

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

AS-BAU HOF GMBH

Eco+Office – Plusenergie und CO₂-Neutralität

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.

AS-BAU

HOF GMBH

INHALT

VORWORT	5
ZUSAMMENFASSUNG	6
Abkürzungsverzeichnis.....	6
EINFÜHRUNG	7
PROJEKT UND GEBÄUDEVORSTELLUNG	8
2.1. Projektidee.....	9
2.2. Verwendete Methoden.....	10
2.2.1. Lebenszyklusanalyse.....	11
2.2.2. Lebenszykluskosten.....	12
2.2.3. Thermische Gebäudesimulation.....	13
2.3. Datengrundlagen des Forschungsvorhabens.....	14
3.1. Lebenszyklusanalyse.....	15
3.1.1. LCA des Bestandsgebäudes.....	15
3.1.2. Ökologische Optimierungspotentiale auf Bauteilebene.....	17
3.1.3. LCA Vergleich Ersatzneubau zu Sanierung.....	21
3.1.4. Kompensation des lebenszyklusbasierten GWP und PENRT.....	28
3.2. Lebenszykluskosten.....	30
3.2.1. LCC der Wärmeerzeugungsvarianten.....	30
3.2.2. LCC der Baukonstruktion - Ausführungsvariante.....	32
3.3. Szenarien Ausführungsvariante.....	33
EINFLUSS DER BAUKONSTRUKTION AUF DAS LASTMANAGEMENT	36
4.1. Grundlagen der thermischen Gebäudesimulationen.....	36
4.1.1. Untersuchte Zonen.....	36
4.1.2. Technische Gebäudeausrüstung.....	37
4.1.3. Untersuchte Kenngrößen.....	37
4.2. Voruntersuchungen.....	37
4.3. Einfluss auf den jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf.....	39
WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNG DES PLANUNGSPROZESSES	44
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	45
LITERATURVERZEICHNIS	46
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	48
TABELLENVERZEICHNIS	51
ANHANG	52

VORWORT

Der Bedarf an Wohn- und Arbeitsraum ist insbesondere in den bayerischen Städten und Metropolregionen stark wachsend. Zusammen mit dem steigenden Bewusstsein für eine nachhaltige gesellschaftspolitische Entwicklung ergeben sich für ein nachhaltiges Baugewerbe neue und spannende Herausforderungen. Um diese Herausforderungen zu meistern, bedarf es einer interdisziplinären und eng verzahnten Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Baupraxis. Aktuell werden in der Planung von Sanierungs- und Neubauvorhaben bereits wissenschaftlich fundierte, innovative Methoden diskutiert und angewendet. Zentrales Element der zukünftigen Entwicklung von Bauprojekten muss der lebenszyklusbasierte Bewertungsansatz sein. Er beinhaltet sowohl die Untersuchung der Lebenszykluskosten, als auch die ökologische und energetische Lebenszyklusanalyse der Gebäude.

Durch die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft und Baugewerbe werden praxistaugliche und umsetzbare Strategien für die Realisierung der nachhaltigen Entwicklung erarbeitet und deren Anwendung an konkreten Fallbeispielen präsentiert. Bauherren, Städte und Kommunen werden für den Umgang mit dem Themenkomplex der nachhaltigen Entwicklung sensibilisiert und erhalten zudem konkrete Handlungsempfehlungen zu dessen Umsetzung.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts erarbeitete die Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München, der AS-Bau Hof GmbH und dem Bayerischen Bauindustrieverband, ein Konzept zur Realisierung eines lebenszyklusbasierten treibhausgas-neutralen Plusenergiegebäudes. Als konkretes Forschungsobjekt, für das bereits im Jahr 2016 mit ersten Vorüberlegungen begonnene Forschungsprojekt, dient das sich aktuell im Bau befindende Büro- und Verwaltungsgebäude der AS-Bau Hof GmbH (Fertigstellung des Gebäudes im Jahr 2020).

ZUSAMMENFASSUNG

Das Forschungsprojekt „Eco+Office AS-Bau“ hat es zum Ziel ein **lebenszyklusbasiertes treibhausgas-neutrales Plusenergiegebäude**, am Fallbeispiel des Büro- und Verwaltungsgebäudes der AS-Bau Hof GmbH, zu planen und realisieren. In Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München, der AS-Bau Hof GmbH und dem Bayerischen Bauindustrieverband werden wissenschaftliche, innovative Methoden erarbeitet und in der Praxis angewandt. Dabei werden die Themenschwerpunkte der ökologischen und ökonomischen Lebenszyklusanalyse sowie der Einfluss der Baukonstruktion auf das Lastmanagement des Gebäudes untersucht. In allen drei Themenschwerpunkten werden sowohl verschiedene Ausführungsvarianten der baukonstruktiven Elemente als auch der Elemente der technischen Gebäudeausrüstung betrachtet. Aus diesen Betrachtungen ergeben sich folglich Handlungsempfehlungen zur Realisierung des eingangs erwähnten Ziels. Die Handlungsempfehlungen fließen unmittelbar in den Planungsprozess mit ein und tragen maßgeblich zur Entscheidungsfindung bei.

Die Projektergebnisse zeigen praxistaugliche und umsetzbare Strategien zur Planung und Realisierung eines **lebenszyklusbasierten treibhausgas-neutralen Plusenergiegebäudes**.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
DGNB	Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
ENPB	Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
EoL	End of Life
GWP	Global Warming Potential
IBH	Ingenieurbüro Hausladen
LCA	Life Cycle Assessment
LHR	Architekturbüro Lang Hugger Rapp
LZPH	Lebenszyklusphase(n)
NGF	Nettogrundfläche
PENRT	nicht erneuerbare Primärenergie
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TUM	Technische Universität München
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
WLG	Wärmeleitgruppe

I. EINFÜHRUNG

In Bezug auf den Klimawandel und den sich daraus ergebenden Herausforderungen für unsere Gesellschaft spielt die Bauindustrie weltweit, durch ihren hohen Ressourcenverbrauch, eine wichtige Schlüsselrolle beim Klimaschutz, denn es entfallen rund 36 % des Endenergiebedarfs und 39 % der CO₂-Emissionen auf Gebäude und die Bauindustrie¹.

In Deutschland begegnet man dieser Herausforderung beispielsweise mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016). In der EnEV sind bau- und anlagentechnische Anforderungen in Bezug auf den energieeffizienten Gebäudebetrieb beschrieben. Definiert sind dabei konkrete Anforderungen sowohl an die thermische Gebäudehülle und den einzuhaltenden Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) als auch an den jährlichen Primärenergiebedarf. Im Zuge der Novellierungen verschärfen sich die Anforderungen stetig, was zu höheren Dämmstandards, d.h. einem erhöhten Einsatz an Wärmedämmung führt. Dadurch sinkt zwar der Energiebedarf während der Nutzungsphase des Gebäudes, jedoch steigen, bedingt durch den erhöhten Materialeinsatz, der Energiebedarf und die Umweltwirkungen für die Herstellung der Materialien, deren Instandhaltung und Austausch sowie deren Entsorgung. Dieser Energiebedarf und die daraus resultierenden Emissionen werden als „Graue Energie“ und „Graue Emissionen“ deklariert. Die Analyse und Bewertung der Grauen Energie und Emissionen werden allerdings weder in der EnEV, noch in einer anderen, baurechtlich bindenden Verordnung und Richtlinie, in Deutschland berücksichtigt. Um den Ressourcenverbrauch und die Klimaauswirkungen im Bauwesen senken zu können, wird es zukünftig erforderlich sein, Gebäude lebenszyklusorientiert zu betrachten, zu analysieren, zu bewerten und vor allem zu optimieren.

II. PROJEKT UND GEBÄUDEVORSTELLUNG



Abbildung 1: Bestandsgebäude Büro- und Verwaltungsgebäudes AS-Bau GmbH (Hof, Bayern)

Übergeordnetes Projektziel des Forschungsprojekts „Eco+Office AS-Bau“ ist es, einen ganzheitlichen Ansatz zu nutzen, um ein **lebenszyklusbasiertes, treibhausgas-neutrales Plusenergiegebäude** zu realisieren. Die Funktionen und Vorteile von Alt- und Neubau sollen dabei optimal zusammenwirken.

Dabei wurde der Planungsprozess für die Sanierung und Erweiterung des Bestandsbürogebäudes der Baufirma AS-Bau Hof GmbH in Hof (Bayern) (AS-Bau Hof, 2019) vom Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) (Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen - Technische Universität München, 2019) der Technischen Universität München (TUM) aus wissenschaftlicher Perspektive begleitet. Die Bearbeitung erfolgte im ständigen und engen Austausch mit dem Bauherrn Dr.-Ing. Thomas Dick (AS-Bau Hof GmbH) und den Fachplanern, Architekturbüro Lang Hugger Rampp GmbH (München) (Lang Hugger Rampp Architekturbüro, 2019), dem Ingenieurbüro Hausladen (Kirchheim b. München) (Ingenieurbüro Hausladen, 2019), der Singer Ingenieur Consult GmbH, Bayreuth - Kulmbach - Zwickau - Bamberg (Singer Ingenieur Consult GmbH, 2019) und dem IBL Ingenieurbüro Lenk (IBL Ingenieurbüro Lenk, 2019). Dadurch wurde ermöglicht, dass die im Rahmen des Projektes theoretisch erarbeiteten Erkenntnisse und Lösungsansätze unmittelbar in die Planung einfließen konnten, um das Ziel, ein lebenszyklusbasiertes Treibhausgas neutrales Plusenergiegebäude zu realisieren, zu erreichen.

Auf Basis dieser Zieldefinition wurden für das Bauvorhaben „Energetische Sanierung und Erweiterung des Büro- und Verwaltungsgebäudes der AS Bau Hof GmbH“ drei wesentliche Methoden identifiziert:

- Ökologische Lebenszyklusanalyse (LCA) der Baukonstruktion und Technischen Gebäudeausrüstung zur Reduzierung der Grauen Energie und Emissionen.
- Untersuchung des Einflusses der Baukonstruktion auf das Lastmanagement zur Senkung des betrieblichen Energiebedarfs.
- Lebenszykluskostenanalyse (LCC) der Baukonstruktion und Technischen Gebäudeausrüstung zur Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses der untersuchten Varianten/Szenarien.



Abbildung 2: Skizze Projektidee des zukünftigen Büro- und Verwaltungsgebäudes AS-Bau Hof GmbH (Quelle: Lang Hugger Rampp GmbH)

2.1. PROJEKTIDEE

Das im Jahr 1977/78 errichtete Büro- und Verwaltungsgebäude der AS-Bau Hof GmbH soll saniert und erweitert oder komplett erneuert werden (siehe Abbildung 1). Dabei wird hinsichtlich des übergeordneten Projektziels unter anderem untersucht, ob das Bestandsgebäude ökologisch sinnvoll weiterverwendet/saniert und mit einem Erweiterungsbau verknüpft werden kann, oder ob das Bestandsgebäude abgerissen werden und ein Ersatzneubau realisiert werden sollte. Schon vorhandene baukonstruktive Strukturen sollen dabei jedoch möglichst weiterverwendet werden (siehe Abbildung 2).

Das Projekt greift aktuelle Forschungsfragen auf und setzt sie in die Praxis um. Der Fokus liegt dabei auf der lebenszyklusbasierten Optimierung des Primärenergiebedarfs, der Treibhausgasemissionen und deren Kompensation. Dabei spielt nicht nur die Optimierung der Betriebsenergie bzw. deren regenerative Bereitstellung und ein abgestimmtes Lastmanagement eine Rolle, sondern auch die Effizienzsteigerung bei der Herstellung und Entsorgung der baukonstruktiven und technischen Komponenten des Gebäudes.

Zentraler Punkt ist also die Reduktion des Anteils an Grauer Energie und den daraus resultierenden Grauen Emissionen. Mit Hilfe eines konkreten Anwendungsbezuges durch das Neubau/Ersatzneubau-Vorhaben der AS-Bau Hof GmbH werden vergleichende Berechnungen durchgeführt sowie konkrete Potentiale benannt und bewertet.

2.2. VERWENDETE METHODEN

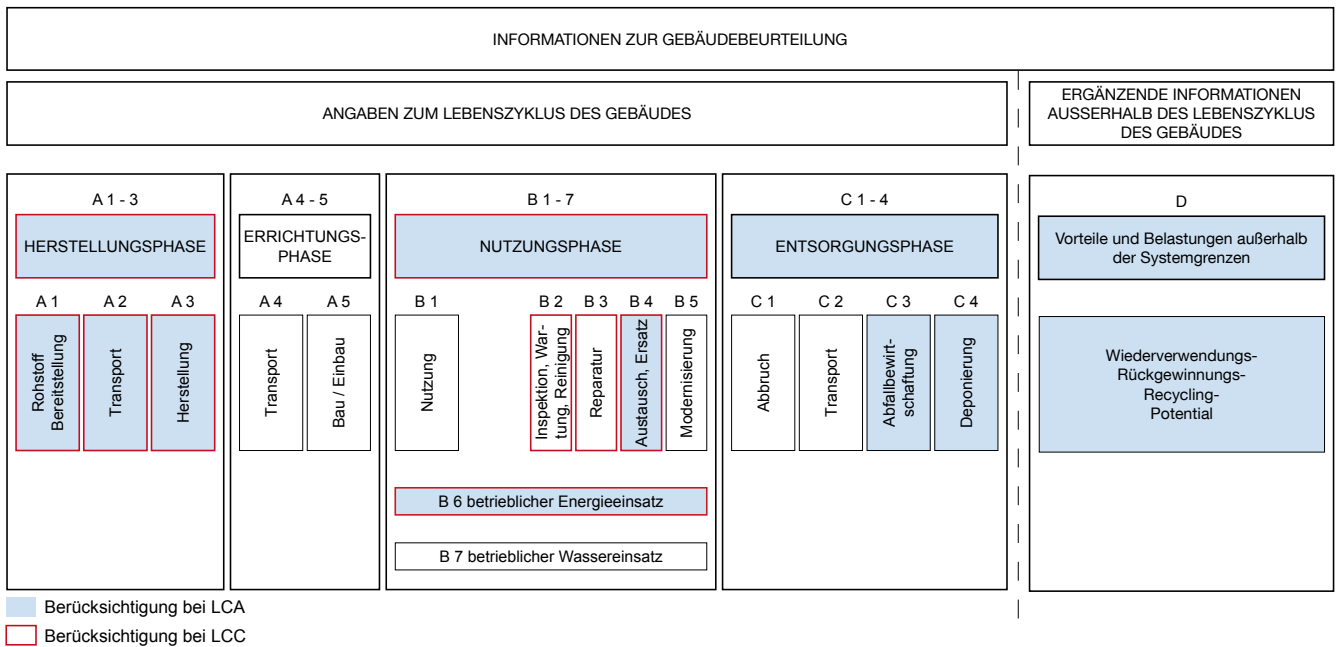


Abbildung 3: Berücksichtigte Lebenszyklusphasen des Gesamtgebäudes nach DIN EN 15978 für LCA und LCC (eigene Darstellung nach DIN EN 15978, 2012, Bild 6)

Abbildung 3 zeigt die Lebenszyklusphasen, die in diesem Projekt innerhalb der Ökobilanzierung (LCA) und Lebenszykluskostenanalyse (LCC) berücksichtigt wurden. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Methoden der LCA und LCC näher erläutert.

2.2.1. LEBENSZYKLUSANALYSE

Ein Gebäude ist das Ergebnis aus dem Zusammenfügen verschiedenster Baumaterialien (z.B. Konstruktionsvollholz und/oder Stahlbeton), unter Verwendung verschiedenster Dienstleistungen (z.B. Transport der Materialien).

Die damit einhergehenden stofflichen und energetischen Input-, Betriebs- und Outputflüsse sowie die potentiellen Umwelteinwirkungen während des gesamten Lebenszyklus – von der Gewinnung der Ausgangsrohstoffe bis zum Recycling – können mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse (engl.: Life Cycle Assessment – LCA) bewertet werden.

Bei der parallelen Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Qualität von Bauprojekten ist es sinnvoll, auf bekannte und einheitliche Bauteildefinitionen zurückzugreifen. Deshalb stützt sich die Auswertung in diesem Forschungsprojekt auf die in Tabelle 9 im Anhang blau markierten Kostengruppen der DIN 276:12-2018. Im Fokus der Bilanzierungen stehen dabei nur die gebäudebezogenen Kostengruppen der KG 320 bis 360 (Gründung, Außenwände, Innenwände, Decken, Dach) und KG 420 (Wärmeversorgungsanlagen) sowie KG 440 (Starkstromanlagen, PV-Anlagen), um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Bauprojekten zu gewährleisten. Dabei wird die Untersuchung auf diejenigen Kostengruppen der dritten Ebene beschränkt, die bei Bauprojekten in vergleichbarer Weise vorkommen und in frühen Planungsphasen bekannt sind. So entfällt z. B. die Erhebung für baukonstruktive Einbauten (KG 380) oder kommunikationstechnischer Anlagen (KG 450), da diese Kostengruppen sehr projektspezifisch und die Massen erst kurz vor oder nach Fertigstellung des Gebäudes genau bekannt sind. Zudem stehen zu den nicht in Betracht gezogenen Kostengruppen so gut wie keine Vergleichswerte für die Bewertung der ökologischen und ökonomischen Qualität von Gebäuden zur Verfügung.

Der Lebenszyklus von Gebäuden wird in 17 Lebenszyklusphasen (LZPH) unterteilt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Es werden derzeit aber nicht alle dieser Lebenszyklusphasen für Berechnungen einer Gebäude-Lebenszyklusanalyse mit einbezogen, da einige dieser Phasen (v.a. Transporte, Errichtung und Abbruch) sehr projektspezifisch sind (Harter, Schneider-Marin, & Lang, 2018). Die Erfassung ist sehr aufwendig und es liegen keine allgemeingültigen und pauschal verwendbaren Daten für die Bilanzierung vor.

So werden die Phasen A1-A3, B4, B6, C3 und C4 erfasst (siehe blau eingefärbte LZPH in Abbildung 3). Die Phase B4 beinhaltet für den Fall des Austauschs einzelner Gebäudekomponenten, z.B. die Erneuerung des Außenputzes, die Abfallbehandlung (C3) und Beseitigung (C4) des zu entsorgenden, alten Putzes und die Herstellungsphase (A1-A3) des neuen Putzes. Darüber hinaus werden mögliche Gutschriften aus Phase D in separaten Szenarien, die explizit im Verlauf des Berichts ausgewiesen werden, mit betrachtet. Die Lebensdauer des betrachteten Gebäudes wird mit 50 Jahren für alle Berechnungen angenommen.

Bei der LCA wurde im Rahmen dieses Projekts grundsätzlich unterschieden zwischen der wissenschaftlichen Begleitung des Planungsprozesses und der Szenarienbetrachtung möglicher Ausführungsvarianten.

Zunächst werden Massenbilanzen und Bauteillisten zu den verbauten Baustoffen der KG 320 bis 360 und KG 420 und 440 aufgestellt. Durch die Verrechnung der Massenaufstellung mit den material- und bauteilspezifischen Ökobilanz-Datensätzen aus der ÖkobaDat Datenbank (Bundesministerium für Umwelt - Naturschutz - Bau und Reaktorsicherheit, 2019) werden Energiebedarf und die potenziellen Treibhausgasemissionen für Herstellung, Nutzung und Entsorgung bzw. Recycling berechnet. Die Analysen konzentrieren sich auf die Indikatoren nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT), gemessen in Megajoule [MJ], und das Treibhauspotential, angegeben als Global Warming Potential (GWP), gemessen in Kilogramm CO₂-Äquivalenten [kg CO₂-Äq.].

2.2.2. LEBENSZYKLUSKOSTEN

Analog zur LCA werden die Einzelkosten in den verschiedenen Lebenszyklusphasen ermittelt, was als Lebenszykluskostenanalyse bezeichnet wird (engl.: Life Cycle Costing – LCC). Abbildung 2 zeigt dabei, in Rot umrandet, die bei der LCC berücksichtigten Lebenszyklusphasen.

Die Herstellungskosten (LZPH A1-A3) für die KG 300 nach DIN 276-1:2008-12 wurden nach der Kostenberechnung des Architekturbüros LHR auf dritter Kostengruppenebene berechnet. Bei Bedarf wurden diese Kostenkennwerte auf Bauteilschichtenebene mit Hilfe der Software LEGEP (Legep-Bausoftware, 2019), Version 2.8.674 und der darin enthaltenen SIRADOS-Baukostendatenbank (SIRADOS, 2019) ergänzt. Die Kosten (Nettokosten) beziehen sich auf das vierte Quartal 2018.

Die Bilanzierung der Lebenszykluskosten der KG 300 in der Nutzungsphase (LZPH B2-B4) erfolgte nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) für Büro- und Verwaltungsgebäude, Kriteriensteckbrief 2.1.1 (Bundesministerium für Umwelt - Naturschutz - Bau und Reaktorsicherheit, 2015). Dabei wird die Barwertmethode mit Diskontierungszins (1,5 %) sowie der Berücksichtigung von jährlichen Bau- und Dienstleistungspreissteigerungen (2 %) angewendet. Berücksichtigt werden Reinigungskosten für Bodenbeläge, Glasflächen, Außenwandbekleidungen, Sonnenschutz und Innentüren bzw. -fenster und Sanitäreinrichtungen. Die jährlichen Kosten für Wartung und Inspektion betragen für die KG 300 0,1% der Herstellungskosten. Laufende jährliche Instandsetzungen werden pauschal mit 0,35 % der Herstellungskosten berücksichtigt. Unregelmäßige Instandsetzungskosten, d.h. Kosten für den Austausch von Bauteilen oder Bauteilschichten, wurden unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Nutzungsdauern nach BNB bauteilspezifisch berechnet.

Eine Berücksichtigung der Entsorgungskosten (LZPH C1-C4) sieht das Zertifizierungssystem des BNB noch nicht vor. Grund dafür sind u.a. fehlende belastbare oder einheitliche Kostenkennwerte, die eine vergleichende Analyse möglich machen würden. Entsorgungskosten sind regional sehr unterschiedlich und volatil. Daher wurden diese im Rahmen der Berechnungen ausgeklammert. Hinzu kommt, dass es noch keine allgemeingültigen Kostenkennwerte für Gutschriften aus Recycling oder Wiederverwendungen (Phase D) gibt. Daher wurde die Phase D somit bei der Berechnung der LCC nicht berücksichtigt.

Die Lebenszykluskosten der Wärmeversorgungsanlagen (KG 420 und 440) wurden ebenfalls bilanziert. Die methodischen Grundlagen sind bei der LCC der TGA dieselben wie bei der Berechnung der LCC der Baukonstruktion.

Die Lebenszykluskostenberechnung für die Herstellung (LZPH A1-A3) der Wärmeversorgungsanlagen basiert auf den Kostenschätzungen durch das IBH. Die

für die Berechnung verwendeten Stromkosten (LZPH B6) basieren ebenfalls auf den Vorgaben des BNB bzw. Recherchen nach aktuellen Strompreisen.

2.2.3. THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

Zur Ermittlung der Einflüsse der Baukonstruktion auf das Lastmanagement und das Raumklima wurden für ausgewählte kritische Zonen dynamisch thermische Gebäudesimulationen durchgeführt. Dynamische thermische Gebäudesimulationen bieten im Gegensatz zu statischen Berechnungen den entscheidenden Vorteil, dass die Einflüsse des Außenklimas, des Nutzers sowie der Steuerung und Regelung der Anlagentechnik im Detail abgebildet werden können. Ergebnisse können somit realitätsnaher und detaillierter ermittelt und dargestellt werden. Um valide Aussagen mit Hilfe von thermischen Gebäudesimulationen treffen zu können, bedarf es jedoch einer hinreichend genauen Ermittlung und Darstellung relevanter Eingabeparameter. Die Qualität und die Aussagekraft der erzeugten Ergebnisse stehen dabei in direktem Zusammenhang mit der Genauigkeit der Eingabeparameter. Ein entscheidender Punkt stellt dabei das energierelevante Nutzerverhalten dar. Da im Rahmen der Grundlagenermittlung zu diesem Forschungsprojekt der Nutzer nicht analysiert werden konnte, basieren die folgenden Ergebnisse auf einem standardisierten Nutzer nach DIN V 18599. Die Ergebnisse zeigen daher grundlegende Tendenzen auf, zur Spezifizierung der Ergebnisse werden in einem weiterführenden Forschungsprojekt, in Kooperation mit der AS-Bau GmbH, gezielte Nutzeranalysen sowie ein ausführliches Gebäudemonitoring durchgeführt. Alle relevanten Eingabeparameter, die den Simulationen zu Grunde liegen, sind in Kapitel 4 dargestellt.

Untersucht wurden kritische Zonen. Damit sind Räume bzw. Bereiche gemeint, welche besonders kritische Eigenschaften aufweisen: z.B. großer Fensterflächenanteil, hohe interne Lasten oder hohe solare Lasten, aufgrund der Orientierung.

Die Einflüsse wurden mittels parametrischer Simulationen ermittelt. Für jede Zone wurde dabei die wirksame Wärmespeicherfähigkeit c_{wirk} systematisch, d.h. von leichter Bauweise ($c_{\text{wirk}} \leq 50 \text{ Wh/m}^2\text{K}$) bis schwerer Bauweise ($c_{\text{wirk}} \geq 130 \text{ Wh/m}^2\text{K}$) variiert und eine ganzjährige Simulation durchgeführt. Berechnet wurde c_{wirk} gemäß DIN EN ISO 13786. Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit ist maßgeblich von den Schichtdicken sowie den spezifischen Wärmekapazitäten c der thermischen relevanten und dem Raum zugewandten Bauteilschichten abhängig.

Um eine möglichst große Bandbreite an möglichen Kombinationen von verschiedenen Wärmespeicherfähigkeiten zu untersuchen, wurden unter idealisierten Annahmen die Dicke d der thermisch relevanten Schichten der Raumbegrenzungsflächen (Außenwand, Decke und Innenwände) zwischen 0 cm und 25 cm in 2,5 cm Schritten variiert, d.h. für jedes Bauteil ergaben sich somit zehn unterschiedliche Schichtdicken. Idealisiert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein vereinfachtes Gebäudemodell verwendet wurde, bei dem konstruktive Eigenschaften (z.B. statische Eigenschaften) der Bauteile vernachlässigt wurden. Unter Berücksichtigung der zehn unterschiedlichen Schichtdicken, und der zu untersuchenden Bauteile ergaben sich insgesamt 1.000 Einzelsimulationen.

2.3. DATENGRUNDLAGEN DES FORSCHUNGSVORHABENS

Ein wesentlicher Bestandteil für die im folgenden durchgeführten Analysen zur LCA und LCC stellen die Datengrundlagen bzw. Datenbanken mit ihren Bauteil- und Materialkennwerten dar. Tabelle 1 zeigt die verwendeten Daten, durch wen diese erhoben wurden und für welche Berechnungsmethoden, bzw. welchen Anwendungsfall, diese als Eingabeparameter dienen.

Generell muss berücksichtigt werden, dass zum Zeitpunkt der wissenschaftlichen Untersuchungen noch kein finaler Planungsstand vorlag, weshalb zum Teil Annahmen bzgl. der Eingabedaten für die Berechnung getroffen wurden. Die Untersuchungen und Berechnungen beruhen demnach auf verschiedenen Planungsständen, die von der Ausführung geringfügig abweichen können.

TABELLE 1 GRUNDLAGEN DER IM PROJEKT VERWENDETEN METHODEN

Bezeichnung	Daten	Erhebung durch	Berechnungsmethodik/Anwendungsfall
LCA der Baukonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestandsunterlagen ▪ Ökobau.dat 2016-I ▪ Durchschnittliche Nutzungsdauern nach BNB 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TUM ▪ LHR 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DIN EN ISO 14040 ▪ DIN EN ISO 14044 ▪ DIN EN 15978
LCC der Baukonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kostenschätzungen der KG 300 ▪ Kostenkennwerte aus LEGEP (Stand Jul. 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LHR ▪ IBH ▪ TUM 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BNB
LCA der technischen Gebäudeausrüstung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ökobau.dat 2016-I ▪ Durchschnittliche Nutzungsdauern nach BNB 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TUM ▪ LHR ▪ IBH 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DIN EN ISO 14040 ▪ DIN EN ISO 14044 ▪ DIN EN 15978
LCC der technischen Gebäudeausrüstung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kostenschätzungen KG 420 und 440 ▪ IBH Auswertung aktueller Stromkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LHR ▪ IBH 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BNB ▪ statistische Auswertung Preissteigerung Stromkosten

III. LEBENSZYKLUSANALYSE

Wie eingangs erwähnt, wurden zur Erreichung der Projektziele ökologische und ökonomische Lebenszyklusbetrachtungen durchgeführt. Durch die wissenschaftliche Begleitung des Planungsprozesses war es möglich, die sich anpassenden und verändernden Planungsstände und dabei aufkommende Fragestellungen zu untersuchen, und für Bauherrn hinsichtlich der Projektziele Handlungsempfehlungen zu erarbeiten. Die Ergebnisse und wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend dargestellt.

3.1. LEBENSZYKLUSANALYSE

Analysiert wurden verschiedene stoffliche und energetische Input- und Betriebsvariablen und -werte sowie ökologische Outputvariablen und -werte der bereits in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Kostengruppen:

- Ökologische Bewertung des Bestandsbaus zur Identifizierung der vorhandenen Grauen Energie und Emissionen
- Materialvergleich verschiedener Bauteilaufbauten zur Identifizierung von Optimierungspotentialen auf Bauteilebene
- Szenarienvergleich auf Gebäudeebene: Ökologischer Vergleich der Baukonstruktion der Ausführungsvarianten „Abriss mit Ersatzneubau“ und „Sanierung Bestandsgebäude mit Erweiterungsbau“, inkl. Kompensation der Umweltwirkungen durch Stromerzeugung aus PV-Anlage
- Ökologischer Vergleich verschiedener Energieversorgungsvarianten für die Ausführung Sanierung mit Erweiterungsbau

3.1.1. LCA DES BESTANDSGEBÄUDES

Bei der Berechnung der LCA des Bestandsgebäudes wurden die baukonstruktiven Elemente des Gebäudes (KG 320 bis 360) berücksichtigt. Das dreigeschossige (KG+II) Bestandsgebäude ist in Massivbauweise (Stahlbeton) errichtet.

Die Ergebnisse waren für die Berücksichtigung, bzw. Wiederverwendung schon vorhandener Ressourcen von großer Bedeutung, da aufbauend auf diesen Ergebnissen untersucht wurde, ob ein Ersatzneubau oder eine Sanierung des Bestandsgebäudes plus Erweiterung lebenszyklusbasiert besser ausfällt. Die technische Gebäudeausrüstung und die Nutzungsphase (B6) wurden dabei nicht berücksichtigt, da die technische Gebäudeausrüstung in jedem Fall komplett erneuert wird und sich dadurch keine vorhandenen Ressourcen nutzen lassen werden.

Die LCA der Baukonstruktion des Bestandsgebäudes ergibt für das gesamte, lebenszyklusbasierte GWP (über 50 Jahre) einen Wert von 310 t CO₂-Äq. Den größten Anteil an den Gesamtemissionen hat die Herstellungsphase mit rund 61% an den Gesamtemissionen (siehe Abbildung 4). Zudem fällt der Austausch (B4) mit rund 30% ebenfalls stark ins Gewicht. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Lebenszyklusphase B4 sehr stark von den definierten Austauschzyklen, bzw. Lebensdauern der einzelnen Materialien/Gebäudekomponenten abhängt. Hierbei wurden statistisch erhobene, durchschnittliche Nutzungsdauern angenommen. Die Entsorgungsphasen (C3 - Abfallbewirtschaftung und C4 - Deponierung) sind für insgesamt 9% des GWP verantwortlich.

Zum besseren Verständnis der Menge an GWP (310 t CO₂-Äq.), erfolgt weiterführend die Umrechnung des GWP in Personenkilometer, die per Flugzeug zurückgelegt werden könnten, bis die gleiche Menge an Treibhausgasemissionen ausgestoßen wäre. Zudem erfolgt die Umrechnung in eine gewisse Anzahl an Bäumen, die zur Kompensation des GWP benötigt werden würde.

Der Wert von 310 t CO₂-Äq. entspricht somit z.B. rund 1,5 Mio. zurückgelegten Personenkilometern per Flugzeug (Umwelt Bundesamt, 2018). Eine Fichte entzieht der Atmosphäre im Jahr rund 10 kg CO₂ und bindet den Kohlenstoff (C) im Holzkörper. Um den Ausstoß von 310 t CO₂-Äq. auszugleichen, müssten somit rund 620 ausgewachsene Fichten über 50 Jahre hinweg Kohlenstoff binden, um diese Menge an CO₂ zu filtern und den Kohlenstoff zu binden (Plant-for-the-Planet Foundation, 2019).

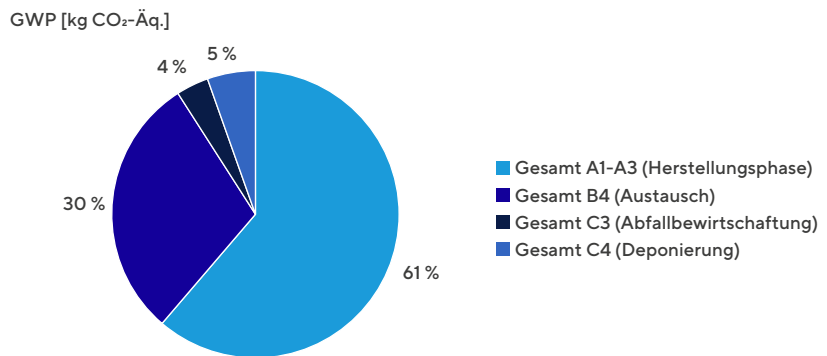


Abbildung 4: Lebenszyklusbasiertes GWP des bisherigen Bestandsgebäudes (KG 300) nach Lebenszyklusphasen

In Bezug auf die lebenszyklusbasierte nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) ergibt sich ein Gesamtwert von 3,9 Mio. MJ, oder 1,1 Mio. kWh. Dabei macht ebenfalls die Herstellungsphase (A1-A3) mit 59% den größten Anteil aus. Der zweitgrößte Anteil entfällt auf die Austausch-Phase (B4) mit 40%. Die Entsorgungsphasen (C3 - Abfallbewirtschaftung und C4 - Deponierung) sind lediglich für insgesamt 1% der PENRT verantwortlich (siehe Abbildung 5).

Die Umrechnung des Gesamtwertes an PENRT (3,9 Mio. MJ, oder 1,1 Mio. kWh) erfolgt weiterführend in eine Anzahl an Jahren, in denen ein durchschnittlicher deutscher Haushalt mit Strom versorgt werden könnte und eine Anzahl an Kilometer, die ein E-Auto mit der genannten Menge an Strom zurücklegen könnte.

Mit dem Gesamtwert an Energie könnte ein durchschnittlicher deutscher Haushalt, mit einem Stromverbrauch von 4.000 kWh pro Jahr, 273 Jahre mit Strom versorgt werden. Ein E-Auto, mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 183 Wh/km könnte mit dieser Menge an Energie rund 6 Mio. Kilometer zurücklegen. Das wären ca. 149 Weltumrundungen am Äquator (Fetene, Kaplan, Mabit, Jensen, & Prato, 2017).

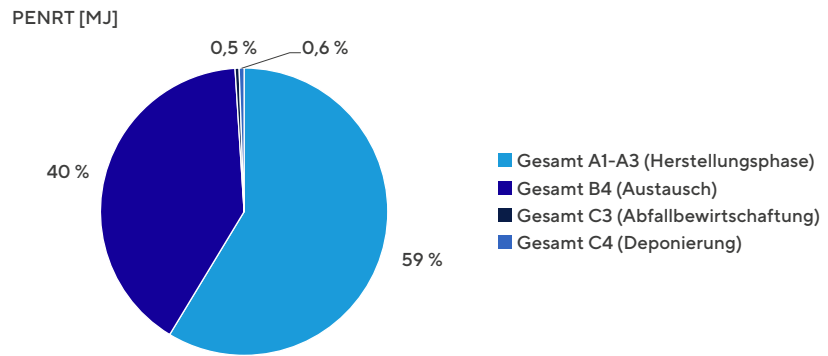


Abbildung 5: Lebenszyklusbasierte PENRT des Bestandsgebäudes (KG 300) nach Lebenszyklusphasen

Anhand dieser Ergebnisse kann die allgemeine Dringlichkeit zur Realisierung ressourcenschonender Gebäude verdeutlicht werden. Die in den frühen Planungsphasen durchgeführte Lebenszyklusanalyse des Bestandsgebäudes unterstützte die Entscheidung den Komplettabriss zu verwerfen und eine Sanierung mit Erweiterungsbau anzudenken.

Durch die Nutzung der bereits vorhandenen Ressourcen, hauptsächlich der Baukonstruktion des Bestandsgebäudes, werden zum einen nicht-erneuerbare Ressourcen nicht weiter erschöpft (z.B. kein zusätzlicher Verbrauch an Beton als Primärmaterial) und zum anderen wird keine zusätzliche Graue Energien benötigt und Emissionen in die Umwelt entlassen. Denn dadurch, dass die bestehende Baukonstruktion noch weiter genutzt wird, entfällt dessen Entsorgung und somit auch die Herstellung des neuen Materials, das für den Ersatzneubau benötigt worden wäre.

3.1.2. ÖKOLOGISCHE OPTIMIERUNGSPOTENTIALE AUF BAUTEILEBENE

Um auf Bauteilebene eine Ausführung mit möglichst wenig Umweltauswirkungen realisieren zu können, wurden dreizehn verschiedene Bauteil- bzw. Materialvergleiche bilanziert:

- V1: Dämmstoffvergleich bei nichttragenden Trennwänden (Innen)
- V2: Vergleich der Perimeterdämmung: Aufbauten mit gleichen U-Werten
- V3: Vergleich der Außenwanddämmung der Stb.-Bestandswände: Aufbauten mit gleichen U-Werten
- V4: Vergleich Trennwände mit F90 Brandschutzanforderung: Beplankung vs. nichtbrennbarer Dämmstoff
- V5: Vergleich Außenwand im Neubau: Holzmassiv vs. Holztafelelemente vs. Stahlbeton
- V6: Beplankungsvergleich Innenwand: GK-Bauplatten vs. Lehmbauplatte vs. Strohbauplatten
- V7: Vergleich Pfosten-Riegel-Fassade: Aluminiumrahmenprofile vs. Holzrahmen mit Aludeckschale
- V8: Vergleich Wandverkleidung innen: Sichtbeton vs. Spachtelung mit Anstrich

V9: Wandfarbenvergleich: scheuerfeste Farbe vs. Dispersionsfarbe vs. Silikatfarbe

V10: Fußbodenvergleich: Fliesen vs. Teppich vs. Parkett vs. Sichtestrich (Terrazzo) vs. Betonstein vs. Naturstein vs. Linoleum vs. Versiegelung

V11: Materialvergleich Trennlagen: PE-Folie vs. Kraftpapier

V12: Vergleich Wandbekleidung: Fliesen vs. Putz mit abwaschbarem Anstrich

V13: Innenputzvergleich: Kalkgipsputz vs. Gipsputz vs. Kalkputz

Nachfolgend werden die Varianten V5 und V12 näher erläutert, da diese Vergleiche Auswirkungen auf die finale Ausführung hatten.

V5: Vergleich Außenwand im Neubau: Holzmassiv vs. Holztafelelemente vs. Stahlbeton

Für den Anbau wurde ein Vergleich von möglichen Außenwandkonstruktionen durchgeführt. Verglichen wurden dabei eine massive Holzwand, eine Holztafelbauwand sowie eine Stahlbetonwand.

**VERGLEICH AUSSENWAND IM NEUBAU:
HOLZMASSIV VS. HOLZTAFELELEMENTE VS. STAHLBETON
GWP**

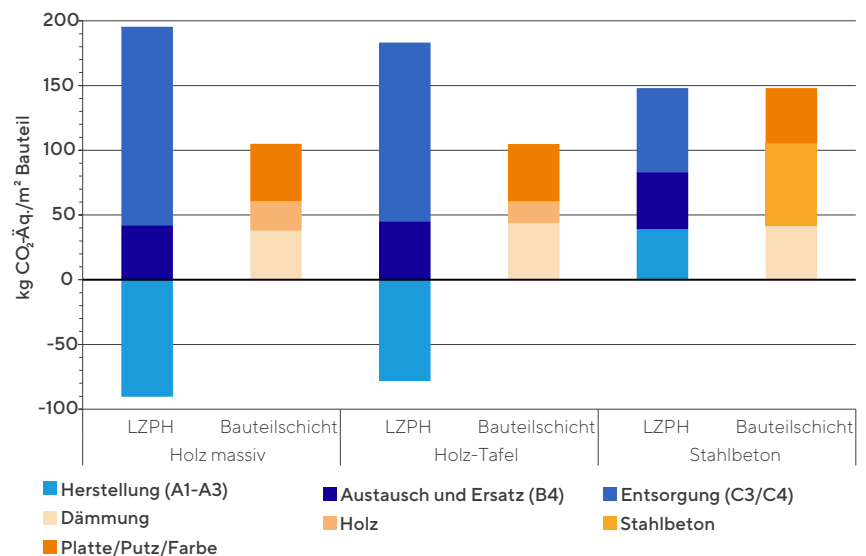


Abbildung 6: GWP der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V5 – strukturiert nach Lebenszyklusphasen und Materialien (eigene Darstellung)

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse hinsichtlich des GWP über einen Lebenszyklus von 50 Jahren hinweg dargestellt, wobei die Holzkonstruktionen geringe GWPs bedingen als die Stahlbetonkonstruktion (-29 %). Jede Außenwand ist mit einer Holzfaserdämmung versehen und besitzt den gleichen U-Wert von ca. 0,135 W/m²K. Da Holz bessere Wärmeleitfähigkeiten aufweist als der Stahlbeton, sind insgesamt geringere Dämmdicken erforderlich. Betrachtet man die Balken der Holzkonstruktionen, so erkennt man die Gutschriften während der Herstellungsphase. Diese spiegeln das in Holz gebundene CO₂-Äq. in Form von Kohlenstoff wider. Die energieintensive Herstellung des Stahlbetons ist dagegen mit CO₂-Emissionen verbunden. Am Ende des Lebenszyklus wird beim Holz eine energetische Verwertung angenommen und der gebundene Kohlenstoff wird wieder freigesetzt. Im Falle der Holzkonstruktionen kann das im Herstellungsprozess (A1-A3) bzw. Wachstumsprozess des Holzes gebundene Treibhausgaspotential (GWP) von den

aus der Nutzungsphase (B4) und Entsorgungsphase (C3/C4) resultierenden Emissionen subtrahiert werden. Daraus ergeben sich die Mengen an GWP, die über den Lebenszyklus der betrachteten Holzkonstruktionen hinweg in die Atmosphäre entlassen werden – jeweils rechter Balken in Abbildung 6.

Auf den ersten Blick zeigt sich beim Vergleich der PENRT ein anderes Bild (siehe Abbildung 7). Energetisch scheint hier Stahlbetonaußenwand am günstigsten zu sein. Das liegt unter anderem daran, dass die energetischen Gutschriften, die sich aus der thermischen Verwertung von Holz am Ende des Lebenszyklus ergeben nicht in der Bilanz der PENRT verrechnet werden. Denn da Holz ein nachwachsender Rohstoff ist, fallen die Gutschriften unter die Bilanz der erneuerbaren Primärenergie, die hier nicht mit abgebildet wird. Würde man zudem die Phase D berücksichtigen (vgl. Abbildung 3), wären die energetischen Vorteile der Holzkonstruktionen klar erkennbar: unter Berücksichtigung der in dieser Phase anfallenden Gutschriften für PENRT würde die massive Holzaußenwand eine PENRT von 450,9 MJ/m², die Holztafelwand eine PENRT von 718,5 MJ/m² und die Stahlbetonwand ein PENRT von 1121,3 MJ/m² Bauteil besitzen.

**VERGLEICH AUSSENWAND IM NEUBAU:
HOLZMASSIV VS. HOLZTAFELELEMENTE VS. STAHLBETON
PENRT**

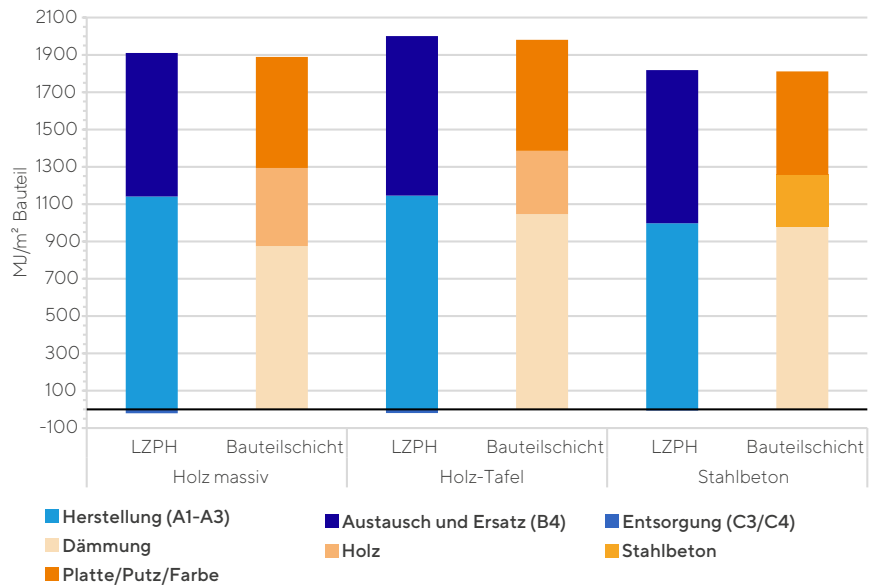


Abbildung 7: PENRT der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V5 – strukturiert nach Lebenszyklusphasen und Materialien (eigene Darstellung)

Ferner ist hinsichtlich der Rohstoffkritikalität nochmals zu erwähnen, dass Holz im Gegensatz zum Stahlbeton ein nachwachsender Rohstoff ist. Des Weiteren ist bezüglich des GWPs der positive Beitrag zur Problemlösung des Klimawandels hervorzuheben. Der Bauherr hat sich letztlich für die Holzmassivbauweise im OG des Neubaus entschieden.

Der Bauherr hat sich letztlich für die Holzmassivbauweise im OG des Neubaus entschieden.

V12: Vergleich Wandbekleidung: Fliesen vs. Putz mit abwaschbarem Anstrich

VERGLEICH WANDBEKLEIDUNG: FLIESEN VS. PUTZ MIT ABWASCHBAREM ANSTRICH GWP

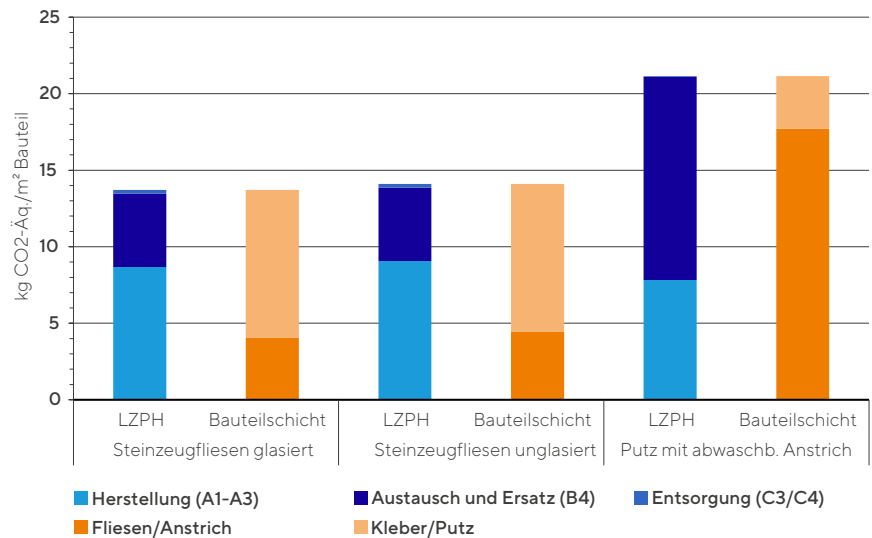


Abbildung 8: GWP der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V12 – strukturiert nach Lebenszyklusphasen und Materialien

Beim Vergleich der Wandbekleidungen wurden verschiedene Varianten, Steinzeugfliesen glasiert und unglasiert sowie Putz mit abwaschbarem Anstrich, berechnet und analysiert. Der Wandaufbau besteht aus 7 mm starken Fliesen und 8 mm starkem Fliesenkleber, wobei dabei die Fliesenfugen ebenfalls berücksichtigt wurden. Der Putz ist ein Kalkputz mit 10 mm Stärke, der einen Anstrich von 1 mm scheuerfester Dispersionsfarbe erhält. Unter diesen Voraussetzungen zeigt sich die Relevanz der Lebenszyklusbetrachtung deutlich: Betrachtet man nur die Herstellungsphasen (A1-A3) so zeigt sich, dass der Putz mit Anstrich, ein um ca. 14% geringeres GWP aufweist (7,8 kg CO₂-Äq.) als die Steinzeugfliesen unglasiert mit 9,1 kg CO₂-Äq. Bezieht man zusätzlich die Nutzungsphase (B4) mit ein, so ändern sich die Gesamtergebnisse deutlich. Grund hierfür ist eine dreimalige Erneuerung des Anstrichs (alle 15 Jahre), wohingegen bei den Fliesen erst durchschnittlich nach höchstens 40 Jahren der Fliesenkleber erneuert werden muss (siehe Abbildung 8).

Auch bei der PENRT zeigt sich der Vorteil der Fliesen deutlich (siehe Abbildung 9). Dies bleibt allerdings nur so, wenn die Fliesen innerhalb einer Nutzungsdauer von 50 Jahren nicht ausgetauscht werden. Ein Austausch des Fliesenklebers (z.B. Neufertigung) ist in der Berechnung mitberücksichtigt.

VERGLEICH WANDBEKLEIDUNG: FLIESEN VS. PUTZ MIT ABWASCHBAREM ANSTRICH PENRT

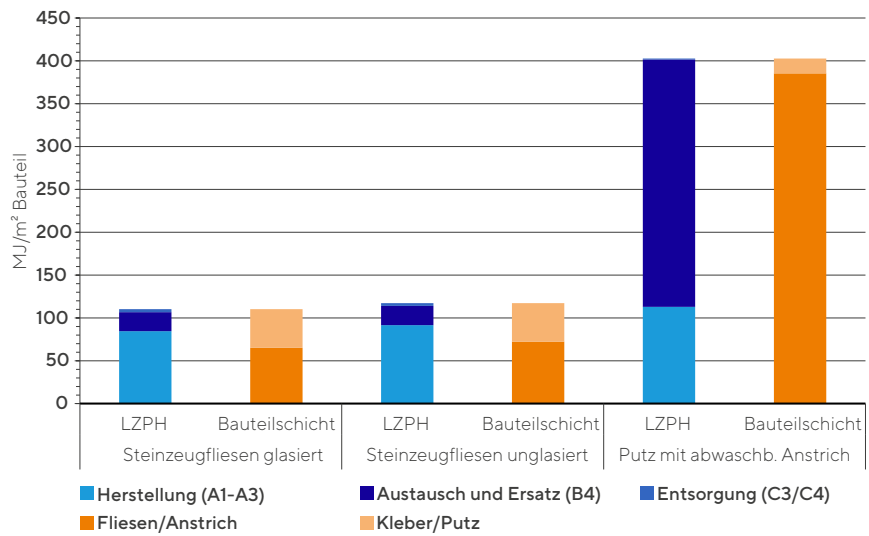


Abbildung 9: PENRT der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V12 – strukturiert nach Lebenszyklusphasen und Materialien

Sollen oder müssen während der 50 Jahre die Fliesen öfter als einmal ausgetauscht werden, müsste überlegt werden, ob ein Anstrich energetisch nicht die geringeren Auswirkungen hätte. Das für die Fliesen-Varianten anfallende GWP wäre somit schon im Falle eines einmaligen Austausches höher als für die Putz-Variante. Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf wäre dann, im Vergleich der drei Varianten, nahezu gleich auf.

Im Falle der Variante V12 hat der Bauherr sich letztendlich für die Fliesen entschieden.

3.1.3. LCA VERGLEICH ERSATZNEUBAU ZU SANIERUNG

Beim Vergleich der LCA zwischen Ersatzneubau und Sanierung mit Erweiterung wurden verschiedene Varianten untersucht. Als Referenz fungiert das Bestandsgebäude (vgl. Kapitel 3.1.1) mit einer NGF von 615 m². Beim Ersatzneubau wird davon ausgegangen, dass das Bestandsgebäude abgerissen wird und ein Ersatzneubau entsteht (NGF_{neu} von 1183 m²). Ferner wird der Fall der Sanierung untersucht. Das Bestandsgebäude (NGF von 615 m²) bleibt erhalten und ein zusätzlicher Anbau (NGF von 568 m²) wird errichtet.

Der Vergleich der Gesamtergebnisse (exklusive TGA und Phase B6) für das absolute GWP und PENRT der verschiedenen Lebenszyklusanalysen in Tabelle 2 zeigt deutliche Unterschiede zwischen den drei Berechnungen auf. Dabei weist das Bestandsgebäude die niedrigsten Werte für das gesamte GWP und die PENRT auf. Das liegt daran, dass sich die NGF bei der Ausführungsvarianten Sanierung mit Erweiterungsbau und dem Ersatzneubau um 92% erhöht.

Werden die absoluten Werte für das GWP und PENRT durch die Quadratmeteranzahl der NGF geteilt, ergibt sich ein spezifischer Wert für das GWP und PENRT. Beim Vergleich der Werte für die verschiedenen Varianten wird deutlich, dass sowohl beim GWP als auch bei der PENRT die Variante Sanierung mit Erweiterungsbau ökologisch am besten ist - trotz umfangreicher baulicher Maßnahmen und erhöhtem Einsatz an Dämmmaterialien.

Gegenüber der Variante Ersatzneubau spart man sich 16,8 % beim GWP und 11,1 % bei der PENRT ein. Im Vergleich zum Bestandsgebäude verringert sich bei der Sanierungsvariante das GWP um 1,8 % je m²NGF und Jahr und die PENRT um 5,6 %. Grund dafür ist die Weiterverwendung der vorhandenen baulichen Ressourcen der Baukonstruktion des Bestandsgebäudes. Es fällt somit kein GWP und keine PENRT für die Entsorgung der baulichen Ressourcen des Bestandsgebäudes an. Insgesamt werden bei der Sanierung mit Erweiterungsbau deutlich weniger neue Gebäudematerialien benötigt als beim Ersatzneubau, was sich auch bilanziell niederschlägt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass durch die energetische Sanierung des Bestandsgebäudes der betriebliche Energieeinsatz (LZPH B6) wesentlich gesenkt wird.

Die treibenden Kostengruppen/Bauteile, in Bezug auf das GWP je m²NGFa, sind die Hinterfüllung mit Magerbeton (KG 321 - Anteil beim Erweiterungsbau: 0,53 kg CO₂-Äq./m²_{NGFa}) und die Gründung (KG 322 - 12,1% des gesamten GWP des Erweiterungsbaus) und auch die Abdichtungsschichten (KG 325- 11,3 % des gesamten GWP des Erweiterungsbaus). Aufgrund der schlechten Bodenverhältnisse am Gebäudestandort konnte nicht auf den Magerbeton verzichtet werden. DBei den Ergebnissen in Tabelle 2 ist zu beachten, dass hier nur die Bilanzierung der Baukonstruktion dargestellt ist. Die Umweltwirkungen der TGA und Betriebsphase des Gebäudes sind in Kapitel 3.1.5, Tabelle 4 abgebildet.

Bei der Betrachtung des Ersatzneubaus muss beachtet werden, dass beim Abbruch der Fenster 0,23 kg CO₂-Äq./m²_{NGFa} und beim Abbruch des Daches 0,25 kg CO₂-Äq./m²_{NGFa} anfallen. Der Abbruch der Innenwände macht 0,22 kg CO₂-Äq./m²_{NGFa} aus. Ansonsten ist die Sanierung des Daches mit 2,04 kg CO₂-Äq./m²_{NGFa} ein wesentlicher Treiber bei der Sanierung. Im Falle des Ersatzneubaus sind im Wesentlichen die Mineralwolle und die Feinblechverkleidung der Attika die maßgeblichen Treiber. In den Abbildungen 9 bis 12 sind die auf die lebenszyklusbasierten GWP- und PENRT-Werte, aufgeschlüsselt nach den einzelnen Lebenszyklusphasen, dargestellt.

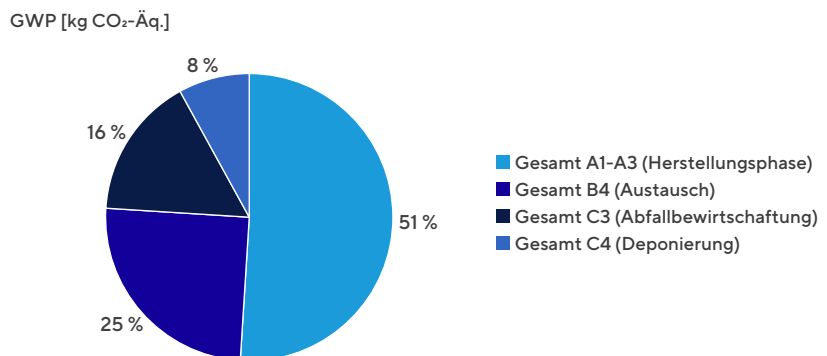


Abbildung 10: Prozentuale Verteilung des GWP nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Sanierung mit Erweiterungsbau (eigene Darstellung)

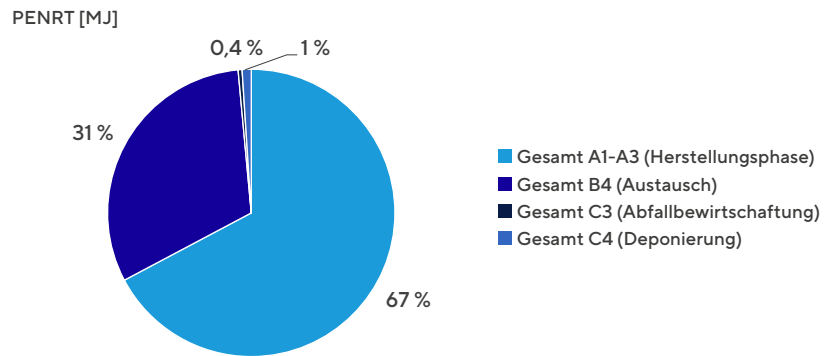


Abbildung 11: Prozentuale Verteilung des PENRT nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Sanierung mit Erweiterungsbau (eigene Darstellung)

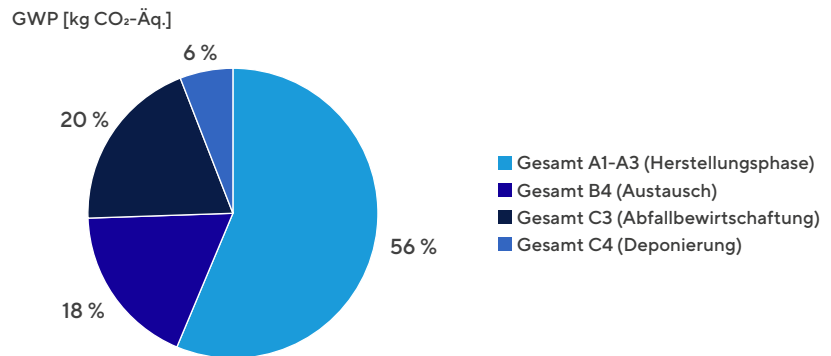


Abbildung 12: Prozentuale Verteilung des PENRT nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Sanierung mit Erweiterungsbau (eigene Darstellung)

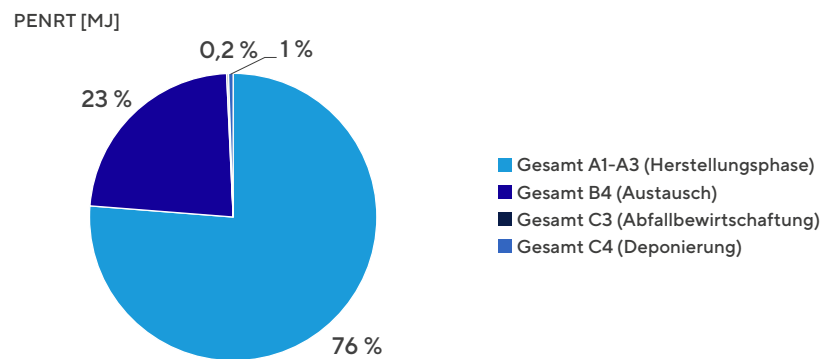


Abbildung 13: Prozentuale Verteilung des PENRT nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Ersatzneubau (eigene Darstellung)

TABELLE 2 VERGLEICH GWP UND PENRT DER AUSFÜHRUNGSVARIANTEN (LCA DER BAUKONSTRUKTION, OHNE TGA UND PHASE B6)

	GWP [kg CO₂-Äq.]	PENRT [MJ]
Bestandsgebäude (615 m ² _{NGF})	309.827	3.937.436
Sanierung mit Erweiterungsneubau (1183 m ² _{NGF})	586.670	7.153.406
Ersatzneubau (1183 m ² _{NGF})	705.956	8.041.913

	GWP [kg CO₂-Äq./m²_{NGF}/a]	PENRT [MJ/m²_{NGF}/a]
Bestandsgebäude	10,1	128,0
Sanierung mit Erweiterungsbau	9,92	120,9
Ersatzneubau	11,93	136,0

Diese Betrachtung wurde dem Bauherrn bereits in der Entwurfsphase präsentiert, was neben weiteren Faktoren dazu beigetragen hat, dass die Variante Sanierung mit Erweiterungsbau letztendlich umgesetzt wurde.

Das Bestandsgebäude wird somit um weitere Büro- und Seminarräume sowie Verkehrsflächen erweitert (siehe Abbildung 14). Das Erdgeschoss ist in Massivbauweise aus Stahlbeton mit außenliegender Wärmedämmung aus Mineralwolle geplant. Im Obergeschoss dominieren massive Holzinneiwände. Die Fassade besteht aus einer Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Eichenholz mit Alu-Deckschale sowie einer Dreischeiben-Sonnenschutzverglasung. Auch das neue Dach wird in Holzmassivbauweise ausgeführt.



Abbildung 14: Erweiterung Büro- und Verwaltungsgebäude AS-Bau Hof GmbH (Quelle: Lang Hügger Rampp GmbH)

Im Rahmen der Sanierung wird die Außenwand des Bestandsbaus nachträglich gedämmt. Die Dämmmaterialien und -dicken variieren dabei je nach Einsatzort und bestehenden Anforderungen. Die Perimeterdämmung im Untergeschoss wird mit 160 bis 260 mm dicken Polystyrol-Hartschaumplatten (WLG 035) realisiert.

Die Fassadendämmung wird mit Mineralwolle (WLG 035) mit einer Dicke von 280 bis 380 mm umgesetzt. Das Flachdach (Rasterdecke aus Stahlbeton) wird ebenfalls nachträglich oberseitig mit einer Gefällewärmedämmung aus Mineralwolle (WLG 035) und einer mittleren thermisch wirksamen Dicke von ca. 420 mm gedämmt. Die Bodenplatte im Erdgeschoss und die Bodenplatten der darüber liegenden Geschosse werden mit einer Fußbodenheizung versehen. Die Geschossdecken des Bestandsgebäudes im EG und OG erhalten einen Hohlboden, mit Calciumsilikatplatten als Trägerplatten für die Fußbodenheizung. Alle anderen Räume erhalten einen Heizestrich.

Während der frühen Planungsphase wurden bereits verschiedene Energieversorgungsvarianten in Bezug auf Heizwärme und Warmwasser, die vom IBH ausgearbeitet und vorgeschlagen wurden, lebenszyklusbasiert analysiert und bewertet. Dabei haben sich drei Varianten als sinnvoll herauskristallisiert, die weiterführend parallel zum Planungsprozess näher analysiert wurden.

Vergleich Energieversorgungsvarianten

Folgende drei Varianten wurden während des Planungsprozesses miteinander verglichen:

TABELLE 3: VARIANTE PELLETKESSEL – REFERENZVARIANTE (HAUPTKOMPONENTEN):

	Dimensionierung	Nutzungsdauer [a]
Pelletkessel	46 kW	20
Pelletbunker	22 m ³	50
Fußbodenheizung	900 m ²	50
Durchlauferhitzer	8 Stück	15
PV-Anlage	805 m ²	20

Bei der Variante Pelletkessel wird von einer jährlich zweimaligen Befüllung mit jeweils 10 Tonnen Pellets, ausgegangen.

TABELLE 4: VARIANTE LUFT-WASSER WÄRMEPUMPE – VARIANTE 2 (HAUPTKOMPONENTEN)

	Dimensionierung	Nutzungsdauer [a]
Wärmepumpe	46 kW	20
Fußbodenheizung	900 m ²	50
Durchlauferhitzer	8 Stück	15
PV-Anlage	868 m ²	20

TABELLE 5: VARIANTE SOLE-WASSER WÄRMEPUMPE – VARIANTE 3 (HAUPTKOMPONENTEN):

	Dimensionierung	Nutzungsdauer [a]
Wärmepumpe	46 kW	20
Erdsonden	10 Stück	50
Fußbodenheizung	900 m ²	50
Durchlauferhitzer	8 Stück	15
PV-Anlage	870 m ²	20

Auf einen Pufferspeicher wird in den beschriebenen Varianten aus Effizienzgründen verzichtet. Eine Pufferung wird durch die intelligente Steuerung des Mindestvolumenstroms durch den Fußbodenheizkreis ermöglicht. Zusätzlich zur Betrachtung der Hauptkomponenten wurde ein Aufschlag von 20 % (nach DGNB) miteinberechnet, um Leitungsrohre, Elektrokabel, etc. pauschal mit zu berücksichtigen (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB e.V.), 2018). Die PV-Fläche ist bei allen Varianten schon so dimensioniert, dass eine vollständige Kompensation der Treibhausgasemissionen und der nicht erneuerbaren Primärenergie, über den gesamten Lebenszyklus hinweg, realisiert wird. Für die Berechnung wurde eine 50-jährige Nutzungsphase des Gebäudes angesetzt, in der der Energiebedarf für die Heizung, Trinkwarmwasser (TWW), Beleuchtung, Raumlufttechnische Anlagen (RLT), Kühlung (nur bei Wärmepumpen Varianten), Hilfsenergien, Nutzerstrom und den Server bilanziert wurde.

Für die im Folgenden dargestellten Ergebnisse werden jeweils die Werte und Grafiken für das GWP präsentiert. Die Werte und Grafiken für PENRT zeigen die gleichen Tendenzen auf, wie die für das GWP. Das liegt daran, dass der lebenszyklusbasierte, nicht erneuerbare Primärenergiebedarf maßgeblicher Treiber für den Ausstoß von Treibhausgasen ist.

Der Vergleich des über den gesamten Lebenszyklus betrachteten GWPs (siehe Abbildung 15) der drei Energieversorgungsvarianten zeigt, dass die Pelletkessel-Variante um 7% besser abschneidet als die Luft-Wasser-Wärmepumpe. Das GWP für das Heizen in der Nutzungsphase bei der Pelletkessel-Variante ergibt sich dabei, laut Ökobaudat, hauptsächlich aus der technischen Trocknung und Produktion der Holzpellets sowie aus den durch die direkte Verbrennung bedingten Emissionen. Das GWP der beiden Wärmepumpen-Varianten ergibt sich aus der Nutzung des Stroms (deutscher Strom-Mix) zum Betrieb der Wärmepumpe. Zusätzlich kommen noch alle weiteren Energiebedarfe der bereits erwähnten Verbraucher hinzu. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe stellt letztendlich, in Bezug auf das GWP und PENRT, die schlechteste Variante dar. Das liegt mitunter an den Erdkollektoren, die zusätzlich, im Vergleich zur Luft-Wasser-Wärmepumpe, installiert werden müssen.

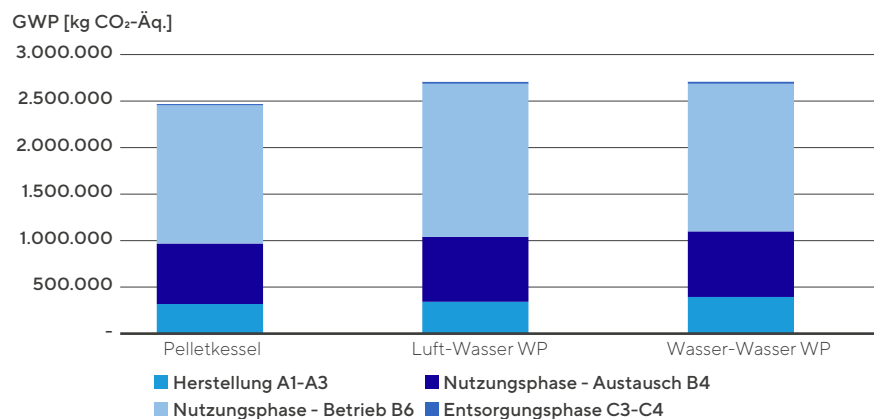


Abbildung 15: Lebenszyklusbasiertes GWP der drei betrachteten Energieversorgungsvarianten, inklusive Nutzungsphase (50 Jahre), bilanziert mit deutschem Strom-Mix (eigene Darstellung)

Da die Nutzungsphase mit 49 bis 52% rund die Hälfte des gesamten GWPs ausmacht, wird diese, wie in Abbildung 16 dargestellt, in die einzelnen Anteile aufgeschlüsselt. Dabei wird deutlich, dass nicht unmittelbar das Heizen und Kühlen (8–11% und 4,6–4,7%) die ausschlaggebenden Faktoren sind. Vor allem die für den Betrieb des Servers erforderliche elektrische Energie, inklusive Kühlung, (30,7–34,1%) und der Nutzerstrom (20,4–22,7%) machen den Großteil an den Emissionen aus.

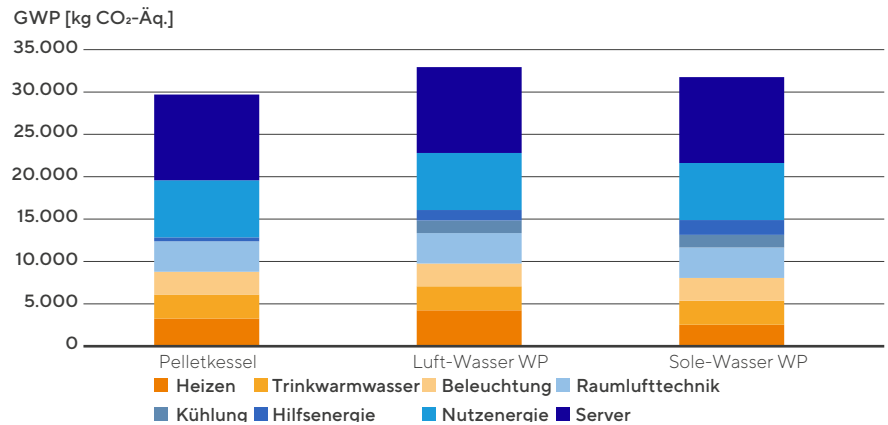


Abbildung 16: Aufschlüsselung der Nutzungsphase der drei verschiedenen Energieversorgungsvarianten nach Energieverbrauchern, bezogen auf ein Jahr (eigene Darstellung)

Wird der Strom für die Nutzungsphase (B6) aus Erneuerbaren Energien bereitgestellt, dann sinkt das auf den Lebenszyklus bezogene GWP und die PENRT, im Vergleich der Varianten, um 68 bis 72 % (siehe Abbildung 17). Das liegt daran, dass bei der Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien unmittelbar kein GWP und PENRT anfällt. Lediglich die Herstellung, Errichtung, Nutzung und Entsorgung der Anlagentechnik wird dabei mitbilanziert. Hinzu kommt, dass die für die lebenszyklusbasierte Kompensation des GWP und PENRT eine geringere PV-Fläche benötigt wird (siehe Kapitel 3.5.1), was zu geringeren GWP- und PENRT-Werten führt. Die Sole-Wasser Wärmepumpe weist lebenszyklusbasiert den höchsten Wert für GWP und PENRT auf. Wie bereits erwähnt, ist dies auf den höheren Konstruktions- bzw. Materialaufwand der Erdsonden zurückzuführen. Hierdurch entstehen größere Umweltwirkungen in der Herstellungsphase. Zudem fällt auf, dass die Nutzungsphase (B6) der Pelletkessel-Variante stärker ins Gewicht fällt, als bei den anderen Varianten. Das liegt daran, dass eine technische Trocknung der Holzpellets vor der Verbrennung im Pelletkessel vorgesehen ist und der Betrieb des Kessels einen höheren Strombedarf als Hilfsenergie benötigt, als die Wärmepumpen-Varianten.

Bei Nutzung Erneuerbarer Energien in der Betriebsphase (B6) fällt die Nutzungsphase (B4), bilanziert über den gesamten Lebenszyklus, am schwersten ins Gewicht. Darauf haben wiederum die Austauschzyklen der einzelnen Komponenten der TGA einen maßgeblichen Einfluss. Auf Grund dessen lohnt es sich, auf qualitativ hochwertige und wertbeständige Komponenten zu setzen, um die Austauschzyklen so gering wie möglich zu halten.

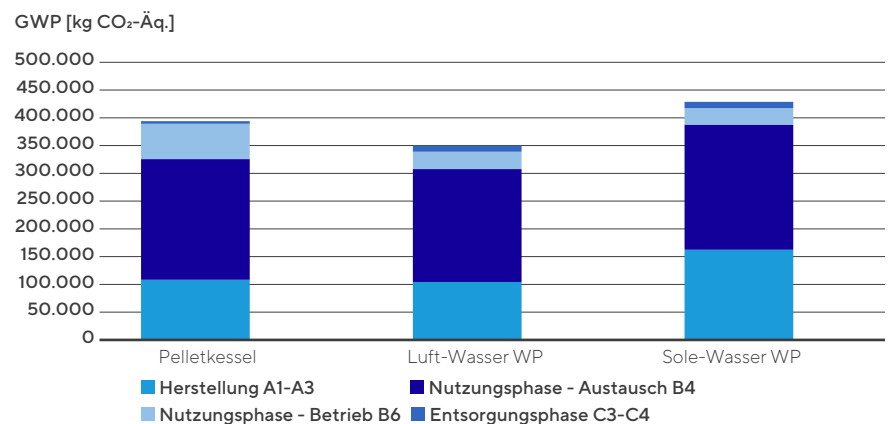


Abbildung 17: Lebenszyklusbasiertes GWP der drei betrachteten Energieversorgungsvarianten, inklusive Nutzungsphase (50 Jahre), bilanziert mit Strom aus erneuerbaren Energien (eigene Darstellung)

3.1.4. KOMPENSATION DES LEBENSZYKLUSBASIER- TEN GWP UND PENRT

Die Kompensation des lebenszyklusbasierten GWP und PENRT wird anhand einer PV-Anlage realisiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch das Erzeugen und Einspeisen von regenerativem Strom aus der PV-Anlage der AS-Bau Hof GmbH der deutsche Strom-Mix im Netz „verdrängt“, bzw. „kompensiert“ wird.

Dadurch ergibt sich für jede, aus der PV-Anlage in das deutsche Stromnetz eingespeiste Kilowattstunde [kWh] Strom eine Kompensation an GWP und PENRT. Die Kompensation des GWP und der PENRT erfolgt in Höhe der Werte des GWP und PENRT, die für den Verbrauch einer Kilowattstunde Strom aus dem deutschen Strom-Mix anfallen würde. Die Werte für das GWP und PENRT kommen dabei ebenfalls aus der Ökobaudat-Datenbank. Das lebenszyklusbasiert anfallende GWP und PENRT (siehe Tabelle 6) bildet die Basis für die Berechnung der Größe der PV-Anlage, die für die Kompensation dieser Werte über 50 Jahre benötigt wird. Dabei werden ebenfalls die Graue Energie und die Grauen Emissionen berücksichtigt.

Zur Kompensation, des über den gesamten Lebenszyklus (inkl. der Berücksichtigung von Nutzungsphase und den Nutzungsdauern) anfallenden GWP und PENRT, der Baukonstruktion (vgl. Kapitel 3.1.3) und der TGA (siehe Tabellen 3 bis 5), werden für die Varianten „Pelletkessel“, „Luft-Wasser Wärmepumpe“ und „Sole-Wasser Wärmepumpe“, folgende PV-Anlagengrößen benötigt:

- Pelletkessel: 805 m²
- Luft-Wasser Wärmepumpe: 868 m²
- Sole-Wasser Wärmepumpe: 870 m²

Aus Sicht des gesamten GWP und PENRT stellt – bezogen auf den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes – die Variante „Sanierung des Bestandsgebäudes plus einem Erweiterungsneubau mit einem Pelletkessel als Wärmeversorger“ die in ökologischer Hinsicht beste Ausführung dar.

Wird der Strom für die Nutzungsphase (B6) aus Erneuerbaren Energien bereitgestellt, reduziert sich die PV-Fläche zur Kompensation deutlich auf 259 m² für die Pelletkessel-Variante, 248 m² für die Luft-Wasser Wärmepumpen-Variante und 267 m² für die Sole-Wasser Wärmepumpen-Variante. Die benötigte PV-Fläche hat sich somit, im Vergleich der Varianten, um 68 bis 71% reduziert.

TABELLE 6 LEBENSZYKLUSBASIERTES GWP UND PENRT DER BAUKONSTRUKTION MIT TGA UND NUTZUNGSPHASE

	GWP [kg CO₂-Äq.]	PENRT [MJ]
Sanierung + Erweiterungsbau mit Pelletkessel	3.054.220	38.483.006
Sanierung + Erweiterungsbau mit Luft-Wasser WP	3.292.722	41.571.965
Sanierung + Erweiterungsbau mit Sole-Wasser WP	3.293.517	41.984.249

Neben wirtschaftlichen Aspekten und unter Berücksichtigung der Ergebnisse zum GWP und PENRT sowie der Einfachheit in der Installation und dem Betrieb der Anlage hat sich der Bauherr für die Variante der Luft-Wasser-Wärmepumpe entschieden. Zudem legt der Bauherr darauf Wert, den Strombedarf in der Nutzungsphase (B6), mit Strom aus Erneuerbaren Energien zu decken.

Das für die Variante Sanierung mit Erweiterungsbau und Luft-Wasser-WP mit Luft-Wasser-WP (Strom aus deutschem Strom-Mix) anfallende lebenszyklusbasierte GWP entspricht rund 15,7 Mrd. Personenkilometer mit dem Flugzeug (201g Treibhausgase pro geflogenem Personenkilometer). Das wiederum entspricht rund 6.585 Fichten, die über 50 Jahre hinweg Kohlenstoff beim Wachstumsprozess einspeichern müssten.

KOMPENSATION DES PENRT/GWP ÜBER DEN LEBENSZYKLUS VON 50 JAHREN

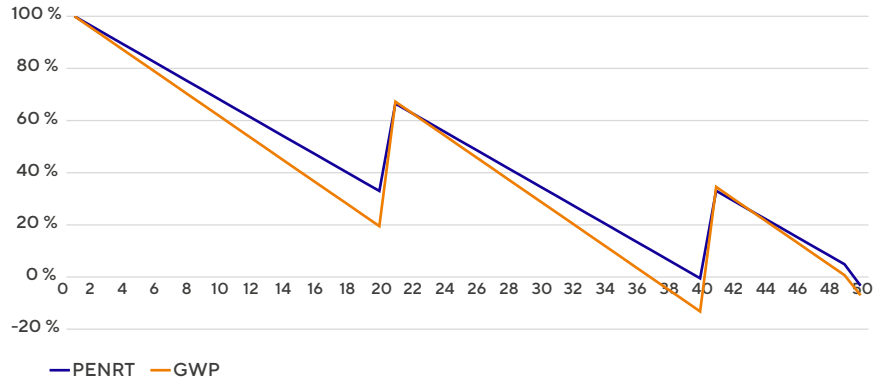


Abbildung 18: Kompensation des lebenszyklusbasierten PENRT und GWP der Variante Sanierung + Erweiterungsbau mit Luft-Wasser-WP, über 50 Jahre Gebäudenutzung (eigene Darstellung).

Die Kompensation des lebenszyklusbasierten PENRT und GWP, der Variante Sanierung mit Erweiterungsbau und Luft-Wasser-WP, verläuft, betrachtet über die 50 Jahre Gebäudenutzung, in einer über jeweils 20 Jahre abfallenden Kurve, mit kurzen, starken Anstiegen nach den jeweils 20 Jahren (siehe Abbildung 18). Betrachtet man den Zeitabschnitt zwischen Jahr 1 und 20, dann ist zu erkennen, dass die Kurven für die Kompensation des PENRT und GWP stetig sinken, was sich aus der bereits beschriebenen Einspeisung, des durch die PV-Anlage erzeugten Stroms in das deutsche Stromnetz, ergibt. Dabei ist anzumerken, dass die Kompensationsrechnung bei einer Eigennutzung des PV-Stroms auf gleiche Weise berechnet werden kann. Denn durch die Eigennutzung des PV-Stroms muss für den Anteil der Eigennutzung kein Strom aus dem deutschen Stromnetz bezogen werden, wofür PENRT und GWP anfallen würde. Der Sprung in den Kurven, zwischen Jahr 20 und 21, ergibt sich aus dem Austausch der PV-Anlage und der Wärmepumpe sowie deren Komponenten. Der gleiche Kurvenverlauf zeigt sich erneut zwischen Jahr 21 und 41, wohingegen im 40. Jahr der Gebäudenutzung eine PENRT-Neutralität und eine GWP-Einsparung erzielt werden konnte. Durch den erneuten Austausch, der PV-Anlage und Wärmepumpe sowie derer Komponenten in Jahr 40, springt die Kurve jedoch wieder nach oben. Im Jahr 50 erfolgt der theoretische Gebäudeabriss mit Entsorgung der Baumaterialien. Deshalb fällt hier die Kompensation geringer aus, was in einem etwas flacheren Kurvenverlauf resultiert. Letztendlich wird im Jahr 50 eine Einsparung an PENRT, also ein Plus an Energie und eine Einsparung an GWP, also mehr als eine Treibhausgarneutralität, erreicht.

3.2. LEBENSZYKLUSKOSTEN

Während des Planungsprozesses wurden zwei Lebenszykluskostenbetrachtungen (engl. Life Cycle Costing – LCC) durchgeführt:

- LCC der Wärmeerzeugungsvarianten: Berücksichtigt wurden die Herstellungskosten (LZPH A1-A3), Nutzungskosten (LZPH B2: nach BNB Kriteriensteckbrief ohne Reinigung), B3 und B4) sowie die Kosten für den betrieblichen Energieeinsatz (LZPH B6)
- LCC der Baukonstruktion mit der Ausführungsvariante Sanierung mit Erweiterungsbau: Berücksichtigt wurden dabei die Herstellungskosten (LZPH A1-A3), die Kosten für Reinigung (LZPH B2), Kosten für Inspektion und Wartung (LZPH B2), regelmäßige Instandsetzungskosten (LZPH B3), Kosten für Austausch und Ersatz (unregelmäßige Instandsetzungskosten – LZPH B4)

3.2.1. LCC DER WÄRMEERZEUGUNGSVARIANTEN

Die LCC der Wärmeerzeugungsvarianten wurde in der Vorentwurfsphase parallel zu deren Ökobilanzierung geführt, um eine ganzheitliche Bewertung zu gewährleisten. Abbildung 19 zeigt insgesamt drei Varianten, die vom Planungsteam vorgeschlagen wurden:

- PV-Anlage in Kombination mit einer Pelletheizung (Referenz-Variante)
- PV-Anlage in Kombination mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (Variante 2)
- PV-Anlage in Kombination mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe (Variante 3)

Die Berechnung der Lebenszykluskosten (Nettokosten) erfolgt nach der Barwertmethode. Bei der Barwertmethode werden Energie- und Baupreissteigerungen und Diskontierungszinsen über eine Lebensdauer von 50 Jahren mitbetrachtet. Dadurch kann der momentane Wert, den zukünftige Kosten in den kommenden 50 Jahren besitzen werden, bestimmt werden. Bei den Nutzungskosten (Phase B2-B4 und B6) und Energiepreissteigerungen wurden zwei Ansätze verfolgt: zum einen der Ansatz nach BNB (Bundesministerium für Umwelt - Naturschutz - Bau und Reaktorsicherheit, 2015), und zum anderen der Ansatz nach VDI 2067, Tabelle A2-A6 unter Berücksichtigung der tatsächlichen Energiepreissteigerung der Jahre 2008 bis 2017.

LCC DER WÄRMEERZEUGUNGSVARIANTEN - LEBENSZYKLUSKOSTEN DER ENERGIEVERSORGUNGSKONZEPTE ÜBER DEN LEBENSZYKLUS VON 50 JAHREN

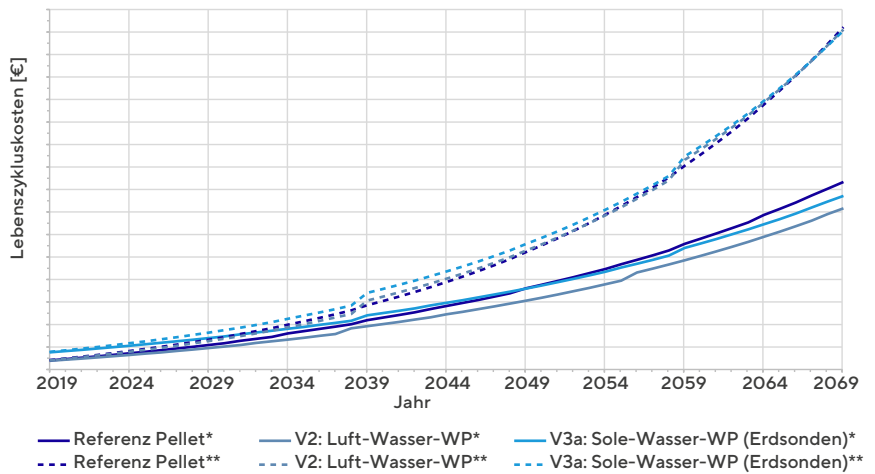


Abbildung 19: Vergleichende Analyse der Lebenszykluskosten der Wärmeerzeuger (eigene Darstellung)

* Statistisch erhobene Energiepreissteigerung und Strompreis abzgl. der Einspeisevergütung, Nutzungsdauern und Kosten für Wartung und Instandsetzung nach VDI

** Energiepreissteigerung nach BNB (ohne Einspeisevergütung, Nutzungsdauern und Kosten für Wartung und Instandsetzung nach BNB)

Abbildung 19 zeigt, dass die Lebenszykluskosten der Wärmeerzeuger wesentlich durch die Energiekosten bestimmt bzw. durch die Preissteigerungsraten beeinflusst werden. Dazu kommen Kosten für den Austausch der Anlagen nach den durchschnittlichen Nutzungsdauern (Kurvensprünge). Für die Nutzungsdauern werden, wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, die Werte des BNB angesetzt. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe ist zwar in der Anschaffung am teuersten, im Laufe der Lebensdauer erzeugt aber die Pelletheizung die größten Kosten. Die Variante mit der Luft-Wasser-WP ist lebenszyklusbasiert am günstigsten, was ebenfalls ein maßgeblicher Punkt bei der Entscheidung des Bauherrn für die Luft-Wasser-Wärmepumpe war. Zusätzlich zu den Komponenten der Wärmeerzeuger muss, wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, eine PV-Anlage zur Kompensation des lebenszyklusbasierten PENRT und GWP mitberücksichtigt werden.

LCC DER PV-ANLAGE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VERSCHIEDENER EIGENNUTZUNGSANTEILE UND EINSPEISEVERGÜTUNGEN ÜBER DEN LEBENSZYKLUS VON 50 JAHREN

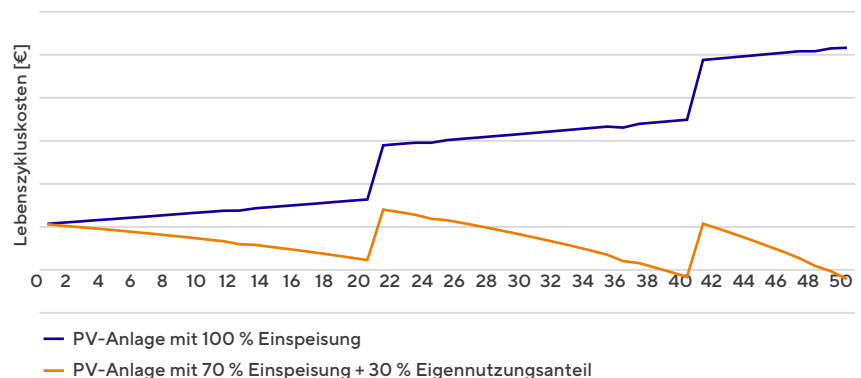


Abbildung 20: LCC der PV-Anlage, inklusive Austauschzyklen, gerechnet über 50 Jahre (eigene Darstellung)

Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten der PV-Anlage (siehe Abbildung 20) wird deutlich, dass bei einer 100 %-igen Einspeisung des eigens erzeugten PV-Stroms, steigende Kosten, über 50 Jahre Gebäudenutzung, zu verzeichnen sind. Das liegt daran, dass mit den aktuellen Kosten für die PV-Anlage, bei konservativer Rechnung und unter Berücksichtigung von Montage, Wechselrichtern und Kabeln, die durch die Anlage erzeugte Kilowattstunde Strom mehr kostet, als die Firma AS-Bau Hof GmbH für eine Kilowattstunde eingespeisten Strom an Vergütung bekommen würde. Eine 100 %-ige Netzeinspeisung ist unter diesen Voraussetzungen, betrachtet über den gesamten Lebenszyklus, nicht wirtschaftlich. Wird jedoch ein Eigennutzungsanteil an PV-Strom von 30 % realisiert, wie es bei der AS-Bau Hof GmbH angestrebt wird, amortisieren sich die investierten Kosten über den Lebenszyklus hinweg. Die PV-Anlage lohnt sich somit bei einem 30 %-igen Eigennutzungsanteil sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus ökologischer und energetischer Sicht. Dennoch muss, durch den sukzessiven Rückgang der gesetzlichen Einspeisevergütungen und die ansteigenden Strompreise der Eigennutzungsanteil in Zukunft steigen, um PV-Anlagen wirtschaftlich zu betreiben, weshalb diesbezüglich über Speichertechnologien nachgedacht werden muss, auch wenn Speichertechnologien derzeit technisch, ökologisch und ökonomische noch nicht attraktiv genug erscheinen (Schröder & Fraunhofer IRB-Verlag, 2018):

- Li-Ionen-Akkus sind noch relativ teuer. Mit einer Lebensdauer von 20 Jahren sind pro Jahr 200 bis 250 Ladezyklen möglich. Der Wirkungsgrad liegt bei bis zu 95 %. Der Wirkungsgrad definiert das Verhältnis zwischen entnommener und eingeladener Energie.
- Blei-Akkus sind etwas billiger, haben aber eine geringere maximale Effizienz von 80 bis 85 % und weniger mögliche Ladezyklen. Der Wirkungsgrad liegt, auf Grund der relativ schnellen Selbstentladung der Batterien und der geringeren maximalen Entladetiefe, bei 50 bis 60 %.

Aktuell muss also noch auf eine gleichmäßige Stromerzeugung zur Erhöhung der direkten Verfügbarkeit von Eigenstrom geachtet werden.

3.2.2. LCC DER BAUKONSTRUKTION - AUSFÜHRUNGSVARIANTE

Für die Ausführungsvariante Sanierung mit Erweiterungsbau wurde analog zur LCA eine LCC der Baukonstruktion durchgeführt. Die Grundlagen dazu können Kapitel 2 entnommen werden. Als Basis für die LCC dient die Massenermittlung der Baukonstruktion, die zuvor schon für die LCA durchgeführt wurde.

Abbildung 21 zeigt die prozentualen Anteile der Lebenszykluskosten der Phasen Herstellung und Nutzung. Es wird deutlich, dass die Herstellungsphase des Gebäudes für rund 50 % der lebenszyklusbasierten Kosten verantwortlich ist. Der Austausch fällt mit 19,7 % ins Gewicht, jedoch sind die Kosten stark von der angesetzten Lebensdauer der einzelnen Materialien abhängig. Hierbei muss beachtet werden, dass die Lebensdauern der bilanzierten Materialien unter Umständen signifikant von realen Austauschzyklen abweichen können. Darüber ist die Reinigung mit 18,5 % ein ebenfalls nicht zu verachtender Kostenfaktor. Es lohnt sich somit auf wertbeständige, leicht zu reinigende Materialien zu setzen, um die Lebenszykluskosten zu reduzieren. Die Kosten der Entsorgungsphase können (noch) nicht allgemeingültig ermittelt werden, da hierzu spezifische Kostenkennwerte fehlen bzw. Entsorgungskosten regional und zeitlich stark schwanken können.

LEBENSZYKLUSKOSTEN DER BAUKONSTRUKTION (HERSTELLUNGS- UND NUTZUNGSPHASE) TOTAL - BARWERT

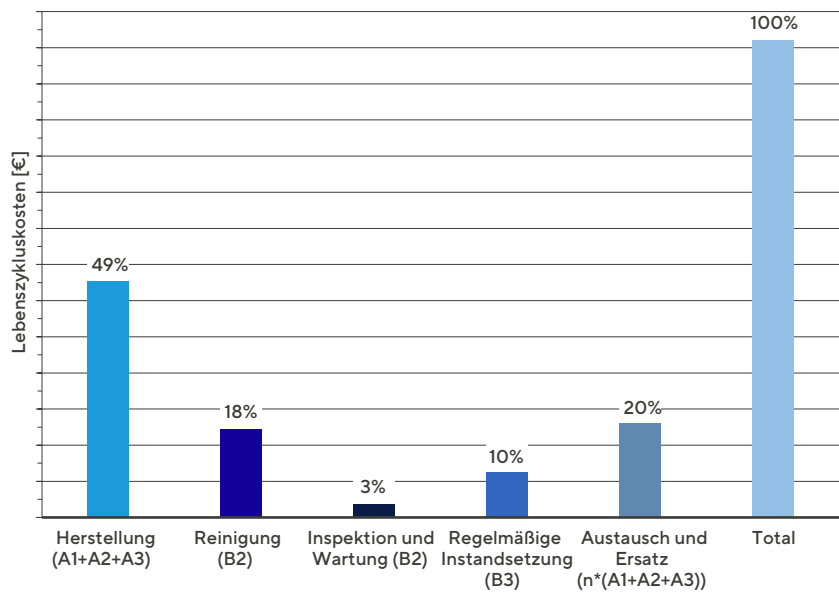


Abbildung 21: Prozentuale Verteilung der Lebenszykluskosten der Baukonstruktion für Herstellung und Nutzung des Gebäudes - Barwert der Nettokosten (eigene Darstellung)

Der Vergleich mit der ausgeführten Energieversorgungsvariante Luft-Wasser-Wärmepumpe (siehe Abbildung 19) zeigt, dass die Herstellungs- und Nutzungskosten der TGA (ohne Phase B6) nach BNB-Kriterien rund 27 % der Kosten für die Baukonstruktion betragen. Insgesamt stellt die Phase B6 über den Lebenszyklus hinweg den größten Kostenfaktor dar. Die Betriebskosten betragen je nach Energiepreissteigerungsszenario über 50 Jahre bis zu 122 % der Kosten für die Baukonstruktion. Deshalb ist es zur Senkung der Betriebskosten zwingend erforderlich, effiziente und sparsame Energieerzeuger einzusetzen und möglichst niedrige Stromkosten anzustreben. Erreicht werden kann dies durch die Eigennutzung des durch die PV-Anlage erzeugten Stroms.

3.3. SZENARIEN AUSFÜHRUNGSVARIANTE

Die letztendliche Ausführungsvariante für die Baukonstruktion und die Technische Gebäudeausrüstung werden weiterführend hinsichtlich vier verschiedener LCA-Szenarien untersucht, die zusammen mit dem Bauherrn definiert wurden. Die Szenarien wirken sich ebenso maßgeblich auf die Ergebnisse der LCC aus. Diese Ergebnisse werden im Folgenden ebenfalls dargestellt. Das bei den folgenden Szenarien berücksichtigte Recycling, bzw. die Wiederverwendung/-verwertung, beinhaltet Gutschriften für das GWP und PENRT (Phase D), die bei der Berechnung der LCA des Gebäudes miteingerechnet werden. Dabei wird je nach LCA-Datensatz aus der Ökobaudat-Datenbank für jedes Baumaterial, bzw. Bauteil ein Recycling, also die Aufwertung und Wiederverwendung, eine direkte Wiederverwendung, oder eine stoffliche, bzw. thermische Wiederverwertung berücksichtigt.

LCA-Szenarios:

- Szenario 1: LCA mit Austauschzyklen nach Norm und ohne Gutschriften für das Recycling/Wiederverwendung/-verwertung.
- Szenario 2: LCA mit Austauschzyklen nach Norm und mit Gutschriften für das Recycling/Wiederverwendung/-verwertung.

- Szenario 3a: LCA mit Austauschzyklen nach Norm und ohne Gutschriften für das Recycling/Wiederverwendung/-verwertung und mit nur einem Austauschzyklus der PV-Anlage über den Lebenszyklus.
- Szenario 3b: LCA mit Austauschzyklen nach Norm und ohne Gutschriften für das Recycling/Wiederverwendung/-verwertung und mit nur einem Austauschzyklus der PV-Anlage und einer um fünf Jahre verspäteten Inbetriebnahme der PV-Anlage (Laufzeit PV-Anlage von 45 Jahren).

TABELLE 7 ERGEBNISSE SZENARIENBETRACHTUNG DER AUSFÜHRUNGSVARIANTE

Szenarien	GWP [kg CO ₂ -Äq.]	PENRT [MJ]	PV-Fläche [m ²]	LCC Gesamtkosten [%]
Szenario 1	3.449.408	44.068.170	921	100
Szenario 2	3.321.900	41.725.683	875	100
Szenario 3a	2.968.076	37.243.214	782	91,6
Szenario 3b	3.074.007	38.591.952	800	91,8

Für die Indikatoren GWP und PENRT werden die absoluten und nicht die spezifischen, auf den Quadratmeter bezogenen Werte angegeben, da die NGF für alle Szenarien die gleiche ist (siehe Tabelle 7).

Dass die PV-Fläche um 6,11% größer ist als im vorherigen Kapitel ergibt sich daraus, dass Komponenten, wie z.B. die Rohrleitungen der PV-Anlage, etc. für diese Berechnungen explizit mitbetrachtet wurden. Somit ergibt sich ein höherer Wert für das GWP und PENRT, also auch für die PV-Kompensationsfläche.

GWP [kg CO₂-Äq.]

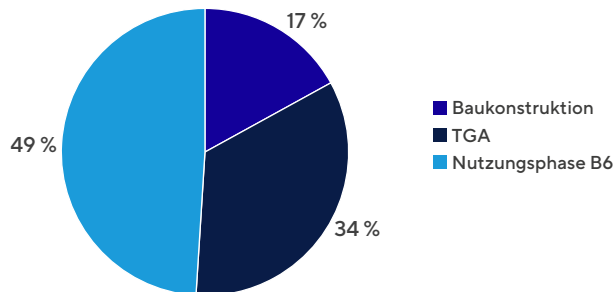


Abbildung 22: Aufteilung des lebenszyklusbasierten GWP für Baukonstruktion, TGA und Nutzungsphase Szenario 1 (eigene Darstellung)

Bei der Verteilung des lebenszyklusbasierten GWPs (Szenario 1) von der Baukonstruktion, der TGA und der Nutzungsphase (B6) (siehe Abbildung 22) wird deutlich, dass trotz des hohen Energiestands der Sanierung und des Erweiterungsbaus (KfW 55) die Nutzungsphase mit rund 50 % den größten Anteil ausmacht. An zweiter Stelle kommt die TGA mit 34%. Ursache hierfür ist die Größe der PV-Anlage von 921 m², inkl. zweier Austauschzyklen, die für 63 % des für die TGA anfallenden GWPs verantwortlich ist. Die Wahl des Zelltypen der PV-Anlage, und die damit variierende Nutzungsdauer der PV-Anlage, muss bei der finalen Auswahl der Komponenten der PV-Anlage unbedingt berücksichtigt werden und kann einen großen Einfluss auf das lebenszyklusbasierte GWP und PENRT haben. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass zur Kompensation des lebenszyklusbasierten GWP und PENRT eines Quadratmeters PV-Fläche (zwei Austauschzyklen), rund 0,26 m² PV-Fläche benötigt wird. Somit ist die PV-Anlage insgesamt mit rund 26 %, einer der größten GWP-Verursacher, aber auf der anderen Seite zur Kompensation des lebenszyklusbasierten PENRT und GWP elementar wichtig. Würde der Strom für die Nutzungsphase (B6) aus Erneuerbaren Energien bezogen, dann würde die

zur Kompensation der Emissionen und zur Realisierung des Plusenergiegebäudes benötigte PV-Fläche von 921 m² auf 262 m² sinken. Circa die Hälfte der 262 m² großen PV-Fläche würde auf dem Dach des Erweiterungsbaus Platz finden und könnte dort installiert werden. Dadurch, dass die Werte für das GWP und PENRT in der Nutzungsphase ebenfalls stark gesunken sind, ist die PV-Anlage, relativ gesehen, immer noch mit rund 38 % einer der größten GWP-Verursacher.

Der Vergleich der Szenarien 1 und 2 zeigt, dass durch das Miteinbeziehen der Gutschriften für das Recycling (Phase D) bzw. die Wiederverwendung/-verwertung aller betrachteten Baumaterialien und Bauteile, rund 4 % des GWP und 5 % des PENRT eingespart werden können. Dabei ist jedoch zu klären, ob die Gutschriften dem abgerissenen Bestandsgebäude, oder dem, zum Teil aus den recycelten Materialien neu gebauten Gebäude, angerechnet werden können. Dadurch, dass es in der Wissenschaft noch keinen Konsens in Bezug auf diese Allokationsproblematik gibt, wird die Phase D separat betrachtet und fließt nicht pauschal in die Berechnung einer LCA mit ein. Die LCC Gesamtkosten bleiben gleich, da die Phase D, wie bereits erwähnt, bei der Berechnung der LCC nicht mitbetrachtet wird.

Der Vergleich der Szenarien 1 und 3a zeigt, dass eine Verlängerung der Lebensdauer der PV-Anlage von 20 auf 25 Jahre, also nur einem Austauschzyklus während des Gebäudelebenszyklus, in einer Verringerung des GWP um rund 14 % und PENRT um rund 15 % resultiert. Dadurch verringern sich die LCC-bezogenen Gesamtkosten um 8,4 %.

Durch die verspätete Inbetriebnahme der PV-Anlage um 5 Jahre in Szenario 3b ergibt sich eine verkürzte Zeit von 45 Jahren zur Kompensation des lebenszyklusbasierten PENRT und GWP. Somit wird im Vergleich zur Variante 3a eine 18 m² größere PV-Fläche benötigt, trotz nur einmaligem Austausch der Anlage über den gesamten Lebenszyklus. Die erhöhte PV-Fläche macht sich lebenszyklusbasierten Gesamtwert des PENRT und GWP bemerkbar. Im Vergleich zu Variante 3a liegt das GWP der Variante 3b um ca. 6 % und das PENRT um ca. 4 % höher. Bei den LCC Gesamtkosten macht sich die verspätete Inbetriebnahme und die dadurch ausfallenden Einspeisevergütungen nur sehr geringfügig bemerkbar, da die 18 m² größere PV-Fläche dies kompensiert.

IV. EINFLUSS DER BAUKONSTRUKTION AUF DAS LASTMANAGEMENT

Die Art und die bauphysikalischen Eigenschaften der Baukonstruktion beeinflussen den Heiz- und Kühlenergiebedarf sowie die Qualität des Raumklimas. Ziel des folgenden Kapitels ist es, den Einfluss der Baukonstruktion speziell für den Sommer- und Winterfall zu analysieren und die Effekte darzustellen. Die zu beantwortende Frage ist, wie die Baukonstruktion zur Reduktion des Energiebedarfs und zur Steigerung der Qualität des Raumklimas beitragen kann.

4.1. GRUNDLAGEN DER THERMISCHEN GEBÄUDESIMULATIONEN

Die Grundlagen unterteilen sich in die Definition der untersuchten Zonen, in die Auflistung der Technischen Gebäudeausrüstung und die Auswahl der untersuchten Kenngrößen.

4.1.1. UNTERSUCHTE ZONEN

Durchgeführt werden die Untersuchungen anhand von zwei exemplarischen Büroräumen. Zone 1 ist ein nach Süd-West ausgerichtetes im Altbau; Zone 2 ist ein nach Süd-Osten ausgerichtetes Büro im Erweiterungsbau (siehe Abbildung 23). Die baulichen Kenngrößen der Zonen sind in Tabelle 8 erläutert.

TABELLE 8 KENNGRÖSSEN DER UNTERSUCHTEN ZONEN

	Netto- grundfläche	Nettovolumen	Lichte Raumhöhe	Fassadenbezo- gener Fenster- flächenanteil
Zone 1	29,6 m ²	80,4 m ³	2,68 m	53 %
Zone 2	53,9 m ²	173,0 m ³	3,21 m	100 %



Abbildung 23: Darstellung der untersuchten Zonen (eigene Darstellung)

4.1.2. TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG

Die Beheizung des Bestandsgebäudes erfolgte bisher mit einem Öl-Brennwertkessel. Im Zuge der Sanierung und der Umstellung auf erneuerbare Energiequellen kommt nun zur Beheizung und Kühlung des Gebäudes eine mit Solarstrom betriebene Luft-Wasser-Wärmepumpe zum Einsatz. Für Sanitär- und Besprechungsräume wurde zudem eine Abluftanlage umgesetzt. Die wichtigsten Kennwerte werden nachfolgend dargestellt:

Heizung und Kühlung

- Wärmeerzeugung Luft-Wasser-Wärmepumpe mit 45 kW
- Übergabesystem Fußbodenheizung, Systemtemperaturen 35/28 °C
Fußbodenkühlung, Systemtemperaturen 16/19 °C
- Wärmespeicherung Heizungspufferspeicher mit 1.000 l Volumen

Raumlufttechnik

- Anlage Zu- und Abluftanlage
- Wärmerückgewinnung WRG >75 %
- Regelung Konstantvolumenstrom
- Lüfterheizung Zulufttemperierung

4.1.3. UNTERSUCHTE KENNGRÖSSEN

Ziel dieser Parameterstudie ist es, den Einfluss der Baukonstruktion auf das Lastmanagement des Gebäudes zu untersuchen. Zum besseren Verständnis werden die Einflüsse mit Hilfe des jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarfs in Kilowattstunden [kWh] sowie mittels der operativen Temperatur in Grad Celsius [°C] bzw. des Verlaufs der operativen Temperatur verdeutlicht. Mit Hilfe des Heiz- und Kühlenergiebedarfs lassen sich ganzheitliche Aussagen über das Gebäude, bezogen auf ein komplettes Jahr, treffen. Die operative Temperatur stellt die gefühlte Temperatur im Raum unter Berücksichtigung der Oberflächentemperaturen der Umgebungsflächen, dar.

4.2. VORUNTERSUCHUNGEN

Um aufzuzeigen, wann eine Erhöhung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit energetisch sinnvoll ist, wurden im Rahmen von Voruntersuchungen diverse Varianten hinsichtlich Nachtlüftung und aktiver Kühlung untersucht. Untersucht wurden folgende Varianten:

V1: Ohne aktive Kühlung und ohne Nachtlüftung

V2: Mit aktiver Kühlung und ohne Nachtlüftung

V3: Mit Nachtlüftung und ohne aktiver Kühlung

V4: Mit aktiver Kühlung und mit Nachtlüftung

Dabei zeigt sich, dass eine Erhöhung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit nur dann sinnvoll ist, wenn eine Nachtlüftung vorhanden ist. Exemplarisch ist dies anhand der operativen Temperatur für Zone 2 in den Abbildung 24 bis Abbildung 26 dargestellt. Zusammenfassend zeigt sich folgendes:

- Der Verlauf der operativen Temperatur ändert sich in Abhängigkeit der Bauart nicht, wenn keine Nachtlüftung vorhanden ist
- Die maximale operative Temperatur kann durch eine Erhöhung der Wärmespeicherfähigkeit gesenkt werden
- Unter Berücksichtigung einer Nachtlüftung reduziert sich die maximale operative Temperatur bei einer schweren Bauart deutlich
- Unter Berücksichtigung einer Nachtlüftung und einer schweren Bauart liegt die operative Temperatur für den untersuchten Zeitraum unterhalb von 26 °C. Die Temperatur von 26 °C gilt laut Arbeitsstättenrichtlinie (ASR 3.5) als Maximaltemperatur, die nicht überschritten werden soll (ASR A3.5, 2018).
- Unter Berücksichtigung einer Nachtlüftung und einer leichten Bauart liegt die operative Temperatur stellenweise deutlich oberhalb von 26 °C. Eine aktive Kühlung zur Realisierung eines akzeptablen Raumklimas ist daher notwendig

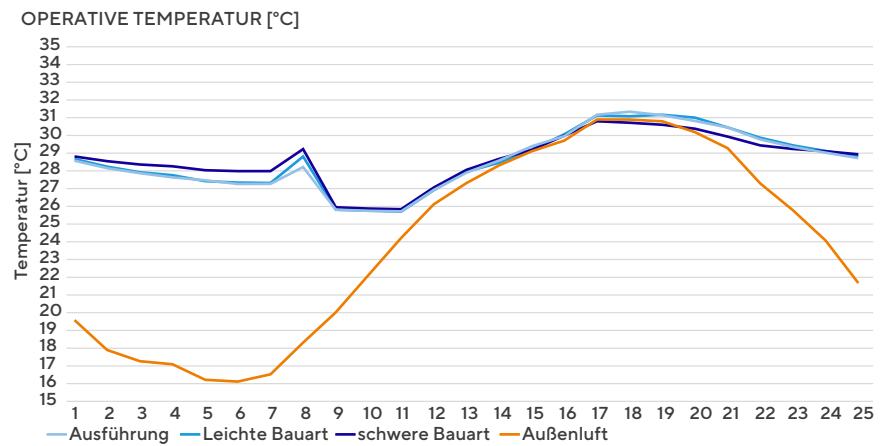


Abbildung 24: Verlauf der operativen Temperatur in Zone 2 unter Berücksichtigung verschiedener Bauarten für Variante V1 - Ohne aktive Kühlung und ohne Nachtlüftung (eigene Darstellung)

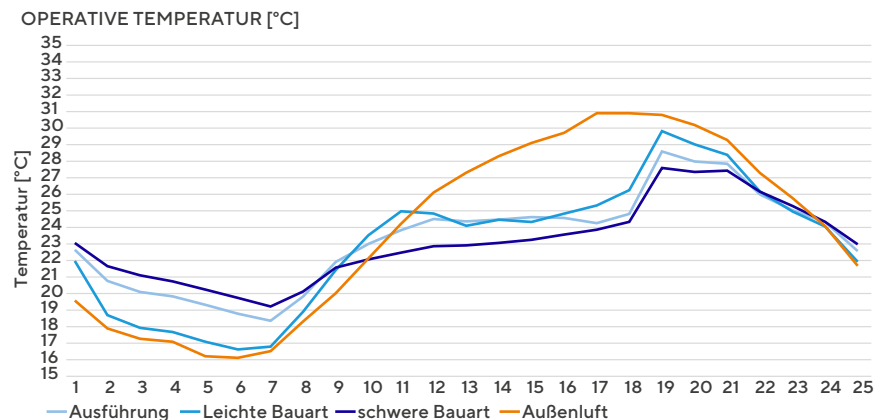


Abbildung 25: Verlauf der operativen Temperatur in Zone 2 unter Berücksichtigung verschiedener Bauarten für Variante V3 - Mit Nachtlüftung und ohne aktiver Kühlung (eigene Darstellung)

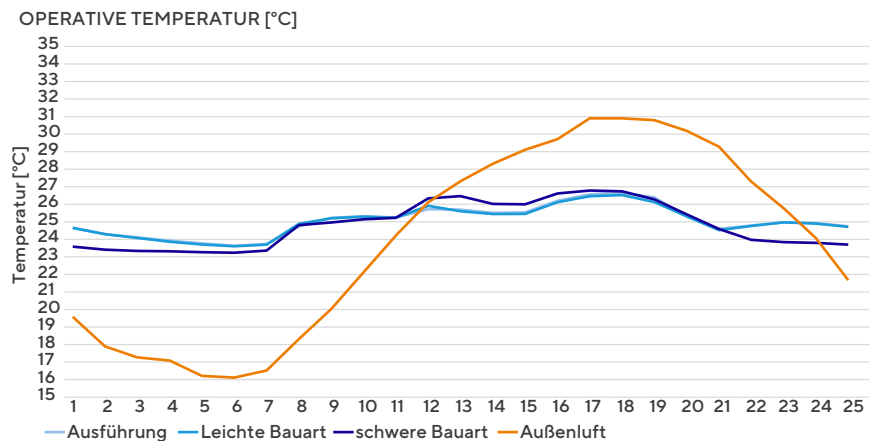


Abbildung 26: Verlauf der operativen Temperatur in Zone 2 unter Berücksichtigung verschiedener Bauarten für Variante V2 - Mit aktiver Kühlung und ohne Nachtlüftung (eigene Darstellung)

Die weiteren Untersuchungen zur wirksamen Wärmespeicherfähigkeit werden basierend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen daher lediglich für die Variante 2 (Mit aktiver Kühlung und ohne Nachtlüftung) dargestellt.

4.3. EINFLUSS AUF DEN JÄHRLICHEN HEIZ- UND KÜHLENERGIEBEDARF

Im Folgenden werden die Ergebnisse der parametrischen Simulationen abgebildet. In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Ergebnisse zum jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf für Zone 1 dargestellt. Für die Heizung und Kühlung wurden dabei die Kennwerte gemäß Kapitel 2.3 berücksichtigt. Die Punkte in den Graphen stellen die Ergebnisse einzelner Simulationen, d.h. eine spezifische Kombination der Schichtdicken dar. In ihrer Gesamtheit zeigen die Graphen die Ergebnisse der rund 1.000, hierzu durchgeführten Simulationen. Manche Bereiche in den Graphen weisen eine höhere Dichte an Simulationsergebnissen auf als andere, was sich an einer größeren Ansammlung/Überlagerung von Punkten in den Grafiken erkennen lässt. Das ist zum Beispiel in Abbildung 27, bei einer wirksamen Wärmespeicherfähigkeit von ca. $150 \text{ Wh/m}^2\text{K}$, zu erkennen. Dies resultiert daraus, dass mehrere Kombinationen von Schichtdicken dieselbe wirksame Wärmespeicherfähigkeit aufweisen. Relevant für die Beurteilung des Einflusses der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit auf den Energiebedarf sind die Minimal- und Maximalwerte sowie die Varianz.

JÄHRLICHER HEIZENERGIEBEDARF

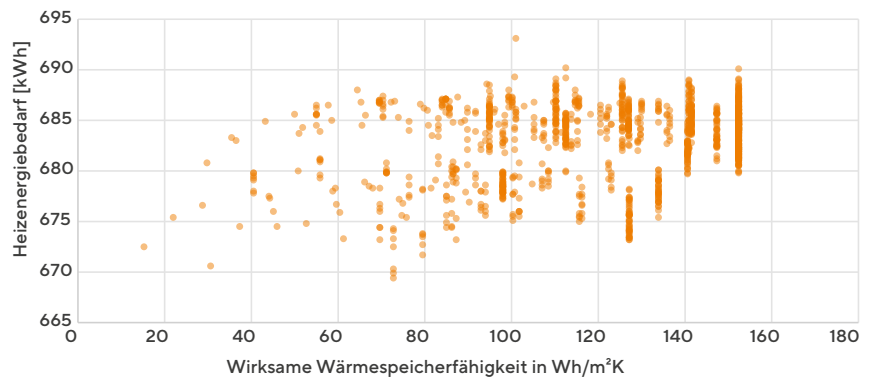


Abbildung 27: Ergebnisse des jährlichen Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 1 (eigene Darstellung)

Für den Heizenergiebedarf zeigt sich anhand Abbildung 27, dass mit steigender Wärmespeicherfähigkeit auch der jährliche Heizenergiebedarf leicht ansteigt.

JÄHRLICHER KÜHLENERGIEBEDARF

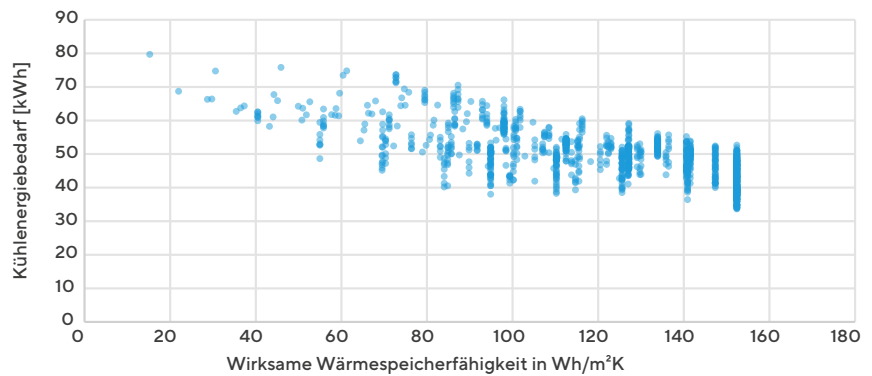


Abbildung 28: Ergebnisse des jährlichen Kühlenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 1 (eigene Darstellung)

Der Kühlenergiebedarf, siehe Abbildung 28, hingegen sinkt mit steigender Wärmespeicherfähigkeit. Zusammenfassend zeigt sich gemäß Tabelle 7, dass der Heizenergiebedarf zwischen 669 kWh/a und 693 kWh/a variiert. Die Varianz beträgt dabei ± 12 kWh/a, was einer prozentualen Änderung von ca. $\pm 2\%$ entspricht. Der Kühlenergiebedarf variiert zwischen 33 kWh/a und 80 kWh/a, was einer Varianz von ± 23 kWh/a und einer prozentualen Änderung von $\pm 30\%$ entspricht. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass für Zone 1 die wirksame Wärmespeicherfähigkeit nur einen sehr geringen Einfluss auf den Heizenergiebedarf und einen hohen Einfluss auf den Kühlenergiebedarf aufweist. Mit steigender Wärmespeicherfähigkeit kann der Kühlenergiebedarf zwar reduziert werden, jedoch zeigt sich auch, dass dabei der Heizenergiebedarf leicht ansteigt. Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf weist eine schwere Bauart mit ($c_{\text{wirk}} \geq 130$ Wh/m²K) tendenziell den geringsten Energiebedarf auf.

TABELLE 9: ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE ZUM JÄHRLICHEN HEIZ- UND KÜHLENERGIEBEDARF BASIEREND AUF PARAMETRISCHEN THERMISCHEN GEBÄUDESIMULATIONEN FÜR ZONE 1

	Minimum in kWh/a	Maximum in kWh/a	Varianz in kWh/a	Prozentuale Änderung
Heizenergie- bedarf	669	693	± 12	± 2 %
Kühlenergie- bedarf	33	80	± 23	± 30 %

JÄHRLICHER HEIZENERGIEBEDARF

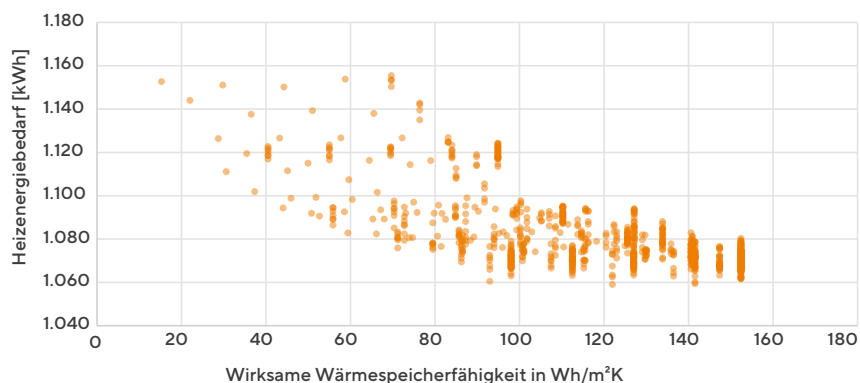


Abbildung 29: Ergebnisse des jährlichen Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 2 (eigene Darstellung)

JÄHRLICHER KÜHLENERGIEBEDARF

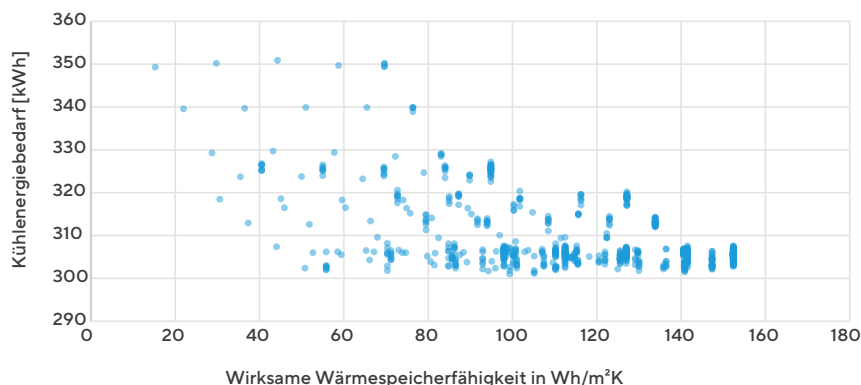


Abbildung 30: Ergebnisse des jährlichen Kühlenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 2 (eigene Darstellung)

Bei Zone 2 zeigt sich, dass der Heizenergiebedarf zwischen 1059 kWh/a und 1155 kWh/a variiert (siehe Abbildung 29 und Tabelle 8). Die Varianz beträgt dabei ± 48 kWh/a, was einer prozentualen Änderung von ca. ± 5 % entspricht. Der Kühlenergiebedarf variiert zwischen 301 kWh/a und 351 kWh/a (siehe Abbildung 30 und Tabelle 8), was einer Varianz von ± 25 kWh/a und einer prozentualen Änderung von ± 8 % entspricht. Anhand der Verläufe zeigt sich zudem, dass der Heiz- und Kühlenergiebedarf bei steigender Wärmespeicherfähigkeit sinkt. Äquivalent zu Zone 1 weist auch Zone 2 tendenziell den geringsten Gesamtenergiebedarf bei einer schweren Bauart ($c_{\text{wirk}} \geq 130 \text{ Wh/m}^2\text{K}$) auf.

TABELLE 10: ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE ZUM JÄHRLICHEN HEIZ- UND KÜHLENERGIEBEDARF BASIEREND AUF PARAMETRISCHEN THERMISCHEN GEBÄUDESIMULATIONEN FÜR ZONE 2

	Minimum in kWh/a	Maximum in kWh/a	Varianz in kWh/a	Prozentuale Änderung
Heizenergie- bedarf	1059	1155	± 48	± 5 %
Kühlenergie- bedarf	301	351	± 25	± 8 %

Zusammenfassend ergeben sich hinsichtlich der parametrischen Untersuchung folgende Ergebnisse:

- Der Einfluss der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit auf den jährlichen Heizenergiebedarf ist mit ± 2 % bei Zone 1 und ± 5 % bei Zone 2 als gering einzuschätzen
- Der Einfluss der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit auf den jährlichen Kühlenergiebedarf ist mit ± 30 % bei Zone 1 und ± 8 % bei Zone 2 als signifikant höher einzuschätzen
- Eine steigende Wärmespeicherfähigkeit führt zu einer signifikanten Reduktion der benötigten Kühlenergie
- In Zone 1 führt eine steigende Wärmespeicherfähigkeit zu einer Erhöhung des jährlichen Heizenergiebedarfs
- In Zone 2 führt eine steigende Wärmespeicherfähigkeit zu einer Reduktion des jährlichen Heizenergiebedarfs
- Die gegenläufige Tendenzen des jährlichen Heizenergiebedarfs zwischen Zone 1 und Zone 2 lassen sich im Rahmen dieser Untersuchung nicht eindeutig beschreiben
- Zur Beschreibung dieser Tendenzen sind aufbauende Parameterstudien erforderlich

V. WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNG DES PLANUNGSPROZESSES

Im Rahmen des Projekts wurde die Gebäudeplanung wissenschaftlich begleitet. Das Ziel war es, innovative und ganzheitliche Planungsinstrumente, die sich bis dato noch nicht im Geschäftsalltag etabliert haben, in den Planungsprozess einfließen zu lassen. Neben simulationsbasierten Werkzeugen wurde eine lebenszyklusbasierte Analyse der Umweltwirkungen (LCA) und der Kosten (LCC) durchgeführt.

Bereits in der Vorentwurfsphase wurden unterschiedliche Varianten, sowohl bei der Konstruktion als auch der Anlagentechnik von den Projektbeteiligten identifiziert. Durch eine lebenszyklusbasierte Bewertung konnten die untersuchten Varianten hinsichtlich energetischer und ökologischer Faktoren sowie Kosten bewertet werden. Die Ergebnisse der Bewertung erlaubten einen Vergleich der jeweiligen Varianten, dessen Erkenntnis wiederum in den weiteren Planungsprozess einfließen konnte.

Das übergeordnete Projektziel war die Realisierung eines **lebenszyklusbasiert treibhausgas-neutralen Plusenergiegebäudes**. Dabei ist die Anwendung der vorherig genannten Methoden unabdingbar. Die planungsrelevanten Parameter (z.B. Energiebedarf, Umweltwirkungen etc.) können nicht nur ermittelt und optimiert werden, sondern im Rahmen der Zielvereinbarung überprüft und validiert werden.

Die Lebenszyklusanalyse stellt einen iterativen Prozess dar. Dies bedeutet, dass die Bewertung schrittweise durch die Anpassung der gewählten Parameter über die einzelnen Planungsphasen wiederholt werden kann. Durch die heute vorhandenen digitalen Möglichkeiten kann der Bewertungsaufwand deutlich reduziert werden. Die Minimierung des Aufwands für die derzeit in der gängigen Praxis noch nicht angewandten Methoden ist Voraussetzung für eine branchenweite Akzeptanz. Durch die Entwicklung und den Einsatz einfacher, standardisierter Werkzeuge können künftig der Zeit- und Kostenaufwand für die genannten Analysen deutlich reduziert werden.

Die wissenschaftliche Begleitung des Planungsprozesses hat zur Sensibilisierung der beteiligten Akteure und des Bauherrn für die gesellschaftliche und politische Relevanz des Themas Nachhaltigkeit im Bauwesen beigetragen. Entscheidend für die Praxis ist, die Ergebnisse einer lebenszyklusbasierten Betrachtung verständlich und plausibel aufzubereiten und zu kommunizieren. Hierbei ist es notwendig, im direkten Kontakt zum Entscheidungsträger zu stehen und die einzelnen Projektpartner eng miteinander zu verknüpfen. Denn nur so lassen sich die aus der Bewertung hervorgehenden Maßnahmen realisieren, um den Themenkomplex Nachhaltigkeit im Bauwesen weiter zu integrieren.

VI. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Forschungsprojekt Eco+Office AS-Bau Hof GmbH zeigt, dass eine Realisierung eines treibhausgas-neutralen Plusenergiegebäudes in diesem Fall leistbar ist und sich darüber hinaus ökonomisch rechnet. Dabei muss vor allem auf die Wiederverwendung schon vorhandener Ressourcen, den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, die am Ende ihres Lebenszyklus im besten Fall ohne großen Aufwand wiederverwendet werden können, und die regenerative Bereitstellung von Energie zur Nutzung des Gebäudes Wert gelegt werden. Zudem müssen zukünftige innovative Konzepte zur Kompensation eines ggfs. nicht vermeidbaren Verbrauchs an nicht-erneuerbaren Energien und den damit verbundenen, anfallenden Energien und Treibhausgasemissionen, unter dringender Berücksichtigung des Einsatzes Erneuerbarer Energien, erarbeitet werden. Das ist essenziell, um den Einfluss des Bauwesens auf unsere Umwelt deutlich zu minimieren und im besten Fall komplett zu reduzieren.

Generell hat sich im Verlaufe des Forschungsprojekts gezeigt, dass durch die Operationalisierung von Methoden zur Bewertung der lebenszyklusbasierten energetischen, ökologischen und ökonomischen Performance von Gebäuden in der Planung frühzeitig Stellschrauben für eine positive Einflussnahme auf den Planungs- und Bauprozess erarbeitet und umgesetzt werden können. Durch eine Bewertung können eventuelle Zielkonflikte erkannt und Einflussfaktoren im Hinblick auf Energieeffizienz, Ökologie, Kosten etc. identifiziert werden. Des Weiteren kann durch die verantwortlichen Akteure gezielt Einfluss auf die ausgewählten Planungsparameter genommen werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von wissenschaftlich fundierten Methoden ein großes Potential bietet, bisherige Planungsleistungen zu ergänzen. Insbesondere in frühen Planungsphasen, in denen die Einflüsse auf Energieeffizienz, Ökologie, Ökonomie und Funktionalität des Gebäudes am höchsten sind, kann durch eine lebenszyklusbasierte Betrachtungsweise in Kombination mit Simulationen ein wertvoller Beitrag geleistet werden, Gebäude lebenszyklusbasiert treibhausgasneutral und energetisch positiv zu planen und zu betreiben. Auf Basis der im Rahmen dieses Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse und erlangten Erkenntnisse wird in einem weiterführenden Forschungsprojekt, in Kooperation mit der AS-Bau GmbH, ein intensives Gebäudemonitoring und Monitoring des Nutzerverhaltens durchgeführt. Dabei werden Parameter bezüglich des energierelevanten menschlichen Interagierens mit dem Gebäude ermittelt. Zudem erfolgt eine Modelloptimierung der thermischen Gebäudesimulation mit Hilfe der Monitoring-Daten. Dabei soll das energierelevante menschliche Interagieren in Gebäudesimulationen mit abgebildet werden. Dadurch erfolgt ein verbesserter Abgleich des energetischen Verhaltens des Gebäudes mit der TGA-Steuerung und somit eine ökologische und ökonomische Optimierung in der Nutzungsphase des Gebäudes.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

AS-Bau Hof. (2019). AS-Bau Hof. September 6, 2019,
<https://www.as-bau-hof.de/>

ASR A3.5. (2018). Bundesministerium für Arbeit und Soziales - Technische Regeln für Arbeitsstätten Raumtemperatur. 7.

Bundesministerium für Umwelt - Naturschutz - Bau und Reaktorsicherheit. (2015). Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Erweiterungsbau Büro- und Verwaltungsgebäude Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen 1. 1-8.

Bundesministerium für Umwelt - Naturschutz - Bau und Reaktorsicherheit. (2019). ÖKOBAUDAT | Datenbank.
<http://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2016). BMWi - Energieeinsparverordnung. September 6, 2019,
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/EnEV.html>

Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB e.V.). (2018). Ökobilanz des Gebäudes. 39-98.

Fetene, G. M., Kaplan, S., Mabit, S. L., Jensen, A. F., & Prato, C. G. (2017). Harnessing big data for estimating the energy consumption and driving range of electric vehicles. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 54, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.04.013>

Harter, H., Schneider-Marin, P., & Lang, W. (2018). The energy grey zone – uncertainty in embedded energy and greenhouse gas emissions assessment of buildings in early design phases. Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision, Proceeding, 196-204.

IBL Ingenieurbüro Lenk. (2019). Ingenieurbüro Lenk. September 20, 2019,
<https://ib-lenk.de/de/content/68/71/startseite>

Ingenieurbüro Hausladen. (2019). IB Hausladen München. September 6, 2019,
<http://www.ibhausladen.de/>

Lang Hugger Rampp Architekturbüro. (2019). Lang Hugger Rampp. September 6, 2019,
<https://www.langhuggerrampp.de/>

Legep-Bausoftware. (2019). LEGEP Software. September 6, 2019,
<https://lekep.de/>

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen - Technische Universität München. (2019). Startseite - ENPB. September 6, 2019,
<https://www.bgu.tum.de/enpb/startseite/>

Plant-for-the-Planet Foundation. (2019). Bäume sind genial! - Plant-for-the-Planet. September 6, 2019,
<https://www.plant-for-the-planet.org/de/informieren/baeume-sind-genial-2>

Schröder, W. 1961-, & Fraunhofer IRB-Verlag. (2018). Gewerblicher Betrieb von Photovoltaikanlagen : Betreiberverantwortung, Betriebssicherheit, Direktvermarktung.

Singer Ingenieur Consult GmbH. (2019). Singer Ingenieur Consult | Ingenieurleistungen aus einer Hand. September 20, 2019, <http://www.singer-ic.de/>

SIRADOS. (2019). SIRADOS Baudaten. September 6, 2019, https://www.sirados.de/?salesgroup=322&chorid=00509556&adword=bi/005-09556&gclid=Cj0KCQjwh8jrBRDQARIsAH7BsXfyeCXYRyRXwmO7EVpunSEC RYyKVSjnPUp38dF0tUyXKpaf4zv5ZocaAjMBEALw_wcB

Umwelt Bundesamt. (2018). Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr | Umweltbundesamt. September 6, 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0>

Wirth & Fraunhofer ISE. (2019). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. 1(96), 1-91. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

VIII. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Bestandsgebäude Büro- und Verwaltungsgebäudes AS-Bau GmbH (Hof, Bayern)	8
Abbildung 2: Skizze Projektidee des zukünftigen Büro- und Verwaltungsgebäudes AS-Bau Hof GmbH (Quelle: Lang Hugger Rampp GmbH)	9
Abbildung 3 Berücksichtigte Lebenszyklusphasen des Gesamtgebäudes nach DIN EN 15978 für LCA und LCC (eigene Darstellung nach DIN EN 15978, 2012, Bild 6)	10
Abbildung 4 Lebenszyklusbasiertes GWP des bisherigen Bestandsgebäudes (KG 300) nach Lebenszyklusphasen	16
Abbildung 5 Lebenszyklusbasierte PENRT des Bestandsgebäudes (KG 300) nach Lebenszyklusphasen	17
Abbildung 6 GWP der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V5 – strukturiert nach LZPH und Materialien (eigene Darstellung)	18
Abbildung 7 PENRT der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V5 – strukturiert nach LZPH und Materialien (eigene Darstellung)	19
Abbildung 8 GWP der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V12 – strukturiert nach Lebenszyklusphasen und Materialien	20
Abbildung 9 PENRT der Bauteilaufbauten des Bauteilvergleichs V12 – strukturiert nach Lebenszyklusphasen und Materialien	21
Abbildung 10 Prozentuale Verteilung des GWP nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Sanierung mit Erweiterungsbau (eigene Darstellung)	22
Abbildung 11 Prozentuale Verteilung des PENRT nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Sanierung mit Erweiterungsbau (eigene Darstellung)	23
Abbildung 12 Prozentuale Verteilung des GWP nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Ersatzneubau (eigene Darstellung)	23
Abbildung 13 Prozentuale Verteilung des PENRT nach Lebenszyklusphasen für die Ausführungsvariante Ersatzneubau (eigene Darstellung)	23

Abbildung 14 Erweiterung Büro- und Verwaltungsgebäude AS-Bau Hof GmbH (Quelle: Lang Hugger Rampp GmbH)	24
Abbildung 15 Lebenszyklusbasiertes GWP der drei betrachteten Energieversorgungsvarianten, inklusive Nutzungsphase (50 Jahre), bilanziert mit deutschem Strom-Mix (eigene Darstellung)	26
Abbildung 16 Aufschlüsselung der Nutzungsphase der drei verschiedenen Energieversorgungsvarianten nach Energieverbrauchern, bezogen auf ein Jahr (eigene Darstellung)	27
Abbildung 17 Lebenszyklusbasiertes GWP der drei betrachteten Energieversorgungsvarianten, inklusive Nutzungsphase (50 Jahre), bilanziert mit Strom aus erneuerbaren Energien (eigene Darstellung)	27
Abbildung 18 Kompensation des lebenszyklusbasierten PENRT und GWP der Variante Sanierung + Erweiterungsbau mit Luft-Wasser WP, über 50 Jahre Gebäudenutzung (eigene Darstellung)	29
Abbildung 19 Vergleichende Analyse der Lebenszykluskosten der Wärmeerzeuger (eigene Darstellung)	31
Abbildung 20 LCC der PV-Anlage, inklusive Austauschzyklen, gerechnet über 50 Jahre (eigene Darstellung)	31
Abbildung 21 Prozentuale Verteilung der Lebenszykluskosten der Baukonstruktion für Herstellung und Nutzung des Gebäudes - Barwert der Nettokosten (eigene Darstellung)	33
Abbildung 22 Aufteilung des lebenszyklusbasierten GWP für Baukonstruktion, TGA und Nutzungsphase (eigene Darstellung)	34
Abbildung 23 Darstellung der untersuchten Zonen (eigene Darstellung)	36
Abbildung 24 Verlauf der operativen Temperatur in Zone 2 unter Berücksichtigung verschiedener Bauarten für Variante V1 - Ohne aktive Kühlung und ohne Nachtlüftung (eigene Darstellung)	38
Abbildung 25 Verlauf der operativen Temperatur in Zone 2 unter Berücksichtigung verschiedener Bauarten für Variante V3 - Mit Nachtlüftung und ohne aktiver Kühlung (eigene Darstellung)	38

Abbildung 26	
Verlauf der operativen Temperatur in Zone 2 unter Berücksichtigung verschiedener Bauarten für Variante V2 - Mit aktiver Kühlung und ohne Nachtlüftung (eigene Darstellung)	39
Abbildung 27	
Ergebnisse des jährlichen Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 1 (eigene Darstellung)	40
Abbildung 28	
Ergebnisse des jährlichen Kühlenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 1 (eigene Darstellung)	40
Abbildung 29	
Ergebnisse des jährlichen Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 2 (eigene Darstellung)	41
Abbildung 30	
Ergebnisse des jährlichen Kühlenergiebedarfs in Abhängigkeit der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit für die Zone 2 (eigene Darstellung)	41

IX. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Grundlagen der im Projekt verwendeten Methoden	13
Tabelle 2 Vergleich GWP und PENRT der Ausführungsvarianten (LCA der Baukonstruktion ohne TGA und Phase B6)	23
Tabelle 3 Variante Pelletkessel – Referenzvariante (Hauptkomponenten)	24
Tabelle 4 Variante Luft-Wasser Wärmepumpe – Variante 2 (Hauptkomponenten)	24
Tabelle 5 Variante Sole-Wasser Wärmepumpe – Variante 3 (Hauptkomponenten)	24
Tabelle 6 Lebenszyklusbasiertes GWP und PENRT der Baukonstruktion mit TGA und Nutzungsphase	27
Tabelle 7 Ergebnisse Szenarienbetrachtung der Ausführungsvariante	31
Tabelle 8 Kenngrößen der untersuchten Zonen	34
Tabelle 9 Zusammenfassung der Ergebnisse zum jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf basierend auf parametrischen thermischen Gebäudesimulationen für Zone 1	39
Tabelle 10 Zusammenfassung der Ergebnisse zum jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf basierend auf parametrischen thermischen Gebäudesimulationen für Zone 2	40
Tabelle 11 Kostengliederung der gebäudebezogenen Kostengruppen nach DIN 276:12-2018, Tabelle 1, die im Projekt berücksichtigt wurden	51

X. ANHANG

TABELLE 11: KOSTENGLIEDERUNG DER GEBÄUDEBEZOGENEN KOSTENGRUPPEN NACH DIN 276:12-2018, TABELLE 1, DIE IM PROJEKT BERÜCKSICHTIGT WURDEN.

Kostengruppe, 2. Ebene	Kostengruppe, 3. Ebene
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktionen	
KG 310 Baugrube/Erdbau	KG 311: Herstellung KG 312: Umschließung KG 313: Wasserhaltung KG 314: Vortrieb
KG 320 - Gründung, Unterbau	KG 321: Baugrundverbesserungen KG 322: Flachgründungen und Bodenplatten KG 323: Tiefgründungen KG 324: Gründungsbeläge KG 325: Abdichtungen und Bekleidungen KG 326: Dränagen
KG 330 - Außenwände/Vertikale Baukonstruktionen, außen	KG 331: Tragende Außenwände KG 332: Nichttragende Außenwände KG 333: Außenstützen KG 334: Außenwandöffnungen KG 335: Außenwandbekleidungen, außen KG 336: Außenwandbekleidungen, innen KG 337: Elementierte Außenwandkonstruktionen KG 338: Lichtschutz zur KG 330 KG 339: Sonstiges zur KG 330
KG 340 - Innenwände/Vertikale Baukonstruktionen, innen	KG 341: Tragende Innenwände KG 342: Nichttragende Innenwände KG 343: Innenstützen KG 344: Innenwandöffnungen KG 345: Innenwandbekleidungen KG 346: Elementierte Innenwandkonstruktionen KG 347: Lichtschutz zur KG 340 KG 349: Sonstiges zur KG 340
KG 350 - Decken/Horizontale Baukonstruktionen	KG 351: Deckenkonstruktionen KG 352: Deckenöffnungen KG 353: Deckenbeläge KG 354: Deckenbekleidungen KG 355: Elementierte Deckenkonstruktionen KG 359: Sonstiges zu KG 350
KG 360 - Dächer	KG 361: Dachkonstruktionen KG 362: Dachöffnungen KG 363: Dachbeläge KG 364: Dachbekleidungen KG 365: Elementierte Dachkonstruktionen KG 366: Lichtschutz zur KG 360 KG 369: Sonstiges zur KG 360
KG 370 - Infrastrukturanlagen	KG 371: Anlagen für den Straßenverkehr KG 372: Anlagen für den Schienenverkehr KG 373: Anlagen für Flugverkehr KG 374: Anlagen des Wasserbaus KG 375: Anlagen der Abwasserentsorgung KG 376: Anlagen der Wasserversorgung KG 377: Anlagen der Energie- und Informationsversorgung KG 378: Anlagen der Abfallentsorgung
KG 380 - Baukonstruktive Einbauten	KG 381: Allgemeine Einbauten KG 382: Besondere Einbauten KG 383: Landschaftsgestalterische Einbauten KG 384: Mechanische Einbauten KG 385: Einbauten in Konstruktionen des Ingenieurbaus KG 386: Orientierungs- und Informationssysteme KG 387: Schutzeinbauten

KG 390 – Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen	KG 381: Allgemeine Einbauten KG 382: Besondere Einbauten KG 383: Landschaftsgestalterische Einbauten KG 384: Mechanische Einbauten KG 385: Einbauten in Konstruktionen des Ingenieurbaus KG 386: Orientierungs- und Informationssysteme KG 387: Schutzeinbauten
KG 400 Bauwerk – Technische Anlagen	
KG 410 – Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	KG 411: Abwasseranlagen KG 412: Wasseranlagen KG 413: Gasanlagen
KG 420 – Wärmeversorgungsanlagen	KG 421: Wärmeerzeugungsanlagen KG 422: Wärmeverteilnetze KG 423: Raumheizflächen KG 424: Verkehrsheizflächen
KG 430 – Raumluftechnische Anlagen	KG 431: Lüftungsanlagen KG 432: Teilklimaanlagen KG 433: Klimaanlagen KG 434: Kälteanlagen
KG 440 – Elektrische Anlagen	KG 441: Hoch- und Mittelspannungsanlagen KG 442: Eigenstromversorgungsanlagen KG 443: Niederspannungsschaltanlagen KG 444: Niederspannungsinstallationsanlagen KG 445: Beleuchtungsanlagen KG 446: Blitzschutz- und Erdungsanlagen KG 447: Fahrleitungssysteme
KG 450 – Kommunikations-, Sicherheits- und Informationstechnische Anlagen	KG 451: Telekommunikationsanlagen KG 452: Schuch- und Signalanlagen KG 453: Zeitdienstanlagen KG 454: Elektroakustische Anlagen KG 455: Audiovisuelle Medien- und Antennenanlagen KG 456: Gefahrenmelde- und Alarmanlagen KG 457: Datenübertragungsnetze KG 458: Verkehrsbeeinflussungsanlagen
KG 460 – Förderanlagen	KG 461: Aufzugsanlagen KG 462: Fahrtreppen, Fahrsteige KG 463: Befahranlagen KG 464: Transportanlagen KG 465: Krananlagen KG 466: Hydraulikanlagen
KG 470 – Nutzungsspezifische und verfahrenstechnische Anlagen	KG 471: Küchentechnische Anlagen KG 472: Wäscherei-, Reinigungs- und badetechnische Anlagen KG 473: Medienversorgungsanlagen, Medizin- und labortechnische Anlagen KG 474: Feuerlöschanlagen KG 475: Prozesswärme-, kälte- und -luftanlagen KG 476: Weitere nutzungsspezifische Anlagen KG 477: Verfahrenstechnische Anlagen, Wasser, Abwasser und Gase KG 478: Verfahrenstechnische Anlagen, Feststoffe, Wertstoffe und Abfälle
KG 480 – Gebäude- und Anlagenautomatik	KG 481: Automationseinrichtungen KG 482: Schaltschränke, Automationsschwerpunkte KG 483: Automationsmanagement KG 484: Kabel, Leitungen und Verlegesysteme KG 485: Datenübertragungsnetze
KG 490 – Sonstige Maßnahmen für technische Anlagen	KG 491: Baustelleneinrichtung KG 492: Gerüste KG 493: Sicherungsmaßnahmen KG 494: Abbruchmaßnahmen KG 495: Instandsetzung KG 496: Materialentsorgung KG 497: Zusätzliche Maßnahmen KG 498: Provisorische technische Anlagen

IMPRESSUM

Ansprechpartner bei der Technischen Universität München
und dem Bayerischen Bauindustrieverband:



Technische Universität München
Fakultät Architektur
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

AUTOREN

Hannes Harter, M. Sc.
hannes.harter@tum.de
Tel.: +49 89 289-23969

Christina Meier-Dotzler
christina.dotzler@tum.de
Tel.: +49 89 289-23990

Michael Vollmer, M. Sc.
michael.vollmer@tum.de
Tel.: +49 89 289-25754

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

INDUSTRIEPARTNER

AS-Bau Hof GmbH
Geschäftsführer Dr.-Ing. Thomas Dick
Stelzenhofstr. 28 | 95032 Hof
www.as-hof.de

ABTEILUNG PROJEKTPLATTFORM ENERGIE + INNOVATION

Dipl.-Ing. Sandro Pfoh
s.pfoh@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 dem Architekturbüro Lang Hugger Rampp GmbH (München) für die Bereitstellung der benötigten gebäudebezogenen Daten, zur Durchführung der Analysen, Untersuchungen und Auswertungen; sowie für die Illustrationen und grafischen Ausarbeitungen der in diesem Bericht gezeigten Abbildungen des Gebäudes.

GESTALTUNG

Dipl.-Des. (FH) Daniel Schwaiger

HERAUSGEBER

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

VERLAG

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Arcisstr. 21 | 80333 München
www.ar.tum.de, verlag@ar.tum.de

ISBN 978-3-948278-05-2

© BBIV, 1. Auflage, Februar 2020

