

Das ‚NAWAREUM‘ in Straubing

Lebenszyklusbasierte energetische und ökologische Bewertung

Beteiligte

Staatliches Bauamt Passau

Karlsbader Straße 15
94032 Passau

und die

Technischen Universität München
Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen
Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
Iryna Takser, M.Sc.
Arcisstraße 21
80333 München
Februar 2022

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Vorwort	3
Einführung	4
Vorgehensweise	8
Wesentliche Ergebnisse.....	12
Zusammenfassung und Empfehlungen.....	17
Literaturverzeichnis.....	19
Abbildungsverzeichnis	21
Tabellenverzeichnis	22

Vorwort

Die Themen des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit erlangen in unserer Gesellschaft zunehmen an Bedeutung, denn die Belastbarkeitsgrenzen unseres globalen Ökosystems sind bereits heute weit überschritten. Der weiterhin drastisch zunehmende Ressourcenverbrauch, der damit verbundene Schadstoff- und Treibhausgasausstoß sowie der fortschreitende Klimawandel führen auch in Deutschland immer häufiger zu Extremwetterereignissen. Daher erfordert es ein grundlegendes Umdenken in allen Bereichen unserer Gesellschaft. Besonders dem Bauwesen wird dabei eine Schlüsselrolle zugeschrieben. Denn hier werden 35 % der globalen Endenergie verbraucht [1], 40 % der weltweiten Treibhausgasemissionen ausgestoßen [2] und 40% des weltweiten Abfallaufkommens produziert [3]. Der Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Bauen der Technischen Universität München beschäftigt sich vor diesem Hintergrund mit Konzepten zur Umsetzung eines positiven ökologischen Fußabdrucks im Bauwesen. Der umfassende Einsatz regenerativer Energiesysteme und Baustoffe, sowie die Umsetzung geschlossener Kreisläufe sind hierbei wesentliche Lösungsansätze. Die lebenszyklusbasierte Ökobilanzierung dient der Beurteilung alternativer Lösungsansätze zum Erreichen dieser Ziele.

Die hier vorliegende Studie zeigt anhand des Praxisbeispiels NAWAREUM, wie die Auswirkungen des Bauwesens auf die Umwelt durch die Anwendung geeigneter Werkzeuge – wie der Ökobilanzierung – reduziert werden können. Aus den Ergebnissen lassen sich konkrete Handlungsempfehlungen für zukünftige Bauprojekte ableiten sowie Interessierte für die Themen des nachhaltigen Bauens sensibilisieren.

Einführung

Projektbeschreibung

Im Rahmen der Realisierung des NAWAREUMs war die Betrachtung der lebenszyklusbasierten ökologischen und energetischen Performance des Museums erwünscht. Dazu wurde in einem ersten Schritt der Neubau, bzw. der aktuelle Planungsstand als Basisvariante lebenszyklusbasiert mithilfe einer Ökobilanz analysiert und bewertet. Hierzu wurde zunächst eine Gesamtbilanz der geplanten Bauteile bzw. Baustoffe und ausgewählter Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) aufgestellt. In einem nächsten Schritt wurden daraus die Energieflüsse und ökologischen Umweltwirkungen des Gebäudes errechnet. Die durch die Ökobilanz erarbeiteten Ergebnisse können für Optimierungs- und Kommunikationszwecke herangezogen werden.

Um den Lebenszyklusansatz zu vervollständigen wurde durch thermische Gebäudesimulationen der jährliche Energiebedarf unter Berücksichtigung des Energieversorgungskonzepts ermittelt. Hierzu wurden zonale thermische Simulationen für repräsentative Zonen durchgeführt. Ein großer Vorteil der thermischen Gebäudesimulationen liegt darin, dass das dynamische Verhalten von Gebäuden realitätsnah ermittelt und dargestellt werden kann. Ziel der thermischen Gebäudesimulationen war es, den Einfluss des Energieversorgungssystems auf den jährlichen Gesamtenergiebedarf darzustellen und diesen darauf aufbauend ökologisch zu bewerten.

In einem Folgeschritt wurde das Außenanlagenkonzept überschlägig hinsichtlich seiner Kompensationsfähigkeit (Speicherung von Kohlenstoff) beurteilt und mit den Ergebnissen aus der gebäudebezogenen Ökobilanzierung abgeglichen. Somit konnte der positive Effekt des Außenraums auf die Bilanz dargestellt werden.

Grundlagen der Lebenszyklusanalyse

Eine ökologische Lebenszyklusanalyse (LCA - Life Cycle Assessment) oder „Ökobilanz erfasst den Stoff- und Energieverbrauch sowie die Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produkts bzw. eines Gebäudes“ [4]. Somit dienen Ökobilanzierungen als Möglichkeit, die Auswirkungen eines Gebäudes und seiner Elemente auf die Umwelt, unabhängig vom Standort, zu bestimmen. Dadurch können Gebäude, durch entsprechende Anpassungen während der Planung, nachhaltiger gestaltet werden. [4] [5]

Eine Ökobilanz besteht, wie in Abbildung 1 dargestellt, aus vier Teilen. Zu Beginn erfolgt die Festlegung des Ziels sowie des Untersuchungsrahmens. Anschließend folgt eine Sachbilanz. Hierbei werden die anfallenden Stoff- und Energieströme analysiert. Diese Daten werden im dritten Schritt genutzt, um die Umweltauswirkung des Gebäudes zu ermitteln (Wirkungsabschätzung). Abschließend werden die Resultate der Analyse in Bezug auf das Ziel bewertet und interpretiert. [5] [6]

Zu Beginn der Ökobilanzierung ist es wichtig das Ziel der LCA sowie die Grenzen des betrachteten Objektes festzulegen. „Dazu gehört beispielsweise die Definition der Systemgrenzen, der Funktion des Systems und der Anforderungen an die Datenqualität“ [6]. Somit wird im ersten Schritt zum Beispiel festgelegt welche Lebensphasen des Gebäudes berücksichtigt werden. Zudem ist es wichtig die funktionelle Einheit zu definieren, wobei es „die produktspezifische [Größe ist] [...] auf welche nachher die Umweltwirkungen bezogen werden. Beispiele sind 1 kg Brot, 1 kWh elektrische Energie, 1 ha Landwirtschaftsland etc.“ [7]. [5] [6]

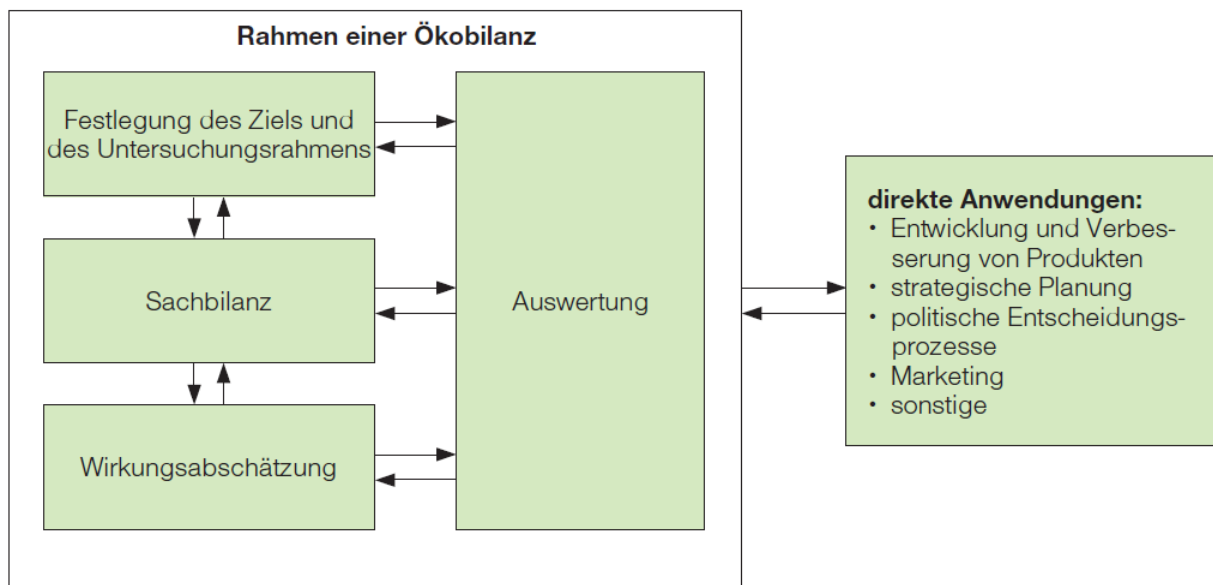


Abbildung 1: Phasen einer Ökobilanz [5]

In der Sachbilanz werden sämtliche ein- (Ressourcen, Materialien) sowie ausgehenden (Abfälle, Emissionen) Energie- bzw. Stoffströme, unter Berücksichtigung der Systemgrenzen und der funktionellen Einheit, erfasst. Beispiele werden in der folgenden Grafik (Abbildung 2) in den grünen

Pfeilen aufgelistet. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden durch Indikatoren dargestellt, die keine direkte Umweltwirkung aufweisen. Dazu gehören zum Beispiel der Primärenergieverbrauch aus nicht erneuerbaren Ressourcen (PENRT - Primary Energy Non Renewable Total) oder der Primärenergieverbrauch aus erneuerbaren Ressourcen (PERT - Primary Energy Renewable Total). PENRT ist die Summe von nicht erneuerbaren Ressourcen wie zum Beispiel Erdöl, Braunkohle, Steinkohle und Erdgas, die stofflich oder in Form von Energie für das Gebäude oder dessen Materialien genutzt werden. PERT ist hingegen die Summe der genutzten erneuerbaren Energie wie zum Beispiel Wind- und Wasserkraft und vollständig unabhängig von PENRT. Der Unterschied ist somit, dass bei PENRT die nicht erneuerbaren und bei PERT die erneuerbaren Energiequellen betrachtet werden. [5] [6] [7]

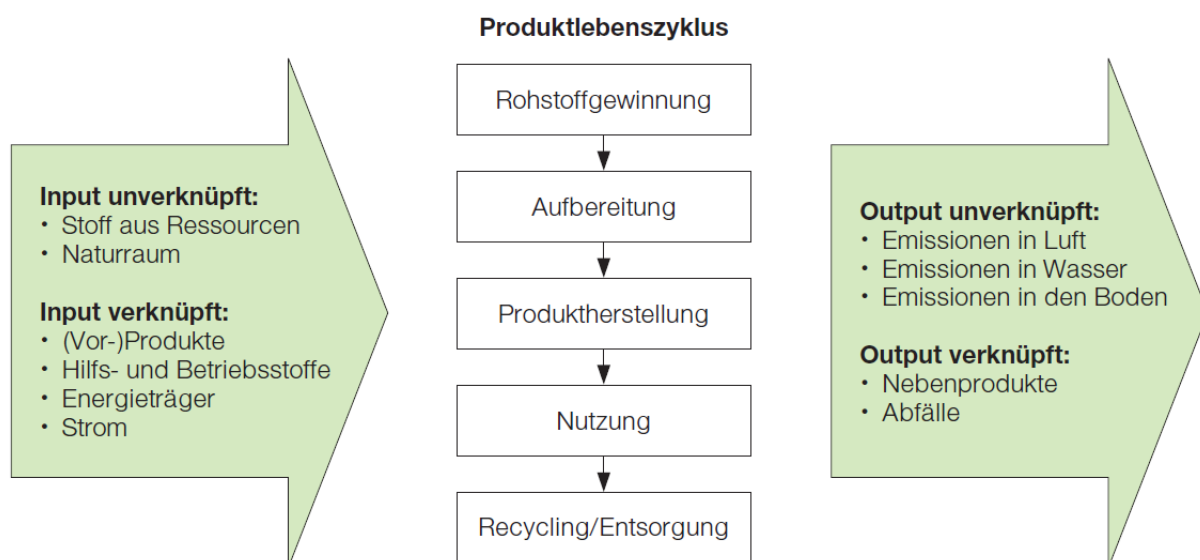


Abbildung 2: Input- und Output-Ströme entlang eines Produktlebenszyklus [5]

Im dritten Schritt der Lebenszyklusanalyse werden die umweltschädlichen Wirkungen der in der Sachbilanz erfassten Ressourcen und Materialien kalkuliert. Hierbei können unterschiedliche Umweltwirkungen betrachtet werden, wie z.B. das Treibhauspotential (GWP - Global Warming Potential), das Versauerungspotenzial (AP - Acidification Potential) oder das Ozonabbaupotenzial (EP - Eutrophication Potential). Das Treibhauspotential berücksichtigt alle erzeugten Emissionen die durch die betrachteten Energie- und Stoffströme entstehen. Das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) ist einer der maßgebenden Stoffe, die zum Klimawandel beitragen. Jedoch tragen „[n]eben [CO₂] [..] eine Reihe weiterer Gase wie Methan oder Lachgas zum Treibhauseffekt bei. [...] Um [jedoch] die Wirkung der unterschiedlichen Gase vergleichbar zu machen, werden Kohlendioxid-Äquivalente berechnet. Sie beschreiben, wie viel eine genau definierte Masse eines Treibhausgases über einen festgelegten Zeitraum im Vergleich zu Kohlendioxid zum Treibhauseffekt beiträgt“ [8]. Dadurch ist ein einheitlicher Vergleich sämtlicher verursachter Treibhausgase möglich. [5] [9]

„Bei der Auswertung einer Ökobilanz werden laut ISO 14 040 die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung beurteilt, um Schlussfolgerungen abzuleiten und Empfehlungen zu

geben“ [2]. Dabei werden die Sachbilanz und Wirkungsabschätzung erneut betrachtet und entscheidende Parameter identifiziert. Diese Parameter werden anschließend auf deren Vollständigkeit und Qualität überprüft. Abschließend wird eine Schlussfolgerung formuliert, die Empfehlungen sowie Anwendungsgrenzen beinhaltet. [5] [6]

Eine Ökobilanzierung wird, wie bei der Definition der Systemgrenzen bereits erwähnt, über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet. Der Lebenszyklus besteht aus der Rohstoffgewinnung, der Herstellung, dem Bau, der Nutzung, einer eventuellen Umnutzung, dem Abriss und der Entsorgung bzw. dem Recycling. Als Grundlage für die Lebenszyklusanalyse dient der Lebenszyklus der DIN EN 15978 (Abbildung 3). Hierbei werden die Phasen Herstellung, Errichtung, Nutzung, Entsorgung und ergänzend Recycling genauer definiert und in weitere Untergruppen eingeteilt. Dies ermöglicht eine genauere Abgrenzung bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens. [5] [10]

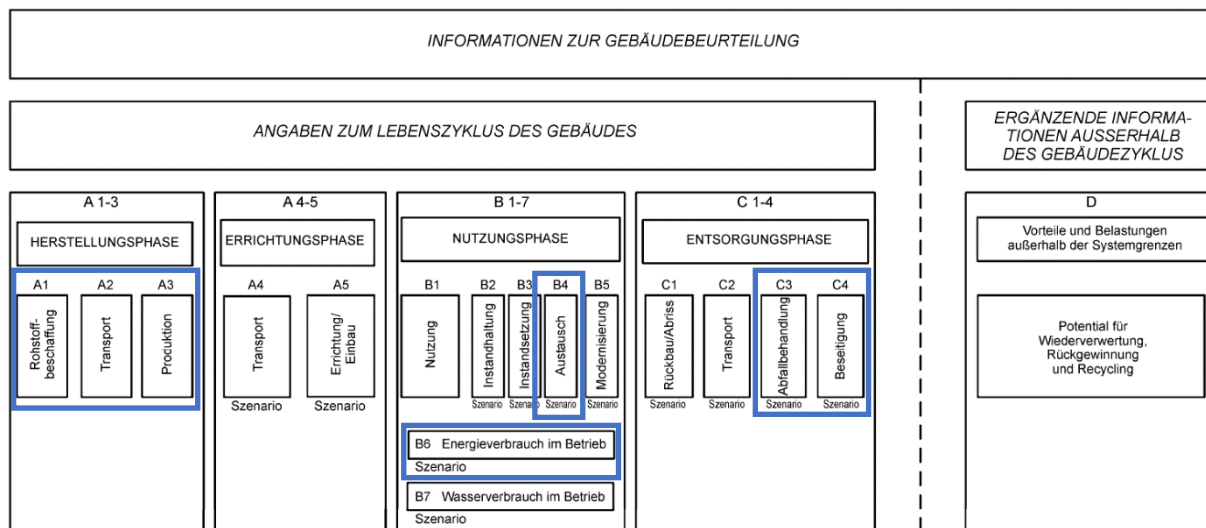


Abbildung 3: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes [11] ¹

¹Die im Rahmen dieser Studie betrachteten Lebenszyklusphasen sind in blau gekennzeichnet.

Vorgehensweise

Die Bearbeitung des Projektes konnte in drei Schritte unterteilt werden:

1. Ökobilanzierung des Museum-Neubaus
2. Thermische Simulation ausgewählter Gebäudezonen
3. Kompensationsfähigkeit des Außenraumkonzepts

Als Grundlage für die unterschiedlichen Themenbereiche wurden die ausgearbeiteten architektonischen Pläne, die Bauteilaufbauten, detaillierte Leistungsverzeichnisse, der Wärmeschutznachweis und die Pläne des Außenraumkonzepts verwendet. Diese Unterlagen lieferten Informationen über die Art der verbauten Materialien sowie der Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) im Gebäude. Zudem konnten aus den Übersichten zum Außenraum die hier verbauten Stoffe sowie die Bepflanzung ermittelt werden. Offene Fragen zu Gebäude- oder Außenraumkomponenten wurden mit den beteiligten Akteuren (dem Bauherrn - Staatliches Bauamt Passau - und dem Nutzer – Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe -) abgestimmt.

Die Ökobilanzierung wurde nach DIN EN 15804 durchgeführt [12]. Diese diente der Analyse und der Bewertung der lebenszyklusbasierten energetischen und emissionsbezogenen Performance des Gebäudes. Zunächst wurde hierfür der projektbezogene Rahmen definiert. Dieser ist dem Abschnitt *Untersuchungsrahmen* zu entnehmen.

In einem weiteren Schritt wurde die Sachbilanz der Gebäudekonstruktion sowie der Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung ermittelt. Hierzu wurden die Massen- sowie Volumenbilanzen der verschiedenen Baustoffe anhand von Leistungsverzeichnissen und architektonischen Plänen händisch berechnet. Die Sachbilanz dokumentierte ebenfalls die im Gebäude eingesetzten Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung. Die Aufnahme der Informationen erfolgte nicht nur auf der quantitativen, sondern auch auf der qualitativen Ebene. Dies bedeutet, dass zusätzlich zu den Mengen auch die Art der einzelnen Gebäudebestandteile festgehalten wurde. Die Zusammenstellung der Massen und der Volumina fand in einer Excel-Tabelle statt, was eine hohe Transparenz zum Vorteil hat. Zudem fand dabei eine Einordnung der jeweiligen Bauteile und Baustoffe zu den entsprechenden Baukostengruppen statt.

Weiter wurde die Abschätzung der Umweltwirkungen des Neubaus durchgeführt. Für die Berechnungen wurden die Kennwerte der jeweiligen Wirkungen aus der Datenbank *Ökobaudat* herangezogen. Die Berechnungen erfolgten mit der zum Zeitpunkt der Durchführung der Studie aktuellen Version (*Ökobaudat 2021-I*) [13]. Die Umweltwirkungen einer jeden untersuchten Komponente wurden abgeschätzt, indem die ermittelten Mengen (Anzahl, Masse, Fläche oder Volumen) mit den Kennwerten der *Ökobaudat* verrechnet wurden. Die Umweltwirkungen der Phase B4 (Austausch) wurden anhand der Nutzungsdauern von Bauteilen ermittelt. Mit der Angabe zur

Lebensdauer des NAWAREUM (s. Abschnitt *Untersuchungsrahmen*) konnte die Anzahl der Austauschzyklen der jeweiligen Bauteilschichten abgeleitet und die Bauteile ökobilanziert werden. Schließlich lieferte das Aufsummieren aller Teilergebnisse die Gesamtwirkungen des Gebäudes. Diese beschreiben die grauen Emissionen sowie die graue Energie der im NAWAREUM verbauten Elemente (vgl. Abschnitt *Wesentliche Ergebnisse*).

Zur Vervollständigung der gesamten Lebenszyklusbetrachtung des Museums, wurde im zweiten Projektschritt eine thermische Gebäudesimulation durchgeführt. Diese diente der Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs des Gebäudes in der Nutzungsphase (B6) unter Berücksichtigung der dynamischen meteorologischen Verhältnisse in Straubing. Nach Abstimmung mit den Projektbeteiligten wurden zwei repräsentative Zonen für die dynamischen Berechnungen ausgewählt. Die Ergebnisse wurden dann auf das gesamte Gebäude hochgerechnet. Den Simulationen lagen die in den Unterlagen vorgegebenen (bzw. mit den Akteuren abgestimmte) Nutzungen, Baukonstruktionen und die zu untersuchenden Energieversorgungsvarianten zugrunde. Die Ergebnisse des Energiebedarfs wurden nach den Verbrauchern *Heizung, Lüftung, Kühlung* und *Beleuchtung* differenziert. Um Optimierungsmaßnahmen aufzuzeigen, wurden zwei weitere Varianten simuliert. Dabei wurden die zu erwartenden Raumtemperaturen ermittelt und insbesondere für den Sommerfall spezifisch bewertet (vgl. Abschnitt *Wesentliche Ergebnisse*).

Die Ergebnisse aus Teil 1 (Ökobilanzierung der grauen Energie) und aus Teil 2 (Energiebedarf der Nutzungsphase) stellen somit die ganzheitliche Bilanzierung des Museums dar. Durch den Bezug der Ergebnisse auf die Nettogrundfläche des Gebäudes wurde es möglich, dieses mit anderen Gebäuden zu vergleichen (vgl. Abschnitt *Wesentliche Ergebnisse*).

Abschließend wurde eine überschlägige Berechnung der Kompensationsfähigkeit des Außenraumkonzepts hinsichtlich seiner Kohlenstoffspeicherung durchgeführt. Hierbei wurde betrachtet, welche Art von Biomasse bzw. Bepflanzung auf dem Grundstück in welchem Umfang eingepflanzt wurde. Die Speicherfähigkeit dieser Bepflanzung errechnete sich mit den Angaben zur Art der verwendeten Pflanzen sowie zu deren erwarteter Lebensdauer. Gleichzeitig wurden die im Außenraum verbauten Materialien hinsichtlich ihrer grauen Emissionen ökobilanziert. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse lieferte die Netto-Speicherfähigkeit des Außenraums. Schließlich lieferte der Vergleich der Netto-Speicherfähigkeit des Außenraums mit den lebenszyklusbasierten Emissionen des Museum-Neubaus die Kompensationsfähigkeit der Bepflanzung im Außenraum des NAWAREUMs.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel der Lebenszyklusanalyse bestand in der Bewertung der ökologischen und energetischen Performance des NAWAREUM-Neubaus. Zudem sollte ermittelt werden, in wie weit die Grünanlagen des Außenraums die lebenszyklusbasierten grauen Emissionen des Museum-Neubaus kompensieren können. Die Ergebnisse sollen einerseits nach Außen kommuniziert werden und andererseits sollen hierdurch Verbesserungspotenziale für zukünftige Projekte aufgezeigt werden.

Beim „NAWAREUM“ handelt es sich um den Neubau eines Informations- und Beratungszentrums für erneuerbare Energien und Rohstoffe (IBZ). Die hier durchgeführte LCA betrachtet die Baukostengruppen KG 300 (Baukonstruktion, inkl. Gründung; kein Bodenaushub) und KG 400 (technische Gebäudeausrüstung) des öffentlichen Gebäudes.

Der Betrachtungszeitraum der Ökobilanzierung entspricht der erwartenden Nutzungsdauer des Gebäudes. Diese wurde nach Rücksprache mit den Bauherren auf 70 Jahre ausgelegt. Die Angaben zu Nutzungsdauern von Bauteilen wurden den entsprechenden Tabellen des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) entnommen [14].

Die Bäume wurden mit einer Lebensdauer von 70 Jahren (analog zum Gebäudealter) bilanziert. Bei den Sträuchern wurde lediglich die Wachstumsphase betrachtet, da hier keine weiteren Daten vorlagen. Stauden, Bodendecker und Rasen wurden nicht bilanziert, da diese Pflanzen zu kurze Lebensdauern vorweisen.

Um den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes zu untersuchen, wurden folgende Phasen betrachtet (s. farbige Kästen in Abbildung 3):

- Herstellung (A1 – A3)
- Austausch (B4)
- Energieverbrauch im Betrieb (B6)
- Entsorgung (C3 – C4).

Das Potential für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling wurde ebenfalls informativ betrachtet. Nach DIN EN 15804 befindet es sich jedoch außerhalb des Gebäudezyklus.

Im Zuge der dynamischen Simulation zur Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs des Gebäudes wurde der Klimastandort *Straubing* genutzt. Für die Simulation wurden zwei repräsentative Zonen betrachtet: die Dauerausstellung im Erdgeschoss sowie ein drei Personen Büro im ersten Obergeschoss. Aus den Ergebnissen der benötigten Endenergie konnte das Treibhausgaspotential sowie die Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) der Betriebsphase bestimmt werden.

Im Rahmen der Studie wurden die Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP) sowie der erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PERT und PENRT) untersucht. Die Wirkungsabschätzung erfolgte mittels der Kennwerte aus der Ökobaudat. Die Auswertung wurde mit Excel umgesetzt.

Die Ergebnisse wurden mit drei funktionellen Einheiten dargestellt:

1. Gebäude (Ergebnisse bezogen auf das gesamte Gebäude),

2. Nettogrundfläche (Ergebnisse bezogen auf 4322 m² Nettogrundfläche),
3. Bauteilfläche (Ergebnisse bezogen auf die jeweilige Bauteilfläche)

Bei der Bilanzierung wurde das 5 % Abschneidekriterium angewandt. Dies bedeutet, dass nur diejenigen Baustoffe bilanziert wurden, die mehr als 5 % der Masse oder des Volumens oder des Treibhauspotentials (Phasen A1 – A3, C3 – C4) ihrer Kostengruppe aufwiesen.

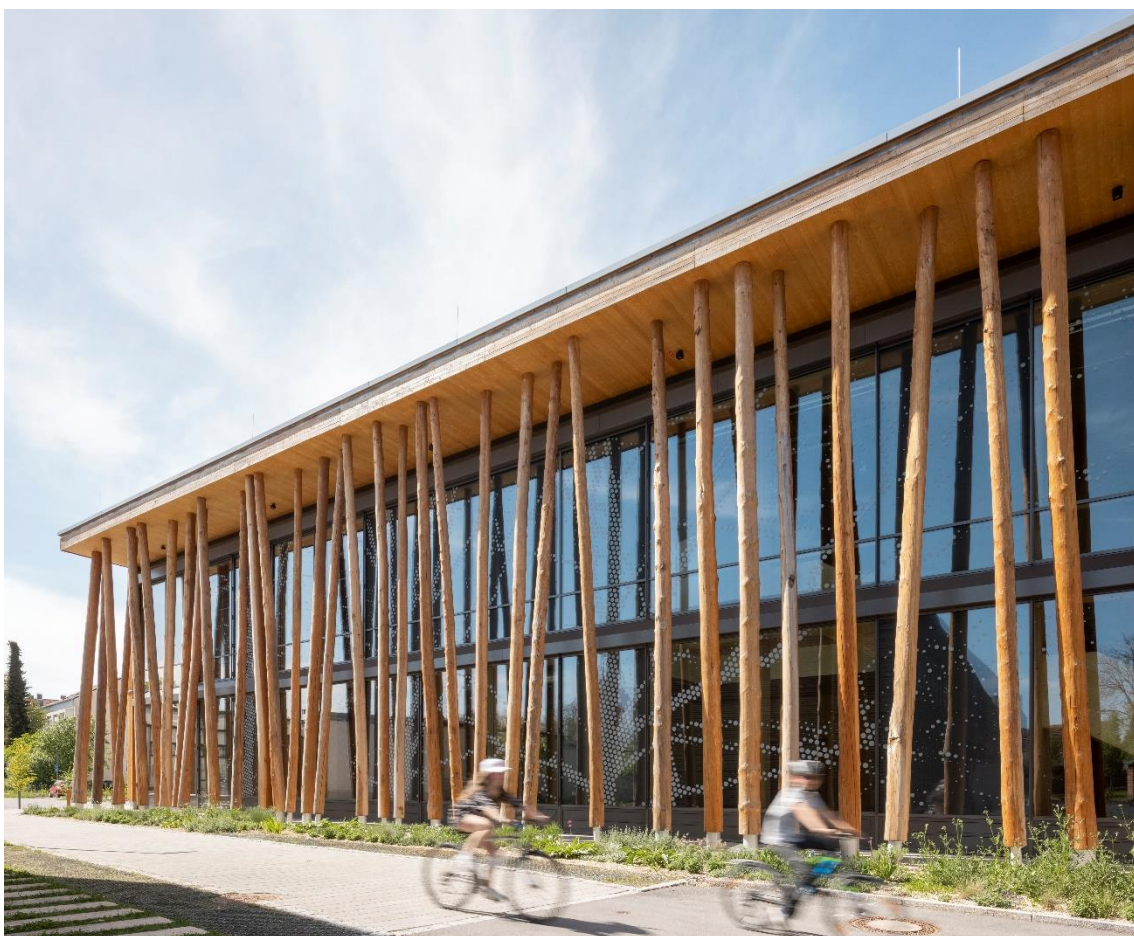


Abbildung 4: NAWAREUM. Fotografie: Herbert Stolz.

Wesentliche Ergebnisse

Die Bilanzierung der im NAWAREUM verbauten Massen lieferte die Ergebnisse, die in Abbildung 5 dargestellt sind. Hieraus wird ersichtlich, dass die Gründung mit etwa 3.900 Tonnen Material den größten Anteil an der gesamten Gebäudemasse einnimmt. Das Sand-Kies-Gemisch sowie der Beton sind die gewichtsintensiven Materialien dieser Kostengruppe. Die XPS-Dämmung (extrudiertes Polystyrol) sowie der Bewehrungsstahl weisen zwar relativ geringe Massen auf, haben jedoch starke Auswirkungen auf das Treibhauspotential (vgl. Abbildung 6). Die zweitgrößten Massenanteile des Gebäudes können bei den Decken festgestellt werden. Dies begründet sich durch den verbauten Beton und Estrich in der Hybridbauweise.

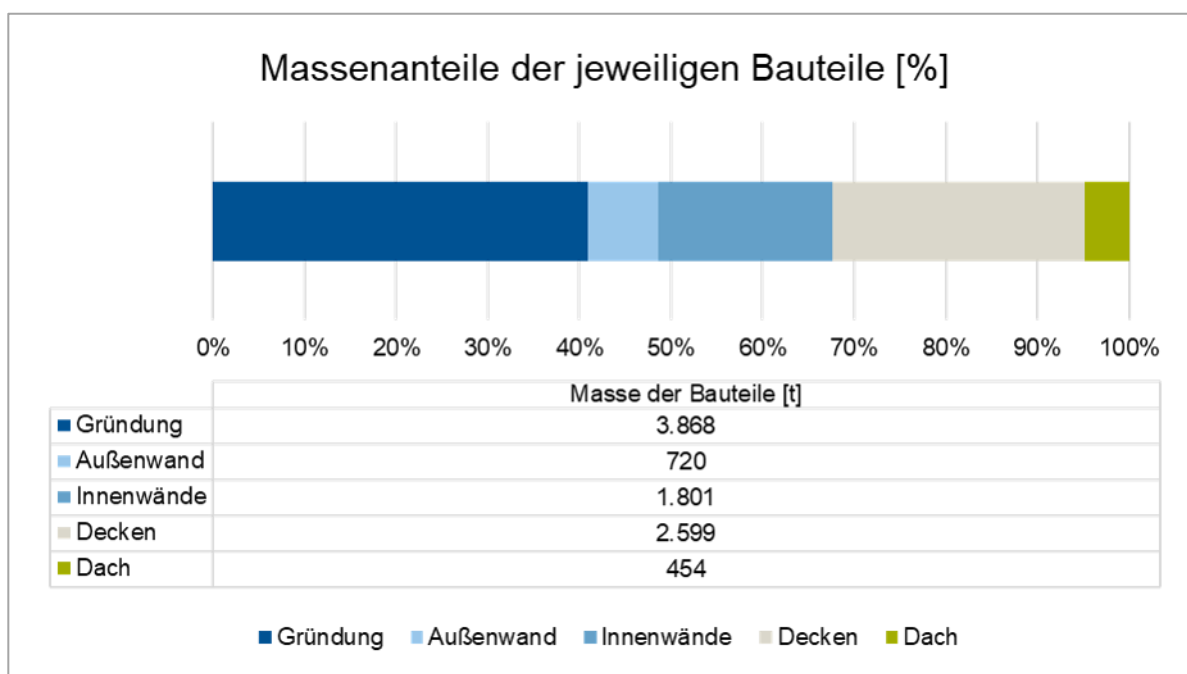


Abbildung 5: Massenverteilung der Bauteile im Gebäude, eigene Berechnungen.

Wird bei den Berechnungen die Bauteilfläche als funktionelle Einheit gewählt, wie in Abbildung 6 dargestellt, können die Bauteile gegenübergestellt und nach ihrem CO₂-Fußabdruck bewertet werden. Besonders auffällig ist hier die Gründung, die ein Treibhauspotential (GWP) von 242 kg CO₂-Äqv./m²_{Bauteilfläche} aufweist. Fast 50 % davon sind auf den Beton zurückzuführen. Trotz ihres geringen Gewichts verursachen der Stahl und die XPS-Dämmung etwa 23 % bzw. 25 % der CO₂-Äquivalente. Das massenreiche Kies-Sand-Gemisch hat einen Anteil von lediglich 5 %.

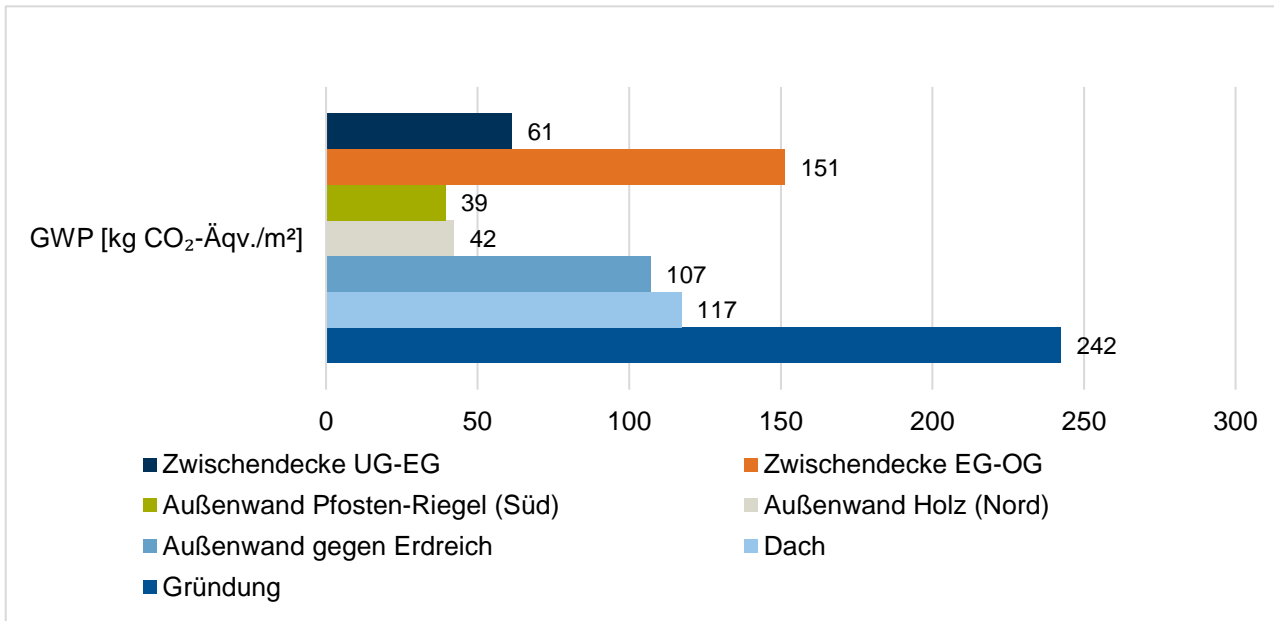


Abbildung 6: Globales Erwärmungspotenzial der Bauteile pro m² Bauteil

Die technische Gebäudeausrüstung (TGA) verursacht über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes graue Emissionen von 674 Tonnen CO₂-Äquivalenten. Die Photovoltaikanlage trägt wesentlich dazu bei (vgl. Abbildung 7). Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Photovoltaikanlagen einen hohen CO₂-Gehalt in der Herstellungsphase aufweisen. Hinzu kommt, dass die Solarmodule im Laufe der Lebensdauer des NAWAREUMs drei Mal ausgetauscht werden müssen. Dem gegenüber steht allerdings die Energieproduktion während der Nutzung des Gebäudes. Allgemein beträgt die energetische Amortisation von Photovoltaikanlagen etwa 4 – 6 Jahre. Insgesamt weist die TGA erhöhte Werte der erzeugten Treibhausgase aus, da es in den erwarteten 70 Lebensjahren des Gebäudes zu einem zwei- bis fünffachem Austausch der Technik kommt.

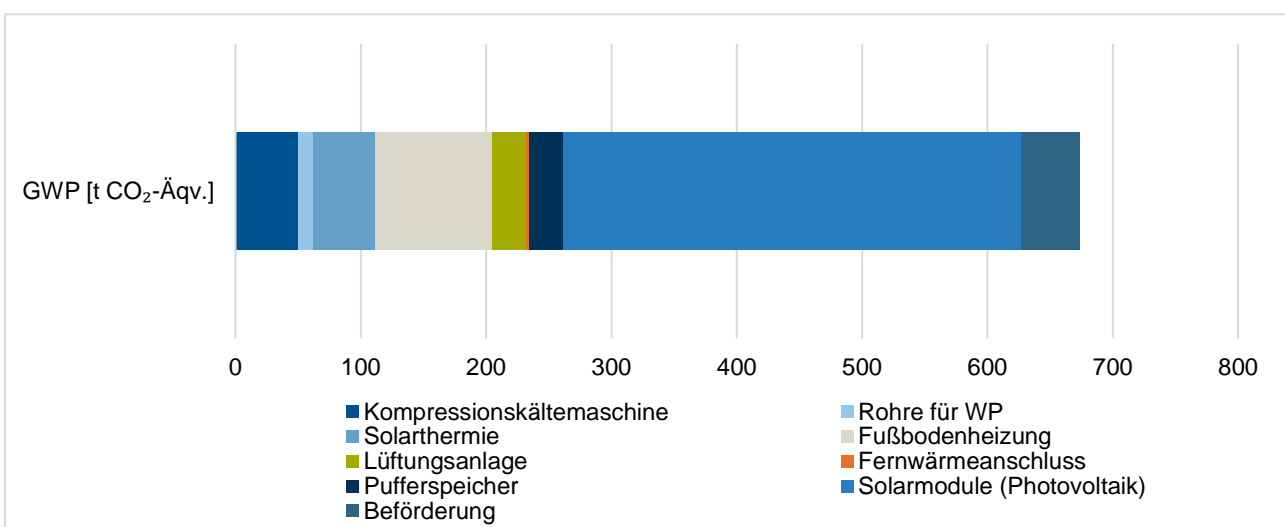


Abbildung 7: Globales Erwärmungspotenzial der TGA; Phasen Herstellung, Austausch, Entsorgung.

Mit der dynamischen Simulation wurde ein spezifischer Endenergiebedarf von $21,40 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Nettogrundfläche}} \cdot \text{a})$ berechnet. Mit den Kennwerten der Ökobaudat [13] und Angaben des Umweltbundesamtes [15] beträgt der Gesamtprimärenergiefaktor 2,377. Damit liegt der spezifische Primärenergiebedarf des Gebäudes bei etwa $51 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Nettogrundfläche}} \cdot \text{a})$. Da das NAWAREUM mit Ökostrom betrieben wird, handelt es sich zu etwa 99 % um erneuerbare Primärenergie. Lediglich $0,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Nettogrundfläche}} \cdot \text{a})$ werden der nicht erneuerbare Primärenergie zugeordnet. Die größten Endenergieverbraucher stellen die Beleuchtung sowie die Lüftungsanlagen mit jeweils etwa $7,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Nettogrundfläche}} \cdot \text{a})$ dar (vgl. Abbildung 8). Insbesondere die Beleuchtung schien hier optimierungsbedürftig zu sein. Daher wurde eine weitere Simulationsvariante mit effizienteren Beleuchtungsmitteln durchgeführt. Damit konnte der Endenergiebedarf der Leuchtmittel auf $2,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Nettogrundfläche}} \cdot \text{a})$ reduziert werden. Zudem wies die Ausgangsvariante mit der Besetzung des Büros mit drei Personen 734 Stunden im Jahr mit einer Innenraumtemperatur von über 26°C auf. Um die Überhitzungsgefahr zu reduzieren, zeigten die Ergebnisse der Simulation bei einer Besetzung des Büros mit zwei Personen eine Minimierung der Übergradstunden auf 524 Stunden auf.

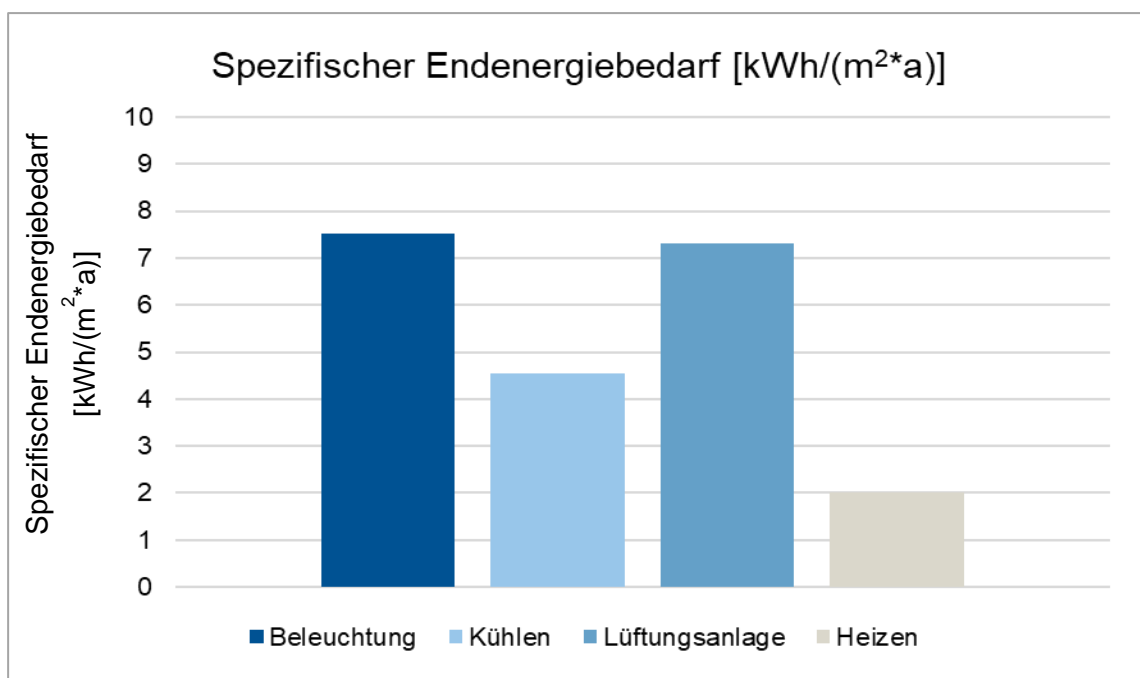


Abbildung 8: Simulationsergebnisse der Betriebsenergie im NAWAREM nach Energieverbraucher.

Die Ergebnisse der Analyse des gesamten Lebenszyklus des NAWAREUM sind in Abbildung 9 dargestellt. Der erneuerbare Primärenergiebedarf (PERT) hat einen Wert von etwa 20 Millionen Kilowattstunden. Ein Anteil von 78 % ist durch die Versorgung mit Ökostrom dem Betrieb des Gebäudes zuzuordnen. Die nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) wurde zu etwa 7 Millionen Tonnen berechnet. Hier ist mit einem Anteil von 97 % die Baukonstruktion und die technische Gebäudeausrüstung ausschlaggebend. Diese Relation überträgt sich auch auf das Globale Erwärmungspotential (GWP). Über den gesamten Nutzungszeitraum stößt das Gebäude etwa 2.000 Tonnen Treibhausgase aus.

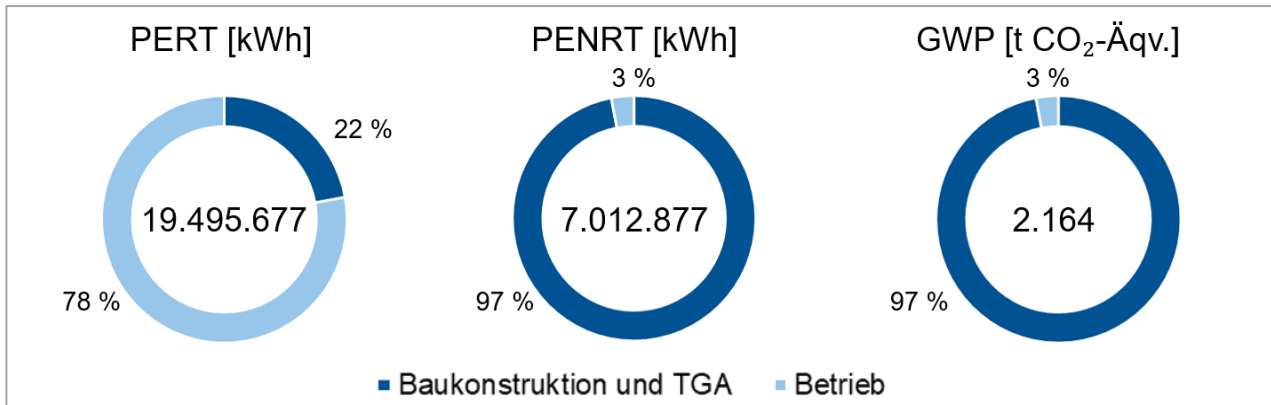


Abbildung 9: Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) und Globales Erwärmungspotenzial der Baukonstruktion, der TGA und der Betriebsenergie; Phasen Herstellung, Austausch, Entsorgung.

Wird als funktionelle Einheit die Nettogrundfläche gewählt, kann das NAWAREUM mit anderen Gebäuden verglichen werden. Abbildung 10 zeigt die Gegenüberstellung des Treibhauspotentials des Museums mit einem konventionellen Verwaltungsgebäude in Stahlbetonbauweise [16]. Bei der Baukonstruktion des NAWAREUMs können deutliche Einsparungen der grauen Emissionen festgestellt werden. Diese sind in etwa halb so groß wie die des Stahlbaus. Die technische Gebäudeausrüstung beider Gebäude ist etwa gleich groß. Im Betrieb zeigt das Museum einen Bruchteil an CO₂-Äquivalenten des konventionellen Gebäudes.

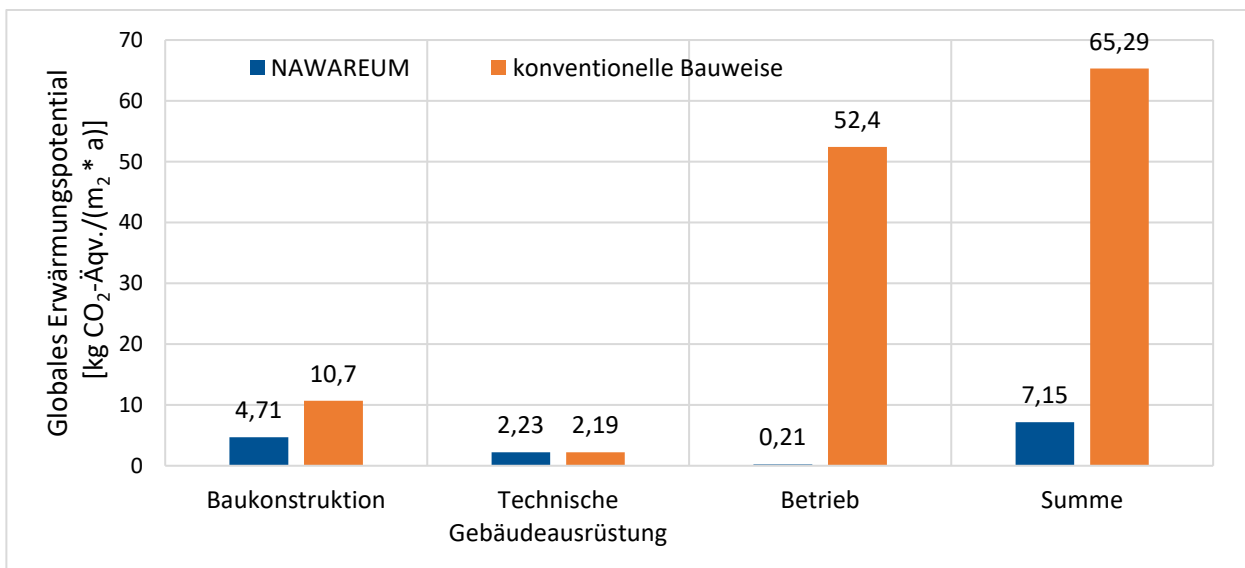


Abbildung 10: Vergleich konventionelles Verwaltungsgebäude und NAWAREUM.

Bei der Berechnung der Kompensationsfähigkeit des Außenraumkonzepts wurde zunächst das Treibhausgaspotential der Außenanlage bestimmt. Der Großteil der hier verbauten Massen ist den Wegen, Plätzen und Einfassungen zuzuordnen. Die verbauten Materialien verursachen graue Emissionen von etwa 56 Tonnen CO₂-Äquivalente (vgl. Abbildung 11). Parallel dazu wurde

überschlägig die Speicherkapazität der Grünflächen ermittelt. Dabei wurden insgesamt 20 Bäume verschiedener Arten und 287 m² an eingepflanzten Sträuchern nach [17] und [18] bilanziert. Gemeinsam haben die Pflanzen eine CO₂-Speicherkapazität von etwa 167 Tonnen CO₂. Die Bäume weisen mit 59 % eine höhere Speicherkapazität des Gases als die Sträucher auf. Die Netto-Kompensationsfähigkeit des Außenraumkonzepts beträgt etwa 111 Tonnen Kohlenstoffdioxid. Damit kann die Außenraumbegrünung 5 % der emittierten CO₂-Äquivalente durch die Herstellung, den Austausch, den Betrieb und die Entsorgung des NAWAREUMs kompensieren.

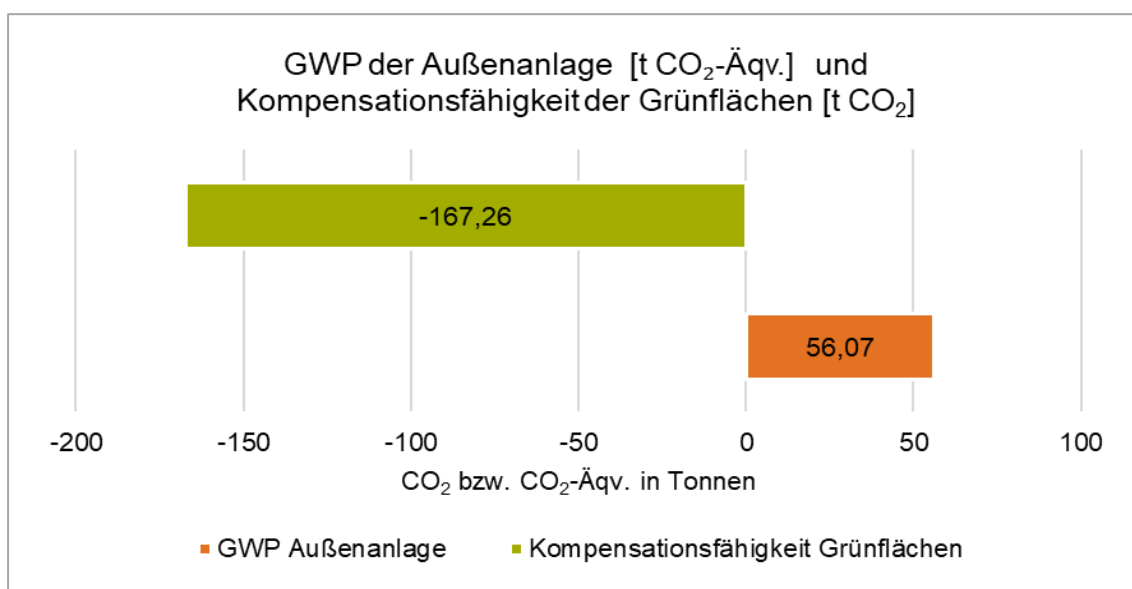


Abbildung 11: Speicherkapazität des Außenraums

Um die restlichen 95 % der klimaschädlichen Gase zu kompensieren, wären bei der Annahme einer Kompensationsfähigkeit von 5,8 Tonnen CO₂/Baum 374 Bäume notwendig.



Abbildung 12: Benötigte Anzahl der Bäume zur vollständigen Kompensation der Treibhausgase des NAWAREUMs.

Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Ergebnisse der im Rahmen des Projekts durchgeführten lebenszyklusbasierten Ökobilanzierung des NAWAREUMs sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der spezifische Primärenergiebedarf beträgt ca. 88 kWh/(m²*a). Etwa 73 % entfallen auf die erneuerbare Primärenergie. Das Globale Erwärmungspotential für den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes liegt bei etwa 2.000 Tonnen CO₂-Äquivalente. Der Wert wird zu 97 % durch die grauen Emissionen der Baukonstruktion und der technischen Gebäudeausrüstung hervorgerufen. Bei der Baukonstruktion lässt insbesondere die Gründung durch ihren hohen Stahlbetongehalt den Wert steigen. Auf der Seite der technischen Gebäudeausrüstung trägt größtenteils die Photovoltaik zu den klimaschädlichen Gasen bei. Die thermodynamische Simulation zweier ausgewählter Zonen des Gebäudes identifizierte die Beleuchtung als einen ungewöhnlich hohen Energieverbraucher. Durch den Einsatz von effizienteren Leuchtmitteln konnte der Energiebedarf der Beleuchtung halbiert werden. Die Untersuchung des Außenraumkonzepts zeigte eine Kompensationsmöglichkeit von etwa 5 % der vom NAWAREUM hervorgerufenen klimaschädlichen Gase. Zur vollständigen Kompensation wären etwa 374 Bäume notwendig. Der Begriff der Kompensation in diesem Zusammenhang als kritisch einzuordnen, da die Bäume nach deren Lebensende ggf. energetisch verwertet werden. Dies führt zur Freisetzung der darin gebundenen CO₂ Emissionen und somit zu einer Aufhebung der erzielten Kompensation. Dem könnte durch die Nutzung der Bäume als Bauholz oder eine laufende Wiederaufforstung der Freiflächen entgegengetreten werden.

Im Vergleich zu einem konventionellen Gebäude zeigte das NAWAREUM zwar Ähnlichkeit im Hinblick auf das Globale Erwärmungspotential der technischen Gebäudeausrüstung. Die Baukonstruktion sowie der Betrieb des Gebäudes zeigten allerdings deutlich bessere Werte.

Tabelle 1: Ergebnisse der lebenszyklusbasierten Ökobilanzierung des NAWAREUMs und das Globale Erwärmungspotenzial des konventionellen Vergleichsgebäudes.

	Gebäude	Erneuerbare Primärenergie (PERT)	Nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)
Spezifisch (pro Quadratmeter Nettogrundfläche und pro Jahr)	NAWAREUM	64,44 kWh/(m ² *a)	23,18 kWh/(m ² *a)	7,15 kg CO ₂ -Äqv./(m ² *a)
	Konventionelle Bauweise	39,91 kWh/(m ² *a)	257,03 kWh/(m ² *a)	65,29 kg CO ₂ -Äqv./(m ² *a)
Total	NAWAREUM	19.495.677 kWh	7.012.877 kWh	2.164 t CO ₂ -Äqv.
	Konventionelle Bauweise ²	6.063.649 kWh	39.055.370 kWh	9.921 t CO ₂ -Äqv

² Bezogen auf eine Nutzungsdauer des Vergleichsgebäudes von 50 Jahren und seine Nettogrundfläche von 3.039 m².

Aus den Ergebnissen lassen sich Empfehlungen sowohl für zukünftige Bauprojekte als auch für das NAWAREUM konkret ableiten:

- Die Lebenszyklusanalyse muss parallel zum Planungsprozess durchgeführt werden. Dabei sollten verschiedene Varianten betrachtet werden, um das Optimum aus Baukonstruktion und technischer Gebäudeausrüstung zu ermitteln. Nur so kann rechtzeitig in die Umsetzung eines Bauprojekts eingegriffen werden.
- Bei der Planung ist darauf zu achten, dass das Gebäude möglichst wenige klimaschädliche Gase verursacht, z.B. durch den Einsatz von Sekundärbauteilen und Sekundärbaustoffen.
- Um ein späteres Wirtschaften mit geplanten Sekundärbauteilen und Sekundärbaustoffen zu ermöglichen, sollte auf lösbare Verbindungen und die Rückbaufähigkeit des Gebäudes geachtet werden. Dies ermöglicht eine einfachere Trennbarkeit der Materialien, was die Kreislaufwirtschaft unterstützt.
- Wenn möglich, sollte auf eine Unterkellerung verzichtet werden. Damit können der Stahlbetonanteil und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen deutlich verringert werden.
- Falls Beton eingesetzt wird, bieten alternative Zuschlagstoffe und Recyclingbeton aus der Region Vorteile. Damit können Ressourcen geschont und CO₂ eingespart werden.
- Es sollten Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt werden.
- Der Austausch von technischer Gebäudeausrüstung sollte nur erfolgen, wenn es technisch notwendig ist und somit die Anzahl der Austauschzyklen verringern. Bei Beleuchtungsmitteln sollte auf eine hohe Lichtausbeute geachtet werden.
- Bei Überhitzungsgefahr können die Räume mit einer geringeren Anzahl an Personen besetzt werden. Alternativ ist ein Einbau von Ventilatoren als einfaches Mittel geeignet.

Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency, [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/buildings>. [Zugriff am 4. August 2020].
- [2] I. E. Agency, „World Energy Outlook 2009,“ Paris.
- [3] United Nations, „<http://www.unep.org>,“ [Online]. Available: http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/9.0_Buildings.pdf. [Zugriff am 9. Juni 2014].
- [4] S. Pfoh, P. Scheider und F. Grimm, „Leitfaden 01 - Ökologische Kenndaten: Baustoffe und Bauteile,“ Projektplattform Energie, o.J..
- [5] H. König, N. Kohler, J. Kreissig und T. Lüzkendorf, Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge, München: DETAIL Business Information GmbH, 2009.
- [6] Fraunhofer Institut für Bauphysik, „Ökobilanzierung: Eine Methodik für den gesamten Lebensweg,“ Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, o.J.. [Online]. Available: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html>. [Zugriff am 26 Januar 2022].
- [7] Bundesamt für Umwelt, „4 Phasen einer Ökobilanz,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, o.J.. [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaftskonsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/4-phasen-einer-oekobilanz.html>. [Zugriff am 26 Januar 2022].
- [8] K. Kumpfmüller, „Wer wie viel CO2 ausstößt,“ 12 Juli 2019. [Online]. Available: <https://www.tagesschau.de/faktenfinder/co2-emissionen-103.html>. [Zugriff am 26 Januar 2022].
- [9] R. Frischknecht, Lehrbuch der Ökobilanzierung, Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2020.
- [10] f. B. u. H. Bundesministerium des Innern, „Instrumente und Kompetenzen,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.nachhaltigesbauen.de/hintergrund/instrumente-und-kompetenzen/>. [Zugriff am 26 Januar 2022].
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode: Deutsche Fassung EN 15978:2011*, Berlin, 2011.
- [12] „DIN EN 15804:2020-03, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019,“ Beuth Verlag, Berlin, 2020.
- [13] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, „<https://www.oekobaudat.de/>,“ [Online]. Available: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [14] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB),“ Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin, 2017.
- [15] Umweltbundesamt, „<https://www.umweltbundesamt.de/>,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>. [Zugriff am 9. August 2021].
- [16] C. Dotzler, C. Röger, P. Schneider-Marin und W. Lang, „Design2Eco | Schlussbericht - Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden –

Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen,
Technische Universität München, München, 2018.

- [17] L. J. Whittinghill, D. Bradley Rowe, R. Schutzki und B. M. Cregg, „Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems,“ *Landscape and Urban Planning*, 2014.
- [18] Climate Change Resource Center, „<https://www.fs.usda.gov/>,“ [Online]. Available: <https://www.fs.usda.gov/ccrc/tool/cufr-tree-carbon-calculator-ctcc>. [Zugriff am 9. August 2021].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen einer Ökobilanz [5]	5
Abbildung 2: Input- und Output-Ströme entlang eines Produktlebenszyklus [5].....	6
Abbildung 3: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes [11]	7
Abbildung 4: NAWAREUM. Fotografie: Herbert Stolz.	11
Abbildung 5: Massenverteilung der Bauteile im Gebäude, eigene Berechnungen.....	12
Abbildung 6: Globales Erwärmungspotenzial der Bauteile pro m ² Bauteil	13
Abbildung 7: Globales Erwärmungspotenzial der TGA; Phasen Herstellung, Austausch, Entsorgung.....	13
Abbildung 8: Simulationsergebnisse der Betriebsenergie im NAWAREM nach Energieverbraucher.....	14
Abbildung 9: Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) und Globales Erwärmungspotenzial der Baukonstruktion, der TGA und der Betriebsenergie; Phasen Herstellung, Austausch, Entsorgung.	15
Abbildung 10: Vergleich konventionelles Verwaltungsgebäude und NAWAREUM.	15
Abbildung 11: Speicherfähigkeit des Außenraums	16
Abbildung 12: Benötigte Anzahl der Bäume zur vollständigen Kompensation der Treibhausgase des NAWAREUMs.....	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der lebenszyklusbasierten Ökobilanzierung des NAWAREUMs..... 17