



**Masterarbeit am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen**

## **Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte von Laborgebäuden**



Technische Universität München  
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen  
Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

**Betreuer:**

Dipl.-Ing. Patricia Schneider  
Dipl.-Ing. Michael Keltsch

**Autor:**

Celine Nickl

**Abgabedatum:**

30.09.2016

## Inhaltsverzeichnis

1	Abstract.....	4
2	Einleitung .....	5
3	Typologie Laborgebäude .....	8
3.1	Historische Entwicklung.....	8
3.2	Laborarten .....	11
3.3	Grundrissorganisation.....	13
3.3.1	Bedarfsplanung und Bestimmung von Raumgruppen .....	13
3.3.2	Zonierung und Stapelung .....	15
3.3.3	Grundrisseinteilung.....	15
3.3.4	Dimensionierung.....	17
3.4	Technische Gebäudeausstattung .....	19
3.5	Sicherheitsanforderungen.....	23
3.6	Aktuelle Trends im Laborbau.....	26
3.7	Nachhaltigkeit von Laborgebäuden .....	28
3.7.1	Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus eines Laborgebäudes.....	28
3.7.2	Zertifizierungssysteme.....	30
3.7.3	Nachhaltige Laborgebäude in Deutschland.....	34
4	Projektvorstellung ZAE Würzburg.....	36
4.1	Architektonisches Konzept .....	36
4.1.1	Städtebauliche Einbindung und Freiraumgestaltung .....	37
4.1.2	Gebäudeentwurf und Grundrissorganisation .....	38
4.1.3	Konstruktion.....	40
4.2	Gebäudetechnisches Konzept und Innovationen .....	42
5	Vorstellung von Varianten für das ZAE in Würzburg .....	44
5.1	Vorgehen zur Variantenentwicklung .....	44
5.2	ZAE real.....	45
5.3	ZAE klassisch .....	46

5.4	ZAE zukünftig .....	47
6	Ökobilanz der Varianten .....	50
6.1	Allgemeine Erklärung Ökobilanz.....	50
6.2	Vorgehen .....	52
6.3	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens.....	53
6.3.1	Zielfestlegung .....	53
6.3.2	Untersuchungsrahmen .....	54
6.4	Sachbilanz .....	55
6.4.1	Inventar Bausubstanz .....	55
6.4.2	Inventar Betrieb .....	59
6.5	Wirkungsabschätzung .....	59
6.5.1	Wirkungsabschätzung ZAE real .....	61
6.5.2	Wirkungsabschätzung ZAE klassisch.....	65
6.5.3	Wirkungsabschätzung ZAE zukünftig .....	67
6.6	Auswertung.....	70
6.6.1	Vergleich und Diskussion der Ergebnisse der Varianten.....	71
6.6.2	Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	77
7	Fazit und Ausblick.....	83
8	Literaturverzeichnis.....	86
9	Abbildungsverzeichnis .....	90
10	Tabellenverzeichnis .....	92
11	Anhang .....	93
	Selbständigkeitserklärung .....	105
	Vereinbarung.....	106

## 1 Abstract

Climate change and resource shortage require new construction strategies to achieve more sustainability within the building industry. The total amount of energy consumed by a building during its lifetime is called “grey energy” and implies the energy needed for its construction, utilisation and demolition. Huge effort is being put into minimisation of energy consumption during the utilisation, whereas possible energy saving potential during the construction and demolition phase is not sufficiently investigated yet.

In this thesis energy saving potentials during the construction phase and the demolition phase are identified for a reference laboratory building, which is the Center for Applied Energy Research (ZAE) in Würzburg. Two construction concepts, “ZAE classic” and “ZAE future”, are presented and compared to the original concept “ZAE real” regarding the energy consumption of the building throughout its entire lifetime by a life cycle analysis (LCA).

The LCA is based on the calculation of the global warming potential (GWP) which is carried out using the online tool eLCA provided by the Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development (BBSR). A comparison of the GWP of the new concepts and the original construction allows to draw a conclusion which concept offers the most energy saving potential compared to the original construction. The thesis reveals that “ZAE future” achieves a GWP saving potential of 48,7 %, whereas the application of the “ZAE classic” concept leads to an increased GWP of 7,5 % in comparison to “ZAE real”.

## 2 Einleitung

Die gegenwärtig intensiv diskutierten Auswirkungen des Klimawandels und die Verknappung der Ressourcen fordern neue Strategien im Bauwesen. Der Gebäudesektor ist für den Verbrauch von rund 50 % aller primären Ressourcen, von 40 % der in Deutschland verbrauchten Gesamtenergie und für den Ausstoß von rund 30 % aller Treibhausgase verantwortlich. [2] Darum kommt diesem Sektor sowohl hinsichtlich des nachhaltigen Umgangs mit den endlichen Ressourcen unserer Erde als auch des sparsamen Einsatzes von Energie eine zentrale Bedeutung zu.

Aktuell werden die größten Potenziale der Effizienzsteigerung in der CO<sub>2</sub>- und Energieeinsparung während der Nutzungsphase von Gebäuden gesehen. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung wird jedoch deutlich, dass während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes Energie verbraucht und CO<sub>2</sub> emittiert wird: Von der Herstellung bis zum Rückbau entsteht ein erheblicher Anteil an „grauer Energie“, der in bisherigen Betrachtungen meist außer Acht gelassen wird.

Der Umwelteinfluss von Gebäuden gewinnt zunehmend an Bedeutung, was sich an der Vielzahl an gesetzlichen Vorschriften und Umwelanforderungen widerspiegelt. Durch Zertifizierungssysteme für nachhaltiges Bauen, wie beispielsweise das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) oder die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), ist die Lebenszyklusanalyse zu einem obligatorischen Bestandteil der Bewertung der ökologischen Qualität von Gebäuden geworden. Es ist zu erwarten, dass die Wichtigkeit der Ökobilanzen in Zukunft weiter steigen wird, um Schwachstellen im Herstellungsprozess, beim Ressourceneinsatz oder bei der Entsorgung von Gebäuden identifizieren zu können und daraus Optimierungsmaßnahmen abzuleiten. Durch die Bilanzierung von Gebäuden entstehen nachhaltigere Bauwerke, die auf Grund ihrer höheren Umweltverträglichkeit auch deutlich bessere Vermarktungschancen aufweisen. Seit 2013 bietet das BNB ein Bewertungssystem für Forschungs- und Laborgebäude an, welches nun auch die Bewertung und Zertifizierung dieser meist hoch technisierten Gebäude ermöglicht.

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit ist die Anwendbarkeit der Lebenszyklusanalyse auf die Typologie Laborgebäude zu überprüfen. Als Referenzgebäude dient das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) in Würzburg. Die Aufgabenstellung wird in Kooperation mit LangHuggerRampp Architekten behandelt, die alle erforderlichen Planungsunterlagen und Verbrauchsdaten zur Verfügung stellen.

Inhaltlicher Schwerpunkt der Masterarbeit ist die Entwicklung von zwei hypothetischen Bauvarianten für das ZAE in Würzburg und deren anschließende vergleichende Ökobilanzierung. Ziel der Arbeit ist es, Optimierungspotenziale in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential - GWP) aufzuzeigen und die Bedeutung der grauen Energie bei Laborgebäuden zu analysieren. Die Ökobilanz beschränkt sich in dieser Arbeit ausschließlich auf die Phasen der Herstellung und des Rückbaus, die Phase der Nutzung wird nicht bilanziert, sondern anhand der realen Verbrauchswerte für alle drei Gebäudevarianten gleich angesetzt. Durch diesen Ansatz kann aufgezeigt werden, wie groß und wie relevant der Anteil an grauer Energie der Bausubstanz bei hochtechnisierten Laborgebäuden tatsächlich ist und inwiefern er optimiert werden kann.

Auf Grund der Ergebnisse der Ökobilanzierung sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche der drei untersuchten Gebäudevarianten hat das geringste Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebenszyklus?
- Welche Optimierungspotenziale ergeben sich aus den Ergebnissen der Ökobilanz?
- Welchen Einfluss hat die Materialwahl auf das Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebenszyklus von hochtechnisierten Laborgebäuden?

Um diese Fragestellungen am Ende der Masterarbeit beantworten zu können, wird mit einer ausführlichen Recherche zur Typologie der Laborgebäude begonnen. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf den Bezug zur Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus gelegt. Darauf folgt ein Kapitel zur Projektvorstellung des ZAE in Würzburg.

Den Hauptteil der Masterarbeit bestimmen die zwei aufeinander aufbauenden Teilbereiche der Variantenentwicklung für das ZAE in Würzburg und die vergleichende Ökobilanz der Varianten.

Im ersten Schritt werden in Form eines Gedankenexperiments zwei alternative Varianten („ZAE klassisch“ und „ZAE zukünftig“) zum realen ZAE in Würzburg entwickelt. Während das sogenannte „ZAE klassisch“ einer konventionellen Bauweise von Laborbauten entspricht, soll „ZAE zukünftig“ einen optimierten Bau in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial darstellen.

Im darauffolgenden Kapitel wird zuerst eine allgemeine Einführung in das Thema Ökobilanzierung gegeben, um danach die drei Gebäudevarianten des ZAE nach den vier Phasen der Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040 bilanzieren zu können. In der ersten Bilanzierungsphase werden Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegt. Anschließend werden im Rahmen der Sachbilanz die Massen aller drei Varianten erhoben und in das Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte von Laborgebäuden

online Tool eLCA eingegeben, um die Berechnungen zu ermöglichen. In der Phase der Wirkungsabschätzung werden die Umweltwirkungen der eingesetzten Materialien mit Hilfe der Datenbank Ökobau.dat abgeschätzt und der Wirkungskategorie des Treibhausgaspotenzials zugeordnet. Die Ergebnisse der Varianten werden dann einzeln vorgestellt.

In der abschließenden Auswertung werden die Ergebnisse der Varianten miteinander verglichen und Schlussfolgerungen gezogen. Die Durchführung einer vergleichenden Ökobilanz der Varianten lässt feststellen, welche baulichen Maßnahmen und Entscheidungen eine Verbesserung der Ökobilanzwerte ermöglichen und wo, unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus, Optimierungspotenziale in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial zu erreichen sind.

Die Masterarbeit schließt mit einem Fazit und einem Ausblick ab.

Das in dieser Masterarbeit analysierte Laborgebäude stellt ein herausragendes Beispiel für gute Architektur, Umsetzung innovativer Konzepte und Einsatz neuartiger Materialien dar. Die Ergebnisse der Arbeit sollen Hinweise dazu liefern, welche weiteren Optimierungspotenziale in Hinsicht auf die Nachhaltigkeit in der Laborarchitektur auch unter Beibehaltung eines hohen ästhetischen Anspruches identifiziert werden können.

### 3 Typologie Laborgebäude

Beginn des, mit Silvia Giordano (Matrikelnummer: 03622327), gemeinschaftlich erarbeiten Teils der Masterarbeit.

Bei Laborgebäuden handelt es sich um eine sehr komplexe architektonische Typologie, die eine Vielzahl an funktionalen, technischen, ökonomischen und rechtlichen Anforderungen erfüllen muss. Entsprechend aufwändig gestalten sich Bau und Betrieb dieser Gebäudeart. Zudem stellen die raschen Veränderungen in den Bereichen der Technologien, der Arbeitsweisen oder der rechtlichen Rahmenbedingungen die Planer vor immer neue Herausforderungen.

Auf den nächsten Seiten wird eine ausführliche Analyse der Eigenschaften und Besonderheiten von Laborgebäuden durchgeführt. Die historische Entwicklung zeigt, wie sich die heutigen Forschungseinrichtungen entwickelten und welche Grundelemente über die Jahrhunderte zu essentiellen Bestandteilen des Laborbaus geworden sind. Die Vielzahl an verschiedenen Laborarten führt zu unterschiedlichen Formen der Grundrissorganisation, die im Folgenden mit Hilfe von schematischen Darstellungen erläutert werden. Auch auf die technische Gebäudeausstattung und die hohen Sicherheitsanforderungen von Laboratorien wird eingegangen. Im Anschluss werden aktuelle Trends im Laborbau besprochen, um als Abschluss des Kapitels das Thema der Nachhaltigkeit in Bezug zu Laborgebäuden zu setzen.

#### 3.1 Historische Entwicklung

Das moderne Labor wie wir es heute kennen, ist keine Erfindung unserer Zeit, sondern hat sich über Jahrhunderte parallel zur Weiterentwicklung der Wissenschaft ausgeprägt. In den Schulen der Antike, wie beispielsweise dem Athenäum von Athen oder dem Museion zu Alexandria, wurden Kenntnisse der Medizin, Mathematik und Astronomie gelehrt, doch ein Laboratorium als Einrichtung zur Erkenntnissuche war noch nicht bekannt. [5, S. 32] Die damaligen Gelehrten beschäftigten sich hauptsächlich mit Überlieferungen ihrer Vorfahren und empirisch gesammelten Erfahrungen. Das eigenständige Erforschen von natürlichen Zusammenhängen hatte zu dieser Zeit nur wenig Bedeutung.

Erst Ende des 12. Jahrhunderts entstanden in Italien, Frankreich und England die „universitates magistrorum et scholarum“. In Städten, in denen die Schulbildung eine hohe Bedeutung und großes Ansehen erlangt hatte, wie beispielsweise Bologna oder Paris, wurde nun die Ratio auf das Überlieferte angewandt und die Forschung dadurch maßgeblich



verändert. Im Bereich der Naturwissenschaften entwickelte sich das Experiment zum zentralen Hilfsmittel für den Erkenntnisgewinn und wurde erstmals über das schriftlich Überlieferte gestellt. [5, S. 32] Ab diesem Zeitpunkt kam es zu erheblichen Veränderungen im Bau von Forschungsgebäuden.

Die historischen Anfänge des Laborbaus lassen sich in das 13. Jahrhundert zurückdatieren. Auf Grund einer Medizinalordnung, welche die Trennung der Berufe des Arztes und des Apothekers vorsah, kam es zur Entstehung von Apothekenoffizinen, Alchimistenküchen und Proberöfen der Hüttenwerke. [19, S. 67] Es kamen die ersten Geräte auf, die zur Erleichterung der Arbeit in den Laboratorien beitrugen und bis heute in jedem chemischen Labor vorzufinden sind. Als Beispiel kann der chemische Herd mit Abzugshaube genannt werden. Er hat sich im Laufe der Zeit stark verändert, ist aber eindeutig als Vorläufer des heutigen Digestoriums zu erkennen.



*Abb. 1 Alchimistenküche [1]*

Ein weiterer bedeutender Schritt in der Entwicklung von Laboratorien vollzog sich im 17. Jahrhundert. [5, S. 32] Damals kam es zur Trennung von Handwerk und Wissenschaft. Hauptsächlich im Bereich der Montanwissenschaft entstanden chemische Laboratorien, um

die beim Schmelzprozess entstehenden schädlichen Nebenerscheinungen zu bestimmen. Eine Separierung der Laborräume wurde aus sicherheitstechnischen Gründen notwendig.

Die Kommunikation wurde in Verbindung mit Laboratorien immer bedeutender und führte im Jahre 1750 zur Utopie einer Ideal-Universität von Giovanni Battista Piranesi. Er entwarf eine Universität die alle Funktionen und Lebensbereiche räumlich in ein Gebäude integrierte. [19, S. 69] Das Labor wurde damit zum Ort des Austausches und der Kommunikation.

Weitere grundlegende Veränderungen im Laborbau prägte zu Beginn des 19. Jahrhunderts Wilhelm von Humboldt. [33, S. 846] Neue Fachgebiete in den Naturwissenschaften kamen auf, da Humboldt davon überzeugt war, dass die Beschäftigung mit der Wissenschaft zur Bildung des Charakters beitragen würde. Im Baustil des Klassizismus entstanden zum Beispiel in Wien und Paris gigantische Kolossalbauwerke für die Universitäten. Die Gebäude wurden jedoch schnell zu klein und zeigten, dass die Unterbringung von allen Fächern und Funktionen in einem Gebäude technisch und typologisch nicht zukunftsfähig war. Als Folge kam es zur Separierung von naturwissenschaftlich-experimentellen Laborbauten. [24, S. 866]

Anfang des 20. Jahrhunderts entdecken die großen Firmen der damaligen Zeit die Notwendigkeit der Forschung für eine positive unternehmerische Zukunft. Die typologische Entwicklung der Laboratorien war geprägt von Änderungen der Technik sowie dem Bedarf an interdisziplinärem Austausch. Aspekte wie die Belichtung und Belüftung der Arbeitsräume wurden immer essenzieller. Erstmals wurden Ansaugschächte, Ventilatoren und viele weitere technische Neuerungen in die Gebäude integriert. [5, S. 33] Institutsbauten mit systematischer Zonierung der Funktionen sowie technischer Erschließung entstanden. Auch komplexere Möglichkeiten der Grundrissorganisation entwickelten sich aus den neuen Erfordernissen: Neben den anfänglichen ein- und zweibündigen Gebäuden gewannen nun umfassendere Lösungen wie der Dreibund an Bedeutung.

In den darauffolgenden Jahrzehnten veränderte sich die Einstellung zur bisherigen Idealvorstellung eines einzigen Gebäudekomplexes, der alle Funktionen beinhaltet. Als Grund für dieses Phänomen wird die im Jahre 1941 veröffentlichte Charta von Athen vermutet. [19, S. 70] Diese sah eine Entflechtung der städtischen Funktionsbereiche vor. Die Trennung der Funktionen wurde als oberstes Ziel verfolgt. Vor allem in der Nachkriegszeit wurde das neue Dogma baulich umgesetzt: Es entstanden sogenannte Schlafstädte fürs Wohnen, Gewerbegebiete fürs Arbeiten und neue Campus Hochschulen auf der grünen Wiese für die Lehre und Forschung. Diese Entwicklung hatte großen Einfluss auf die

Laborgebäude. Es kam zu einer Trennung von Büro und Labor in separate Gebäude. Durch diese Maßnahme ging der Raum für Kommunikation zwischen den beiden Bereichen verloren.

Doch schnell wurde den Menschen bewusst, dass das Fehlen von Begegnungsflächen einen Qualitätsverlust mit sich bringt. Aus diesem Grund wird in der heutigen Zeit die ursprüngliche Idee des Raumes für Kommunikation wieder als integraler Bestandteil der Raumkonzeption von Laborgebäuden in die Planung mit aufgenommen. [19, S. 71]

Mitte der sechziger Jahre führte die Verwendung von Rastern und Modulen zu einer erheblichen Beschleunigung der Bauplanung von Forschungseinrichtungen. Durch die Standardisierung konnten hochkomplexe Gebäude nun um einiges einfacher verwirklicht werden.

Bis heute gehören Grundprinzipien der historischen Laboratorien zu den essentiellen Bestandteilen von rezent erbauten Laborgebäuden. Sinn und Zweck der Errichtung von Laboratorien war und ist es, den dort arbeitenden Menschen ein sicheres Arbeitsumfeld zu bieten und gleichzeitig einen reibungslosen Betriebsablauf zu gewährleisten. Besonders bedeutsam ist es, dass Raum für fachliche Gespräche und wissenschaftlichen Austausch geschaffen wird.

Die historische Entwicklung der Typologie Laborgebäude zeigt, dass moderne Erfordernisse wie Flexibilität, Autonomie und Anpassungsfähigkeit schon lange zentrale Themen des Laborbaus sind und durchaus auch zukunftsorientierte Leitbilder darstellen.

### **3.2 Laborarten**

Das breite Spektrum an unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen und Forschungsgebieten spiegelt sich in einer Vielzahl von unterschiedlichen Forschungseinrichtungen und Gebäudetypologien wieder. Eine Einteilung in Labortypen kann nach Egbert Dittrich anhand unterschiedlichster Kriterien erfolgen. [19, S. 19] Im Folgenden wird die Einteilung anhand der drei naturwissenschaftlichen Hauptforschungsrichtungen Chemie, Biologie und Physik vorgenommen, da es für die Konzeption von Laborgebäuden maßgeblich ist, welche Fachdisziplin das Labor nutzen wird. Mit der Zeit hat sich eine Reihe von überlappenden Forschungsgebieten entwickelt, wie zum Beispiel die Biochemie oder die Biomedizin. Diese Überlappungen werden in dieser Arbeit nicht näher besprochen. Auch auf die Erläuterung von Sonderlaboren, wie beispielsweise Tier- oder Reinlabore, wird verzichtet.

**Chemische Laboratorien** sind Räumlichkeiten in denen chemische Arbeiten, nasspräparativ oder trocken, durchgeführt werden. Das Chemielabor passt sich anhand seiner Bauweise und Ausstattung genau an die jeweilige Nutzung an und besitzt die für die chemischen Arbeitsverfahren notwendigen Laborgeräte. Meist werden chemikalienfeste Bodenbeläge verbaut und auch das Mobiliar muss speziell auf die Nutzung von Gefahrstoffen abgestimmt werden. Die Arbeitsplätze verfügen weitestgehend über spezielle Luftabzugssysteme, sogenannte Digestorien, die ein vom Raum abgeschottetes Arbeiten ermöglichen und einen hohen Luftwechsel gewährleisten. Wenn mit bedenklichen Gefahrstoffen gearbeitet wird, gilt als Faustregel: Pro 40 m<sup>2</sup> Laborfläche zwei bis vier Digestorien. Die Labortische sind fast immer fest eingebaut, da bewegliche Tische die Sicherheit gefährden würden. Neben Regalen und Schränken für Laborreagenzien dürfen auch Messgeräte und Sicherheitseinrichtungen für Notfälle in keinem Chemielabor fehlen. In der Regel ist eine Notdusche vorhanden, in der sich das Personal bei Unfällen zum Beispiel von ätzenden Chemikalien befreien kann. Auch das Tragen von besonderer Schutzkleidung soll vor Verletzungen schützen. [24, S. 868]

**Biologische Laboratorien** können hingegen biochemisch, molekularbiologisch, nasspräparativ oder trocken sein. Hier werden biologische Untersuchungen, Analysen und Versuche durchgeführt. Da im Vergleich zum Chemielabor mit weniger Gefahrstoffen gearbeitet wird, sind die Anforderungen an den Luftwechsel geringer. Außerdem reichen in diesem Fall ein bis zwei Digestorien pro 40 m<sup>2</sup> Fläche für die Sicherheitsarbeit direkt unter einem Abzug aus. Die Labortische sind auch hier fest eingebaut. [24, S. 868]

**Physikalische Laboratorien** zeichnen sich durch einen „Werkstattcharakter“ aus. Große Flächen für Versuchsaufbauten oder für Geräteapparaturen sind notwendig. [24, S. 868] Die Labortische können beweglich sein und die Labormöblierung ist generell geringer als in den vorgenannten Typen gehalten. Elektroinstallationen befinden sich entweder in Kabelkanälen im Wandbereich oder werden von der Decke abgehängt. In Physiklaboren kommen wenige bis gar keine Digestorien vor. [42, S. 312]

Heutzutage existiert neben den klassischen Laborarten eine Vielzahl an komplexeren Laborstrukturen, die hauptsächlich durch geräteintensive beziehungsweise computerbezogene Arbeitsweisen geprägt sind.

Nach der Vorstellung der wichtigsten Labortypologien lässt sich zusammenfassend sagen, dass jede einzelne ganz eigene, spezielle Anforderungen hat, die bei der Planung zwingend berücksichtigt werden müssen. Im nächsten Kapitel kann nun auf die Auswirkungen der Labortypen auf die Grundrissorganisation eingegangen werden.

### 3.3 Grundrissorganisation

Eine optimierte Grundrissorganisation steht im Forschungsbau eng verbunden mit der Konzeption von nachhaltigen, effizienten Gebäuden. Die Herausforderung der Planer liegt darin, sich den raschen Veränderungen der Forschungsbranche anzupassen und robuste, zukunftsfähige Systeme zu entwickeln.

#### 3.3.1 Bedarfsplanung und Bestimmung von Raumgruppen

Zu Beginn der Entwurfsplanung steht eine umfangreiche Bedarfsplanung; sie ist für das Entstehen eines erfolgreichen Projektes unumgänglich. In interdisziplinärer Zusammenarbeit von Bauherren, Planern, Wissenschaftlern, Technikern und allen zusätzlich am Bauvorhaben Beteiligten, wird genauestens analysiert, welche Räumlichkeiten benötigt werden.

Laborgebäude bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Raumtypen und sie stellen für jeden einzelnen Labortyp eigene Anforderungen an die Raumqualität sowie die technische Ver- und Entsorgung. Trotz der Verschiedenartigkeit von naturwissenschaftlichen Forschungsgebäuden können laut Hochschul-Informationssystem (HIS) typische Funktionsbereiche definiert werden: [10, S. 12–13]

**Flächen für experimentelle Forschung** gelten als Kernbereich jeden Laborgebäudes und beinhalten meist Standardlabore für die typischen Forschungsrichtungen. Feste Arbeitsplätze für die Wissenschaftler müssen in der Planung berücksichtigt werden.

**Flächen für theoretisches Arbeiten** beinhalten Büros, aber auch Schreibarbeits- und Auswertplätze. Schreibarbeitsplätze können klassischen Büroräumen gleichgesetzt werden; Auswertplätze werden hingegen nur für kurze, versuchsbegleitende Aufgaben genutzt. Oft sind Flächen für theoretisches Arbeiten durch eine Glasscheibe von den Laborräumen getrennt. Durch die Glaselemente werden störende Einflüsse abgeschwächt, der Sichtkontakt jedoch nicht verwehrt.

Als **Serviceflächen** werden Raumbereiche bezeichnet, die den Forschungsprozess unterstützend begleiten. Dazu zählen beispielsweise Spülküchen oder Wägeräume.

**Infrastrukturflächen** stehen den Wissenschaftlern über die Servicefläche hinaus zur Verfügung und beinhalten beispielweise Bibliotheken oder Lagerflächen. Auch technische Funktionsflächen werden zu diesem Typ von Flächen gezählt, sie beinhalten zum Beispiel Technikräume für betriebstechnische Anlagen.

**Kommunikationsflächen** bilden Orte der Begegnung, Beratung und des Austausches. In Form von Besprechungsräumen, Aufenthaltszonen oder Cafeterias können Begegnungsflächen geschaffen werden, die zu einem angenehmen Arbeitsklima beitragen.

Der Funktionsbereich der **Lehrflächen**, in Form von Hörsälen oder Seminarräumen, findet nicht in jedem Forschungszentrum Verwendung.

**Verkehrsflächen** sind Bestandteil jedes architektonischen Gebildes. Neben Nutzflächen sind Verkehrsflächen sehr wichtig für die kommunikative Qualität in einem Gebäude. Die richtige Anordnung der Flure und Erschließungszonen beeinflusst einen Entwurf erheblich.



Abb. 2 Funktionsbereiche eines Laborgebäudes [10, S. 36] (Eigene Darstellung)

Danach werden die erforderlichen Räumlichkeiten laut Dieter Grömling „in drei unterschiedlich konditionierte Zonen aufgeteilt bzw. entflochten [...], um einheitlich definierte Raumgruppen zu schaffen:

- Belichtete Räume für konzentriertes theoretisches Arbeiten → niedrig installiert, Büroräume
- Belichtete und installierbare Räume für experimentelles Arbeiten → hochinstalliert, Laboratorien
- Unbelichtete installierbare Räume für Geräte und Sondernutzungen → hochinstalliert, Dunkelzone“. [23, S. 42]

Bei näherer Betrachtung der Funktionsbereiche fällt auf, dass die Raumtypen des Labors und des Büros den größten Flächenanteil in Forschungsgebäuden benötigen. Die zwei Raumtypen unterscheiden sich stark in ihrer Funktionsweise und der haustechnischen Installationsdichte. Büroräume benötigen ausschließlich Technik für Heizung, Kühlung, Belichtung, Informations- und Kommunikationsmedien (IuK-Medien) und Elektroversorgung. Laboratorien für die wissenschaftliche Arbeit sind hingegen je nach Anforderungen hochbeziehungsweise höchstinstallierte Bereiche und machen mit ihrer technischen Gebäudeausstattung zwischen 40 % und 60 % der Gesamtbaukosten aus. [24, S. 868] Für die Planung von Forschungsgebäuden ist deshalb das Zusammenfügen von Räumen mit vergleichbaren technischen Anforderungen bedeutsam. Durch diese Maßnahme entstehen wirtschaftlichere Gebäude, denn durch beliebiges Durchmischen von Raumtypen kann es zu einem höheren technischen Aufwand kommen. Es gibt zwei Möglichkeiten für das Zusammenfügen von Räumen: die Zonierung oder die Stapelung. [23, S. 40–41]

### 3.3.2 Zonierung und Stapelung

Bei der **Zonierung** werden vergleichbare Räume entlang eines Flures zusammengefasst. Die Länge der Reihung ist hierbei von der Trassenführung, den Raumdimensionen und baurechtlichen Bindungen wie beispielsweise Fluchtwegen abhängig.

Unter **Stapelung** versteht sich hingegen die unmittelbar benachbarte, auf allen Geschossen identische Anordnung von Räumen auf mehreren Ebenen. Hier spielen städtebauliche Überlegungen und die Anordnung von Technischächten eine entscheidende Rolle.

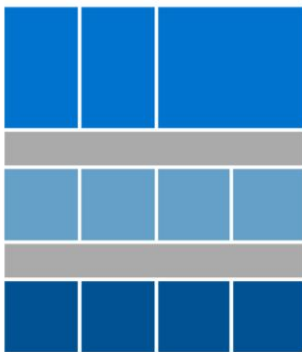
### 3.3.3 Grundrisseinteilung

Steht die Einteilung der Räumlichkeiten in verschiedene Zonen und sind konkrete Überlegungen zu Konzepten der Zonierung oder Stapelung angestellt worden, kann mit der Grundrissorganisation im eigentlichen Sinne begonnen werden. Je nach Forschungsfeld, Arbeitsweise und zu erwartender Entwicklung des Instituts ergeben sich unterschiedliche Bündigkeiten, die klassischen Laboren entsprechen können aber auch als moderne Kombilaboratorien ausfallen können.



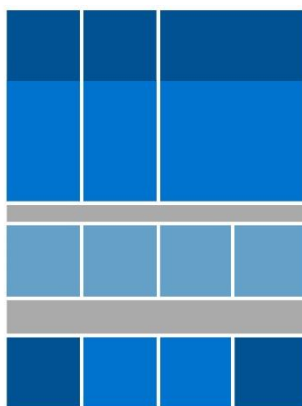
Der sogenannte **Zweibund** zählt zu den klassischen Varianten der Grundrissorganisation; er ist darum in sehr vielen Laboratorien vorzufinden. Hierbei sind zwei Raumbünde durch einen Flur voneinander getrennt. Meist liegen die Nutzungsbereiche der Labore den Büros gegenüber.

Abb. 3 Zweibund [10, S. 30] (Eigene Darstellung)



Auch die **dreibündige Organisation** gehört zu den klassischen Möglichkeiten der Grundrisseinteilung. Sie unterscheidet von der zweibündigen Grundrissorganisation eine zusätzliche, mittig platzierte Zone, die sogenannte Dunkelzone. Biologische Forschungseinrichtungen haben einen höheren Bedarf an Geräteräumen, weshalb diese zur Dreibündigkeit tendieren. Chemische und vor allem physikalische Labore benötigen weniger Dunkelräume und werden deshalb vorzugsweise als Zweibund konzipiert. [24, S. 870]

Abb. 4 Dreibund [10, S. 30] (Eigene Darstellung)



Natürlich gibt es auch eine Vielzahl an **Sonderformen** in der Grundrissorganisation. Beispielsweise kann die dreibündige Organisationsform abgewandelt werden, indem die Büroflächen direkt mit der Laborzone verbunden werden. Meist werden diese beiden Bereiche nur durch ein Glaselement räumlich voneinander getrennt, damit der Blickkontakt und folglich eine bessere Kommunikation möglich ist. Dunkelzone und Servicebereich bleiben wie in der dreibündigen Organisation bestehen.

Abb. 5 Sonderform [10, S. 30] (Eigene Darstellung)

Der Trend im Laborbau entwickelt sich seit rund zehn Jahren immer weiter hin zur Öffnung der Laborstrukturen. [24, S. 871] Gründe dafür sind die Zunahme von teamorientierter Forschung und die nicht mehr wegzudenkende Nutzung von Informationstechnologien (IT). Diese Entwicklungen stellen neue Herausforderungen an die Planer von Forschungseinrichtungen und verlangen neue Entwurfskonzepte. Sogenannte „Kombilabore“, sehr offene und flexible Laborstrukturen, erobern den derzeitigen Markt, da diese Typologie die Aspekte der Kommunikation und Flexibilität vermehrt in den Vordergrund rückt.



Unabhängig von der Organisationsform der Nutzungsbereiche, sind Labor- und Büروفunktionen immer an den Außenbänden eines Laborgebäudes anzusiedeln. Damit wird der Sichtkontakt nach außen und zusätzlich die natürliche Belichtung der Arbeitsplätze gewährleistet. Räume die keine natürliche Belichtung benötigen, wie zum Beispiel Kühl- oder Lagerräume, werden vorzugsweise im Gebäudeinneren angesiedelt.

### 3.3.4 Dimensionierung

Nach der Vorstellung der Grundrissorganisationsformen kann nun auf die Dimensionierung von Laboratorien eingegangen werden. Die Breite von Forschungseinrichtungen wird durch die funktionalen Bindungen bestimmt, die Tiefe hingegen durch die Labormöblierung. Der klassische Labortisch besitzt ein Regemaß von 1,20 m x 0,80 m. Daraus ergibt sich eine Standardbreite für das Ausbauraster von 1,15 m und für das konstruktive Achsmaß folglich 3,45 beziehungsweise 6,90 m. Damit sind die Abstände zwischen den Laborwerkbänken und den Fluren optimiert. Nach DIN EN 14056 muss die Gangbreite mindestens 1,45 m betragen. [10, S. 18–22]

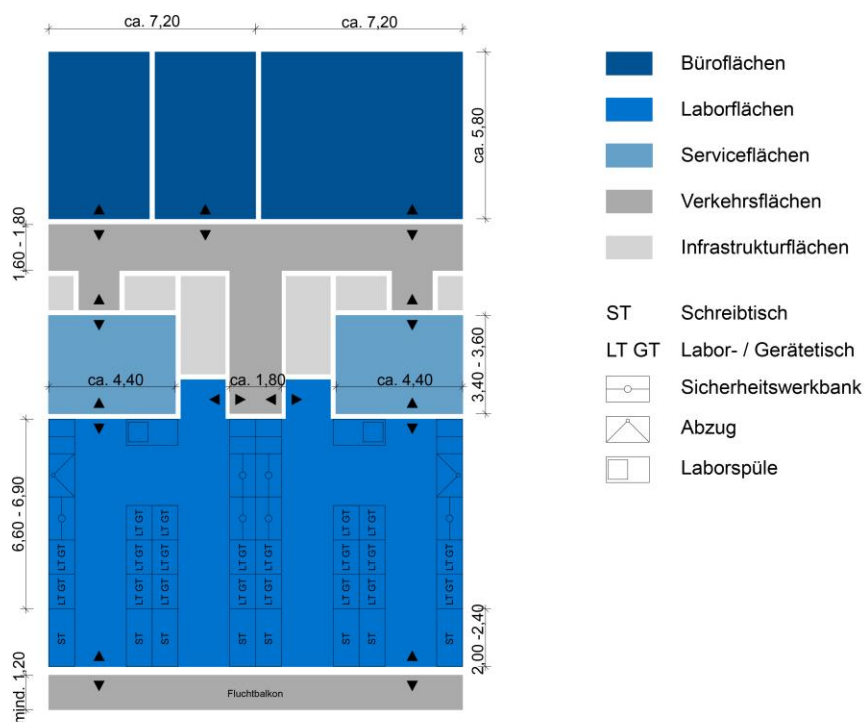


Abb. 6 Mindestbreiten in Laboren [10, S. 36] (Eigene Darstellung)

Das Spektrum des Ausbaurasters bewegt sich zwischen 1,05 und 1,30 m, doch Abweichungen vom Standardmaß müssen gut überlegt sein, da Folgen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit auftreten können. Geringere Abstände zwischen den Bänken entsprechen Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte von Laborgebäuden

nicht mehr den Laborrichtlinien und auch größere Abstände wären nicht gewünscht, da unkontrollierbare Abstellflächen entstünden.

Büro- und Laborflächen zählen zu den größten Nutzungsbereichen in Forschungsgebäuden. Doch gerade in diesen beiden Bereichen klaffen die Anforderungen an die Geschosshöhe am weitesten auseinander.

Bei Laboratorien ist die Geschosshöhe durch den Platzbedarf der technischen Geräte gegeben. Es ergibt sich eine notwendige Mindestgeschosshöhe zwischen 3,80 und 4,00 m. [10, S. 19–20]

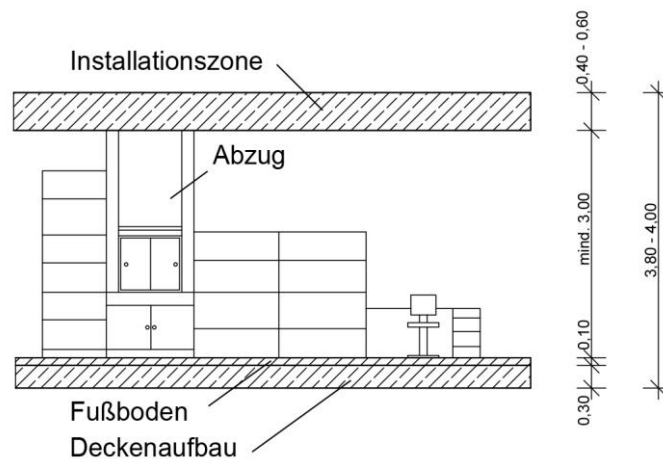


Abb. 7 Erforderliche Geschosshöhe für Laboratorien mit Abzug [10, S. 20] (Eigene Darstellung)

Die Mindestgeschosshöhe von Büroräumen ist von den jeweiligen Länderbauordnungen abhängig. Diese schreiben vor, dass die lichte Raumhöhe für Aufenthaltsräume mindestens 2,40 m betragen muss. [10, S. 20] In der Praxis weisen Büroräume aus Gründen des Raumeindrucks und der Flexibilität Geschosshöhen zwischen 2,90 und 3,40 m auf.

Die unterschiedlichen Anforderungen an die Geschosshöhe der beiden Hauptnutzungsbereiche führen zu Problemen in der architektonischen Konzeption von Forschungsgebäuden. Wissenschaftler bevorzugen kurze Wege zwischen den beiden Bereichen. Somit entstehen Büroräume mit sehr hohen Geschossen. Dies ist wirtschaftlich nicht sinnvoll und aus diesem Grund empfehlen Experten eine Differenzierung zwischen reinen Labor- und reinen Bürobereichen. Der sogenannte Split-Level-Typus ist sowohl wirtschaftlich als auch technisch sinnvoller, doch er wird wegen der längeren Wege zwischen Labor- und Büroräumen meist nicht gewünscht. [24, S. 870]

Am Ende des Kapitels zur Grundrissorganisation kann festgehalten werden, dass sich in den letzten Jahren folgende wirtschaftliche Größenordnung für Laborgebäude ergeben haben:

- Längenausdehnung von ca. 25 bis 30 m
- 3 bis 4 Geschosse, plus Untergeschoss und Dachtechnikzentrale [24, S. 868]
- Standardbreite Ausbauraster von 1,15 m
- Raumtiefen von ca. 6 bis 13 m → abhängig von Erschließungsprinzip, Schachtordnung, Brandschutzkonzept [10, S. 76]
- Konstruktives Achsmaß von 3,45 beziehungsweise 6,90 m. [10, S. 21]

Durch das Einhalten von bestimmten Planungsregeln und vor allem durch die Arbeit in interdisziplinären Planungsteams sollte es in Zukunft möglich sein, effizientere und nachhaltigere Laborgebäude zu entwerfen und somit die beachtlichen Umweltauswirkungen von Laborgebäuden zu verbessern.

### **3.4 Technische Gebäudeausstattung**

Da es sich bei Laborgebäuden meist um hochtechnisierte Gebäude handelt, spielt die technische Gebäudeausstattung (TGA) im Laborbau eine entscheidende Rolle. Hans-U. Jaeger unterstreicht die Wichtigkeit der technischen Gebäudeausstattung, indem er die Anlagen der Versorgungstechnik als „den Kreislauf, das Stoffwechselsystem und das Nervensystem einer Forschungsstätte [beschreibt], ohne die ein Arbeiten oder Forschen nicht möglich [wäre].“ [29, S. 60] In Laborgebäuden dient die TGA nicht nur, wie es in den meisten Gebäuden üblich ist, der Regulierung des Raumklimas und somit der Sicherstellung der Behaglichkeit der Nutzer, sondern erfüllt zwei weitere wichtige Funktionen: Den Schutz der Nutzer vor gesundheitsbeeinträchtigenden Luftschadstoffen sowie die Versorgung der Labore mit den benötigten Medien für experimentelles Arbeiten. Auch die Entsorgung nicht mehr benötigter Medien, wie beispielsweise Abwasser oder Abwärme, spielt in Laborgebäuden eine wichtige Rolle. [10, S. 22]

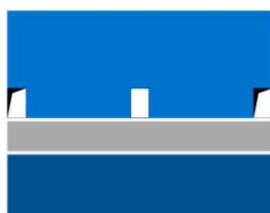
Der TGA sollte bereits in frühen Entwurfsphasen eine erhebliche Bedeutung eingeräumt werden, denn Anlagen der Versorgungstechnik beeinflussen die Installationswege, die Geschosshöhen, das Brandschutzkonzept, die Gebädekubatur und das Erscheinungsbild eines Laborgebäudes maßgeblich. Zudem ist die Gebäudetechnik auch aus wirtschaftlicher Sicht essenziell, da sie bei Forschungsgebäuden rund 50 % der Gesamtbaukosten ausmacht und während der Nutzungsphase für den Großteil der Betriebskosten verantwortlich ist. [23, S. 45]

Wie schon bei der Planung der Grundrissorganisation hat auch bei der Planung der technischen Gebäudeausstattung die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Experten eine Schlüsselrolle für die Konzeption eines erfolgreichen Projektes. Nur eine Entwurfsplanung, die die Technik integriert, führt zu überzeugenden und finanzierbaren Forschungsbauten. [24, S. 869] Als wirtschaftlich werden Gebäude bezeichnet, die nicht überinstalliert sind und sowohl flexibel betreibbar, als auch nachrüstbar sind. Als Leitbild von Technikkonzepten gilt die sogenannte Entflechtung. Sie beschreibt die kreuzungsfreie und niveaugetrennte vertikale und horizontale Trassierung von Installationen. [23, S. 45]

Zu Beginn der Planung der technischen Gebäudeausstattung empfiehlt sich, wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, eine Einteilung des Gebäudes in verschiedene Raumgruppen. Steht die Einteilung in verschiedenen konditionierte Räume, kann mit der Schachtkonzeption begonnen werden. Ziel ist es, möglichst kurze Installationsleitungen für die Zu- und Abfuhr von Medien zu schaffen. Es gibt zwei Möglichkeiten der Ausführung von Leitungsschächten in Laborgebäuden: Sie können in Form von Einzelschächten oder Zentralschächten angelegt werden. [10, S. 24–25]



**Einzelschächte** beliefern einzelne Laborräume mit Medien und bieten somit eine individuelle Versorgung. Sie eignen sich besonders bei Laboratorien mit begrenzten Raumhöhen oder anspruchsvollen Hygieneanforderungen. Sie zeichnen sich positiv durch kurze Leitungswege aus, aber verbrauchen sehr viel Fläche und benötigen einen hohen Anteil an Brandschutzklappen.



**Zentral- oder Sammelschächte** werden in Forschungseinrichtungen meist mittig oder außen platziert und werden hauptsächlich in Gebäuden verbaut, in denen ein hoher Luftwechsel erforderlich ist. Im Vergleich zur Ausführung in Form von Einzelschächten benötigen Zentral- oder Sammelschächte weniger Brandschutzklappen und kleinere Dachzentralen.



Abb. 8 Schachtkonzepte [23, S. 44] (Eigene Darstellung)

In den meisten Gebäuden werden Kombinationen aus Einzel- und Zentralschacht bevorzugt, da dadurch eine differenzierte Bedarfszuordnung für Zuluft, Abluft und Medien gewährleistet wird. Die Wahl der Schachtart hängt jedoch immer vom jeweiligen Einzelfall ab.

Neben der soeben beschriebenen Installationsführung zählen auch die Raumluftechnik, die Heizung, die Kühlung und die Medienversorgung zur technischen Grundausstattung eines jeden Laborgebäudes. Jede Technikart wird durch individuelle Anforderungen und gestaltungsrelevante Aspekte bestimmt, die in der Planung berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden wird auf die wichtigsten technischen Anlagen kurz eingegangen.

Die **Raumluftechnik** (RLT) dient überwiegend der Abfuhr von stofflichen und thermischen Lasten, der Frischluftversorgung sowie der Konditionierung der zugeführten Luft. Des Weiteren sorgt sie für die Aufrechterhaltung des Überdrucks in Reinräumen sowie des Unterdrucks in Räumen, in denen Stoffe mit hohem Gefährdungspotenzial Verwendung finden. Die RLT-Anlagen in Laboratorien müssen drei Aufgaben erfüllen:

- Die Versorgung mit einer ausreichenden Menge an Frischluft, wobei die Behaglichkeitskriterien (siehe DIN EN 15251) einzuhalten sind
- Die Verdünnung und Abfuhr von möglicherweise freigesetzten Gefahrstoffen, um Gesundheitsgefährdungen über die Atemluft zu vermeiden
- Den Abluft- und Zuluftbedarf von Laboreinrichtungen und Geräten sicherzustellen.

Bei der Planung der Raumluftechnik sollte aus wirtschaftlichen Gründen zwischen mechanisch und natürlich belüfteten Räumen unterschieden werden. Büroräume oder Verkehrsflächen benötigen beispielsweise nicht zwingend eine raumluftechnische Anlage und können natürlich belüftet werden. [24, S. 869] Die natürliche Belüftung führt zu einer erheblichen Senkung der Betriebsenergie der Lüftungsanlage und zu einer höheren Nutzerakzeptanz, da aktiv Einfluss auf die Raumqualität genommen werden kann. Die restlichen Räume eines Forschungsgebäudes, wie zum Beispiel die Laboratorien selbst oder Räume mit hohen Wärmelasten, werden raumluftechnisch mechanisch ver- und entsorgt. Die raumluftechnischen Anlagen kommen in Forschungsbauten den Aufgaben des Filterns, des Heizens und des Kühlens nach. [23, S. 45–46] Da die Raumluftechnik auf Grund ihrer Dimensionen viel Fläche einnimmt, sollte eine optimale Anordnung wie folgt aussehen: Zuluftzentrale im Untergeschoss und Abluftzentrale auf dem Dach. [23, S. 46] Dadurch werden Leitungswege verkürzt, Schachtgrößen reduziert und Energieverluste vermieden. Ein Nachteil dieser Anordnung ist jedoch, dass das Prinzip der Wärmerückgewinnung nicht umgesetzt werden kann, da die Leitungen der Zu- und Abluft nicht aneinander vorbeiführen und aus diesem Grund kein Wärmeaustausch erfolgen kann. Die Zuluft wird in Laboratorien über Lüftungskanäle und Luftauslässe eingebracht. Über Abzüge oder Luftkanäle wird die Abluft dann wieder abgesaugt. Wichtig bei der Konzeption ist, dass die Ansaug- und

Ausblasöffnungen nicht zu nahe aneinander liegen, da es sonst zu Kurzschlüssen kommen kann. [23, S. 46]

Die DIN 1946 (Teil 7) liefert die Basis für die Bemessung der erforderlichen Lüftungsleistung der Raumluftechnik. Bei Laborgebäuden liegt der permanente Abluftvolumenstrom bei  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $\text{m}^2$  Hauptnutzfläche (HNF). Dies entspricht einem achtfachen Luftwechsel pro Stunde in einem Raum von 3 m Höhe. Ein derart hoher Luftwechsel führt zu erheblichen Investitions- und Betriebskosten, weshalb in der heutigen Praxis der Luftwechsel in Räumen, in denen nicht mit Gefahrstoffen gearbeitet wird, aus Gründen der Effizienz und Nachhaltigkeit, auf einen vierfachen Luftwechsel reduziert werden kann. [10, S. 23–24] Durch diese Maßnahme wird in Zukunft versucht, auf unnötig hohe Luftwechselraten zu verzichten und damit den Energiebedarf von Laborgebäuden beträchtlich zu senken.

Auch die **Heizung** und **Kühlung** von Laborgebäuden darf nicht vernachlässigt werden. Die Heizung stellt dabei ein unkritisches Gewerk dar, da Forschungsbauten eher durch Gewerke wie Lüftungstechnik und Kälteversorgung geprägt werden. [24, S. 869] Der wirtschaftlich optimalste und effizienteste Weg der Wärmeversorgung ist der Anschluss an das öffentliche Fernwärmenetz. [23, S. 46] Diese Lösung ist wesentlich wirtschaftlicher, als Forschungsgebäude selbst mit Wärme zu versorgen.

Die Kälteversorgung gewinnt hingegen immer mehr an Bedeutung, da die Gerätebestückung der Labore immer dichter wird. Es wird zwischen zwei Arten der Kühlung unterschieden: Die Kälteversorgung für RLT Anlagen und die Prozesskühlung für Experimente. Rückkühlwerke werden in der Regel auf dem Dach, Kältemaschinen meist im Untergeschoss oder auf dem Dach untergebracht. Beide Anlagen sind sowohl visuell als auch akustisch und schwingungstechnisch entwurfsrelevant. [24, S. 869]

Bei der Betrachtung der **Medienversorgung** von Laborgebäuden ist zu Beginn zu klären, ob eine zentrale oder eine dezentrale Versorgung sinnvoll ist. [23, S. 46] Nur Medien, die regelmäßig an vielen Verbrauchsstellen benötigt werden, sollten über eine zentrale Versorgung zugeführt werden, da sonst die Gefahr von Verunreinigungen oder Leckagen besteht. [10, S. 24] Unterschieden wird zwischen drei Arten der Versorgung: Gase und Medien können als Zentrallager, Gruppenlager (geschossweise) oder als Einzelflaschen im Laboratorium vorhanden sein. [23, S. 46] Die Wahl der Versorgungsart hängt grundsätzlich davon ab, in welcher Menge und Qualität das Medium benötigt wird. Es bietet sich beispielsweise an, häufig verwendete Gase wie Stickstoff oder Argon über ein Zentrallager zuzuführen. Damit wird das Laborpersonal entlastet. Bei hochreinen Gasen bietet es sich hingegen an, Einzelflaschen in den jeweiligen Laboratorien bereitzustellen. [10, S. 26]

Wichtig bei der Planung ist außerdem die frühzeitige Klärung der Stickstoffversorgung. Der dafür notwendige voluminöse Tank wirkt sich nämlich beträchtlich auf die Gestaltung der Außenanlagen aus. [24, S. 869]

Bei der **Wasserversorgung** ist zu beachten, dass Abwasser und Laborwasser meist als zwei getrennte Systeme ausgeführt werden. [24, S. 869] Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Regenentwässerung und Feuerlöscheinrichtungen die Außenraumgestaltung beeinflussen können.

Das letzte im Rahmen dieser Arbeit besprochene Gewerk stellt die **Elektroversorgung** dar. Diese nimmt fast die Hälfte des Investitionsvolumens der technischen Gebäudeausstattung von Laborgebäuden ein. [23, S. 47] Durch die Notwendigkeit zahlreicher elektronischer Geräte in modernen Laborgebäuden, werden heutzutage in der Regel eigene Serverräume benötigt. Da sich die Datentechnik in ständiger Entwicklung befindet, ist auch hier die Option der Nachrüstbarkeit sehr wichtig und will sorgfältig geplant sein.

Abschließend ist festzuhalten, dass die technische Gebäudeausstattung eine sehr wichtige Stellschraube in Bezug auf die Effizienz von Laborgebäuden darstellt. Für die Zukunft ist es daher von enormer Bedeutung, neue nachhaltige Systeme zu entwickeln, die zu einer Reduktion der Investitions- und Betriebskosten führen. Aufgabe der Planer wird außerdem sein, bestehende Technikkonzepte zu hinterfragen und diese durch neue, innovative Verbesserungsmaßnahmen zu optimieren.

### 3.5 Sicherheitsanforderungen

Laborgebäude bieten Raum für die Durchführung verschiedenster Tätigkeiten zum Erkenntnisgewinn. Sowohl die in Laboren herrschenden unterschiedlichen Bedingungen, als auch das Nutzen verschiedenster Chemikalien führen zu erhöhten Anforderungen an die Sicherheit. Diese wird nicht nur durch den Bau und die Einrichtung bestimmt, sondern auch das Verhalten des Laborpersonals trägt stark dazu bei. Technische, organisatorische und personelle Maßnahmen führen zu einer Minimierung der Gefährdungen in Laboratorien. [18] Oberste Priorität hat dabei immer der Schutz vor Unfällen und Erkrankungen der im Labor tätigen Personen. [19, S. 455]

In Deutschland existiert eine Vielzahl an Gesetzen und Vorschriften, die sich mit dem Thema Sicherheit in Laborgebäuden auseinandersetzt. Dazu zählen beispielsweise das Arbeitsschutzgesetz oder die Gefahrstoffverordnung. In dieser Arbeit wird hauptsächlich auf die Laborrichtlinien (BGR 120) und die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 526)

eingegangen, da diese in relativ kompakter Form die wichtigsten Aspekte der Sicherheitsanforderungen aufzeigen.

Wichtig in Bezug auf die Sicherheit in Laborbauten ist eine Gefährdungsbeurteilung von Gefahren, die mittelbar oder unmittelbar Auswirkungen auf die Sicherheit haben. Laut Laborrichtlinien ist in Laborgebäuden gewöhnlich mit folgenden Gefährdungen und Gefahrstoffen zu rechnen:

- Brand- und Explosionsgefahr durch brennbare feste, flüssige und gasförmige Stoffe
- Gefahr von Gesundheitsschäden durch feste, flüssige und gasförmige Stoffe
- Gefahr durch unbekannte, heftige und durchgehende Reaktionen
- Augen- und Hautgefährdung durch ätzende und reizende Stoffe. [18]

Doch es gibt noch viele weitere gefährdende Einwirkungen, wie zum Beispiel mangelhafte Beleuchtung am Arbeitsplatz. Bei Arbeiten mit Gefahrstoffen unter unzureichendem Licht wird das Risiko enorm erhöht.

Je nach Gefährdungspotenzial werden gentechnische Arbeiten in vier **Sicherheitsstufen** eingeordnet: [4]

Sicherheitsstufe 1 beinhaltet die Arbeit mit Mikroorganismen, wie beispielsweise Pilzsporen. Bei gesunden erwachsenen Personen führen die harmlosen Stoffe zu keinen Erkrankungen. Labore der Sicherheitsstufe 1 benötigen keine speziellen Maßnahmen zur Verhinderung von Infektionen.

Sicherheitsstufe 2 beinhaltet Arbeiten mit Mikroorganismen, die eine gemäßigte Gefahr für Laborpersonal und Umgebung darstellen. Dazu zählen Stoffe wie beispielsweise Grippeviren oder Salmonellen. Mitarbeiter von S2-Laboren müssen im Umgang mit pathogenen Stoffen geschult sein. Die Labore besitzen meist eine Zugangskontrolle und auch Einrichtungen zur Eindämmung von infektiösen Gasen oder Flüssigkeiten.

Sicherheitsstufe 3 beinhaltet Arbeiten mit Mikroorganismen, die zu schweren Erkrankungen oder Epidemien, wie zum Beispiel Gelbfieber oder Hepatitis, führen können. S3-Labore müssen einen abgeschlossenen Luftkreislauf besitzen, damit potenziell verseuchte Luft nicht in andere



Räume gelangen kann. Die Abluft aus S3-Laboren muss gefiltert werden, bevor sie wieder mit der Außenluft in Berührung kommt.

Sicherheitsstufe 4 beinhaltet Arbeiten mit hochansteckenden Mikroorganismen, die meist tödlich sind oder für die es keine wirksame Behandlungsmethode gibt. Dazu zählt beispielweise Ebola. Auf Grund der enormen Gefahr für Personen und Umwelt besitzen S4-Labore die höchste Stufe von Sicherheitsvorkehrungen bezüglich Stoffkreislauf und Zugangskontrolle. Das Laborpersonal ist verpflichtet, während der Arbeit mit S4-Stoffen, Schutzanzüge zu tragen. Der Luftdruck in den Laboratorien ist außerdem unter leichtem Unterdruck gehalten, damit keine potenziell verseuchte Luft austreten kann.

Nach der Festlegung der Sicherheitsstufen eines Labors, kann ein weiterer wichtiger Punkt in Bezug auf die Sicherheit in Laborgebäuden besprochen werden: Der **Brandschutz**. Bauliche Anlagen jeglicher Art müssen aus baurechtlicher Sicht folgende Schutzziele erreichen: Der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch muss vorgebeugt und die Rettung von Personen oder Tieren gewährleistet werden. Da in Laborräumen spezifische Tätigkeiten, insbesondere mit Gefahrstoffen, durchgeführt werden, werden zudem spezifische Schutzmaßnahmen baulicher, technischer, organisatorischer oder personeller Art gefordert. [18] In der Bauordnung ist geregelt, wie diese Schutzziele erreicht werden. Wegen der unterschiedlichen Laborarten und der Vielzahl an Tätigkeiten mit verschiedenen Gefahrstoffen sind die Schutzmaßnahmen für Laborgebäude laut TRGS 526 fallbezogen festzulegen. [7] Forschungsbauten sind meist als Sonderbauten einzustufen, da sie beispielsweise mehr als 1600 m<sup>2</sup> Grundfläche im Geschoss mit der größten Ausdehnung besitzen oder in ihnen mit Stoffen mit erhöhter Explosions- oder Brandgefahr gearbeitet wird. Für sie gelten gegebenenfalls Sonderbauvorschriften, die im Brandschutzkonzept berücksichtigt werden müssen. [19, S. 77]

Grundlage für die Ausarbeitung erforderlicher Brandschutzmaßnahmen ist das Erstellen einer Gefährdungsbeurteilung für jeden Arbeitsbereich. [3] So ist in Laboren beispielsweise das Arbeiten unter einem Abzug besonders wichtig, da dadurch ein hervorragender Schutz vor toxischen Gefährdungen geboten wird. Bei der Gefährdungsbeurteilung sollte auch der Schutz der Umwelt mit beachtet werden.

Da das Bauordnungsrecht in Deutschland von Region zu Region verschieden ist, wurde eine Musterbauordnung (MBO) eingeführt. Diese hat zwar keine Rechtskraft, dient jedoch als

einheitliche Orientierungshilfe. So lässt sich in abgekürzter Form festhalten, dass im Laborbau:

- für Laborräume raumabschließende Decken, Wände und Türen mit Feuerwiderstandsfähigkeit gefordert sind
- zwei (in der Regel bauliche) Rettungswege mit Anforderungen an notwendige Flure und notwendige Treppen in geeignete Treppenräume vorhanden sein müssen [19, S. 80]
- die Rettungsweglänge in einen notwendigen Treppenraum oder ins Freie maximal 35 m betragen darf. [19, S. 79]

Neben baulichen Maßnahmen zum Brandschutz müssen auch technische, organisatorische oder personelle Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden. Diese werden etwa in Form von Vorbereitungsübungen auf mögliche Brandsituationen, durch Flucht- und Rettungspläne für die Mitarbeiter aber auch durch eine angemessene Lagerung von brennbaren und leicht entzündlichen Stoffen ausgeführt. [3] Auch das Tragen von Sicherheitskleidung oder das Vorsehen von Sicherheitsduschen ist für ein möglichst ungefährliches Arbeiten in Laboren unumgänglich.

In Laborgebäuden muss die Sicherheit von Lebewesen und Umwelt an oberster Stelle stehen. Nur wenn ein unbedenkliches Forschen möglich ist, können die Mitarbeiter in geschützter Atmosphäre neue Erkenntnisse gewinnen.

### **3.6 Aktuelle Trends im Laborbau**

Die Wissenschaft und die Forschung befinden sich in einem stetigen Wandel. Künftige Laborgebäude müssen dieser Dynamik Rechnung tragen und sich den ständig ändernden Anforderungen anpassen. Nachdem in den vorherigen Abschnitten des Kapitels „Typologie Laborgebäude“ erläutert wurde, wie Laborgebäude in der Regel geplant und gebaut werden, sollen nun die aktuellen Trends im Laborbau aufgezeigt werden. Anhand der Entwicklungen im letzten Jahrzehnt kann ein Ausblick auf künftige Trends im Laborbau gegeben werden.

Seit rund zehn Jahren ist eine Tendenz zu zunehmend größeren und offeneren Laborstrukturen erkennbar. [35, S. 14] Hervorgerufen wird dieser Wandel überwiegend durch die zunehmende Interdisziplinarität der Forschungsaufgaben und -gruppen und dem daraus resultierenden erhöhten Bedarf an Kommunikation in den Forscherteams. In den sogenannten Kombilaborstrukturen werden durch die offene Grundrissstruktur bessere Kommunikationsmöglichkeiten für die Mitarbeiter geschaffen und durch die intelligente

Abfolge von Räumen offene, geschlossene, akustisch abgeschirmte oder nicht abgeschirmte Bereiche abwechslungsreich aneinander gereiht. Außerdem bieten größere räumliche Einheiten mehr Anpassungsfähigkeit in Bezug auf heute noch nicht absehbare künftige Veränderungen. [24, S. 871]

Weitere entscheidende Entwicklungen im Bereich der Forschung stellen die zunehmende Digitalisierung sowie die Automatisierung der Arbeitsprozesse dar. Es lässt sich derzeit durch die steigende Automatisierung noch keine Veränderung der Anzahl der Laborarbeitsplätze vermerken, aber die Dichte der Laborarbeit erhöht sich. Das bedeutet, dass mehr Prozesse pro Flächeneinheit durchgeführt werden können. Auch die Geschwindigkeit der Informationsflüsse ist enorm gestiegen, was in Zukunft eine Ausstattung der Labore mit unterstützender Informationstechnologie unumgänglich macht. Eine umfangreiche Vernetzung soll die Kommunikation zwischen den Forschern erleichtern und somit einen schnelleren Austausch von Informationen, beispielsweise zum Stand von Versuchen, ermöglichen. [10, S. 9]

Auch im Bereich der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz sind positive Entwicklungen im Laborbau zu vermerken. Es werden vermehrt kompakte, massive Strukturen mit geringem Glasanteil gebaut, um solare Einträge im Sommer zu minimieren und geringere Wärmeverluste im Winter zu verzeichnen. Zusätzlich sorgen Initiativen wie BNB, DGNB oder EGNATON dafür, dass das hervorragende Niveau europäischer Forschungsgebäude gestärkt wird und damit zu einer vorbildlichen Labor-Baukultur führt. [24, S. 872]

Abschließend kann festgehalten werden, dass das Labor der Zukunft Raum für Begegnungen und Gespräche bietet und damit einen erheblichen Mehrwert zu standardisierten Laborstrukturen aufweist. Gleichzeitig werden die Digitalisierung und Automatisierung große Herausforderungen für die künftigen Planer von Laborgebäuden mit sich bringen, die nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit bewältigt werden können. Bei der Planung und im Betrieb von Laborbauten sind die Aspekte der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz unabdingbar mit zu berücksichtigen. Nur wenn all diese Punkte Beachtung finden, können flexible Labore entstehen, die sich derzeit kaum voraussehbaren weiteren Entwicklungen in Wissenschaft und Forschung anzupassen vermögen.

Ende des, mit Silvia Giordano (Matrikelnummer: 03622327), gemeinschaftlich erarbeiteten Teils der Masterarbeit.

### 3.7 Nachhaltigkeit von Laborgebäuden

Das Thema Nachhaltigkeit ist aktueller denn je und aus diesem Grund aus fast keinem Lebensbereich mehr wegzudenken. Auch im Gebäudesektor wird der Nachhaltigkeit eine bedeutende Rolle zugemessen: In Deutschland ist der Bausektor für rund 40 % des Energieverbrauchs verantwortlich. [28] Dieser enorme Wert lässt erahnen, wie hoch die Optimierungspotenziale in diesem Bereich sein könnten. Durch nachhaltiges Bauen und Sanieren wäre eine hohe Energieeinsparung möglich, durch die dem Ziel eines „nachhaltigeren Deutschland“ beträchtlich näher gekommen werden könnte. Die Bundesregierung hat die Problematik und das Potenzial erkannt und im Jahre 2010 mit dem Energiekonzept ehrgeizige Ziele für den Klimaschutz festgelegt. Der Gebäudebestand soll in Deutschland bis zum Jahre 2050 nahezu klimaneutral sein. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, muss der Primärenergiebedarf gegenüber 1990 um rund 80 % vermindert werden. Im Rahmen der internationalen Klimapolitik haben die Mitgliedsstaaten auf europäischer Ebene verbindliche Klima- und Energieziele vereinbart. Innerhalb der EU sollen bis 2020 folgende Ziele erreicht werden (20-20-20 Formel): [36]

- 20 % weniger Treibhausgasemissionen (gegenüber 1990)
- 20 % höhere Energieeffizienz
- 20 % Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch.

Die EU ist auf einem guten Weg, die angestrebten Ziele bis 2020 zu erreichen. Um auch die langfristigen Ziele bis 2050 zu erfüllen, müssen in vielen Sektoren und Lebensbereichen nachhaltige Konzepte entwickelt und umgesetzt werden.

Nachhaltigkeit und Energieeffizienz haben auch für Laborgebäude eine erhebliche Relevanz, da es sich um Gebäude handelt, die vor allem im Betrieb sehr viel Energie verbrauchen. Aus diesem Grund wird im Kapitel „Nachhaltigkeit von Laborgebäuden“ besprochen, welche Maßnahmen für einen nachhaltigen Laborbau und -betrieb über den gesamten Lebenszyklus möglich sind und welche Zertifizierungssysteme für Laborgebäude genutzt werden können. Abschließend wird auf das gegenwärtig diskutierte Thema „Greenwashing“ eingegangen.

#### 3.7.1 Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus eines Laborgebäudes

Auf Grund der komplexen Eigenschaften von Forschungsgebäuden und den wesentlich höheren Energieverbrauchswerten im Gegensatz zu anderen Gebäudearten, führt im Bereich der Laborarchitektur das Durchsetzen von Maßnahmen zur Nachhaltigkeits- und Effizienzsteigerung zu besonders guten Ergebnissen. Wichtig ist dabei die Berücksichtigung

des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Verbesserungsmaßnahmen nur in gewissen Bereichen reichen nicht aus. Nachhaltige Strategien müssen von der Herstellung bis zum Rückbau eines Gebäudes bedacht werden, nur dann können Verbesserungen hinsichtlich Kostensenkung und verringerter Belastung für die Umwelt erreicht werden. Die Umsetzung nachhaltiger Strategien führt gleichzeitig meist zu Effizienzsteigerung. [19, S. 373] Nachhaltige Architektur legt beispielsweise Wert auf sorgfältige Materialwahl, welche ihrerseits ein angenehmes Innenraum- und somit Arbeitsklima schafft und auf diese Weise das Wohlbefinden der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen verbessert, die folglich als Team eine bessere Leistung erbringen.

Um in Zukunft die Entstehung von nachhaltigen und effizienten Laborgebäuden zu fördern, wird vermehrt auf die Zertifizierung gesetzt. Schon während des Planungsprozesses sollen Optimierungen im Bereich des Luftwechsels, des Energieverbrauchs und des Beleuchtungskonzeptes durchgeführt werden. Besonders hohe Verbesserungspotenziale gibt es im Bereich der Anlagen für Be- und Entlüftung: Sie verbrauchen mindestens 40 % der Gesamtenergie eines Laborbaus, weshalb alle reduzierenden Maßnahmen beträchtliche Einsparungen ermöglichen. [19, S. 380] Die Laborlüftung dient vorrangig dem Schutz des Laborpersonals vor gefährlichen Substanzen und erst in zweiter Linie dem Komfort. Die Sicherheit ist oberstes Schutzziel und hat prioritäre Bedeutung gegenüber der Energieersparnis. Hohe Luftwechselraten bedeuten aber nicht automatisch mehr Sicherheit; sie können sich auch nachteilig auf die Gesundheit der Nutzer auswirken. Insofern kann nur eine intelligente Laborlüftung, die sich an die jeweiligen Bedingungen anpasst, die Lösung für ein sowohl auf Sicherheit als auch auf Komfort ausgerichtetes System sein. Die Lüftung kann zum Beispiel nur in bestimmten Bereichen, in denen aus sicherheitstechnischen Gründen ein erhöhter Luftwechsel auch effektiv notwendig ist, einen hohen Luftwechsel erzeugen und im Rest des Laborgebäudes nicht mit höchster Leistung fahren. Diese Maßnahme würde den Energieverbrauch von Forschungseinrichtungen schon entscheidend verbessern.

Doch mit der erfolgreichen Zertifizierung eines Gebäudes und den dadurch schon in frühen Planungsphasen einbezogenen Optimierungsmaßnahmen, werden erst die notwendigen Voraussetzungen für ein nachhaltiges Laborgebäude geschaffen. Für einen dauerhaft nachhaltigen Laborbetrieb ist ein ständiges Sicherstellen von individuellen Strategien für einen nachhaltigen Betrieb, in Form von Labormanagement, notwendig. [19, S. 374] Ohne ständiges Messen, Steuern und Regeln ist ein nachhaltiger Betrieb nicht möglich.

Neben Optimierungsmaßnahmen im Bereich der Laborlüftung verbessern unzählige weitere Maßnahmen die Nachhaltigkeit und Energieeffizienz von Laborgebäuden. Beispielsweise müssen zukunftsfähige Laborbauten ein hohes Maß an Flexibilität aufweisen, um künftige Entwicklungen zu ermöglichen und den immer wichtiger werdenden Raum für Kommunikation zu gewährleisten. Auch eine nachhaltige Gestaltung der Laborarbeitsplätze ist unabdingbar.

Im Zentrum steht bei allen Maßnahmen die Frage, wie die Laborarbeit in Zukunft aussehen wird. Da diese Frage nicht eindeutig beantwortet werden kann, bewegen sich Planer auf der sicheren Seite, wenn sie eine energieeffiziente und nachhaltige Bauweise wählen und einen angemessenen Technikeinsatz vorsehen. Gebäude dieser Art verringern sowohl Investitions- als auch Betriebskosten und bieten im Idealfall den Nutzern direkte Beeinflussbarkeit der für den Betrieb ausschlaggebenden Technik. Nachhaltigkeit mit gekoppelter Effizienzsteigerung ist im Laborbau sehr wichtig, denn nur in hohem Grad funktionsfähige Gebäude, die durch ihre besondere Atmosphäre leistungssteigernde Wirkung erzeugen und in keinem Fall die Sicherheit vernachlässigen, sind zukunftsfähig.

### 3.7.2 Zertifizierungssysteme

Nachhaltigkeit ist im Zuge des Umweltschutzgedankens, der Energieverknappung und nicht zuletzt im Hinblick auf das Erbe, das wir nachfolgenden Generationen überlassen, zu einer wichtigen Verantwortung des Menschen geworden. Da aber oft nur einzelne Personen den Nachhaltigkeitsgedanken leben, sind in den letzten Jahrzehnten Leitlinien entstanden, die eine Orientierung für jedermann ermöglichen. In Form von Nachhaltigkeitszertifizierungen können Gebäude unter ökonomischen, ökologischen und sozio-kulturellen Aspekten bewertet werden und somit Gebäuden Nachhaltigkeit eines gewissen Grades attestieren. Weltweit gibt es für Büro- und Wohngebäude schon lange eine Vielzahl an Zertifizierungssystemen. Neu ist hingegen, dass nun auch Laborgebäude zertifiziert werden können.

Zertifizierungen stellen ein allgemein anerkanntes Reglement dar und verhelfen den Planern bei der Umsetzung von nachhaltigen Gebäuden. Trotz der Verschiedenheiten der unterschiedlichen Systeme, ist allen gemein, dass hohe Ansprüche an die Architektur, die Gebäudetechnik und die daraus resultierenden Planungsprozesse gestellt werden. [19, S. 373] Die Anforderungen der Systeme entwickeln sich allmählich zu Standards, die langfristig alle Gebäude erfüllen müssen und die vermutlich auch Teil der gesetzlichen Vorschriften werden. [25, S. 10] Denn von den Zertifizierungen profitieren

schließlich alle: Die Bauherren von der Planungssicherheit und den verbesserten Vermarktungschancen, die Betreiber von einer höheren Gebäudequalität und höheren Mieten und die Nutzer von angenehmeren Wohnverhältnissen und niedrigeren Betriebskosten. Ziel der Nachhaltigkeitszertifizierung ist eine transparente, möglichst umfassende Darstellung der Gebäudequalität eines Bauwerkes.

Im Laufe dieser Arbeit werden nur die bekanntesten und für Laborgebäude relevanten Green Building Zertifizierungssysteme vorgestellt. Wichtig ist, dass subjektive Einflüsse des Audits vermieden werden sollen und sich deshalb alle Systeme bemühen, möglichst viele quantitativ bewertbare Kriterien einzubeziehen. [19, S. 374]

### **BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method**

Das erste Zertifikat zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden war BREEAM aus Großbritannien. Es kann als die Urversion aller Zertifizierungssysteme der ersten Generation bezeichnet werden, da sich die Inhalte und Bewertungsschemata der meisten Zertifikate danach orientieren. [26, S. 30] Seit einiger Zeit zählen auch Laborgebäude zu den zertifizierbaren Nutzungsarten von BREEAM. Sie werden in der Kategorie BREEAM Other Buildings, die zu sonstigen Nutzungsarten gehören, bewertet.



Abb. 9 BREEAM - Logo [6]

Die Standardkriterien in den verschiedenen Nutzungsarten sind:

- Management
- Gesundheit und Behaglichkeit
- Energie
- Transport
- Wasser
- Materialien
- Abfall
- Flächenverbrauch und Grundstücksökologie
- Emissionen
- Zusatzkriterien für außergewöhnliche Leistungen.

Je nachdem, wie gut ein Gebäude in den verschiedenen Kriterien bewertet wird, desto höher ist der prozentuale Gesamterfüllungsgrad. Daraus ergibt sich im Folgenden ein Zertifizierungsgrad der die endgültige Bewertung des Gebäudes beschreibt. Schneidet ein Gebäude beispielsweise in allen Kategorien sehr gut ab und erhält es in der Gesamterfüllung mehr als 85 %, dann wird es mit der Bestnote „Herausragend“ bewertet.

### **LEED – Leadership in Energy and Environmental Design**

Dieses Bewertungssystem wurde 1998 in den Vereinigten Staaten entwickelt und ist weltweit am weitesten verbreitet. [19, S. 374] Für Laborgebäude werden zurzeit verschiedene Nutzungsarten unterschieden:

- LEED NC – Neubau und Sanierung
- LEED CI – Büroinnenausbau
- LEED EB – Bestandsgebäude
- LEED CS – Rohbau.

Den Nutzungsarten sind jeweils verschiedene Kategorien zugeordnet. Die verschiedenen Kriterien werden bewertet und je nach Punktezahl erreicht ein Gebäude eine gewisse Bewertungshöhe, welche das Ergebnis der Bewertung darstellt. Unterschieden wird zwischen Silber, Gold und Platin.

Neben dem Zertifizierungssystem für Laborgebäude besitzt LEED in Zusammenarbeit mit der amerikanischen Umweltbehörde EPA und dem amerikanischen Energiedepartment DOE seit Mitte der 1990er Jahre die Initiative „Laboratories for the 21st Century“ (Labs21). [37] Experten aus aller Welt tauschen sich auf regelmäßigen Konferenzen zum Thema



Nachhaltigkeit im Laborbau und -betrieb aus. Der Fokus liegt neben nachhaltigem und effizientem Laborbau und -betrieb bei der Reduktion von Wasserverbrauch und der Sicherheit der Mitarbeiter. Labs21 will mit Hilfe von selbst erstellten Richtlinien und Tools Planungshilfen und -tips für Planer beziehungsweise Bauherren anbieten und damit eine unterstützende Organisation darstellen. [31, S. 15]

*Abb. 10 LEED - Logo [40]*

Problematisch bei der Umsetzung der LEED Regeln in Europa ist der Bezug auf den amerikanischen ASHRAE Standard. Des Weiteren ist der Kriterienkatalog sehr stark auf Bürogebäude ausgelegt und bietet nur wenige laborspezifische Kategorien und Kriterien. Da



LEED aber einen sehr hohen Marktanteil hat und der Marketingeffekt dadurch verstärkt wird, bevorzugen viele Planer oder Bauherren die LEED Zertifizierung.

### **DGNB – Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen**

Im Jahre 2009 hat die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen in Kooperation mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) ein System zur Nachhaltigkeitsprüfung von Gebäuden entwickelt. Während sich das BMVBS auf die Bewertung von Bundesbauten, in Form des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB), konzentriert, hat die DGNB ein vollständiges Zertifizierungssystem für verschiedenste Gebäudenutzungen und Quartiere aufgebaut. Das Nachhaltigkeitskonzept des DGNB geht über das klassische Dreisäulenmodell hinaus und umfasst sechs Themenfelder: [41, S. 17]

- Ökologie
- Ökonomie
- Soziokulturelle und funktionale Aspekte
- Technik
- Prozesse
- Standort.

Das Bewertungssystem bezieht stets den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes mit ein und berücksichtigt die ersten vier Themenfelder mit gleicher Gewichtung in der Bewertung. Damit ist das DGNB System das einzige Bewertungssystem, das den wirtschaftlichen Aspekten gleich große Bedeutung wie den ökologischen Aspekten zumisst. [12]



Entscheidend ist des Weiteren, dass das DGNB System immer die Gesamtperformance eines Bauwerks bewertet und nicht einzelne Maßnahmen.

*Abb. 11 DGNB - Logo [17]*

Im Jahre 2011 wurde das System um Zertifizierungskriterien für Laborgebäude erweitert. [19, S. 376] Das Bewertungssystem geht im Gegensatz zu den anderen Systemen genauesten auf die technischen Details ein. Da Labore sehr vielfältig genutzt werden können, dient ein virtuelles Laborgebäude (Referenzgebäude) als belastbare Vergleichsgrundlage. Darin sind technische Mindestvorgaben und Konstruktionsanweisungen definiert. Bewertet werden die von dem realen Laborgebäude

(Bewertungsgegenstand) erzielten Verbesserungen in Bezug auf das virtuelle Gebäude. [39, S. 36–37] Als Besonderheit dieser Zertifizierung kann hervorgehoben werden, dass sie durch das anwendungsorientierte Nutzungsprofil von Laborgebäuden den hohen Anteil an Prozessenergiebedarf abbildet und zudem den Lebenszykluskosten eine wichtige Rolle beimisst. Einzigartig ist auch, dass die DGNB Kommunikationsbereiche oder Planungsprozessqualität mit bewertet. Zwingend notwendig für die Zertifizierung von Laborgebäuden ist auch ein Betriebs-, Sicherheits- und Abfallkonzept. In seltenen Fällen kann auch ein Explosionsschutzgutachten verlangt werden.

Die DGNB bewertet anhand von 40 Nachhaltigkeitskriterien aus den zuvor genannten sechs Themenfeldern und vergibt je nach Erfüllungsgrad Auszeichnungen in Platin, Gold, Silber oder Bronze.

Nach der Vorstellung der drei wichtigsten Zertifizierungssysteme für Laborgebäude, kann abschließend angemerkt werden, dass die durch eine Zertifizierung anfallenden Mehrkosten sich in der Regel lohnen. Für die Zukunft ist anzunehmen, dass im Bereich der Laborarchitektur noch höhere Anforderungen an Nachhaltigkeit und Energieeinsparung entstehen werden. [27, S. 29] Die räumlichen sowie technischen Anforderungen an Laborgebäude werden sich dadurch maßgeblich verändern. Die Themen Langlebigkeit und Anpassungsfähigkeit werden vermehrt in den Fokus treten. Gebäude, die diese Anforderungen erfüllen, werden gefragt sein, da sie den Nutzwert erhöhen und die Lebensdauer eines Gebäudes verlängern. Dies ist vor allem angesichts der hohen und schlecht vorhersehbaren Veränderungen von Forschungsgebäuden wichtig.

### 3.7.3 Nachhaltige Laborgebäude in Deutschland

Laborgebäude zählen sicherlich nicht zu den Hauptnutzungsarten von Gebäuden in Deutschland, doch auf Grund ihrer hohen Technisierung dürfen sie in Bezug auf die Nachhaltigkeitszertifizierung keinesfalls außer Acht gelassen werden. Da Laborbauten erst seit einigen Jahren zertifiziert werden können, gibt es für die zukünftige Entwicklung noch viel Entwicklungspotenzial: Ziel ist, dass immer mehr Laborgebäude zertifiziert werden und dadurch eine Vielzahl an hochwertigen und zukunftsfähigen Forschungsbauten entstehen. Mit der Zertifizierung von Laboren wurde eine neue Etappe eingeläutet, denn Forschungsgebäude wurden damit aus dem Status der Spezialimmobilien gehoben. [39, S. 39] Die Zertifizierung eines Bauwerks bringt viele Vorteile für Planer und Bauherren mit sich. Das Argument einer schnelleren Vermietbarkeit oder besserer Marktchancen beim

Verkauf kann Projektanten und Bauherren meist schnell von der Wichtigkeit einer Zertifizierung überzeugen.

Doch Zertifizierungsergebnisse können auch missbraucht werden, indem Firmen ihre Gebäude zertifizieren lassen, um einen besseren Eindruck in der Öffentlichkeit zu machen. Ein Green Building Zertifikat präsentiert ein Unternehmen vor allem bei neuen, potenziellen Kunden und Partnern sehr positiv und kann aus diesem Grund einen erheblichen Vorteil für das Unternehmen darstellen. In manchen Fällen besteht jedoch das Problem, dass das gezeigte nachhaltige Engagement nicht im Verhältnis zu den negativen Auswirkungen des Kerngeschäfts der Firma steht. Dieses Phänomen trägt die Bezeichnung „Greenwashing“.

Es sollte letztlich festgehalten werden, dass die positiven Seiten des Schaffens von nachhaltigen Laborgebäuden stark überwiegen und in Zukunft noch viel mehr Wert auf nachhaltige und energieeffiziente Architektur im Bereich der hochtechnisierten Laborbauten gelegt werden sollte. Nur so können Gebäude entstehen, die sowohl der Umwelt als auch den Nutzern einen positiven Mehrwert bieten.

## 4 Projektvorstellung ZAE Würzburg

Nachdem durch eine ausführliche Analyse der Typologie Laborgebäude die wichtigsten Grundkenntnisse zum Thema Laborarchitektur dargestellt wurden, kann nun mit der Projektvorstellung des Referenzgebäudes für die Ökobilanzierung, dem Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) in Würzburg, begonnen werden. Da die Aufgabenstellung dieser Masterarbeit in Kooperation mit LangHuggerRampp Architekten, den Planern des ZAE, behandelt wird, konnte auf Planungsunterlagen und Verbrauchsdaten zurückgegriffen werden.



Abb. 12 ZAE in Würzburg [43]

### 4.1 Architektonisches Konzept

Im August 2010 wurde die Planung eines Neubaus für das ZAE Bayern oder auch Energy Efficiency Center von LangHuggerRampp Architekten aufgenommen. Das Architekturbüro konzipierte ein Forschungs- und Demonstrationsgebäude mit dem Ziel, Leuchtturmwirkung in Bezug auf den Einsatz prototypischer Materialien zur Steigerung der Energieeffizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energieträger zu erlangen. Das Gebäude ist äußerst funktional gestaltet und bietet Platz, um verschiedenste neuartige Entwicklungen im Gebäudebereich unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten zu erproben.

Das ZAE wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Forschungsschwerpunkts Forschung für Energieoptimiertes Bauen (EnOB) gefördert. Weitere Sponsoren entsprangen dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft,

Infrastruktur, Verkehr und Technologie, der High-Tech-Offensive Zukunft Bayern und auch Landesmittel wurden zur Finanzierung des Projektes herangezogen. [22, Menüpunkt: Home]

#### 4.1.1 Städtebauliche Einbindung und Freiraumgestaltung

Im Jahre 2009 wurde ein städtebaulicher Wettbewerb für das ehemalige Areal der US Kaserne Leighton-Barracks ausgelobt. Daraus ging als erster Baustein für das neue Quartier das ZAE Gebäude hervor. Das Baugrundstück liegt am südwestlichen Rand des ca. 135 ha großen Areals der Konversionsfläche und das Gebäude mit seinen Freianlagen werde im Rahmen der „Energiegärten“ in das Konzept der für 2018 geplanten Landesgartenschau integriert. Durch die radikal ökologische und innovative Ausrichtung des Bauwerks entstand ein anspruchsvoller Auftakt für zukünftige städtebauliche Entwicklungen auf der Konversionsfläche.



Abb. 13 Lageplan ZAE Würzburg [38]

Die Freiflächenplanung verfolgte das Ziel maximaler Kosteneffizienz bei gleichzeitig hohem Anspruch an Freiraum- und Aufenthaltsqualität. Durch Maßnahmen wie beispielsweise der Minimierung der Flächenversiegelung oder der Bewirtschaftung mit Regenwasser konnten diese Ziele erreicht werden. Durch weitere sensitive Schritte, wie das Angleichen der Dachform mit sich wiederholenden kurvierten Membranschalen an die östlich gelegene, sanft

gekurvte Hangkante des Maintals, entstand ein qualitativ hochwertiger Entwurf, der sowohl von den Anwohnern als auch der Stadtbehörde gut angenommen und gewürdigt wird.

#### 4.1.2 Gebäudeentwurf und Grundrissorganisation

Für das ZAE in Würzburg wurde von Beginn an ein integraler Entwurfsprozess verfolgt. Im Vordergrund der Planung stand, die Vielfalt der Anforderungen der Nutzer in das architektonische Konzept zu integrieren und dadurch ein möglichst effizientes Forschungsgebäude zu konzipieren. Entstanden ist ein zweigeschossiger Bau, der nach einem sehr klaren Organisationsprinzip aufgebaut ist: Im Erdgeschoss verfolgt das Gebäude die Organisationsform eines Doppelspur-Dreihüfters, im Obergeschoss hingegen die des klassischen Zweihüfters. Das ZAE beinhaltet Laborräume, einen Technikumsraum, Büroräume sowie die Infrastruktur für die Forschungsaktivität. Außerdem sind ein Veranstaltungsraum und ein Infocenter, in dem aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse präsentiert werden, vorhanden. Das Gebäude besitzt eine Netto-Grundfläche (NGF) von 3170 m<sup>2</sup> und hat ca. 13 Millionen Euro gekostet.

Das dreihüftige **Erdgeschoss** besitzt im östlichen Teil des Gebäudes einen öffentlich zugänglichen Bereich. Dieser wird über einen zentralen Eingangsbereich erschlossen und beherbergt neben dem Infocenter auch den Veranstaltungsraum. Im westlichen, privaten Teil des Gebäudes befinden sich die Laborbereiche und das Technikum. In der Dunkelzone des Laborbereichs liegen Lager- und Werkstattflächen sowie Experimentier- und Messräume die kein Tageslicht benötigen oder haben sollen. Die regelmäßig besetzten Chemie- und Physiklabore sind an der gut belichteten Südfassade angeordnet. Ein außenliegender Sonnenschutz sorgt dafür, dass Überhitzung verhindert wird. Das sogenannte Technikum bietet ausreichend Platz für großmaßstäbliche Versuchsaufbauten, wie zum Beispiel einer Hot Box, und Flächen für die technische Gebäudeausrüstung. Dieser Bereich befindet sich an der Gebäudenordseite, da direkte Sonneneinstrahlung hier nicht erwünscht ist. Außerdem befinden sich im Erdgeschoss Räume der Gebäudetechnik sowie Lager- und Archivräume. Das Erdgeschoss hat Dimensionen von ca. 30 mal 80 m und ist gemäß dem Geländeverlauf gestuft ausgeführt. Die lichten Geschosshöhen liegen zwischen ca. 3,00 und 4,00 m.



Abb. 14 Grundriss Erdgeschoss [38] (Eigene Darstellung)

Das **Obergeschoss** besteht aus einem Nord-Süd ausgerichteten Zweihüfter, der sowohl Büro- als auch Seminarbereiche enthält. Die Büroräume, in Form von Zellen- und Kombibüros, befinden sich beidseitig an dem sich aufweitenden Erschließungsflur. An die Gangzone angegliedert sind Serverräume sowie Schächte und Sanitärkerne. Im Obergeschoss herrschen optimale Tageslichtbedingungen und durch eine innovative Gebäudeleit- und Regelungstechnik können die Nutzer die Einstrahlung, Wärme- und Kälteversorgung beliebig steuern. Dies führt zu hochqualitativen Büroarbeitsplätzen, die das Wohlbefinden der Mitarbeiter verbessern. Das Obergeschoss hat Dimensionen von ca. 14 mal 80 m und die lichte Geschosshöhe liegt zwischen ca. 2,80 und 3,00 m.



Abb. 15 Grundriss Obergeschoss [38] (Eigene Darstellung)

Das Gebäude ist in Querrichtung in modulare 15 m Einheiten geteilt. Dazwischen liegen 5 m breite Zwischenzonen, die transparent ausgebildete Treppenhaus- und Kommunikationszonen beinhalten. Das modulare System ermöglicht jederzeit die Erweiterbarkeit des Gebäudes und wirkt gleichzeitig gliedernd.

Durch die genauere Betrachtung der Grundrisse kristallisieren sich drei maßgebende Prämissen für den Gebäudeentwurf heraus: Flächeneffizienz, Modularität und intelligente Organisationsprinzipien. Die architektonische Gebäudegestalt spiegelt die innovativen Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte von Laborgebäuden

technischen Ansprüche des Gebäudes optimal wider und bildet auf Grund ihres unverwechselbar formalen und materiellen Erscheinungsbildes die bauliche Visitenkarte für das ZAE Bayern.

#### 4.1.3 Konstruktion

Das Erdgeschoss wurde in Massivbauweise errichtet und bietet damit Temperaturstabilität für die jeweiligen Nutzungen. Im Gegensatz dazu wurde das Obergeschoss als Leichtbauweise, mit Ausnahme der Stahlbeton-Zwischenbauten mit Treppenkernen, konstruiert. Leichte Konstruktionen haben bezüglich des Primärenergiebedarfs bei Erzeugung und Einbau Vorteile gegenüber massereichen Bauweisen und sind zudem bezüglich der Bauzeiten zeiteffizienter.

Die tragenden und aussteifenden Teile des Tragwerks sind als Stahlbetonskelettbau ausgebildet, wobei die Stützen des Obergeschosses als Stahlverbundstützen ausgeführt sind. Die Geschosstrennung zwischen Erd- und Obergeschoss erfolgt über eine Stahlbetondecke. Die Dachdecke ist als mehrschalige Leichtkonstruktion erstellt, deren Tragwerk aus skelettiertem Profilstahlbau besteht.

Die Innenbereiche wurden konsequent im Trockenbau ausgeführt, wodurch die notwendige Flexibilität hinsichtlich Erweiterungs- und Wandlungsfähigkeit von baulichen Arbeitsflächenstrukturen gesichert wird. Durch die Verwendung von Bauplatten und Kühlsegel-Deckensystemen mit integrierten Phasenwechselmaterialien (Phase Change Material – PCM) wurde eine Erhöhung der Wärmespeicherkapazität der Gebäudemasse erzielt.

Einen wesentlichen Schwerpunkt der Innovationen, die das Gebäude auszeichnen, bildet die Gebäudehülle. Aus diesem Grund werden im Folgenden die unterschiedlichen Dachkonstruktionen und die Fassade genauer besprochen.

Die **Dächer** des ZAE sind mehrschalig ausgeführt und haben unterschiedliche textile Bauweisen. Die neuartigen, leichten und flexiblen Konstruktionen aus Membran erlangen seit einigen Jahren immer mehr Bedeutung in der Architektur. Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Membranen, doch meist kommen beschichtbare Glasfaser- und andere Textilgewebe oder Folien zum Einsatz. Der zweigeschossige Teil des Gebäudes ist mit einer transluzenten, konstruktiv geformten Membran aus PTFE (Polytetrafluorethylen) beschichtetem Glasfasergewebe überspannt. Die Membran dient als Witterungsschutz und bildet außerdem die äußere Lage des mehrschaligen Dachaufbaus. Die wärmedämmende Ebene des Daches verläuft innen in der Horizontalen. Diese innen liegende Lage ist zum Teil



transluzent, zum Teil opak ausgebildet und führt damit zu verbesserten Tageslichtbedingungen in den Büroräumen. Gleichzeitig dient die Nutzung der Dachebene als Kühlsegel und Akustikdecke. Die thermisch entkoppelte Zwischenklimazone, die zwischen der Membran und der starren horizontalen Hülle entsteht, wirkt während der Heizperiode als thermischer Puffer und ist während der Sommermonate luftdurchströmt. Die Gangbereiche und die 5 m breiten Zwischenzonen, die die Treppenhäuser und Kommunikationsflächen beinhalten, sind mit einer transparenten, konstruktiv gespannten ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen) Folie überdeckt. Diese dient wieder als Witterungsschutz. Hier stellt den thermischen Raumabschluss eine horizontal eingebaute Isolierverglasung mit Aerogel-Füllung dar. Durch das Einbringen der Füllung in den Scheibenzwischenraum entstehen hochwärmedämmende Bauteile. Diese bieten jedoch keine Durchsicht, können Tageslicht aber diffus und gleichmäßig in die Tiefe der Innenräume lenken. Aber nicht nur die Isolierverglasungen sind im ZAE mit Aerogel gefüllt, auch zwischen der doppellagigen Membrankonstruktion und den Stegdoppelplatten im Deckenbereich des Obergeschosses findet diese Methode Anwendung.

Das Dach für das Technikum und den Veranstaltungsraum besteht aus einer mehrlagigen, pneumatischen Kissenkonstruktion. Sie ist transluzent, dient wieder als Witterungsschutz und hat eine wärmedämmende Wirkung.

Membrankonstruktionen haben den Vorteil, dass sie sehr leicht sind und somit große Spannweiten ermöglichen. Dies führt im Vergleich zu anderen Bauweisen zu erheblichen Vorteilen hinsichtlich einer optimierten gesamtenergetischen Bewertung. Außerdem kann die Lichttransmission je nach Wunsch variieren: Je nach Grundmaterial oder Art der Bedruckung lassen sich spezifische Transmissionsgrade oder auch transparente oder transluzente Eigenschaften erreichen. Des Weiteren besitzt das Membrandach des ZAE eine innovative Beschichtung (EverClean), die Oberflächenverschmutzungen durch einen Selbstreinigungseffekt verhindert. Durch die photokatalytische Beschichtung  $\text{TiO}_2$  werden unter UV-Licht Einfluss organische Anhaftungen zersetzt und durch Regen oder Wasser ganz einfach von der Membranoberfläche entfernt.

Die **Fassade** des Gebäudes ist eine modular konstruierte Pfosten-Riegel-Konstruktion. Die Außenwände sind entsprechend ihrer Exposition in den hohen Fassadenbereichen mit starren, außen liegenden Sonnenschutzlamellen versehen. Die Durchsichtbereiche besitzen hingegen elektromotorisch betriebene Raffstores. Die Verglasung besteht aus hochwärmedämmenden Produkten, die opaken Flächen aus Vakuum-Isolationspaneelen und transluzenten wärmedämmenden Paneelen. Die Verglasung erzeugt oft thermische

Schwachstellen in einem Gebäude. Aus diesem Grund wurden für das ZAE optimierte Fensterrahmen und Fassadenanbindungen entwickelt. Es entstand ein hoch wärmedämmendes Fensterprofil, genannt TopTherm 90, das einen  $U_f$ -Wert von  $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht. Eine weitere Innovation bestand in der Verwendung von Vakuum-Isolationspaneelen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Dämmmaterialien weisen Vakuumisolationspaneelen deutlich bessere Wärmeleitfähigkeiten auf. Das Verbesserungspotenzial liegt bei einem Faktor fünf bis zehn und führt somit zu Werten von etwa  $0,003$  bis  $0,008 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dadurch lassen sich sehr schlanke, hocheffiziente Gebäudehüllen realisieren. [22, Menüpunkt: Innovationen]

Durch den Einsatz textiler Elemente im Bereich der Gebäudehülle erlangt das Projekt eine architektonische Einzigartigkeit. Die textile Hülle hat nicht nur eine hohe Signalwirkung, sondern trägt wesentlich zur Steigerung der Energieeffizienz bei. Für die Gesamtmaßnahme war ein stark limitiertes Budget vorhanden, mit dem eine maximal wirtschaftliche, Masse sparende und kosteneffiziente Bauweise erzielt werden sollte. Bei der Membranbauweise wurden beispielsweise die systemimmanenten hohen Lasten aus Normalkraft des zugbeanspruchten Flächentragwerks über die Geschosdecke des Obergeschosses kurzgeschlossen und benötigten somit keinen zusätzlichen Gründungsaufwand. Durch diese Maßnahme wurde das Aufkommen von hohen zusätzlichen Kosten verhindert. Auch die Wahl von Beton und Stahl für die Primärkonstruktion hatte Vorteile: Die Materialien zeichnen sich durch ihre Leistungsfähigkeit, Langlebigkeit und geringe Unterhaltskosten aus. Zudem wird auch während des Betriebs des Gebäudes, durch intensives Monitoring, ein Optimum an Wirtschaftlichkeit erreicht.

## 4.2 Gebäudetechnisches Konzept und Innovationen

Aufgrund der ständigen Zunahme des Treibhauseffekts erscheinen die ökologischen Folgeerscheinungen – wie Erderwärmung, Klimawandel, Polschmelze und Anstieg der Meeresspiegel – kaum mehr begrenzbar. Besondere Sorge bereiten die aus diesen Wirkungen resultierenden Effekte auf Ökonomie und Ökologie. Das Bewusstsein über diese global wirksam werdenden Phänomene führte zu anspruchsvollen Reduktionszielen für den Ausstoß von  $\text{CO}_2$  im Rahmen der internationalen und nationalen Klimaschutzpolitik. Energetische Sanierungen von Altbauten und energieeffiziente Bauweisen bei Neubauten sind bedeutsame Schritte hin zum Erreichen der  $\text{CO}_2$  Reduktionsziele.

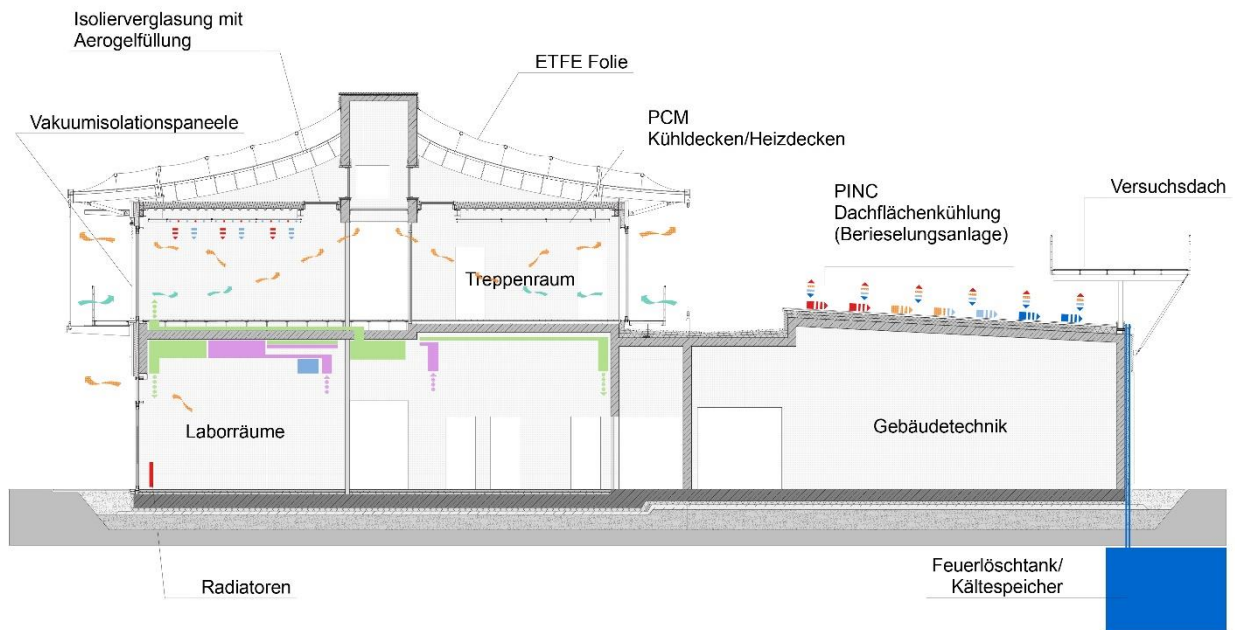


Abb. 16 Schnitt Haustechnik [38]

Das gebäudetechnische Konzept des ZAE leistet einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Entwicklung von nachhaltigen und effizienten Gebäuden. Gesamtziel des Projektes war es, durch innovative Techniken ein Gebäude mit Vorbildcharakter zu schaffen und darin sowohl innovative Konzepte als auch neue Materialien in Einsatz zu bringen und dadurch Erfahrungswerte zu gewinnen, die diesen Innovationen eine breite Anwendung in der Bauwirtschaft ermöglichen. Außerdem ist das Gebäude ein Experimentiergebäude, an dem neuartige Entwicklungen im Gebäudebereich erprobt werden können. So führen zum Beispiel die effizienten Technologien in der Gebäudehülle in Verbindung mit einer intelligenten Gebäudetechnik zu einer hohen Primärenergieausbeute.

Durch einen von Beginn an integralen Entwurfsprozess und die innovativen gebäudetechnischen Maßnahmen die im ZAE verwirklicht wurden, erlangt das Gebäude einen bemerkenswert niedrigen Primärenergiebedarf von 179 kWh/m<sup>2</sup>a. Damit unterschreitet das Gebäude die Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 für Referenzgebäude um 50 %. [22]

Da der Betrieb im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit nicht bilanziert wird, wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Erklärung der Gebäudetechnik des ZAE mit den darin eingesetzten innovativen Techniken verzichtet. Falls jedoch Interesse besteht, kann im Anhang ab Seite 94 das gebäudetechnische Konzept des ZAE nachgelesen werden.

## 5 Vorstellung von Varianten für das ZAE in Würzburg

Nach einer Analyse der Typologie Laborgebäude und der anschließenden Projektvorstellung des Referenzgebäudes für die Ökobilanzierung, kann nun der inhaltliche Schwerpunkt der Masterarbeit dargestellt werden. Dieser besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Teilbereichen:

- Variantenentwicklung für das ZAE in Würzburg
- Vergleichende Ökobilanz der Varianten.

Für das ZAE in Würzburg werden folglich im ersten Schritt in Form eines Gedankenexperiments Bauvarianten entwickelt, die anschließend in einer Ökobilanzierung miteinander verglichen werden. Durch den Vergleich der Varianten lässt sich am Ende der Arbeit aufzeigen, in welchen Bereichen Optimierungspotenziale in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial (GWP) zu erreichen sind.

### 5.1 Vorgehen zur Variantenentwicklung

Auf Grundlage des realen Gebäudes (ZAE real genannt), werden zwei hypothetische Gebäudevarianten (ZAE klassisch und ZAE zukünftig) erstellt. Während ZAE klassisch einer konventionellen Bauweise von Laborbauten entspricht, soll ZAE zukünftig einen optimierten Bau in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial darstellen.

Damit die drei Varianten miteinander verglichen werden können, besitzen ZAE klassisch und ZAE zukünftig denselben mittleren U-Wert wie ZAE real, der durch die Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV) für Nichtwohngebäude vorgegebenen ist. Laut EnEV 2009 sind demzufolge „zu errichtende Nichtwohngebäude so auszuführen, dass die Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche nach Anlage 2 Tabelle 2 nicht überschritten werden“. [9] Der im Anhang auf Seite 98 vorgegebene Höchstwert für die opaken Außenbauteile liegt bei  $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der für die transparenten Außenbauteile bei  $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der mittlere U-Wert der opaken Außenbauteile des ZAE real liegt bei  $0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der für die transparenten Außenbauteile hingegen bei  $0,94 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Beide Werte liegen damit unter dem festgesetzten Höchstwert.

Nachfolgend werden die drei Bauvarianten kurz vorgestellt, um im Anschluss die vergleichende Ökobilanz besser nachvollziehen zu können. Der Fokus der Beschreibung wird dabei auf die Veränderungen von ZAE klassisch und ZAE zukünftig im Vergleich zu ZAE real gelegt.

## 5.2 ZAE real

ZAE real ist das effektiv existierende ZAE Gebäude in Würzburg. Es dient als Grundlage für die zwei hypothetischen Gebäudevarianten. Wie in Kapitel 4 erwähnt, handelt es sich um einen Bau, dessen Erdgeschoss in Massivbauweise und dessen Obergeschoss in Leichtbauweise errichtet wurde. Das Dach besteht aus verschiedenen innovativen Membrankonstruktionen und auch bei der Haustechnik wurde auf den Einsatz zukunftsweisender und effizienter Techniken geachtet.

In den folgenden Absätzen wird auf die einzelnen Aufbauten von ZAE real näher eingegangen.

Die Baugrube beinhaltet einen Aushub von 5000 m<sup>3</sup> und ist für alle drei Gebäudevarianten gleich angesetzt.

ZAE real besitzt sechs verschiedene Gründungsarten, die sich jedoch lediglich im Bereich des Bodenbelags unterscheiden. Im Eingangsbereich, in den Sanitärräumen und im Chemielabor besteht der Bodenbelag aus Fliesen. Info Center, Veranstaltungsraum und Foyer sind mit einem Parkettboden ausgestattet. Die Laborräume besitzen einen PVC Bodenbelag, das Technikum eine rohe Betondecke.

Die Außenwände setzen sich sowohl aus einer tragenden Stahlbeton-, als auch einer tragenden Mauerwerkswand zusammen. Beide Wandarten sind mit Mineralwolle gedämmt und besitzen eine Fassadenbekleidung aus Aluminium. An einigen Stellen des Fassadenbereiches befinden sich Vakuumisolationspaneele. Als Bekleidung im Innenraum wird ein Kalk-Gips-Innenputz verwendet. Des Weiteren sind im Erdgeschoss von ZAE real Stahlbetonstützen vorhanden, im Obergeschoss kommen dagegen Stahlstützen zum Einsatz. Die eingesetzte Pfosten-Riegel-Fassade besteht aus Aluminiumrahmen und einer Dreifachverglasung.

Beim Innenausbau finden tragende Stahlbetoninnenwände und nicht tragende Gipskartonwände in zwei verschiedenen Dicken Einsatz. Zudem zählen Stahlbeton- und Stahlstützen zum Innenausbau von ZAE real.

Die Decken im Obergeschoss bestehen aus zwei Aufbauten mit Hohlraumboden aus Kunststoff. Der eine Hohlraumdeckenaufbau hat einen Kautschuk Bodenbelag, der andere einen Fliesenbelag. Der dritte Deckenaufbau besteht aus einem Standard Deckenaufbau ohne Hohlraumboden mit Fliesen als Bodenbelag.

Die Dächer des ZAE real bilden die größte Besonderheit des Gebäudes und sind aus diesem Grund etwas komplex aufgebaut. Sie bestehen aus sechs verschiedenen Flachdachaufbauten, die mit Membranen oder Kissen überdeckt sind. Eine Stahlkonstruktion über dem Flachdach des Obergeschosses hält die darüber liegende Membran aus ETFE Folie beziehungsweise PTFE beschichtetem Glasfasergewebe. Zusätzlich besitzt das Bürodach Oberlichter mit Aerogelfüllung und eine Dachbekleidung aus PCM.

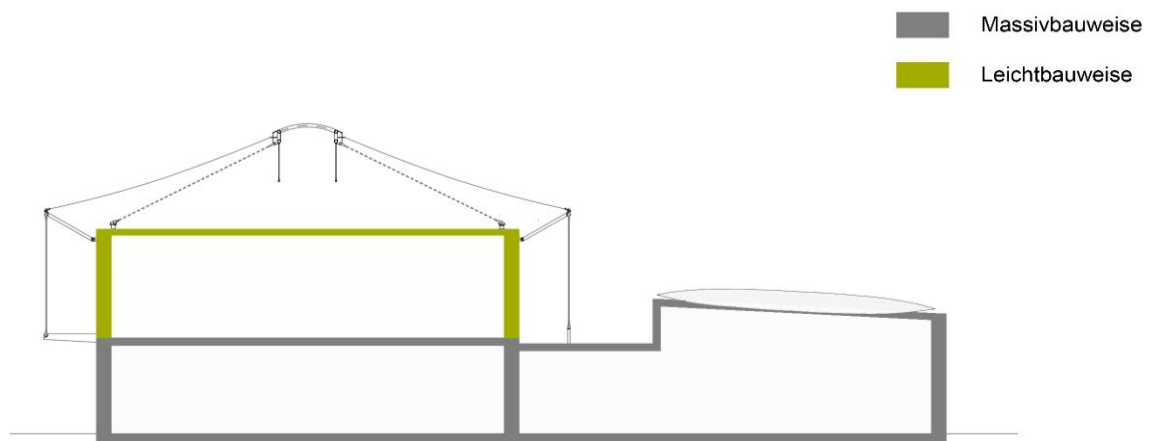


Abb. 17 ZAE real (Eigene Darstellung)

### 5.3 ZAE klassisch

Die Gebäudevariante für ZAE klassisch soll ein Gebäude darstellen, das keinen besonderen Wert auf Nachhaltigkeit und Energieeffizienz legt. Es handelt sich um einen herkömmlichen Massivbau mit klassischem Flachdach, in dem keine innovativen Materialien verbaut werden.

Die Gründung des ZAE klassisch wird auf zwei verschiedene Aufbauten reduziert. Diese unterscheiden sich lediglich im Bereich des Bodenbelags: In den Laborräumen und dem Technikum wird ein PVC Bodenbelag verwendet, in den übrigen Räumlichkeiten ein Fliesenbelag.

Die Außenwände bestehen aus einem gängigen Wärmedämmverbundsystem aus Stahlbeton. Als Dämmstoff dient Mineralwolle, als Wandbekleidung findet sowohl innen als auch außen ein Kunstharzputz Verwendung. Im Gegensatz zu ZAE real wurde der Fensterflächenanteil um 20 % verringert; im Gegensatz zur im ZAE real vorhandenen Pfosten-Riegel-Fassade finden hier klassische Fenstereinbauten Einsatz. Außerdem bestehen die Rahmen der Fenster aus PVC-Kunststoffrahmen. Die Verglasung in ZAE klassisch wird identisch der in ZAE real eingesetzten Dreifachverglasung angenommen.

Die Innenwände unterscheiden sich lediglich in der Wanddicke von denen des ZAE real. Alle eingesetzten nichttragenden Gipskartonwände sind 12,5 cm dick und entsprechen somit den dicksten in ZAE real eingesetzten Gipskartonwänden.

Größter Unterschied im Deckenbereich zu ZAE real ist, dass im ZAE klassisch kein Hohlraumboden vorgesehen wird. Die über das komplette Obergeschoss gehende Stahlbetondecke ist mit einem Gummibodenbelag ausgestattet.

Ein klassisches Stahlbeton-Flachdach mit EPS Dämmung, das als Gründach ausgeführt ist, dient dem ZAE klassisch als Überdachung. Im Gegensatz zu ZAE real handelt es sich hierbei um eine starke Vereinfachung der Dachkonstruktion. Oberlichter sind nicht vorhanden. Es ist zu erwarten, dass dies sowohl die Ergebnisse der Ökobilanz, als auch die Lichtsituation im Innenraum beeinflussen wird.

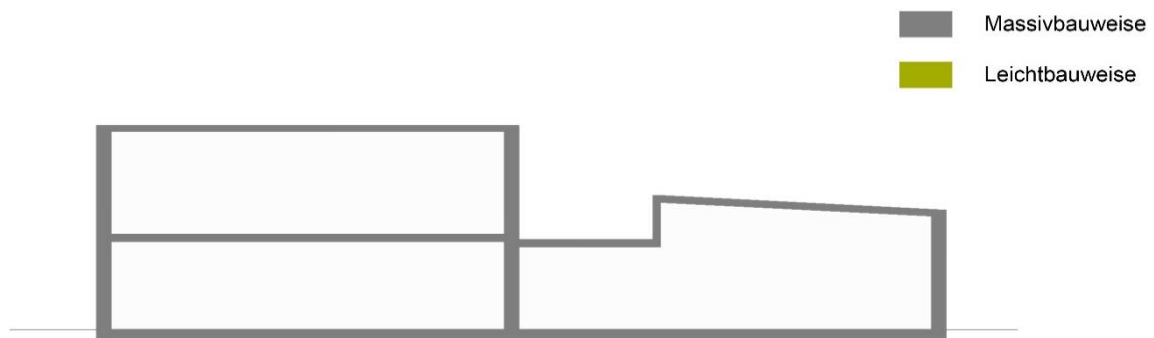


Abb. 18 ZAE klassisch (Eigene Darstellung)

#### 5.4 ZAE zukünftig

Die Variante des ZAE zukünftig stellt ein optimiertes Gebäude in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial dar. Durch den Einsatz weniger energieintensiver Baustoffe sollen Verbesserungspotenziale im Bereich des Treibhausgaspotenzials aufgezeigt und damit auch die Stellschrauben erkennbar werden, an denen zur Konzeption eines verbesserten Gebäudes gedreht werden kann.

ZAE zukünftig besitzt eine Gründung mit einem Bodenbelag aus Linoleum. Das Material kann im ganzen Gebäude eingesetzt werden, da es eine hohe Strapazierfähigkeit aufweist und aus diesem Grund auch für den Gebrauch in Laborräumen geeignet ist.

Die Außenwände bestehen aus einer tragenden Stahlbetonwand. Der Brandschutz fordert für Laborräume raumabschließende Decken, Wände und Türen mit Feuerwiderstandsfähigkeit. Diese Vorgabe ist in der Gebäudevariante des ZAE zukünftig eingehalten, da die Decke über dem Erdgeschoss feuerhemmend ausgeführt ist. Außerdem

ist dem Brandschutznachweis von ZAE real zu entnehmen, dass äußere Brandwände nicht notwendig sind, da das Gebäude einen Abstand von mehr als 2,5 m zur Grundstücksgrenze aufweist. Aus diesem Grund können die Oberflächen von Außenwänden einschließlich Dämmstoffen und Unterkonstruktionen aus normal entflammbaren Materialien bestehen. [30] Ein Auszug aus dem Brandschutznachweis ist im Anhang auf Seite 98 ersichtlich. Dies ließ bei ZAE zukünftig erhebliche Veränderungen im Bereich der Außenwand im Vergleich zu ZAE real zu. Die Dämmung bei ZAE zukünftig besteht nun nicht mehr aus Mineralwolle, sondern aus Holzfaserdämmplatten; die Bekleidung der Fassade aus Eichen-Schrittholz. Die aus Aluminium bestehenden Fensterrahmen und die Verglasung bleiben unverändert. Die Bekleidung innen wird durch einen Lehmputz ersetzt. Im Erdgeschoss befinden sich Stahlbetonstützen, im Obergeschoss werden diese jedoch durch Holzstützen ersetzt, da im Obergeschoss keine besonderen Anforderungen an den Brandschutz gestellt sind.

Der Innenausbau unterscheidet sich nur in der Materialität der Stützen im Obergeschoss von ZAE real: Hier kommen erneut Holz- anstatt Stahlstützen zum Einsatz.

Auch bei ZAE zukünftig wird kein Hohlraumboden vorgesehen: Die Decke im Obergeschoss entspricht einer Standarddecke mit Holzparkett.

Das Flachdach hat einen klassischen Aufbau: Es besteht aus einer Tragkonstruktion aus Eichenholz, einer häufig im Dachbau eingesetzten Holzart, und ist mit Holzfaserplatten gedämmt.

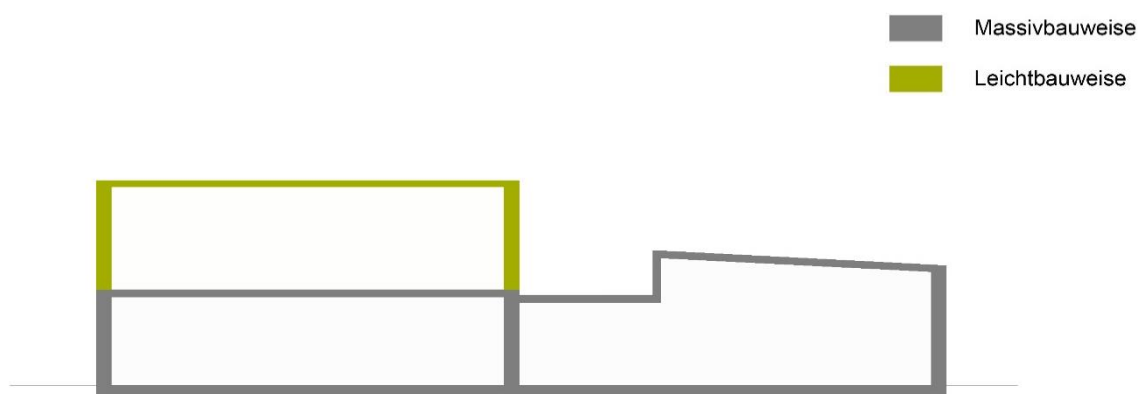


Abb. 19 ZAE zukünftig (Eigene Darstellung)



Abschließend können in Tabelle 1 auf einen Blick die baulichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten von ZAE klassisch und ZAE zukünftig im Vergleich zu ZAE real dargestellt werden:

*Tabelle 1 Bauliche Unterschiede und Gemeinsamkeiten der drei Gebäudevarianten*

	ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig
Baugrube	5.000 m <sup>3</sup> Aushub	5.000 m <sup>3</sup> Aushub	5.000 m <sup>3</sup> Aushub
Gründung	3 versch. Bodenbeläge: - Fliesen - PVC - Parkett	2 versch. Bodenbeläge: - Fliesen - PVC	1 Bodenbelag: - Linoleum
Außenwände	Tragende Außenwände aus Stahlbeton und Mauerwerk mit Mineralwolldämmung und Aluminium-Bekleidung  EG: Stahlbetonstützen OG: Stahlstützen  Kalk-Gips-Innenputz  Fensterrahmen aus Aluminium	Wärmedämmverbundsystem aus Stahlbeton mit Mineralwolldämmung  Keine Stützen  Kunstharzputz  20 % geringerer Fensterflächenanteil  Fensterrahmen aus PVC	Tragende Außenwände aus Stahlbeton mit Holzfaserdämmplatten und Eichenholz-Bekleidung  EG: Stahlbetonstützen OG: Holzstützen  Lehmputz  Fensterrahmen aus Aluminium
Innenwände	Tragende Innenwände aus Stahlbeton in 2 Dicken  Nichttragende Gipskartonwände in 2 Dicken  EG: Stahlbetonstützen OG: Stahlstützen	Tragende Stahlbeton Innenwände  Nichttragende Gipskartonwände dick  Keine Stützen	Tragende Stahlbeton Innenwände  Nichttragende Gipskartonwände dünn  EG: Stahlbetonstützen OG: Holzstützen
Decken	Hohlraumboden  Kautschuk- oder Fliesenbelag	Kein Hohlraumboden  Gummi-Bodenbelag	Kein Hohlraumboden  Parkettbelag
Dächer	6 versch. Flachdachaufbauten  Oberlichter  Stahlkonstruktion für Membranen	Klassisches Gründach  Keine Oberlichter	Flachdach aus Holz  Keine Oberlichter

## 6 Ökobilanz der Varianten

Im folgenden Kapitel werden die drei Gebäudevarianten bilanziert und anschließend die Ergebnisse miteinander verglichen. Begonnen wird mit einer kurzen, allgemeinen Einführung in das Thema Ökobilanzierung, um die Bedeutsamkeit des Themas zu veranschaulichen und das Verständnis der Vorgehensweise und der Berechnungen zu fördern.

### 6.1 Allgemeine Erklärung Ökobilanz

Die Methode der Ökobilanz (Life Cycle Assessment – LCA) dient zur Abschätzung der mit einem Gebäude verbundenen potentiellen Umweltauswirkungen über dessen gesamten Lebenszyklus. Dabei werden alle Input- und Outputflüsse betrachtet, die ein Gebäude von der Rohstoffgewinnung, über die Produktion und Anwendung, bis hin zur Entsorgung aufweist – sprich von der Wiege bis zur Bahre. Alle mit dem Lebenszyklus verbundenen Umweltauswirkungen des Gebäudes, wie beispielsweise Emissionen, Ressourcenverbrauch oder Naturinanspruchnahme, werden dabei erfasst und kumuliert. Die Umweltbelastungen werden hinsichtlich potenzieller Wirkungen zusammengefasst und somit für eine Bewertung transparent gemacht. [34, S. 38]

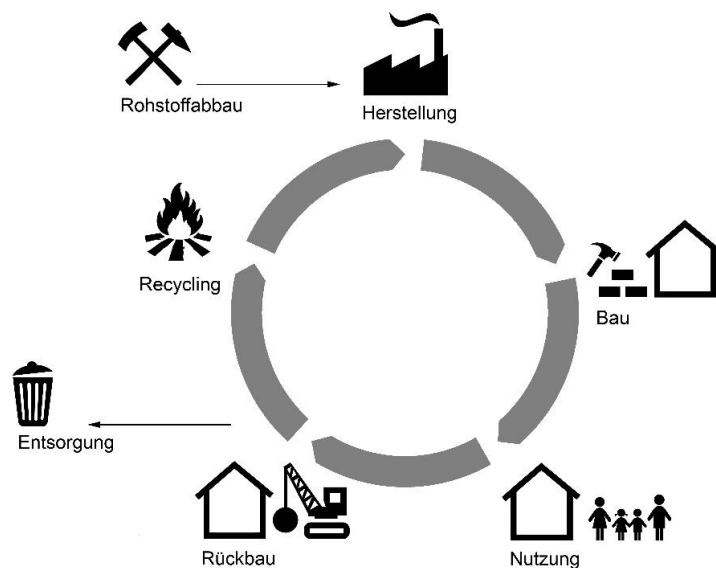


Abb. 20 Lebenszyklus eines Gebäudes (Eigene Darstellung)

Die normative Grundlage für Ökobilanzen bilden zwei Normen:

- DIN EN ISO 14040 [16]
- DIN EN ISO 14044 [15]

In der DIN EN ISO 14040 sind Grundsätze und Rahmenbedingungen festgehalten. In der DIN EN ISO 14044 Anforderungen und Anleitungen zur Erstellung einer Ökobilanz. Eine Ökobilanz umfasst in Folge dieser Normen vier Phasen. Sie sind in Abbildung 21 dargestellt.

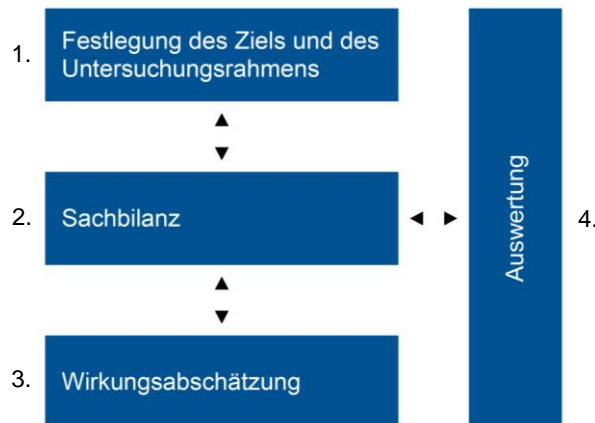


Abb. 21 Rahmen einer Ökobilanz nach ISO 14040 [16] (Eigene Darstellung)

Die einzelnen Phasen stehen miteinander in Interaktion und bauen aufeinander auf, indem sie sich auf die Ergebnisse der vorhergehenden Phasen beziehen. Aus diesem Grund wird die Erstellung einer Ökobilanz als iterativer Prozess verstanden, in dem es im Laufe der Bearbeitung notwendig sein kann, dass einzelne Punkte oder Faktoren verändert oder angepasst werden müssen, um das ursprüngliche Ziel der Studie zu erreichen.

Die Umweltwirkungen werden durch die Auswahl verschiedener Wirkungskategorien beschrieben. Da DIN EN ISO 14044 keine feste Liste von Wirkungskategorien vorgibt, kann die Auswahl vom Ersteller der Ökobilanz frei getroffen werden. [32, S. 203] Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Kategorien mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie übereinstimmen. In Deutschland werden in einer Ökobilanz meist die folgenden fünf Wirkungskategorien ausgewertet: [34, S. 45]

- Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential – GWP) in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente
- Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential – ODP) in kg R11-Äquivalente
- Versauerungspotenzial (Acidification Potential – AP) kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente
- Eutrophierungspotenzial (Eutrication Potential – EP) in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalente
- Sommersmogpotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential – POCP) in kg Ethen-Äquivalente

Darüber hinaus können weitere Indikatoren wie zum Beispiel der Verbrauch abiotischer Ressourcen (Abiotic Depletion of Resources – ADP) oder Human- und Ökotoxizitätspotenziale betrachtet werden. Oft werden die diesen Kategorien zugrundeliegenden Modelle jedoch als wissenschaftlich umstritten angesehen, weshalb sie international noch nicht als konsensfähig zu betrachten sind.

Durch die Ökobilanzierung ist es möglich, Schwachstellen im Herstellungsprozess, beim Ressourceneinsatz oder in der Entsorgung auszumachen und entsprechende Optimierungsmaßnahmen zu entwickeln. Die frühzeitige Durchführung einer Ökobilanz macht es schon während des Planungsprozesses möglich, Umweltaspekte direkt in Entscheidungen miteinzubeziehen und dadurch mögliche ungewollte Umweltauswirkungen zu vermeiden. Durch den Vergleich mehrerer Varianten können beispielsweise ökologische Vor- und Nachteile analysiert werden und dadurch optimierte Gebäude in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus entstehen. Die Ökobilanz dient einerseits als Grundlage zur ökonomischen und ökologischen Betriebsoptimierung, andererseits führt sie zu einer besseren Marktpositionierung. Es zeichnet sich nämlich ab, dass Gebäude, die über eine Bilanzierung verfügen, sich besser auf dem Markt positionieren und höhere Preise erzielen. Die Ökobilanzierung gewinnt jedoch vor allem immer mehr an Bedeutung, weil aktuelle Labels und Standards, wie beispielsweise DGNB oder LEED, bei der Gebäudezertifizierung eine Ökobilanz zur quantitativen Bewertung der Umweltwirkungen verlangen. In Zukunft werden vermutlich auch weitere energetische Nachweisverfahren, wie beispielsweise die EnEV, die Wichtigkeit der Lebenszyklusbetrachtung erkennen und über die Energie für den Gebäudebetrieb hinaus auch auf den Energieverbrauch in den Phasen der Herstellung und des Rückbaus achten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Vielzahl an gesetzlichen Vorschriften und Umwelanforderungen die Ökobilanzierung im Gebäudesektor zunehmend an Bedeutung gewinnen wird. Durch die Ökobilanzierung ist es möglich, konkrete Optimierungsmaßnahmen für zukunftsfähige Gebäude zu entwickeln und somit einen erheblichen Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit und Effizienz im Bausektor zu leisten.

## 6.2 Vorgehen

Bevor die drei Gebäudevarianten des ZAE nach den vier Phasen der Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040 bilanziert werden können, müssen Ziel und Untersuchungsrahmen für die Studie festgelegt werden. Danach kann mit der Sachbilanz fortgefahren werden, die nachfolgend die Berechnung der Varianten ermöglicht. Berechnet wird mit dem online Tool

eLCA, das vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) erstellt wurde. Ausgangspunkt stellte die Bilanzierung des real existierenden Gebäudes dar. Auf Grund der dabei ermittelten Daten wurden darauf die hypothetischen Gebäudevarianten als Gedankenexperiment bilanziert. Nach Eingabe aller notwendigen Daten in eLCA können im nächsten Schritt in der Wirkungsabschätzung die Umweltwirkungen der eingesetzten Materialien mit Hilfe einer Datenbank abgeschätzt werden. In eLCA wird die Datenbank Ökobau.dat aus dem Jahr 2011 genutzt. Nach der Phase der Wirkungsabschätzung werden zum Abschluss die vorliegenden Ergebnisse ausgewertet und miteinander verglichen.

### **6.3 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**

Die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens ist die erste Komponente jeder normgerechten Ökobilanz. Hier wird festgelegt, wie die Studie gestaltet wird. Laut DIN EN ISO 14044 müssen „Ziel und Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz (...) eindeutig festgelegt und auf die beabsichtigte Anwendung abgestimmt sein. Aufgrund der iterativen Eigenschaften der Ökobilanz ist der Untersuchungsrahmen während der Studie möglicherweise zu konkretisieren.“ [15]

#### **6.3.1 Zielfestlegung**

In der Zieldefinition können folgende Leitfragen als Hilfestellung dienen:

- Anwendungsbereich → Was wird untersucht?
- Erkenntnisinteresse → Gründe für die Durchführung der Studie?
- Zielgruppe → An wen richten sich die Ergebnisse der Studie?

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit werden die Umweltauswirkungen der drei Varianten des ZAE untersucht. Dabei wird das Kriterium des Treibhausgaspotenzials (GWP) näher betrachtet. Grund für die Durchführung der Studie ist die Notwendigkeit der Anwendung neuer und nachhaltiger Strategien im Bauwesen. Denn durch die Auswirkungen des Klimawandels und der Verknappung der Ressourcen, werden aktuell die größten Potenziale der Effizienzsteigerung vorwiegend in der CO<sub>2</sub>- und Energieeinsparung während der Nutzungsphase von Gebäuden gesehen. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung wird jedoch deutlich, dass während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes Energie verbraucht und CO<sub>2</sub> emittiert wird: Von der Herstellung bis zum Rückbau entsteht ein erheblicher Anteil an „grauer Energie“, der bislang meist außer Acht gelassen wird. Mit

dieser Studie sollen genau diese Energien und Potenziale im Lebenszyklus von Laborbauten ergründet werden.

Die Ergebnisse der Studie sollen als Planungs- und Entscheidungshilfe für künftige Bauvorhaben dienen. Adressat der Studie sind folglich alle umweltinteressierten und umweltbewussten Personen des Bausektors.

Erklärtes Ziel der Arbeit ist es folglich, Optimierungspotenziale in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial (GWP) aufzuzeigen und die Bedeutung der grauen Energie bei Laborgebäuden zu analysieren. Die Fragen, die es am Ende der Ökobilanzierung zu beantworten gilt, sind Folgende:

- Welche der drei Gebäudevarianten hat das geringste Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebenszyklus?
- Welche Optimierungspotenziale ergeben sich aus den Ergebnissen der Ökobilanz?
- Welchen Einfluss hat die Materialwahl auf das Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebenszyklus von hochtechnisierten Laborgebäuden?

### 6.3.2 Untersuchungsrahmen

Nach der Zieldefinition kann der Untersuchungsrahmen der Studie festgelegt werden. Dieser ist eng mit der Zieldefinition verbunden. Hier gilt es die Systemgrenze sowie die funktionelle Einheit zu definieren und den Betrachtungszeitraum der Bilanzierung festzulegen.

Der Ökobilanz liegt ein relativer Ansatz zugrunde. Dieser ist auf einer funktionellen Einheit aufgebaut, welche festlegt, was zu untersuchen ist. Alle Input- und Outputflüsse einer Studie beziehen sich auf eben diese Einheit. Dadurch wird eine Basis geschaffen, die den Vergleich der Ergebnisse der Ökobilanz ermöglicht. Die Systemgrenze legt fest, welche Prozessmodule in der Studie berücksichtigt werden und welche nicht.

In dieser Studie stellt das zu untersuchende Produktsystem das ZAE in Würzburg dar. Um den Vergleich mit anderen Gebäudeökobilanzen zu erleichtern, bezieht sich diese Arbeit auf eine funktionelle Einheit von einem m<sup>2</sup> Nutzfläche. Als Systemgrenze gilt die thermische Hülle des Gebäudes. Der Innenausbau wird mit berücksichtigt, jedoch wird auf die Bilanzierung der Gebäudetechnik verzichtet, da, wie bereits erwähnt, sich der Fokus der Studie auf die Phasen der Herstellung und der Entsorgung und den Anteil an grauer Energie der Bausubstanz richtet. Der Betrieb wird nicht bilanziert; er wird für alle drei Varianten in gleicher Höhe angesetzt. Die Systemgrenze ist in Abbildung 22 graphisch dargestellt.

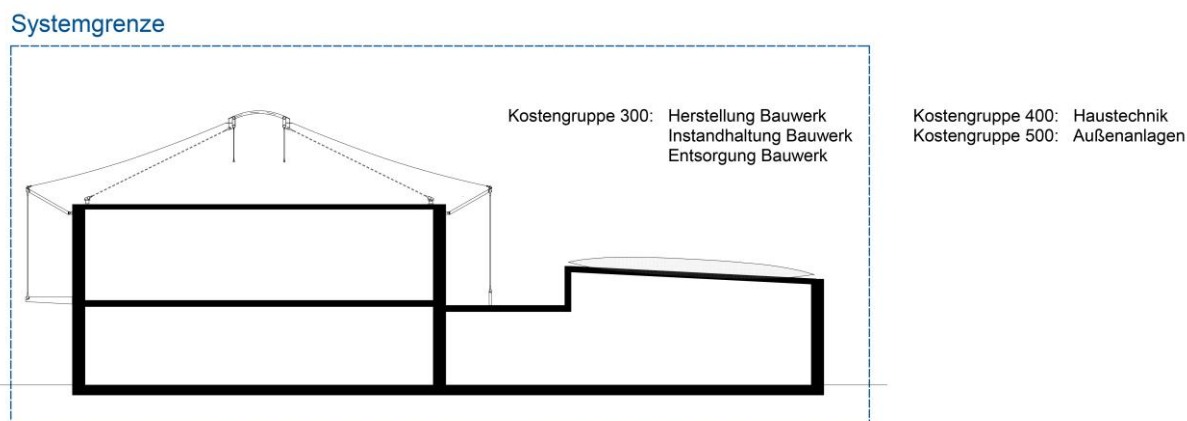


Abb. 22 Grafische Darstellung Systemgrenze (Eigene Darstellung)

Sämtliche Input- und Outputflüsse werden auf einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bezogen.

## 6.4 Sachbilanz

Nach der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens der Ökobilanzierung wird im zweiten Schritt die Sachbilanz vorgenommen. In dieser Phase wird das zu betrachtende System genau analysiert und es gilt alle zur Durchführung der Studie erforderlichen Daten zu erheben. Neben der Datenerhebung umfasst die Phase der Sachbilanz Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems. Der Prozess hin zur Erstellung der Sachbilanz erfolgt iterativ. [16]

### 6.4.1 Inventar Bausubstanz

Zu Beginn wird für die drei zu bilanzierenden Gebäudevarianten des ZAE eine Massenermittlung erstellt. Grundlage für die Massenermittlung stellt die Variante ZAE real dar. Dies bedeutet, dass die Flächen von ZAE klassisch und ZAE zukünftig sich grundlegend an den Werten des real existierenden Gebäudes orientieren. Veränderungen entstehen zum Beispiel durch Änderungen am Fensterflächenanteil, durch die Reduktion von Aufbauten und vor allem durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien.

Sämtliche Flächen der Bausubstanz werden ermittelt und in einer Excel Datei erfasst. Dies ist nötig, um die Bilanzierung stets transparent und nachvollziehbar zu halten. Die Massen werden nach den Kostengruppen der DIN 276-1 gegliedert, da diese zu einem späteren Zeitpunkt auch nach diesem Gliederungsprinzip in das online Tool eLCA eingegeben werden müssen. Die Unterteilung nach DIN 276-1 gliedert die Kostengruppe 300 „Bauwerk“ wie folgt: [13]

- 310 Baugrube
- 320 Gründung
- 330 Außenwände
- 340 Innenwände
- 350 Decken
- 360 Dächer

Die Untergruppen der einzelnen Kostengruppen können im Anhang auf Seite 99 nachgeschlagen werden.

Sobald die Massen vollständig erhoben sind, werden die Materialien der verschiedenen Aufbauten festgelegt. Da eine ausführliche Erläuterung aller Aufbauten der drei Gebäudevarianten den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, werden nun nur einige besonders relevante Details des ZAE real beschrieben.

ZAE real besitzt, wie schon in Kapitel 5 „Vorstellung von Varianten für das ZAE in Würzburg“ geschildert, mehrere Aufbauten für die Gründung des Gebäudes. Die Flachgründungen (Kostengruppe 322) und die Unterböden und Bodenplatten (Kostengruppe 324) sind für die verschiedenen Aufbauten stets gleich aufgebaut, nur die Bodenbeläge (Kostengruppe 325) variieren. Deshalb wird im Folgenden beispielhaft eine Gründung mit Parkett als Bodenbelag dargestellt.



Abb. 23 Kostengruppe 320: Gründung Info Center, Veranstaltungsraum, Foyer ZAE real (Eigene Darstellung)

Sobald die Masse eines Bauteils erfasst ist und die Materialität des Aufbaus geklärt ist, kann das Bauteil in eLCA eingegeben werden. Am Beispiel der Gründung soll im Folgenden erklärt werden, wie die Eingabe in eLCA funktioniert. Die in der Gründung verbaute Menge beträgt 309,79 m<sup>2</sup>. Die einzeln erhobenen Bauteilschichten können in eLCA in den jeweiligen



Kostengruppen eingetragen werden. Zum Beispiel gehören die Materialien Parkett, Zementestrich, Dämmung und PE-Folie zur Kostengruppe 325. Die eingegebenen Schichten bilden zusammen eine Bauteilkomponente. Die einzelnen Bauteilkomponenten der verschiedenen Kostengruppen werden schlussendlich zu einem vollständigen Bauteil zusammengefügt. Dieses befindet sich in der übergeordneten Kostengruppe 320, da dort die vollständige Gründung aufgeführt wird. Nach erfolgreicher Eingabe des Bauteils, werden von eLCA die errechneten Werte für das Bauteil angezeigt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für die Gründung von Info Center, Veranstaltungsraum und Foyer.

Tabelle 2 Ergebnisse Gründung Info Center, Veranstaltungsraum, Foyer ZAE real

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung
GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa	<b>0,46</b>	0,36	0,05	0,048

Ein weiteres wichtiges Bauteil des ZAE real stellt die Außenwand aus Stahlbeton dar. Die verbaute Menge beträgt 403,74 m<sup>2</sup>.



Abb. 24 Kostengruppe 330: Tragende Außenwand Stahlbeton ZAE real (Eigene Darstellung)

Genau wie im Beispiel der Gründung, werden auch bei der Außenwand die einzelnen Materialschichten in eLCA zu einem Bauteil zusammengefügt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 3 ersichtlich:

Tabelle 3 Ergebnisse Tragende Außenwand Stahlbeton ZAE real

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung
GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa	<b>0,29</b>	0,70	0,01	-0,43

Analog zu diesen beiden Beispielen wird die gesamte analysierte Bausubstanz für alle drei Gebäudevarianten in das online Tool eLCA eingegeben und mit selbst erhobenen Daten in Excel ergänzt. Als Datenquelle für die Bilanzierung dient wie schon erwähnt die für Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte von Laborgebäuden

Deutschland repräsentative Datenbank Ökobau.dat aus dem Jahr 2011. Diese wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) zur Verfügung gestellt. Die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführte Studie orientiert sich an den Lebenszyklusphasen die nach DGNB in die Ökobilanz miteinbezogen werden müssen. Abbildung 25 veranschaulicht die zu berücksichtigenden Phasen des Lebenszyklus, die Teil der Berechnungen sind.

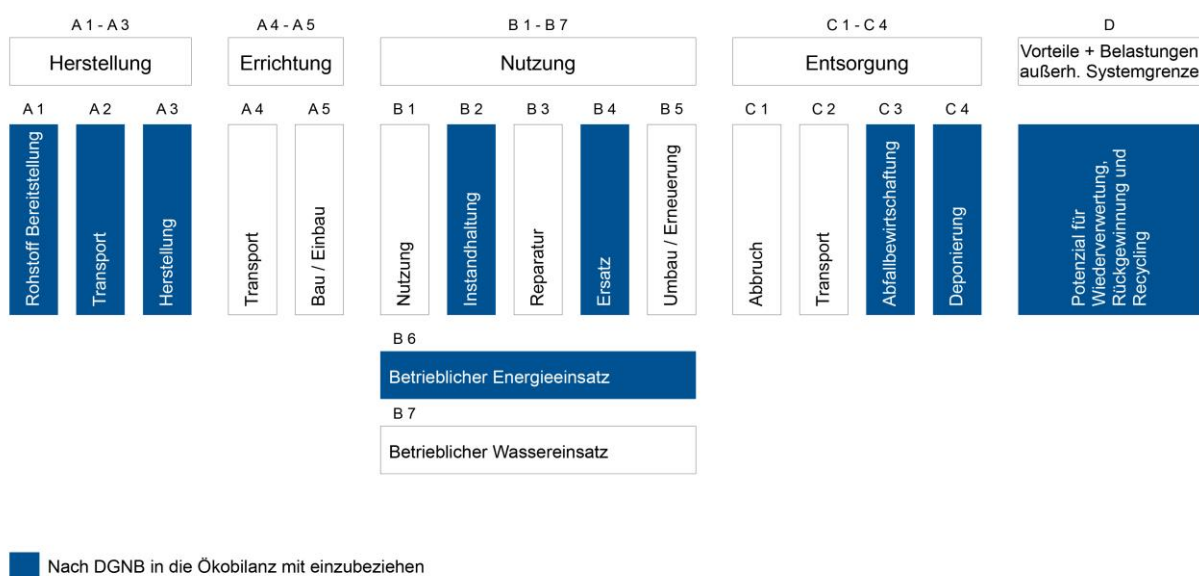


Abb. 25 Phasen Lebenszyklus [14] (Eigene Darstellung)

ZAE real besitzt eine Vielzahl an innovativen Baustoffen, wie beispielsweise Vakuumisulationspaneele in der Fassade oder Fenster mit Aerogelfüllung im Dachbereich. Für diese neuartigen Materialien gibt es meist keine hinterlegten Daten auf Ökobau.dat. Daher war es notwendig bei den jeweiligen Herstellern nachzufragen, ob Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declaration – EPD) der Baustoffe vorhanden sind. Eine Umweltproduktdeklaration gibt quantitative Umweltinformationen über den Lebensweg eines Produktes. Die Suche nach diesen Daten für bislang nicht erfasste Baustoffe verlief sehr erfolgreich: Lediglich für das PTFE beschichtete Glasfasergewebe, das als Membrandach fungiert, wurde keine EPD gefunden, da sie bis zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit nicht definiert worden war.

Die selbst erhobenen Daten können nicht in eLCA eingefügt werden, weshalb ihre Einarbeitung in die Ökobilanzierung über Excel erfolgen musste. Selbst erhobene Daten sind in der Datei farblich gekennzeichnet. Zum besseren Verständnis sind die wichtigsten Ausschnitte aus den EPDs im Anhang ab Seite 100 beigefügt. Einige Daten, wie beispielsweise die Dreifachverglasung oder der Aushub der Baugrube, sind in der Ökobau.dat Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte von Laborgebäuden

2011 noch nicht erfasst; sie mussten deshalb aus der neueren Version der Datenbank, der Ökobau.dat 2016, entnommen werden und der Ökobilanz über die Excel-Datei hinzugefügt werden. Auch diese Daten sind farblich gekennzeichnet.

#### 6.4.2 Inventar Betrieb

Neben dem Inventar der Bausubstanz müssen in einer Ökobilanzierung auch die Daten des Betriebs aufgenommen werden. Da diese Arbeit das Ziel hat, die Phasen der Herstellung und der Entsorgung, aber nicht die des Betriebs zu betrachten, werden für alle drei Gebäudevarianten die gleichen Energiebedarfe beziehungsweise Energieverbräuche angesetzt. Diese werden aus der EnEV Berechnung des ZAE real entnommen, welche im Anhang auf Seite 102 beigefügt ist.

*Tabelle 4 Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/m<sup>2</sup>a*

Energieträger	Heizung	Warmwasser	Eingebaute Beleuchtung	Lüftung	Kühlung einschl. Befeuchtung	Gebäude insgesamt
Fernwärme	104,5	21,3	0	0	5,4	<b>131,2</b>
Strom	0,6	0,2	11,9	8,5	10,6	<b>31,8</b>

#### 6.5 Wirkungsabschätzung

Nach der Eingabe der Varianten ZAE klassisch, ZAE real und ZAE zukünftig in eLCA, kann nun im dritten Schritt der Ökobilanzierung die Wirkungsabschätzung vorgenommen werden. Dabei wird die Bedeutung potenzieller Umweltauswirkungen anhand der Ergebnisse der Sachbilanz beurteilt. Die Daten der Sachbilanz werden hierfür mit Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft, um daraus die potenziellen Umweltauswirkungen zu erkennen.

Im Hinblick auf die Problematiken, die der Klimawandel mit sich bringt, wird der Bausektor vor enorme Herausforderungen gestellt. Wie bereits in Kapitel 3.7 „Nachhaltigkeit von Laborgebäuden“ erwähnt, sollen bis zum Jahre 2020 die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 20 % reduziert werden. Insbesondere im Bereich des Bauens und des Wohnens werden große Einsparpotenziale vermutet. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die Ergebnisse der Sachbilanz der drei untersuchten Gebäudevarianten der Wirkungskategorie des Treibhausgaspotenzials zugeordnet. Damit können die potenziellen

Umweltauswirkungen, die über den gesamten Lebenszyklus der Gebäudevarianten entstehen, aufgezeigt werden.

Das Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential – GWP) ist der potenzielle Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten, das heißt zum sogenannten Treibhauseffekt. [20, S. 80] Zusätzlich zum natürlichen Treibhauseffekt ist ein durch Menschen verursachter Treibhauseffekt, anthropogener Treibhauseffekt genannt, zu beobachten. [34, S. 45] Zu anthropogen freigesetzten Treibhausgasen zählen beispielsweise Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) oder Methan ( $\text{CH}_4$ ). Verbrennung fossiler Brennstoffe oder Entwaldungen führen zum Beispiel zum Ausstoß von Kohlendioxid und leisten damit einen erheblichen Beitrag zum Treibhauseffekt und gleichzeitig zur Klimaerwärmung. Das Treibhausgaspotenzial wird als Kohlendioxid-Äquivalente ( $\text{CO}_2$ -Äqv.) angegeben. Dies bedeutet, dass alle Emissionen bezüglich ihres potenziellen Treibhauseffekts zu  $\text{CO}_2$  ins Verhältnis gesetzt werden. Der Beitrag eines Stoffes ist dabei über einen Zeitraum von meist 100 Jahren gemittelt, da die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre berücksichtigt werden muss. Zusammenfassend bedeutet dies: Je niedriger der GWP-Wert, desto niedriger die potenzielle Wirkung auf die globale Erwärmung und die damit verbundenen Umweltauswirkungen.

Da nun geklärt wurde, auf welchen Wirkungsindikator sich die Studie der drei Varianten für das ZAE in Würzburg bezieht, kann folglich kurz auf das zu erwartende Ergebnis eingegangen werden. Wie in Abbildung 26 dargestellt, ist der Betrieb für alle drei Varianten gleich angesetzt. In den Phasen des Baus und des Rückbaus, die im Rahmen dieser Masterarbeit untersucht werden und aus diesem Grund grau hinterlegt sind, sind große Veränderungen zwischen den Varianten zu erwarten. ZAE real wird voraussichtlich in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial schon relativ gute Werte erzielen. ZAE klassisch sollte um einiges schlechter abschneiden, ZAE zukünftig sollte hingegen die Werte von ZAE real durch Optimierungsmaßnahmen deutlich unterschreiten.

### Erwartete Emissionen während des Lebenszyklus der drei Gebäudevarianten

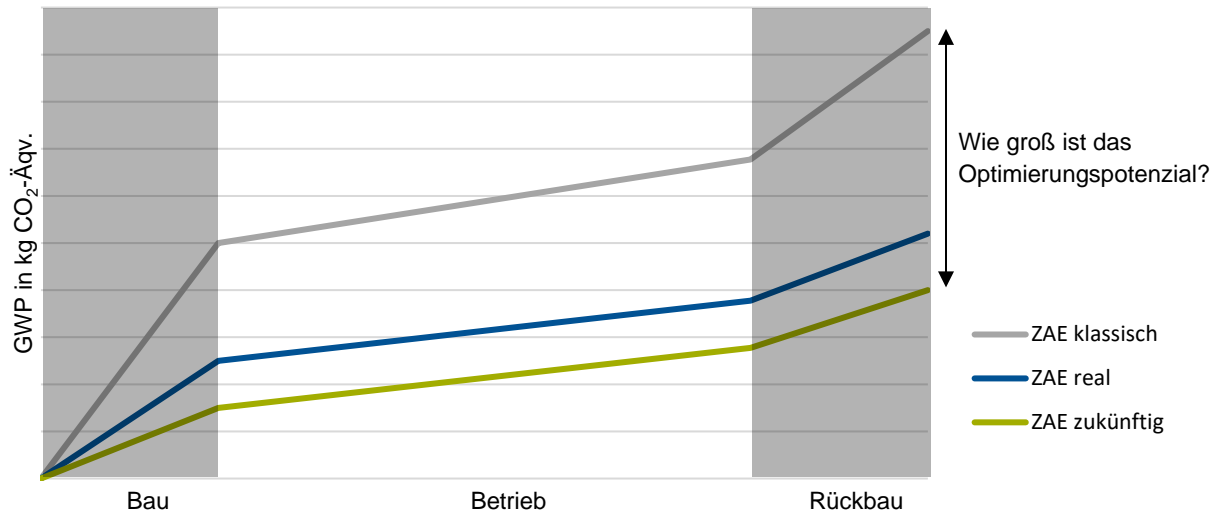


Abb. 26 Erwartete Ergebnisse Ökobilanz (Eigene Darstellung)

Auf den nächsten Seiten werden die realen Ergebnisse, bezogen auf das Treibhausgaspotenzial, der Gebäudevarianten einzeln vorgestellt. Erst im darauffolgenden Kapitel, dem Kapitel der Auswertung, werden die Ergebnisse der Varianten dann miteinander verglichen und ausgewertet. Aus den Berechnungen und dem Vergleich können dann Schlussfolgerungen gezogen werden, die eine Beantwortung der eingangs gestellten Schlüsselfragen zulassen und aufzeigen, wie groß das Optimierungspotenzial allein durch die Wahl der Baustoffe ist.

#### 6.5.1 Wirkungsabschätzung ZAE real

Bei der Betrachtung der Ökobilanzergebnisse von ZAE real fällt auf, dass in den Bereichen der Gründung (Kostengruppe 320), der Außenwände (Kostengruppe 330) und der Dächer (Kostengruppe 360) die höchsten GWP-Werte erzielt werden.

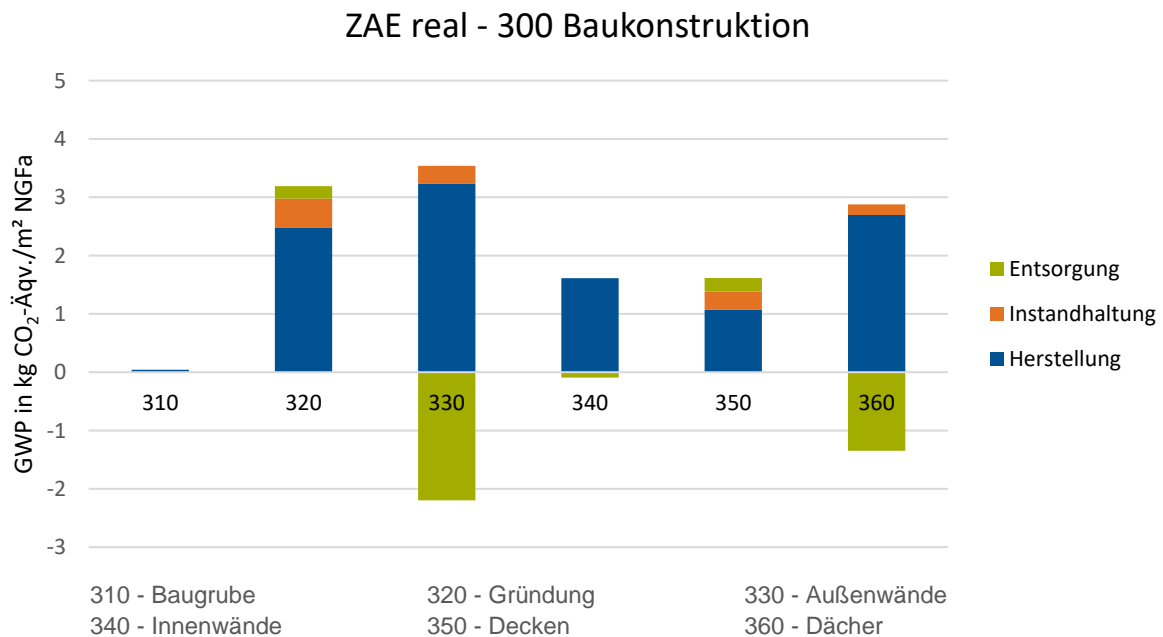


Abb. 27 ZAE real – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt (Eigene Darstellung)

Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Kostengruppen ist in Abbildung 28 zu erkennen, dass bei der Gründung die Kostengruppe 322, welche die Fundamentplatten aus wasserundurchlässigem Beton (WU-Beton) beinhaltet, die Werte in die Höhe treibt. Dies liegt am hohen Einsatz an Stahlbeton der Festigkeitsklasse C30/37 für die Ausführung der Fundamentplatten. Außerdem ist zu erwähnen, dass beim Vergleich der sechs verwendeten Bodenbeläge der PVC-Belag am schlechtesten abschneidet und hohe Werte im Bereich der Herstellung und Instandhaltung aufweist. Die besten Werte erzielt der Parkettboden, da seine Herstellung und Instandhaltung auf Grund der Materialität einen negativen GWP-Wert aufweisen. Der negative Wert kommt zustande, weil Holzprodukte als Kohlenstoffspeicher gelten und somit für die Verringerung von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre sorgen. Erst am Ende ihrer Lebensdauer wird das CO<sub>2</sub> durch Verbrennung freigesetzt und somit in der Phase der Entsorgung ein positiver GWP-Wert erreicht. Insgesamt erreicht die Kostengruppe 325 „Bodenbeläge“ einen Gesamtwert von 0,64 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF pro Jahr.

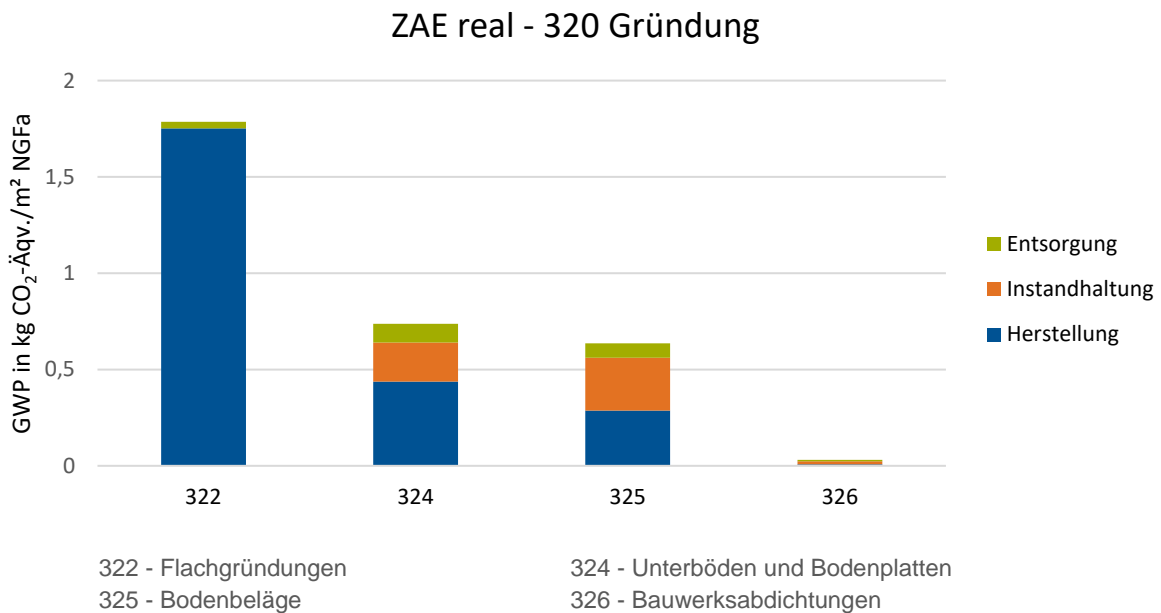


Abb. 28 ZAE real – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung)

Im Bereich der Außenwände treiben vor allem die Pfosten-Riegel-Fassade (Kostengruppe 334) sowie die Außenwandbekleidung außen (Kostengruppe 335) die GWP-Werte nach oben. Auffällig sind die hohen negativen Werte in der Phase der Entsorgung der beiden Kostengruppen. Diese kommen durch eine Gutschrift, die dem Material Aluminium durch sein Recyclingpotenzial zuerkannt wird, zustande.

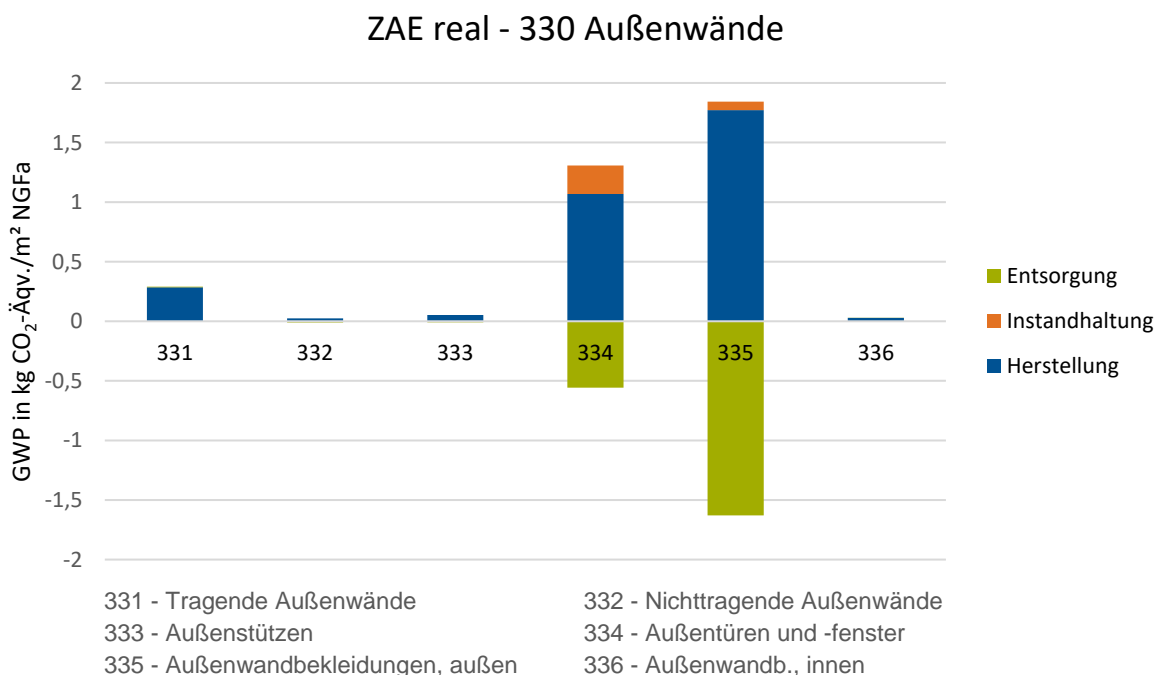


Abb. 29 ZAE real – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung)

Die Dächer des ZAE real sind, wie schon erwähnt, sehr innovativ und zukunftsfähig. Da die Membrandächer von einer Stahlkonstruktion getragen werden, kommen im Bereich der Dachkonstruktionen (Kostengruppe 361) die höchsten Werte zustande. Dafür sorgen zudem der hohe Einsatz an Stahlbeton und Stahlprofilen in den Flachdachaufbauten. Gleichzeitig führen das Recyclingpotenzial von Stahl und Aluminium sowie die Bauschutttaufbereitung von Beton in der Phase der Entsorgung zu einem negativen Wert von  $-0,87 \text{ kg/CO}_2\text{-Äquivalente pro m}^2 \text{ NGF pro Jahr}$ . Die Dachfenster (Kostengruppe 362) führen trotz ihrer Aerogelfüllung zu keinen kritischen Werten. Auch die Dachbeläge (Kostengruppe 363) schneiden trotz des Einsatzes von ETFE Folie äußerst gut ab. Zu beachten ist jedoch, dass das PTFE beschichtete Glasfasergewebe nicht mitbilanziert werden konnte, da hierfür bislang noch keine Daten zum Treibhausgaspotenzial vorliegen. Da der Herstellungsprozess des Materials als sehr aufwändig gilt, wären bei Berücksichtigung der Daten in den Berechnungen für die Dachbeläge natürlich höhere Werte zu erwarten. Im Kapitel 6.6 „Auswertung“, wo die Ergebnisse der Varianten miteinander verglichen werden, müssen die Dächer der drei Gebäudevarianten miteinander vergleichbar sein. Damit die Vergleichbarkeit gegeben ist, wird in der Bilanzierung der Dächer bei allen drei Varianten die Fläche, auf der bei ZAE real das PTFE eingesetzt ist, ohne Abdichtungsebene bilanziert.

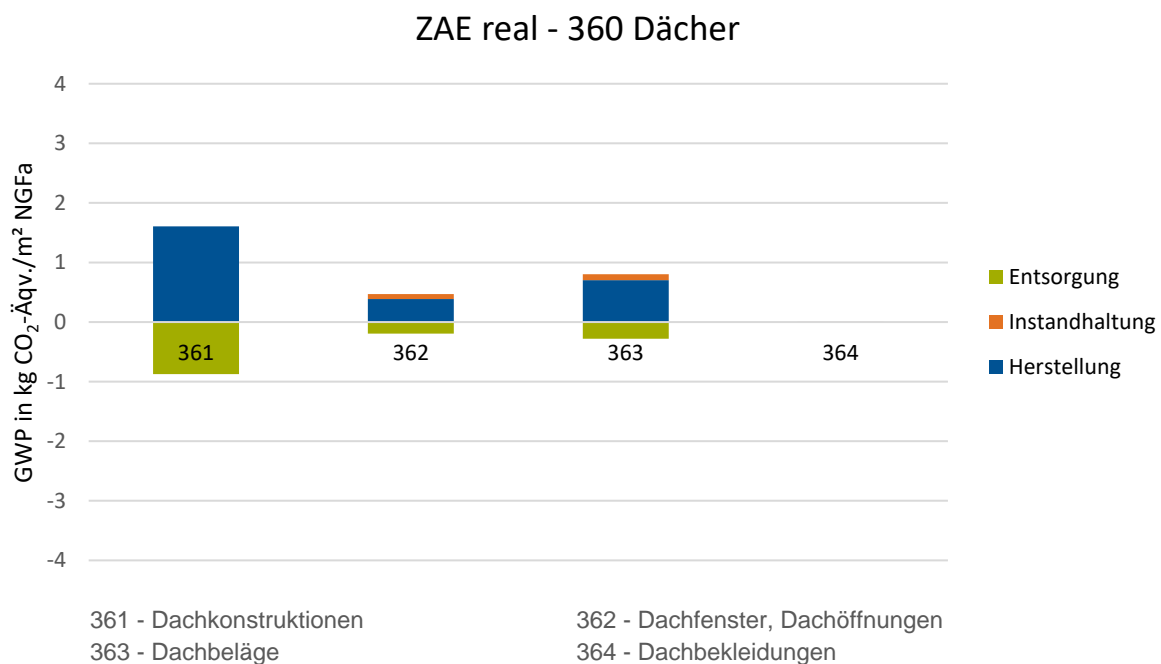


Abb. 30 ZAE real – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung)



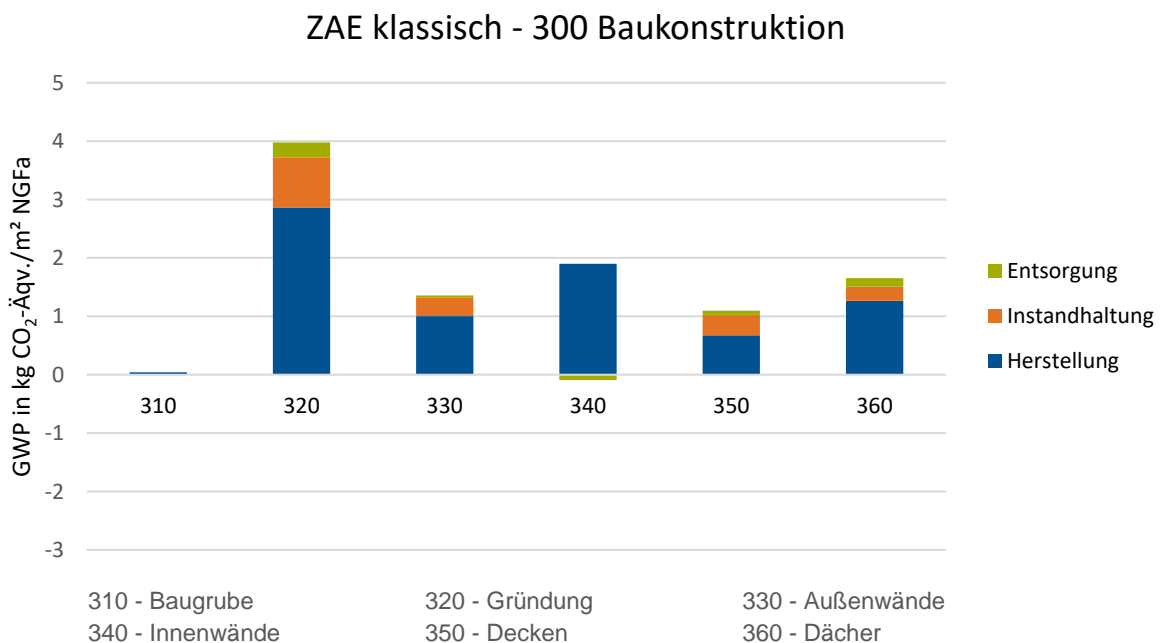
Insgesamt erreicht ZAE real für die gesamte Baukonstruktion ein Ergebnis von 9,24 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGFa und Jahr. Erst im Kapitel der Auswertung, wo die Ergebnisse der drei Gebäudevarianten miteinander verglichen werden, können Aussagen bezüglich der Qualität dieses Wertes getroffen werden.

*Tabelle 5 Ergebnisse Baukonstruktion gesamt ZAE real*

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung
GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa	<b>9,24</b>	11,13	1,30	-3,19

### 6.5.2 Wirkungsabschätzung ZAE klassisch

ZAE klassisch erreicht in der Ökobilanz die interessantesten Werte im Bereich der Gründung (Kostengruppe 320) und der Dächer (Kostengruppe 360).



*Abb. 31 ZAE klassisch – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt (Eigene Darstellung)*

Bei der Gründung führen, wie in Abbildung 32 erkennbar, einerseits die Flachgründungen (Kostengruppe 322), andererseits auch die Bodenbeläge (Kostengruppe 325) zu den hohen Werten. Der eingesetzte PVC-Bodenbelag erhöht den GWP-Wert deutlich, da das Material, auf Grund seiner Lebensdauer von 20 Jahren, im Laufe des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren zwei Mal ausgetauscht werden muss.

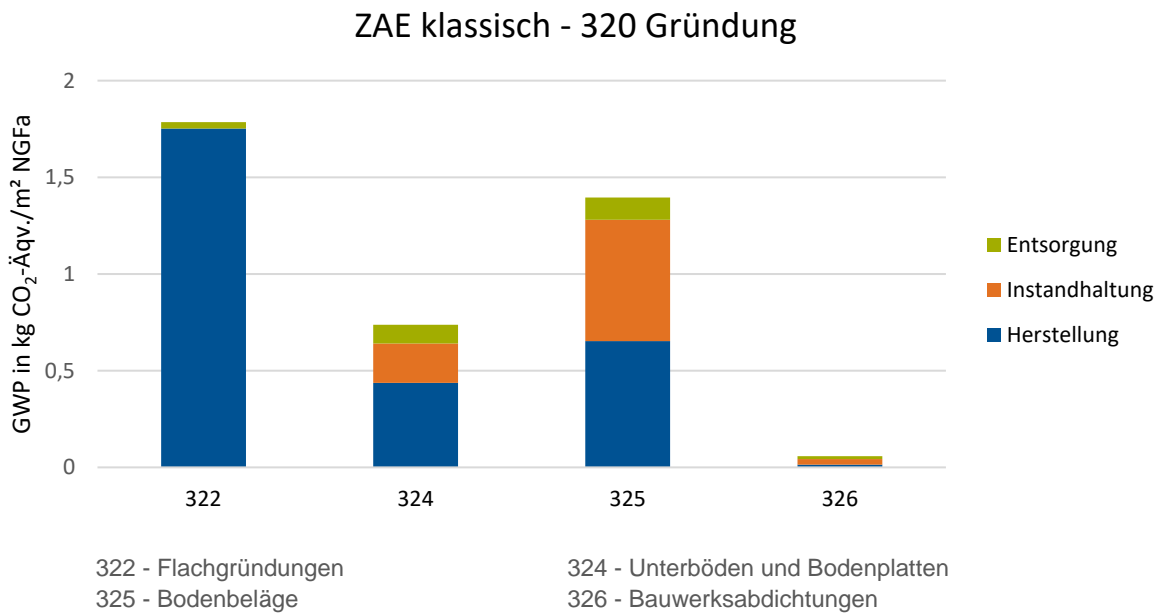


Abb. 32 ZAE klassisch – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung)

Auffällig ist, dass die Werte der Außenwände (Kostengruppe 330) relativ gering ausfallen. Die Kostengruppe 331 der tragenden Außenwände, welche aus massiven Stahlbetonwänden besteht, liegt bei einem GWP-Wert von 0,48 kg/CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF pro Jahr. Außerdem besitzen sowohl die eingesetzten PVC-Fensterrahmen, als auch der Kunstharzputz als Bekleidung innen und außen sehr gute Werte, die unter 0,60 kg/CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF pro Jahr liegen.

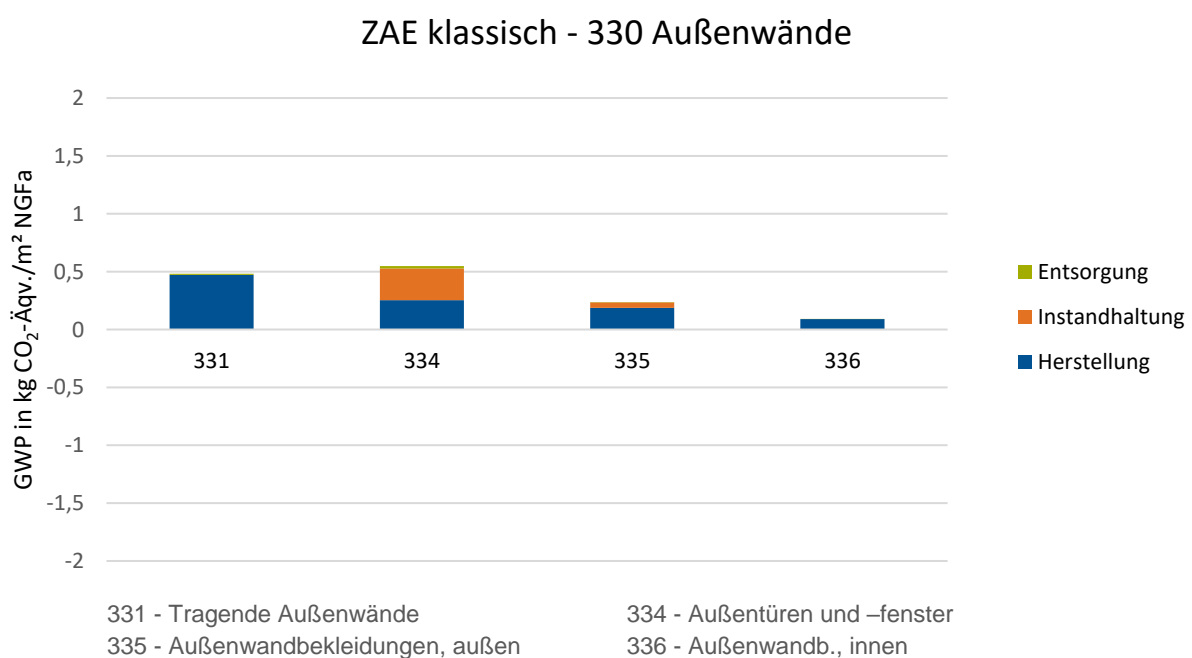


Abb. 33 ZAE klassisch – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung)

Das extensiv begrünte Flachdach von ZAE klassisch erzielt seine höchsten Werte im Bereich der Dachkonstruktion (Kostengruppe 361). Im Bereich der Dachbeläge (Kostengruppe 363) ist anzumerken, dass die Folie für das Gründach einen hohen GWP-Wert in der Herstellung aufweist und zusätzlich ein Mal im Laufe des fünfzigjährigen Betrachtungszeitraums ausgetauscht werden muss.

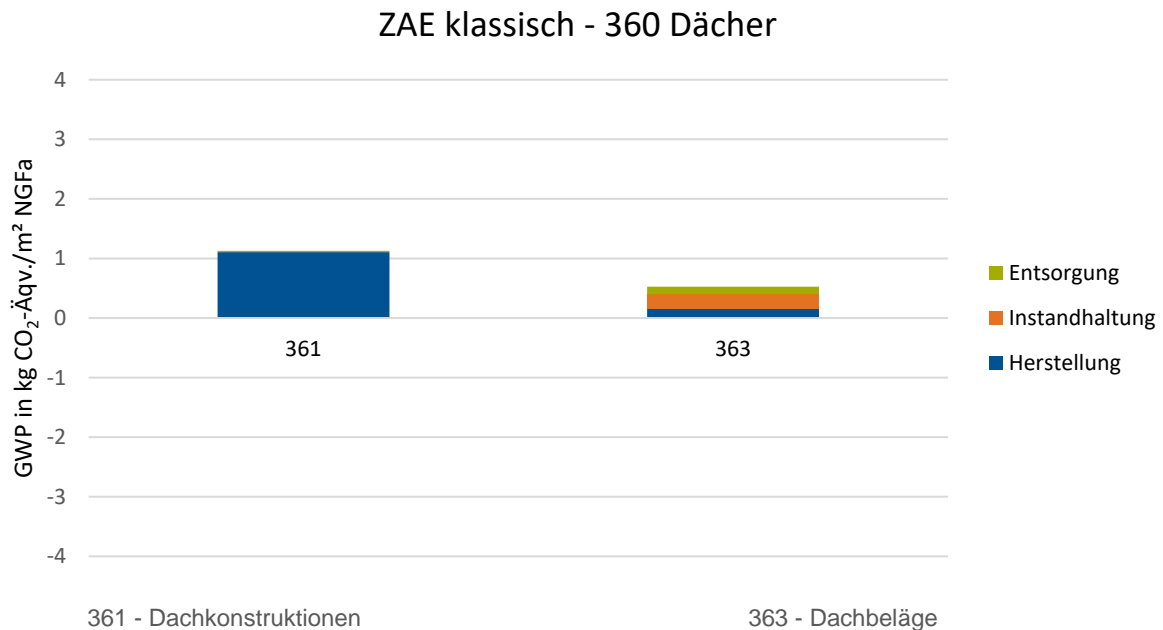


Abb. 34 ZAE klassisch – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung)

Wie in Tabelle 6 ersichtlich, erreicht ZAE klassisch für die gesamte Baukonstruktion einen Wert von 9,93 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr.

Tabelle 6 Ergebnisse Baukonstruktion gesamt ZAE klassisch

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung
GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa	<b>9,93</b>	7,74	1,77	0,42

### 6.5.3 Wirkungsabschätzung ZAE zukünftig

Die Ökobilanzwerte von ZAE zukünftig weisen in den Kostengruppen 320 „Gründung“ und 360 „Dächer“ die auffallendsten Werte auf.

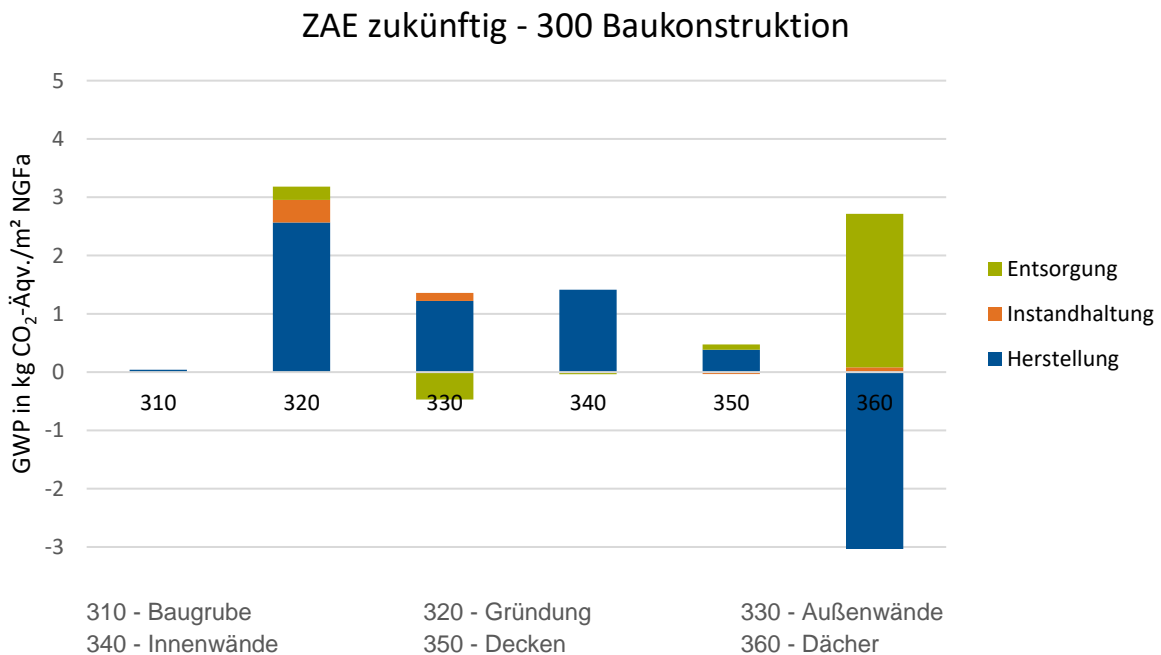


Abb. 35 ZAE zukünftig – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt (Eigene Darstellung)

Die Gründung von ZAE zukünftig erreicht durch den Einsatz 40 cm dicker Stahlbetondecken den höchsten GWP-Wert im Bereich der Fundamentplatten (Kostengruppe 322). Weiters besitzt das Gebäude einen Linoleum Bodenbelag (Kostengruppe 325), der im Bereich der Herstellung sehr gute GWP-Werte erzielt. Da Linoleum jedoch nur eine Lebensdauer von 20 Jahren hat, muss der Belag im Laufe des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren zwei Mal ausgetauscht werden und führt deshalb zu einem erheblichen Anstieg des GWP-Wertes im Bereiche der Instandhaltung.

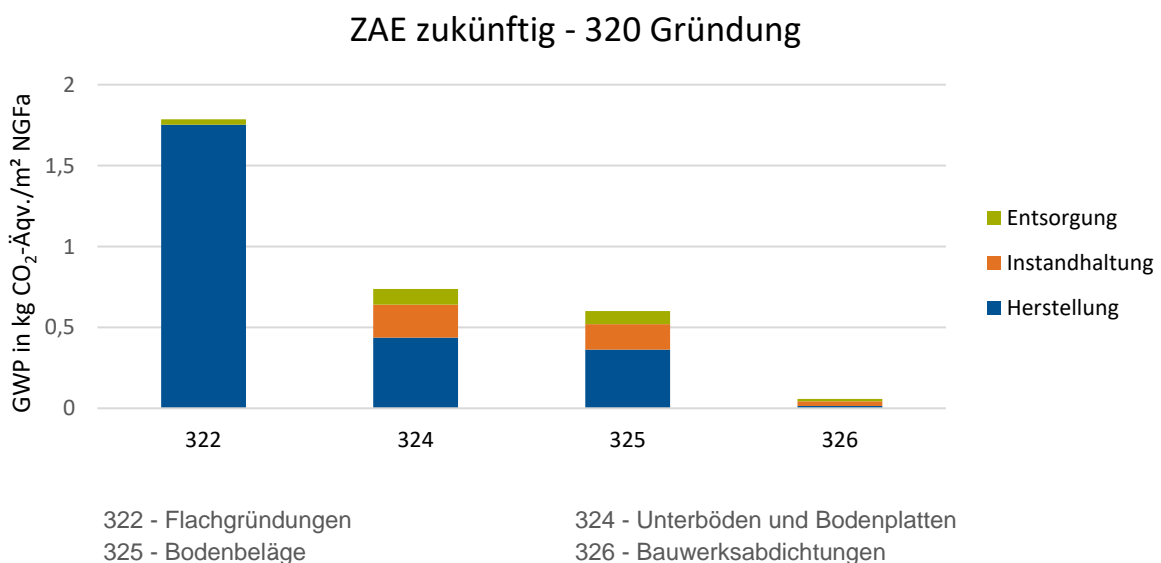
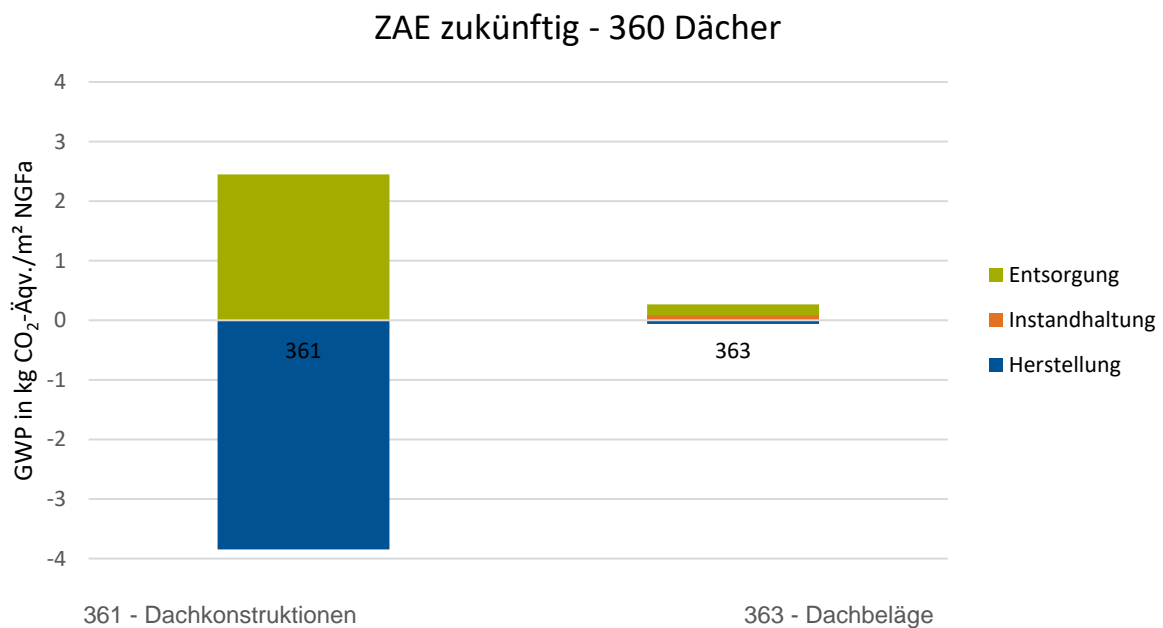


Abb. 36 ZAE zukünftig – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung)

Das Flachdach von ZAE zukünftig besteht aus einer Massivholzdecke aus Eichenholz. Durch den Einsatz des Baustoffes Holz fällt der GWP-Wert im Bereich der Dachkonstruktion (Kostengruppe 361) besonders gut aus. Der negative Wert, der dadurch in der Phase der Herstellung entsteht, lässt den Bereich der Dachkonstruktion in seiner Gesamtheit mit einem negativen GWP-Wert abschließen. Auch die Holzfaserdämmplatten im Bereich der Dachbekleidungen (Kostengruppe 363) weisen im Bereich der Herstellung und Instandhaltung negative Werte auf.



*Abb. 37 ZAE zukünftig – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung)*

Im Bereich der Außenwände fällt auf, dass die Außenwandbekleidungen außen (Kostengruppe 335) negative Werte im Bereich der Herstellung und Instandhaltung ergeben. Dies ist durch den Einsatz von Eichenschichtholz als Außenwandbekleidung zu erklären. In der Kostengruppe 354 wird ein negativer Wert im Bereich der Entsorgung erreicht, da dem Aluminium-Fensterrahmen ein Recyclingpotenzial zugeschrieben wird.

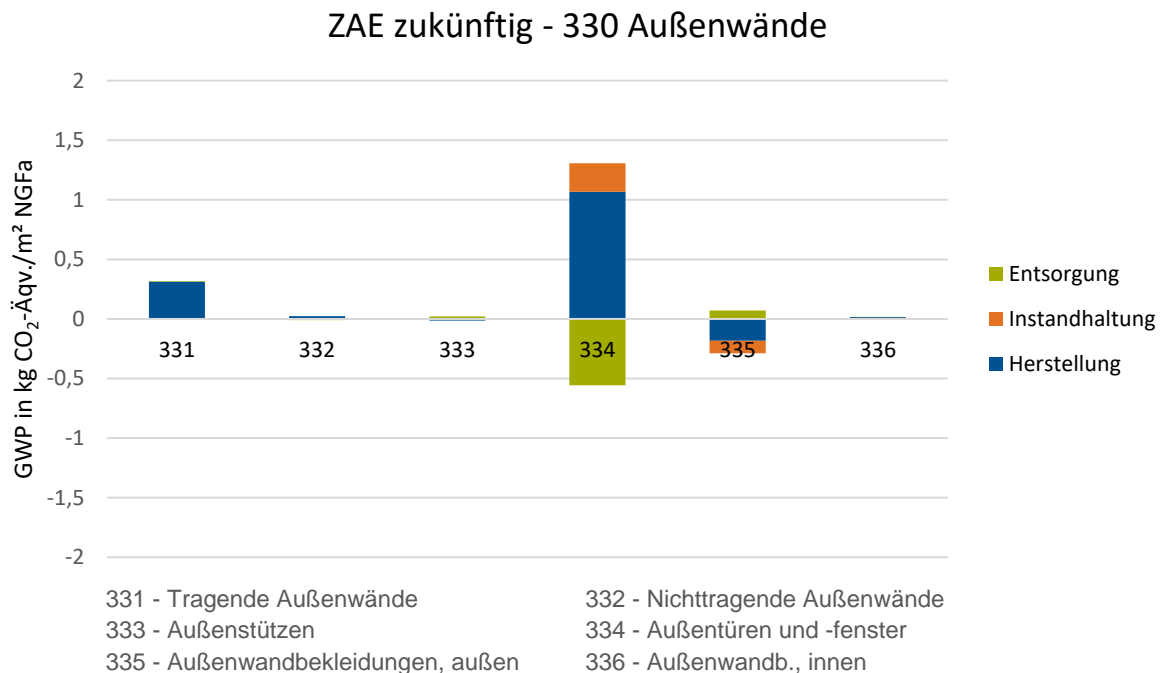


Abb. 38 ZAE zukünftig – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung)

Durch den Einsatz weniger energieintensiver Baustoffe erreicht ZAE zukünftig für die gesamte Baukonstruktion einen hervorragenden Wert von 4,74 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr.

Tabelle 7 Ergebnisse Baukonstruktion gesamt ZAE zukünftig

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung
GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa	<b>4,74</b>	1,72	0,57	2,44

## 6.6 Auswertung

Im vierten und gleichzeitig letzten Schritt werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung zusammengeführt und die drei Gebäudevarianten des ZAE in Würzburg miteinander verglichen. Aus dem Vergleich können Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen für den Bau nachhaltiger und effizienter künftiger Laborgebäude ausgesprochen werden.

### 6.6.1 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse der Varianten

Im Folgenden werden alle Kostengruppen der Varianten einzeln miteinander verglichen, um festzustellen, in welchen Bereichen Optimierungsmaßnahmen am effektivsten sind und wo die Stellschrauben für künftige Laborneubauten liegen.

In der Kostengruppe der Baugruben fallen die Werte der drei Varianten identisch aus, da die für ZAE real effektiv ausgeführte Baugrube für die beiden Varianten in identischer Ausführung angenommen wird. Der gesamte GWP-Wert, der sich aus Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung zusammensetzt, liegt bei sehr geringen 0,04 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr.

Zwischen den Varianten kommt es zu keiner Abweichung.



Abb. 39 Variantenvergleich – Kostengruppe 310 Baugrube (Eigene Darstellung)

Bei den Gründungen sind erste Veränderungen zwischen den Varianten erkennbar. Die Gründungen unterscheiden sich zwar lediglich in ihren Bodenbelägen voneinander, dennoch sind beachtliche Abweichungen ersichtlich. Die Gründung von ZAE klassisch kommt auf einen GWP-Wert von 3,98 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr und erreicht somit den höchsten Wert der drei Varianten. ZAE zukünftig besitzt, im Gegensatz zu ZEA real, einen Bodenbelag aus Linoleum. Die Werte liegen nichts desto trotz sehr nahe aneinander und belaufen sich bei ZAE real auf 3,19 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr, bei ZAE zukünftig auf 3,18 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. Linoleum besitzt, wie schon erwähnt, sehr gute Werte in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial, doch auf Grund der geringen Lebensdauer von 20 Jahren und dem daraus resultierenden zweifachen Austausch

im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, erreicht die Gründung von ZAE zukünftig einen fast identischen Wert wie die Gründung von ZAE real mit ihren sechs verschiedenen Bodenbelägen.

Um einen genaueren Blick auf die verschiedenen Untergruppen der Kostengruppen werfen zu können, werden im Anhang ab Seite 103 Diagramme eingefügt, die die einzelnen Untergruppen der drei Gebäudevarianten im Vergleich zeigen.

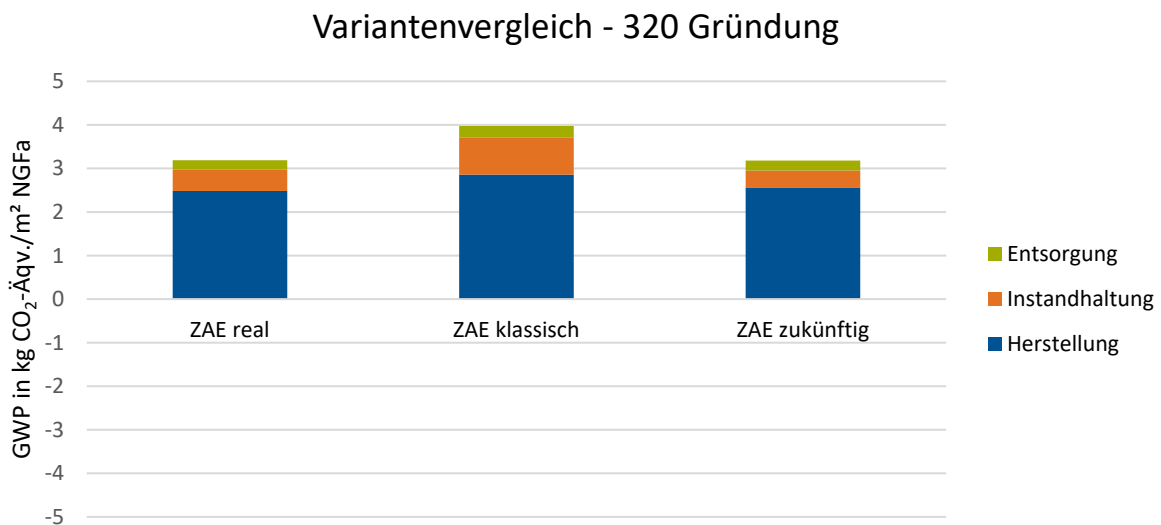


Abb. 40 Variantenvergleich – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung)

Die Abweichungen der Varianten werden auf den nächsten Seiten in Form von Tabellen dargestellt. ZAE real gilt hier immer als Vergleichsmaßstab (100 %), dem die Werte von ZAE klassisch und ZAE zukünftig gegenüber gestellt werden. Die prozentuale Abweichung bezieht sich folglich immer auf ZAE real. Unterschreitungen zu ZAE real werden in grün, Überschreitungen in blau dargestellt.

Wie in Tabelle 8 aufgelistet, überschreitet ZAE klassisch ZAE real im Bereich der Gründung um 24,7 %. ZAE zukünftig unterschreitet ZAE real hingegen nur um minimale -0,2 %.

Tabelle 8 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 320 Gründung in kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa

ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig	Abweichung	%	Abweichung	%
3,19	3,98	3,18	0,79	24,7	-0,0079	-0,2

Im Bereich der Außenwände sind mit die stärksten Schwankungen zwischen den Varianten des ZAE zu erkennen. Die Außenwände von ZAE real erreichen einen GWP-Gesamtwert



von 1,34 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. Trotz der relativ hohen GWP-Werte bei der Herstellung von Aluminium, das bei der Pfosten-Riegel-Fassade im Bereich der Außenwandbekleidungen außen und im Bereich der Fensterrahmen eingesetzt wurde, entsteht durch das hohe Recyclingpotenzial des Materials ein verhältnismäßig niedriger Gesamtwert für die Kostengruppe der Außenwände. ZAE klassisch erreicht nahezu den gleichen Wert wie ZAE real. Dies liegt einerseits daran, dass bei ZAE klassisch auf den Einsatz von Stahlbetonstützen verzichtet werden kann, da das Gebäude komplett in Massivbauweise errichtet wird und diese Kostengruppe somit im Vergleich zu ZAE real entfällt, andererseits besitzen die verwendeten Materialien des Kunstharzputzes, der im Bereich der Außenwandbekleidungen außen benutzt wird, und der PVC-Fensterrahmen zwar geringere Herstellungswerte als bei ZAE real, aber gleichzeitig auch keine negativen Recyclingpotenziale in der Phase der Entsorgung. ZAE klassisch kommt auf einen GWP-Wert von 1,36 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. ZAE zukünftig erreicht dagegen durch Veränderungen im Bereich der Dämmung und Bekleidung deutlich bessere Werte als die zwei anderen Varianten. Die eingesetzten Holzfaserdämmplatten sowie die Bekleidung der Fassade aus Holz optimieren die GWP-Werte stark. Auch die Verwendung von Holzstützen im Obergeschoss bringt im Gegensatz zu den anderen Varianten enorme Verbesserungen in der Berechnung. ZAE zukünftig erreicht auf Grund des Einsatzes nachhaltiger Materialien einen Wert von 0,89 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr.

### Variantenvergleich - 330 Außenwände

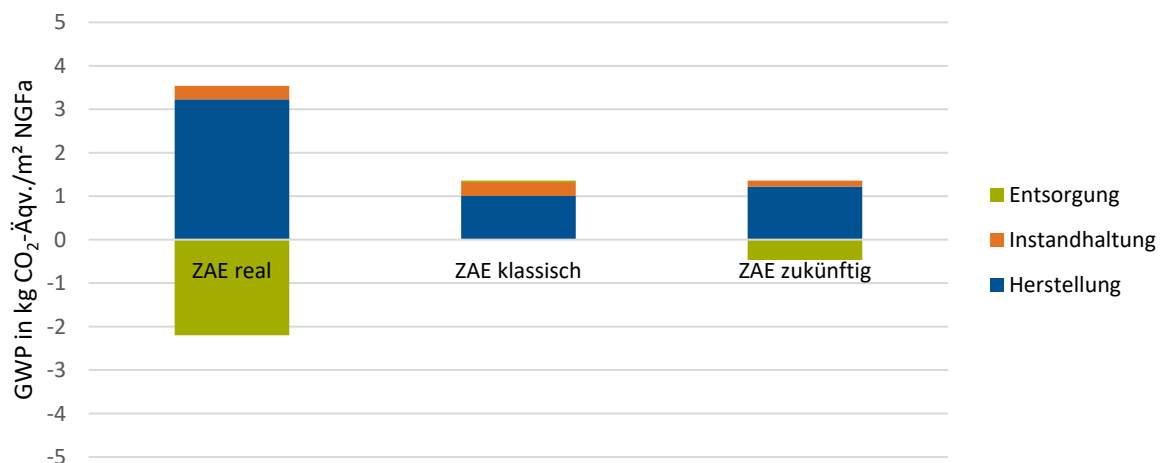


Abb. 41 Variantenvergleich – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung)

Im Bereich der Außenwände überschreiten die Werte von ZAE klassisch die Werte von ZAE real um geringe 1,3 %. Der Unterschied zwischen ZAE real und ZAE zukünftig fällt hingegen deutlich höher aus: ZAE zukünftig unterschreitet die Werte von ZAE real um -33,7 %.

Tabelle 9 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 330 Außenwände in kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa

ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig	Abweichung	%	Abweichung	%
1,34	1,36	0,89	0,017	1,3	-0,46	-33,7

Die Innenwände der Varianten unterscheiden sich lediglich in ihren Wanddicken. ZAE real besitzt Innenwände aus Stahlbeton in den Dicken 20 cm und 25 cm sowie Innenwände aus Gipskarton in den Dicken 10 cm und 12,5 cm. ZAE klassisch ist mit denselben Stahlbetonwänden ausgestattet, die Gipskartonwände sind im Unterschied zu ZAE real jedoch alle 12,5 cm dick. Dies führt zu höheren Werten in den Berechnungen der Gebäudevariante ZAE klassisch. ZAE zukünftig verfügt über 12,5 cm dicke Gipskartonwände, die identischen Stahlbetonwände wie in ZAE real, zusätzlich aber über Innenstützen aus Holz im Obergeschoss. Durch diese Abänderungen erreicht ZAE zukünftig geringere Werte als die beiden anderen Varianten.

Variantenvergleich - 340 Innenwände

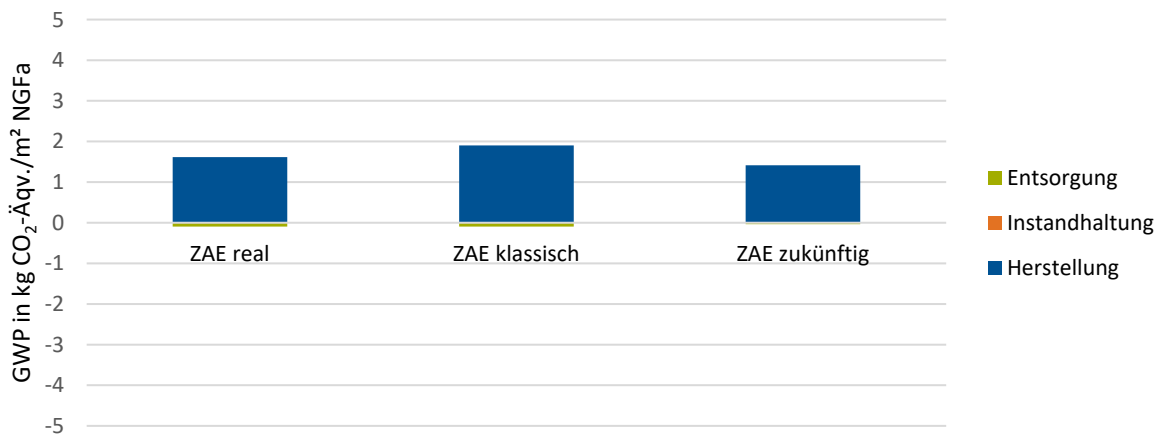


Abb. 42 Variantenvergleich – Kostengruppe 340 Innenwände (Eigene Darstellung)

Die Werte aus Tabelle 10 zeigen, dass ZAE klassisch ZAE real im Bereich der Innenwände um 18,9 % überschreitet und ZAE zukünftig den Wert von ZAE real um -9,4 % unterschreitet.

Tabelle 10 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 340 Innenwände in kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa

ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig	Abweichung	%	Abweichung	%
1,52	1,81	1,38	0,29	18,9	-0,14	-9,4

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse im Bereich der Decken, fällt auf, dass ZAE real die schlechtesten Werte in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial aufweist. Dies liegt daran, dass Hohlraumböden mit Kunststofffüßen eingesetzt wurden. Diese treiben die Werte für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung stark nach oben und führen zu einem Werte von 1,61 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. Im Gegensatz dazu besitzt ZAE klassisch mit einer Decke ohne Hohlraumboden und einem Gummi-Bodenbelag deutlich geringere Werte. ZAE zukünftig erreicht mit einem Parkettbelag mit 0,44 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr sogar einen noch besseren Wert.

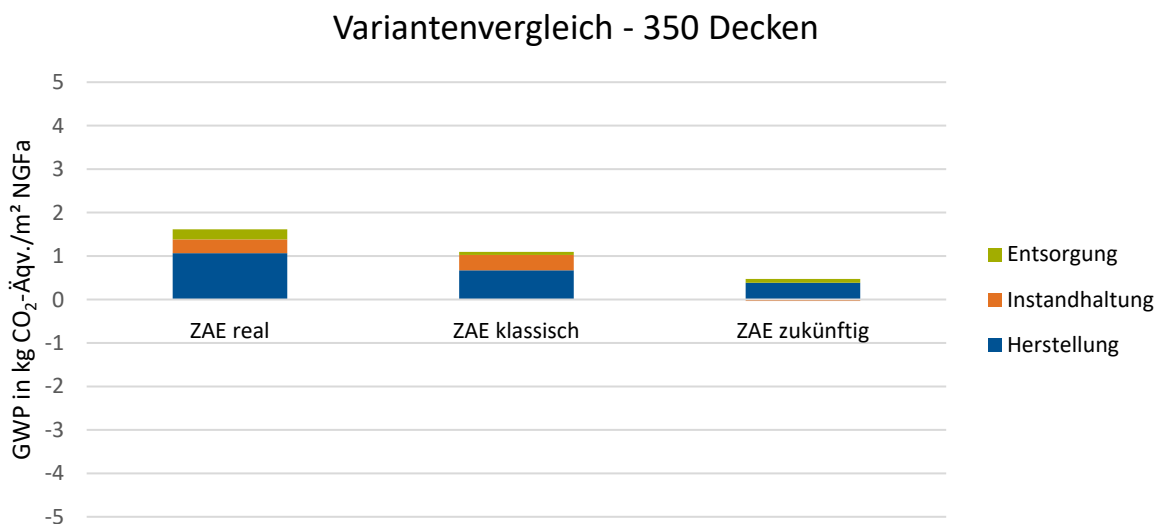


Abb. 43 Variantenvergleich – Kostengruppe 350 Decken (Eigene Darstellung)

Werden nun die drei Varianten im Vergleich betrachtet, fällt auf, dass sowohl ZAE klassisch als auch ZAE zukünftig im Bereich der Decken ZAE real deutlich unterschreiten.

Tabelle 11 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 350 Decken in kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa

ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig	Abweichung	%	Abweichung	%
1,61	1,10	0,44	-0,52	-32,1	-1,17	-72,8

Die Kostengruppe der Dächer zeigt, dass ZAE real einen hohen GWP-Wert von 1,53 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr erreicht. Dies liegt am hohen Einsatz von Stahl im Bereich der Dachkonstruktionen. Interessant ist, dass die Dachfenster, welche in den anderen beiden Varianten nicht vorgesehen sind, den Wert nicht merklich nach oben

treiben. Außerdem fällt auf, dass die Dachbekleidungen (Kostengruppe 364), welche die ETFE Folie beinhalten, einen minimalen Wert von 0,0006 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr ausmachen und somit ebenfalls nicht ausschlaggebend für den hohen Wert sind. ZAE klassisch hingegen, mit seinem Standard-Flachdachaufbau, erreicht einen guten Gesamtwert von 1,65 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. ZAE zukünftig kommt auf einen hervorragenden Wert von -1,19 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. Grund dafür ist der Einsatz von Holz für die Dachkonstruktion.

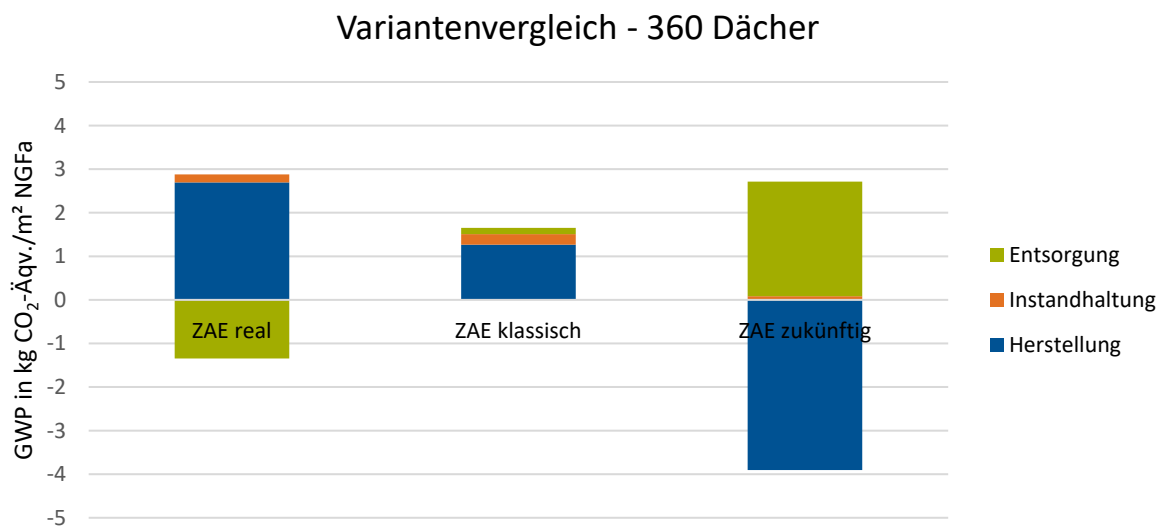


Abb. 44 Variantenvergleich – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung)

Werden die drei Gebäudevarianten im Vergleich zueinander betrachtet, so erzielt das Dach von ZAE klassisch einen um 7,8 % höheren Wert als das Dach von ZAE real. ZAE zukünftig schneidet durch sein Holzdach um beachtliche -177,7 % besser ab als die Kostengruppe der Dächer von ZAE real. Es ist aber zu beachten, dass das PTFE beschichtete Glasfasergewebe nicht in die Bilanzierung mit einbezogen werden konnte und der GWP-Wert für das Dach von ZAE real bei Mitberücksichtigung dieses Materials natürlich höher ausfallen und eventuell sogar schlechtere Werte als ZAE klassisch erzielen würde. Der durch den Einsatz von Membranen im Dachbereich resultierende hohe GWP-Wert muss als ein Nachteil für dieses Gebäude verbucht werden. Ihm stehen jedoch auch sehr positive und vorteilhafte Effekte (wie die Tageslicht-Qualität erreichende Beleuchtung der Innenräume), die nicht in die Ökobilanz einfließen, gegenüber.

Damit trotz Fehlen der GWP-Werte des Materials PTFE die Kostengruppe der Dächer miteinander verglichen werden kann, wurden die äquivalenten Flächen bei allen drei Gebäudevarianten nicht mitbilanziert. Das bedeutet, dass in allen drei Gebäudevarianten die Abdichtungsebenen im Bereich des PTFE nicht bilanziert wurden.

Tabelle 12 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 360 Dächer in kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa

ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig	Abweichung	%	Abweichung	%
1,53	1,65	-1,19	0,12	7,8	-2,73	-177,7

### 6.6.2 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Durch den im vorigen Kapitel beschriebenen Vergleich der Varianten lassen sich nun am Ende der Arbeit die eingangs gestellten Fragestellungen beantworten und daraus Schlussfolgerungen ziehen, in welchen Bereichen die Optimierungspotenziale bei Laborgebäuden in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial (GWP) am größten sind. Zusätzlich können Empfehlungen für künftige, in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial optimierte Laborneubauten formuliert werden.

Im ersten Schritt können die Werte der entstehenden Emissionen während des Lebenszyklus der drei Gebäudevarianten in einem Diagramm dargestellt werden. Es fällt auf, dass sie für die Phase des Betriebs im Verhältnis zu den Phasen des Baus und des Rückbaus sehr hoch sind.

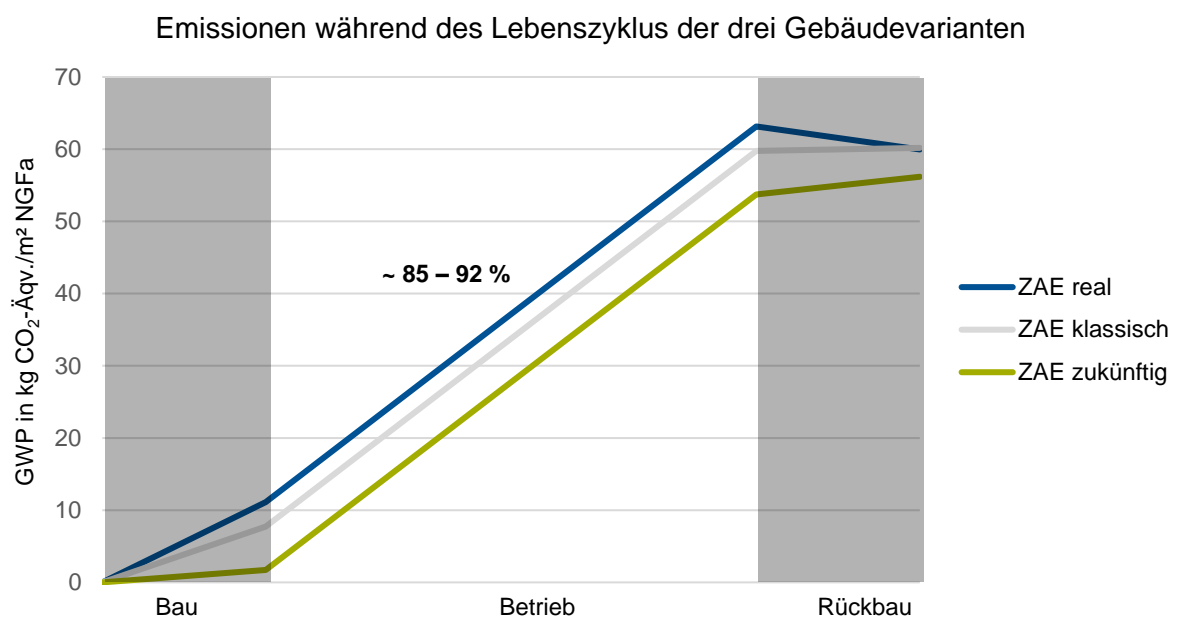


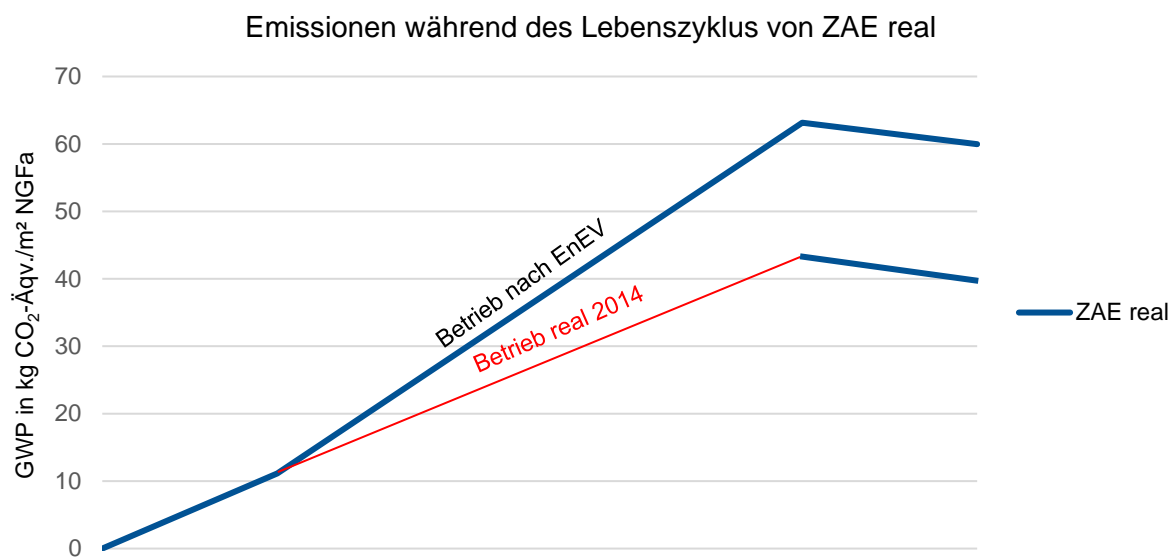
Abb. 45 Emissionen während des Lebenszyklus der drei Gebäudevarianten (Eigene Darstellung)

Der Betrieb ist in allen drei Gebäudevarianten für 85 % bis 92 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich und erreicht einen Wert von 52,02 kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa. Die Phasen des Baus und des Rückbaus schlagen demzufolge mit 8 % bis 15 % der Emissionen zu Buche. Doch wie in den folgenden Absätzen erklärt wird, ist das Optimierungspotenzial der Bausubstanz groß und nicht zu vernachlässigen.

*Tabelle 13 Ergebnisse Emissionen während des Lebenszyklus der drei Gebäudevarianten in kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa*

	ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig
<b>Herstellung</b>	11,13	7,74	1,72
<b>Betrieb</b>	52,02	52,02	52,02
<b>Instandhaltung</b>	1,30	1,77	0,57
<b>Entsorgung</b>	-3,19	0,42	2,44

Wird die Phase des Betriebs von ZAE real nicht aus dem EnEV Nachweis entnommen, sondern die realen Werte für das Jahr 2014 eingesetzt, erreicht die Phase des Betriebs einen GWP-Wert von circa 32 kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa. Damit verringert sich der prozentuale Anteil des Betriebs zum Emissionsausstoß: Er liegt nun zwischen 76 % und 87 %. Demzufolge sind die Phasen des Baus und des Rückbaus für 13 % bis 24 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Bezogen auf die realen Verbrauchswerte kommt der Gebäudesubstanz somit eine deutlich größere Wichtigkeit zu.



**Abb. 46 Emissionen während des Lebenszyklus von ZAE real (Eigene Darstellung)**

Auf die Frage, welche der drei Gebäudevarianten des ZAE das geringste Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebenszyklus aufweist, kann eine ganz klare Antwort gegeben werden: Es ist die Variante ZAE zukünftig. Auf Grund des Einsatzes nachhaltiger, nachwachsender Materialien schneidet ZAE zukünftig in der Ökobilanz um 48,7 % besser ab als ZAE real. Zwischen den beiden Varianten gibt es eine Abweichung von 4,50 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. Um eine bessere Vorstellung von diesem Wert zu bekommen, wurden die eingesparten kg CO<sub>2</sub> in mit einem PKW der Mittelstandsklasse gefahrene km umgerechnet. Durch die erzielten Einsparungen könnte ein mittelständischer PKW rund 120.000 km pro Jahr zurücklegen. Dieser Wert überschreitet die in Deutschland im Jahresdurchschnitt pro Auto gefahrene Anzahl von rund 14.000 km um ein vielfaches und ist einer dreimaligen Erdumrundung gleichzusetzen. [21]

ZAE klassisch schneidet hingegen um 7,5 % schlechter als ZAE real ab und erreicht somit die schlechtesten Werte der Ökobilanzierung. Zwischen diesen beiden Varianten gibt es eine Abweichung von 0,69 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr. In einem Jahr können durch die Einsparung von ZAE real gegenüber ZAE klassisch umgerechnet circa 18.000 km mit einem PKW zurückgelegt werden.

*Tabelle 14 Ergebnisse Variantenvergleich – Baukonstruktion gesamt in kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa*

ZAE real	ZAE klassisch	ZAE zukünftig	Abweichung	%	Abweichung	%
9,24	9,93	4,74	0,69	7,5	-4,50	-48,7

Abbildung 47 veranschaulicht grafisch, dass ZAE zukünftig die besten Werte der gesamten Baukonstruktion über deren Lebenszyklus aufweist. ZAE real schneidet auf Grund des negativen Wertes in der Phase der Entsorgung besser als ZAE klassisch ab.

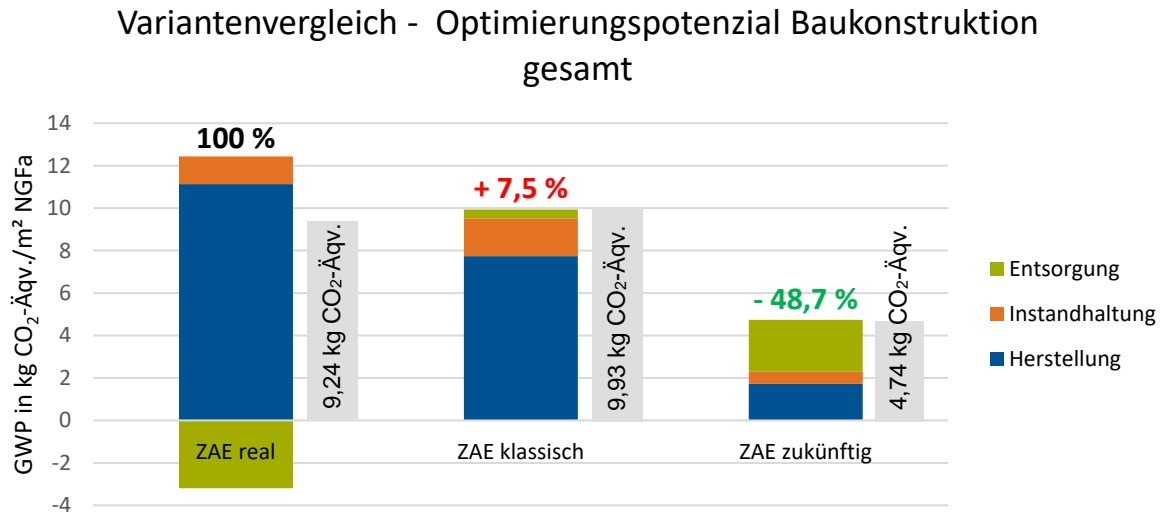


Abb. 47 Variantenvergleich – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt – Optimierungspotenzial in % angegeben (Eigene Darstellung)

In der Bilanzierung der Bausubstanz wurde die TGA nicht mit berücksichtigt. Um jedoch einen Vergleich anstellen zu können, wie die Ergebnisse der Ökobilanz der drei Varianten unter Berücksichtigung der Gebäudetechnik aussehen würden, wird im Folgenden der für jede Gebäudevariante errechnete GWP-Gesamtwert der Gebäudesubstanz mit einem prozentualen Aufschlag versehen. Dieser muss für alle drei Varianten konstant sein, da die eingesetzte TGA identisch angenommen wird und das Gebäude mit der schlechtesten Bausubstanz nicht benachteiligt werden soll. Es werden folglich 10 % des Gesamtwertes der Bausubstanz von ZAE real berechnet und dieser Wert dem errechneten Gesamtwert der Bausubstanz allen drei Gebäuden zugerechnet. Damit ist laut BNB-System die TGA berücksichtigt. [8] Der GWP-Gesamtwert von ZAE real erhöht sich dadurch auf einen Wert von 10,16 kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa. ZAE klassisch erreicht unter Berücksichtigung der TGA einen Wert von 10,85 kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa und ZAE zukünftig von 5,66 kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa.

Da nun auch die TGA in der Gebäudesubstanz berücksichtigt wurde, können die Werte mit dem Referenzwert der BNB verglichen werden. Dieser liegt für die Konstruktion bei 12,5 kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup> NGFa. [8] Somit liegen alle drei Gebäudevarianten unter dem festgelegten Wert der BNB.

Die Durchführung der vergleichenden Ökobilanz der Varianten lässt schlussendlich feststellen, welche baulichen Maßnahmen und Entscheidungen eine deutliche Verbesserung der Ökobilanzwerte ermöglichen. Wie in Abbildung 48 auffällt, kommen die größten Veränderungen beziehungsweise Verbesserungen in der Ökobilanzierung der Varianten in Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte von Laborgebäuden



den Bereichen der Gründung, der Außenwände, der Decken und der Dächer auf. Aus diesem Ergebnis ergeben sich ganz klare Optimierungspotenziale für Laborgebäude.

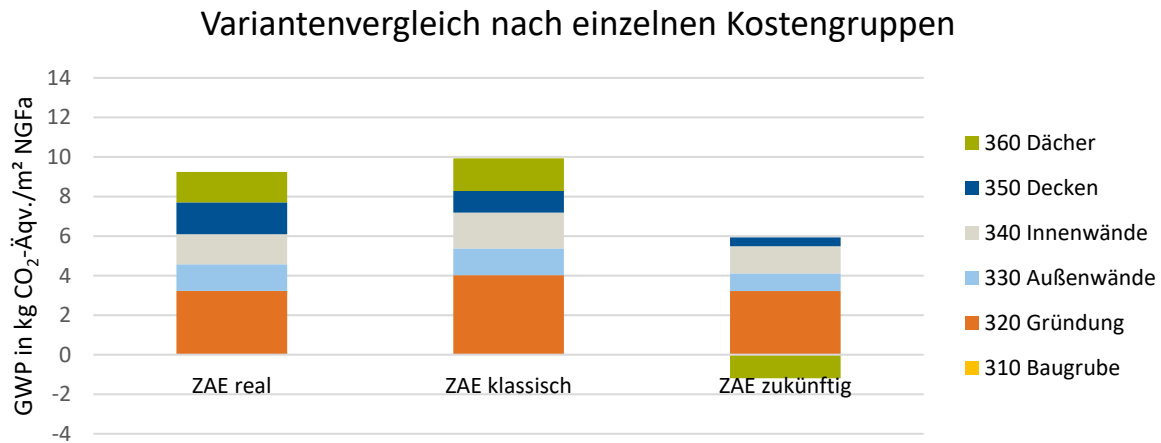


Abb. 48 Variantenvergleich nach einzelnen Kostengruppen (Eigene Darstellung)

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Verwendung von ökologischen, nachwachsenden Materialien stets zu besseren Ökobilanzergebnissen über den Lebenszyklus eines Gebäudes führt. Falls der Einsatz ökologischer Materialien nicht möglich ist, beispielsweise auf Grund der strengen Brandschutzbestimmungen für Laborgebäude, so kann empfohlen werden, Materialien zu verwenden, die gute GWP-Werte in der Phase ihrer Entsorgung aufweisen. Ein Beispiel dafür wäre Aluminium: Dem Material kommt in der Phase seiner Entsorgung, infolge des Recyclingpotenzials, ein negativer Wert zu, der sich insgesamt positiv auf die Ökobilanz auswirkt.

Eine bedeutende Schlussfolgerung aus den Ergebnissen der Ökobilanz ist es, eine Trennung von Büro- und Laborräumen in Laborbauten vorzusehen, da sich diese sehr positiv auf die Ökobilanz auswirkt. Durch die Entkoppelung der beiden Bereiche lassen sich Differenzierungen in Bezug auf die Materialwahl, den Brandschutz, aber auch die Raumhöhe vornehmen. ZAE zukünftig erreicht beispielsweise durch den unterschiedlichen Materialeinsatz im Erd- und Obergeschoss seine herausragenden Werte. Der Laborbereich im Erdgeschoss kann in Massivbauweise vorgesehen werden, das Obergeschoss des Gebäudes, das auf Grund der ausschließlichen Nutzung als Bürofläche keine speziellen Anforderungen an den Brandschutz erfüllen muss, kann vollständig in Holzbauweise errichtet werden. Die durch die Trennung der beiden Funktionsbereiche entstehenden, aber meist nicht erwünschten längeren Wege für das im Gebäude arbeitende Personal, können zwar als nachteilig beurteilt werden, jedoch bei einer umfassenden Betrachtung wird dieser Nachteil durch den in der Lebenszyklusanalyse erzielten Vorteil ohne Zweifel aufgewogen.

Zudem kann festgehalten werden, dass in der Planung von Laborgebäuden stets darauf geachtet werden muss, Aufbauten effizient zu entwerfen. Zum Beispiel führen zu dicke Wandaufbauten schnell zu beträchtlichen Unterschieden in den Ökobilanzergebnissen, ohne dabei jeglichen Mehrwert für das Gebäude zu generieren. Hier gilt es in einer gewissenhaften und auf Funktionalität ausgerichteten Planung, den Einbau unnötiger Bauteile zu vermeiden und auf die sortenreine Trennung der Materialien zu achten.

Durch die Umsetzung innovativer Konzepte, wie beispielsweise der Membrandachkonstruktion des ZAE real, kommt es nur zu geringen Steigerungen des GWP-Wertes im Laufe des Lebenszyklus eines Gebäudes. Die dadurch entstehende Vielzahl an Vorteilen wiegt jedoch die geringfügige Steigerung des GWP-Wertes deutlich auf: Zum Beispiel wird durch den Einsatz leichter Materialien die Masse eines Gebäudes verringert, was sich in der Ökobilanz in besseren Ergebnissen niederschlägt. So erreicht ZAE klassisch beispielweise eine Gesamtmasse von 8.000 t, die rund 2.500 kg/m<sup>2</sup> NGF entspricht, was der höchsten Masse und dem höchsten Wert der drei Gebäudevarianten entspricht. Die Gesamtmasse von ZAE real beläuft sich auf circa 7.000 t, was einem Wert von 2.200 kg/m<sup>2</sup> NGF entspricht. ZAE zukünftig weist mit 6.900 t die geringste Masse auf und erreicht mit einem Gewicht von 2.100 kg/m<sup>2</sup> NGF das beste Ergebnis in der Ökobilanzierung. Außerdem schafft der Einsatz von Membranen einen enormen Mehrwert in Bezug auf das Innenraumklima, das Arbeitsklima sowie die Nutzung des Tageslichtes. Dieser Mehrwert wird in der Ökobilanzierung zwar nicht erfasst, er trägt jedoch neben dem Anspruch des experimentellen Einsatzes neuartiger Materialien mit zur Rechtfertigung des geringfügig höheren GWP-Wertes bei.

Zusammenfassend lässt sich durch die Identifizierung verschiedener Optimierungsmaßnahmen festhalten, dass die Materialwahl einen großen Einfluss auf das Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebenszyklus von hochtechnisierten Laborgebäuden hat. Sie kann daher als bedeutende Stellschraube für die Nutzung von Optimierungspotenzialen der Bausubstanz bei Ökobilanzwerten von Laborbauten ausgemacht werden. Die Wahl nachwachsender Materialien und nachhaltiger Bauweisen beim Bau von Laborgebäuden verringert die graue Energie und das Treibhausgaspotenzial maßgeblich. Berücksichtigt man diese Erkenntnis in Zukunft vermehrt, so können nachhaltigere Laborgebäude entstehen, die im Gegensatz zur derzeitigen Praxis nicht nur Optimierungsmaßnahmen in der Phase des Betriebs und damit vor allem des Technikeinsatzes achten, sondern den gesamten Lebenszyklus von Laborgebäuden, von der Herstellung bis zur Entsorgung, berücksichtigen und optimieren.

## 7 Fazit und Ausblick

Nach Abschluss der Ökobilanzierung des real existierenden Gebäudes des ZAE in Würzburg und der beiden hypothetisch angenommenen Gebäudevarianten lassen sich einige grundsätzliche Erkenntnisse über das Optimierungspotenzial von Laborgebäuden festhalten.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen und Vergleiche machen deutlich, dass es für die Kategorie der Laborgebäude durchaus Sinn macht, den gesamten Lebenszyklus dieser Gebäudekategorie in den Blick zu nehmen, wenn es darum geht, Nachhaltigkeit zu erhöhen sowie Energieverbrauch und Treibhausgaspotenzial zu senken. Auf Grund des hohen Technisierungsgrades von Laborbauten und dem damit einhergehenden hohen Energieverbrauch in der Nutzungsphase wurde bislang in der Überzeugung, dass in diesem Abschnitt des Lebenszyklus von Laborbauten die größten Optimierungspotenziale bestehen, fast ausschließlich auf diese Phase geachtet. Die für den Bau und Rückbau in allen drei Gebäudevarianten errechneten Werte sind erwartungsgemäß deutlich niedriger als die für die Betriebsphase gegebenen Werte. Die Emissionswerte in den Phasen für Bau und Rückbau liegen bei den drei Varianten des ZAE in der Spanne von 8 % bis 15 % der gesamten Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus. Die Werte für die Phase des Betriebes liegen zwischen 85 % und 92 %. Auf den ersten Blick mag der Anteil für Bau und Rückbau niedrig erscheinen, betrachtet man jedoch die effektiven Werte, so ist der für die Bausubstanz notwendige Anteil doch beachtlich.

Als Schlussfolgerung kann also festgehalten werden, dass die Betrachtung der Energiewerte und des Treibhausgaspotenzials während des gesamten Lebenszykluses von Laborbauten sinnvoll erscheint. Die Optimierung aller Phasen ist sicherlich der erfolgreichste Weg zu nachhaltigen, zukunftsfähigen Laborgebäuden. Verbesserungsmaßnahmen nur in gewissen Bereichen reichen nicht aus, um ein in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial optimiertes Gebäude zu erhalten.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Analyse ist, dass es bei der Planung von Laborbauten sehr gut zu überlegen gilt, wie die verschiedenen Funktionsbereiche in einem Labor verteilt werden. Im ersten Teil dieser Arbeit wurden verschiedene Grundrissmodelle für Labore auch unter dem Gesichtspunkt ihrer historischen Entwicklung vorgestellt. Bei rezenten Laborbauten zeichnet sich eine deutliche Tendenz zur Anordnung verschiedener Funktionsbereiche in unmittelbarer Nähe ab. Dadurch rücken Bereiche für die Durchführung von Versuchen, Büros und Kommunikationsräume eng zusammen und werden zum Beispiel auf ein und demselben Stockwerk untergebracht. Die Ergebnisse der Analyse zeigen jedoch,

dass gerade diese Tendenz im Laborbau die Optimierung in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial erschwert. Werden die verschiedenen Funktionsbereiche vermischt, so müssen die strengen Brandschutzbestimmungen für alle Funktionsbereiche eingehalten werden, auch wenn sie nicht für alle Bereiche erforderlich wären. Eine Entkoppelung von Forschungsräumen sowie Büro- und Kommunikationsbereichen lässt es zu, dass für die letztgenannte Kategorie deutlich niedrigere Ansprüche für den Brandschutz angewandt werden können. Aus diesem Grund können für diese Räume Materialien Einsatz finden, die eine deutliche Verbesserung der Ökobilanz des Gesamtgebäudes erbringen.

Will man dieses Optimierungspotenzial in zukünftigen Laborbauten nutzen, so gilt es eine intelligente Planung in enger Abstimmung mit den Nutzern der Labors durchzuführen, um den Anspruch der Energieeffizienz und der Reduktion des Treibhausgaspotenzials mit der Erwartung des Personals in Hinsicht auf ein funktionales und die Arbeitsprozesse gut unterstützendes Gebäude zu vereinen.

Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die Werte in den Ökobilanzen der drei Gebäudevarianten deutlich von den eingesetzten Materialien beeinflusst werden. Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen im Gebäudesektor mindert den Treibhausgasausstoß in den Phasen der Herstellung und des Rückbaus erheblich und führt damit zu Gebäuden, die über ihren gesamten Lebenszyklus weniger „graue Energie“ aufweisen.

Die Baustoffauswahl wird durch die zunehmende Bedeutung von Ökobilanzierungen im Gebäudesektor künftig immer wichtiger werden und damit das Bewusstsein von Bauherren verändern. Gebäude, die gute Ökobilanzen aufweisen, bieten Vorteile in der Vermarktung, die sich in höheren Kaufpreisen und Mieteinnahmen niederschlagen, und im Betrieb von Gebäuden, da sie mit geringeren Kosten für Besitzer und Mieter verbunden sind. Aus diesem Grund wird die Akzeptanz von Ökobilanzierungen und die Nachfrage nach Zertifizierungen zunehmen und das Bewusstsein für Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit in der Bevölkerung insgesamt steigen. Als Folge wird der Gebäudesektor vermehrt an der Ausschöpfung von Optimierungspotenzialen interessiert sein und damit sowohl die Materialwahl, als auch die Betrachtung des gesamten Lebenszykluses von Gebäuden mit in die Planungsentscheidungen einbeziehen.

Als weiterer Faktor, der in enger Verbindung mit dem Treibhausgaspotenzial steht, hat sich die Masse eines Gebäudes erwiesen. Der Vergleich der drei Varianten des ZAE hat ergeben, dass das Gebäude mit der geringsten Masse auch den geringsten GWP-Wert erzielt. Das Gebäude mit der höchsten Masse weist den höchsten Wert auf. Da die Masse

von Gebäuden in unmittelbarem Zusammenhang mit den eingesetzten Materialien steht, lässt sich folgern, dass Laborgebäude in Zukunft vermehrt in Leichtbauweise konstruiert werden sollten, da diese Bauweise deutlich geringere Massen als herkömmliche Bauweisen erzielt.

Ein Paradebeispiel für diese Empfehlung stellen die Membranen dar, die im ZAE real verbaut sind. Es handelt sich um sehr zukunftsfähige Materialien, die keine großen Tragwerke oder Tragstrukturen benötigen. Die Herstellung solcher Membranen braucht jedoch, im Verhältnis zu ihrer sehr geringen Masse, relativ hohe Energiemengen und verursacht gleichzeitig schädliche Treibhausgase. Die Expertenmeinungen zu Membranen gehen demzufolge auseinander: Einerseits werden Membranen zu Kunststoffen gezählt, die wegen ihrer langen Abbauzeiten als eher umweltschädlich gelten. Doch andererseits kann durch Konzepte, die das Material effizient nutzen, eine bedeutende Ressourcen- und Energieeinsparung erreicht und damit die Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus insgesamt verbessert werden. [11] Zu beachten ist in diesem Zusammenhang jedoch auch, dass die strengen Anforderungen an den Brandschutz von Laborgebäuden den Gebrauch von leichten Bauweisen in der Realität jedoch meist stark einschränken. Durch Umsetzung kluger Konzepte, die zumindest eine teilweise Trennung von Labor- und Büroräumen ermöglichen, kann ein Einsatz von Materialien erfolgen, der beachtliche Verbesserungen der Ökobilanzwerte von Laborgebäuden erlauben.

Zum Abschluss kann festgehalten werden, dass im Bereich der Laborarchitektur große Optimierungspotenziale für Ökobilanzwerte gegeben sind. Um sie ausschöpfen zu können, gilt es alle Lebenszyklusphasen zu berücksichtigen und Verbesserungspotenziale über die Betriebsphase hinaus zu nutzen. Der Anteil der „grauen Energie“ in der Bau- und Rückbauphase darf nicht vernachlässigt werden, denn auch er birgt große Optimierungspotenziale in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial. Die in der Arbeit hypothetisch angenommene und bilanzierte Variante des ZAE zukünftig kann als Vorbild für künftige Laborneubauten dienen, denn durch die umweltbewusste, nach Nutzungsbereichen differenzierte Baustoffwahl und die Berücksichtigung aller Gebäude-Lebensphasen in der Ökobilanzierung, entstand ein in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial optimiertes Baukonzept, das hervorragende Ökobilanzwerte aufweist.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Alchimistenküche. Zugriff am 05.05.2016  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Pieter\\_Bruegel\\_the\\_Elder\\_-\\_The\\_Alchemist.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Pieter_Bruegel_the_Elder_-_The_Alchemist.JPG)
- [2] BAUER, Michael; MÖSLE, Peter; SCHWARZ, Michael (Hrsg.): *Green Building. Leitfaden für nachhaltiges Bauen*. Springer Vieweg, Berlin, 2013
- [3] Baunetz Wissen Brandschutz. Labore. Zugriff am 17.05.2016  
[http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Brandschutz-Brandschutz-in-Laboren\\_4714244.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Brandschutz-Brandschutz-in-Laboren_4714244.html)
- [4] Biologische Sicherheitsstufe. Zugriff am 17.05.2016  
[http://www.chemie.de/lexikon/Biologische\\_Sicherheitsstufe.html](http://www.chemie.de/lexikon/Biologische_Sicherheitsstufe.html)
- [5] BRAUN, Hardo: Das Laboratorium im Forschungsbau: Grundzüge und Entwicklungslinien. In: BRAUN, Hardo; GRÖMLING, Dieter (Hrsg.): *Entwurfsatlas Forschungs- und Technologiebau*. Birkhäuser - Verlag für Architektur, Basel, 2005, S. 32–35
- [6] BREEAM - Logo. Zugriff am 29.05.2016  
<http://www.breeam.com/projects/img/logo-breeam.png>
- [7] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS): *Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 526 - Laboratorien)*. Fassung: GMBI S. 295-314 (Nr. 15) vom 02.04.2008
- [8] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Neubau Laborgebäude. Zugriff am 29.09.2016  
[https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB\\_Steckbriefe\\_Laborgebaeude/v\\_LN2013-4/BNB\\_LN2013-4\\_111.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Laborgebaeude/v_LN2013-4/BNB_LN2013-4_111.pdf)
- [9] Bundesrechtsverordnung: *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Anlage 2: Anforderungen an Nichtwohngebäude (Energieeinsparverordnung EnEV)*. Fassung: 16.11.2001, letzte Änderungen durch Art. 3 VO vom 24.10.2015
- [10] CORDES, Silke; HOLZKAMM, Ingo: *Forschungszentren und Laborgebäude. Organisation, bauliche Konzeption und Ressourcenplanung für Forschungsgebäude der Biowissenschaften, Chemie und Nanotechnologie*. HIS Hochschul-Informations-System GmbH, Hannover, 2007
- [11] CREMERS, Jan: *Environmental impact of mebrane and foil materials and structures. Status quo and future outlook, 2014*
- [12] Das DGNB Zertifizierungssystem - Einzigartig flexibel. Zugriff am 23.05.2016  
<http://www.dgnb-system.de/de/system/zertifizierungssystem/>

- [13] Deutsches Institut für Normung: *Kosten im Bauwesen - Teil 1: Hochbau (DIN 276-1)*.  
Fassung: 12.2008
- [14] Deutsches Institut für Normung: *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte (DIN EN 15804)*. Fassung: 2012
- [15] Deutsches Institut für Normung: *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (DIN EN ISO 14044)*. Fassung: 10.2006
- [16] Deutsches Institut für Normung: *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (DIN EN ISO 14040)*. Fassung: 10.2006
- [17] DGNB - Logo. Zugriff am 29.05.2016  
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/thumb/6/60/DGNB-Logo.svg/2000px-DGNB-Logo.svg.png>
- [18] DGUV - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: *Sicheres Arbeiten in Laboratorien. Grundlagen und Handlungshilfen (BGR 120)*, 2015
- [19] DITTRICH, Egbert: *Handbuch für nachhaltige Laboratorien*. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin, 2012
- [20] DORSCH, Lutz; JUNG, Ulrich (Hrsg.): *Kursbuch: Von der Energieeffizienz zur Nachhaltigkeit*. Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln, 2012
- [21] Ein Auto fährt pro Jahr im Schnitt rund 14.000 Kilometer. Zugriff am 14.09.2016  
[http://www.t-online.de/auto/news/id\\_74583174/so-viele-kilometer-faehrt-ein-auto-im-durchschnitt.html](http://www.t-online.de/auto/news/id_74583174/so-viele-kilometer-faehrt-ein-auto-im-durchschnitt.html)
- [22] Energy Efficiency Center Würzburg. Zugriff am 30.05.2016  
<http://www.energy-efficiency-center.de/de/Home>
- [23] GRÖMLING, Dieter: Die Planungsparameter Standort, Nutzung und Typus. In: BRAUN, Haro; GRÖMLING, Dieter (Hrsg.): *Entwurfsatlas Forschungs- und Technologiebau*. Birkhäuser - Verlag für Architektur, Basel, 2005, S. 36–52
- [24] GRÖMLING, Dieter: Typologie von Forschungsbauten. In: *Detail* 50. Jg. (2010), Nr. 9, S. 866–875
- [25] HARTWIG, Joost: Nachhaltigkeitszertifizierung. In: *Nachhaltiges Bauen. Zertifizieren in Neubau und Bestand* (2012), Nr. 01+02, S. 10–11
- [26] HAUSER, Gerd; EßIG, Natalie; EBERT, Thilo: *Zertifizierungssysteme für Gebäude. Nachhaltigkeit bewerten - Internationaler Systemvergleich - Zertifizierung und Ökonomie*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, Berlin/München, 2010

- [27] HEGGER, Manfred: Räumliche und technische Anforderungen an Forschungsbauten. In: BRAUN, Hardo; GRÖMLING, Dieter (Hrsg.): *Entwurfsatlas Forschungs- und Technologiebau*. Birkhäuser - Verlag für Architektur, Basel, 2005, S. 28–31
- [28] Hoher Energieverbrauch des Gebäudesektors. Zugriff am 23.05.2016  
<https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2014/22/Meldung/hoher-energieverbrauch-des-gebaeudesektor.html>
- [29] JAEGER, Hans-U.: Luft. In: BRAUN, Hardo; GRÖMLING, Dieter (Hrsg.): *Entwurfsatlas Forschungs- und Technologiebau*. Birkhäuser - Verlag für Architektur, Basel, 2005, S. 60–62
- [30] Kersken und Kirchner GmbH München: Brandschutznachweis für das ZAE in Würzburg, 2011
- [31] KlingStubbins: *Sustainable Design of Research Laboratories. Planning, Design, and Operation*. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J., 2010
- [32] KLÖPPFER, Walter; GRAHL, Birgit (Hrsg.): *Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. WILEY-VCH, Weinheim, 2009
- [33] KÖHT, Anke: Universitäten bauen - Ein geschichtlicher Überblick. In: *Detail* 50. Jg. (2010), Nr. 9, S. 844–850
- [34] KÖNIG, Holger; KOHLER, Niklaus; KREIßIG, Johannes; LÜTZKENDORF, Thomas (Hrsg.): *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung. Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2009
- [35] KUCHENBECKER, Gerd: *Ein Labor für morgen. Entwicklung eines wandlungsfähigen Labors und seine Planungsmethodik*. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2008
- [36] Kurzinfo Klimaschutz. Zugriff am 27.05.2016  
<http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/kurzinfo/>
- [37] Labore im 21. Jahrhundert. Der Weg zum Green Campus. Zugriff am 29.05.2016  
[https://www.mdc-berlin.de/38254398/de/about\\_the\\_mdc/science\\_and\\_society/green\\_campus/Green\\_Campus\\_dt.pdf](https://www.mdc-berlin.de/38254398/de/about_the_mdc/science_and_society/green_campus/Green_Campus_dt.pdf)
- [38] LangHuggerRampp GmbH München: Ausführungsplanung für das ZAE in Würzburg, 2012
- [39] LAUPICHLER, Andrea; WEITZEL, Johannes: Zertifizierung von Laborgebäuden. In: *Nachhaltiges Bauen. Zertifizieren in Neubau und Bestand* (2012), Nr. 01+02, S. 36–39
- [40] LEED - Logo. Zugriff am 29.05.2016  
[http://www.hoinka.com/wordpress/wp-content/uploads/USGBC\\_kl.jpg](http://www.hoinka.com/wordpress/wp-content/uploads/USGBC_kl.jpg)



- [41] LEMAITRE, Christine (Hrsg.): *Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude. DGNB Handbuch für nachhaltiges Bauen ; Version 2012*. Kohlhammer, Stuttgart, 2012
- [42] NEUFERT, Ernst; KISTER, Johannes: *Bauentwurfslehre*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 1992
- [43] Petra Hoeglmeier Photography. ZAE in Würzburg. Zugriff am 25.07.2016  
<http://petrahoeglmeier.com/?works=zae-wuerzburg>

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Alchimistenküche [1] .....	9
Abb. 2 Funktionsbereiche eines Laborgebäudes [10, S. 36] (Eigene Darstellung) .....	14
Abb. 3 Zweibund [10, S. 30] (Eigene Darstellung) .....	16
Abb. 4 Dreibund [10, S. 30] (Eigene Darstellung) .....	16
Abb. 5 Sonderform [10, S. 30] (Eigene Darstellung) .....	16
Abb. 6 Mindestbreiten in Laboren [10, S. 36] (Eigene Darstellung) .....	17
Abb. 7 Erforderliche Geschosshöhe für Laboratorien mit Abzug [10, S. 20] (Eigene Darstellung) .....	18
Abb. 8 Schachtkonzepte [23, S. 44] (Eigene Darstellung) .....	20
Abb. 9 BREEAM - Logo [6].....	31
Abb. 10 LEED - Logo [40] .....	32
Abb. 11 DGNB - Logo [17] .....	33
Abb. 12 ZAE in Würzburg [43].....	36
Abb. 13 Lageplan ZAE Würzburg [38].....	37
Abb. 14 Grundriss Erdgeschoss [38] (Eigene Darstellung) .....	39
Abb. 15 Grundriss Obergeschoss [38] (Eigene Darstellung) .....	39
Abb. 16 Schnitt Haustechnik [38] .....	43
Abb. 17 ZAE real (Eigene Darstellung) .....	46
Abb. 18 ZAE klassisch (Eigene Darstellung).....	47
Abb. 19 ZAE zukünftig (Eigene Darstellung).....	48
Abb. 20 Lebenszyklus eines Gebäudes (Eigene Darstellung) .....	50
Abb. 21 Rahmen einer Ökobilanz nach ISO 14040 [16] (Eigene Darstellung).....	51
Abb. 22 Grafische Darstellung Systemgrenze (Eigene Darstellung).....	55
Abb. 23 Kostengruppe 320: Gründung Info Center, Veranstaltungsraum, Foyer ZAE real (Eigene Darstellung).....	56

Abb. 24 Kostengruppe 330: Tragende Außenwand Stahlbeton ZAE real (Eigene Darstellung).....	57
Abb. 25 Phasen Lebenszyklus [14] (Eigene Darstellung) .....	58
Abb. 26 Erwartete Ergebnisse Ökobilanz (Eigene Darstellung) .....	61
Abb. 27 ZAE real – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt (Eigene Darstellung) .....	62
Abb. 28 ZAE real – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung) .....	63
Abb. 29 ZAE real – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung).....	63
Abb. 30 ZAE real – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung) .....	64
Abb. 31 ZAE klassisch – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt (Eigene Darstellung) .	65
Abb. 32 ZAE klassisch – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung) .....	66
Abb. 33 ZAE klassisch – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung) .....	66
Abb. 34 ZAE klassisch – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung).....	67
Abb. 35 ZAE zukünftig – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt (Eigene Darstellung) .	68
Abb. 36 ZAE zukünftig – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung) .....	68
Abb. 37 ZAE zukünftig – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung) .....	69
Abb. 38 ZAE zukünftig – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung) .....	70
Abb. 39 Variantenvergleich – Kostengruppe 310 Baugrube (Eigene Darstellung) .....	71
Abb. 40 Variantenvergleich – Kostengruppe 320 Gründung (Eigene Darstellung) .....	72
Abb. 41 Variantenvergleich – Kostengruppe 330 Außenwände (Eigene Darstellung).....	73
Abb. 42 Variantenvergleich – Kostengruppe 340 Innenwände (Eigene Darstellung) .....	74
Abb. 43 Variantenvergleich – Kostengruppe 350 Decken (Eigene Darstellung).....	75
Abb. 44 Variantenvergleich – Kostengruppe 360 Dächer (Eigene Darstellung) .....	76
Abb. 45 Emissionen während des Lebenszyklus der drei Gebäudevarianten (Eigene Darstellung).....	77
Abb. 46 Emissionen während des Lebenszyklus von ZAE real (Eigene Darstellung) .....	78
Abb. 47 Variantenvergleich – Kostengruppe 300 Baukonstruktion gesamt – Optimierungspotenzial in % angegeben (Eigene Darstellung) .....	80
Abb. 48 Variantenvergleich nach einzelnen Kostengruppen (Eigene Darstellung) .....	81

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Bauliche Unterschiede und Gemeinsamkeiten der drei Gebäudevarianten .....	49
Tabelle 2 Ergebnisse Gründung Info Center, Veranstaltungsraum, Foyer ZAE real.....	57
Tabelle 3 Ergebnisse Tragende Außenwand Stahlbeton ZAE real.....	57
Tabelle 4 Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/m <sup>2</sup> a .....	59
Tabelle 5 Ergebnisse Baukonstruktion gesamt ZAE real .....	65
Tabelle 6 Ergebnisse Baukonstruktion gesamt ZAE klassisch .....	67
Tabelle 7 Ergebnisse Baukonstruktion gesamt ZAE zukünftig.....	70
Tabelle 8 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 320 Gründung in kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa .....	72
Tabelle 9 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 330 Außenwände in kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa .....	74
Tabelle 10 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 340 Innenwände in kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa .....	74
Tabelle 11 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 350 Decken in kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa .....	75
Tabelle 12 Ergebnisse Variantenvergleich – Kostengruppe 360 Dächer in kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa .....	77
Tabelle 13 Ergebnisse Emissionen während des Lebenszyklus der drei Gebäudevarianten in kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa .....	78
Tabelle 14 Ergebnisse Variantenvergleich – Baukonstruktion gesamt in kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> NGFa .....	79

## 11 Anhang

Abb. A.1: Gebäudetechnisches Konzept und Innovationen .....	94
Abb. A.2: EnEV 2009, Anlage 2 (Anforderungen an Nichtwohngebäude), Tabelle 2 .....	98
Abb. A.3: Auszug aus dem Brandschutznachweis für das ZAE in Würzburg .....	98
Abb. A.4: Kostengruppen nach DIN 276-1 .....	99
Abb. A.5: Umweltproduktdeklaration Aerogel .....	100
Abb. A.6: Umweltproduktdeklaration Vakuumisulationspaneel .....	101
Abb. A.7: Umweltproduktdeklaration ETFE-Folie .....	101
Abb. A.8: Energieausweis des ZAE in Würzburg – Jährlicher Endenergiebedarf .....	102
Abb. A.9: Variantenvergleich – 320 Gründung mit Untergruppen .....	103
Abb. A.10: Variantenvergleich – 330 Außenwände mit Untergruppen .....	103
Abb. A.11: Variantenvergleich – 340 Innenwände mit Untergruppen .....	103
Abb. A.12: Variantenvergleich – 350 Decken mit Untergruppen .....	104
Abb. A.13: Variantenvergleich – 360 Dächer mit Untergruppen .....	104

## **Abb. A.1:** Gebäudetechnisches Konzept und Innovationen

### **Energieversorgung und Wärmeversorgungsanlagen**

Den Kern der energetischen Versorgung des ZAE Gebäudes stellt die Nutzung von **Fernwärme** zum Heizen, zur Warmwasserversorgung und zur Gebäudekühlung mittels offener Sorptionskältetechnik dar. Diese wird durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt und besitzt laut regionalem Energieversorger einen Primärenergiefaktor von 0,5. Die Wärmeerzeugungsanlage muss die Beheizung des Gebäudes über statische Heizflächen, die Versorgung des Heizregisters der raumluftechnischen Anlagen sowie die Warmwasserbereitung in Stillstandzeiten der solarthermischen Anlage garantieren. [22, Menüpunkt: Gebäudekonzept] Durch den Einsatz einer Folienabdeckung anstelle einer Glasabdeckung kann der Kollektorwirkungsgrad der thermischen Solarkollektoren erheblich gesteigert werden und die Anlage insgesamt deutlich effizienter werden. [22, Menüpunkt: Innovationen]

Der Wärmebedarf wird über Heiz- beziehungsweise Kühldecken, Ventilheizkörper und Röhrenradiatoren sowie Fußbodenheizung oder –kühlung gedeckt. In den Räumlichkeiten des Obergeschosses kommt ein neuartiges System zum Einsatz, das Heiz- und Kühldecken mit Phase Change Material (PCM) kombiniert. Die Räume können einzeln geregelt werden und somit das Be- und Entladen des PCMs vorausschauend steuern. In den restlichen zu beheizenden Räumen befinden sich Raumheizflächen in Form von Ventilheizkörpern oder Röhrenradiatoren. Das System der Fußbodenheizung beziehungsweise –kühlung kommt im Eingangsbereich, dem Foyer, dem Infocenter und dem Veranstaltungsraum vor. Jeder Raum ist dabei einzeln regulierbar.

### **Kältetechnische Anlagen**

Das ZAE besitzt zwei Systeme zur Kälteerzeugung: Die Passive Infrarot Nachtkühlungsanlage (Passive Infrared Night Cooling → PINC) und eine konventionelle Kältemaschine. Die beiden Systeme sind miteinander gekoppelt und greifen auf einen 100 m<sup>3</sup> großen Löschwassertank zu, dessen Wasser als Speicher der erzeugten Kälte dient.

Die **passive Infrarot Nachtkühlungsanlage mit Pufferspeicher (PINC)** erzeugt Kälte durch den Wärmestrahlungsaustausch mit dem kühlen Nachthimmel. Die Abwärme aus den Laboren wird über einen Wärmetauscher in eine Regenwasserzisterne geleitet. Zur Rückkühlung wird das Regenwasser auf die blechbedeckte Massivdachfläche über dem Technikbereich geleitet und aufgrund der Strahlungskühlung kühlt das Medium ab und wird wieder in die Zisterne zurückgeführt. Da das Wasser frei über die Dachfläche fließt, wird das

System als hydraulisch offen bezeichnet. Es handelt sich um einen innovativen und energieeffizienten Ansatz zur Kühlung, der besonders in Laborgebäuden, wo hohe Wärmelasten bewältigt werden müssen, Sinn macht. Je höher die Fluidtemperatur ist, desto effizienter ist die natürliche Rückkühlung auf dem Dach.

Außerdem wird im ZAE Kälte durch eine **Kältemaschine** erzeugt. Diese konventionelle Methode der Kälteerzeugung erfolgt in der Nacht. Dadurch wird der COP-Wert (Coefficient of Performance) der Anlage verbessert und die freie Kühlung kann deutlich länger in Betrieb sein. In einem der beiden vorhandenen Löschwassertanks wird das erzeugte Kaltwasser zwischengespeichert. Die Deckung des Kältebedarfs wird über wassergeführte Systeme, Umluftkühlung oder über die Raumlüftung sichergestellt.

In den Technik- und Laborräumen kommen Umluftkühlgeräte (ULK) zum Einsatz. Im Eingangsbereich, dem Foyer, dem Infocenter und dem Veranstaltungsraum wird, wie schon zuvor erwähnt, die Fußbodenheizung beziehungsweise –kühlung angewandt.

Da das ZAE in einer sehr leichten Bauweise konstruiert wurde, sind passive Kühlmaßnahmen, wie zum Beispiel Nachtlüftung, ohne zusätzliche Speichermasse nicht ausreichend einsetzbar. Außerdem kommt es angesichts der teilweise transluzenten Außenhülle zu erhöhten Wärmeeinträgen. Folglich kommt es in den Übergangszeiten zu kurzzeitigen Wechseln von Heiz- und Kühlbedarf und im Sommer oft zu erhöhten Temperaturen im Innenraum. Phasenwechselmaterialien (PCM) ermöglichen, ohne zusätzlichen konventionellen Kühlungsaufwand, die Pufferung von Temperaturspitzen durch die zusätzliche thermische Masse beim Phasenübergang. Durch den Einsatz kombinierter Heiz- und Kühldecken mit Latentwärmespeichermaterialien gelang es, behagliche Temperaturen in den Innenräumen zu gewährleisten. In den Sommermonaten reicht die Pufferung von Temperaturspitzen alleine nicht aus: Nachtkühlung und die Koppelung des PCM an die Kühldecke führen zu deutlichen Verbesserungen. Durch die Koppelung des PCM an die Kühldecke, kann die Kälte aus der PINC Anlage genutzt werden. Zudem wird durch den Anschluss an ein aktives Kühlsystem sichergestellt, dass das PCM sich auch im Hochsommer, bei hohen nächtlichen Temperaturen, entlädt.

### **Raumluftechnische Anlagen**

In Bezug auf die raumluftechnischen Anlagen sind drei unterschiedliche Systeme vorhanden, da je nach Nutzung bestimmte Vorgaben zur Be- und Entlüftung eingehalten werden sollen:

System 1 (Experimentierstatus)	Sorptive Luftentfeuchtung, Kühlung und Energiespeicherung (Liquid Desiccant Cooling Systems → L-DCS)
System 2	Sorptionsgestützte Klimatisierung (Desiccant Cooling System → DEC) mit Sorptionsrad
System 3	Absauganlage für Messräume oder Labore. [22, Menüpunkt: Gebäudekonzept]

Da sich das L-DCS System beim Bau des ZAE in einer Experimentierphase befand, musste zur Sicherheit ein zweites, erprobtes und innovatives System, das sogenannte DEC System, vorgesehen werden.

Die Büroflächen im Obergeschoss sowie das Technikum im Erdgeschoss werden über das am ZAE entwickelte **L-DCS Zentrallüftungsgerät** mit frischer Außenluft versorgt. Die Anlage kann je nach Bedarf gesteuert werden und bezieht sich dabei insbesondere auf die vorherrschende Außentemperatur.

Die **DEC-Anlage** versorgt die Räume im Erdgeschoss und die Sanitärräume im Obergeschoss. Auch diese Anlage kann bedarfsabhängig geregelt werden, wobei die Einflussfaktoren hier die Luftqualität und die Lufttemperatur sind.

In Laboratorien und Messräumen sind **Absauganlagen** notwendig, um den erforderlichen Luftwechsel zu gewährleisten. Dafür sind Ventilatoren notwendig, die auf dem Dach des Gebäudes platziert sind. Die im Raum erfasste Luft wird hierbei über das Dach aus dem Gebäude befördert.

### **Elektrotechnische Anlagen**

Das Gebäude besitzt eine außenliegende Trafostation und wird über einen Niederspannungshausanschluss versorgt. Wichtig bei der Planung war das Thema Beleuchtung, da durch effiziente Konzepte deutliche Einsparungen in diesem Bereich zu erreichen sind. Aus diesem Grund gibt es im Forschungsgebäude moderne Lichtmanagementsysteme mit Präsenzmeldern und tageslichtabhängige Beleuchtungssteuerung in den Büros. Auch durch die transluzente Gebäudehülle, die eine optimale Ausnutzung des Tageslichts erlaubt, kann der Energieverbrauch für die Beleuchtung drastisch verringert werden.



### **Gebäudeautomation**

Das Gebäude besitzt für alle Bereiche eine Gebäudeautomation (GA). Dadurch können zum Beispiel Geräte für Heizung, Kühlung oder Lüftung wirksam geregelt und in ihrer Effizienz gesteigert werden. Durch die Möglichkeit der individuellen Einstellbarkeit der verschiedenen Systeme in den einzelnen Räumen ist eine hohe Nutzerakzeptanz gegeben. Höchstes Ziel der Gebäudeautomation ist jedoch, dass ein möglichst wirtschaftlicher Betrieb ermöglicht wird und die Lebenszykluskosten dadurch minimiert werden.

Durch einen von Beginn an integralen Entwurfsprozess und die innovativen gebäudetechnischen Maßnahmen die im ZAE verwirklicht wurden, erlangt das Gebäude einen bemerkenswert niedrigen Primärenergiebedarf von 179 kWh/m<sup>2</sup>a. Damit unterschreitet das Gebäude die Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 für Referenzgebäude um 50 %. [22]

**Abb. A.2:** EnEV 2009, Anlage 2 (Anforderungen an Nichtwohngebäude), Tabelle 2

**Tabelle 2**  
Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der  
wärmeübertragenden Umfassungsfläche von Nichtwohngebäuden

Zeile	Bauteile	Anforderungsniveau	Höchstwerte der nach Nummer 2.3 bestimmten Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten	
			Zonen mit Raum-Solltemperaturen im Heizfall $\geq 19\text{ °C}$	Zonen mit Raum-Solltemperaturen im Heizfall von $12\text{ bis } < 19\text{ °C}$
1a	Opake Außenbauteile, soweit nicht in Bauteilen der Zeilen 3 und 4 enthalten	nach EnEV 2009 *	$\bar{U} = 0,35\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$\bar{U} = 0,50\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
1b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U} = 0,35\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
1c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U} = 0,28\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
2a	Transparente Außenbauteile, soweit nicht in Bauteilen der Zeilen 3 und 4 enthalten	nach EnEV 2009 *	$\bar{U} = 1,9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$\bar{U} = 2,8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
2b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U} = 1,9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
2c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U} = 1,5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
3a	Vorhangfassade	nach EnEV 2009 *	$\bar{U} = 1,9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$\bar{U} = 3,0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
3b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U} = 1,9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
3c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U} = 1,5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
4a	Glasdächer, Lichtbänder, Lichtkuppeln	nach EnEV 2009 *	$\bar{U} = 3,1\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$\bar{U} = 3,1\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
4b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U} = 3,1\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	
4c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U} = 2,5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	

\* Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 29. April 2009 (BGBl. I S. 954) geändert worden ist.

\*\* § 28 bleibt unberührt.

**Abb. A.3:** Auszug aus dem Brandschutznachweis für das ZAE in Würzburg

### 3.2.3 Decken – BayBO Art. 29

Die Aussagen zur Feuerwiderstandsdauer gemäß 3.1 gelten gleichermaßen für den Raumabschluss der Decke über dem EG. Daher ist für diese zunächst eine feuerhemmende Ausführung ausreichend. Wie bereits beschrieben, sieht die Planung aber eine feuerbeständige Realisierung vor.

### 3.3 Außenwände und Vorbauten – BayBO Art. 26

Bei Gebäuden der Gebäudeklasse 1 und 3 dürfen Oberflächen von Außenwänden einschließlich Dämmstoffe und Unterkonstruktionen normalentflammbar sein; weitergehende Anforderungen bestehen nicht.

**Abb. A.4:** Kostengruppen nach DIN 276-1

- 310 Baugrube
  - 311 Baugrubenherstellung
  - 312 Baugrubenumschließung
  - 313 Wasserhaltung
  - 314 Baugrube, sonstiges
- 320 Gründung
  - 321 Baugrundverbesserung
  - 322 Flachgründungen
  - 323 Tiefgründungen
  - 324 Unterböden und Bodenplatten
  - 325 Bodenbeläge
  - 326 Bauwerksabdichtungen
  - 327 Dränagen
  - 329 Gründungen, sonstiges
- 330 Außenwände
  - 331 Tragende Außenwände
  - 332 Nichttragende Außenwände
  - 333 Außenstützen
  - 334 Außentüren und –fenster
  - 335 Außenwandbekleidungen, innen
  - 336 Außenwandbekleidungen, außen
  - 337 Elementierte Außenwände
  - 338 Sonnenschutz
  - 339 Außenwände, sonstiges
- 340 Innenwände
  - 341 Tragende Innenwände
  - 342 Nichttragende Innenwände
  - 343 Innenstützen
  - 344 Innentüren und –fenster
  - 345 Innenwandbekleidungen
  - 346 Elementierte Innenwände
  - 349 Innenwände, sonstiges
- 350 Decken
  - 351 Deckenkonstruktionen
  - 352 Deckenbeläge
  - 353 Deckenbekleidungen
  - 359 Decken, sonstiges
- 360 Dächer
  - 361 Dachkonstruktionen
  - 362 Dachfenster, Dachöffnungen
  - 363 Dachbeläge
  - 364 Dachbekleidungen
  - 369 Dächer, sonstiges

Abb. A.5: Umweltproduktdeklaration Aerogel

## 5 | LCA (Ökobilanz): Ergebnisse

Beschreibung der Systemgrenze (X = Teil der LCA, MNB = Modul Nicht Bewertet)

Produktstufe			Baustufe		Verwendungsstufe								Endstufe des Lebenszyklus				Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze																	
Rohstofflieferung			Transport		Herstellung		Transport		Bau- / Installationsprozess		Verwendung		Wartung		Reparatur		Ersatz <sup>(1)</sup>		Modernisierung <sup>(1)</sup>		Energieverbrauch im Betrieb		Wasserverbrauch im Betrieb		Rückbau / Demolierung		Transport		Abfallaufbereitung		Entsorgung		Wiederverwendung / Recycling-Potential	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D																		
X	X	X	X	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB	MNB																		

### LCA Ergebnisse für Spaceloft® Weiß/Grau

Umweltauswirkungen

(je 1 m<sup>2</sup> Spaceloft® Weiß/Grau)

Parameter	Einheit	Produktstufe	Baustufe	Verwendungs- stufe	Endstufe des Lebenszyklus	Gesamt
Treibhauspotenzial	kg CO <sub>2</sub> Äq	1.23E+01	1.80E-01	n/z	n/z	1.25E+01

Abb. A.6: Umweltproduktdeklaration Vakuumisulationspaneel

**5. LCA: Ergebnisse**

Nachfolgend sind die Umweltwirkungen und Sachbilanzindikatoren für ein **unkaschiertes Vakuum-Isolations-Paneel** ausgewiesen. Es werden zwei mögliche Entsorgungsszenarien ausgewiesen. Szenario 1, ersichtlich in C3/1, C4/1 und D1, basiert auf einem materiellen Recycling des Stützkerns. Szenario 2 (C3/2, C4/2 und D2) bezieht sich auf die thermische Verwertung der brennbaren Bestandteile des VIP. Die Umweltwirkungen und Sachbilanzindikatoren für die verschiedenen **Kaschierungen** sind dem Anhang zu entnehmen. Eine Formel zur Berechnung der kaschierten Vakuum-Isolations-Paneele ist in Kapitel 6 dargestellt.

**ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT)**

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium								Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohtstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	X	X	X	X	

**ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1 m² VIP mit 25 mm Dicke**

Parameter	Einheit	A1-A3	C2	C3/1	C3/2	C4/1	C4/2	D/1	D/2
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	42,20	0,10	0,37	0,00	0,58	0,64	-40,77	-0,36

Abb. A.7: Umweltproduktdeklaration ETFE-Folie

**5. LCA: Results**

The following table depicts the results of the indicators concerning the estimated impact, use of resources as well as waste and other output flows in relation to 1 m² of Texlon® system.

**DESCRIPTION OF THE SYSTEM BOUNDARY (X = INCLUDED IN LCA; MND = MODULE NOT DECLARED)**

PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE								END OF LIFE STAGE				BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARIES
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to the site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement <sup>1)</sup>	Refurbishment <sup>1)</sup>	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	X	MND	MND	X	X	X	X	

**RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 m² Texlon®-System**

Parameter	Unit	A1-A3	A4	A5	B6	C2	C3/1	C3/2	C4/1	C4/2	D/1	D/2
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Eq.]	4.07E+1	1.83E+1	5.75E-1	1.32E-1	1.05E-1	5.75E-1	0.00E+0	2.52E-1	1.50E+0	-2.46E+1	-1.97E+1

**Abb. A.8:** Energieausweis des ZAE in Würzburg – Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/m<sup>2</sup>a

## ENERGIEAUSWEIS

für Nichtwohngebäude VORLÄUFIG

gemäß den §§ 16 ff. Energieeinsparverordnung (EnEV)

---

### Berechneter Energiebedarf des Gebäudes

Frauenland 42

2

---

### Primärenergiebedarf „Gesamtenergieeffizienz“

CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>1)</sup> 26 [kg/(m<sup>2</sup>·a)]

**Dieses Gebäude**  
94 kWh/(m<sup>2</sup>·a)

0      200      400      600      800      ≥1.080

EnEV-Anforderungswert Neubau      EnEV-Anforderungswert modernisierter Altbau

Anforderungen gemäß EnEV<sup>2)</sup>

**Primärenergiebedarf**

Ist-Wert 94 kWh/(m<sup>2</sup>·a)    Anforderungswert 255 kWh/(m<sup>2</sup>·a)

Mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten     eingehalten

Sommerlicher Wärmeschutz (bei Neubau)     eingehalten

Für Energiebedarfsberechnungen verwendetes Verfahren

Verfahren nach Anlage 2 Nr. 2 EnEV

Verfahren nach Anlage 2 Nr. 3 EnEV („Ein-Zonen-Modell“)

Vereinfachungen nach § 9 Abs. 2 EnEV

---

### Endenergiebedarf

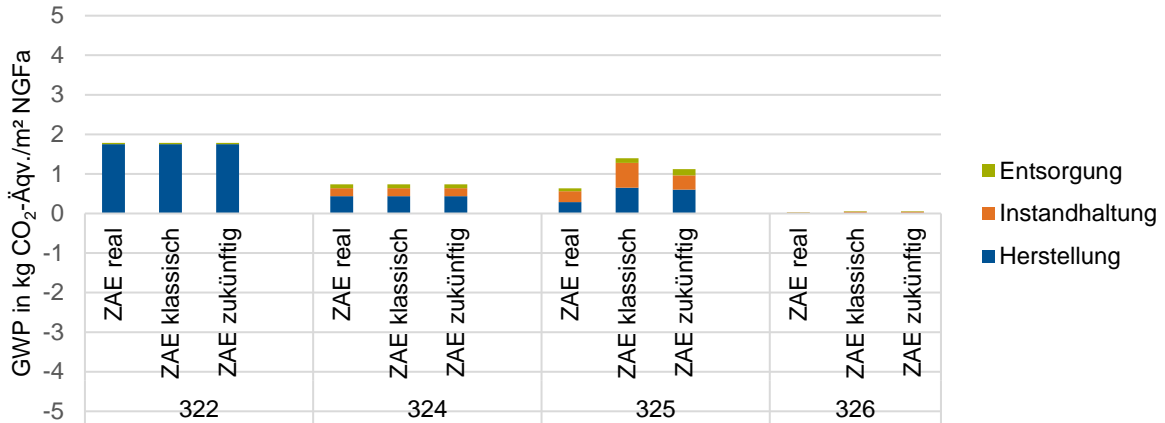
Energieträger	Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/(m <sup>2</sup> ·a) für					Gebäude insgesamt
	Heizung	Warmwasser	Eingebaute Beleuchtung	Lüftung <sup>4)</sup>	Kühlung einschl. Befeuchtung	
Fernwärme	104,5	21,3	0,0	0,0	5,4	<b>131,2</b>
Strom	0,6	0,2	11,9	8,5	10,6	<b>31,8</b>

---

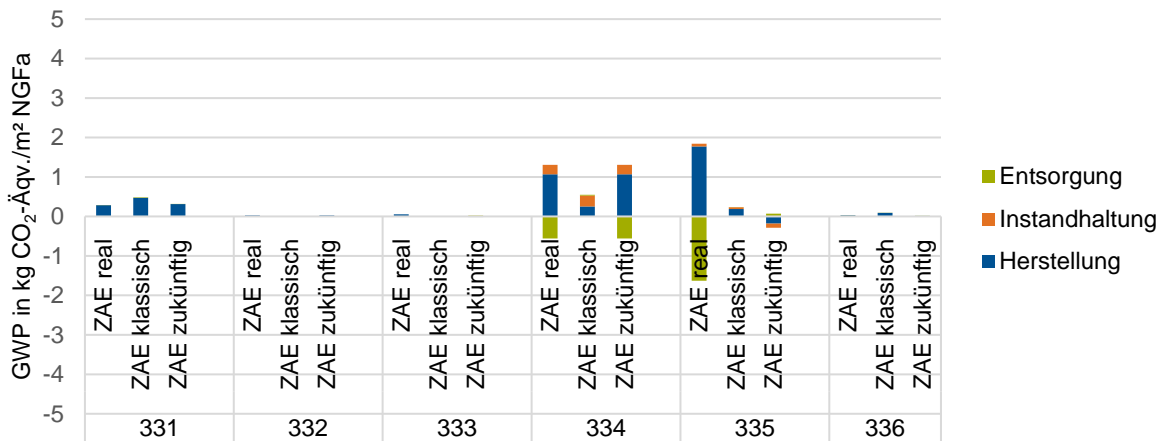
### Aufteilung Energiebedarf

[kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Heizung	Warmwasser	Eingebaute Beleuchtung	Lüftung <sup>4)</sup>	Kühlung einschl. Befeuchtung	Gebäude insgesamt
<b>Nutzenergie</b>	76,0	8,5	11,9	0,0	25,0	<b>121,4</b>
<b>Endenergie</b>	105,0	21,6	11,9	8,5	10,7	<b>157,7</b>
<b>Primärenergie</b>	21,3	4,7	31,0	22,0	14,8	<b>93,8</b>

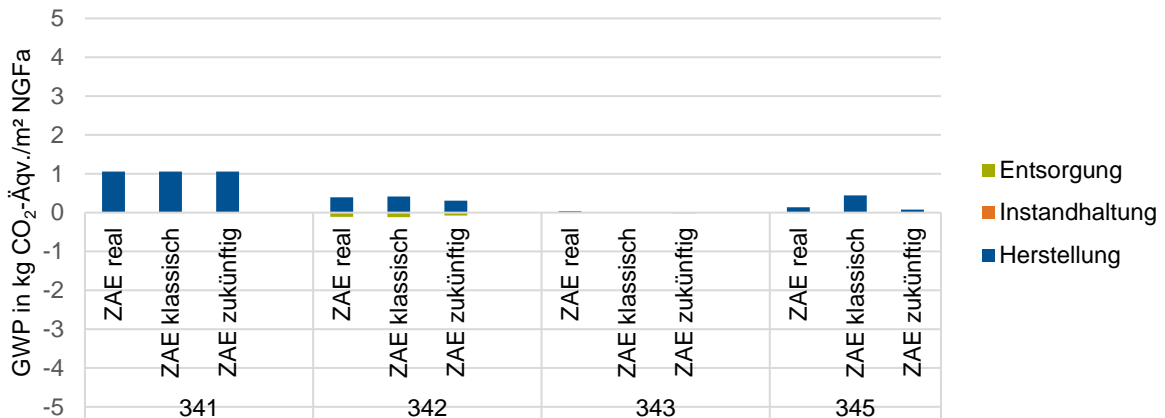
**Abb. A.9:** Variantenvergleich – 320 Gründung mit Untergruppen



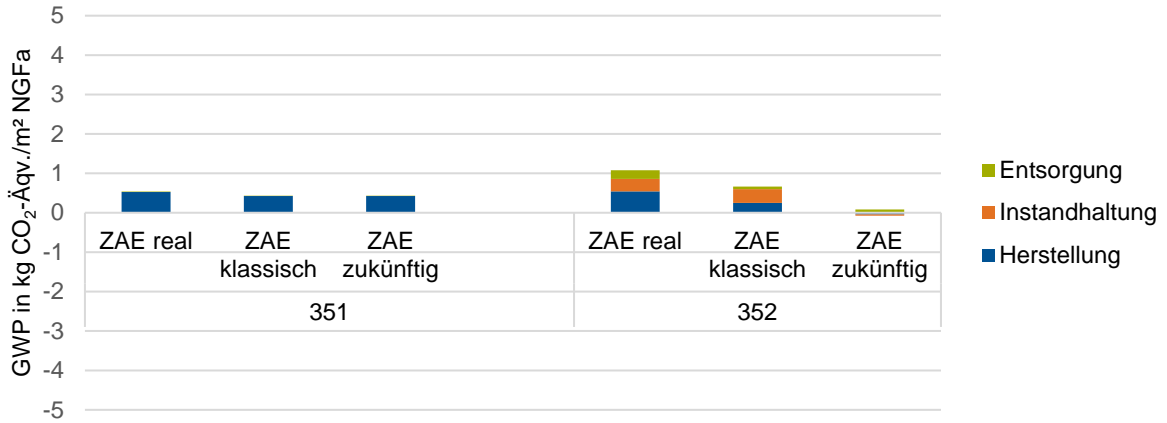
**Abb. A.10:** Variantenvergleich – 330 Außenwände mit Untergruppen



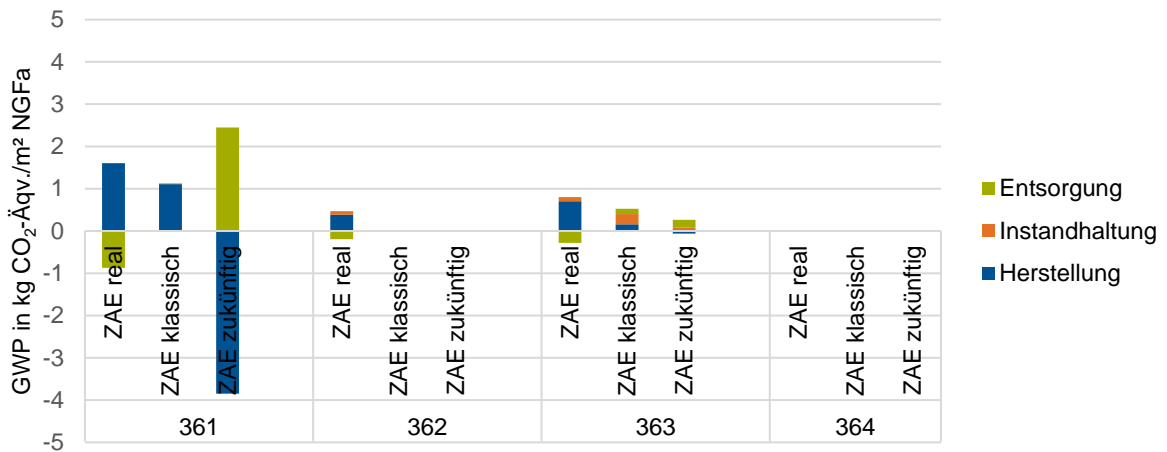
**Abb. A.11:** Variantenvergleich – 340 Innenwände mit Untergruppen



**Abb. A.12:** Variantenvergleich – 350 Decken mit Untergruppen



**Abb. A.13:** Variantenvergleich – 360 Dächer mit Untergruppen





### **Selbständigkeitserklärung**

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Die Arbeit wurde noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt.

München, den

.....

(Unterschrift)

## Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,  
Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges  
Planen und Bauen (Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Frau/Herrn .....

(Anschrift)

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte  
Masterarbeit mit dem Titel

.....  
.....

- in Bibliotheken der TUM, hier die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, als Printmedium Studenten und Besuchern zugänglich gemacht wird.
- auf der Homepage des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen in Dateiform (PDF) passwortgeschützt zugänglich gemacht wird.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weiter gegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für



mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den \_\_\_\_\_, den \_\_\_\_\_

.....

(TUM)

.....

(Autorin/Autor)