Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Potentialanalyse des Einsatzes von BIM am Beispiel der Nachhaltigkeitsanalysen im Rahmen einer realen Nichtwohngebäudeplanung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Oksana Ichbiah
Matr.Nr.: 01635834

unter der Anleitung von

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Thomas Bednar**

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich Bauphysik und Schallschutz
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E206-02, A-1040 Wien

in Zusammenarbeit mit und Betreuung durch

Ed. Züblin AG, Zentrale Technik
Albstadtweg 3, 70567 Stuttgart

Dipl.-Ing. **Jan Jung**
Dipl.-Ing. **Daniela Greiner**

Wien, im November 2018 _____

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar für die wissenschaftliche Betreuung dieser Masterarbeit bedanken.

Besonderer Dank geht an die Firma Ed. Züblin AG für die Ermöglichung dieser Masterarbeit, insbesondere an Herrn Dipl.-Ing. Jan Jung, Frau Dipl.-Ing. Daniela Greiner und Frau Dr.-Ing. M.sc. Wi.-Ing. Karoline Fath für die hochgeschätzte Betreuung, die hilfreiche Unterstützung und die nützlichen Anweisungen.

Viel Dank gilt auch dem Bauphysik Team, das stets ansprechbar war, und allen Mitarbeitern der Fassadentechnik für das sehr angenehme Arbeitsklima.

Weiterhin danke ich den Support-Teams von DIAL GmbH und Hottgenroth Software GmbH für die Hilfe bei meinen Fragen bezüglich der verwendeten Softwareprodukte.

Ein herzlicher Dank geht an meine Freunde, die mich immer motiviert haben, und an meine Eltern, die mich während meines Studiums ständig unterstützt haben. Nicht zuletzt möchte ich meiner Großmutter für die umfassende Korrektur dieser Arbeit danken.

Kurzfassung

Der Gebäudesektor kann eine entscheidende Rolle in der Verringerung der klimawirksamen Emissionen spielen. Planungsentscheidungen, die einen Einfluss auf den Energiebedarf und das Treibhauspotential eines Gebäudes haben, müssen sehr früh im Planungsprozess getroffen werden. Die Methode des Building Information Modeling (BIM) bietet ein großes Potential, um unterschiedliche Entwurfsvarianten in den frühen Planungsphasen untersuchen zu können.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Frage behandelt, inwiefern die BIM-Planungsmethode dabei helfen kann, die bauphysikalische und ökologische Planung und Optimierung einer Fassade effizienter zu führen. Diese Frage wurde anhand eines konkreten Beispiels beantwortet. Es wurden drei Fassadenvarianten für ein Nichtwohngebäude, die bestimmte thermische und visuelle Anforderungen erfüllen, anhand einer Ökobilanz verglichen.

Es wurden die thermischen und visuellen Anforderungen erläutert, bei denen die Fassade relevant ist. Die notwendigen Daten, die ein BIM-Modell beinhalten soll, um diese Anforderungen nachzuweisen und eine Ökobilanz durchzuführen, wurden aufgelistet. Darauf aufbauend wurden Testgebäude in der BIM-Software Revit modelliert und mit der IFC-Schnittstelle in die Softwareprodukte Hottgenroth Energieberater 18599 3D und DIALux importiert. Schon bei einfachen Gebäudemodellen haben sich Fehler bezüglich der Übertragung der Geometrie und der technischen Eigenschaften ergeben. Der Datenaustausch mit der IFC-Schnittstelle ist noch nicht genug ausgereift, um Vorteile gegenüber einer Nachmodellierung zu bieten. Für die Berechnung der Ökobilanz hingegen ermöglicht ein BIM-Modell eine automatische Mengenermittlung, was zu einem Zeit- und Qualitätsgewinn führt.

Anschließend wurde am Beispiel des Nichtwohngebäudes „Volksbank Freiburg“ der Zeitaufwand für den Vergleich von drei Fassadenvarianten ohne Einsatz von BIM ermittelt. Es wurde der Zeitaufwand für den Nachweis der thermischen und visuellen Anforderungen sowie für die Berechnung der Ökobilanz gemessen. Das Ergebnis zeigt viel Zeit man gewinnen könnte, wenn der Datenaustausch zwischen dem BIM-Modell und den unterschiedlichen Softwareprodukten reibungslos funktionieren würde.

Abstract

The building sector can play a decisive role in the reduction of climate-affecting emissions. Planning decisions having an impact on the energy demand and on the global warming potential of a building need to be taken in an early stage of the planning process. The Building Information Modeling (BIM) method has the potential to offer studying different design alternatives in the early planning stages.

The goal of this master's thesis is to investigate whether the BIM method can help in more efficient planning and optimizing façades from the building physics and ecological point of view. This will be shown for a specific example of a non-residential building. A life cycle assessment will be made to compare three façade alternatives meeting the same thermal and visual requirements.

First these requirements are explained. Then we establish a list of data which need to be defined in a BIM-Model to deliver proof of these requirements and to calculate a life cycle assessment. On this basis, we created test models using the BIM-software Revit and we imported them into the softwares Hottgenroth Energieberater 18599 3D and DIALux with the IFC-format. Errors regarding the transfer of geometry and technical parameters occurred even with simple building models. The data exchange with the IFC-Format is still in the development stages. Therefore, it is quicker to model the building again rather than to import an ifc-file and correct the numerous errors. However, for the calculation of the life cycle assessment, the BIM-model enabled an automatic quantity takeoff, which leads to a time and quality gain.

Thereafter, we calculated the time needed to compare the three façade alternatives for the aforementioned non-residential building called "Volksbank Freiburg" without using the BIM method. We measured the time needed to prove the thermal and visual requirements being met and to calculate the life cycle assessment. The result shows how much time could be saved if the exchange of data between the BIM model and the other softwares were working perfectly.

Résumé

Le secteur du bâtiment peut jouer un rôle décisif dans la réduction des émissions contribuant au réchauffement climatique. Les décisions qui ont un impact sur la demande énergétique et le potentiel de réchauffement global d'un bâtiment doivent être prises dans les premières phases de développement du projet. La méthode Building Information Modeling (BIM) ouvre de nouvelles possibilités pour pouvoir comparer plusieurs alternatives lors des études de faisabilités.

Ce mémoire s'intéresse au potentiel de la méthode BIM pour augmenter l'efficacité de la planification et l'optimisation de façades du point de vue énergétique et écologique. Ce potentiel est analysé à l'aide d'un exemple concret. On compare trois variantes de façade d'un bâtiment non résidentiel, qui vérifient certaines exigences thermiques et visuelles, à l'aide d'une analyse de cycle de vie.

D'abord, les exigences thermiques et visuelles qui ont une influence sur la conception de la façade sont expliquées. Ensuite, on liste les données devant être comprises dans la maquette BIM afin de démontrer que ces exigences sont respectées et de calculer l'analyse de cycle de vie. Sur cette base, des modèles simplifiés sont modélisés dans le logiciel BIM Revit, puis importés dans les logiciels Hottgenroth Energieberater 18599 3D et DIALux à l'aide du format de fichier universel IFC. Des erreurs concernant la géométrie et les paramètres techniques ont eu lieu à l'importation de modèles même très simples. L'échange de données avec le format IFC n'est pas encore au point et ne présente pour l'instant pas de gain de temps par rapport au fait de modéliser à nouveau le bâtiment dans chaque logiciel. Cependant, en ce qui concerne l'analyse du cycle de vie, la méthode BIM permet une détermination automatique de quantités, ce qui signifie un gain de temps et de précision.

Après cela, le temps nécessaire pour comparer les trois variantes de façades du bâtiment « Volksbank Freiburg » sans la méthode BIM est déterminé. Il s'agit ici du temps pour prouver que les exigences thermiques et visuelles sont respectées et pour le calcul de l'analyse du cycle de vie. Les résultats permettent de montrer le temps qui pourrait être gagné, si l'échange de données entre la maquette BIM et les différents logiciels utilisés fonctionnait parfaitement.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung ... **III**

Kurzfassung ... **V**

Abstract ... **VI**

Résumé ... **VII**

Inhaltsverzeichnis ... **IX**

Abkürzungsverzeichnis ... **XII**

1 Einleitung ... **1**

1.1 Motivation ... 1

1.2 Forschungsfrage ... 1

1.3 Aufbau der Diplomarbeit ... 2

2 Grundlagen: BIM ... **5**

2.1 Building Information Modeling: Definition ... 5

2.2 Varianten in der BIM-Arbeitsweise ... 9

2.3 IFC-Datenformat ... 10

2.4 Stand der Einführung ... 11

3 Fassadenplanung und Fassadenoptimierung ... **13**

3.1 Allgemeine Anforderungen ... 13

3.2 Optische und tageslichttechnische Betrachtung ... 15

3.2.1 Anforderungen ... 15

3.2.2 Nachweisführung ... 16

3.3 Thermische und energetische Betrachtung ... 18

3.3.1 Anforderungen ... 18

3.3.2 Nachweisführung: die Energieeinsparverordnung ... 21

3.4 Ökobilanzierung ... 29

3.4.1 Definition und normative Grundlagen ... 29

3.4.2 Umweltindikatoren ... 31

3.4.3 Datengrundlage ... 31

3.4.4 Ökobilanz nach DGNB ... 32

4 Verbesserungsmöglichkeiten durch den Einsatz von BIM 37

4.1 Verwendete Software 37

4.1.1 Autodesk Revit 2017 37

4.1.2 Hottgenroth Energieberater 18599 3D 38

4.1.3 DIALux evo 8 40

4.1.4 Excel 2016 41

4.2 Arbeitsabläufe ohne und mit BIM 41

4.2.1 Arbeitsablauf ohne Einsatz von BIM 41

4.2.2 Optimierungspotentiale durch den Einsatz eines BIM-Modells 42

4.3 EnEV-Nachweis 44

4.3.1 Methodik 44

4.3.2 Notwendige Daten für den EnEV-Nachweis 44

4.3.3 Geometrieeingabe 45

4.3.4 Eingabe von bauphysikalischen Kennwerten in Revit 57

4.3.5 Eingabe der Orientierung des Grundstücks 65

4.3.6 Übertragung von HottCAD nach Revit 66

4.3.7 Zusammenfassung 67

4.4 Tageslichtquotientberechnung 68

4.4.1 Methodik 68

4.4.2 Notwendige Daten für die Tageslichtquotientberechnung 68

4.4.3 Geometrieeingabe 69

4.4.4 Eingabe des Standorts und der Orientierung des Grundstücks 73

4.4.5 Zusammenfassung 74

4.5 Ökobilanz 75

4.6 Zusammenfassung 76

5 Potential der BIM-Arbeitsweise am Beispiel des Variantenvergleiches für das Projekt „Volksbank Freiburg“ 79

5.1 Beschreibung des Projektes „Volksbank Freiburg“ 79

5.2 Rahmenbedingungen für den Vergleich 82

5.3 Beschreibung der drei Varianten 82

5.3.1 Variante 1: Ist-Zustand 83

5.3.2 Variante 2: Elementfassade 86
5.3.3 Variante 3: Fensterband 89
5.4 Nachweise 91
5.4.1 EnEV-Nachweis 91
5.4.2 Tageslicht und Sichtverbindung nach außen 101
5.5 Ökobilanz und Vergleich der drei Varianten über den Lebenszyklus 104
5.6 Zeitaufwandserfassung 109
6 Schlussfolgerung und Ausblick 115
Literaturverzeichnis 119
Abbildungsverzeichnis 124
Tabellenverzeichnis 129
Anhänge 133
A U-Wert Berechnung 133
A.1 Ist-Zustand 133
A.2 Elementfassade 136
A.3 Fensterband 138
A.4 Pfosten-Riegel-Fassade im Erdgeschoss 139
B Bauteilkatalog 141
C Ausführung des Referenzgebäudes in der EnEV 145
D Nachweis der visuellen Anforderungen 150
D.1 Nachweis der geometrischen Anforderungen 150
D.2 Berechnung des Tageslichtquotienten 153

Abkürzungsverzeichnis

2D Zweidimensional

3D Dreidimensional

BAuA Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

BBSR Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung

BGF Bruttogrundfläche

BIM Building Information Modeling

BMI Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat

BMVI Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DGNB Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

EnEV Energieeinsparverordnung

EG Erdgeschoss

GWP Global Warming Potential

IAI Industrieallianz für Interoperabilität

IBU Institut Bauen und Umwelt

IFC Industry Foundation Classes

IT Informationstechnik

NRF Nettoraumfläche

OG Obergeschoss

OKFB Oberkante Fußboden

PENRT Primärenergiebedarf nicht erneuerbar total

TGA Technische Gebäudeausrüstung

VDI Verein Deutscher Ingenieure

WDVS Wärmedämmverbundsystem

1 Einleitung

1.1 Motivation

In Europa ist der Gebäudesektor verantwortlich für 40 % des Primärenergieverbrauchs und 36 % der Treibhausgasemissionen (Europäische Kommission, 2018). Der Hauptteil dieses Energieverbrauchs dient der Heizung der Gebäude. Dazu kommen noch die Warmwasserbereitung, die Lüftung, die Beleuchtung, die Nutzung von elektronischen Geräten und die Kühlung. Schon während der Planung eines Gebäudes kann sein Energieverbrauch durch verschiedene Maßnahmen reduziert werden. Einerseits hat die Fassade einen hohen Einfluss auf den Energiebedarf. Durch effektive konstruktive Maßnahmen kann ein hoher Wärme- und Sonnenschutz erreicht werden, was die Notwendigkeit an Heiz- und Kühlsystemen verringert. Andererseits ist die Effizienz der Heiz- und Anlagentechnik ein weiterer wichtiger Faktor, der zur Senkung des Energieverbrauchs beitragen kann.

Um den Energieverbrauch während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu reduzieren, muss aber nicht nur der Energieverbrauch während des Betriebs des Gebäudes berücksichtigt werden, sondern auch der Energieeinsatz für die Herstellung, den Transport, die Erneuerung und die Entsorgung der Baumaterialien.

Die Entwicklung von neuen Planungswerkzeugen wird notwendig, um diese zahlreichen Aspekte neben allen anderen Anforderungen in den frühen Planungsphasen berücksichtigen zu können. Ein großes Potential bietet die Digitalisierung der Planungsmethoden und das Thema BIM (Building Information Modeling), die sich in den letzten Jahren sehr entwickelt haben. Durch die Erstellung eines digitalen Gebäudemodells, das alle notwendigen Informationen für alle Projektbeteiligten beinhaltet, könnte die Zusammenarbeit zwischen den unterschiedlichen Fachdisziplinen erleichtert werden und die Untersuchung verschiedener Varianten schneller geführt werden.

1.2 Forschungsfrage

In der vorliegenden Diplomarbeit heben wir den Einfluss der Fassade auf den Energieverbrauch eines Gebäudes hervor. Ziel der Arbeit ist, folgende Forschungsfrage zu beantworten:

Kann man durch den Einsatz einer BIM-basierte Arbeitsweise die bauphysikalische Planung und Optimierung einer Fassade effizienter führen?
Unter Optimierung verstehen wir hier die technische Optimierung der Fassade, nicht die wirtschaftliche Optimierung. Die technische Optimierung betrifft den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf und das Treibhauspotential der Fassade während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes unter Einhaltung der thermischen und visuellen Anforderungen.
Für diese spezifische Aufgabe werden zuerst die heutigen Möglichkeiten durch den Einsatz eines BIM-Planungsprozesses untersucht. Dann erfolgt am Beispiel des Büro- und Hotelgebäudes „Volksbank Freiburg“ eine Quantifizierung des Zeitgewinns, der mit dem Einsatz von BIM bei der Studie von drei Fassadenvarianten erreichbar wäre.

1.3 Aufbau der Diplomarbeit

Das Kapitel 2 befasst sich mit den Grundlagen des Building Information Modeling. Der Begriff BIM wird erklärt, und die Zielsetzung und das Potential dieser Arbeitsweise werden erläutert. Die Varianten in der Umsetzung dieser Planungsmethode werden erklärt, und es wird auf die Notwendigkeit eines offenen und herstellerneutralen Formats für den Datenaustausch aufmerksam gemacht. Anschließend wird der heutige Stand der Einführung der BIM-Methode dargestellt.
Im Kapitel 3 werden die bauphysikalischen und ökologischen Anforderungen an Gebäude, bei denen die Fassade relevant ist, aufgelistet. Die thermischen und visuellen Anforderungen sowie die Grundlage der Ökobilanzierung werden ausführlich erläutert, und es werden die Methoden der Nachweisführung in Deutschland und der Optimierung erklärt.
Im Kapitel 4 werden die verwendeten Softwareprodukte für die Erstellung des BIM-Modells, den Nachweis der visuellen und thermischen Anforderungen und die Ökobilanz vorgestellt. Die heutigen Verbesserungsmöglichkeiten im Planungsprozess durch den Einsatz von BIM werden untersucht, indem der Datenaustausch zwischen dem BIM-Modell und den fachspezifischen Softwareprodukten analysiert wird.
Im Kapitel 5 erfolgt eine Zeitmessung am Beispiel des Projektes „Volksbank Freiburg“. Sie betrifft den Zeitaufwand, den ein Vergleich von drei Fassadenvarianten hinsichtlich ihres nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs und ihres Treibhauspotentials unter Einhaltung der thermischen und visuellen Anforderungen mit einem konventionellen Planungsprozess erfordert.

Sie zeigt, in welchen Planungsschritten Zeit durch die Unterstützung eines BIM-Modells gespart werden könnte. Außerdem wird der mögliche Zeitgewinn, der mit einem reibungslosen BIM-Prozess erreichbar wäre, für diese spezifische Aufgabe quantifiziert.

Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse dieser Diplomarbeit zusammengefasst mit einem Ausblick auf die zukünftige Entwicklung der BIM-Arbeitsweise in der bauphysikalischen Fassadenplanung.

2 Grundlagen: BIM

In den letzten Jahren hat die Digitalisierung große Änderungen in der Wirtschaft und in der Gesellschaft verursacht und in vielen Branchen zu einer Erhöhung der Produktivität geführt. Auch in der Baubranche ändern sich die Planungs- und Produktionsprozesse durch den Einsatz von digitalen Werkzeugen. Eine wesentliche Änderung bildet die Umsetzung der BIM-Planungsmethode. In diesem Abschnitt werden diese Methode und die wichtigen Begriffe definiert, um die Möglichkeiten und Schwierigkeiten bei der Umsetzung dieser Methode zu zeigen.

2.1 Building Information Modeling: Definition

Im BIM-Leitfaden wird der Begriff Building Information Modeling wie folgt definiert:
„Planungsmethode im Bauwesen, die die Erzeugung und die Verwaltung von digitalen virtuellen Darstellungen der physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks beinhaltet. Die Bauwerksmodelle stellen dabei eine Informationsdatenbank rund um das Bauwerk dar, um eine verlässliche Quelle für Entscheidungen während des gesamten Lebenszyklus zu bieten, von der ersten Vorplanung bis zum Rückbau.“.
Diese Planungsmethode beruht auf einem digitalen Gebäudemodell, das Informationen von allen Projektbeteiligten beinhaltet und das für die Planung, die Ausführung und den Betrieb des Gebäudes benutzt wird. Ein BIM-Modell stellt also mehr als ein 3D-Modell dar; er besteht aus intelligenten Objekten, die die technischen Informationen für die unterschiedlichen Fachdisziplinen enthalten. Zum Beispiel kann einer Wand ein Material mit seiner Rohdichte und seiner Wärmeleitfähigkeit zugewiesen werden. (Egger, et al., 2013)

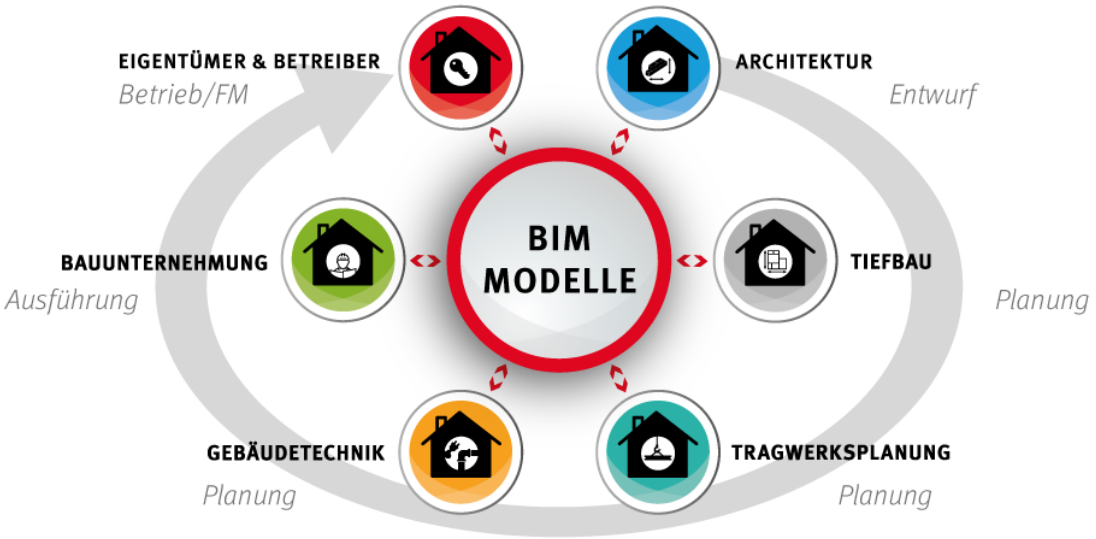


Abbildung 1: Nutzung eines BIM-Modells von allen Projektbeteiligten über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes (Quelle: https://www.cadstudio.com/bim-consulting/)

Ein wichtiger Punkt ist die zentrale Verwaltung von allen Informationen: die Zentralisierung aller Informationen in einem Modell ermöglicht Konsistenz in der Planung. Alle Grundrisse, Schnitte und Ansichten können aus dem 3D-Modell abgeleitet werden. Änderungen im Modell werden automatisch in allen Plänen geändert, was zu widerspruchsfreien Plänen führt. Das digitale Gebäudemodell ermöglicht auch eine schnelle und präzise Mengenermittlung. Die einzelnen Fachdisziplinen können außerdem die benötigten Informationen direkt aus dem Modell übernehmen. Durch die Nutzung eines Modells über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes soll also der Datenaustausch zwischen den Fachdisziplinen erleichtert und Informationsverluste vermieden werden.

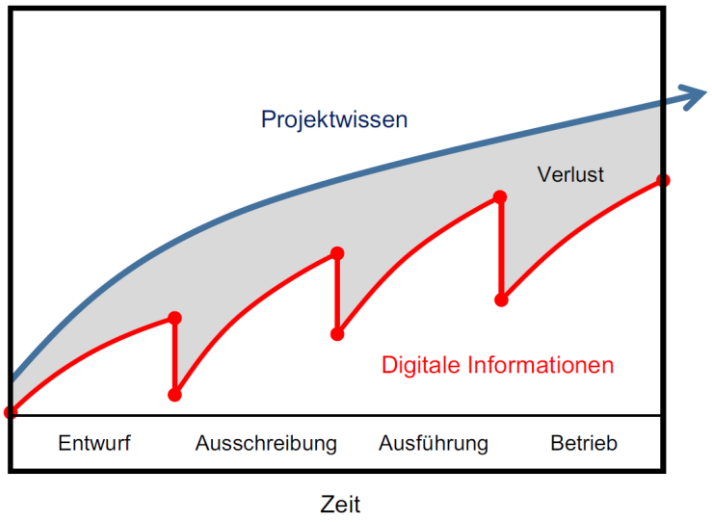


Abbildung 2: Informationsverlust durch Brüche im Informationsfluss (Borrmann, et al., 2015)

Die Informationsverluste sind nämlich oft Ursache für Qualitätsmängel, Bauverzögerungen und Kostenüberschreitungen. Die BIM-Arbeitsweise soll helfen, eine hohe Planungs-, Termin- und Kostensicherheit zu erreichen. Wie folgende Abbildung zeigt, wird bei einem BIM-gestützten Planungsprozess der Aufwand in die frühen Projektphasen vorverlagert.

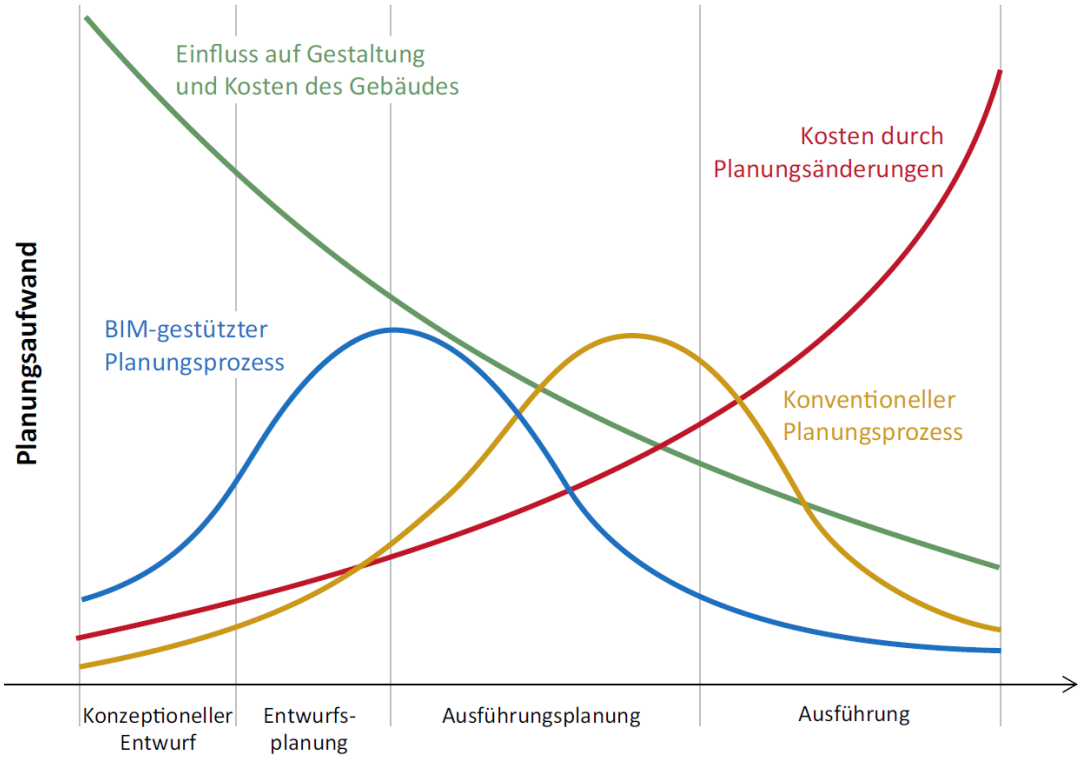


Abbildung 3: Planungsaufwand bei einem konventionellen und einem BIM-gestützten Planungsprozess (Borrmann, et al., 2015)

Bei einem konventionellen Planungsprozess findet die detaillierte Planung oft erst in der Ausführungsplanung statt. Mit der Zeit nehmen aber die Einflussmöglichkeiten auf die Gestaltung und die Kosten eines Gebäudes ab, und die durch Planungsänderungen verursachten Kosten nehmen hingegen zu. Das gilt auch für den Energiebedarf eines Gebäudes: die wichtigsten Planungsentscheidungen müssen sehr früh getroffen werden, und der Einfluss auf die Energieeffizienz eines Gebäudes nimmt mit dem Projektfortschritt ab.

Mit dem Einsatz von BIM wird der Planungsaufwand in die frühen Projektphasen gelegt, wo die Entscheidungen noch wichtige Auswirkungen auf die Planung haben können. Verschiedene Entwurfsvarianten können visuell dargestellt und verglichen werden.

Ein BIM-gestützter Planungsprozess soll zu einer Effizienzsteigerung führen. Der durch den Einsatz von BIM erreichbare Zeitgewinn hängt von der Planungsaufgabe und der Erfahrung der Projektbeteiligten ab. In seiner Diplomarbeit hat M. Alder den Zeitaufwand für die Mengenermittlung auf zwei Arten gemessen: einmal mit der BIM-Software Revit, das andere Mal mit einer manuellen Ermittlung. Diese Mengenermittlung wurde von Studenten der Brigham Youth University am Beispiel eines Restaurants ausgeführt. Die Studenten, die die BIM-Software verwendet haben, waren im Durchschnitt 44 % schneller als die anderen mit derselben Genauigkeit (Alder, 2006).

Das Architektur- und Planungsbüro Lott + Barber Architects in Savannah in den Vereinigten Staaten verwendet seit 2004 die BIM-Software Revit für alle Projekte. Sie haben ihren Zeitgewinn mit BIM quantifiziert, indem sie den Zeitaufwand für zwei Projekte mit vergleichbaren Größen gemessen haben – eins mit Revit und eins mit konventionellen CAD-Werkzeugen geplant. Auch in diesem Fall konnte durch den Einsatz von BIM viel Zeit gespart werden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgezeigt: (Autodesk, 2008)

Tabelle 1: Zeitersparnis mit BIM im Architektur- und Planungsbüro Lott + Barber Architects

Aufgabe	Stunden mit CAD-Werkzeugen	Stunden mit Revit	Stunden gespart	Zeitersparnis
Vorentwurf	190	90	100	53%
Entwurf	436	220	216	50%
Erstellen der Bauunterlagen	1023	815	208	20%
Kontrolle und Koordination	175	16	159	91%
Total:	1824	1141	683	

2.2 Varianten in der BIM-Arbeitsweise

In der Umsetzung von BIM gibt es unterschiedliche Stufen. Unterschieden wird zwischen den Begriffen „little BIM“ und „big BIM“. „Little BIM“ bezeichnet eine Arbeitsweise, wo ein Planer eine spezifische BIM-Software als Insellösung innerhalb seiner Fachdisziplin benutzt. Das Modell wird aber nicht für die Koordination zwischen allen Fachdisziplinen verwendet. Dabei wird das große Potential von BIM nicht ausgenutzt. „Big BIM“ bezeichnet hingegen einen Planungsprozess, wo eine modellbasierte Kommunikation zwischen allen Projektbeteiligten und über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes erfolgt.

Bezüglich der Planungswerkzeuge kann zwischen „closed BIM“ und „open BIM“ unterschieden werden. In der „closed BIM“ Arbeitsweise werden ausschließlich Software derselben Hersteller verwendet. Die Vielzahl der Aufgaben und der Beteiligten im Bauwesen führt aber dazu, dass es kaum möglich ist, die ganze Planung eines Gebäudes nur mit Softwareprodukten eines Herstellers zu erledigen. Die „open BIM“ Arbeitsweise bedeutet die Nutzung einer Softwarekonstellation mit Softwareprodukten von unterschiedlichen Herstellern. Sie erfordert Interoperabilität zwischen den unterschiedlichen Planungswerkzeugen. Um den Wandel der Baubranche in Richtung „big open BIM“ zu fördern, wurde ein offenes und herstellerunabhängiges Datenformat entwickelt: das IFC-Format.

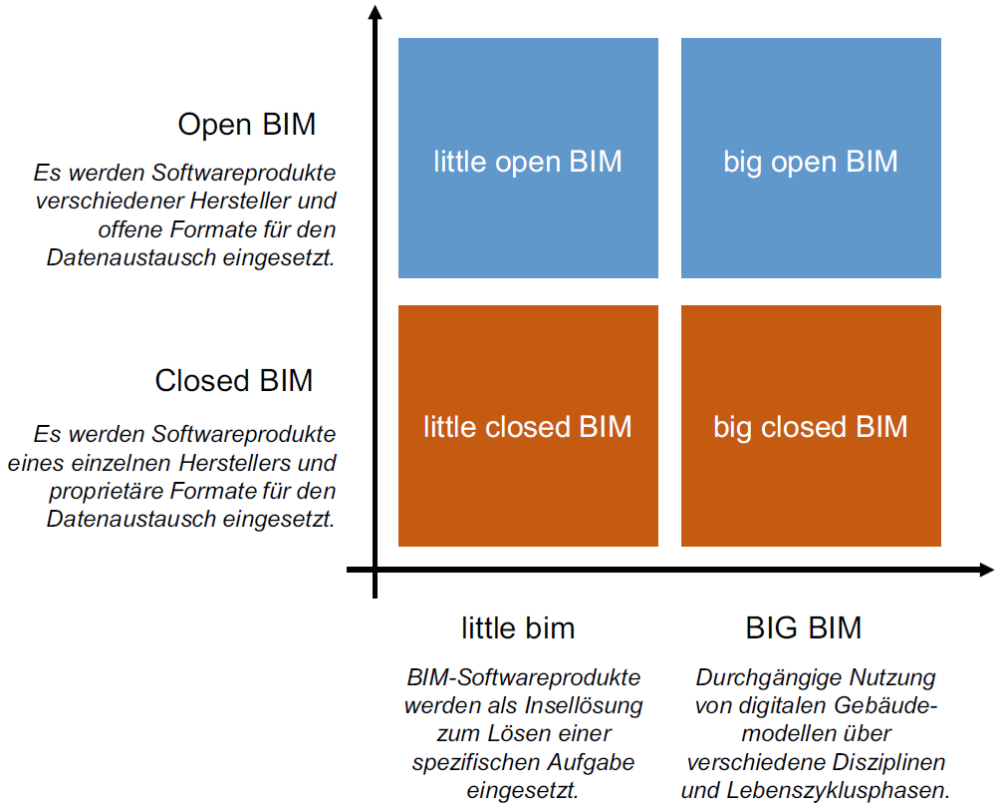


Abbildung 4: Varianten in der Umsetzung von BIM (Borrmann, et al., 2015)

2.3 IFC-Datenformat

Das IFC-Format (Industry Foundation Classes) ist ein offenes und standardisiertes Datenformat für die Beschreibung und den Austausch von Gebäudemodellen, das nach ISO 16739 normiert ist. Es ermöglicht Interoperabilität zwischen unterschiedlichen Softwareprodukten durch IFC-Dateien mit der Endung *.ifc. Dieser Standard wurde von der Industrieallianz für Interoperabilität (IAI) entwickelt – heute buildingSMART International genannt. Diese internationale Organisation wurde im Jahre 1995 gegründet und besteht aus Baufirmen, Ingenieurbüros und Softwarehersteller. BuildingSMART International ist in nationale oder regionale Chapter unterteilt; in deutschsprachigen Ländern ist sie durch buildingSMART e.V. vertreten. Ihr Ziel ist die „erfolgreiche Entwicklung, Anwendung und Verbreitung von offenen IT Standards und Prozessdefinitionen für Interoperabilität“ (BuildingSMART e.V.). Nach der ersten Version des IFC Datenformates im Jahre 1997 wurden neue Versionen entwickelt. Heute ist die Version IFC 2x3 weit verbreitet, sie wird aber zukünftig durch die Version IFC 4 ersetzt werden.

Das IFC-Format wird bereits weltweit von vielen Softwareprodukten unterstützt. Eine Einschränkung zur allgemeinen Verwendung dieses Standards beruht auf der Tatsache, dass der Austausch von IFC-Dateien noch nicht einwandfrei funktioniert, und dass die Geometrie und Informationen eines Modells nicht immer fehlerfrei übertragen werden (Borrmann, et al., 2015).

2.4 Stand der Einführung

Die Umsetzung der BIM-Arbeitsweise ist ein langer Prozess, der alle Akteure der Baubranche betrifft. In einigen Ländern ist die BIM-Planungsmethode schon ziemlich weit eingeführt, und sie wird durch die Veröffentlichung von BIM-Richtlinien unterstützt. In Singapur, Finnland und den Niederlanden zum Beispiel ist das IFC-Format für öffentliche Bauvorhaben schon verbindlich vorgeschrieben (Borrmann, et al., 2015).
In Deutschland befassen sich schon einige Baufirmen und Ingenieurbüros mit dem Thema BIM, jedoch ist die Einführung von BIM noch nicht verbindlich und vertraglich vereinbart.

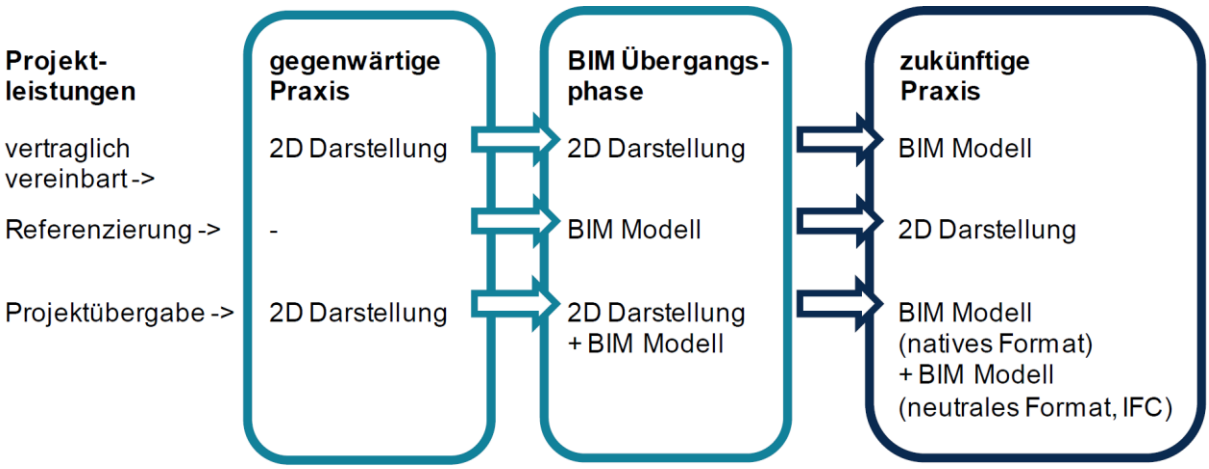


Abbildung 5: Bedeutung von 2D-Plänen und 3D-Modellen in der gegenwärtigen Praxis, die BIM-Übergangsphase und in der zukünftigen Praxis (Egger, et al., 2013)

In der BIM-Übergangsphase wird bereits teilweise mit einem BIM-Modell geplant; nur 2D-Pläne werden aber erfordert. Es wird erwartet, dass in der Zukunft BIM-Modelle sowohl im nativen als auch in einem neutralen Format wie das IFC-Format verlangt werden. Die 2D-Pläne werden dann direkt aus dem 3D-Modell abgeleitet und als Referenz oder zur Archivierung in Papierform dienen.

Im Jahre 2013 wurde im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) der erste BIM-Leitfaden für Deutschland verfasst. Dieser Leitfaden definiert alle wichtigen Begriffe zum Thema BIM, gibt einen Überblick über die Entwicklung von BIM im Ausland und in Deutschland und erläutert die wesentlichen Potentiale und Voraussetzungen zur Einführung dieser Planungsmethode. Für die weitere Umsetzung von BIM in der Baupraxis wird die Verfassung von deutschen BIM-Richtlinien empfohlen. (Egger, et al., 2013)

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) befasst sich damit, eine Richtlinienreihe von 9 Richtlinien zum Thema BIM zu entwickeln. Zur Zeit ist nur das VDI 2552 Blatt 3 „BIM – Modellbasierte Mengenermittlung zur Kostenplanung, Terminplanung, Vergabe und Abrechnung“ veröffentlicht, und die Blätter 2 „BIM – Begriffe“, 5 „BIM – Datenmanagement“ und 8.1 „BIM – Qualifikationen – Basiskenntnisse“ sind als Entwurf vorhanden. (Borrmann, et al., 2015)

Vier BIM-Pilotprojekte im Infrastrukturbereich werden aktuell von dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gefördert um Erfahrung zu sammeln, und ab 2020 sollen alle Projekte im Verkehrsinfrastrukturbau auf Basis eines BIM-Modells erfolgen (BMVI, 2015).

Diese neuen Entwicklungen lassen erwarten, dass die BIM-Planungsmethode in den nächsten Jahren immer häufiger zum Einsatz kommen wird.

3 Fassadenplanung und Fassadenoptimierung

In diesem Abschnitt werden die bauphysikalischen und ökologischen Anforderungen an Fassaden beschrieben. Die visuellen und thermischen Anforderungen sowie die normativen Vorgaben und Methoden der Nachweisführung in Deutschland werden im Detail erklärt. Dann werden die Grundlagen der Ökobilanzierung und die Methode der Ökobilanz nach den DGNB Richtlinien erläutert.

3.1 Allgemeine Anforderungen

Die Fassade bildet die Schnittstelle zwischen dem Innen- und Außenraum. Sie bestimmt zum einen die architektonische Erscheinung des Gebäudes und ermöglicht durch die Fenster den Ausblick nach außen. Um die Behaglichkeit des Nutzers eines Gebäudes unabhängig von dem Außenklima zu gewährleisten, muss eine Fassade zahlreiche Anforderungen erfüllen.
Als thermische Gebäudehülle spielt die Fassade eine entscheidende Rolle an den Energiebedarf eines Gebäudes, da sie das Gebäude gegen Wärme und Kälte isoliert. Sie schützt auch den Innenraum gegen Regenwasser und Zugerscheinungen und muss also dicht ausgeführt werden. Durch die Fassadenöffnungen erfolgt die Lüftung, die einen hygienischen Luftwechsel gewährleisten muss, um die Raumfeuchte zu regulieren, die verbrauchte Luft auszutauschen und frische Luft zu versorgen. Des Weiteren spielt die Fassade eine große Rolle in der Beleuchtung eines Raumes: Natürliche Belichtung durch einfallendes Sonnenlicht sollte bevorzugt werden, um den Bedarf an künstliche Beleuchtung zu reduzieren. Sonnenschutzmaßnahmen sind jedoch notwendig, um eine Überhitzung im Sommer zu vermeiden. Die Gebäudehülle isoliert auch den Innenraum von dem Außenlärm wie zum Beispiel Verkehrslärm und Baustellenlärm und sie muss auch Brandüberschläge vermeiden. Schließlich erfüllt eine Fassade statische Anforderungen: sie muss ihr Eigengewicht tragen, Druck- und Sogkräfte aus Windlasten übernehmen und manchmal auch tragende Funktionen für andere Bauteile übernehmen. (Knaack, et al., 2007)

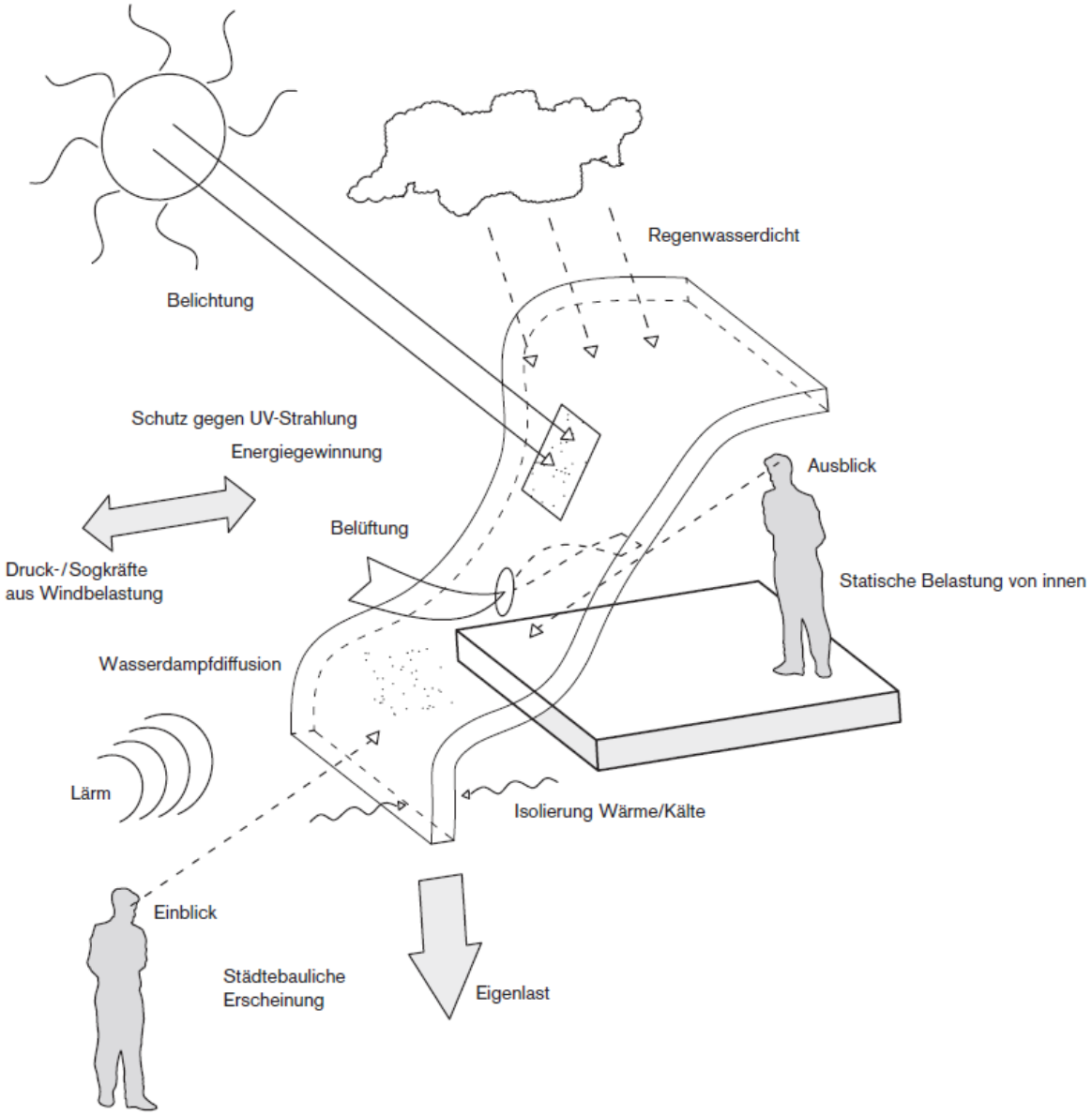


Abbildung 6: Funktionen einer Fassade (Knaack, et al., 2007, S.36)

Die einzelnen Anforderungen können sich widersprechen; bei der Planung müssen immer alle Aspekte betrachtet werden, um einen Kompromiss zu erreichen. In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die visuellen und thermischen Anforderungen gelegt. Weitere Anforderungen werden in der Folge nicht betrachtet.

3.2 Optische und tageslichttechnische Betrachtung

3.2.1 Anforderungen

Die Beleuchtung ist ein wichtiger Faktor, der zur Behaglichkeit eines Raumes beiträgt. Zuerst werden die grundlegenden lichttechnischen Begriffe definiert, dann werden die optischen und tageslichttechnischen Anforderungen an Innenräume beschrieben.

Lichtstrom

Der Lichtstrom ist die von einer Lichtquelle ausgestrahlte oder von einer Fläche empfangene Lichtleistung. Die Strahlung wird entsprechend der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet und in der Einheit Lumen (lm) angegeben.

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke *E* in einem Punkt einer Oberfläche ist der Quotient des Lichtstroms, der auf ein den Punkt enthaltendes Element der Oberfläche auftrifft, und der Fläche dieses Elements. Sie wird in Lux (lx) angegeben. Diese Einheit entspricht lm/m^2. (DIN EN 12665:2016)

Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient ist $D = \frac{E_p}{E_a} . 100\%$

Dabei ist

E_p die Beleuchtungsstärke in einem Punkt einer gegebenen Ebene, die durch direktes und indirektes Himmelslicht bei angenommener oder bekannter Leuchtdichteverteilung erzeugt wird;

E_a die Horizontalbeleuchtungsstärke bei unverbauter Himmelshalbkugel.

Hierbei bleiben die durch direktes Sonnenlicht bewirkten Anteile beider Beleuchtungsstärken unberücksichtigt. (DIN 5034-1:2011)

Die Beleuchtung sollte ausreichend für die Erfüllung der Sehaufgaben sein. Die optischen Anforderungen hängen von der vorgesehenen Nutzung des Raumes ab. Die typische mittlere Beleuchtungsstärke in einem Hotelzimmer beträgt ungefähr 200-300 lx, während sie in einem Büro 300 bis 600 lx betragen kann (Riccabona, et al., 2013).

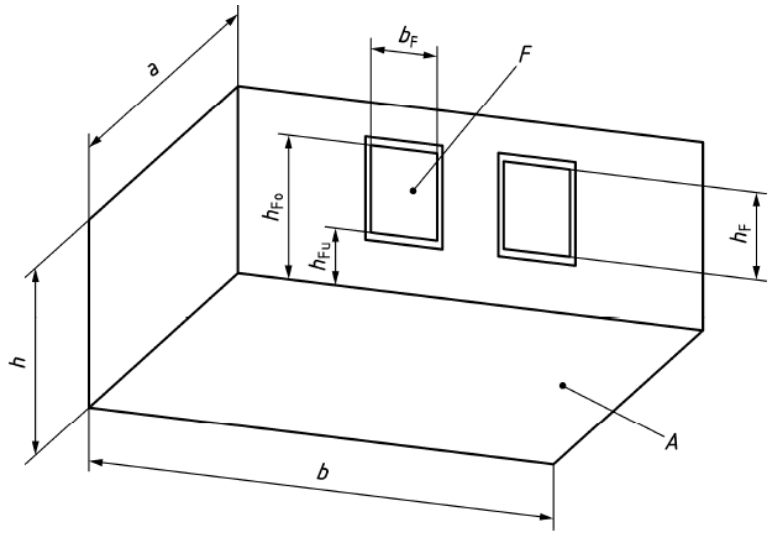
Die Beleuchtung sollte auch gleichmäßig sein, da zu hohe Kontrastunterschiede als unangenehm empfunden werden. Vor allem an Arbeitsplätzen sollte die Sonnenblendung durch den Einsatz von Blendschutz vermieden werden. Der Blendschutz kann innen- oder außenliegend sein und aus verschiedenen Materialien wie Textilien, Holz oder Metall bestehen.
Die natürliche Belichtung sollte bevorzugt werden, um die Notwendigkeit der künstlichen Beleuchtung zu verringern und eine bessere Raumstimmung zu bieten. Dazu kommt, dass die Sonneneinstrahlung notwendig für den menschlichen Stoffwechsel ist. Die Gestaltung des Raumes sollte also die Nutzung von so viel Tageslicht wie möglich erlauben (Knaack, et al., 2007). Dabei ist aber immer zu beachten, dass ein hoher Verglasungsanteil im Sommer zur Überhitzung des Raumes führen kann. Sonnenschutzanlagen werden daher üblicherweise nach Strahlung und Wind automatisch gesteuert, während der Blendschutz individuell durch den Nutzer gesteuert werden sollte.

3.2.2 Nachweisführung

Laut der Arbeitsstättenverordnung müssen alle Arbeitsräume „ausreichend Tageslicht erhalten“ und „eine Sichtverbindung nach außen haben“ (Arbeitsstättenverordnung, 2004). Diese Anforderungen werden in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4 „Beleuchtung“ konkretisiert. Es gibt zwei Möglichkeiten, um nachzuweisen, dass ein Raum über ausreichendes Tageslicht verfügt. Entweder muss der Tageslichtquotient am Arbeitsplatz größer als 2 % (4% bei Dachoberlichtern) sein, oder das „Verhältnis von lichtdurchlässiger Fenster-, Tür- oder Wandfläche bzw. Oberlichtfläche zur Raumgrundfläche“ muss mindestens 1:10 betragen (BAuA, 2011).

Die DIN 5034-1:2011 gibt die allgemeinen Anforderungen an Tageslicht in Innenräumen. Sie gilt für alle Aufenthaltsräume einschließlich der Arbeitsräume, nicht aber für Räume in Beherbergungsstätten, die nur der Übernachtung dienen. Es werden Mindestanforderungen festgelegt, um eine ausreichende Sichtverbindung nach außen und Helligkeit durch Tageslicht sicherzustellen.
Zum Erreichen einer ausreichenden Sichtverbindung nach außen werden Anforderungen an die Abmessungen und Position von Fenstern gestellt. Folgende Abbildung zeigt die

Bezeichnung der Fenster- und Arbeitsraummaße und die Anforderungen an die Fensterbreite, -Höhe und -Position.



Legende

A	Grundfläche
a	Raumtiefe
b	Raumbreite
h	Raumhöhe
F	durchsichtige Fensterfläche
b_F	Breite der durchsichtigen Glasfläche
h_F	Höhe der durchsichtigen Glasfläche
h_{Fu}	Höhe der Unterkante der durchsichtigen Glasfläche
h_{Fo}	Höhe der Oberkante der durchsichtigen Glasfläche

Anforderungen:

$b_F \geq 1{,}00$ m
$h_F \geq 1{,}25$ m bei überwiegend sitzender Tätigkeit; 1,00 m bei überwiegend stehender Tätigkeit
$h_{Fu} \leq 0{,}95$ m bei überwiegend sitzender Tätigkeit
$h_{Fu} \leq 1{,}20$ m bei überwiegend stehender Tätigkeit
$h_{Fo} \geq 2{,}20$ m

Bild 1 — Maße der durchsichtigen Fensterflächen von Arbeitsräumen zum Erreichen einer ausreichenden Sichtverbindung nach außen

Abbildung 7: Anforderungen an die Fensterabmessungen und -Position (DIN 5034-1:2011)

Zusätzlich gilt für Arbeitsräume, die in ihren Abmessungen vergleichbar mit Wohnräumen sind, dass die Breite der durchsichtigen Glasfläche b_F bzw. die Summe der Breiten aller Fenster mindestens 55% der Breite des Arbeitsraumes betragen muss. Arbeitsräume sind in ihren Abmessungen mit Wohnräumen vergleichbar, wenn eine Raumhöhe von 3,5 m, eine Raumtiefe von 6 m und eine Raumfläche von 50 m^2 nicht überschritten wird.

Die folgende Tabelle gibt andere Mindestanforderungen an die Fensterfläche je nach Raumtiefe *a* und Raumgrundfläche *A*.

Tabelle 2: Mindestanforderungen an die Fensterfläche je nach Raumtiefe und Raumgrundfläche (DIN 5034-1:2011)

Tabelle 1 — Maße der durchsichtigen Fensterflächen F von Arbeitsräumen zum Erreichen einer ausreichenden Sichtverbindung nach außen (zur Vermaßung siehe Bild 1)

Arbeitsraummaße	Fensterfläche
für $a \leq 5{,}0$ m	$F \geq 1{,}25$ m^2
Für $a > 5{,}0$ m	$F \geq 1{,}50$ m^2
für $A \leq 600$ m^2	$\Sigma F \geq 0{,}1 \cdot A$
für 600 m^2 < $A \leq 2\,000$ m^2	$\Sigma F \geq 60$ m^2 + $0{,}01 \cdot A$
für h ≤ 3,5 m	$\Sigma F \geq 0{,}3 \cdot$ b $\cdot$ h

Eine ausreichende Helligkeit durch Tageslicht wird durch die Berechnung des Tageslichtquotienten nachgewiesen. Für den Anwendungsbereich der DIN 5034-1:2011 erfolgt die Berechnung des Tageslichtquotienten bei bedecktem Himmel. Für Arbeitsräume, die in ihren Abmessungen Wohnräumen entsprechen, gilt der Nachweis als erfüllt, wenn der Tageslichtquotient auf einer horizontalen Bezugsebene in einer Höhe von 0,85 m über dem Fußboden in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von beiden Seitenwänden im Mittel wenigstens 0,9 % und am ungünstigsten dieser Punkte wenigstens 0,75 % beträgt. Wenn Fenster in zwei aneinandergrenzenden Wänden vorhanden sind, muss der Tageslichtquotient am ungünstigsten dieser Punkte wenigstens 1 % betragen.
In Arbeitsräumen mit Dachoberlichtern sollte der Tageslichtquotient auf der Nutzebene einen mittleren Wert größer als 4 % aufweisen, und ein Tageslichtquotient von 2 % sollte in keinem Punkt unterschritten werden. (DIN 5034-1:2011)

3.3 Thermische und energetische Betrachtung

3.3.1 Anforderungen

3.3.1.1 Winterlicher Wärmeschutz

Die operative Temperatur ist der „Mittelwert aus Raumlufttemperatur und der flächenanteilig gemittelten Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen“ (DIN 4108-2:2013).

Die raumumschließenden Flächen haben also einen großen Einfluss auf die empfundene Temperatur und somit auf die thermische Behaglichkeit der Nutzer.
Darüber hinaus erfolgen Wärmeverluste und -einträge durch die Gebäudehülle. Diese sind hauptsächlich abhängig von: (DIN 4108-2:2013, S. 11)

- den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Bauteile der Gebäudehülle
- der Luftdichtheit der Gebäudehülle
- dem erhöhten Wärmestrom im Bereich der Wärmebrücken
- dem Gesamtenergiedurchlassgrad der verglasten Flächen, deren Größe und Orientierung
- der wirksamen Wärmekapazität der Außen- und raumumschließenden Flächen.

Um die Transmissionswärmeverluste durch die Außenbauteile zu verringern, müssen Materialien mit geringen Wärmeleitfähigkeiten gewählt werden.
Die Luftdichtheit ist ein weiterer wichtiger Aspekt zur Vermeidung der Wärmeverluste. Durch Fugen und Undichtheiten zirkuliert die Luft, was zu Wärmeverlusten führt. Eine Luftdichtheitsschicht raumseitig der Dämmung soll ein Einströmen von Raumluft in die Konstruktion verhindern. (DIN 4108-3)
Wärmebrücken sind Bereiche, wo der normal zum Bauteil auftretende Wärmestrom durch einen Wechsel in der Dicke der Bauteile, eine Durchdringung der Gebäudehülle durch Baustoffe mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit oder eine unterschiedlich große Innen- und Außenoberfläche verändert wird (Schild, et al., 2013, S. 151). Das sind zum Beispiel auskragende Balkonplatten, Attiken, Kanten und Ecken. Wärmebrücken führen zu deutlich höheren Transmissionswärmeverlusten und dadurch zu einer niedrigen Oberflächentemperatur an der Innenseite und möglicherweise Schimmel- und Tauwasserbildung. Um eine Beschädigung der Baumaterialien zu vermeiden, müssen diese Bereiche sorgfältig geplant werden. Mögliche Maßnahmen sind die thermische Trennung auskragender Bauteile und eine durchgehende Dämmebene. (DIN 4108-2 Beiblatt 2, 2006, S. 5)
Eine kompakte Bauweise verringert die Wärmeverluste durch die Gebäudehülle. Auch die Lage des Gebäudes hat einen Einfluss auf die Wärmeverluste eines Gebäudes: benachbarte Gebäude sowie Pflanzungen können ein Gebäude vor dem Wind schützen, und eine günstige Orientierung ermöglicht die Nutzung solarer Gewinne. (DIN 4108-2:2013)

3.3.1.2 Sommerlicher Wärmeschutz

Während im Winter solare Gewinne erwünscht sind, um den Heizwärmebedarf eines Gebäudes zu reduzieren, können diese im Sommer zu einer Überhitzung führen. Maßnahmen sind notwendig, um den Einsatz von Kühlsystemen zu vermeiden oder zu minimieren und gleichzeitig behagliche Temperaturen zu gewährleisten. Die Sonneneinträge, die meistens die größte Wärmequelle darstellen, hängen von verschiedenen Faktoren ab; das sind unter anderem:

- der Anteil an verglasten Flächen
- die Orientierung der verglasten Flächen sowie deren Neigung bei Dachfensterflächen
- der Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Außenbauteile: das ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines transparenten Bauteils für Sonnenenergie. Dieser sollte möglicherweise im Winter hoch sein und im Sommer niedrig sein.
- die Sonnenschutzmaßnahmen: diese sollten adaptiv sein, um die widersprüchlichen Anforderungen im Winter und im Sommer zu erfüllen.

Als Sonnenschutzmaßnahmen können konstruktive Maßnahmen wie auskragende Dächer und Balkone eingesetzt werden. Innen- oder außenliegende Sonnenschutzvorrichtungen wie Fensterläden, Rollläden, Jalousien und Markisen tragen auch zur Verringerung der Wärmeeinträge bei. Außenliegende Sonnenschutzvorrichtungen wie textile Rollos oder Lamellenraffstores sind effizienter, weil sie die solare Strahlung bereits vor der Glasebene abfangen. Bei einem innenliegenden Sonnenschutz geht die Wärme durch das Glas in den Raum; nur ein geringer Teil der Strahlung kann blockiert werden. Innenliegender Sonnenschutz in Form von Folien oder Textilien dienen also hauptsächlich als Blendschutz.

Dabei muss immer beachtet werden, dass der Sonnenschutz einen Einfluss auf das Tageslicht hat. Dieser Aspekt wird im Abschnitt 3.3 erläutert.

Neben den solaren Gewinnen tragen auch interne Lasten durch Personen, Geräte, Maschinen und Beleuchtung zur Erwärmung eines Raumes bei. Die Gebäude sollen möglicherweise durch passiven Maßnahmen wie die Nachtkühlung gekühlt werden. Wenn eine Nachtkühlung nicht möglich ist, zum Beispiel wegen hohen Außenlärmes oder aus Sicherheitsgründen, oder wenn sie nicht ausreichend ist, müssen aktive Kühlsysteme eingesetzt werden.

Die wirksame Kapazität der Bauteile hat auch einen großen Einfluss auf die sommerliche Behaglichkeit eines Gebäudes. Speicherfähige Bauteile nehmen während des Tages Wärme auf

und reduzieren also den Temperaturanstieg im Raum. Diese gespeicherte Wärme wird dann während der Nacht an die kühle Nachtluft abgegeben. Dabei sind nur die Bauteilschichten raumseits vor Wärmedämmschichten wirksam.
Schließlich hat die Raumgeometrie einen Einfluss auf eine mögliche Überhitzung: in kleinen Räumen steigt die Temperatur schneller, vor allem wenn die Fenster über zwei oder mehrere Orientierungen verfügen. (DIN 4108-2:2013)

3.3.2 Nachweisführung: die Energieeinsparverordnung

Alle Gebäude, die beheizt oder gekühlt werden, müssen die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) erfüllen. In folgendem Abschnitt werden die Anforderungen der EnEV an den Neubau von Nichtwohngebäuden beschrieben. Zuerst werden die wichtigen Begriffe definiert, dann werden die Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf und an die energetische Qualität der Gebäudehülle erläutert.

3.3.2.1 Grundlagen und wichtige Begriffe

Die Begriffe Nutzenergiebedarf, Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf werden in der DIN V 18599-1:2011 wie folgt definiert.
Der **Nutzenergiebedarf** ist der rechnerisch ermittelte Energiebedarf, der zur Konditionierung einer Gebäudezone notwendig ist, das heißt zur Heizung, Kühlung, Be- und Entlüftung, Befeuchtung, Beleuchtung und Trinkwarmwasserversorgung.
Unter **Endenergiebedarf** versteht man den rechnerisch ermittelten Energiebedarf, der der Anlagentechnik zur Verfügung gestellt wird, um bestimmte Parameter wie die Innenraumtemperatur, den Warmwasserbedarf oder die Beleuchtung sicherzustellen. Der Endenergiebedarf berücksichtigt also neben dem Nutzenergiebedarf alle Verluste der Anlagentechnik durch die Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe innerhalb der Bilanzgrenze „Gebäudehülle“.
Der **Primärenergiebedarf** ist der rechnerisch ermittelte Energiebedarf, der zusätzlich zum Energieinhalt des notwendigen Brennstoffs und der Hilfsenergien für die Anlagentechnik auch die Energiemengen einbezieht, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Gebäudes

bei der Rohstoffgewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen.

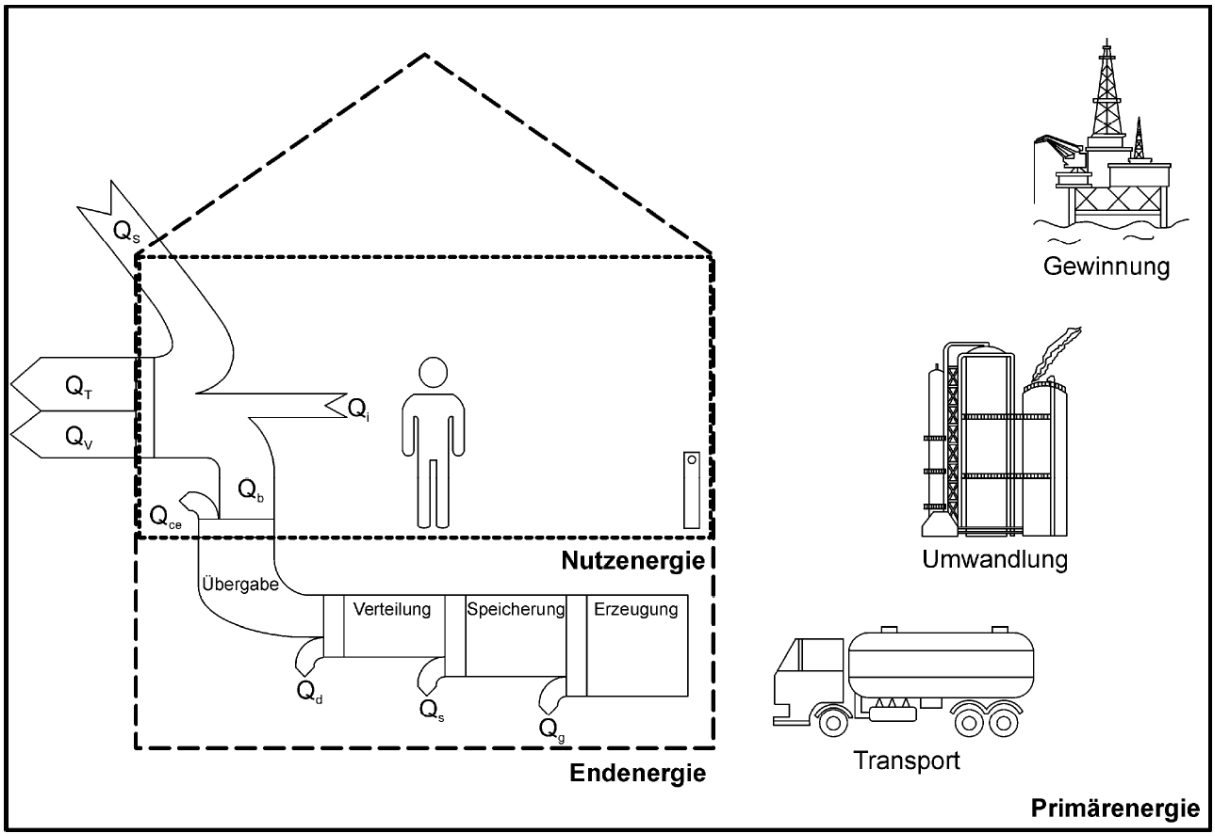


Abbildung 8: Definition der Nutzenergie, Endenergie und Primärenergie (Schild, et al., 2010)

In der EnEV wird der Primärenergiebedarf durch Multiplikation des Endenergiebedarfs mit dem Primärenergiefaktor des jeweiligen Brennstoffs erhalten. Die Primärenergiefaktoren sind der Tabelle A.1 der Anhang A der DIN V 18599-1:2011 zu entnehmen. Im Rahmen der EnEV sind die Werte für den **nicht erneuerbaren Anteil** zu verwenden.

Der Brennwert und der Heizwert sind zwei Maße für den Energieinhalt von Brennstoffen, das heißt die „Wärmemenge, die bei einer vollen Verbrennung unter einem konstanten Druck von 101 320 Pa aus einer Menge eines Brennstoffes gewonnen werden kann“ (DIN V 18599-1:2011, S.16). Der **Brennwert** enthält die bei der Wasserdampfkondensation entstehende Wärmemenge, während der **Heizwert** diese latente Wärme nicht umfasst.

In der DIN V 18599-1:2011 wird der Endenergiebedarf auf den Brennwert bezogen, die Primärenergiefaktoren sind aber auf den Heizwert bezogen. Daher ist noch ein Umrechnungsfaktor notwendig, um das Verhältnis zwischen Heizwert und Brennwert des Brennstoffes zu

berücksichtigen. Diese Umrechnungsfaktoren sind der Tabelle B.1 der Anhang B der DIN V 18599-1:2011 zu entnehmen.

3.3.2.2 Anforderung an den Jahres-Primärenergiebedarf

Der Jahres-Primärenergiebedarf eines Nichtwohngebäudes muss einen bestimmten Höchstwert nicht überschreiten. Dieser Wert wird auf die Nettogrundfläche bezogen und wird anhand eines Referenzgebäudes bestimmt, welche die gleiche Geometrie, Nettogrundfläche, Ausrichtung und Nutzung hat, wie das zu errichtende Gebäude und welche hinsichtlich seiner Ausführung den Vorgaben der Tabelle 1 der Anlage 2 der EnEV entspricht. Beim Referenzgebäude und bei dem zu errichtenden Gebäude müssen die Unterteilung hinsichtlich der Nutzung, die Randbedingungen und die verwendete Berechnungsverfahren gleich sein (EnEV, 2014, S.50-63). Die Ausführung des Referenzgebäudes ist im Anhang C zu finden.
Der Jahres-Primärenergiebedarf Q_p ist nach der Vornormenreihe DIN V 18599:2011 zu ermitteln. Diese Vornormenreihe beschreibt ein Verfahren, mit dem die Gesamtenergiebilanz von Gebäuden berechnet werden kann. Ermittelt werden die Energieaufwendungen für:

- die Heizung
- die Lüftung
- die Klimatisierung (Kühlung und Befeuchtung)
- die Trinkwarmwasserversorgung
- die Beleuchtung

sowie die benötigten Hilfsenergien (zum Beispiel Strom für Ventilatoren) (DIN V 18599-1:2011).
Die Nutzungsrandbedingungen und Klimadaten sind der DIN V 18599-10:2011 zu entnehmen.
Es ist zu beachten, dass es sich in der EnEV um den **nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf** handelt, da der „Jahres-Primärenergiebedarf Q_p“ durch die Bewertung des Endenergiebedarfs mit Primärenergiefaktoren für den nicht erneuerbaren Anteil ermittelt wird.

3.3.2.3 Anforderung an die energetische Qualität der Gebäudehülle

Zur Gewährleistung der energetischen Qualität der Gebäudehülle wurden Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche eingeführt. Die Bauteile sind in vier Kategorien gegliedert:

- Opake Außenbauteile
- Transparente Außenbauteile
- Vorhangfassade
- Glasdächer, Lichtbänder, Lichtkuppeln

Für jede Kategorie muss der Mittelwert des Wärmedurchgangskoeffizienten des jeweiligen Bauteiltyps unter Berücksichtigung der Flächenanteile berechnet werden und mit den Höchstwerten der Tabelle 2 der Anlage 2 der EnEV verglichen werden. (Schild, et al., 2010, S. 9)

Tabelle 3: Höchstwerte für die U-Werte der Hüllfläche von Nichtwohngebäuden gemäß EnEV

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 ≥ 19 °C	Zonen mit Raum-Solltemperaturen im Heizfall von 12 bis < 19 °C
1a	Opake Außenbauteile, soweit nicht in Bauteilen der Zeilen 3 und 4 enthalten	nach EnEV 2009 *	$\bar{U}$ = 0,35 W/(m²·K)	$\bar{U}$ = 0,50 W/(m²·K)
1b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U}$ = 0,35 W/(m²·K)	
1c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U}$ = 0,28 W/(m²·K)	
2a	Transparente Außenbauteile, soweit nicht in Bauteilen der Zeilen 3 und 4 enthalten	nach EnEV 2009 *	$\bar{U}$ = 1,9 W/(m²·K)	$\bar{U}$ = 2,8 W/(m²·K)
2b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U}$ = 1,9 W/(m²·K)	
2c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U}$ = 1,5 W/(m²·K)	
3a	Vorhangfassade	nach EnEV 2009 *	$\bar{U}$ = 1,9 W/(m²·K)	$\bar{U}$ = 3,0 W/(m²·K)
3b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U}$ = 1,9 W/(m²·K)	
3c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U}$ = 1,5 W/(m²·K)	
4a	Glasdächer, Lichtbänder, Lichtkuppeln	nach EnEV 2009 *	$\bar{U}$ = 3,1 W/(m²·K)	$\bar{U}$ = 3,1 W/(m²·K)
4b		für Neubauvorhaben bis zum 31. Dezember 2015 **	$\bar{U}$ = 3,1 W/(m²·K)	
4c		für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 **	$\bar{U}$ = 2,5 W/(m²·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.

Bei der Berechnung sind die Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen gegen unbeheizte Räume oder Erdreich zusätzlich mit dem Faktor 0,5 zu gewichten. Für den Mittelwert der an das Erdreich angrenzenden Bodenplatten bleiben die Flächen unberücksichtigt, die mehr als 5 m vom äußeren Rand des Gebäudes entfernt sind. Für Zonen mit unterschiedlichen Raum-Solltemperaturen im Heizfall ist die Berechnung getrennt durchzuführen.

3.3.2.4 Zonierung

Für die Berechnung des Energiebedarfs kann das Gebäude in Zonen unterteilt werden. Die Unterteilung in Zonen erfolgt, sodass in jeder Zone die berechneten Nutzenergiemengen,

Wärmequellen und Wärmesenken ähnlich sind. Das wichtigste Kriterium zur Bildung einer Zone ist also eine einheitliche Nutzung. Bereiche mit unterschiedlichen Nutzungen müssen in unterschiedliche Zonen geteilt werden. Dann müssen die Bereiche noch unterteilt werden, wenn sie nicht die gleiche Art der Konditionierung aufweisen. Dazu kommen noch weitere Kriterien wie zum Beispiel der Anteil an transparenten Flächen in der Fassade. Diese Kriterien sind in den Tabellen 7 und 8 der DIN V 18599-1 aufgelistet. Das Gebäude ist in so viele Zonen wie notwendig zu teilen, um die wesentlichen Unterschiede berücksichtigen zu können. Jedoch erhöht sich mit der Anzahl an Zonen der Berechnungsaufwand. Deshalb können kleine Zonen anderen Zonen zugeschlagen werden, wenn die Nutzung und die Art der Konditionierung nicht zu unterschiedlich sind.

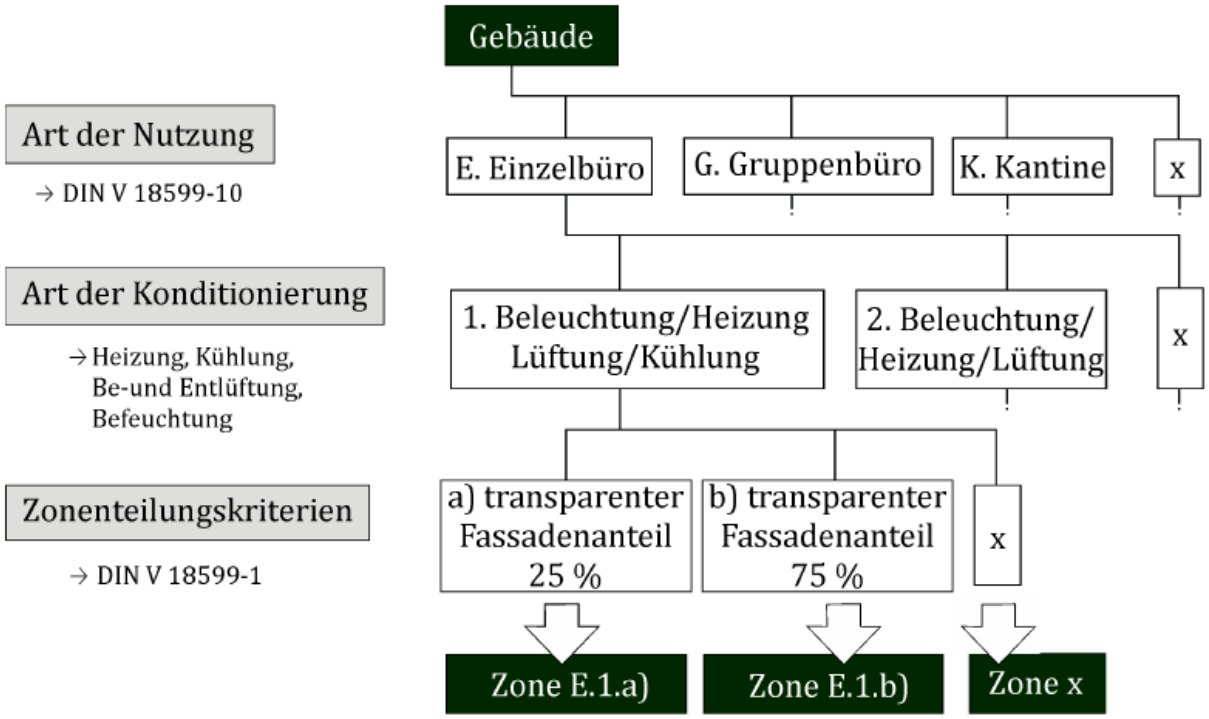


Abbildung 9: Kriterien zur Bildung von Zonen (DIN V 18599-1:2016)

Der Energiebedarf wird für jede Zone berechnet und die Ergebnisse werden summiert, um den Energiebedarf des Gebäudes zu ermitteln. (DIN V 18599-1, S. 51-55)

3.3.2.5 Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes

Laut der Energieeinsparverordnung müssen die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 eingehalten werden. Dafür lässt die DIN 4108-2 zwei Nachweisverfahren zu.

Die erste Möglichkeit ist das Sonneneintragskennwerteverfahren. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn der vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh} in kritischen Räumen unterhalb eines zulässigen Grenzwertes S_{zul} liegt: $S_{vorh} \leq S_{zul.}$

Die kritischen Räume sind die Räume, die über den größten Sonneneintrag verfügen und zu den höchsten Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes führen.

Der **vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh}** ist das Verhältnis der energetisch gewichteten Fensterfläche zur Grundfläche des kritischen Raumes:

$$S_{vorh} = \frac{\sum_j A_{W,j} \cdot g_{tot,j}}{A_G}$$

Dabei bedeuten:

$A_{w,j}$ die Fensterfläche des *j*-ten Fensters in m^2

$g_{tot,j}$ der Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases einschließlich Sonnenschutz des j-ten Fensters

A_G die Nettogrundfläche des Raumes oder des Raumbereichs in m^2

Der Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases g_{tot} ist das Produkt des Gesamtenergiedurchlassgrades des Glases für senkrechten Strahlungseinfall nach DIN EN 410 *g* mit dem Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen F_C: $g_{tot}=g.F_C$

Der **zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul}** ist die Summe von sechs Termen zur Berücksichtigung:

- der Nachtlüftung und der Bauart (leicht, mittel, schwer)
- des grundflächenbezogenen Fensterflächenanteils
- des Gesamtenergiedurchlassgrades der transparenten Außenbauteile
- der Fensterneigung
- der Orientierung

- des Einsatzes passiver Kühlung

Die Werte für diese einzelnen Termen sind in der Tabelle 8 der DIN 4108-2:2013 zu finden. Der erste Term zur Berücksichtigung der Nachtlüftung und der Bauart hängt von der Klimaregion des Gebäudes ab. In Deutschland gibt es drei Sommerklimaregionen.

Das zweite Nachweisverfahren ist eine thermische Gebäudesimulation unter den Randbedingungen nach dem Abschnitt 8.4.2 der DIN 4108-2:2013. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die Anzahl der Übertemperaturgradstunden, an denen die operative Innentemperatur einen Bezugswert $\theta_{b,op}$ überschreitet, kleiner als der Anforderungswert von 500 Stunden pro Jahr für Nichtwohngebäude und 1200 Stunden pro Jahr für Wohngebäude ist.
Der Bezugswert der Innentemperatur $\theta_{b,op}$ hängt von der Sommerklimaregion des Gebäudes ab und ist in der Tabelle 9 der DIN 4108-2 zu finden. (DIN 4108-2:2013)

3.3.2.6 Nebenanforderungen

Neben die Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf, die energetische Qualität der Gebäudehülle und den sommerlichen Wärmeschutz stellt die EnEV andere Anforderungen an Gebäude. In diesem Abschnitt werden einige erwähnt.
Laut der EnEV müssen „die Anforderungen des Mindestwärmeschutzes nach den anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden.“. Diese Anforderungen sind in der DIN 4108-2:2013 definiert. Der Abschnitt 5 der DIN 4108-2 gibt Mindestwerte für Wärmedurchlasswiderstände von Bauteilen.
Dazu kommt, dass der Einfluss der Wärmebrücke so gering wie möglich gehalten werden muss. Der verbleidende Einfluss der Wärmebrücken kann auf drei verschiedene Weisen berücksichtigt werden: (Schild, et al., 2010)

- eine pauschale Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten aller Bauteile der Gebäudehülle um $\Delta U_{WB} = 0{,}1\ W/m^2K$;
- eine pauschale Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten aller Bauteile der Gebäudehülle um $\Delta U_{WB} = 0{,}05\ W/m^2K$. Das ist nur zulässig, wenn alle Anschlüsse gemäß der DIN 4108 Beiblatt 2 ausgeführt sind, oder wenn ein Gleichwertigkeitsnachweis vorliegt;

- eine detaillierte Berechnung der spezifischen längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ.

3.4 Ökobilanzierung

Durch die steigenden Anforderungen an den Wärmeschutz wird der Energieverbrauch für den Betrieb eines Gebäudes immer niedriger. Der Anteil an Energie, der für die Konstruktion des Gebäudes benötigt wird, nimmt also gegenüber dem Anteil Nutzung eine zunehmende Bedeutung (Braune, et al., 2018). Eine Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes ist notwendig, um seinen Einfluss auf die Umwelt zu minimieren. Dafür hat sich die Methode der Ökobilanzierung entwickelt, um die Umweltauswirkungen eines Produkts oder Systems zu quantifizieren und verschiedene Alternativen zu vergleichen. In diesem Abschnitt werden die Ökobilanzierung definiert und die normativen Grundlagen nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 erklärt. Dann werden ausgewählte Umweltindikatoren beschrieben, und die Datengrundlage und die Methodik nach DGNB werden klar gemacht.

3.4.1 Definition und normative Grundlagen

Die Ökobilanzierung ist eine Methode zur Analyse der Umweltwirkungen und des Energieverbrauches, die bei der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts entstehen.

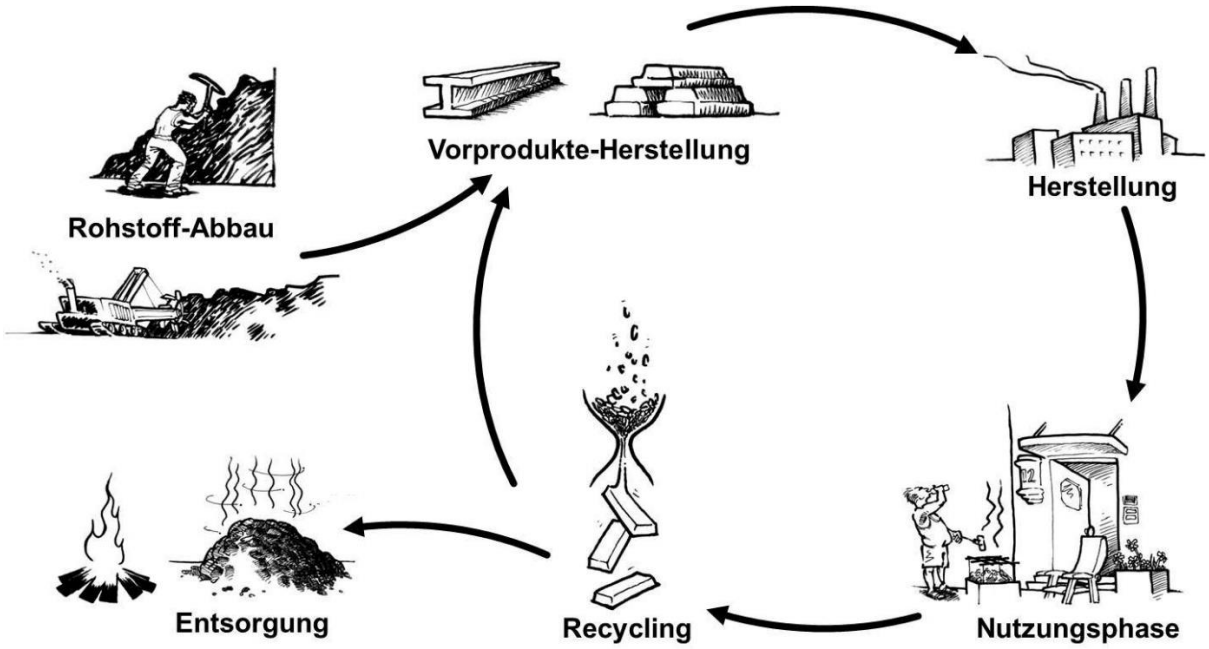


Abbildung 10: Lebenszyklus eines Gebäudes (Fraunhofer Institut für Bauphysik)

Die Ökobilanz ist in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 wie folgt definiert: „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“. Diese zwei Normen definieren die Grundlagen und die Anforderungen zur Erstellung einer Ökobilanz. Diese Methode dient zum besseren Verständnis und zur Berücksichtigung der Umweltwirkungen. Dadurch können mögliche Umweltbelastungen schon in den frühen Planungsphasen identifiziert und möglicherweise vermieden werden.

Eine Ökobilanzierung besteht aus vier Phasen: (DIN EN ISO 14040:2009)

- **Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen:** Definition der Systemgrenze und des Detaillierungsgrades
- **Sachbilanz-Phase**: Bestandsaufnahme von Input-/Outputdaten, Sammlung der Daten
- **Wirkungsabschätzung**: Beurteilung der Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen, Herstellung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen den Daten der Sachbilanz und den Umweltauswirkungen
- **Auswertung**: gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung

Funktionelle Einheit

Eine funktionelle Einheit ist der „quantifizierte Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“. (DIN EN ISO 14040:2009)

Systemgrenzen

Die Systemgrenzen legen räumlich und zeitlich fest, was in die Bewertung einbezogen wird.

3.4.2 Umweltindikatoren

Eine Ökobilanz basiert auf verschiedene Indikatoren, um den Energieeinsatz und die Umweltwirkungen wie Emissionen in der Luft, Einleitungen in Wasser und Verunreinigung von Boden zu erfassen, die durch die Herstellung eines Produktes entstehen.

In dieser Arbeit werden nur zwei Indikatoren berücksichtigt: der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PE_{ne}) für die Ressourceninanspruchnahme, und das Treibhauspotential (GWP: Global Warming Potential) für die Umweltwirkung.

Der **nicht erneuerbare Primärenergiebedarf** ist der Bedarf an nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Eine Verringerung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs führt zu einem niedrigen Ressourcenverbrauch von fossilen Energieträgern. Er wird auf die Fläche und Jahr bezogen und in $MJ/m^2_{NGF}.a$ angegeben.

Das **Treibhauspotential** ist ein Maß für die Emissionen, die zum Treibhauseffekt und somit zur globalen Erwärmung beitragen. Er wird in Kohlendioxid-Äquivalente ausgedrückt (kg CO_2-Äquivalent). Da die Treibhausgase unterschiedlich lange in der Atmosphäre bleiben, muss dieser Wert auf einen Zeitraum bezogen werden. In der Datenbank Ökobaudat wird nach EN 15804 das Treibhauspotential auf einen Zeitraum von 100 Jahren bezogen. (DGNB, 2018)

3.4.3 Datengrundlage

3.4.3.1 Datenbank Ökobaudat

Die Datenbank Ökobaudat ist eine deutsche Datenbank für die ökologische Bewertung von Bauwerken. Sie wurde im Rahmen von Forschungsprojekten der Forschungsinitiative „Zukunft

Bau“ entwickelt und wird von dem Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat online zur Verfügung gestellt. Diese Datenbank ist seit 2013 konform zur DIN EN 15804. Sie bietet generische und herstellerspezifische Datensätze zu über 1000 Bauprodukten, sowie Datensätze zu Transportprozessen und End-of-Life Szenarien. (BMI)

3.4.3.2 Umweltproduktdeklarationen Typ III

Produktspezifische Daten können in Umweltproduktdeklarationen gefunden werden. Für Ökobilanzen werden Umweltproduktdeklarationen Typ III (auf Englisch EPD: Environmental Product Declaration) nach DIN EN ISO 14025 benutzt. Sie beinhalten quantitative Aussagen zu den Umweltaspekten eines Produkts. Sie beruhen auf der Ökobilanz-Methode gemäß DIN EN ISO 14040: es werden die Umweltauswirkungen eines Produktes während seines gesamten Lebenszyklus erfasst; und gegebenenfalls enthalten sie ergänzende Informationen. Die EPD werden von unabhängigen Dritten auf Vollständigkeit, Plausibilität und Normenkonformität geprüft und können auf der Internet-Plattform des Instituts Bauen und Umwelt (IBU) gefunden werden: https://ibu-epd.com/. (IBU)

3.4.4 Ökobilanz nach DGNB

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V. wurde im Jahre 2007 von 16 Initiatoren der Bau- und Immobilienwirtschaft mit dem Ziel gegründet, die Nachhaltigkeit im Bauwesen zu fördern. Dafür wurde gemeinsam mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) das Zertifizierungssystem DGNB entwickelt, um die Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren objektiv zu beschreiben und zu bewerten. Die Bewertung erfolgt anhand von Kriterien, die in den sechs folgenden Themengebieten gegliedert sind:

- Ökologische Qualität
- Ökonomische Qualität
- Soziokulturelle und funktionale Qualität
- Technische Qualität
- Prozessqualität
- Standortqualität

Die DGNB Zertifizierung wird für Neubauten in Platin, Gold und Silber vergeben. Um eine einheitlich hohe Qualität der Gebäude zu garantieren, muss für jede Auszeichnung nicht nur ein Gesamterfüllungsgrad erreicht werden, sondern auch ein Mindesterfüllungsgrad in allen ergebnisrelevanten Themengebieten.

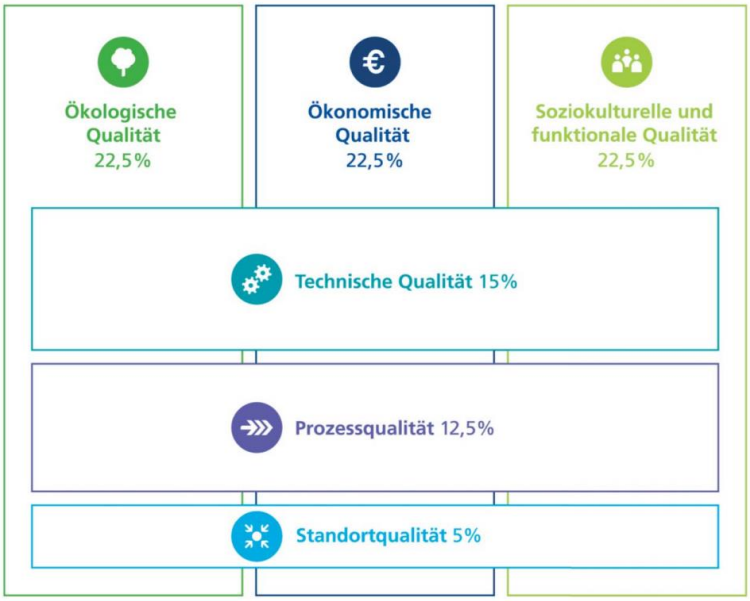


Abbildung 11: Themengebiete für die DGNB Zertifizierung (DGNB, 2018)

Die Ökobilanz zählt zur einer der sechs Kriterien im Themengebiet ökologische Qualität. Die Methode für die Ökobilanz für Neubauten nach DGNB ist im Kriterium „ENV1.1 Ökobilanz des Gebäudes“ des Kriterienkatalogs Gebäude Neubau 2018 definiert. Um die Ergebnisse von Ökobilanzen vergleichen zu können ist es wichtig, gleiche Regeln und Methoden zu verwenden. Dafür werden die Methodik, die Datenqualität und die Systemgrenzen festgelegt.

Methodik

Die Grundlage für die Berechnung der Ökobilanz ist die DIN EN 15978. Diese Norm beschreibt die Methodik für eine Ökobilanzierung auf der Gebäudeebene und die geltenden Systemgrenzen.

Datenqualität

Die aktuell gültige Version der Ökobaudat soll verwendet werden. Spezifische Daten wie zum Beispiel EPD sollen gegenüber generischen Daten bevorzugt werden, solange sie die methodischen Vorgaben der DIN EN 15804 einhalten.

Systemgrenzen

Das gesamte Gebäude ohne Außenanlagen wird über seinen kompletten Lebenszyklus betrachtet.

Die funktionelle Einheit ist die Beschreibung des zu bewertenden Gebäudes. Folgende Abbildung zeigt, welche Lebensphasen und Prozesse für eine Ökobilanz nach der DGNB Methode relevant sind.

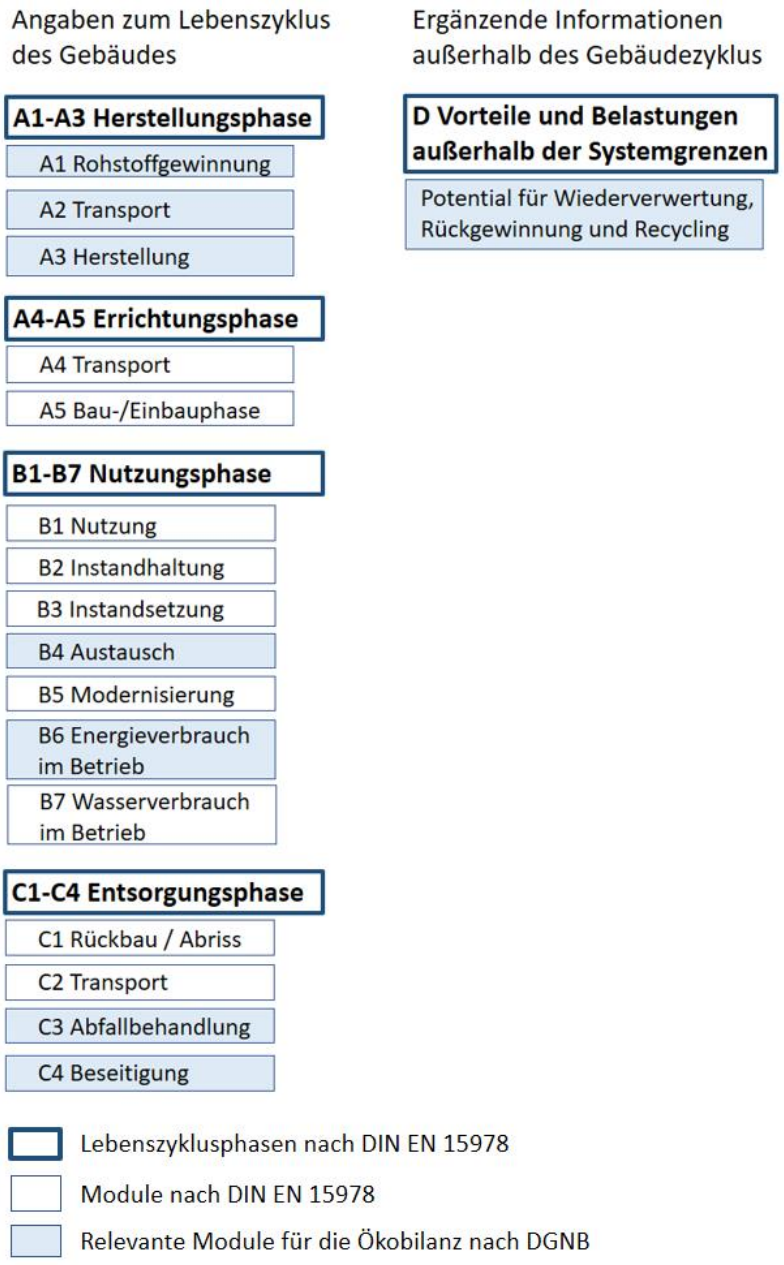


Abbildung 12: Lebenszyklusphasen und relevante Module der DIN EN 15978 für die Ökobilanz nach DGNB, eigene Darstellung

A1-A3 Herstellungsphase

Für die Herstellungsphase werden aggregierte Daten aus Ökobaudat oder aus EPD verwendet.

B4 Austausch

Der Betrachtungszeitraum ist für jedes Nutzungsprofil spezifisch festgelegt und beträgt meistens 50 Jahre, außer für die Nutzungsprofile Produktion und Logistik, für die er 20 Jahre beträgt.

Die Lebensdauer für Baustoffe und -produkte werden der BBSR-Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB“ (2017) oder den Umweltproduktdeklarationen (EPD) gemäß DIN EN 15804 entnommen. Hier wird angenommen, dass der Austausch mit dem selben Produkt erfolgt. Bei der Ökobilanzberechnung wird nur die Herstellung und die Entsorgung des ausgetauschten Produkts berücksichtigt.

B6 Energieverbrauch im Betrieb

Die Nutzung von Energie im Betrieb wird gemäß der EnEV 2014 ermittelt. Dabei ist der Endenergiebedarf der unterschiedlichen Energieträger und nicht der Primärenergiebedarf relevant. Die Ökobilanzwerte des Strombedarfs sind mit dem deutschen Strom-Mix laut Ökobaudat zu ermitteln. Die Ökobilanzwerte für weitere Energieträger sind zu benennen und mit den Ökobaudat-Datensätzen zu ermitteln.

C1-C4 Entsorgungsphase und D Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen

Für die Entsorgungsphase und die Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen werden Daten aus Ökobaudat oder aus EPD entnommen.

Die Ergebnisse sind auf die Nettoraumfläche (NRF) nach DIN 277 ohne Fahrgassen der Tiefgaragen und auf ein Jahr zu beziehen. Die Nettoraumfläche ist die „Teilfläche der Brutto-Grundfläche (BGF), die sämtliche Grundflächen der nutzbaren Räume aller Grundrissebenen des Bauwerks umfasst“ (DIN 277-1). Die Ergebnisse werden dann mit Referenzwerten verglichen, die von dem Nutzungsprofil abhängig sind. Dabei ist zu beachten, dass der Jahres-Primärenergiebedarf in der EnEV nicht auf die Nettoraumfläche bezogen ist.

Ökobilanzergebnisse

Die Umweltwirkungspotentiale ergeben sich durch die Summe der entstehenden Umweltwirkungspotentiale für die Konstruktion und für die Nutzung des Gebäudes. (DGNB, 2018)

4 Verbesserungsmöglichkeiten durch den Einsatz von BIM

In diesem Kapitel werden die Verbesserungsmöglichkeiten bei der Planung und Optimierung von drei Fassadenvarianten durch den Einsatz eines BIM-Planungsprozesses untersucht. Es werden zuerst die verwendeten Softwareprodukte für die Erstellung des BIM-Modells, den Nachweis der visuellen und thermischen Anforderungen und die Ökobilanz erklärt. Dann werden die Arbeitsabläufe ohne und mit dem Einsatz von BIM verglichen. Es folgt eine Untersuchung der heutigen Möglichkeiten des Datenaustausches zwischen dem BIM-Modell und den fachspezifischen Softwareprodukten.

4.1 Verwendete Software

4.1.1 Autodesk Revit 2017

Für diese Arbeit wurde die Software Autodesk Revit 2017 für die Erstellung des BIM-Modells verwendet. Revit ist eine BIM-Software, die Funktionen für die architektonische Planung, die Tragwerksplanung und die Gebäudetechnik umfasst. Sie ermöglicht einen multidisziplinären und kollaborativen Entwurfsprozess durch die Bereitstellung eines BIM-Modells, auf den alle Projektbeteiligten zugreifen können (Autodesk Revit, 2018a).

Revit basiert auf einer objektorientierten und parametrischen Modellierweise. Objekte werden mit sogenannten „Familien“ erstellt. Für die architektonische Planung gibt es unter anderem die Familien Wand, Tür, Fenster, Stütze, Dach, Decke, Fassadensysteme, Treppe, Rampe, Geländer… Innerhalb jeder Familie befinden sich unterschiedliche Familientypen (auch Typen genannt). Diese Typen können dupliziert und geändert werden. Die Geometrie und Eigenschaften jedes Typen werden anhand von Parametern gesteuert. Zwei Typen von Türen können sich zum Beispiel durch ihre Abmessungen und Materialien unterscheiden. (Autodesk, 2018c)

Revit ermöglicht den Export von Gebäudemodellen nach den folgenden IFC-Versionen: IFC4, IFC2x3, und IFC2x2 (Autodesk, 2018b). Es können auch Mengen automatisch berechnet werden und die Tabellen können im Textformat .txt exportiert werden und in Excel importiert werden.

Die verwendete Version von Revit verfügt über das Plug-in „b.i.m.m. Tools“, das einige Arbeitsabläufe vereinfacht. Es wurde vor allem die Funktion des LevelManagers benutzt. Der LevelManager ermöglicht die Steuerung von Ebenen und ihre Zuordnung an Geschosse.

4.1.2 Hottgenroth Energieberater 18599 3D

Energieberater 18599 3D ist eine Software des Herstellers Hottgenroth für die energetische Planung und Bewertung von Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die Bilanzierung kann nach DIN 4108-6 und DIN 4701-10/12 oder nach DIN V 18599 erfolgen. Diese Software wurde von der 18599 Gütegemeinschaft anhand von Prüfbeispielen, die allgemein zugänglich sind, validiert.

Der Energieberater 18599 3D bietet zwei Möglichkeiten, um die Hüllfläche eines Gebäudes einzugeben. Die erste Möglichkeit ist die händische Eingabe der Hüllfläche. Für jedes Bauteil der Gebäudehülle müssen folgende Eigenschaften eingegeben werden:

- Bauteiltyp: Wand gegen außen / unbeheizt / Erdreich, Dach gegen außen, Fenster gegen außen / unbeheizt …
- Fläche
- Neigung
- Orientierung
- U-Wert
- Für Fenster: g-Wert, Rahmenanteil, Sonnenschutz
- Angrenzende Zonen

Der U-Wert eines Bauteils kann entweder manuell eingegeben werden, oder das Bauteil kann im Bauteil-Katalog definiert werden, dann wird sein U-Wert automatisch berechnet, wie auf der Abbildung 13 ersichtlich ist.

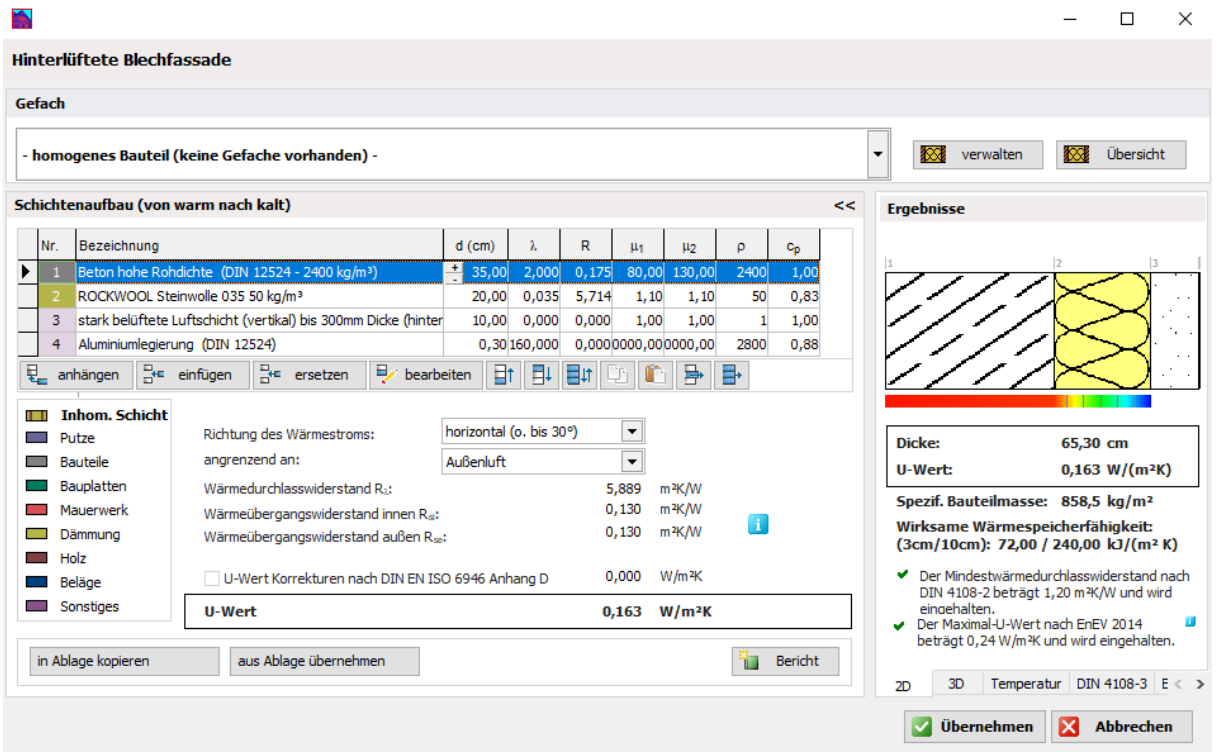


Abbildung 13: Definition einer hinterlüfteten Blechfassade im Bauteil-Katalog im Energieberater 18599 3D

Die zweite Möglichkeit besteht darin, das Gebäude in dem integrierten CAD-Modul „HottCAD“ zu modellieren oder mit einer IFC-Datei zu importieren. Die Modellierung erfolgt in HottCAD mit folgenden Elementen: Außenwand, Innenwand, Fenster, Tür, Decke und Dach. Die Fenster und Türen müssen zu einer Wand gehören und werden als Abzugsfläche definiert. Im Gegensatz zu Revit gibt es hier keine speziellen Bauteiltypen für Vorhangfassaden. Die Vorhangfassaden müssen als Fenster modelliert werden. Danach kann in der Hüllflächentabelle eingegeben werden, dass diese Fenster für die Ausführung des Referenzgebäudes als Vorhangfassade betrachtet werden müssen. Die U-Werte der Bauteile können auch direkt in HottCAD eingegeben werden. Die Zonierung basiert auf Räumen, die entweder automatisch oder händisch modelliert werden können. Diese Räume können dann Zonen zugeordnet werden.

Um eine Nachmodellierung des Gebäudes zu vermeiden, gibt es auch die Möglichkeit ein bestehendes Modell im IFC-Format zu importieren. Diese Funktion befindet sich noch in Entwicklung. Der Hersteller gibt Anforderungen, damit das Modell korrekt importiert wird und damit die Berechnung erfolgen kann. Diese sind:

- Die Dateien müssen in der IFC Version 2x3 Coordination View 2.0 vorliegen
- Das Gebäude muss eine klassische Geschossstruktur aufweisen (Keller – EG – OG – Dach)

- Gebogene Wände oder Wände mit nicht parallelen Seitenflächen können im Moment nur visuell dargestellt, aber nicht berechnet werden. Annäherungen können durch das manuelle Setzen von mehreren Ecken realisiert werden.
- Decken müssen als gerades Prisma vorliegen. Ein Prisma ist ein geometrischer Körper, dessen Seitenkanten parallel und gleich lang sind und der ein Vieleck als Grundfläche hat. Ein gerades Prisma entsteht, wenn das die Grundfläche beschreibende Vieleck mittels Parallelverschiebung senkrecht zur Grundfläche verschoben wird. Öffnungen (Fenster und Türen) müssen auch als prismatischer Körper vorliegen. Für Dächer gibt es keine speziellen geometrischen Voraussetzungen (Hottgenroth Software, 2017).

Beim Import werden die Bauteile in der HottCAD-Geometrie konvertiert und können gegebenenfalls bearbeitet werden. Die Bauteile, die keinen HottCAD-Elementen entsprechen, werden als „externe Bauteile“ in grün angezeigt und fließen in die Berechnung nicht ein. (Hottgenroth Software)

Mithilfe des Gebäudemodells erfolgt die Erfassung der Hüllfläche automatisch. Die automatische Erfassung anhand des Modells in HottCAD bietet den Vorteil, dass Fehler bei der Flächenerfassung einfacher vermieden werden. Vor allem bei großen Projekten kann die Hüllflächentabelle schnell unübersichtlich werden. Die Nutzung eines Gebäudemodells garantiert die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und ermöglicht im Fall von Projektänderungen eine schnellere Anpassung der Berechnung. Dabei wird vorausgesetzt, dass beim IFC-Import alle Abmessungen korrekt übertragen wurden.

4.1.3 DIALux evo 8

DIALux evo 8 ist eine Software zur Planung, Berechnung und Visualisierung von Licht für Innen- und Außenräume. Dieses kostenlose Programm wurde von der Firma DIAL GmbH entwickelt und eignet sich sowohl für die Berechnung von Tageslicht als auch von Kunstlicht mithilfe von Produktdaten von Leuchtenhersteller. Für diese Arbeit wurde DIALux für die Berechnung des Tageslichtquotienten verwendet. Das Gebäude muss in dem Programm DIALux modelliert werden. Dafür bieten sich zwei Möglichkeiten: die Nachmodellierung anhand von DWG-Dateien, oder der Import einer IFC-Datei. DIAL ist Mitglied von Buildingsmart und unterstützt den open BIM Ansatz durch die Entwicklung einer Funktion zum Import von IFC-Dateien. Es

handelt sich aber noch um eine „Beta-Feature“: es kann vorkommen, dass der Import nicht funktioniert oder Fehler aufweist (DIAL, 2017). DIAL stellt auch Voraussetzungen bezüglich der Modellierung und der Export-Einstellungen für einen guten IFC-Import. Diese sind:

- Logische Gebäudestruktur: DIALux evo setzt mindestens ein Gebäude mit Etage und Wänden voraus. Ohne (logisches) Gebäude wird der Import abgebrochen.
- Modellierung mit richtigen Familien
- Export Einstellungen: IFC Version 2x3
- Mehrschichtige Bauelemente sollten nicht in einzelne Objekte aufgeteilt werden.
- Um die Import- und Berechnungsdauer zu reduzieren, wird empfohlen, Möbel nicht zu importieren. Für die Lichtplanung ist es manchmal ausreichend, nur eine Etage zu importieren und nicht das ganze Gebäude.

4.1.4 Excel 2016

Excel ist ein Tabellenkalkulationsprogramm von dem Softwarehersteller Microsoft. Text-Dateien können importiert und nachbearbeitet werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde das Programm für die Berechnung der Ökobilanz, die Bildung der Mittelwerte der Tageslichtquotienten und die graphische Darstellung von Ergebnissen in Diagrammen verwendet.

4.2 Arbeitsabläufe ohne und mit BIM

Wie oben schon erwähnt, ist der Import von IFC-Dateien in den fachspezifischen Programmen noch nicht vollständig funktionsfähig. Das ist einer der Gründe dafür, dass die BIM-Planungsmethode noch nicht überall umgesetzt wird. In der Folge werden Arbeitsabläufe ohne und mit Einsatz von BIM beschrieben. Diese Beschreibung erfolgt für die spezifische Aufgabe der Vergleich von Fassadenvarianten anhand einer Ökobilanz, nachdem die thermischen und visuellen Anforderungen nachgewiesen wurden.

4.2.1 Arbeitsablauf ohne Einsatz von BIM

Bei einem konventionellen Planungsprozess werden Fassadenvarianten anhand von CAD-Werkzeugen gebildet, und dann wird die Dokumentation erstellt. Die 2D-Pläne werden durch

DWG-Dateien, PDF-Dateien oder ausgedrückte Pläne ausgetauscht. Die relevanten Daten müssen dann in den fachspezifischen Softwareprodukten händisch eingegeben werden. In den Softwareprodukten Hottgenroth Energieberater 18599 3D und DIALux soll das Gebäude erneut modelliert werden. Für die Ökobilanz werden die Mengen aus den 2D-Plänen ermittelt, und händisch in Excel eingegeben.

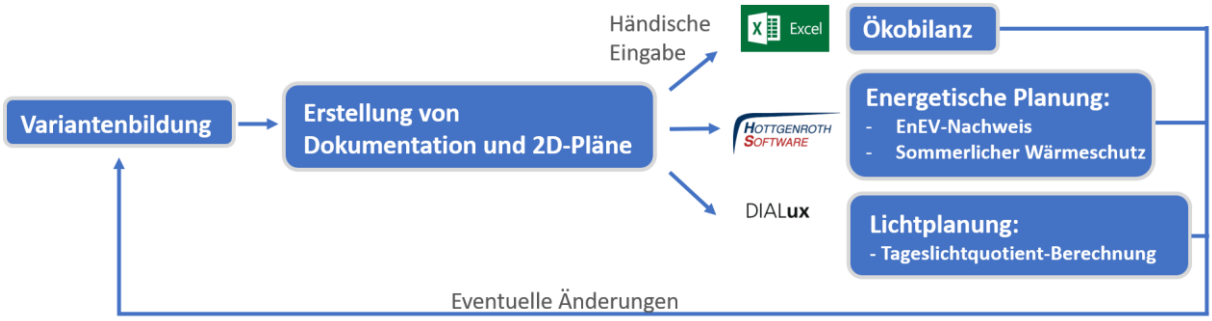


Abbildung 14: Ablauf bei einem konventionellen Planungsprozess

4.2.2 Optimierungspotentiale durch den Einsatz eines BIM-Modells

Im Idealfall, das heißt wenn der Datenaustausch zwischen dem BIM-Modell und den Planungssoftwareprodukten fehlerfrei funktionieren würde, würde die Variantenbildung einmal in dem BIM-Modell erfolgen. Aus diesem Modell könnten automatisch die Gebäudemodelle mit den notwendigen Daten in die Software Hottgenroth und DIALux übertragen werden. Aus dem BIM-Modell könnten außerdem alle Materialmengen ermittelt und nach Excel exportiert werden, um diese mit den relevanten Umweltindikatoren zu multiplizieren. Nach den Berechnungen in den fachspezifischen Softwareprodukten würden die gegebenenfalls notwendigen Änderungen direkt in dem BIM-Modell gemacht werden.

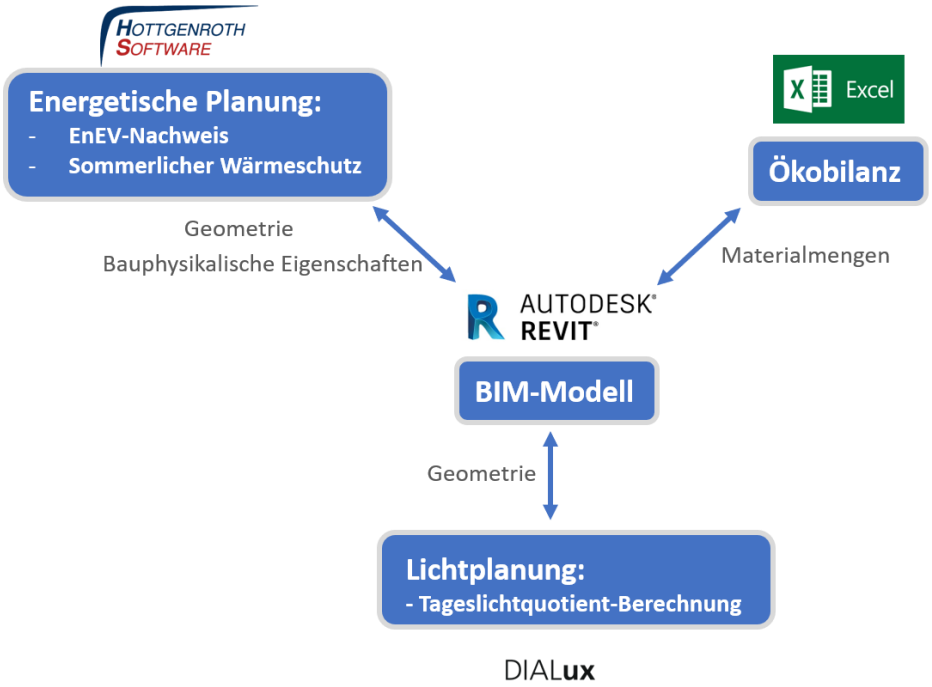


Abbildung 15: Idealer Ablauf bei einem BIM-gestützten Planungsprozess

In der Folge wird untersucht, inwieweit die Umsetzung der BIM-Planungsmethode heute möglich ist. Die Software Hottgenroth bietet eine IFC-Import sowie -Export Funktion. In der Software DIALux ist lediglich der Import von IFC-Dateien möglich. Diese drei Übertragungswege werden untersucht.

Abbildung 16: Vorhandene Schnittstellen zwischen Autodesk Revit und den Softwareprodukten DIALux und Hottgenroth

Die heutigen Möglichkeiten zur Beschleunigung der Ökobilanz werden dann erläutert.

4.3 EnEV-Nachweis

4.3.1 Methodik

Zuerst wird die Übertragung von IFC-Dateien von Revit nach Hottgenroth Energieberater 18599 3D untersucht. Die notwendigen Daten für den EnEV-Nachweis werden aufgelistet. Auf dieser Basis werden Testgebäude entwickelt. Diese Gebäude werden in Revit modelliert, nach IFC exportiert und dann in die Software Hottgenroth importiert. Die Modelle werden nach dem Import kontrolliert und auf Fehler untersucht. Zuerst wird das Modell graphisch überprüft. Wenn keine Fehler offensichtlich sind, werden alle wichtigen Abmessungen nachgemessen und mit dem Revit-Modell verglichen. Dann wird überprüft, ob die bauphysikalischen Werte korrekt übertragen wurden. Wenn Räume nicht schon vorhanden waren, wird ein Raum definiert und einer Zone zugeordnet, damit die Berechnung möglich wird. Die Hüllflächentabelle wird dann aufgerufen. Es wird anschließend überprüft, ob die automatische Erfassung der Hüllfläche korrekt erfolgt ist.
Die Übertragung von IFC-Dateien von Hottgenroth nach Revit wird auch untersucht.

4.3.2 Notwendige Daten für den EnEV-Nachweis

Für die Erstellung eines EnEV-Nachweises sind folgende Daten notwendig und müssen im Modell enthalten sein:

- Bauteiltyp: in der EnEV gibt es unterschiedliche Anforderungen für die unterschiedlichen Bauteiltypen
- Bauteilabmessungen: Flächen und Volumina werden anhand des CAD-Modells in Hott-CAD automatisch berechnet. Die Voraussetzung dafür ist, dass alle Abmessungen stimmen.
- Neigung der Bauteile
- Orientierung: wichtig für die Sonneneinstrahlung
- U-Werte der Bauteile
- Für Fenster: U-Wert, g-Wert, Rahmenanteil, Sonnenschutz

- Räume mit ihren Nutzungen: die Raumart kann dabei helfen, ein Nutzungsprofil zuzuordnen.

4.3.3 Geometrieeingabe

4.3.3.1 Vier Wände

Das erste Modell besteht aus vier Wänden mit einem rechteckigen Grundriss, wie in der Abbildung 17 ersichtlich ist. Die Wände sind 5 m hoch und 20 cm dick. Es wurden zwei Varianten von diesem Modell erstellt, wo zuerst die Wandhöhe und dann die Wanddicke variiert wurden.

Abbildung 17: Grundriss der vier Wände in Revit

Nach dem Import in HottCAD wurden die Wände anerkannt. Die Nachmessung der Abmessungen hat ergeben, dass die Länge, die Breite und die Dicke der Wände immer korrekt übertragen wurden. Jedoch setzt HottCAD die Höhe der Wände bei allen Varianten zum Standardwert von 2,60 m.

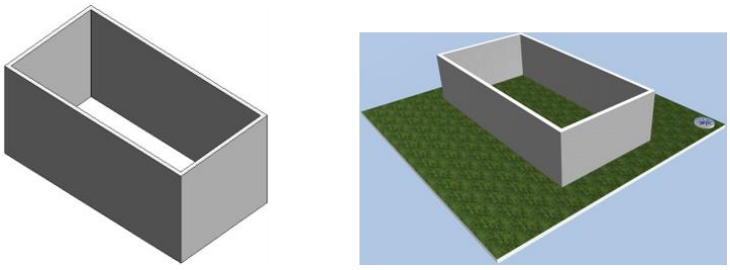


Abbildung 18: 3D Ansicht von vier Wänden in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

4.3.3.2 Eingeschossiges Gebäude

Das vorherige Modell von vier Wänden wird mit einer Bodenplatte von 22 cm und einem Dach von 25 cm ergänzt, um ein eingeschossiges Gebäude zu bekommen. Die Geschossebene wurden mit dem LevelManager definiert:

- Im EG: OKFB 0,00 m
- Im 1.OG: 5,00 m

Die Geschossebenen sind im LevelManager als „Bezugsebene“ bezeichnet: diese Ebenen werden in der IFC-Datei für die Geschossstruktur übernommen. Es kann also pro Geschoss nur eine Ebene als Bezugsebene gewählt werden.

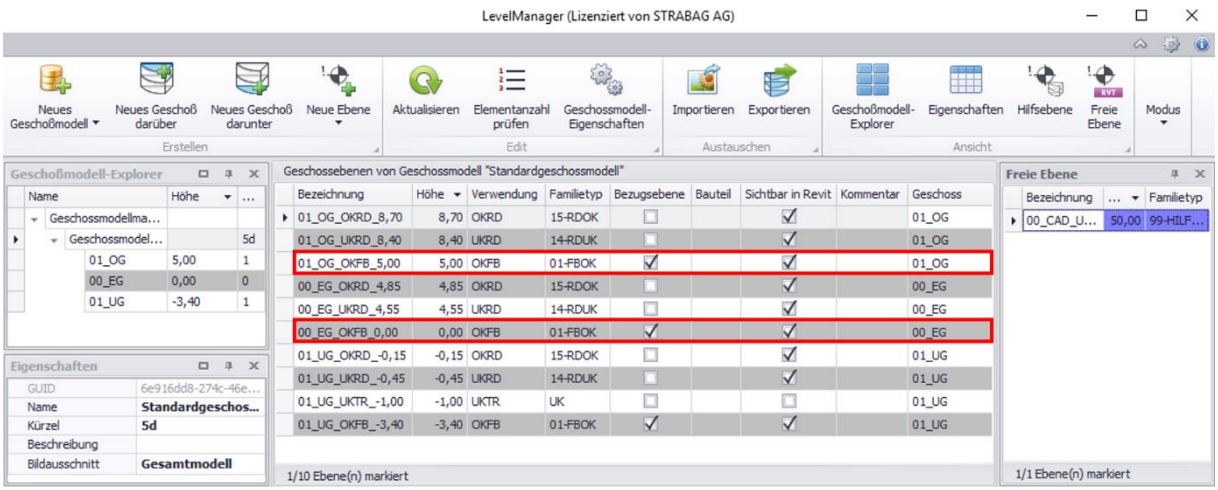


Abbildung 19: Definition der Geschossebenen im LevelManager

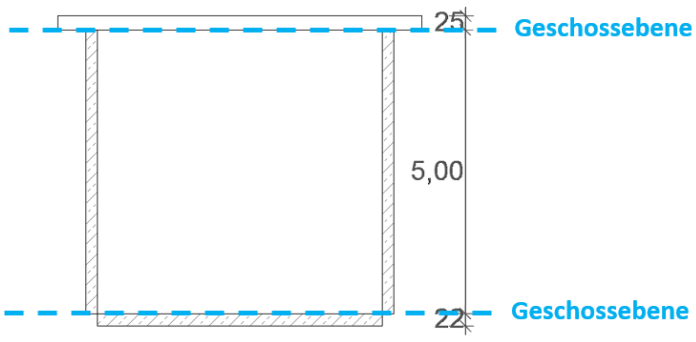


Abbildung 20: Schnitt des eingeschossigen Gebäudes und Geschossdefinition in Revit

Nach dem Import in HottCAD wurden die in Revit definierten Geschossebenen für die Geschossstruktur in HottCAD verwendet. Die Bodenplatte und das Dach wurden als solche

anerkannt. Jedoch konnte man feststellen, dass es einen Abstand zwischen der Oberkante der Wände und der Unterkante des Daches gab. Anstatt 5 m betrug die Wandhöhe 4,56 m.

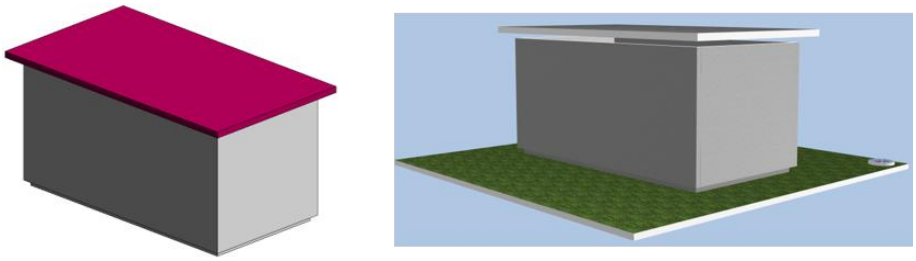


Abbildung 21: 3D Ansicht von dem eingeschossigen Gebäude in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

Es wird also eine andere Geschossdefinition probiert: mit demselben Modell wird die untere Geschossebene unter die Bodenplatte gesetzt. Im LevelManager werden neue Ebenen definiert und als Bezugsebenen gewählt.

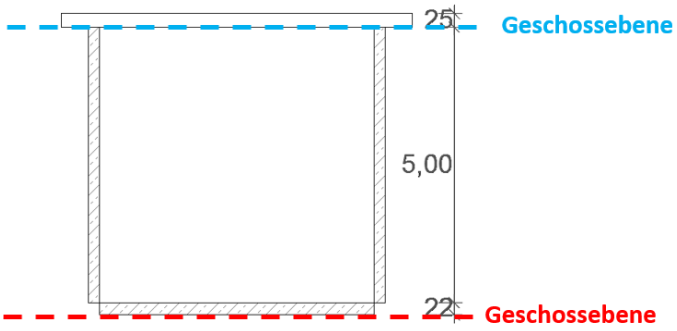


Abbildung 22: Schnitt des eingeschossigen Gebäudes und Geschossdefinition in Revit

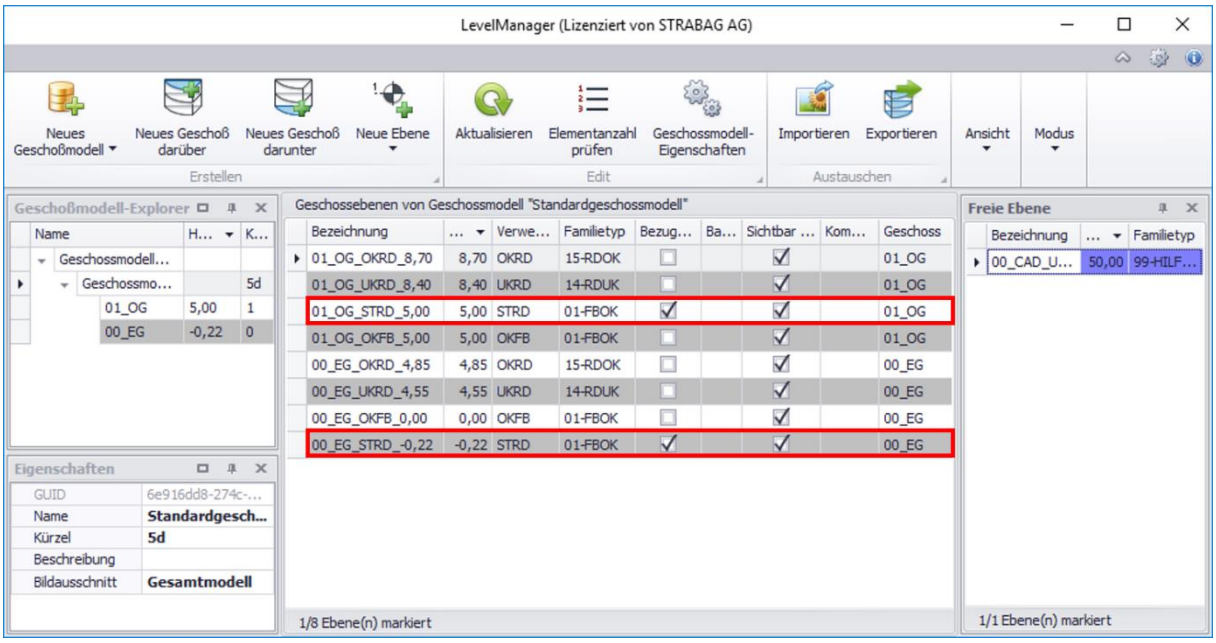


Abbildung 23: Definition der Geschossebenen im LevelManager

Mit dieser neuen Geschossdefinition gibt es nach Import in HottCAD keinen Abstand mehr zwischen der Oberkante der Wände und die Unterkante des Daches. Die Wandhöhe beträgt 5 m und ist jetzt korrekt. Nach Aufruf der Hüllflächentabelle wurden alle Bauteile und ihre Flächen korrekt erfasst.

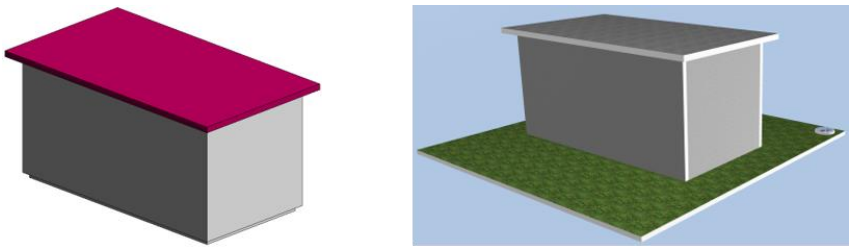


Abbildung 24: 3D Ansicht von dem eingeschossigen Gebäude in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) mit der richtigen Geschossdefinition

4.3.3.3 Zweigeschossiges Gebäude

Das eingeschossige Gebäude wird um ein Geschoss erweitert und mit der vorherigen Geschossdefinition nach IFC exportiert. Da für den EnEV-Nachweis die tatsächliche Raumhöhe von Interesse ist, handelt es sich bei der Geschossdecke nicht nur um die Rohdecke: die Dicke des Fußbodenaufbaus und gegebenenfalls der abgehängten Unterdecke müssen auch berücksichtigt werden.

In diesem Beispiel wird angenommen, dass die 44 cm dicke Geschossdecke sich von der Unterkante der Fertigdecke bis zur Oberkante des Fertigfußbodens erstreckt.

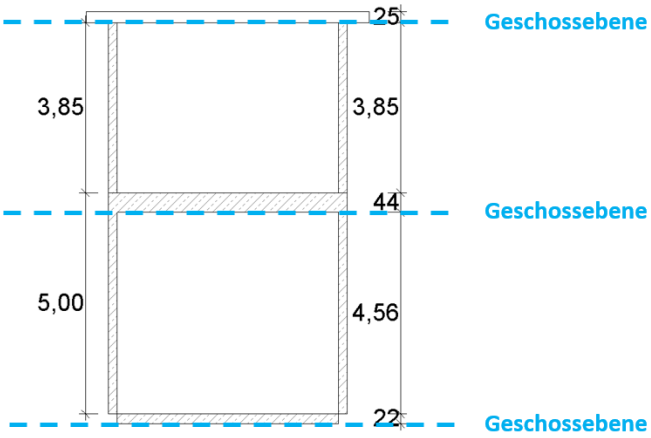


Abbildung 25: Schnitt des zweigeschossigen Gebäudes und Geschossdefinition in Revit

Nach dem Import in HottCAD wurden alle Abmessungen korrekt übertragen. Die Raumhöhen stimmen.

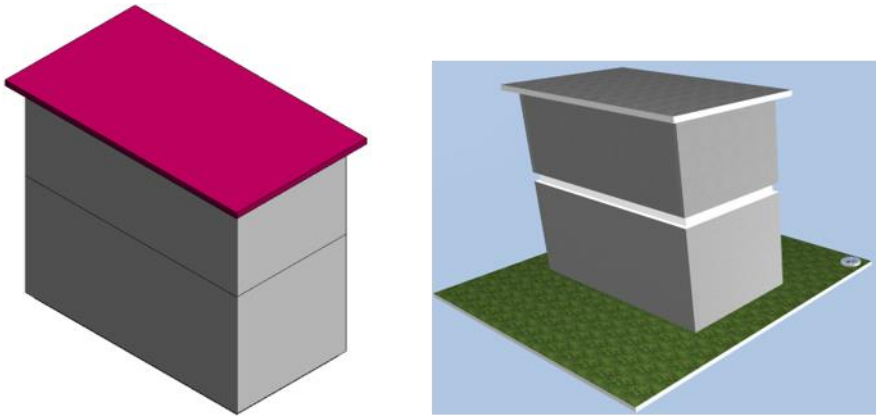


Abbildung 26: 3D Ansicht von dem zweigeschossigen Gebäude in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

4.3.3.4 Dreigeschossiges Gebäude

Das Gebäude wird wieder um ein Geschoss in zwei Varianten erweitert: eine bei der beide Zwischendecken gleich sind, und eine mit unterschiedlichen Zwischendecken.

Mit gleichen Zwischendecken

Bei der Variante mit gleichen Zwischendecken haben beide Zwischendecken eine Dicke von 44 cm.

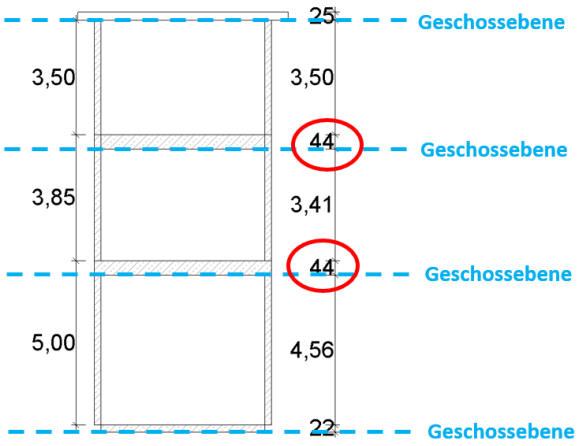


Abbildung 27: Schnitt des dreigeschossigen Gebäudes mit gleichen Zwischendecken und Geschossdefinition in Revit

Nach dem Import in HottCAD wurden alle Abmessungen korrekt übertragen und die Raumhöhen stimmen.

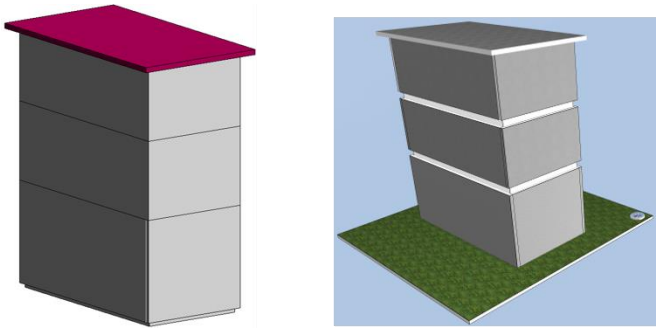


Abbildung 28: 3D Ansicht von dem dreigeschossigen Gebäude mit gleichen Zwischendecken in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

Mit unterschiedlichen Zwischendecken

Die Dicke der obersten Zwischendecke wird verändert und beträgt jetzt 36 cm. Die Räume im 1. OG haben also eine Raumhöhe von 3,49 m.

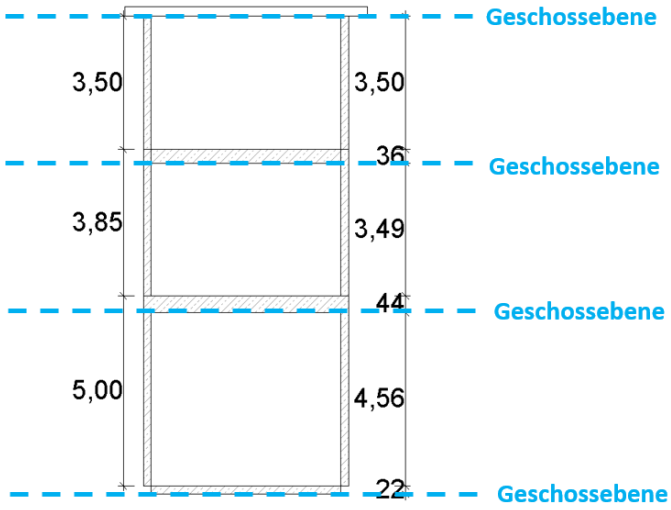


Abbildung 29: Schnitt des dreigeschossigen Gebäudes mit unterschiedlichen Zwischendecken und Geschossdefinition in Revit

Nach dem Import in HottCAD werden die Raumhöhen im 1. OG und im 2. OG falsch übertragen. Es wurde keine Lösung gefunden, die zu einer fehlerfreien Übertragung dieses Modells von Revit zu HottCAD führt.

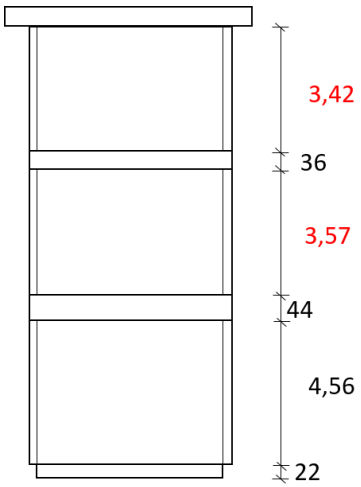


Abbildung 30:Eigene Darstellung der Raumhöhen des dreigeschossigen Gebäudes mit unterschiedlichen Zwischendecken nach Import in HottCAD. In Rot sind die Raumhöhen, die falsch übertragen wurden.

In der Folge wird das Modell des eingeschossigen Gebäudes vom Abschnitt 4.3.3.2 mit anderen Elementen erweitert.

4.3.3.5 Öffnungen: Fenster und Türen

In diesem Abschnitt wird das Modell mit drei Öffnungen ergänzt: ein Fenster, eine opake Tür und eine Glastür. Die Abmessungen der Öffnungen sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 4: Abmessungen der Öffnungen im Revit-Modell

	Fenster	**Opake Tür**	**Glastür**
Breite	1,10 m	1,010 m	1,010 m
Höhe	2 m	2,135 m	2,135 m
Schwelle	1 m	-	-
Rahmenbreite	0,060 m	-	0,080 m
Rahmenhöhe unten	0,080 m	-	0,20 m
Rahmenhöhe oben	0,080 m	-	0,12 m

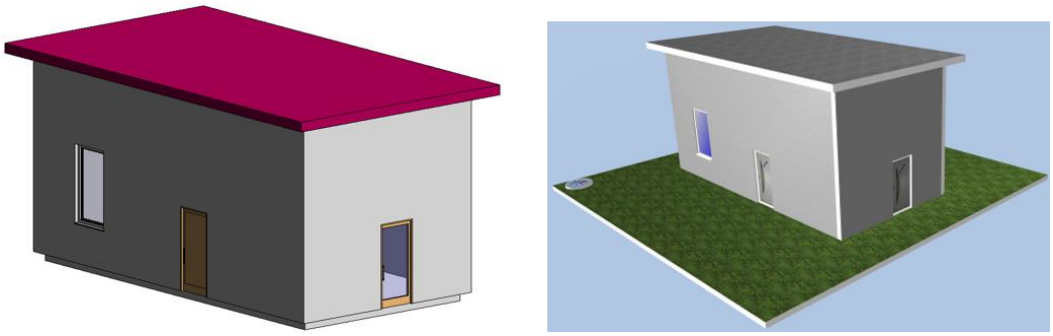


Abbildung 31: 3D Ansicht von dem Gebäude mit Öffnungen in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

Nach dem Import in HottCAD wurden die Abmessungen korrekt übertragen. Jedoch wurde die Glastür in eine opake Tür konvertiert. Das führt dann bei der Berechnung der Sonneneinträge zu Fehlern.

4.3.3.6 Komplexe Fassaden

Anschließend wird eine der Wände mit nichttragenden Fassaden ersetzt. Diese Fassaden werden in Revit mit der Familie „Fassadensysteme“ modelliert.

Vollverglaste Fassade

Zuerst wird eine der Wände mit einer vollverglasten Fassade ersetzt. Nach dem Import in HottCAD wird die Glasfassade im Grundriss sichtbar. Bei der automatischen Raumzeichnung wurde die Glasfassade als Raumgrenze anerkannt. Jedoch ist sie in der 3D-Ansicht nicht sichtbar.

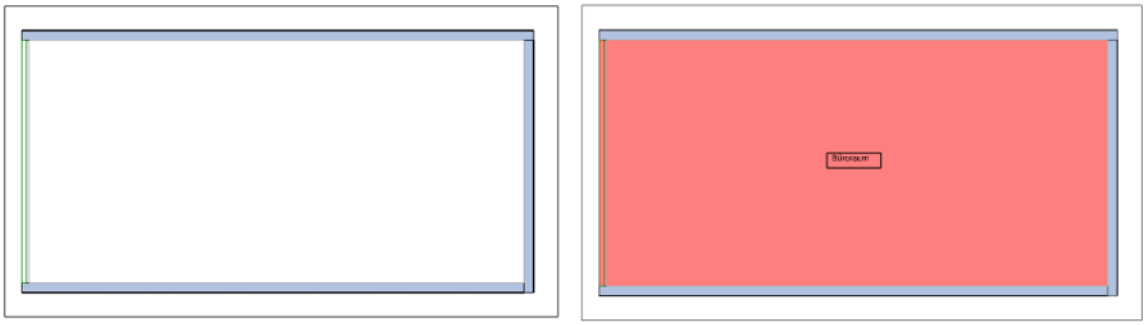


Abbildung 32: Screenshot von HottCAD – Grundriss des Gebäudes mit der Glasfassade nach Import in HottCAD (links) und nach der automatischen Raumzeichnung (rechts)

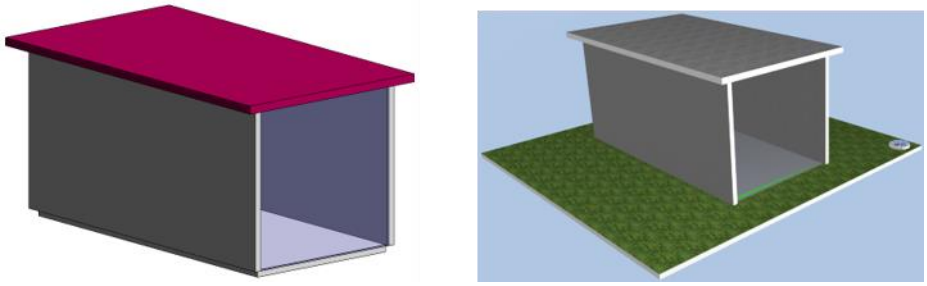


Abbildung 33: 3D Ansicht von dem Gebäude mit einer Glasfassade in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

Nach der automatischen Erfassung der Hüllfläche in HottCAD fehlt die vollverglaste Fassade; es werden nur die drei anderen Wände erfasst.

Nr	K	A	Bauteilbezeichnung	Bez	Fläche	U-Wert	Raum	Zonen
1	DA		Dach 001-1-2		**56,97**		00_EG_STRD_-0,22-R1 - Büroraum	Einzelbüro
2	WA	N	Wand 003		**55,39**	**0,24**	00_EG_STRD_-0,22-R1 - Büroraum	Einzelbüro
3	WA	S	Wand 001		**55,39**	**0,24**	00_EG_STRD_-0,22-R1 - Büroraum	Einzelbüro
4	WA	O	Wand 002		**28,35**	**0,24**	00_EG_STRD_-0,22-R1 - Büroraum	Einzelbüro
5	BE		Boden-2		**56,16**	**0,24**	00_EG_STRD_-0,22-R1 - Büroraum	Einzelbüro

Abbildung 34: Screenshot von Hottgenroth - Hüllflächentabelle für das Gebäude mit der Glasfassade

Pfosten-Riegel-Fassade

Die Pfosten-Riegel-Fassade wird auch in Revit mit der Familie „Fassadensysteme“ modelliert. Nach dem Import in HottCAD sind nur die Pfosten sichtbar, aber nicht die Verglasung.

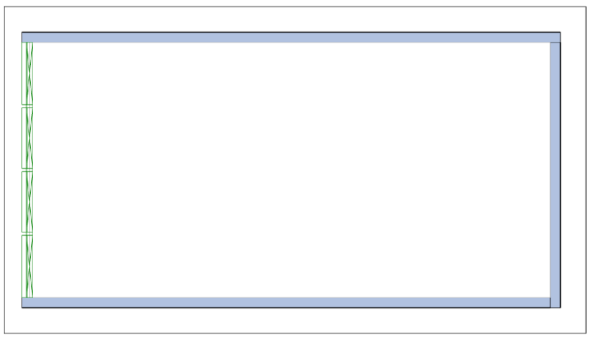


Abbildung 35: Screenshot von HottCAD – Grundriss des Gebäudes mit der Pfosten-Riegel-Fassade nach Import in HottCAD

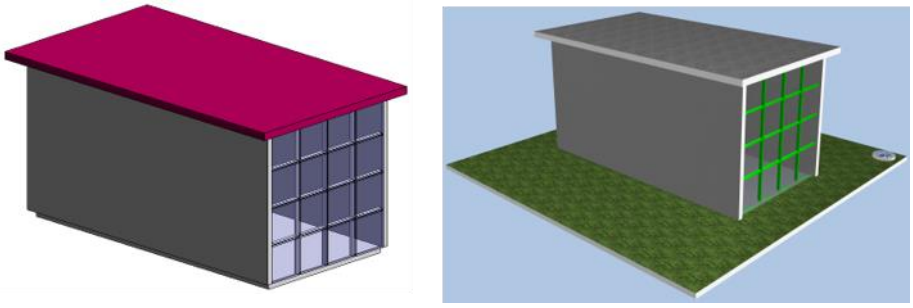


Abbildung 36: 3D Ansicht von dem Gebäude mit einer Pfosten-Riegel-Fassade in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

Wie bei der Glasfassade fehlt die Pfosten-Riegel-Fassade nach der automatischen Erfassung der Hüllfläche.

4.3.3.7 Innenwände und Räume

Das eingeschossige Gebäude wird mit Innenwänden ergänzt. Es werden dann drei Räume in Revit definiert, mit Namen die der Raumfunktion entsprechen. So kann eine Zuordnung der Räume zu Zonen nach dem Import in HottCAD erleichtert werden.

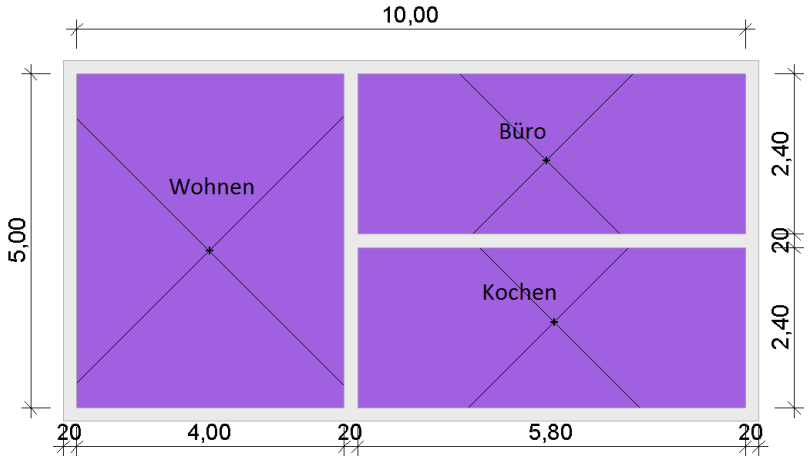


Abbildung 37: Räume mit Namen in Revit

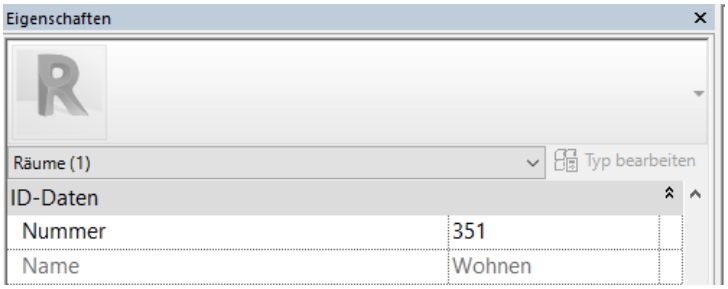


Abbildung 38: Screenshot der Raumeigenschaften in Revit

Laut der Empfehlungen des Herstellers muss beim Import in HottCAD die Option „Bezeichner übernehmen“ mit einem Haken aktiviert werden, damit die Raumnamen übernommen werden. (Hottgenroth Software, 2017)

Die Innenwände und Räume wurden in HottCAD übertragen. Nach dem Import wurde jedoch festgestellt, dass die Raumnummern und nicht die Raumnamen von Revit als Raumnamen in HottCAD übernommen wurden. Die Raumfunktion geht also verloren.

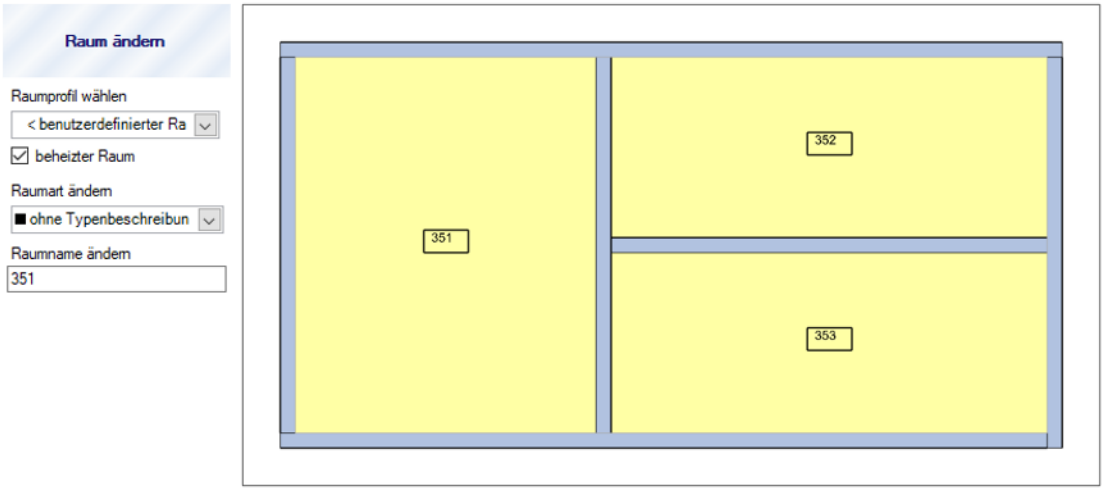


Abbildung 39: Räume nach Import in HottCAD

4.3.3.8 Komplexes Gebäude

Ein Teilausschnitt eines komplexeren Modells für ein Schulgebäude in Revit wurde nach IFC exportiert und in HottCAD importiert.

Nach dem Import in HottCAD wurden folgende Fehler festgestellt:

- Ein Großteil der Fenster ist verschwunden.
- Die Fenster, die in HottCAD sichtbar sind, wurden nicht in Fenster konvertiert. Sie sind nur als nicht berechnungsrelevante Bauteile dargestellt. Das liegt daran, dass diese Fenster mit der Familie „Fassadensysteme“ in Revit modelliert wurden.
- In HottCAD lag das Dach auch über dem Innenhof, was in Revit nicht der Fall war.
- Im Untergeschoss gibt es einen Abstand zwischen der Unterkante der Wände und der Bodenplatte.
- Im Untergeschoss wurden neue Wände gezeichnet, die beim Revit-Modell nicht existierten.
- Es wurde nur ein Teil der Räume übernommen.

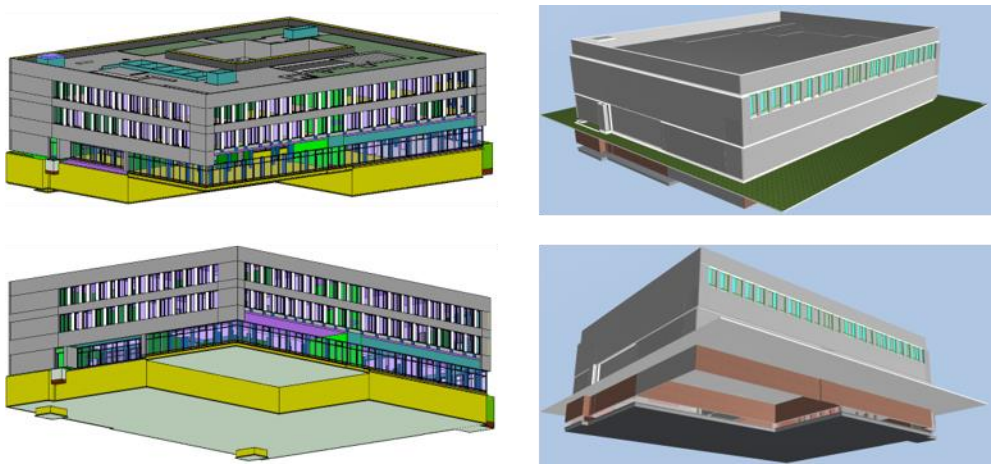


Abbildung 40: 3D-Ansichten des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

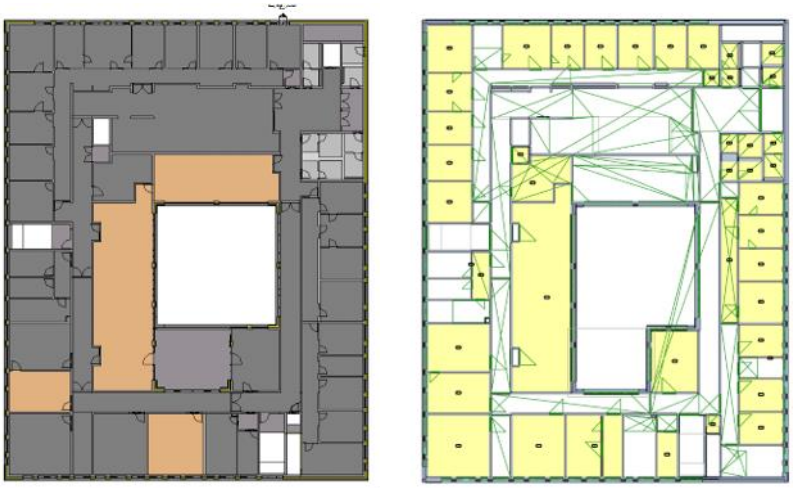


Abbildung 41: 3D-Ansichten des 1.OG des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

4.3.4 Eingabe von bauphysikalischen Kennwerten in Revit

4.3.4.1 U-Werte von opaken Bauteilen

In Revit können Aufbauten für Wände, Decken und Dächer definiert werden. Für jedes Material können thermische Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit eingegeben werden.

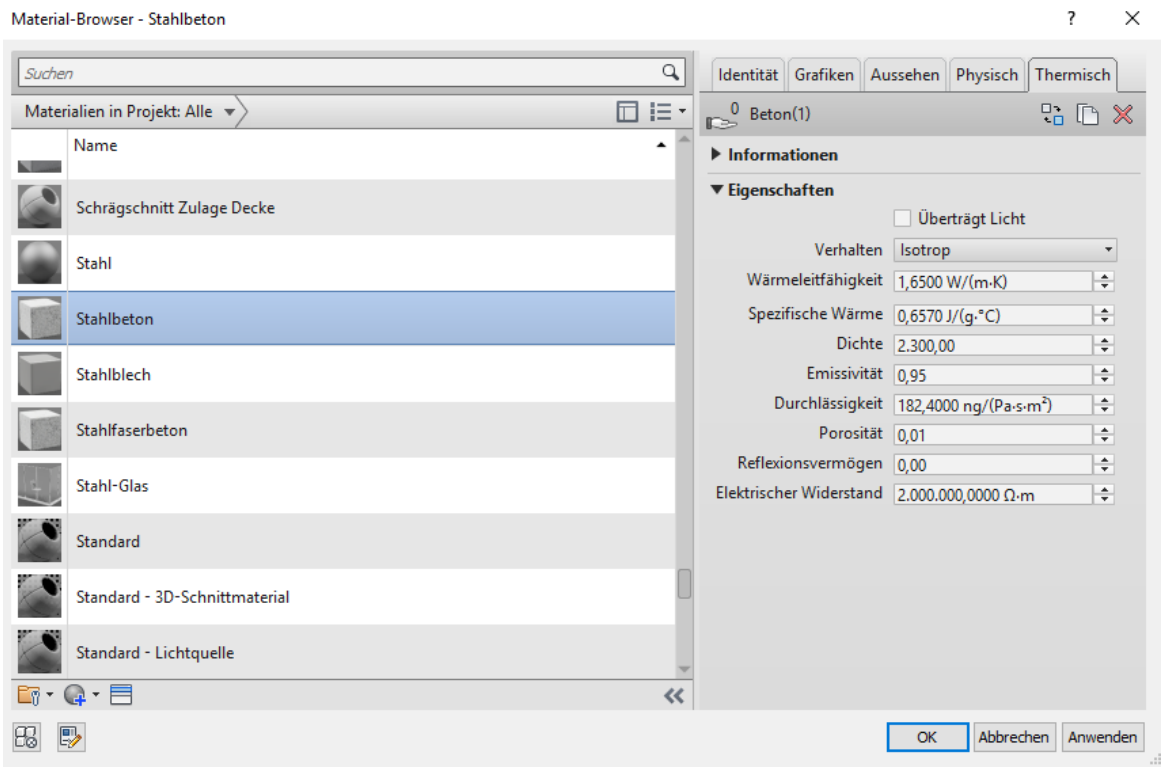


Abbildung 42: Screenshot von Revit – Definition der Materialeigenschaften

Einschalige Wand

Der Wärmedurchgangskoeffizient oder U-Wert eines Bauteils errechnet sich aus $U = \frac{1}{Rtot}$, mit $R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \ldots + R_n + R_{se}$.

Dabei bedeuten:

U der Wärmedurchgangskoeffizient in W/m^2K

R_{tot} der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand in m^2K/W

R_{si} der Wärmeübergangswiderstand der inneren Oberfläche in m^2K/W

R_{se} der Wärmeübergangswiderstand der äußeren Oberfläche in m^2K/W

R_1, R_2, …, R_n die Bemessungs-Wärmedurchlasswiderstände jeder Schicht in m^2K/W

Der Wärmedurchlasswiderstand einer Schicht ergibt sich aus $R = \frac{d}{\lambda}$ mit d, der Dicke des Baustoffes in m, und λ, der Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes in W/mK. (DIN EN ISO 6946:2018, S.18-19)

Anhand eines einfachen Beispiels wird geprüft, ob Revit die U-Werte korrekt berechnet. Es wird der U-Wert einer 20 cm dicken Betonwand mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1,65 W/mK berechnet. Eine manuelle Berechnung (siehe Tabelle 5) ergibt einen U-Wert von 3,43 W/m^2K.

Tabelle 5: Manuelle Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Betonwand

	Dicke d	Wärmeleitfähigkeit λ		R
Beton	0,20 m	1,65 W/mK		0,1212 m^2K/W
			R_{si}	0,13 m^2K/W
			R_{se}	0,04 m^2K/W
			R_{tot}	0,29 m^2K/W
			U	3,43 W/m^2K

Es wurde dann eine Wand mit einer Dicke von 20 cm in Revit modelliert. Als Material wurde Beton mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1,65 W/mK gewählt. Die Berechnung des „Wärmeübergangskoeffizienten (U)“ erfolgt dann automatisch auf der Basis der Dicke und der Wärmeleitfähigkeit. Das Ergebnis kann in den analytischen Eigenschaften abgelesen werden, wie die Abbildung 43 zeigt.

Analytische Eigenschaften	
Wärmeübergangskoeffizient (U)	8,2500
Thermischer Widerstand (R)	0,1212 (m^2·K)/W

Abbildung 43: Berechnung der thermischen Eigenschaften der Betonwand in Revit, Screenshot

Der von Revit berechneter Wärmeübergangskoeffizient (U) beträgt 8,25 W/m^2K und weicht vom Ergebnis der manuellen Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten ab. Dieses Beispiel zeigt, dass die Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se} nicht berücksichtigt wurden. Der „Thermische Widerstand (R)“ entspricht dem Wärmedurchlasswiderstand der Betonschicht. Der „Wärmeübergangskoeffizient (U)“ ist nur der Kehrwert des „thermischen Widerstands“ und muss also nicht mit dem in der Bauphysik oft als „U-Wert“ genannten Wärmedurchgangskoeffizienten verwechselt werden.

Die in Revit modellierte Wand wurde im IFC-Format gespeichert und in HottCAD importiert. Wie folgende Abbildung zeigt, wurde der von Revit berechnete Wärmeübergangskoeffizient der Wand als U-Wert übernommen. Das ist ein Fehler, der bei der Berechnung der

Gesamtenergiebilanz zu falschen Ergebnissen führen würde. Es ist notwendig, die U-Werte manuell zu korrigieren.

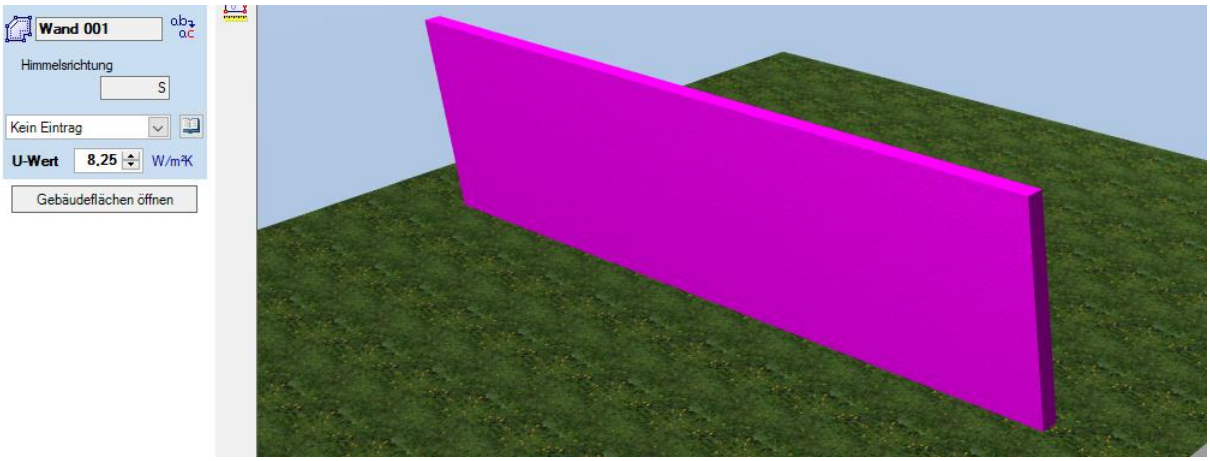


Abbildung 44: U-Wert der einschaligen Betonwand in HottCAD nach Import der IFC-Datei

Mehrschichtige Wand

Es wurde auch für eine mehrschichtige hinterlüftete Wand der Wärmedurchgangskoeffizient manuell und in Revit berechnet. Der Aufbau der Wand und die U-Wert Berechnung sind folgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 6: Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der mehrschichtigen Wand

	Dicke d	Wärmeleitfähigkeit λ	R
Beton	0,20 m	1,65 W/mK	0,1212 m^2K/W
Mineralwolle	0,12 m	0,035 W/mK	3,4286 m^2K/W
Hinterlüftung	0,04 m	0,025 W/mK	-
Aluminium-Blechverkleidung	0,02 m	160 W/mK	-
		R_{si}	0,13 m^2K/W
		R_{se}	0,13 m^2K/W
		R_{tot}	3,810 m^2K/W
		U	0,262 W/m^2K

Diese Wand wurde dann in Revit modelliert und der Aufbau gemäß Tabelle 6 eingegeben.

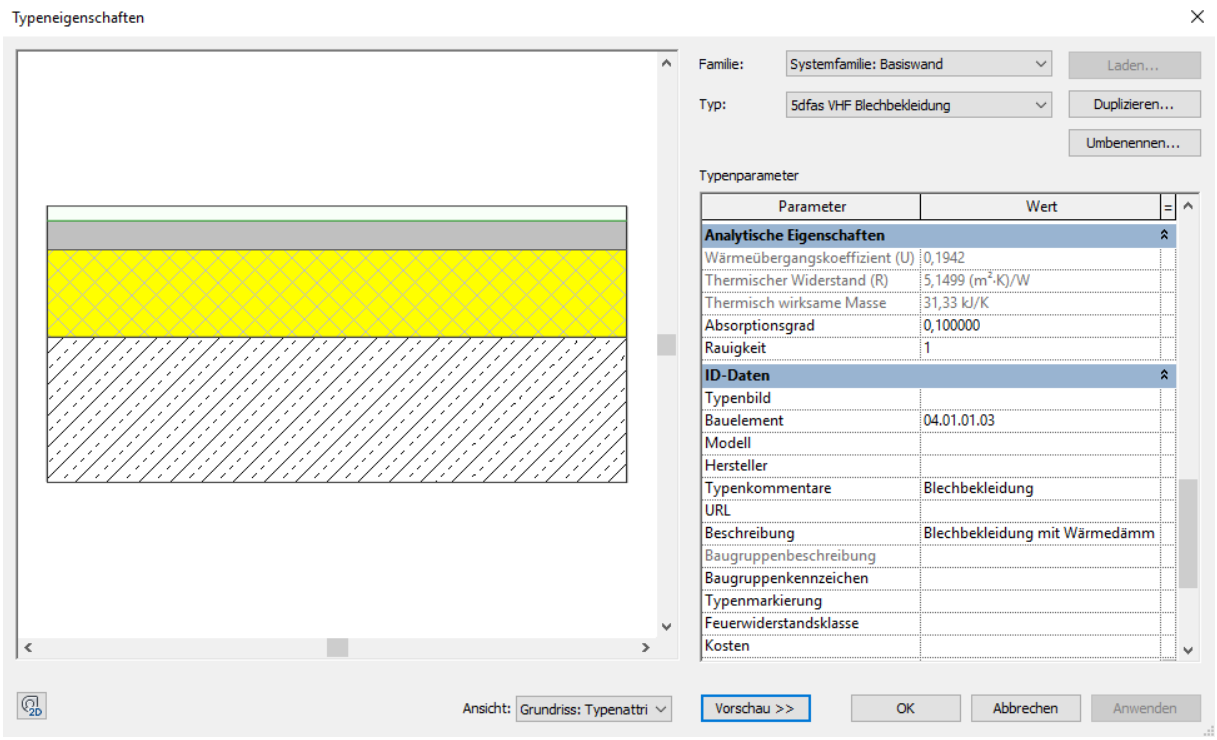


Abbildung 45: Eigenschaften der hinterlüfteten Betonwand in Revit

Revit berechnet den thermischen Widerstand mit allen Schichten. In diesem Fall wurden auch die Hinterlüftung und die Aluminiumblechverkleidung miteinbezogen, was falsch ist, weil diese Schichten nicht thermisch wirksam sind.

Der Aufbau der Wand geht beim IFC-Import in HottCAD verloren. In HottCAD wird die Wand als einschalige Wand dargestellt. Hier muss auch der U-Wert manuell korrigiert werden. Der Aufbau der Wand kann alternativ im HottCAD-Bauteilkatalog nochmal manuell definiert werden, um die U-Wert-Berechnung automatisch zu ermöglichen.

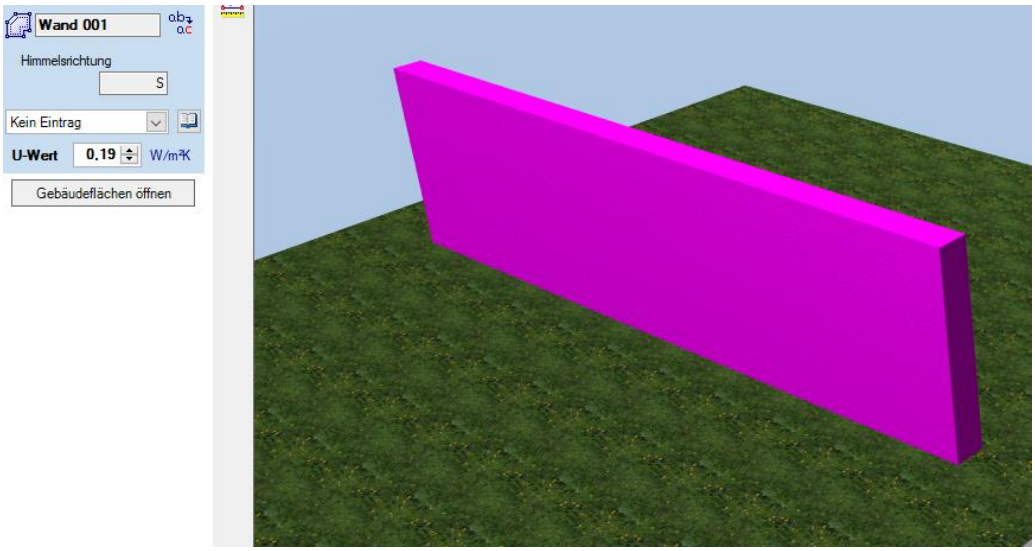


Abbildung 46: Mehrschichtige Wand nach IFC-Import in HottCAD

4.3.4.2 U-Werte und g-Werte von transparenten Bauteilen

Was die thermischen Eigenschaften von Fenstern betrifft, gibt Revit vordefinierte Verglasungstypen mit ihren U- und g-Werten zur Wahl.

Abbildung 47: Screenshot - Wahl der Verglasungstypen in Revit

Es besteht die Möglichkeit, neue Verglasungstypen in die Datei Constructions.xml im Revit Ordner (C:\Program Files\Autodesk\Revit 2017\de-DE) hinzuzufügen. Das gleiche gilt für Türen.

Bei dem Import eines Fensters mit einem U-Wert von 6,71 W/m²K und einem g-Wert von 0,86 in HottCAD wurde der U-Wert übertragen, aber nicht der g-Wert.

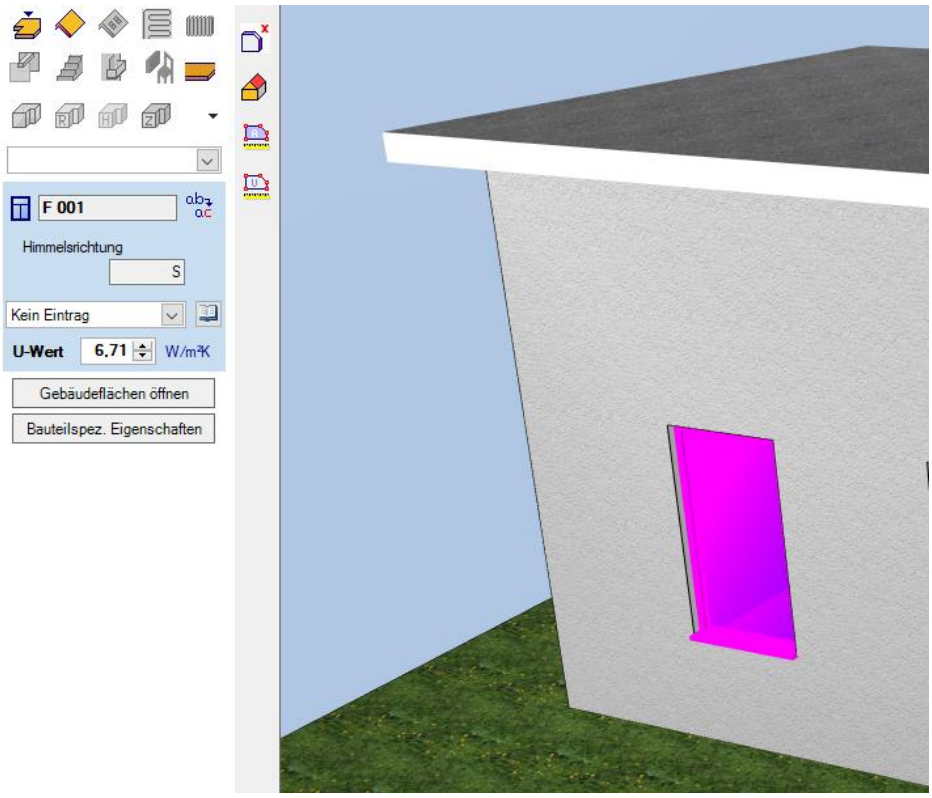


Abbildung 48: Screenshot des Fensters nach Import in HottCAD

4.3.4.3 U-Werte von Vorhangfassaden

In Revit können U-Werte und g-Werte nur für die einzelnen Komponenten einer Vorhangfassade definiert werden. Es besteht keine Möglichkeit, den U_{cw}-Wert einer Vorhangfassade aus den U-Werten der einzelnen Komponenten zu berechnen. In Hottgenroth gibt nicht einmal die Möglichkeit, Vorhangfassaden einzugeben. Diese müssen als Fenster in einer Wand modelliert werden. (Hottgenroth Akademie, 2018) Die U-Wert-Berechnung erfolgt in beiden Fällen manuell nach DIN EN ISO 12631.

4.3.4.4 Probleme in der Art der Modellierung

Ein weiteres Problem bei dem Datenaustausch zwischen Revit und HottCAD besteht in der Modellierungsweise. Bei komplexen Projekten kann es oft vorkommen, dass chronologisch nach der Bauausführung geplant wird: Rohbau, Fassade und Ausbau. In Revit wird dann das BIM-Modell auch durch getrennte Objekte für den Rohbau, die Fassade und den Ausbau modelliert. Eine Wand kann zum Beispiel mit zwei gegliederten Objekten modelliert werden: eine Rohbauwand aus Beton und eine nichttragende Wand für das Wärmedämmverbundsystem.

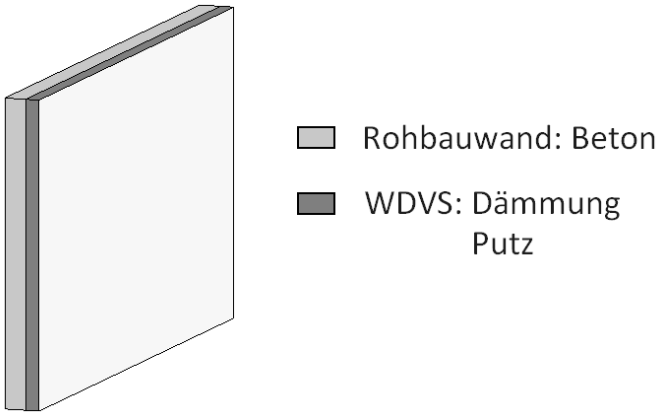


Abbildung 49: Modellierung einer Betonwand mit WDVS mit zwei getrennten Objekten

Diese Modellierungsweise eignet sich zum Beispiel für die Mengenermittlung, aber sie ist problematisch für die Berechnung von U-Werten und Energiebilanzen. Durch die getrennte Modellierung geht die Beziehung zwischen der Rohbauwand und dem Wärmedämmverbundsystem verloren. In Revit ist es nicht möglich, diese Beziehung zu erstellen und es werden zwei unterschiedliche U-Werte für jede Wand berechnet. In Hottgenroth ist vorgesehen, dass eine Wand nur mit einem Objekt modelliert wird und dieser Wand ein Schichtaufbau oder ein U-Wert zugewiesen wird.
Es wurde ein eingeschossiges Gebäude in Revit modelliert, bei dem die Wände mit zwei Objekten modelliert sind.

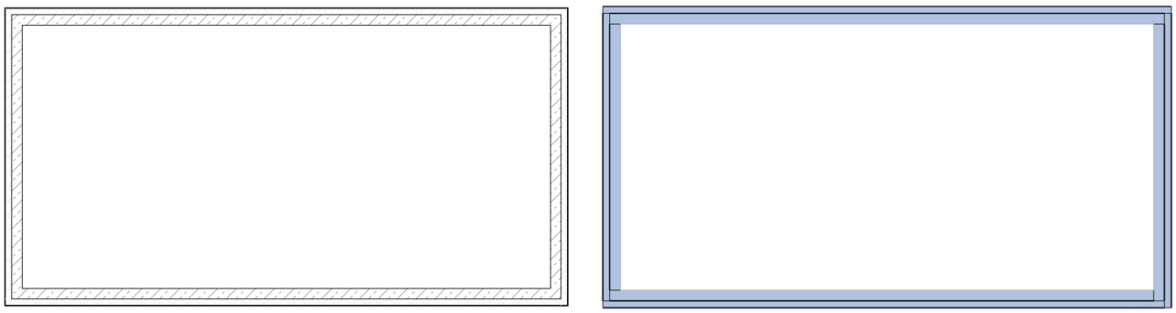


Abbildung 50: Grundriss des Gebäudes mit den getrennt nach Rohbau und Fassade modellierten Wänden in Revit (links) und HottCAD (rechts)

Nach dem Import in HottCAD wurden die Wände korrekt übertragen und bestehen auch aus zwei getrennten Objekten. Bei der automatischen Hüllflächenerfassung wurden aber die

Wände nicht erfasst. Die Hüllflächentabelle zeigt, dass nur der Boden und das Dach erfasst wurden.

	Nr	K	A	Bauteilbezeichnung	Bez	Fläche	U-Wert	Raum
▶	1	DA	□	Dach 001-1-1		**56,16**		00_EG_STRD
	2	BE	□	Boden-1		**56,16**	**0,24**	00_EG_STRD

Abbildung 51: Hüllflächentabelle bei der Modellierung mit getrennten Objekten für den Rohbau und die Fassade

4.3.5 Eingabe der Orientierung des Grundstücks

Zum Testen der Übertragung der Orientierung des Grundstücks wird das Grundstück des eingeschossigen Gebäudes in Revit orientiert. Als Orientierungspunkt wird ein Fenster an die Süd-Ost-Fassade platziert. Nach Import in HottCAD war das Grundstück auch korrekt orientiert.

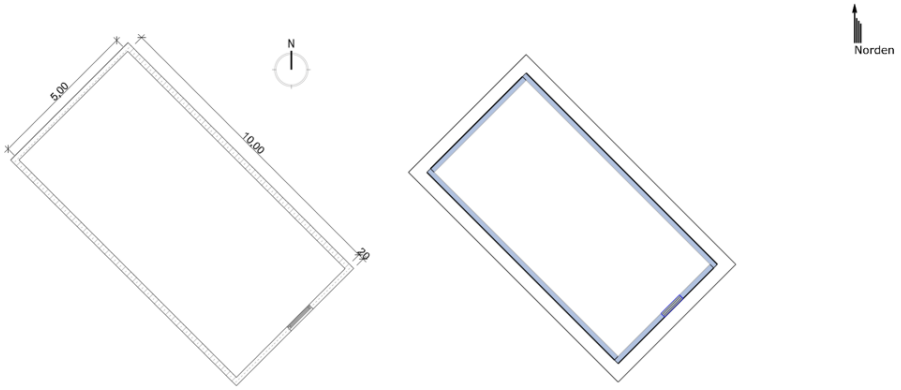


Abbildung 52: Grundriss eines Gebäudes mit einem süd-ost orientierten Fenster in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

Die Bauteile wurden bei der automatischen Hüllflächenerfassung mit der richtigen Orientierung erfasst.

Nr	K	A	Bauteilbezeichnung	Bez	Fläche	U-Wert	Raum	Zonen
1	DA		Dach 001-1-1		56,16		00_EG_STRD_-0	Einzelbüro
2	WA	NW	Wand 004		28,35	0,24	00_EG_STRD_-0	Einzelbüro
3	WA	SW	Wand 003		54,60	0,24	00_EG_STRD_-0	Einzelbüro
4	WA	SO	Wand 002		27,33	0,24	00_EG_STRD_-0	Einzelbüro
5	FA	SO	- F 001		1,02	6,71	00_EG_STRD_-0	Einzelbüro
6	WA	NO	Wand 001		54,60	0,24	00_EG_STRD_-0	Einzelbüro
7	BE		Boden-1		56,16	0,24	00_EG_STRD_-0	Einzelbüro

Abbildung 53: Screenshot von Hottgenroth - Hüllflächentabelle für das Gebäude mit dem süd-ost orientierten Fenster

4.3.6 Übertragung von HottCAD nach Revit

Zur Untersuchung der Übertragung eines Gebäudemodells von HottCAD nach Revit wurde das in HottCAD erstellte Modell eines Bürogebäudes gewählt. Dieses Modell wurde nach IFC exportiert und dann in Revit importiert.

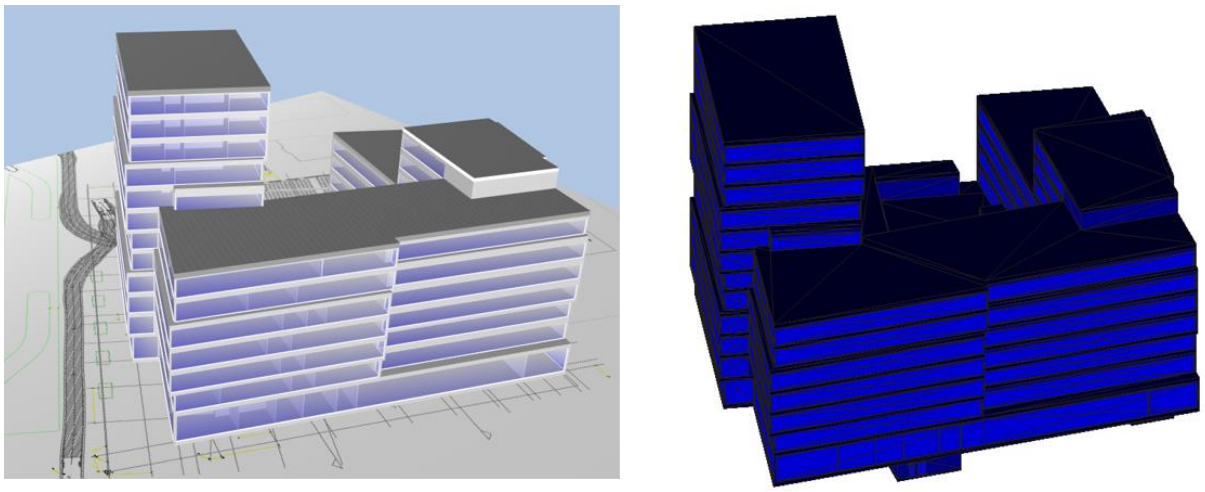


Abbildung 54: 3D-Ansicht des Bürogebäudes in HottCAD (links) und nach Import in Revit (rechts)

Nach dem Import in Revit wurde festgestellt, dass die Bauteile in die korrekten Familien konvertiert wurden. Jedoch gingen die bauphysikalischen Eigenschaften verloren. Die Bauteile konnten zudem nicht bearbeitet werden. Die Nutzung des importierten Modells bleibt also beschränkt.

4.3.7 Zusammenfassung

Die vorherige Untersuchung hat folgende Punkte gezeigt:

- Wenn keine Decken und Dächer definiert sind, wird die Höhe falsch übertragen. Ein Standardwert von 2,60 m wird automatisch für die Höhe benutzt.
- Die Geschossebenen müssen sich an der Unterkante der Bodenplatte, der Unterkante der Geschossdecken und der Unterkante des Daches befinden, um einen korrekten Import zu ermöglichen.
- Die Glastüren werden in opake Türen konvertiert.
- Die nichttragenden Fassaden wie zum Beispiel vollverglaste Fassaden oder Vorhangfassaden werden nicht übertragen.
- Zahlreiche Fehler ergeben sich beim Import von komplexeren Gebäuden.
- Die U-Werte von opaken Bauteilen werden in Revit nicht korrekt berechnet. Die falschen U-Werte werden dann in HottCAD übernommen. Der Schichtaufbau geht beim Import verloren.
- Für die U-Werte von Vorhangfassaden gibt es weder in Revit noch in HottCAD Möglichkeiten, diese zu berechnen.
- Der Import von IFC-Dateien aus HottCAD in Revit liefert Modelle, die nicht mehr bearbeitet werden können.

Der Softwarehersteller Hottgenroth ist sich dieser Probleme bewusst und hat ein Revit Plug-in entwickelt, um die Übertragung von Gebäudedaten zu verbessern. Mit diesem Plug-in sollen weniger Informationen bei dem Datenaustausch verloren gehen. Daten wie die Materialien, Schichtaufbauten, Zonierungsdaten und Raumprofile sollen nach HottCAD übertragen werden, um eine doppelte Erfassung der Gebäudedaten zu vermeiden. Eine Voraussetzung, um das Plug-in nutzen zu können, ist dass die beiden Programme Revit und Hottgenroth auf demselben Rechner installiert sind. (Hottgenroth Software, 2018)

4.4 Tageslichtquotientberechnung

In diesem Abschnitt wird die Übertragung von IFC-Dateien von Revit nach DIALux für die Berechnung des Tageslichtquotienten untersucht.

4.4.1 Methodik

Zuerst werden die notwendigen Daten für die Berechnung des Tageslichtquotienten aufgelistet. Auf dieser Basis werden Testgebäude entwickelt oder vom Abschnitt 4.3 übernommen. Diese Gebäudemodelle werden nach IFC exportiert und dann in die Software DIALux importiert. Nach dem Import in DIALux wird ähnlich wie beim Import in HottCAD vorgegangen. Das Modell wird zuerst graphisch und dann anhand einer Nachmessung geprüft. Es wird darauf geachtet, ob die transparenten Bauteile als lichtdurchlässig erkannt wurden. Die Berechnung des Tageslichtquotienten in DIALux ist nur möglich, wenn sich mindestens eine lichtdurchlässige Öffnung im Gebäude befindet.

4.4.2 Notwendige Daten für die Tageslichtquotientberechnung

Für die Berechnung des Tageslichtquotienten ist es wichtig, dass folgende Daten im Revit-Modell enthalten sind und korrekt übertragen werden:

- Bauteilabmessungen
- Innenwände und Raumabmessungen: Die Raumtiefe ist für die Berechnung des Tageslichtquotienten nach DIN 5034-1 erforderlich, da die Berechnung in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von beiden Seitenwänden erfolgt.
- Orientierung und Standort: wichtig für die Sonneneinstrahlung
- Abmessungen und Position der lichtdurchlässigen Flächen

4.4.3 Geometrieeingabe

4.4.3.1 Geometrie

Zur Untersuchung der Übertragung der Geometrie wurden die Modelle von den Abschnitten 4.3.3.1 bis 4.3.3.4 übernommen. Unabhängig von der Definition der Geschossebenen war die Übertragung der Bauteilabmessungen und Raumhöhen korrekt.

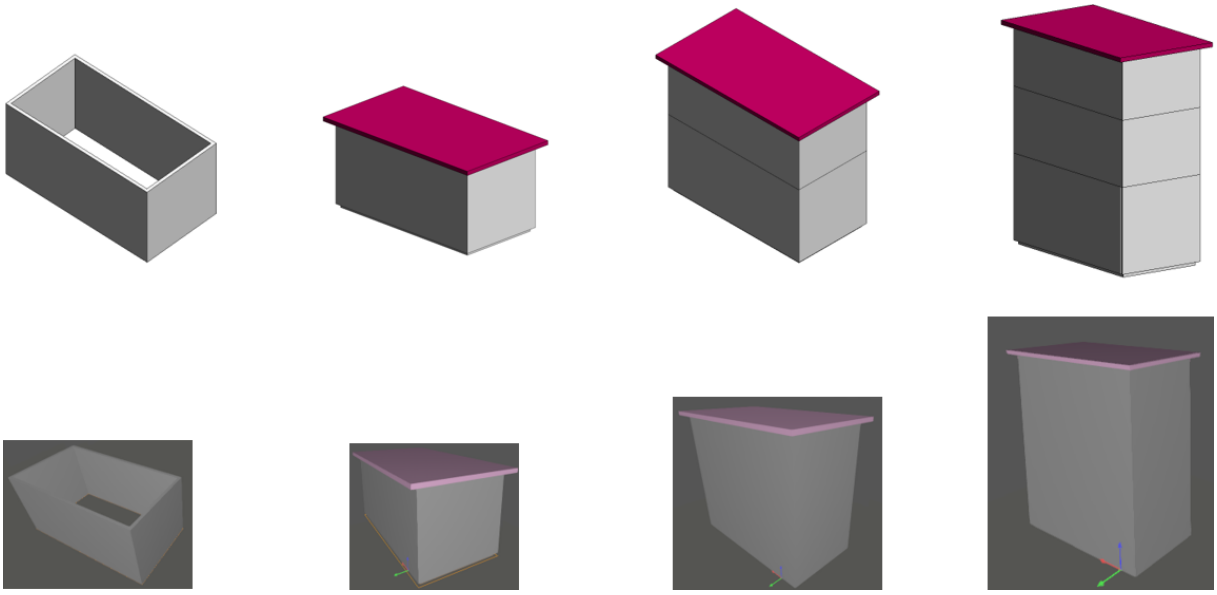


Abbildung 55: 3D-Ansicht von vier Testgebäuden in Revit (oben) und nach Import in DIALux (unten)

4.4.3.2 Lichtdurchlässige Öffnungen

Das Modell mit Öffnungen vom Abschnitt 4.3.3.5 wurde in DIALux importiert. Die Fenster- und Türabmessungen wurden korrekt übertragen. Im Gegensatz zu Hottgenroth sieht die Glastür auch nach Import in DIALux transparent aus.

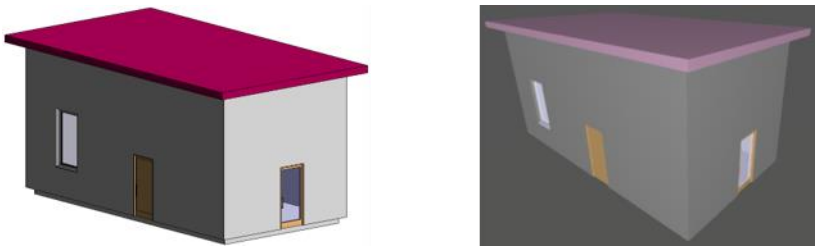


Abbildung 56: 3D Ansicht von dem Gebäude mit Öffnungen in Revit (links) und nach Import in DIALux (rechts)

Bei der Berechnung des Tageslichtquotienten wird aber ersichtlich, dass nur das Fenster als lichtdurchlässig anerkannt wurde. Die Glastür hingegen, wird in der Berechnung als opak angesehen.

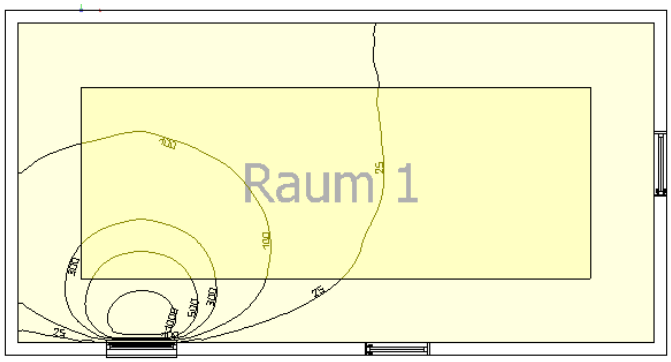


Abbildung 57: Ergebnisse der Berechnung der Beleuchtungsstärke in DIALux

4.4.3.3 Komplexe Geometrie

DIALux stellt den Anwendern ein „regelkonformes BIM/IFC Beispiel“ zur Verfügung, das eine Pfosten-Riegel-Fassade enthält. Nach dem Import sieht die Pfosten-Riegel-Fassade in DIALux transparent aus, aber sie wird nicht als tageslichtrelevant anerkannt. Die Berechnung des Tageslichtquotienten zeigt, dass diese Fassade nicht als lichtdurchlässig angesehen wird.
Die einzige Möglichkeit laut DIALux Support besteht darin, die Fensterelemente in der Pfosten-Riegel-Fassade neu zu definieren.

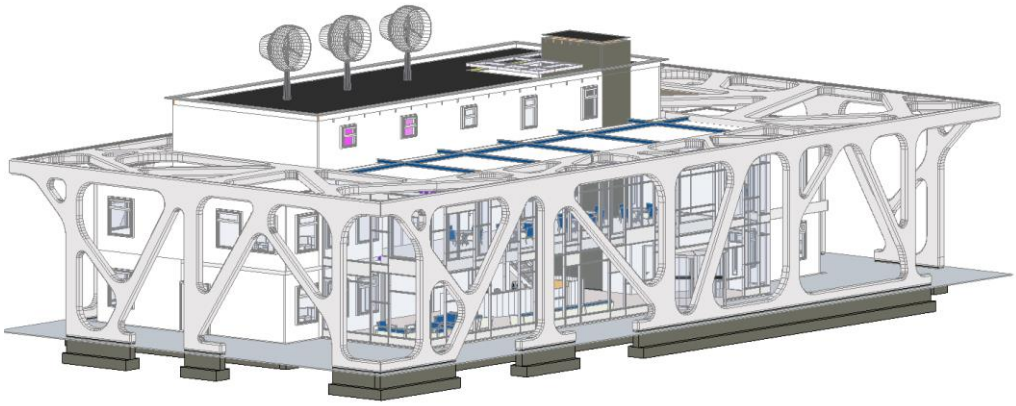


Abbildung 58: Revit-Screenshot des DIALux-Beispiels mit einer Vorhangfassade

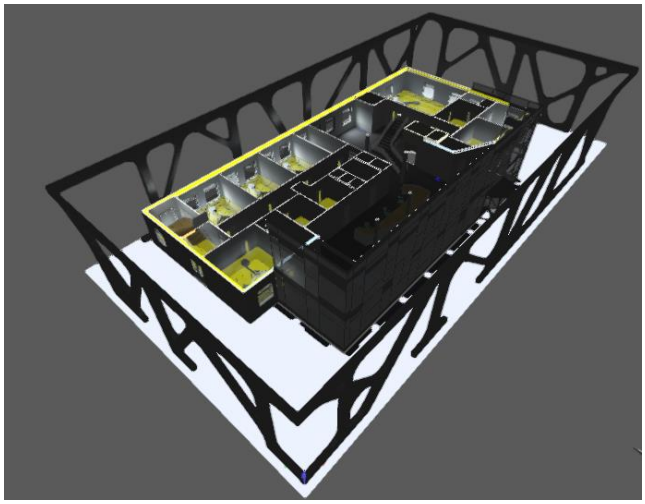


Abbildung 59: DIALux-Screenshot nach der Berechnung des Tageslichtquotienten für das DIALux-Beispiel mit einer Pfosten-Riegel-Fassade. In der Berechnung wurde die Pfosten-Riegel-Fassade sichtlich als opak angesehen.

4.4.3.4 Innenwände und Räume

Auch wenn Räume nicht spezifisch in Revit modelliert werden, erscheinen diese in DIALux als Räume.

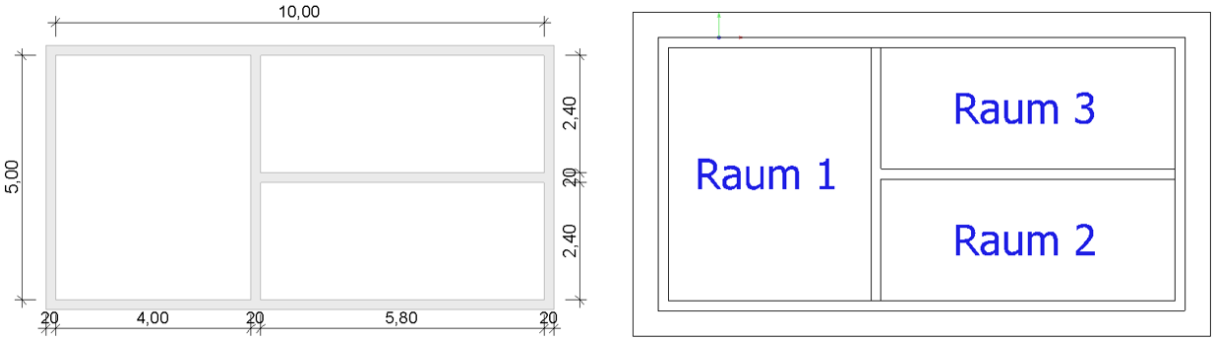


Abbildung 60: Grundriss eines Gebäudes ohne Raumdefinition in Revit (links) und nach Import in DIALux (rechts)

Es ist also für den Import in DIALux nicht notwendig, Räume vorher in Revit zu definieren.

4.4.3.5 Komplexes Gebäude

Ein Teilausschnitt des Modells für ein Schulgebäude in Revit wurde nach IFC exportiert und in DIALux importiert.

Nach dem Import in DIALux wurden die Abmessungen korrekt übertragen. Für die Fenster kann aber kein Haken „tageslichtrelevant“ gesetzt werden. Das liegt daran, dass die Fenster mit der Familie „Fassadensysteme“ in Revit modelliert wurden. Diese werden also bei der Tageslichtberechnung nicht als lichtdurchlässig berücksichtigt. Außerdem wurde die Berechnung des Tageslichtquotienten gleich unterbrochen.

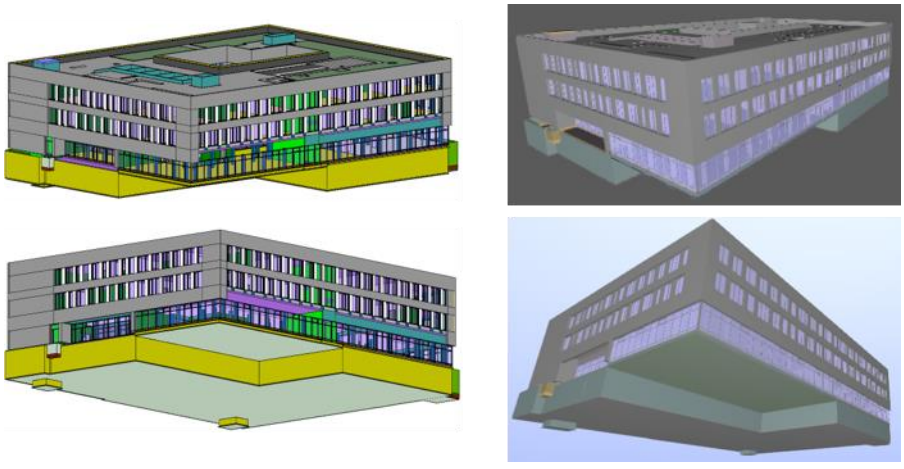


Abbildung 61: 3D-Ansichten des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

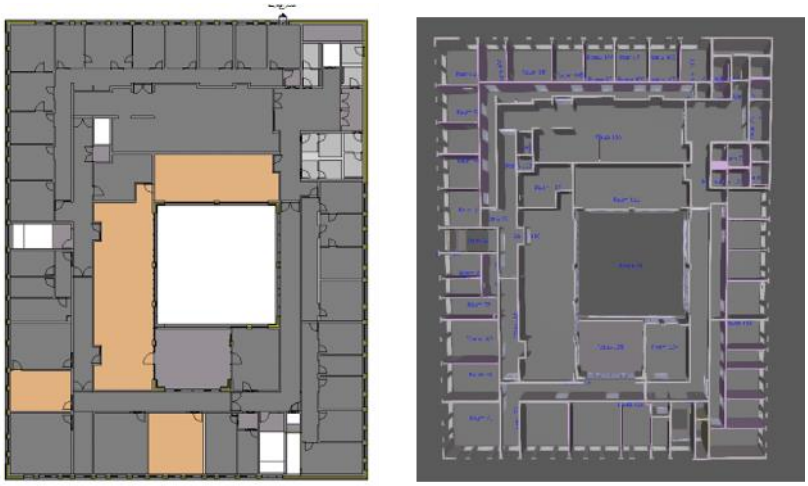


Abbildung 62: 3D-Ansichten des 1.OG des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts)

4.4.4 Eingabe des Standorts und der Orientierung des Grundstücks

Zur Untersuchung der Übertragung des Standorts und der Orientierung des Grundstücks wurde das Modell vom Abschnitt 4.3.5 genommen. Als Standort des Grundstücks wurde in Revit Freiburg im Breisgau definiert.

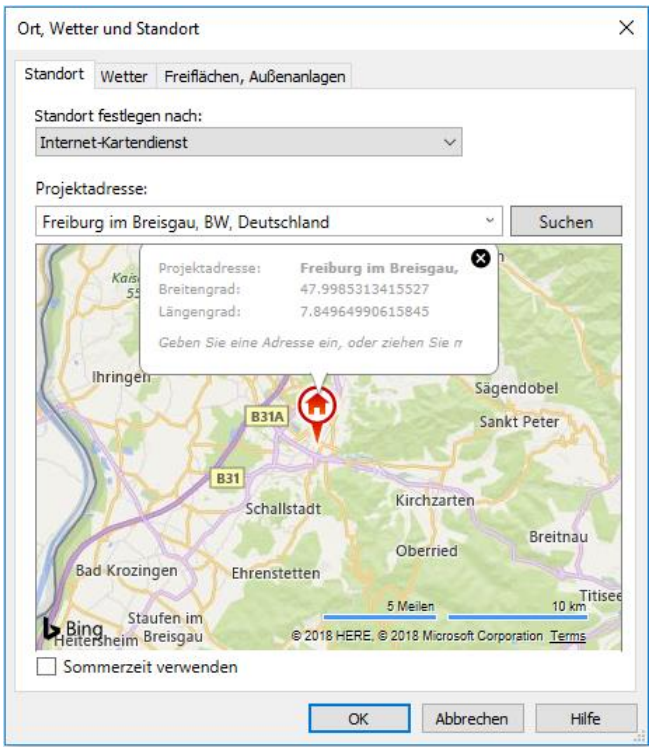


Abbildung 63: Standortdefinition in Revit

Nach dem Import in DIALux wird der Standort korrekt übertragen.

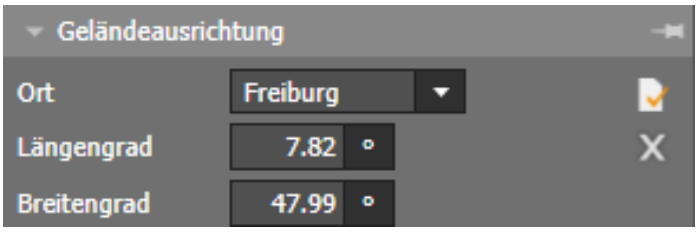


Abbildung 64: Geländeausrichtung nach Import in DIALux

Wie auf folgender Abbildung ersichtlich ist, wird das Grundstück außerdem mit der korrekten Orientierung übertragen.

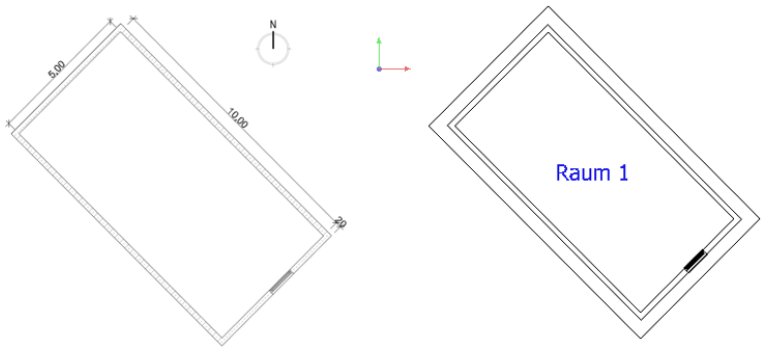


Abbildung 65: Grundriss eines Gebäudes mit einem süd-ost orientierten Fenster in Revit (links) und nach Import in DIALux (rechts)

4.4.5 Zusammenfassung

Bei dem Import von IFC-Dateien wurden bei einfachen Gebäuden die Daten zum Großteil korrekt übertragen. Jedoch haben sich Probleme bei manchen lichtdurchlässigen Öffnungen ergeben, die bei der Berechnung als opak erfasst wurden. Die Übertragung von Pfosten-Riegel-Fassaden ist möglich, aber sie werden bei der Berechnung ebenfalls als lichtundurchlässig angesehen. Auch wenn die Möglichkeit besteht, alle transparenten Elemente einer Pfosten-Riegel-Fassade neu in DIALux zu definieren, so ist das jedoch sehr zeitaufwendig.

4.5 Ökobilanz

In diesem Abschnitt werden die heutigen Möglichkeiten zur Erstellung einer Ökobilanz mit Unterstützung des BIM-Modells vorgestellt.

Aus Revit können Bauteillisten erstellt werden, um die Mengen und Massen automatisch zu ermitteln. Es ist möglich, die Bauteile nach ausgewählten Kriterien zu sortieren. Die Bauteillisten können als Text-Datei gespeichert und dann in Excel geöffnet werden. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel von einer Bauteilliste, die automatisch mit Revit erstellt wurde.

<02_5dfas-0.00.11-BL-Alu-Pfosten_Aufteilung-Massen>

A	B	C	D
5dfas Gebäudeteil	Länge	Anzahl	Familie
Büro	8.765,272	7392	Pfosten rechteckig
Büro: 7392	8.765,272		
Hotel	4.232,774	3249	Pfosten rechteckig
Hotel: 3249	4.232,774		
Stiftung	2.619,457	2283	Pfosten rechteckig
Stiftung: 2283	2.619,457		
Gesamt: 12924	15.617,503		

Abbildung 66: Automatisch in Revit erstellte Bauteilliste zur Ermittlung der Länge der Aluminium-Pfosten der Fassade, getrennt nach Gebäudeteil

Die Mengenermittlung hängt stark von der Modellierung und dem Detaillierungsgrad ab. Wenn die Bauteile nicht detailliert genug sind (zum Beispiel ein Paneel ohne Beschreibung der Materialien), muss die Bauteilliste nachbearbeitet werden. Für die Umrechnung der Materialmengen in der geeigneten Einheit sollten auch die Materialeigenschaften wie die Dichte oder die flächenbezogene Masse definiert sein. Die automatisierte Mengenermittlung hat auch den Vorteil, dass sie genauer als eine manuelle Mengenermittlung ist. Fehler können sich zwar ergeben, wenn Bauteile nicht modelliert wurden; diese Fehler sind aber einfacher nachzuvollziehen, als wenn Bauteile bei der manuellen Mengenermittlung vergessen wurden.

In dieser Arbeit wird die Ökobilanz mit Excel ausgeführt. Die Umweltindikatoren müssen aus Ökobaudat oder aus EPD kopiert werden. Es existieren aber Software für Ökobilanzen, die die Datenbanken enthalten. Die Diplomarbeit von K. Forth befasst sich mit BIM-integrierte Ökobilanzierung. In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Softwareprodukte zur Erstellung von

Ökobilanzen analysiert. Es hat sich herausgestellt, dass für die Ökobilanzierung nach den DGNB Richtlinien zwei Softwareprodukte geeignet waren: eLCA und OneClickLCA.

eLCA ist eine Browseranwendung mit Daten aus Ökobaudat, die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung entwickelt wurde. In dieser Software sind Berechnungen gemäß der BNB und der DGNB möglich. Die Baukonstruktionen und Massen müssen aber händisch eingegeben werden. Die Verwendung dieser Software in Verbindung mit von Revit automatisch erstellten Bauteillisten könnte das Kopieren von Umweltindikatoren von Ökobaudat nach Excel ersparen.

OneClickLCA ist eine Software der Firma Bionova Ltd., die unter anderem für Ökobilanzen nach BREEAM, LEED, HQE und DGNB geeignet ist. Sie unterstützt den BIM-Prozess durch den Import von IFC-Dateien und durch Plug-ins zu verschiedenen BIM-Softwareprodukte wie zum Beispiel Revit. Es sind mehrere Datenbanken und EPD-Datensätze verfügbar, unter anderem die Ökobaudat und EPD aus der IBU-Plattform.

Mit dem Revit Plug-in werden die Mengen aus dem Revit-Modell ermittelt und die Materialzuordnung vollautomatisiert. Laut K. Forth ist die Materialzuordnung jedoch schwer nachvollziehbar, und Fehler sind schwer zu erkennen und zu berichtigen. Außerdem werden Komposit-Materialien wie zum Beispiel Stahlbeton nicht korrekt abgebildet.

Mit dem Import von IFC-Dateien haben sich Abweichungen bezüglich der Geometrie und der Materialzuordnung ergeben. Es konnte also keine zufriedenstellende Qualität der Ökobilanz mit der Verwendung dieser Schnittstelle erreicht werden. (Forth, 2018)

4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Datenaustausch zwischen dem BIM-Modell in Revit und den fachspezifischen Softwareprodukten Hottgenroth und DIALux noch nicht genug ausgereift ist, um bei der Planung zum Einsatz zu kommen. Der Import und der Export nach dem IFC-Format sind immer mit einem Informationsverlust verbunden. Ein weiteres Problem liegt in der getrennten Modellierung für den Rohbau, die Fassade und den Ausbau. Mit dieser Modellierungsweise kann die Software Hottgenroth nicht umgehen.

Für die Berechnung der Ökobilanz kann schon mit der automatischen Mengenermittlung viel Zeit gewonnen werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Modell mit dem geeigneten Detaillierungsgrad modelliert wurde.

In dem nächsten Abschnitt wird anhand eines konkreten Beispiels untersucht, wie viel Zeit gewonnen werden könnte, wenn der Datenaustausch reibungslos funktionieren würde.

5 Potential der BIM-Arbeitsweise am Beispiel des Variantenvergleiches für das Projekt „Volksbank Freiburg“

Dieses Kapitel behandelt das Potential der BIM-Arbeitsweise mit einer Zeitmessung am Beispiel des Projektes „Volksbank Freiburg“. Zuerst wird das Projekt vorgestellt, dann erfolgt ein Vergleich der geplanten Fassade mit zwei alternativen Fassadenvarianten. Um das Effizienzsteigerungspotential durch einen reibungslosen BIM-Planungsprozess zu zeigen, wird der Zeitaufwand für die einzelnen Fassadenplanungsschritte ohne Einsatz von BIM gemessen. Dabei wird gezeigt, welche Schritte mit dem Einsatz von BIM erspart werden könnten und wie zeitaufwendig diese Schritte sind. Erst wird nachgewiesen, dass alle drei Varianten die im Abschnitt 3 vorgestellten Mindestanforderungen bezüglich Wärmeschutz und Tageslichtversorgung erfüllen. Der Vergleich wird dann durch eine Ökobilanzierung der Fassadenelemente bestimmt.

5.1 Beschreibung des Projektes „Volksbank Freiburg“

Es handelt sich um ein Bauvorhaben in Freiburg für einen Gebäudekomplex mit hauptsächlich Büro- und Hotelnutzung. Es soll die schon abgerissenen Bestandsgebäude der Volksbank, des Hotels Rheingold und der Aula des St. Ursula-Gymnasiums ersetzen. Das Grundstück befindet sich in einer Höhe von 270 m üNN (über Normal-Null) gegenüber dem Hauptbahnhof, an der Ecke zwischen der Bismarckallee und der Eisenbahnstraße. Der architektonische Entwurf wurde von Hadi Teherani Architects entwickelt; Visualisierungen werden auf folgenden Abbildungen gezeigt.

Abbildung 67: Visualisierungen des Entwurfs der „Volksbank Freiburg“

Wie in den Visualierungen ersichtlich ist, besteht das Gebäude aus zueinander versetzt angeordneten Kuben: zwei oder drei Geschosse sind in Einheiten zusammengefasst und zueinander in zwei Richtungen um jeweils 70 cm parallel versetzt angeordnet. Daher entstehen Vor- und Rücksprünge in der Fassade. Der Rohbau besteht aus einem Skelettbau mit Stahlbetondecken.

Das Gebäude wird in zwei Bauteile gegliedert: der Bauteil A, der Eigentum der Volksbank ist, und der Bauteil B, der Eigentum der „Stiftung Breisgauer Katholischer Religionsfonds“ ist. Im Bauteil A befinden sich im Erdgeschoss Geschäfte und in den Obergeschossen die Büros der Volksbank sowie ein Hotel. Der höchste Bereich besteht aus einem Turm mit 12 Geschossen in einer Höhe von 44,115 m. Im Bauteil B soll ein fünfgeschossiger Neubau für die bestehende Aula des St. Ursula Gymnasiums sowie Musikräume und Büroflächen gebaut werden.

Abbildung 68: Bauteil A mit Büro- (in blau dargestellt) und Hotelnutzung (in Rot dargestellt), und Bauteil B (in Gelb dargestellt) (Hadi Teherani Architects, 2016)

Insgesamt stellt das ein Bauvolumen von 25.344 m^2 BGF oberirdisch dar (NBF_Bau- und Nutzungsbeschreibung.doc). Dazu kommt noch eine gemeinsame dreigeschossige Tiefgarage. Folgende Abbildung zeigt die Anzahl an oberirdischen Geschossen in den verschiedenen Teilen des Gebäudes.

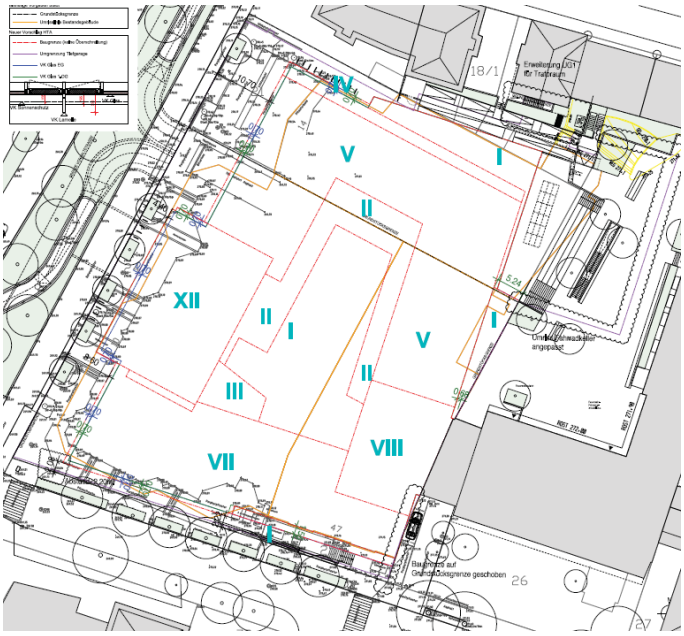


Abbildung 69: Grundriss mit Anzahl der Geschosse (Hadi Teherani Architects, 2017)

Die Bürobereiche des Bauteils A sowie die Gewerbeeinheiten im Erdgeschoss sollen eine DGNB-Zertifizierung mit dem Gütesiegel Gold erhalten. Für alle übrigen Bereiche wie das Hotel und den Bauteil B ist keine Zertifizierung vorgesehen.

5.2 Rahmenbedingungen für den Vergleich

In der Folge werden drei Fassadenvarianten für das Projekt „Volksbank Freiburg“ verglichen: die geplante Fassade, und zwei andere Varianten. Es wird nur der Bauteil A betrachtet. Damit alle Varianten die grundlegenden Anforderungen an Fassaden erfüllen, werden folgende Mindestanforderungen gestellt:

- Wärmeschutz: Alle Varianten müssen die EnEV 2014 mit den verschärften Anforderungen von 2016 einhalten. Der Nachweis wird im Abschnitt 5.5.1 ausgeführt.
- Visuelle Anforderungen: Die Varianten müssen die Anforderungen bezüglich der Sichtverbindung nach außen und des Tageslichts gemäß der Arbeitsstättenverordnung und der DIN 5034-1:2011 erfüllen. Der Nachweis erfolgt im Abschnitt 5.5.2.

5.3 Beschreibung der drei Varianten

Die Fassade des Bauteils A gliedert sich prinzipiell in vier Bereiche. Der erste Bereich bildet das Erdgeschoss und teilweise das 1. Obergeschoss zu den Straßenseiten. Für diesen Bereich wurde eine geschosshohe Glasfassade in Pfosten-Riegel-Konstruktion gewählt. Der zweite Bereich ist ein Teil der Ostfassade des Hotels im Erdgeschoss, wo massive Stahlbetonwände mit einer hinterlüfteten Blechfassade vorgesehen sind. Beide Bereiche bleiben in allen Fassadenvarianten gleich. Die zwei übrigen Bereiche sind die Fassade des Büroteils und die Fassade des Hotelteils in den Obergeschossen, die 92% der gesamten Fassade darstellen. Nur diese zwei Bereiche sind in den drei Varianten unterschiedlich. In allen Varianten haben die Außentüren einen U-Wert von 1,5 $W/m^2.K$.

5.3.1 Variante 1: Ist-Zustand

Bei dem Ist-Zustand ist für die Obergeschosse eine Pfosten-Riegel-Fassade mit einem Raster von 1,4 m * 3,5 m vorgesehen. Diese besteht aus transparenten und opaken Elementen; der Anteil an opaken Elementen hängt von der Nutzung des Bereichs ab. Vertikale Aluminiumlisenen sind vor den Pfosten angeordnet. Sie haben eine Tiefe von 350 mm und die Breite der Pfosten, d.h. 50 mm. In diese Lisenen wird der Sonnenschutz geführt.

5.3.1.1 Büroteil

Der Bürobereich wird raumhoch verglast. Zwischen den verglasten Bereichen befinden sich 70 cm breite opake Sandwichpaneele mit Aluminiumkaschierung. Sie verfügen über integrierte nach innen öffnende Öffnungsflügel mit Öffnungsbegrenzern. Ein außenliegender Sonnenschutz in Form von schienengeführten Raffstoren ist geplant. Die Brüstung besteht aus Beton und ist mit Aluminiumverbundplatten verblendet.

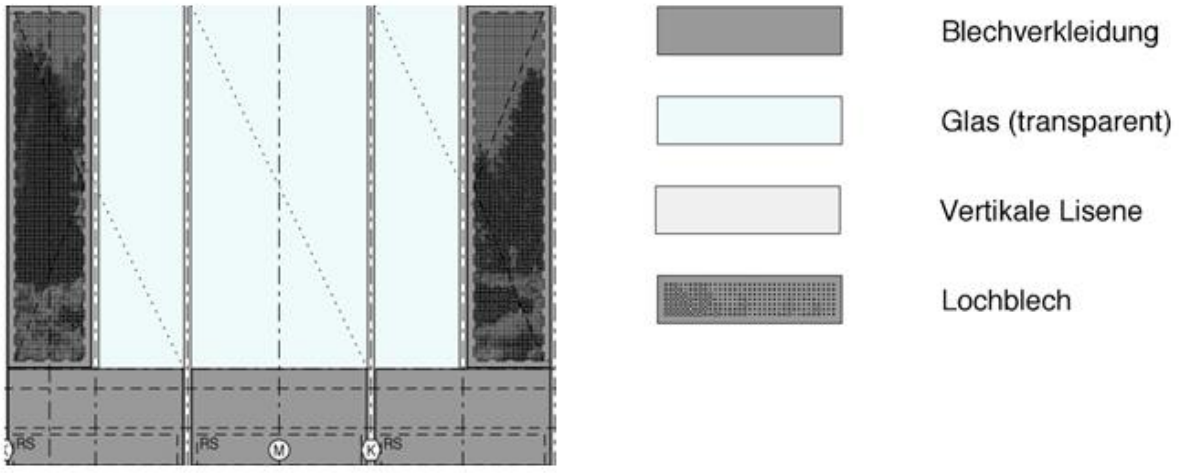


Abbildung 70: Schematische Darstellung eines wiederkehrenden Elementes im Büroteil

Der Verglasungsanteil im Bürobereich beträgt 55 %. Der Aufbau der Brüstung, der Lüftungsflügel und der Verglasung sind folgenden Tabellen zu entnehmen.

Tabelle 7: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung der Brüstung beim Ist-Zustand

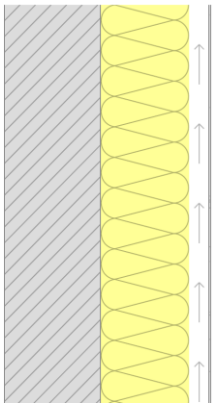
Brüstung				
	Von innen nach außen	Dicke d in m	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Wärmedurchlasswiderstand R in m2K/W
	Beton	0,15	2	0,075
	Mineralwolle	0,14	0,035	4
	Hinterlüftung	0,03		-
	Aluminium-Blech	0,003		-
			R_{si} in m^2K/W	0,13
			R_{se} in m^2K/W	0,13
			R_{tot} in m^2K/W	4,335
			U in W/m^2K	**0,23**

Tabelle 8: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung der Lüftungsflügel beim Ist-Zustand

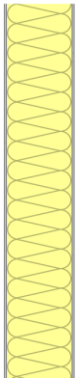
Lüftungsflügel mit Lochblechverkleidung				
	Von innen nach außen	Dicke d in m	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Wärmedurchlasswiderstand R in m2K/W
	Aluminium-Blech	0,002	200	0,00001
	Mineralwolle	0,08	0,035	2,28571
	Aluminium-Blech	0,002	200	0,00001
			R_{si} in m^2K/W	0,13
			R_{se} in m^2K/W	0,04
			R_{tot} in m^2K/W	2,46
			U in W/m^2K	**0,41**

Tabelle 9: Eigenschaften der Verglasung und der Pfosten beim Ist-Zustand

Verglasung	
U_g	0,7 W/m²K (Dreifachverglasung) Mit wärmetechnisch verbessertem Randverbund
g	0,34 (Sonnenschutzverglasung)
Pfosten und Riegel	
Material	Aluminium, thermisch getrennt
U_f	1,5 W/m²K
Ansichtsbreite	5 cm Tiefe: 15 cm
Sonnen- und Blendschutz	
Sonnenschutz	Im Büroteil: Außenliegende Raffstoren, randgebördelte Lamellen mit einer Breite von 80 mm, aus pulverbeschichtetem Aluminium Automatische Steuerung anhand der Einstrahlung Im Hotelteil: kein außenliegender Sonnenschutz
Blendschutz	Innenliegender Blendschutz

5.3.1.2 Hotelteil

Im Hotelbereich soll der Anteil an transparenten Elementen niedriger sein, dafür werden höhere Brüstungen und opake Paneele mit opakem emailliertem Glas vorgesehen. Der Verglasungsanteil beträgt ungefähr 30 %. In diesem Bereich ist kein außenliegender Sonnenschutz geplant. Die Öffnungsflügel werden hier auch opak ausgeführt. Ausschließlich an der Ostfassade des Hotels befinden sich starre horizontale nach innen geneigte Lamellen als Sichtschutz auf den Schulhof.

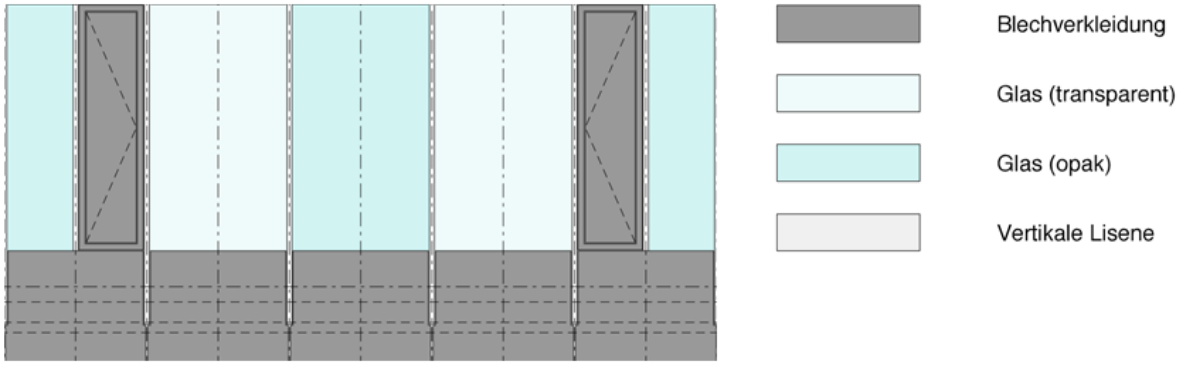
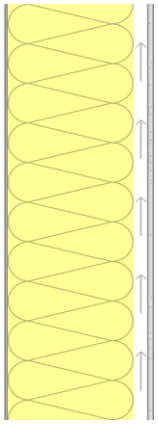


Abbildung 71: Schematische Darstellung eines wiederkehrenden Elementes im Hotelteil

Der Aufbau der Brüstungen, der Lüftungsflügel und der Verglasung ist gleich wie beim Bürobereich. Der Aufbau des opaken Glaspaneels ist folgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 10: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des opaken Glaspaneels beim Ist-Zustand

Opakes Glaspaneel				
	Von innen nach außen	Dicke d in m	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Wärmedurchlasswiderstand R in m2K/W
	Aluminium-Blech	0,003	200	0,000015
	Mineralwolle	0,185	0,035	5,285714
	Hinterlüftung	0,02		-
	Glas	0,008		-
			R_{si} in m^2K/W	0,13
			R_{se} in m^2K/W	0,13
			R_{tot} in m^2K/W	5,545729
			U in W/m^2K	**0,18**

5.3.2 Variante 2: Elementfassade

Die zweite Fassade, die untersucht wird, ist eine Elementfassade. Sie besteht aus elementierten vorkonfektionierten Aluminium-Rahmenkonstruktionen mit opaken und transparenten Flächen. Die Elemente haben eine Breite von 1,4 m und eine Höhe von 3,5 m. Sie werden an den Geschossdecken angehängt. Der Aufbau der opaken Paneele und der Verglasung sind folgenden Tabellen zu entnehmen. Im Bürobereich wird ein innenliegender Sonnenschutz geplant.

Tabelle 11: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des hinterlüfteten Glaspaneels bei der Elementfassade

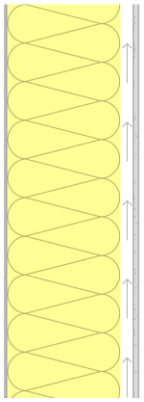
Hinterlüftetes Glaspaneel				
	Von innen nach außen	Dicke d in m	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Wärmedurchlasswiderstand R in m2K/W
	Stahlblech	0,003	50	0,00006
	Mineralwolle einseitig mit schwarzem Glasvlies kaschiert	0,18	0,035	5,14286
	Hinterlüftung	0,02		-
	Glas	0,008		-
			R_{si} in m^2K/W	0,13
			R_{se} in m^2K/W	0,13
			R_{tot} in m^2K/W	5,40292
			U in W/m^2K	**0,19**

Tabelle 12: Eigenschaften der Verglasung und der Pfosten bei der Elementfassade

Verglasung	
U_g	0,7 W/m^2K (Dreifachverglasung) Mit wärmetechnisch verbessertem Randverbund
g	0,25 (Sonnenschutzverglasung)
Pfosten und Riegel	
Material	Aluminium, thermisch getrennt
U_f	1,2 W/m^2K
Ansichtsbreite	6 cm Tiefe: 15 cm
Fensterrahmen	
Material	Aluminium, thermisch getrennt
U_f	1,2 W/m^2K
Rahmenbreite	7 cm
Sonnen- und Blendschutz	
Sonnen- und Blendschutz	Im Büroteil: Innenliegend Im Hotelteil: kein Sonnen-/Blendschutz

Der Büro- und der Hotelteil unterscheiden sich nur durch den Anteil an Verglasung. Im Bürobereich beträgt der Anteil der Verglasung 55 %, während er im Hotelteil 30 % beträgt.

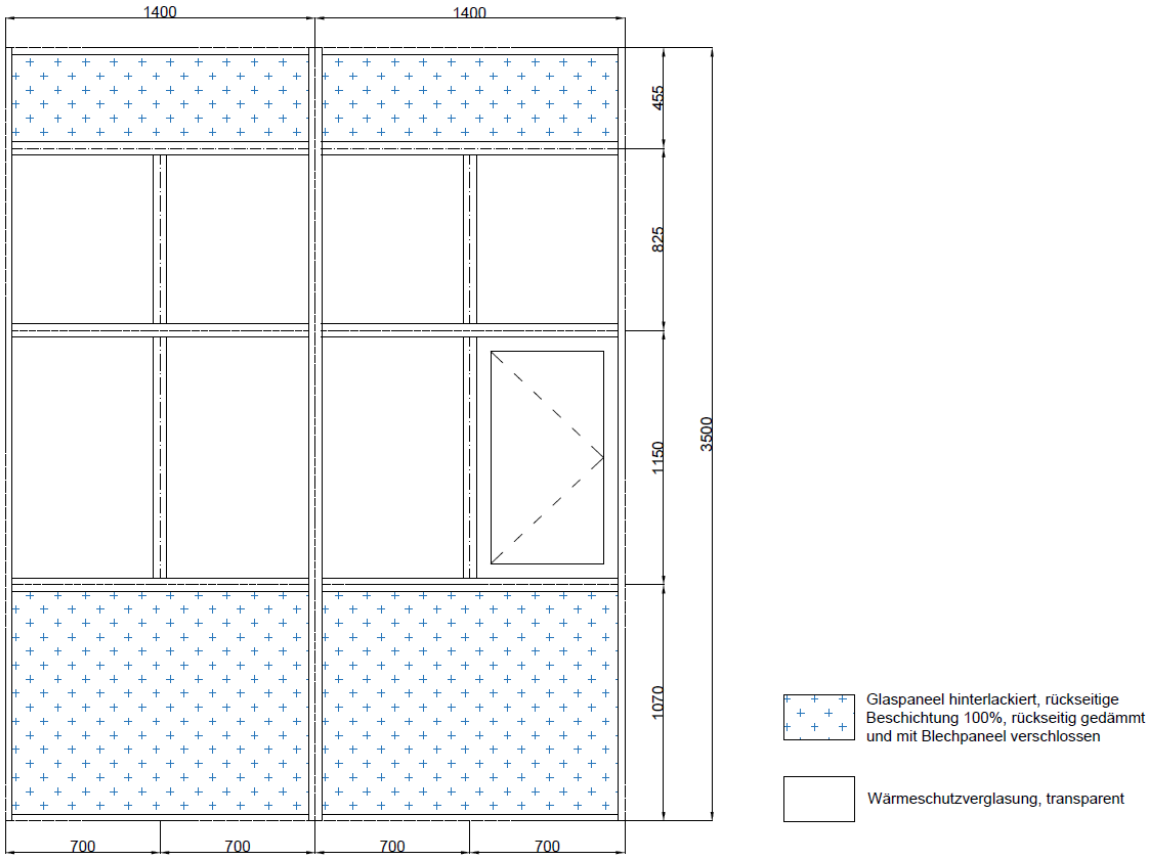


Abbildung 72: Zwei Elemente der Fassade im Bürobereich

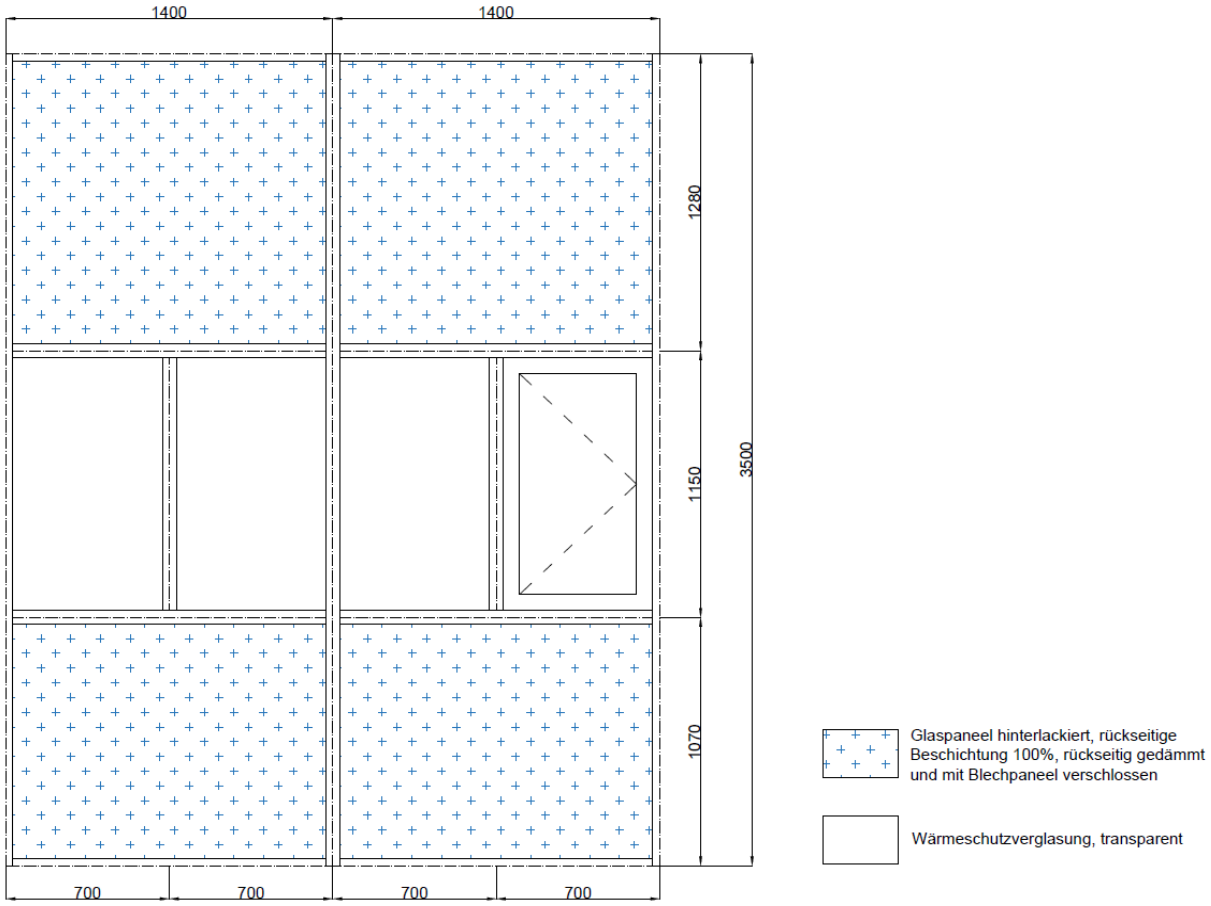


Abbildung 73: Zwei Elemente der Fassade im Hotelbereich

5.3.3 Variante 3: Fensterband

Bei der dritten Variante handelt es sich um eine Fensterband-Fassade. Diese besteht aus einem Aluminium-Fensterband mit Festverglasung und Drehkippflügel. Die außenliegenden Fensterbänke bestehen aus Aluminium-Blech. Ein außenliegender Sonnenschutz in Form von Raffstores ist geplant. Als Blendschutz sind innenliegende Flächenvorhänge vorgesehen. Die Brüstung besteht aus Beton und ist mit Faserzementplatten verkleidet. Der Anteil der Verglasung beträgt 50 %. Zwischen den zwei Fensterbändern befindet sich ein Sandwichpaneel. In dieser Variante wird nicht zwischen dem Büroteil und dem Hotelteil unterschieden: die Fassade ist überall gleich.

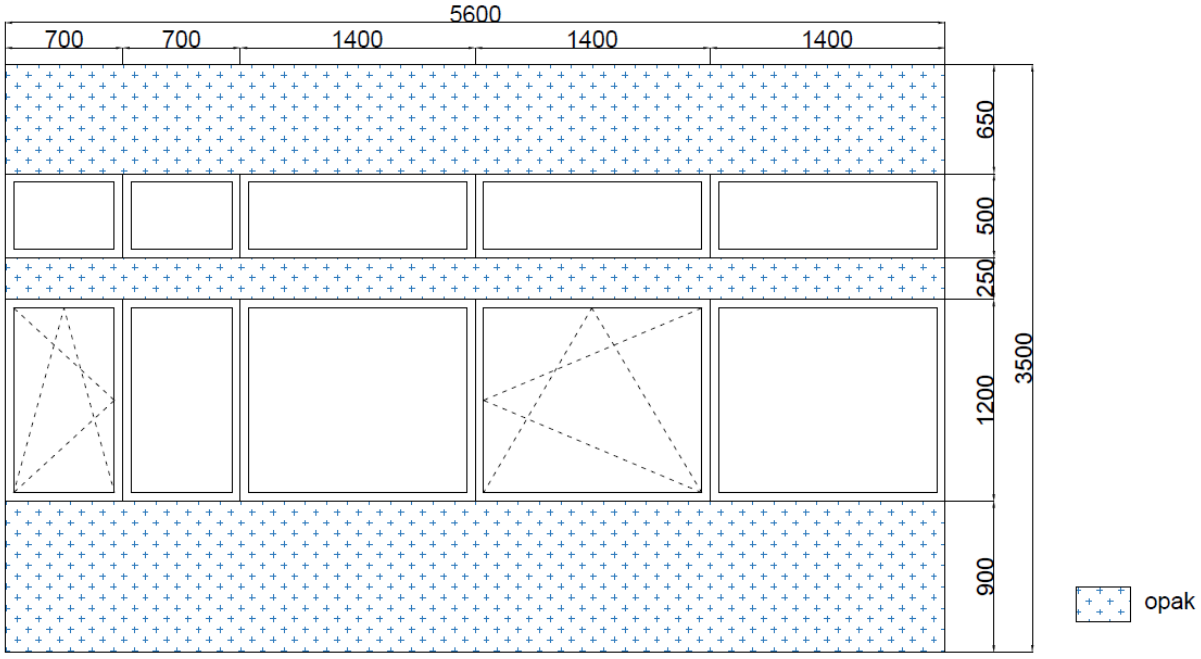


Abbildung 74: Schematische Darstellung eines Ausschnitts der Fensterband-Fassade

Tabelle 13: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des opaken Glaspaneels beim Fensterband

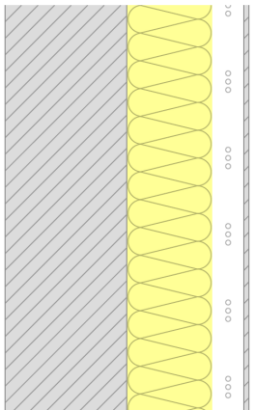
Brüstung				
	Von innen nach außen	Dicke d in m	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Wärmedurchlasswiderstand R in m^2K/W
	Beton	0,2	2	0,1
	Mineralwolle	0,14	0,035	4
	Hinterlüftung	0,052		-
	Faserzementplatte	0,008		-
			R_{si} in m^2K/W	0,13
			R_{se} in m^2K/W	0,13
			R_{tot} in m^2K/W	4,36
			U in W/m^2K	**0,23**

Tabelle 14: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des Sandwichpaneels beim Fensterband

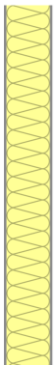
Sandwichpaneel				
	Von innen nach außen	Dicke d in m	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Wärmedurchlasswiderstand R in m^2K/W
	Aluminium-Blech	0,002	200	0,00001
	Mineralwolle	0,07	0,035	2
	Aluminium-Blech	0,002	200	0,00001
			R_{si} in m^2K/W	0,13
			R_{se} in m^2K/W	0,04
			R_{tot} in m^2K/W	2,17
			U in W/m^2K	**0,46**

Tabelle 15: Eigenschaften der Fenster beim Fensterband

Verglasung	
U_g	1,1 W/m^2K (Zweifachverglasung) Mit wärmetechnisch verbessertem Randverbund
g	0,56
Rahmen	
Material	Aluminium, thermisch getrennt
U_f	1,3 W/m^2K
Rahmenbreite	5 cm
Sonnen- und Blendschutz	
Sonnenschutz	Außenliegende Raffstoren Lamellen 60 mm breit, gewölbt, ungebördelt, aus pulverbeschichtetem Aluminium Automatische Steuerung anhand der Einstrahlung
Blendschutz	Innenliegende Flächenvorhänge

5.4 Nachweise

Weiterhin wird nachgewiesen, dass die drei Fassadenvarianten die im Abschnitt 3 definierten thermischen und visuellen Anforderungen erfüllen.

5.4.1 EnEV-Nachweis

Der EnEV-Nachweis wird mit der Software Hottgenroth durchgeführt. Das Gebäude wird anhand von den Plänen im DWG-Format in HottCAD nachmodelliert. In diesem Modell werden

für alle Bauteile ein Aufbau und bauphysikalische Kennwerte definiert. Es werden alle Räume definiert, und diese werden Zonen mit Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10 zugeordnet.
Es wurde zuerst das Gebäude mit allen Informationen aber ohne Fenster modelliert. Das Modell wurde dupliziert, um die zwei anderen Varianten zu erstellen. Die Fenster wurden dann in jedem dieser drei Modelle eingesetzt.

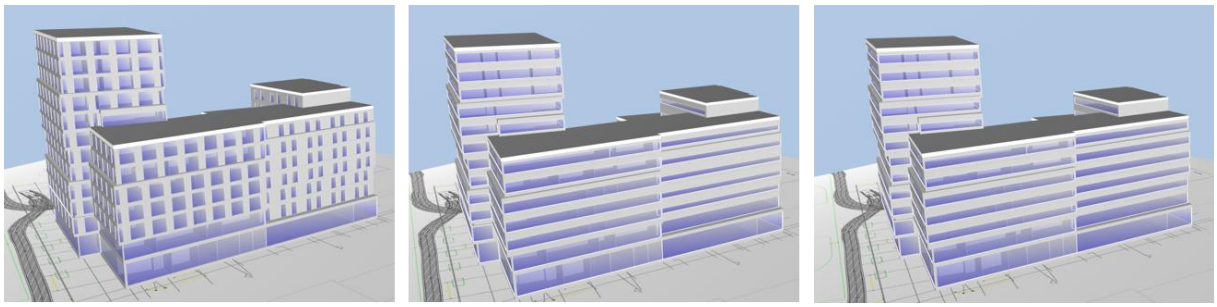


Abbildung 75: 3D-Modelle der „Volksbank Freiburg“ in HottCAD im Ist-Zustand (links), mit der Elementfassade (Mitte) und mit der Fensterband-Fassade (rechts)

Aus diesen Modellen wird jeweils die Hüllfläche automatisch erfasst und der EnEV-Nachweis ausgeführt.

Angaben zum Gebäude

Nettogrundfläche: A_{NGF}= 22.032 m^2

Volumen: V_e= 88.854 m^2

Bei der Berechnung wurden folgende Parameter gesetzt:

- Der Wärmebrückenzuschlag wurde pauschal mit 0,1 W/m^2K angenommen
- Für die Gebäudedichtheit wurde die Kategorie I gemäß der Tabelle 7 der DIN V 18599-2:2016 gewählt

Zonierung

Das Gebäude wurde in 14 Zonen unterteilt. Jeder Zone wurde ein Nutzungsprofil nach DIN V 18599:2016 zugewiesen.

Tabelle 16: Zonen mit Nutzungsprofilen nach DIN V 18599 und Konditionierung

Zone	Nutzungsprofil nach DIN V 18599-10:2016	Lüftungsanlage	Heizung	Kühlung	Warmwasser	Beleuchtung
1	Gruppenbüro	X	X	X	X	X
2	Großraumbüro	X	X	X	X	X
3	Verkehrsfläche		X			X
4	WC und Sanitärräume in Nichtwohngebäuden	X	X		X	X
5	Besprechung / Sitzungszimmer / Seminar	X	X	X		X
6	Lager		X			X
7	Sonstige Aufenthaltsräume	X	X	X		X
8	Hotelzimmer	X	X	X	X	X
9	Kantine	X	X	X		X
10	Theater - Foyer		X			X
11	Einzelhandel/Kaufhaus	X	X	X	X	X
12	Schalterhalle		X			X
13	Fitnessraum	X	X	X		X
14	Küche in Nichtwohngebäuden	X	X	X		X

5.4.1.1 Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes

Der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes erfolgt nach dem Sonneneintragskennwerteverfahren gemäß DIN 4108-2:2013. Freiburg befindet sich in der Sommerklimaregion C. Es kann hier von einer mittleren Bauweise ausgegangen werden, denn in allen Varianten bestehen die 30 cm dicken Decken aus Stahlbeton, die Wärmedämmung liegt an der Außenseite der Außenbauteile, es gibt keine abgehängte Decke und auch keine hohen Räume (DIN 4108-2:2013, S. 27). Da die Kühlung durch Deckenkühlung erfolgt, kann bei der Berechnung des zulässigen Sonneneintragskennwertes der Wert für den Einsatz passiver Kühlung in Betracht gezogen werden.

Der Nachweis wird für zwei kritische Räume vollzogen, wo der Sonneneintrag am größten ist: ein Raum im Büroteil und ein Raum im Hotelteil. Im Büroteil handelt es sich um einen Eckraum im 11.OG. Im Hotelteil handelt es sich um ein Regelhotelzimmer im 6. OG.

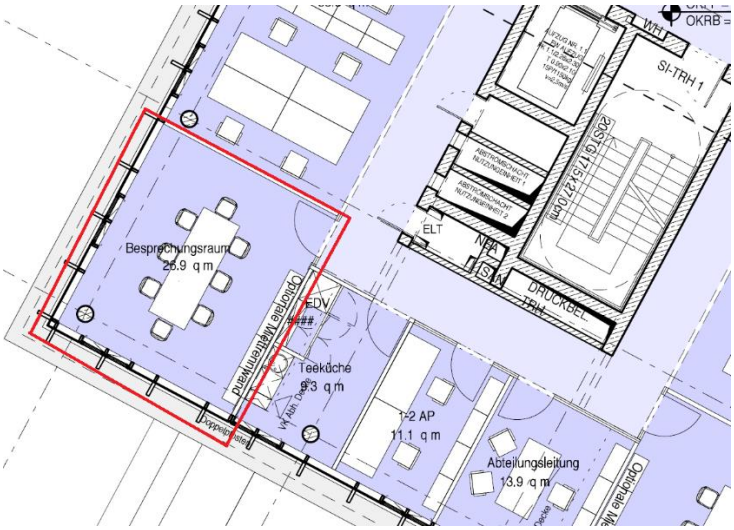


Abbildung 76: Kritischer Raum im 11. OG des Büroteils

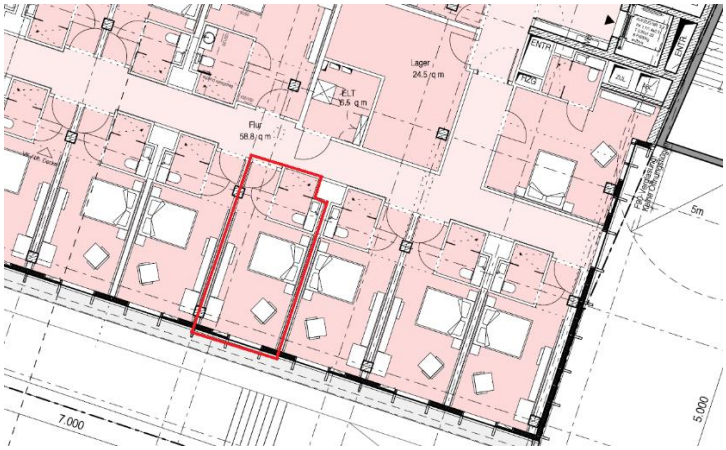


Abbildung 77: Kritischer Raum im 6. OG des Hotelteils

Der Nachweis erfolgt in Hottgenroth. Aus allen gezeichneten Räumen wird in Hottgenroth eine Raumliste erstellt, von der der relevante Raum gewählt werden muss. Nach der händischen Eingebung der einzelnen Parameter wird der Nachweis nach dem Sonneneintragskennwerteverfahren ausgeführt. Folgende Abbildung zeigt den Nachweis für den Büroteil im Ist-Zustand.

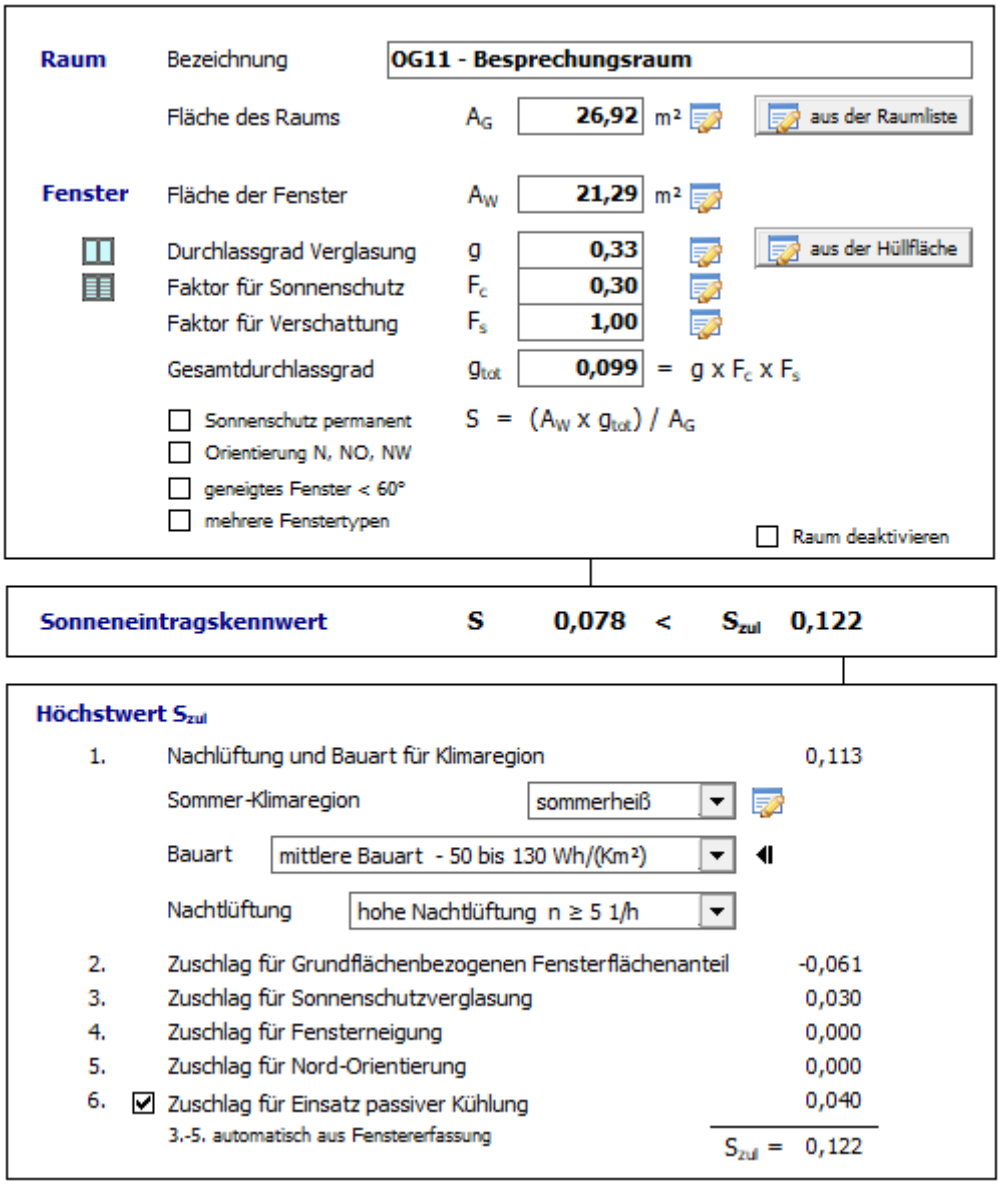


Abbildung 78: Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes in Hottgenroth für den kritischen Raum des Büroteils im Ist-Zustand

Für die anderen Varianten wird ähnlich vorgegangen. Die Ergebnisse erscheinen in der folgenden Tabelle.

Tabelle 17: Sonneneintragskennwerte für die kritischen Räume des Büroteils und des Hotelteils bei den drei Varianten

	g-Wert der Verglasung	Faktor für Sonnenschutz	S_{vorh}	S_{zul}
Kritischer Raum im Büroteil				
Ist-Zustand	0,33	0,3	0,078	0,122
Elementfassade	0,25	0,65	0,124	0,126
Fensterband	0,55	0,25	0,090	0,108
Kritischer Raum im Hotelteil				
Ist-Zustand	0,33	1	0,058	0,086
Elementfassade	0,25	1	0,043	0,086
Fensterband	0,55	0,25	0,035	0,047

5.4.1.2 Einhaltung der Höchstwerte der mittleren U-Werte der wärmeübertragenden Umfassungsfläche

U-Wert Berechnung

Bei der ersten und der zweiten Varianten handelt es sich um Vorhangfassaden. Da Hottgenroth keine Möglichkeit bietet, die U-Werte von Vorhangfassaden zu berechnen, müssen diese händisch nach DIN EN ISO 12631 berechnet werden. Die Vorhangfassaden werden in HottCAD als Fenster modelliert und die berechneten U-Werte händisch eingegeben. In unserem Fall wird für die Berechnung des U-Wertes der Vorhangfassade das Verfahren mit Beurteilung der einzelnen Komponenten benutzt. Folgende Abbildung zeigt diese Berechnungsmethode.

$$U_{cw} = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_p U_p + \sum A_f U_f + \sum A_m U_m + \sum A_t U_t + \sum l_{f,g}\Psi_{f,g} + \sum l_{m,g}\Psi_{m,g}}{A_{cw}} + \frac{\sum l_{t,g}\Psi_{t,g} + \sum l_{m,p}\Psi_{m,p} + \sum l_{m,f}\Psi_{m,f} + \sum l_{t,f}\Psi_{t,f}}{A_{cw}} \quad (12)$$

Dabei ist

U_g, U_p	der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung oder des Paneels;
U_f, U_m, U_t	der Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens, des Pfostens und des Riegels;
$\Psi_{f,g}$, $\Psi_{m,g}$, $\Psi_{t,g}$	der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge der kombinierten thermischen Wirkungen der Verglasung und des Rahmens oder des Pfostens oder des Riegels;
$\Psi_{m,p}$, $\Psi_{t,p}$	der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge der kombinierten thermischen Wirkungen von Paneel-Pfosten oder Paneel-Riegel;
$\Psi_{m,f}$, $\Psi_{t,f}$	der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge der kombinierten thermischen Wirkungen von Rahmen-Pfosten und Rahmen-Riegel.

Abbildung 79: Berechnung der U-Werte von Vorhangfassaden anhand des Verfahrens mit Beurteilung der einzelnen Komponenten gemäß DIN EN ISO 12631

Die U_{cw}-Werte wurden für jedes einzelne Element der beiden Vorhangfassaden ermittelt und dann flächengewichtet gemittelt. Die Berechnung ist dem Anhang A zu entnehmen.

Tabelle 18: U_{cw}-Werte für den Ist-Zustand und die Elementfassade

	U_{cw} im Büroteil	U_{cw} im Hotelteil
Ist-Zustand	0,92 W/m².K	0,67 W/m².K
Elementfassade	1,11 W/m².K	0,86 W/m².K

Bei der dritten Varianten, der Fensterband-Fassade, handelt es sich nicht um eine Vorhangfassade. Die U-Werte werden hier für die opaken Bauteile und die Fenster getrennt ermittelt. Die opaken Bauteile haben einen mittleren U-Wert von 0,26 W/m².K und die Fenster haben einen mittleren U-Wert von 1,44 W/m².K. Das ergibt einen mittleren U-Wert für die Fensterband-Fassade von U=0,83 W/m².K.

Der Büroteil hat eine Fassadenfläche von 4964,68 m² und der Hotelteil hat eine Fassadenfläche von 2554,40 m². Die U-Werte der drei Fassadenvarianten wurden flächenanteilig gemittelt und verglichen.

Tabelle 19: Mittlere U-Werte der drei Fassadenvarianten. Die U-Werte sind beim Ist-Zustand und beim Fensterband fast gleich.

	U-Wert für den Büroteil	U-Wert für den Hotelteil	Mittlerer U-Wert
Ist-Zustand	0,92 W/m^2.K	0,67 W/m^2.K	**0,84 W/m^2.K**
Elementfassade	1,11 W/m^2.K	0,87 W/m^2.K	**1,03 W/m^2.K**
Fensterband	0,83 W/m^2.K	0,83 W/m^2.K	**0,83 W/m^2.K**

Wie die obere Tabelle zeigt, unterscheiden sich die mittleren U-Werte der drei Fassadenvarianten kaum; vor allem beim Ist-Zustand und beim Fensterband sind diese fast gleich. Da die Sonneneintragskennwerte sich auch wenig unterscheiden, ist also zu erwarten, dass die drei Varianten zu einem ähnlichen Jahres-Primärenergiebedarf führen werden.
Für die sonstigen Bauteile wie zum Beispiel Decken und Dächer wurden die Aufbauten im Bauteilkatalog von Hottgenroth definiert und die U-Werte wurden automatisch berechnet. Die Aufbauten und U-Werte sind im Anhang B zu finden.

Einhaltung der Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten

Alle Zonen haben Raumsolltemperaturen im Heizfall, die mehr als 19°C betragen. Die Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche für Nichtwohngebäude befinden sich in der Tabelle 2 der Anlage 2 der EnEV. (EnEV 2014, S. 56) Die folgenden Tabellen zeigen, dass die Höchstwerte nicht überschritten werden.

Tabelle 20: Nachweis der Einhaltung der Höchstwerte der mittleren U-Werte der Hüllfläche beim Ist-Zustand

Bauteile	Mittlerer U-Wert	Höchstwert
Vorhangfassade	0,84 W/m^{2}K	1,5 W/m^{2}K
Opake Außenbauteile	0,19 W/m^{2}K	0,28 W/m^{2}K

Tabelle 21: Nachweis der Einhaltung der Höchstwerte der mittleren U-Werte der Hüllfläche bei der Elementfassade

Bauteile	Mittlerer U-Wert	Höchstwert
Vorhangfassade	1,02 W/m^{2}K	1,5 W/m^{2}K
Opake Außenbauteile	0,19 W/m^{2}K	0,28 W/m^{2}K

Tabelle 22: Nachweis der Einhaltung der Höchstwerte der mittleren U-Werte der Hüllfläche bei der Fensterband-Fassade

Bauteile	Mittlerer U-Wert	Höchstwert
Transparente Außenbauteile	1,37 W/m^{2}K	1,5 W/m^{2}K
Opake Außenbauteile	0,21 W/m^{2}K	0,28 W/m^{2}K

5.4.1.3 Einhaltung des zulässigen Jahres-Primärenergiebedarfs

Die TGA des Gebäudes wird in folgender Tabelle aufgelistet. Da für die Heizungsversorgung und teilweise die Warmwasserversorgung eine Fernwärme mit einem Primärenergiefaktor nicht erneuerbar von f_p=0,10 eingesetzt wird, ist zu erwarten, dass Heizung und Warmwasser bei dem nicht erneuerbaren Jahres-Primärenergiebedarf nicht maßgeblich sein werden.

Tabelle 23: TGA des Gebäudes „Volksbank Freiburg“

Heizung	Fernwärme mit dem Primärenergiefaktor f_p=0,10 Übergabe der Wärme über Deckenheizungen sowie freie Heizflächen
Warmwasser	Hotelzimmer: durch Fernwärme Büros und Handel: dezentral über Elektrodurchlauferhitzer
Kühlung	Kompressionskälteanlage Übergabe über Kühldecken
Lüftung	Zentrale raumlufttechnische Anlagen Zu- und Abluftgeräte: Heiz- und Kühlfunktion mit einem WRG > 70 %
Beleuchtung	Ausschließlich LED

Die Ergebnisse der Berechnung für die drei Fassadenvarianten und die Aufteilung des End- und nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und Warmwasser werden in folgender Abbildung dargestellt.

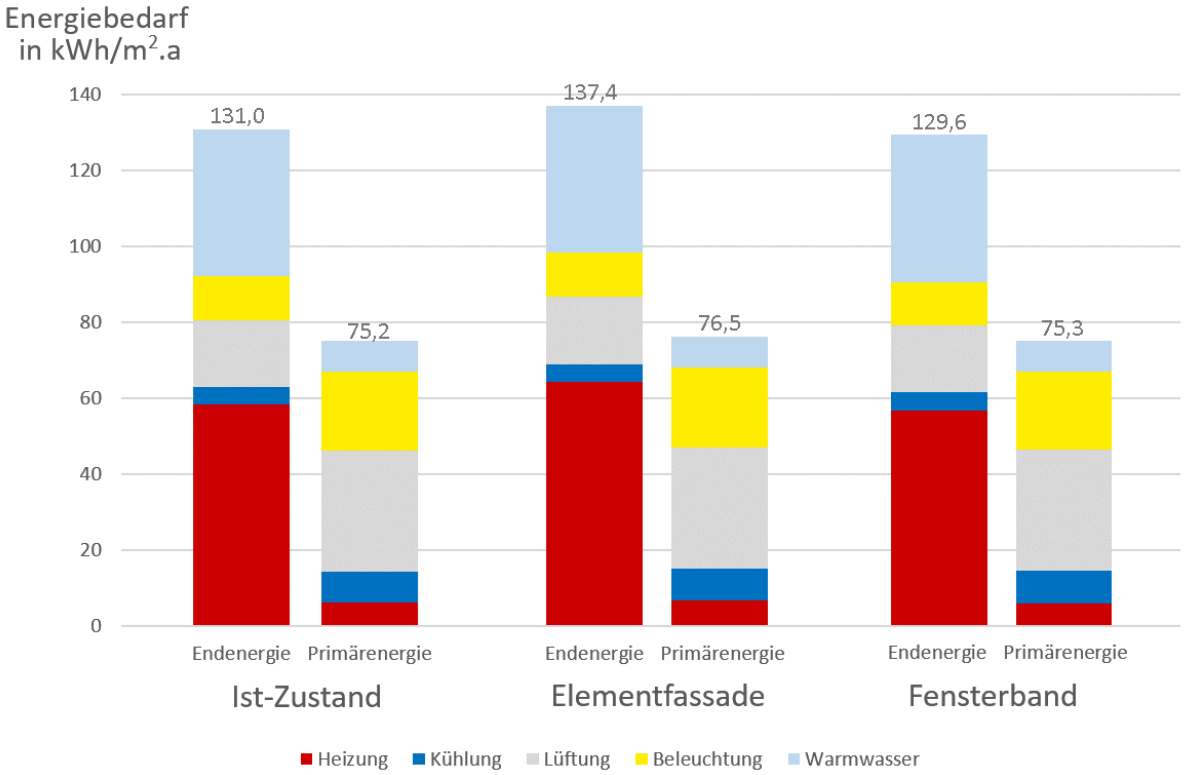


Abbildung 80: Der End- als auch der Primärenergiebedarf der drei untersuchten Varianten ist sehr ähnlich. Das ist plausibel, weil die Energieeinsparverordnung der TGA, welche in allen Varianten gleich ist, viel Bedeutung zuteilt.

Für die drei Varianten wurden die zulässigen Höchstwerte für den nicht erneuerbaren Jahres-Primärenergiebedarf eingehalten.

Tabelle 24: Nachweis der Einhaltung des zulässigen Höchstwertes des Jahres-Primärenergiebedarfs bei den drei Fassadenvarianten

	Jahres-Primärenergiebedarf q_p		**Zulässiger Höchstwert (0,75*$q_{Referenzgebäude}$)**
Ist-Zustand	75,2 kWh/m²	≤	117,8 kWh/m²
Elementfassade	76,5 kWh/m²	≤	120,4 kWh/m²
Fensterband	75,3 kWh/m²	≤	117,3 kWh/m²

5.4.2 Tageslicht und Sichtverbindung nach außen

5.4.2.1 Einhaltung der Arbeitsstättenverordnung

In allen Varianten haben Arbeitsräume eine Sichtverbindung nach außen.
Der Nachweis der Anforderung nach ausreichendem Tageslicht gemäß der Arbeitsstättenverordnung erfolgt mit dem Kriterium des Verhältnisses von lichtdurchlässigen Flächen zur Raumgrundfläche: dieses muss mindestens 1:10 betragen. Der Nachweis wurde für die Arbeitsräume im 2.OG geführt und ist dem Anhang D zu entnehmen.

5.4.2.2 Einhaltung der DIN 5034-1:2011

Sichtverbindung nach außen

Um eine ausreichende Sichtverbindung nach außen zu gewährleisten, gibt es in der DIN 5034-1:2011 Mindestabmessungen und Anforderungen bezüglich der Position von Fenstern sowie Anforderungen bezüglich der Fensterfläche im Verhältnis zu den Arbeitsraummaßen. Auch hier wird der Nachweis für die Arbeitsräume im 2.OG geführt. Der detaillierte Nachweis ist im Anhang D zu finden.
Die Arbeitsräume im 2. OG sind überwiegend für sitzende Tätigkeiten. Die Breite der durchsichtigen Verglasung des Fensters b_F beträgt in allen Räumen bei allen Fassadenvarianten mehr als 1,00 m. Da die Arbeitsräume in ihren Abmessungen vergleichbar mit Wohnräumen sind, gilt zusätzlich die Anforderung, dass die Breite der durchsichtigen Verglasung des Fensters b_F mindestens 55% der Breite des Arbeitsraumes betragen soll. Diese Anforderung wird in einigen Räumen beim Ist-Zustand wegen der Abfolge zwischen raumhohen Verglasungen und raumhohen opaken Lüftungspaneelen nicht erfüllt. Da die Verglasung aber raumhoch ist und alle anderen Anforderungen erfüllt sind, sollte die Sichtverbindung nach außen ausreichend sein.

Folgende Tabelle zeigt, dass die Anforderungen bezüglich der Mindesthöhe und der Position der Fenster erfüllt wurden.

Tabelle 25: Nachweis der Anforderungen bezüglich der Mindesthöhe und der Position der Fenster

	Soll	Ist-Zustand	Elementfassade	Fensterband
Höhe der durchsichtigen Verglasung h_F in m	≥ 1,25	2,765	1,855	1,5
Oberkante der durchsichtigen Verglasung des Fensters h_{Fo} in m	≥ 2,20	2,765	2,865	2,8
Unterkante der durchsichtigen Verglasung des Fensters h_{Fu} in m	≤ 0,95	0	0,95	0,95

Es wurden auch die Anforderungen bezüglich der Fensterfläche im Verhältnis zu den Arbeitsraummaßen erfüllt. Die Fensterfläche beträgt in allen Räumen mehr als 1,50 m^2 für allen Varianten, sodass die Raumtiefe keine Rolle mehr spielt und der Nachweis erfüllt ist. Alle Räume haben eine Grundfläche von weniger als 600 m^2. In diesem Fall entspricht die Anforderung $\sum F \geq 0{,}1.A$ der Anforderung der Arbeitsstättenverordnung, deren Nachweis im Abschnitt 5.5.2.1 erfüllt wurde. Die Anforderung $\sum F \geq 0{,}3.b.h$ war also maßgebend und wurde in den drei Varianten erfüllt.

Helligkeit

Der Nachweis der ausreichenden Beleuchtung mit Tageslicht erfolgt durch die Berechnung des Tageslichtquotienten mit der Software DIALux. Dafür muss das Gebäude in DIALux modelliert werden.

Im Gegensatz zu Hottgenroth ist es aber nicht notwendig, das komplette Gebäude fertig zu modellieren. In unserem Fall wird der Nachweis für die Arbeitsräume des Büroteils im 2.OG geführt: es reicht also, nur dieses Geschoss mit allen Fenstern und Innenräumen detailliert zu modellieren. Wie in HottCAD wird zuerst das Gebäude mit allen Innenwänden im 2. OG ohne Fenster modelliert. Das Modell wird dann dupliziert und für jede Variante mit Fenstern ergänzt.

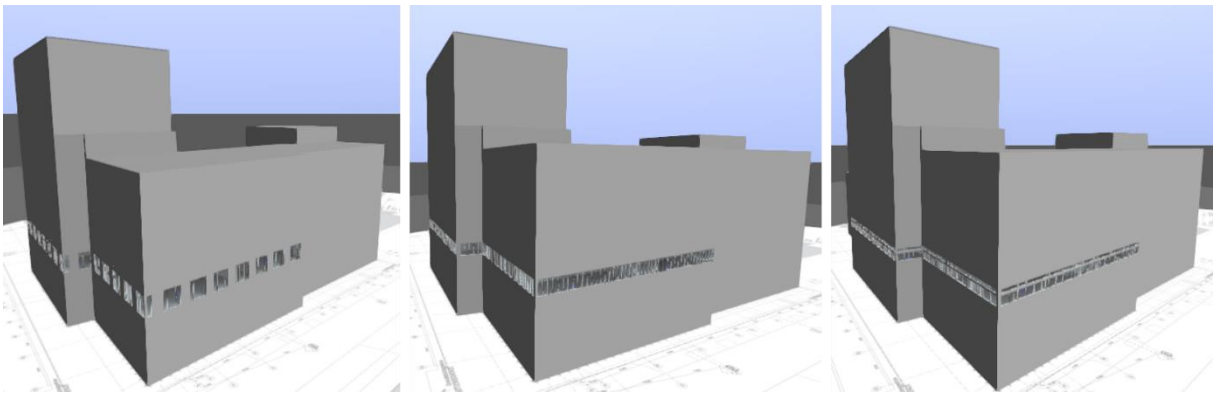


Abbildung 81: 3D-Modelle der „Volksbank Freiburg“ in DIALux im Ist-Zustand (links), mit der Elementfassade (Mitte) und der Fensterband-Fassade (rechts). Die Fenster und die Innenwände wurden nur für das 2. OG modelliert

Abbildung 82: Büroteil des 2.OG mit Fenstern und Innenwänden im Ist-Zustand in DIALux

Berechnungspunkte wurden in halber Raumtiefe in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden und in einer Höhe von 0,85 m über dem Fußboden gesetzt. Die Anforderungen beziehen sich auf die Werte des Tageslichtquotienten an diesen beiden Punkten sowie auf deren Mittelwert. Die Ergebnisse sind dem Anhang D zu entnehmen. Der Nachweis wurde bei der Elementfassade in allen Arbeitsräumen erfüllt. Nicht erfüllt wurde er beim Ist-Zustand in den Räumen 13, 14 und 15 und beim Fensterband in den Räumen 13 und 14. Für diese Räume, die durch den Bauteil B verschattet sind, ist eine detailliertere Tageslichtsimulation notwendig.

5.5 Ökobilanz und Vergleich der drei Varianten über den Lebenszyklus

Das Ziel dieser Ökobilanz ist der Vergleich der drei Fassadenvarianten hinsichtlich des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs und des Treibhauspotentials während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. Folgende Abbildung zeigt die Systemgrenzen für die Berechnung der Ökobilanz nach DGNB. In dieser Arbeit wird als Systemgrenze nur die Fassade genommen, das heißt die Außenwände (inklusive Türen und Fenster). Die Kellerwände sind hier ausgeschlossen, da sie in allen drei Varianten gleich sind. Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre.

(1) Außenwände (inklusive Türen und Fenster) und Kellerwände
(2) Dach
(3) Geschossdecken (inklusive Fußbodenaufbau und -beläge und Beschichtungen)
(4) Bodenplatte (inklusive Fußbodenaufbau und -beläge und Beschichtungen sowie Geschossdecken über Luft)
(5) Fundamente[1]
(6) Innenwände und Türen (inklusive Beschichtungen sowie Innenstützen)
(7) Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen sowie Lufttechnische Anlagen
(8) Sonstige gebäudetechnische Anlagen (z. B. Photovoltaik oder der Einsatz von solaren Kollektoren)
(9) In Einzelfällen: Nutzerausstattung mit nennenswertem Energieverbrauch in der Nutzungsphase (sofern geeignete Ökobilanzdaten dafür vorliegen, bspw. Kühltheken und Kühlräume), nutzungsspezifisch können hier weitere Konkretisierungen vorgenommen werden.

Abbildung 83: Systemgrenze nach DGNB und Systemgrenze für den Vergleich der drei Fassadenvarianten in Rot eingekreist (DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau, 2018, S. 52)

Die Ergebnisse der Ökobilanz setzen sich aus den jährlichen Durchschnittswerten über den angesetzten Betrachtungszeitraum für die Konstruktion und die Nutzung des Gebäudes zusammen: $UWP_G = UWP_K + UWP_N$

mit:

- UWP_G: Gesamtes entstehendes Umweltwirkungspotential für Konstruktion und Nutzung des Gebäudes

- UWP_K: Entstehendes Umweltwirkungspotential bei der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung des Bauwerks als jährlicher Durchschnittswert über den für die Zertifizierung angesetzten Betrachtungszeitraum
- UWP_N: prognostiziertes jährliches Umweltwirkungspotential für den Betrieb des realisierten Gebäudes, abgeleitet aus dem Endenergiebedarf nach EnEV 2014

Der jährliche Durchschnittswert für die Konstruktion des Gebäudes UWP_K wird wie folgt berechnet: $UWP_K = (H + I + E) / t_d$

mit:

- H: Entstehendes Umweltwirkungspotential bei der Herstellung des Gebäudes
- I: Entstehendes Umweltwirkungspotential bei Instandhaltung und Austausch des Gebäudes
- E: Entstehendes Umweltwirkungspotential bei der Verwertung und Entsorgung des Gebäudes
- t_d: Angesetzter Betrachtungszeitraum für die Zertifizierung in Jahren

Der jährliche Durchschnittswert für die Nutzung des Gebäudes UWP_N wird wie folgt berechnet: $UWP_N = UWP_{NS} + UWP_{NW}$

mit:

- UWP_{NS}: Umweltwirkungspotential des Strombedarfs während der Nutzung, berechnet gemäß EnEV 2014, multipliziert mit dem UWP-Faktor des deutschen Strom-Mix aus Ökobaudat
- UWP_{NW}: Umweltwirkungspotential des Wärme- und gegebenenfalls Kühlungsbedarfs während der Nutzung, berechnet gemäß EnEV 2014, multipliziert mit dem UWP-Faktor des gewählten Energieträgers aus Ökobaudat

(DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau, 2018)

Für die Berechnung der Umweltwirkungspotentiale für die Konstruktion wurden die Materialmengen aus den 2D-Plänen ermittelt und in Excel mit den Umweltindikatoren aus Ökobaudat multipliziert. Es ist zu beachten, dass die Berechnung nur für die Fassade und nicht für das ganze Gebäude erfolgt.

Für die Berechnung der Umweltwirkungspotentiale für die Nutzung des Gebäudes wurde der Endenergiebedarf aus den EnEV Berechnungen entnommen, getrennt nach Strombedarf und Wärmebedarf. Der Strombedarf wurde mit den Umweltwirkungspotential-Faktoren des deutschen Strom-Mix multipliziert und der Wärmebedarf wurde mit den Umweltwirkungspotential-Faktoren einer Fernwärme aus Abfällen mit einem Primärenergiefaktor nicht erneuerbar von 0,11 multipliziert.

Die Ergebnisse wurden zur Plausibilitätskontrolle mit den DGNB-Referenzwerten verglichen. Dabei ist zu beachten, dass diese Referenzwerte für einen Vergleich mit den Ergebnissen der Ökobilanz des gesamten Gebäudes mit den Systemgrenzen nach Abbildung 83 vorgesehen sind.

Für die Konstruktion betragen die Referenzwerte der DGNB für das gesamte Gebäude PENRT$_{Ref}$ = 123 MJ/m^2 NRF.a und GWP$_{Ref}$ = 9,4 kg CO_2/m^2 NRF.a.

Die Referenzwerte für die Nutzung des Gebäudes sind vom Strombedarf und vom Wärmebedarf des Gebäudes abhängig.

Tabelle 26: Ergebnisse der Ökobilanz für die Konstruktion der Fassade und Vergleich mit DGNB-Referenzwerten

	PENRT in MJ / m^2 NRF.a	% vom Referenzwert	GWP in kg CO_2 / m^2 NRF.a	% vom Referenzwert
DGNB Referenzwerte	123		9,4	
Ist-Zustand	11,45	9,31 %	0,92	9,84 %
Elementfassade	10,42	8,47 %	0,86	9,18 %
Fensterband	9,42	7,66 %	0,87	9,21 %

Tabelle 27: Ergebnisse der Ökobilanz für die Nutzung des Gebäudes und Vergleich mit DGNB-Referenzwerten

	PENRT in MJ/m² NRF.a	DGNB Referenz-wert	% vom Referenz-wert	GWP in kg CO_2/m² NRF.a	DGNB Referenz-wert	% vom Referenz-wert
Ist-Zustand	254,65	505	50,45 %	33,89	37	92,44 %
Elementfassade	259,17	525	49,37 %	35,16	38	92,41 %
Fensterband	255,10	501	50,91 %	33,27	36	91,34 %

Es erscheint plausibel, dass die Umweltwirkungspotentiale für die Konstruktion der Fassade ungefähr 9% der Umweltwirkungspotentiale für die Konstruktion des gesamten Gebäudes ausmachen. Bei der Nutzung ist es auch plausibel, dass das Treibhauspotential dem Referenzwert nah ist und der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf niedriger ist, da für die Wärmeversorgung eine Fernwärme mit einem niedrigen nicht erneuerbaren Primärenergiefaktor gewählt wurde.

Folgende Abbildungen zeigen die Ergebnisse für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf und das Treibhauspotential für die Konstruktion der Fassade und die Nutzung des Gebäudes. Sowohl beim nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf als auch beim Treibhauspotential unterscheiden sich die Varianten kaum. Dieses Ergebnis erscheint plausibel, weil sich für die Nutzung ein ähnlicher nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf ergeben hat und weil die Bauweise und verwendete Materialien auch nicht grundsätzlich unterschiedlich sind. Der Unterschied zwischen diese drei Varianten liegt vermutlich in den Kosten, die aber in dieser Arbeit nicht betrachtet wurden.

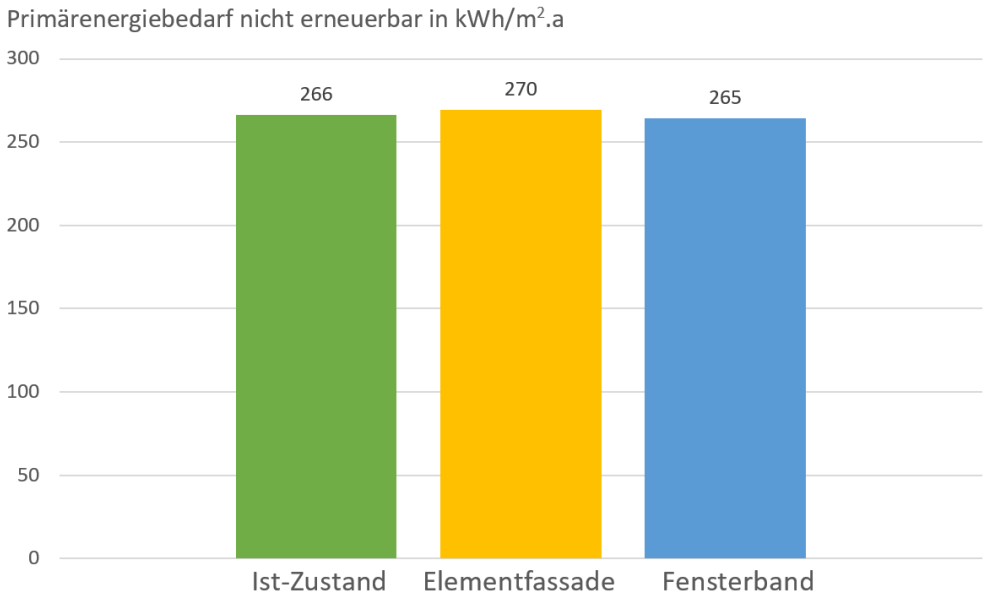


Abbildung 84: Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf für die Konstruktion der Fassaden (Herstellung, Instandhaltung, Verwertung und Entsorgung) und die Nutzung des Gebäudes ist bei den drei Varianten sehr ähnlich

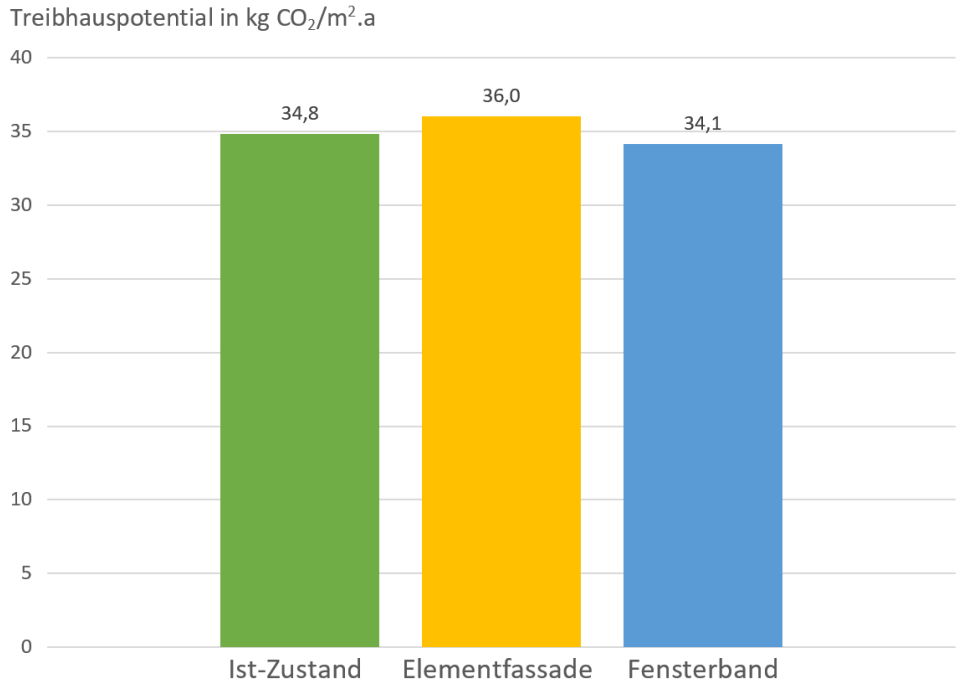


Abbildung 85: Das Treibhauspotential für die Konstruktion der Fassaden (Herstellung, Instandhaltung, Verwertung und Entsorgung) und die Nutzung des Gebäudes ist bei den drei Varianten sehr ähnlich

5.6 Zeitaufwandserfassung

Bei der Durchführung des Nachweises der visuellen und thermischen Anforderungen und der Ökobilanz am Beispiel des Projektes „Volksbank Freiburg“ wurde der Zeitaufwand für jeden Schritt gemessen. In diesem Abschnitt werden für diese drei Aufgaben die Planungsschritte aufgelistet. Die Planungsschritte, die im Idealfall durch den Einsatz von BIM erspart werden könnten, sind in den folgenden Tabellen in Blau gekennzeichnet. Es erfolgt eine Quantifizierung des Zeitgewinns, der erreichbar wäre, wenn der Datenaustausch zwischen dem BIM-Modell und den fachspezifischen Softwareprodukten fehlerfrei funktionieren würde. Folgende Tabellen zeigen die Ergebnisse der Zeitmessung für die Untersuchung der drei Fassadenvarianten für die „Volksbank Freiburg“.

Tabelle 28: Zeitaufwand für den Nachweis der visuellen Anforderungen ohne Einsatz von BIM

		Zeitaufwand		
	Verwendete Software	Ist-Zustand	Elementfassade	Fensterband
Arbeitsstättenverordnung				
Berechnung des Verhältnisses der lichtdurchlässigen Öffnungen zur Raumgrundfläche und Vergleich mit dem Anforderungswert	Excel	20 Min	20 Min	20 Min
DIN 5034-1				
Mindestabmessungen für Fenster	Excel	20 Min	20 Min	20 Min
Modellierung der Außenwände des Gebäudes	DIALux	3 Std		
Modellierung der Innenwände im 2. OG	DIALux	30 Min		
Definition der Berechnungspunkte	DIALux	5 Min		
Modellierung der Fenster im 2.OG	DIALux	2 Std	2 Std	2 Std
Berechnung	DIALux	15 Min	15 Min	15 Min
Export der Ergebnisse in PDF	DIALux	5 Min	5 Min	5 Min
Eingabe in Excel für die Berechnung der Mittelwerte und Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen	Excel	10 Min	10 Min	10 Min

Blau: Schritte, die mit einem reibungslosen Datenaustausch erspart werden könnten

Tabelle 29: Zeitaufwand für den Nachweis der thermischen Anforderungen ohne Einsatz von BIM

		Zeitaufwand		
	Verwendete Software	Ist-Zustand	Elementfassade	Fensterband
EnEV-Nachweis				
Modellierung der Außenwände des Gebäudes	Hottgenroth	3 Std		
Modellierung des Bodens, der Decken und der Dächer	Hottgenroth	2 Std		
Modellierung der Innenwände	Hottgenroth	5 Std		
Modellierung der Räume	Hottgenroth	3 Std		
Zuordnung von Zonen	Hottgenroth	5 Std		
Modellierung der Fenster	Hottgenroth	8 Std	6 Std	6 Std
Definition der Schichtaufbauten der Bauteile im Bauteilkatalog-Tool und automatische Berechnung der U-Werte	Hottgenroth	4 Std		
Händische Berechnung der U-Werte für die Vorhangfassaden und das Fensterband	Excel	2 Std	1 Std	1 Std
Zuordnung der U- und g-Werte der in allen Varianten gleichen Bauteile	Hottgenroth	30 Min		
Zuordnung der U- und g-Werte der anderen Bauteile	Hottgenroth	30 Min	30 Min	30 Min
Manuelle Eingabe von Parametern (z.B. Sonnenschutz)	Hottgenroth	1 Std	1 Std	1 Std
Berechnung	Hottgenroth	5 Min	5 Min	5 Min
Export der Ergebnisse in PDF	Hottgenroth	5 Min	5 Min	5 Min
Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes	Excel	30 min	10 Min	10 Min

Blau: Schritte, die mit einem reibungslosen Datenaustausch erspart werden könnten

Tabelle 30: Zeitaufwand für die Ökobilanz ohne Einsatz von BIM

		Zeitaufwand		
	Verwendete Software	Ist-Zustand	Elementfassade	Fensterband
Vorbereitung der Excel-Datei	Excel	1 Std		
Mengenermittlung für die in allen Varianten gleichen Bauteile (Erdgeschoss und hinterlüftete Blechfassade)	Excel	3 Std		
Mengenermittlung für die anderen Bauteile (Obergeschosse)	Excel	6 Std	2 Std	2 Std
Suche nach geeigneten Daten in Ökobaudat / IBU und Kopieren der Indikatoren in der Excel-Datei	Excel	6 Std	4 Std	4 Std
Umrechnung der Mengen in der geeigneten Einheit zur Multiplikation mit den Indikatoren	Excel	2 Std	2 Std	2 Std
Berechnung der Ökobilanz für die Nutzung des Gebäudes	Excel	10 Min	10 Min	10 Min
Zusammenfassung der Ergebnisse	Excel	20 Min	20 Min	20 Min

Blau: Schritte, die mit einem reibungslosen Datenaustausch erspart werden könnten

Bei den Berechnungen in den Softwareprodukten DIALux und Hottgenroth hat die Modellierung des Gebäudes den größten Zeitaufwand erfordert. Viel Zeit könnte also erspart werden, wenn der Import von IFC-Dateien reibungslos funktionieren würde.

Bei der Ökobilanz stellt die Mengenermittlung ungefähr ein Drittel des Zeitaufwandes dar. Wie im Abschnitt 4.5 beschrieben wurde, könnte die Mengenermittlung mit Revit automatisch erstellt werden, angenommen dass das Modell alle notwendigen Informationen enthält.

Um die Importdauer eines Modells der „Volksbank Freiburg“ mit allen Innenwänden und Räume zu schätzen, wurde die Importdauer eines komplexen Gebäudemodells in HottCAD und in DIALux gemessen. Dafür wurde das Modell eines Schulgebäudes mit 10196 m^2 BGF verwendet, das schon in den Abschnitten 4.3.3.8 und 4.4.3.5 vorgestellt wurde. Der Import in HottCAD wurde sehr schnell vollzogen und hat 3 Minuten gedauert. Der Import in DIALux hat hingegen wesentlich länger gedauert: 51 Minuten. Bei dem Import eines komplexen Gebäudes wie der „Volksbank Freiburg“ ist also mit einer Importdauer von ungefähr 6 Minuten in

HottCAD und 2 Stunden in DIALux zu rechnen. Es ist zu beachten, dass nicht berechnungsrelevante Objekte wie zum Beispiel Möbel die Importdauer erheblich erhöhen können. Um die Importdauer zu verringern, sollten diese Objekte vor dem IFC-Export gefiltert werden.
Nach dem Import muss geprüft werden, ob das Modell korrekt importiert wurde. Der Zeitgewinn, der erreichbar wäre, wenn der Datenaustausch problemlos funktionieren würde, wird in folgender Tabelle und folgender Abbildung gezeigt.

Tabelle 31: Berechnung des Zeitgewinns mit BIM

	Nachweis der visuellen Anforderungen	Nachweis der thermischen Anforderungen	Ökobilanz	Summe
Zeitaufwand	13,1 Std	52,3 Std	35,5 Std	106,9 Std
Zeitaufwand für die Schritte, die mit BIM vermieden werden könnten	9,5 Std	39 Std	13 Std	61,5 Std
Importdauer des Modells	2 Std	0,1 Std	-	2,1 Std
Kontrolldauer des Modells	1 Std	2 Std	2 Std	5 Std
Zeitgewinn mit BIM	6,5 Std 50%	36,9 Std 71%	11 Std 31 %	54,4 Std 51 %

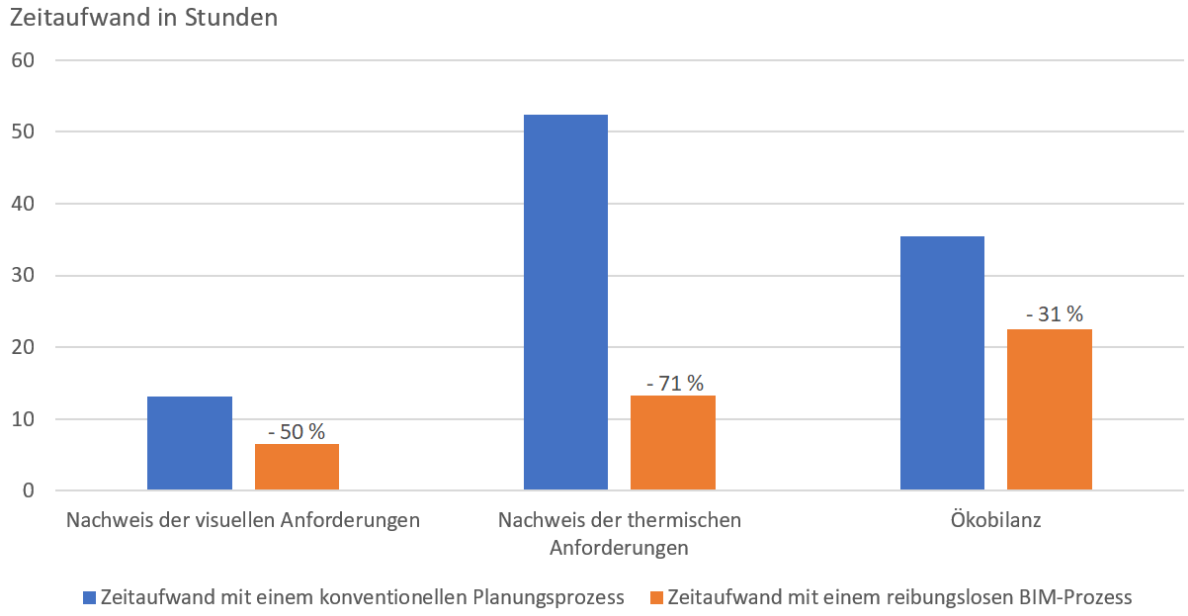


Abbildung 86: Zeitaufwand mit einem konventionellen und mit einem reibungslosen BIM-basierten Planungsprozess

Für diese spezifische Aufgabe könnte also im Durchschnitt 51 % der Zeit erspart werden. Es ist zu beachten, dass die Eingabe der Materialien und der technischen Eigenschaften nicht mehr in den fachspezifischen Softwareprodukten stattfinden würde, sondern im BIM-Modell: Der Aufwand wäre verlagert. Der berechnete Zeitgewinn zieht den Zeitaufwand für die Modellierung in Revit und die Eingabe der Informationen nicht in Betracht. Der Vorteil von BIM liegt aber darin, dass diese Daten ein für alle Mal definiert werden. Diese Planungsmethode wird besonders interessant, wenn das Modell von allen Fachdisziplinen genutzt werden kann. Außerdem kann eine höhere Genauigkeit der Berechnung erwartet werden, wenn die Massen und Flächen nicht mehr händisch, sondern automatisch ermittelt werden.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war zu untersuchen, ob der Einsatz einer BIM-basierten Arbeitsweise dazu beitragen kann, die bauphysikalische und ökologische Planung und Optimierung einer Fassade effizienter zu führen. Die Untersuchung erfolgte am Beispiel eines konkreten Falles: für das Projekt „Volksbank Freiburg“ sollten drei Fassadenvarianten, die bestimmte visuelle und thermische Anforderungen erfüllen, anhand einer Ökobilanz hinsichtlich des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs und des Treibhauspotentials verglichen werden.

Dafür wurden im Kapitel 4 die heutigen Verbesserungsmöglichkeiten durch den Einsatz eines BIM-Planungsprozesses analysiert. Für den Nachweis der visuellen und thermischen Anforderungen mit den Softwareprodukten DIALux und Hottgenroth Energieberater 18599 3D wurde definiert, welche Daten notwendig sind und im BIM-Modell in Revit enthalten sein sollten. Anhand einfacher Gebäudemodelle wurde überprüft, ob die Geometrie und die technischen Eigenschaften mit der IFC-Schnittstelle korrekt übertragen wurden. Es stellte sich heraus, dass Fehler schon bei einfachen Gebäudemodellen auftreten. Bei komplexen Geometrien wie Pfosten-Riegel-Fassaden war das Modell nach Import in den beiden Softwareprodukten fehlerhaft und konnte für die Berechnung nicht verwendet werden. Außerdem waren die Möglichkeiten zur Eingabe von bauphysikalischen Kennwerten in Revit begrenzt und für die spezifischen Besonderheiten in Deutschland nicht geeignet, und der Import in Hottgenroth war mangelhaft. Die importierten Modelle müssen also geprüft und bearbeitet werden, was aufgrund der zahlreichen Fehler sehr aufwendig sein kann. Der Datenaustausch mit der IFC-Schnittstelle ist also noch nicht genug ausgereift, um zum Einsatz zu kommen. Für die Ökobilanz bietet schon die automatische Erstellung von Bauteillisten ein großes Potential an Zeitersparnis für die Mengenermittlung, unter der Voraussetzung, dass das Modell mit allen relevanten Informationen modelliert wurde.

Im Kapitel 5 erfolgte die Zeitmessung für die Planung und Optimierung der Fassade der „Volksbank Freiburg“. Für die geplante Fassade und zwei alternative Fassadenvarianten wurde nachgewiesen, dass die visuellen und thermischen Anforderungen erfüllt waren. Dann erfolgte die Berechnung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs und des Treibhauspotentials. Dabei wurde für jeden Planungsschritt der Zeitaufwand erfasst. Auf dieser Basis wurde der Zeitgewinn geschätzt, der bei einem reibungslosen BIM-Prozess erreichbar wäre. Die Zeitmessung hat gezeigt, dass für die bauphysikalischen Berechnungen in den Softwareprodukten DIALux

und Hottgenroth der größte Aufwand in der Nachmodellierung des Gebäudes liegt. Mit einem fehlerfreien Datenaustausch mit der IFC-Schnittstelle könnte die Nachmodellierung entfallen, und die Nachweise könnten mit einem geringeren Zeitaufwand geführt werden. Für die Ökobilanz kann schon mit der automatischen Mengenermittlung viel Zeit gewonnen werden. Die Nutzung einer einzigen Datenquelle würde Widersprüche vermeiden und eine höhere Genauigkeit der Berechnungen gewährleisten. Dadurch würde der Planungsprozess auch an Qualität gewinnen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die BIM-basierte Arbeitsweise ein großes Effizienzsteigerungspotential bietet und in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen wird. Die Erstellung eines BIM-Modells bringt schon Vorteile bei der Mengenermittlung und bei der Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten.

Die Interoperabilität mit der IFC-Schnittstelle ist noch bei vielen Softwareprodukten mangelhaft. Es ist aber zu erwarten, dass viele Softwarehersteller und Akteure der Baubranche sich damit beschäftigen werden, diese Interoperabilität zu verbessern und weiterzuentwickeln. Die erreichte Effizienzsteigerung würde die Untersuchung von mehreren Varianten in der frühen Entscheidungsphase erleichtern.

Literaturverzeichnis

Alder, Morgan. August 2006. *Comparing time and accuracy of Building Information Modeling to on-screen takeoff for a quantity takeoff of a conceptual estimate*. Brigham Young University – School of Technology.

Arbeitsstättenverordnung. 2004. [Online: http://www.gesetze-im-internet.de/arbst_ttv_2004/index.html]

Autodesk. 2008. *The Five Fallacies of BIM.* [Online: http://dynamic.ziftsolutions.com/clients/autodesk/assets/emea/whitepapers/The_Five_Fallacies_of_BIM.pdf]

Autodesk. 2018. *Revit*. [Online: https://www.autodesk.de/products/revit/overview, Zugriff am 23.08.18]

Autodesk. April 2018. *About Revit and IFC*. [Online: https://knowledge.autodesk.com/de/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/DEU/Revit-DocumentPresent/files/GUID-6708CFD6-0AD7-461F-ADE8-6527423EC895-htm.html]

Autodesk. August 2018. *Revit-Familien*. [Online: https://knowledge.autodesk.com/de/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/DEU/Revit-Model/files/GUID-4EBB97AD-C7B6-4828-91EB-BC0E99B81E43-htm.html]

Braune, Anna; Ruiz Durán, Christine; Gantner, Johannes. Februar 2018. *Leitfaden zum Einsatz der Ökobilanzierung.* Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V.

BuildingSMART e.V. [Online: https://www.buildingsmart.de/, Zugriff am 27.08.18]

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). April 2011. *Technische Regeln für Arbeitsstätten, ASR A3.4 Beleuchtung.* [Online: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/ASR-A3-4.html]

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Februar 2017. *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. [Online: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf]

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI). *Ökobaudat* [Online: http://www.oekobaudat.de/]

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Dezember 2015. *Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken*. Berlin

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau.* Version 2018. [Online: http://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/version2018/02_ENV1.1_Oekobilanz-des-Gebaeudes.pdf, Zugriff im Mai 2018]

DIAL. April 2017. *Release DIALux evo 7: IFC-Import und effizientere Workflows.* [Online: https://www.dial.de/de/article/release-dialux-evo-7-ifc-import-und-effizientere-workflows/]

DIN 277-1. Januar 2016. *Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen – Teil 1: Hochbau*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN 4108 Beiblatt 2. März 2006. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN 4108-2. Februar 2013. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN 5034-1. Juli 2011. *Tageslicht in Innenräumen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN EN 12665. September 2016. *Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN EN 15978. Oktober 2012. *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN EN ISO 12631. Januar 2018. Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN EN ISO 14040. November 2009. *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN EN ISO 14044. Oktober 2006. *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN V 18599-1. Oktober 2016. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung –Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN V 18599-10. Oktober 2016. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung –Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Egger, Martin; Hausknecht, Kerstin; Liebich, Thomas; Przybylo, Jakob. 2013. *BIM-Leitfaden für Deutschland: Information und Ratgeber*. Forschungsinitiative ZukunftBAU, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Energieeinsparverordnung. Nichtamtliche Lesefassung zur Zweiten Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013

Europäische Kommission. 2018. *Buildings.* [Online: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings]

Forth, Kasimir. April 2018. *BIM-integrierte Ökobilanzierung*. Technische Universität München – Diplomarbeit am Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation.

Hadi Teherani Architects. April 2017. *Entwurfsbericht.*

Hadi Teherani Architects. Dezember 2016. *Vorentwurfsbericht.*

Hottgenroth Akademie. 2018. *FAQ: Klassifizierung von Vorhangfassaden, Lichtkuppeln und Glasdächer* [Online: http://www.hottgenroth-akademie.de/mediathek/faq/energieberater/nichtwohngebaeude/klassifizierung-von-vorhangfassaden-lichtkuppeln-und-glasdaecher/]

Hottgenroth Software. *HottCAD Handbuch.*

Hottgenroth Software. Juli 2018. *Mehr als eine Schnittstelle: die Plug-ins von Hottgenroth / ETU Software* [Online: https://www.hottgenroth.de/S/Newsletter/HottNews/Juli/2018/revit/Plun-in/Revit-Plug-In/Seite.html,108695]

Hottgenroth Software. September 2017. *Arbeiten mit der IFC-Schnittstelle im BIM-Workflow.* [Online: https://www.hottgenroth.de/S/Newsletter/September/IFC-Schnittstelle/BIM-Workflow/Seite.html,%2099430]

Institut Bauen und Umwelt e.V. [Online: https://ibu-epd.com/]

Knaack, Ulrich; Klein, Tillmann; Bilow, Marcel; Auer, Thomas; 2007. *Fassaden: Prinzipien der Konstruktion.* Basel: Birkhäuser Verlag AG

Riccabona, Christof; Bednar, Thomas. 2013. *Baukonstruktionslehre 4 – Bauphysik*. Wien: MANZ Verlag

Schild, Kai; Brück, Henrik; 2010. *Energieeffizienzbewertung von Gebäuden: Anforderungen und Nachweisverfahren gemäß EnEV 2009*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag

Schild, Kai; Willems, Wolfgang M; 2013. *Wärmeschutz: Grundlagen - Berechnung - Bewertung.* Wiesbaden: Springer Fachmedien

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nutzung eines BIM-Modells von allen Projektbeteiligten über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes (Quelle: https://www.cadstudio.com/bim-consulting/) 6
Abbildung 2: Informationsverlust durch Brüche im Informationsfluss (Borrmann, et al., 2015) 7
Abbildung 3: Planungsaufwand bei einem konventionellen und einem BIM-gestützten Planungsprozess (Borrmann, et al., 2015) 7
Abbildung 4: Varianten in der Umsetzung von BIM (Borrmann, et al., 2015) 10
Abbildung 5: Bedeutung von 2D-Plänen und 3D-Modellen in der gegenwärtigen Praxis, die BIM-Übergangsphase und in der zukünftigen Praxis (Egger, et al., 2013) 11
Abbildung 6: Funktionen einer Fassade (Knaack, et al., 2007, S.36) 14
Abbildung 7: Anforderungen an die Fensterabmessungen und -Position (DIN 5034-1:2011) 17
Abbildung 8: Definition der Nutzenergie, Endenergie und Primärenergie (Schild, et al., 2010) 22
Abbildung 9: Kriterien zur Bildung von Zonen (DIN V 18599-1:2016) 26
Abbildung 10: Lebenszyklus eines Gebäudes (Fraunhofer Institut für Bauphysik) 30
Abbildung 11: Themengebiete für die DGNB Zertifizierung (DGNB, 2018) 33
Abbildung 12: Lebenszyklusphasen und relevante Module der DIN EN 15978 für die Ökobilanz nach DGNB, eigene Darstellung 34
Abbildung 13: Definition einer hinterlüfteten Blechfassade im Bauteil-Katalog im Energieberater 18599 3D 39
Abbildung 14: Ablauf bei einem konventionellen Planungsprozess 42
Abbildung 15: Idealer Ablauf bei einem BIM-gestützten Planungsprozess 43
Abbildung 16: Vorhandene Schnittstellen zwischen Autodesk Revit und den Softwareprodukten DIALux und Hottgenroth 43
Abbildung 17: Grundriss der vier Wände in Revit 45
Abbildung 18: 3D Ansicht von vier Wänden in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 45
Abbildung 19: Definition der Geschossebenen im LevelManager 46
Abbildung 20: Schnitt des eingeschossigen Gebäudes und Geschossdefinition in Revit 46
Abbildung 21: 3D Ansicht von dem eingeschossigen Gebäude in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 47

Abbildung 22: Schnitt des eingeschossigen Gebäudes und Geschossdefinition in Revit 47
Abbildung 23: Definition der Geschossebenen im LevelManager 48
Abbildung 24: 3D Ansicht von dem eingeschossigen Gebäude in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) mit der richtigen Geschossdefinition 48
Abbildung 25: Schnitt des zweigeschossigen Gebäudes und Geschossdefinition in Revit 49
Abbildung 26: 3D Ansicht von dem zweigeschossigen Gebäude in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 49
Abbildung 27: Schnitt des dreigeschossigen Gebäudes mit gleichen Zwischendecken und Geschossdefinition in Revit 50
Abbildung 28: 3D Ansicht von dem dreigeschossigen Gebäude mit gleichen Zwischendecken in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 50
Abbildung 29: Schnitt des dreigeschossigen Gebäudes mit unterschiedlichen Zwischendecken und Geschossdefinition in Revit 51
Abbildung 30:Eigene Darstellung der Raumhöhen des dreigeschossigen Gebäudes mit unterschiedlichen Zwischendecken nach Import in HottCAD. In Rot sind die Raumhöhen, die falsch übertragen wurden. 51
Abbildung 31: 3D Ansicht von dem Gebäude mit Öffnungen in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 52
Abbildung 32: Screenshot von HottCAD – Grundriss des Gebäudes mit der Glasfassade nach Import in HottCAD (links) und nach der automatischen Raumzeichnung (rechts) 53
Abbildung 33: 3D Ansicht von dem Gebäude mit einer Glasfassade in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 53
Abbildung 34: Screenshot von Hottgenroth - Hüllflächentabelle für das Gebäude mit der Glasfassade 53
Abbildung 35: Screenshot von HottCAD – Grundriss des Gebäudes mit der Pfosten-Riegel-Fassade nach Import in HottCAD 54
Abbildung 36: 3D Ansicht von dem Gebäude mit einer Pfosten-Riegel-Fassade in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 54
Abbildung 37: Räume mit Namen in Revit 55
Abbildung 38: Screenshot der Raumeigenschaften in Revit 55
Abbildung 39: Räume nach Import in HottCAD 56

Abbildung 40: 3D-Ansichten des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 57
Abbildung 41: 3D-Ansichten des 1.OG des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 57
Abbildung 42: Screenshot von Revit – Definition der Materialeigenschaften 58
Abbildung 43: Berechnung der thermischen Eigenschaften der Betonwand in Revit, Screenshot 59
Abbildung 44: U-Wert der einschaligen Betonwand in HottCAD nach Import der IFC-Datei . 60
Abbildung 45: Eigenschaften der hinterlüfteten Betonwand in Revit 61
Abbildung 46: Mehrschichtige Wand nach IFC-Import in HottCAD 62
Abbildung 47: Screenshot - Wahl der Verglasungstypen in Revit 62
Abbildung 48: Screenshot des Fensters nach Import in HottCAD 63
Abbildung 49: Modellierung einer Betonwand mit WDVS mit zwei getrennten Objekten 64
Abbildung 50: Grundriss des Gebäudes mit den getrennt nach Rohbau und Fassade modellierten Wänden in Revit (links) und HottCAD (rechts) 64
Abbildung 51: Hüllflächentabelle bei der Modellierung mit getrennten Objekten für den Rohbau und die Fassade 65
Abbildung 52: Grundriss eines Gebäudes mit einem süd-ost orientierten Fenster in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 65
Abbildung 53: Screenshot von Hottgenroth - Hüllflächentabelle für das Gebäude mit dem süd-ost orientierten Fenster 66
Abbildung 54: 3D-Ansicht des Bürogebäudes in HottCAD (links) und nach Import in Revit (rechts) 66
Abbildung 55: 3D-Ansicht von vier Testgebäuden in Revit (oben) und nach Import in DIALux (unten) 69
Abbildung 56: 3D Ansicht von dem Gebäude mit Öffnungen in Revit (links) und nach Import in DIALux (rechts) 70
Abbildung 57: Ergebnisse der Berechnung der Beleuchtungsstärke in DIALux 70
Abbildung 58: Revit-Screenshot des DIALux-Beispiels mit einer Vorhangfassade 71
Abbildung 59: DIALux-Screenshot nach der Berechnung des Tageslichtquotienten für das DIALux-Beispiel mit einer Pfosten-Riegel-Fassade. In der Berechnung wurde die Pfosten-Riegel-Fassade sichtlich als opak angesehen. 71

Abbildung 60: Grundriss eines Gebäudes ohne Raumdefinition in Revit (links) und nach Import in DIALux (rechts) 72
Abbildung 61: 3D-Ansichten des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 72
Abbildung 62: 3D-Ansichten des 1.OG des Schulgebäudes in Revit (links) und nach Import in HottCAD (rechts) 73
Abbildung 63: Standortdefinition in Revit 73
Abbildung 64: Geländeausrichtung nach Import in DIALux 74
Abbildung 65: Grundriss eines Gebäudes mit einem süd-ost orientierten Fenster in Revit (links) und nach Import in DIALux (rechts) 74
Abbildung 66: Automatisch in Revit erstellte Bauteilliste zur Ermittlung der Länge der Aluminium-Pfosten der Fassade, getrennt nach Gebäudeteil 75
Abbildung 67: Visualisierungen des Entwurfs der „Volksbank Freiburg“ 80
Abbildung 68: Bauteil A mit Büro- (in blau dargestellt) und Hotelnutzung (in Rot dargestellt), und Bauteil B (in Gelb dargestellt) (Hadi Teherani Architects, 2016) 81
Abbildung 69: Grundriss mit Anzahl der Geschosse (Hadi Teherani Architects, 2017) 81
Abbildung 70: Schematische Darstellung eines wiederkehrenden Elementes im Büroteil 83
Abbildung 71: Schematische Darstellung eines wiederkehrenden Elementes im Hotelteil 86
Abbildung 72: Zwei Elemente der Fassade im Bürobereich 88
Abbildung 73: Zwei Elemente der Fassade im Hotelbereich 89
Abbildung 74: Schematische Darstellung eines Ausschnitts der Fensterband-Fassade 90
Abbildung 75: 3D-Modelle der „Volksbank Freiburg“ in HottCAD im Ist-Zustand (links), mit der Elementfassade (Mitte) und mit der Fensterband-Fassade (rechts) 92
Abbildung 76: Kritischer Raum im 11. OG des Büroteils 94
Abbildung 77: Kritischer Raum im 6. OG des Hotelteils 94
Abbildung 78: Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes in Hottgenroth für den kritischen Raum des Büroteils im Ist-Zustand 95
Abbildung 79: Berechnung der U-Werte von Vorhangfassaden anhand des Verfahrens mit Beurteilung der einzelnen Komponenten gemäß DIN EN ISO 12631 97
Abbildung 80: Der End- als auch der Primärenergiebedarf der drei untersuchten Varianten ist sehr ähnlich. Das ist plausibel, weil die Energieeinsparverordnung der TGA, welche in allen Varianten gleich ist, viel Bedeutung zuteilt 100

Abbildung 81: 3D-Modelle der „Volksbank Freiburg“ in DIALux im Ist-Zustand (links), mit der Elementfassade (Mitte) und der Fensterband-Fassade (rechts). Die Fenster und die Innenwände wurden nur für das 2. OG modelliert 103
Abbildung 82: Büroteil des 2.OG mit Fenstern und Innenwänden im Ist-Zustand in DIALux 103
Abbildung 83: Systemgrenze nach DGNB und Systemgrenze für den Vergleich der drei Fassadenvarianten in Rot eingekreist (DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau, 2018, S. 52) 104
Abbildung 84: Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf für die Konstruktion der Fassaden (Herstellung, Instandhaltung, Verwertung und Entsorgung) und die Nutzung des Gebäudes ist bei den drei Varianten sehr ähnlich 108
Abbildung 85: Das Treibhauspotential für die Konstruktion der Fassaden (Herstellung, Instandhaltung, Verwertung und Entsorgung) und die Nutzung des Gebäudes ist bei den drei Varianten sehr ähnlich 108
Abbildung 86: Zeitaufwand mit einem konventionellen und mit einem reibungslosen BIM-basierten Planungsprozess 113
Abbildung 87: Berechnung des U_{cw}-Wertes des Lüftungsflügels 133
Abbildung 88: Nummerierung der Elemente für die Elementfassade im Büroteil 136
Abbildung 89: Nummerierung der Elemente für die Elementfassade im Hotelteil 137
Abbildung 90: Nummerierung der Elemente für die Fensterband-Fassade 138
Abbildung 91: Nummerierung der Arbeitsräume im 2. OG 150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitersparnis mit BIM im Architektur- und Planungsbüro Lott + Barber Architects. 8
Tabelle 2: Mindestanforderungen an die Fensterfläche je nach Raumtiefe und Raumgrundfläche (DIN 5034-1:2011) 18
Tabelle 3: Höchstwerte für die U-Werte der Hüllfläche von Nichtwohngebäuden gemäß EnEV 25
Tabelle 4: Abmessungen der Öffnungen im Revit-Modell 52
Tabelle 5: Manuelle Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Betonwand 59
Tabelle 6: Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der mehrschichtigen Wand 60
Tabelle 7: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung der Brüstung beim Ist-Zustand 84
Tabelle 8: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung der Lüftungsflügel beim Ist-Zustand 84
Tabelle 9: Eigenschaften der Verglasung und der Pfosten beim Ist-Zustand 85
Tabelle 10: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des opaken Glaspaneels beim Ist-Zustand 86
Tabelle 11: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des hinterlüfteten Glaspaneels bei der Elementfassade 87
Tabelle 12: Eigenschaften der Verglasung und der Pfosten bei der Elementfassade 87
Tabelle 13: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des opaken Glaspaneels beim Fensterband 90
Tabelle 14: Schichtaufbau und U-Wert Berechnung des Sandwichpaneels beim Fensterband 91
Tabelle 15: Eigenschaften der Fenster beim Fensterband 91
Tabelle 16: Zonen mit Nutzungsprofilen nach DIN V 18599 und Konditionierung 93
Tabelle 17: Sonneneintragskennwerte für die kritischen Räume des Büroteils und des Hotelteils bei den drei Varianten 96
Tabelle 18: U_{cw}-Werte für den Ist-Zustand und die Elementfassade 97
Tabelle 19: Mittlere U-Werte der drei Fassadenvarianten. Die U-Werte sind beim Ist-Zustand und beim Fensterband fast gleich. 98
Tabelle 20: Nachweis der Einhaltung der Höchstwerte der mittleren U-Werte der Hüllfläche beim Ist-Zustand 98

Tabelle 21: Nachweis der Einhaltung der Höchstwerte der mittleren U-Werte der Hüllfläche bei der Elementfassade 98
Tabelle 22: Nachweis der Einhaltung der Höchstwerte der mittleren U-Werte der Hüllfläche bei der Fensterband-Fassade 99
Tabelle 23: TGA des Gebäudes „Volksbank Freiburg“ 99
Tabelle 24: Nachweis der Einhaltung des zulässigen Höchstwertes des Jahres-Primärenergiebedarfs bei den drei Fassadenvarianten 100
Tabelle 25: Nachweis der Anforderungen bezüglich der Mindesthöhe und der Position der Fenster 102
Tabelle 26: Ergebnisse der Ökobilanz für die Konstruktion der Fassade und Vergleich mit DGNB-Referenzwerten 106
Tabelle 27: Ergebnisse der Ökobilanz für die Nutzung des Gebäudes und Vergleich mit DGNB-Referenzwerten 107
Tabelle 28: Zeitaufwand für den Nachweis der visuellen Anforderungen ohne Einsatz von BIM 109
Tabelle 29: Zeitaufwand für den Nachweis der thermischen Anforderungen ohne Einsatz von BIM 110
Tabelle 30: Zeitaufwand für die Ökobilanz ohne Einsatz von BIM 111
Tabelle 31: Berechnung des Zeitgewinns mit BIM 112
Tabelle 32: Berechnung des U_{cw}-Wertes im Büroteil im Ist-Zustand 134
Tabelle 33: Berechnung des U_{cw}-Wertes im Hotelteil im Ist-Zustand 135
Tabelle 34: Berechnung des U_{cw}-Wertes für die Elementfassade im Büroteil 136
Tabelle 35: Berechnung des U_{cw}-Wertes für die Elementfassade im Hotelteil 137
Tabelle 36: Berechnung des mittleren U-Wertes der Fenster für die Fensterband-Fassade 138
Tabelle 37: Berechnung des mittleren U-Wertes der opaken Elemente für die Fensterband-Fassade 139
Tabelle 38: Berechnung des U_{cw}-Wertes der Pfosten-Riegel-Fassade im Erdgeschoss 140
Tabelle 39: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) des Flachdaches über EG, 6.OG und 11.OG 141
Tabelle 40: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) des Flachdaches, Dachterrassen 142
Tabelle 41: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Außenwand (beheizter Räume) zu Erdreich im UG 142

Tabelle 42: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Wände beheizter Räume zur Tiefgarage 143
Tabelle 43: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Decke zwischen EG und UG, Bereich Tiefgarage 143
Tabelle 44: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Kellerbodenplatte beheizter Bereiche im 3.UG 144
Tabelle 45: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der hinterlüfteten Blechfassade 144
Tabelle 46: Arbeitsraummaße und Fensterabmessungen im Ist-Zustand 151
Tabelle 47: Arbeitsraummaße und Fensterabmessungen für die Elementfassade 151
Tabelle 48: Arbeitsraummaße und Fensterabmessungen für die Fensterband-Fassade 152
Tabelle 49: Tageslichtquotient in den Arbeitsräumen im 2.OG im Ist-Zustand 153
Tabelle 50. Tageslichtquotient in den Arbeitsräumen im 2.OG mit der Elementfassade 153
Tabelle 51: Tageslichtquotient in den Arbeitsräumen im 2.OG mit der Fensterband-Fassade 154

Anhänge

A U-Wert Berechnung

In diesem Anhang erfolgt die Berechnung der U_{cw}-Werte für die Pfosten-Riegel-Fassade im Ist-Zustand und für die Elementfassade, und des mittleren U-Wertes für die Fensterband-Fassade. Die U_{cw}-Werte wurden für die einzelnen Komponenten ermittelt und flächengewichtet gemittelt. Die Berechnung der U_{cw}-Werte erfolgte anhand eines Excel-Tools der Firma Schüco gemäß DIN EN ISO 12631. Die Werte für die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten wurden dem Anhang D der DIN EN ISO 12631 entnommen.

A.1 Ist-Zustand

A.1.1 Büroteil

Folgende Abbildung zeigt die Berechnung des U_{cw}-Wertes des Lüftungsflügels. Die Berechnung der U_{cw}-Werte der anderen Elemente erfolgt auf ähnliche Weise.

Wärmetechnisches Verhalten an Vorhangfassaden

Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten / Vereinfachtes Verfahren / Deutsche Fassung prEN 13947:2000

Berechnung einer Vorhangfassaden

	Ansichts-breite in mm	U-Wert in W/m²K	Ψ-Wert in W/mK		Modulabmessungen in m			Füllungsart	Modulfläche in m²	
					Anzahl	Breite	Höhe		Teilflächen	Gesamtfläche
Pfostenprofil	50	1,50		Füllung I	1	0,70	2,77	Paneel	1,94	1,94
Riegelprofil	50	1,50		Füllung II				Festverglasung	0,00	
Fensterprofil				Füllung III				Paneel	0,00	
Festverglasung				Füllung IV				Festverglasung	0,00	
Festverglasung				Füllung V				Paneel	0,00	
Paneel		0,41	0,20	Füllung VI				Fenster	0,00	

Bauteil	Anzahl	Füllungsart		A /m²	U / W/(m²K)	L / m	Ψ / W/(mK)	A * U / W/K	Ψ * L / W/K
Füllung I	1 x	*Paneel*	*Riegelprofil*	0,035	1,50			0,053	
			Pfostenprofil	0,136	1,50			0,204	
			Paneelfläche	1,765	0,41	6,73	0,20	0,724	1,346
			Gesamt	A_{cw} =	1,936 m²			*Summen:*	0,980	1,346
			Rahmen	A_f =	0,171 m²					
			Rahmenanteil		8,82%			A_{cw} U_{cw} =	2,326	

SCHÜCO International KG
Abteilung Vorentwicklung
Th. Nolte
31. Mai 2003

U_{cw} = 1,20 W/m²K

Abbildung 87: Berechnung des U_{cw}-Wertes des Lüftungsflügels

Tabelle 32: Berechnung des U_{cw}-Wertes im Büroteil im Ist-Zustand

Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche eines Elementes in m^2	Anzahl an Elemente	Gesamte Fläche in m^2	U_{cw}-Wert in W/m^2K	A*U
Brüstung					1082,13	0,23	248,89
Lüftungsflügel mit Lochblechverkleidung	0,7	2,765	1,9355	575	1112,91	1,20	1335,50
transparente Verglasung 0,7 m breit	0,7	2,765	1,9355	580	1122,59	1,22	1369,56
transparente Verglasung 1,4 m breit	1,4	2,765	3,871	277	1072,27	1,02	1093,71
opakes Glaspaneel 0,7 m breit	0,7	2,765	1,94	3	5,81	0,75	4,35
opake Glaspaneel 1,4 m breit	1,4	2,765	3,87	12	46,45	0,52	24,16
opakes Glaspaneel vor Betonwand 0,7 m breit	0,7	2,765	1,94	4	7,74	0,73	5,65
opakes Glaspaneel vor Betonwand 1,4 m breit	1,4	2,765	3,87	16	61,94	0,51	31,59
transparente Verglasung 2,8*2,225	2,8	2,225	6,23	13	80,99	0,94	76,13
transparente Verglasung 1,4*2,225	1,4	2,225	3,12	4	12,46	1,04	12,96
transparente Verglasung 1,015*2,225	1,015	2,225	2,26	2	4,52	1,12	5,06
transparente Verglasung 2,1*3,115	2,1	3,115	6,54	9	58,87	0,93	54,75
transparente Verglasung 2,8*3,115	2,8	3,115	8,72	12	104,66	0,90	94,20
transparente Verglasung 1,4*3,115	1,4	3,115	4,36	5	21,81	1,00	21,81
transparente Verglasung 0,7*3,115	0,7	3,115	2,18	4	8,72	1,21	10,55
transparente Verglasung 2,8*1,85	2,8	1,85	5,18	6	31,08	0,96	29,84
transparente Verglasung 1,4*1,85	1,4	1,85	2,59	6	15,54	1,07	16,63
Oberlicht 2,8*0,615	2,8	0,615	1,72	11	18,94	1,35	25,57
transparente Verglasung 1,4*0,615	1,4	0,615	0,86	4	3,44	1,37	4,72
transparente Verglasung 2,8*0,615	2,8	0,615	1,72	2	3,44	1,28	4,41
transparente Verglasung 1,4*1,695	1,4	1,695	2,37	6	14,24	1,08	15,38
transparente Verglasung 0,7*1,695	0,7	1,695	1,19	12	14,24	1,28	18,22
Fenster 0,7*1,695	0,7	1,695	1,19	12	14,24	1,320	18,79

Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche eines Elementes in m^2	Anzahl an Elemente	Gesamte Fläche in m^2	U_{cw}-Wert in W/m^2K	A*U
opakes Glaspaneel 0,7*1,695	0,7	1,695	1,19	12	14,24	0,810	11,53
opakes Glaspaneel 1,4*1,085	1,4	1,085	1,52	16	24,30	0,690	16,77
opakes Glaspaneel 1,4*0,635	1,4	0,635	0,89	8	7,11	0,890	6,33
Total					**4964,68**		**4557,05**
U_{cw}-Wert	**0,92**	**W/m^2K**					

A.1.2 Hotelteil

Tabelle 33: Berechnung des U_{cw}-Wertes im Hotelteil im Ist-Zustand

Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche eines Elementes in m^2	Anzahl an Elemente	Gesamte Fläche in m^2	U_{cw}-Wert in W/m^2K	A*U
Brüstung					732,9	0,231	169,30
Lüftungsflügel mit Lochblechverkleidung	0,7	2,5	1,75	157	274,8	1,220	335,20
transparente Verglasung 1,4 m breit	1,4	2,5	3,50	139	486,5	1,030	501,10
transparente Verglasung 0,7 m breit	0,7	2,5	1,75	8	14,0	1,230	17,22
Fenster Süd-Ost	1,4	2,5	3,50	23	80,5	1,070	86,14
opakes Glaspaneel 1,4 m breit	1,4	2,5	3,50	146	511,0	0,530	270,83
opakes Glaspaneel 0,7 m breit	0,7	2,5	1,75	176	308,0	0,760	234,08
opakes Glaspaneel vor Betonwand 1,4 m breit	1,4	2,5	3,50	20	70,0	0,520	36,40
opakes Glaspaneel vor Betonwand 0,7 m breit	0,7	2,5	1,75	4	7,0	0,740	5,18
transparente Verglasung 2,8*3,115	2,8	3,115	8,72	7	61,1	0,900	54,95
transparente Verglasung 1,4*3,115	1,4	3,115	4,36	2	8,7	1,000	8,72
Total					**2554,43**		**1719,11**
U_{cw}-Wert	**0,67**	**W/m^2K**					

A.2 Elementfassade

A.2.1 Büroteil

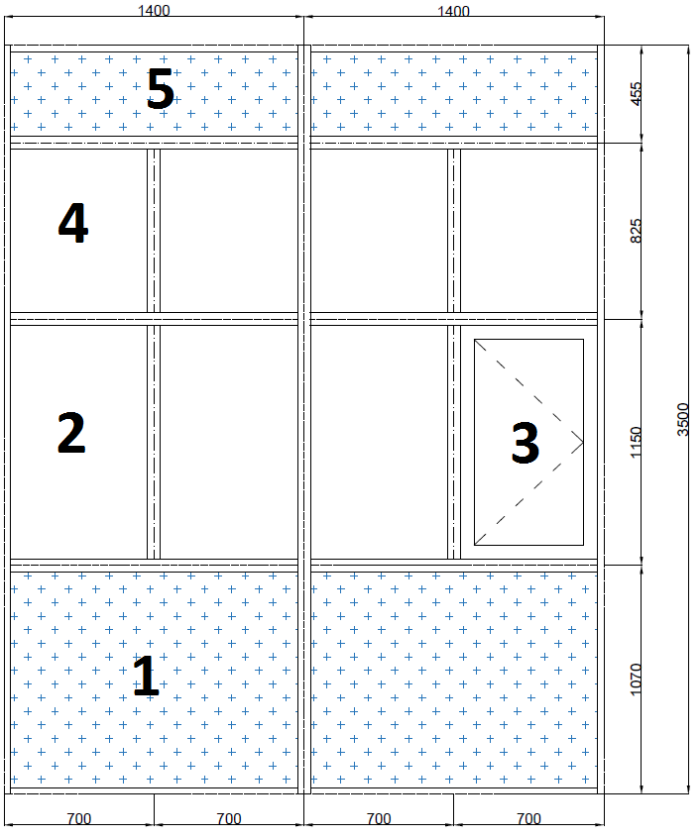


Abbildung 88: Nummerierung der Elemente für die Elementfassade im Büroteil

Tabelle 34: Berechnung des U_{cw}-Wertes für die Elementfassade im Büroteil

N°	Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche in m²	An-zahl	Gesamte Fläche in m²	U-Wert in W/m²K	A*U
1	Hinterlüftetes Glaspaneel un-ten	1,400	1,070	1,50	2	3,00	0,70	2,10
2	Festverglasung	0,700	1,150	0,81	3	2,42	1,33	3,21
3	Fenster Dreh-flügel	0,700	1,150	0,81	1	0,81	1,19	0,96
4	Festverglasung	0,700	0,825	0,58	4	2,31	1,41	3,26
5	Hinterlüftetes Glaspaneel oben	1,400	0,455	0,64	2	1,27	1,07	1,36
Total						**9,8**		**10,89**
U_{cw}-Wert	**1,11**	**W/m²K**						

A.2.2 Hotelteil

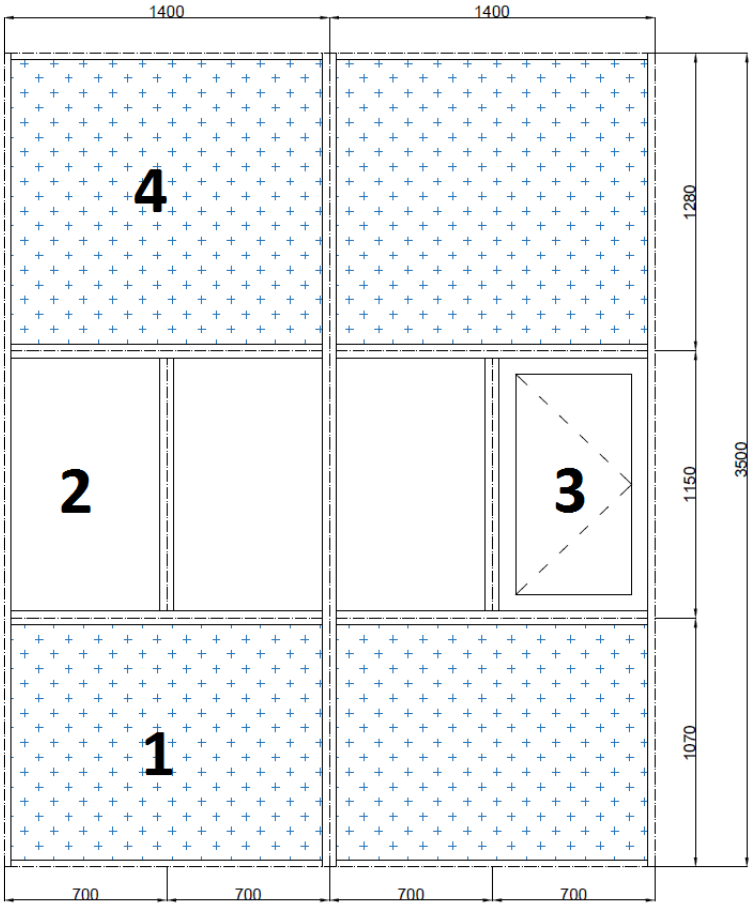


Abbildung 89: Nummerierung der Elemente für die Elementfassade im Hotelteil

Tabelle 35: Berechnung des U_{cw}-Wertes für die Elementfassade im Hotelteil

N°	Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche in m^2	Anzahl	Gesamte Fläche in m^2	U-Wert in W/m^2K	A*U
1	Hinterlüftetes Glaspaneel unten	1,400	1,070	1,50	2	3,00	0,67	2,01
2	Festverglasung	0,700	1,150	0,81	3	2,42	1,31	3,16
3	Fenster Drehflügel	0,700	1,150	0,81	1	0,81	1,19	0,96
4	Hinterlüftetes Glaspaneel oben	1,400	1,280	1,79	2	3,58	0,65	2,33
Total						**9,8**		**8,46**
U_{cw}-Wert	**0,86**	**W/m^2K**						

A.3 Fensterband

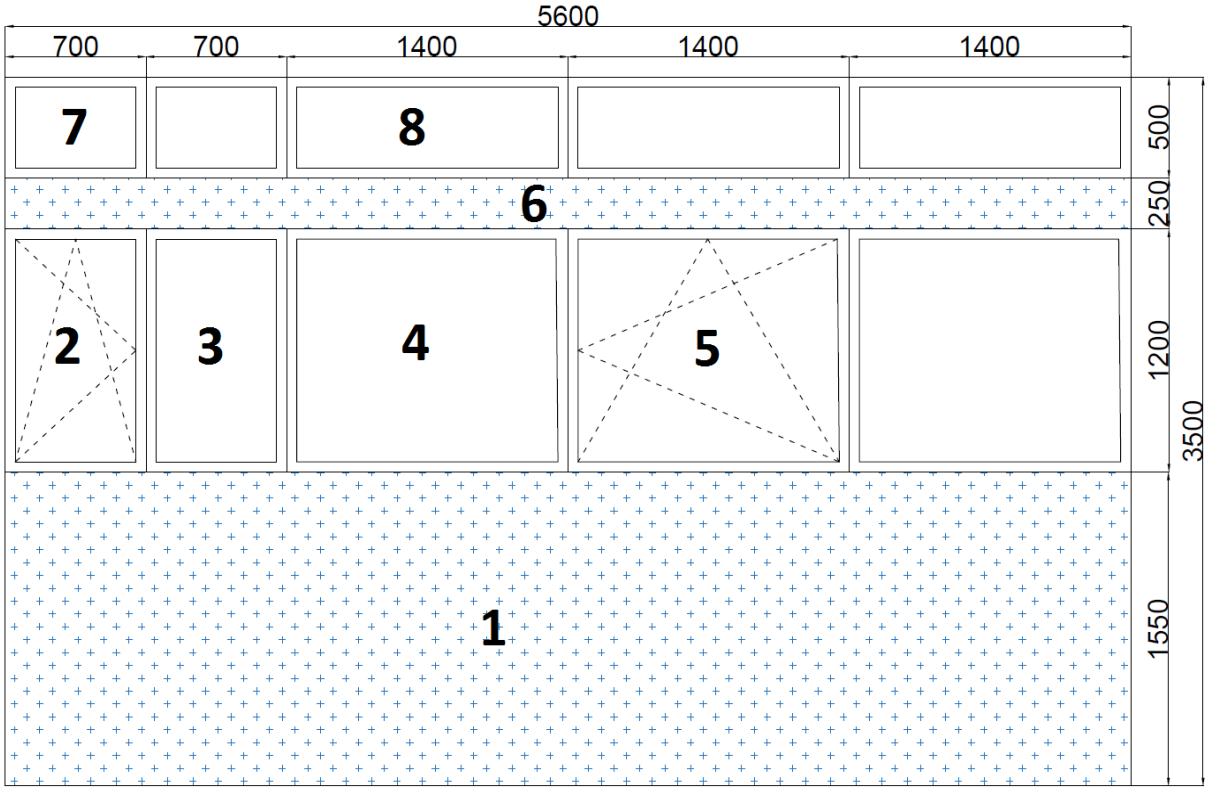


Abbildung 90: Nummerierung der Elemente für die Fensterband-Fassade

Tabelle 36: Berechnung des mittleren U-Wertes der Fenster für die Fensterband-Fassade

N°	Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche in m^2	An-zahl	Gesamte Fläche in m^2	U-Wert in W/m^2K	A*U
2	Fenster	0,700	1,200	0,840	1	0,84	1,47	1,23
3	Festverglasung	0,700	1,200	0,840	1	0,84	1,47	1,23
4	Festverglasung	1,400	1,200	1,680	2	3,36	1,36	4,57
5	Fenster	1,400	1,200	1,680	1	1,68	1,36	2,28
7	Festverglasung	0,700	0,500	0,350	2	0,7	1,62	1,13
8	Festverglasung	1,400	0,500	0,700	3	2,1	1,54	3,23
Total						**9,52**		**13,69**
	Mittlerer U-Wert Fenster	**1,44**	**W/m^2K**					

Tabelle 37: Berechnung des mittleren U-Wertes der opaken Elemente für die Fensterband-Fassade

N°	Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche in m^2	An-zahl	Gesamte Fläche in m^2	U-Wert in W/m^2K	A*U
1	Brüstung	5,600	1,550	8,680	1	8,68	0,23	2,00
6	Paneel	5,600	0,250	1,400	1	1,4	0,46	0,64
Total						**10,08**		**2,64**
	Mittlerer U-Wert opake Elemente	**0,26**	**W/m^2K**					

A.4 Pfosten-Riegel-Fassade im Erdgeschoss

Die Pfosten-Riegel-Fassade im Erdgeschoss ist bei allen Varianten gleich. Folgende Tabelle zeigt die Berechnung des U_{cw}-Wertes dieser Pfosten-Riegel-Fassade.

Tabelle 38: Berechnung des U_{cw}-Wertes der Pfosten-Riegel-Fassade im Erdgeschoss

Element	Breite in m	Höhe in m	Fläche eines Elementes in m^2	Anzahl an Elemente	Gesamte Fläche in m^2	U_{cw}-Wert in W/m^2K	A*U
transparente Verglasung 2,8*3,115	2,8	3,115	8,72	2	17,4	0,90	15,70
transparente Verglasung 1,4*3,115	1,4	3,115	4,36	10	43,6	1,00	43,61
transparente Verglasung 2,8*4,265	2,8	4,265	11,94	8	95,5	0,88	84,07
opakes Glaspa-neel 1,4 m*3,115	1,4	3,115	4,36	1	4,4	0,51	2,22
transparente Verglasung 2,8*4,265	2,8	4,265	11,94	6	71,65	0,88	63,05
transparente Verglasung 1,4*4,265	1,4	4,265	5,97	12	71,65	0,98	70,22
transparente Verglasung 2,1*4,265	2,1	4,265	8,96	12	107,48	0,91	97,80
transparente Verglasung 2,8*2,295	2,8	2,295	6,43	12	77,11	0,93	71,71
transparente Verglasung 1,15*4,265	1,15	4,265	4,90	16	78,48	1,03	80,83
transparente Verglasung 0,7*4,265	0,7	4,2665	2,99	8	23,89	1,19	28,43
Total					**591,21**		**557,66**
U_{cw}-Wert	**0,94**	**W/m^2K**					

B Bauteilkatalog

Flachdach über EG, 6.OG und 11.OG

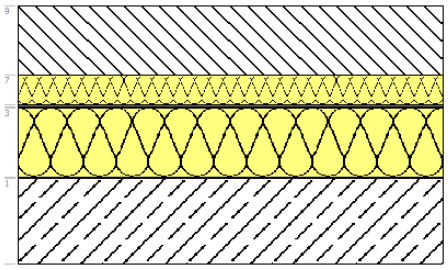


Tabelle 39: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) des Flachdaches über EG, 6.OG und 11.OG

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/mK	R m²K/W	ρ kg/m³
	R_{si}			0,10	
1	Beton	25,00	2,500	0,10	2400
2	Dampfsperre	0,40	-	-	-
3	Wärmedämmung, Mineralwolle 040	20,00	0,040	5,00	130
4	Abdichtung, 1. Lage	0,40	0,170	0,02	1200
5	Abdichtung Oberlage (Wurzelschutz)	0,52	0,170	0,03	1150
6	ggf. Wurzelschutzfolie	0,02	-	-	-
7	Wasserretentionsbox Optigrün WRB	8,50	-	-	-
8	Filtervlies, zum Beispiel Optigrün 105	0,02	-	-	-
9	Substrat (extensiv)	20,00	-	-	1000
	R_{se}			0,04	

R_{tot}= 5,36 m²K/W
U=0,19 W/m²K

Flachdach, Dachterrassen

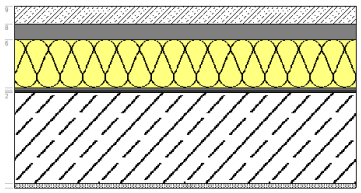


Tabelle 40: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) des Flachdaches, Dachterrassen

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/mK	R m²K/W	ρ kg/m³
	R_{si}			0,10	
1	Putz, ggf. abgehängte Akustikdecke	1,50	1,000	0,01	1800
2	Beton armiert (mit 2% Stahl)	30,00	2,500	0,12	2400
3	Voranstrich	-	1,000	-	1640
4	Abdichtung (1. Lage)	0,30	0,170	0,02	1150
5	Abdichtung (Wurzelschutz)	0,52	0,170	0,03	1150
6	Bauten- / Trittschallschutzmatte	0,80	0,130	0,06	1000
7	Dämmung (XPS) mit Zulassung	16,00	0,032	5,00	36
8	Diffusionsoffene Trennlage Roof	0,10	-	-	-
9	Kiesschüttung 16/32	5,00	0,700	-	1800
10	Gehwegplatten, Beton	6,00	1,350	0,04	2000
	R_{se}			0,04	

R_{tot}=5,44 m²K/W
U=0,18 W/m²K

Außenwand (beheizter Räume) zu Erdreich im UG

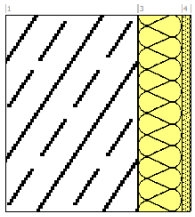


Tabelle 41: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Außenwand (beheizter Räume) zu Erdreich im UG

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/mK	R m²K/W	ρ kg/m³
	R_{si}			0,13	
1	Beton	30,00	2,500	0,12	2400
2	Abdichtung (DIN 18195-4)	0,30	-	0,02	-
3	Perimeterdämmung	10,00	0,037	2,70	25
4	Noppenfolie und Vlies	2,00	-	-	-
	R_{se}			0,00	

R_{tot}= 2,97 m²K/W
U=0,34 W/m²K

Wände beheizter Räume zur Tiefgarage

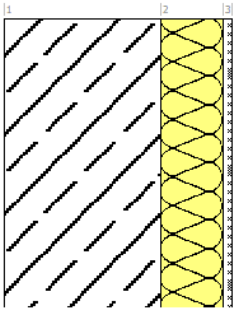


Tabelle 42: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Wände beheizter Räume zur Tiefgarage

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/mK	R m²K/W	ρ kg/m³
	R_{si}			0,13	
1	Beton armiert mit 2% Stahl	25,00	2,300	0,11	2400
2	Dämmung MF	10,00	0,035	2,86	30
3	Putz	1,50	-	-	1800
	R_{se}			0,04	

R_{tot}= 3,14 m^2K/W
U=0,32 W/m^2K

Decke zwischen EG und UG, Bereich Tiefgarage

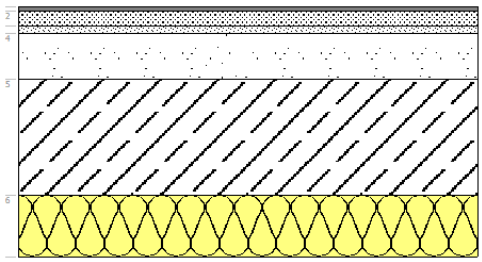


Tabelle 43: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Decke zwischen EG und UG, Bereich Tiefgarage

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/mK	R m²K/W	ρ kg/m³
	R_{si}			0,17	
1	Belag	1,00	-	-	-
2	Anhydrit-Estrich	4,00	-	-	2100
3	Trägerplatte	1,90	-	-	1150
4	Luftschicht ruhend / Stützen	12,00	0,543	0,22	1
5	Beton armiert (mit 2% Stahl)	30,00	2,500	0,12	2400
6	Schallabsorb. MW-Dämmung	16,00	0,035	4,57	-
	R_{se}			0,04	

R_{tot}=5,12 m^2K/W
U=0,20 W/m^2K

Kellerbodenplatte beheizter Bereiche im 3. UG

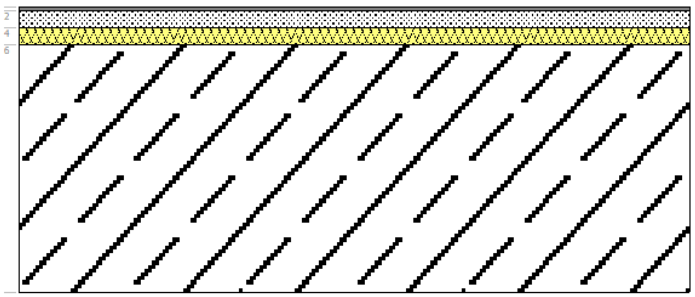


Tabelle 44: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der Kellerbodenplatte beheizter Bereiche im 3.UG

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/mK	R m²K/W	ρ kg/m³
	R_{si}			0,17	
1	Belag	1,50	1,000	0,01	2000
2	Zement-Estrich	6,00	1,400	0,04	2000
3	Trennlage (PE-Folie)	0,04	-	-	1000
4	Wärmedämmung EPS	6,00	0,035	1,71	30
5	Dampfbremse	0,02	-	-	450
6	Beton	90,00	2,500	0,36	2400
	R_{se}			0,00	

R_{tot}=2,30 m²K/W
U=0,43 W/m²K

Hinterlüftete Blechfassade

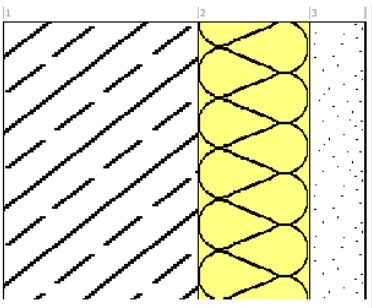


Tabelle 45: Schichtenaufbau (von warm nach kalt) der hinterlüfteten Blechfassade

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/mK	R m²K/W	ρ kg/m³
	R_{si}			0,13	
1	Beton	35,00	2,000	0,17	2400
2	Mineralwolle 035	20,00	0,035	5,71	50
3	Hinterlüftung	10,00	-	-	1
4	Aluminiumverbundplatten	0,30	160,000	-	2800
	R_{se}			0,13	

R_{tot}=6,15 m²K/W
U=0,16 W/m²

C Ausführung des Referenzgebäudes in der EnEV

Tabelle 1

Ausführung des Referenzgebäudes

Zeile	Bauteile/Systeme	Eigenschaft (zu Zeilen 1.1 bis 1.13)	Referenzausführung/Wert (Maßeinheit)	
			Raum-Solltemperaturen im Heizfall ≥ 19 °C	Raum-Solltemperaturen im Heizfall von 12 bis < 19 °C
1.0	Der nach einem der in Nummer 2 oder in Nummer 3 angegebenen Verfahren berechnete Jahres-Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes nach den Zeilen 1.1 bis 8 ist für Neubauvorhaben ab dem 1. Januar 2016 mit dem Faktor 0,75 zu multiplizieren. § 28 bleibt unberührt.			
1.1	Außenwand (einschließlich Einbauten, wie Rollladenkästen), Geschossdecke gegen Außenluft	Wärmedurchgangskoeffizient	U = 0,28 W/(m²·K)	U = 0,35 W/(m²·K)
1.2	Vorhangfassade (siehe auch Zeile 1.14)	Wärmedurchgangskoeffizient	U = 1,4 W/(m²·K)	U = 1,9 W/(m²·K)
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_\perp = 0,48$	$g_\perp = 0,60$
		Lichttransmissionsgrad der Verglasung	$\tau_{D65} = 0,72$	$\tau_{D65} = 0,78$
1.3	Wand gegen Erdreich, Bodenplatte, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen (außer Abseitenwänden nach Zeile 1.4)	Wärmedurchgangskoeffizient	U = 0,35 W/(m²·K)	U = 0,35 W/(m²·K)
1.4	Dach (soweit nicht unter Zeile 1.5), oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	Wärmedurchgangskoeffizient	U = 0,20 W/(m²·K)	U = 0,35 W/(m²·K)
1.5	Glasdächer	Wärmedurchgangskoeffizient	$U_W = 2,7$ W/(m²·K)	$U_W = 2,7$ W/(m²·K)
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_\perp = 0,63$	$g_\perp = 0,63$
		Lichttransmissionsgrad der Verglasung	$\tau_{D65} = 0,76$	$\tau_{D65} = 0,76$
1.6	Lichtbänder	Wärmedurchgangskoeffizient	$U_W = 2,4$ W/(m²·K)	$U_W = 2,4$ W/(m²·K)
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_\perp = 0,55$	$g_\perp = 0,55$
		Lichttransmissionsgrad der Verglasung	$\tau_{D65} = 0,48$	$\tau_{D65} = 0,48$
1.7	Lichtkuppeln	Wärmedurchgangskoeffizient	$U_W = 2,7$ W/(m²·K)	$U_W = 2,7$ W/(m²·K)
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_\perp = 0,64$	$g_\perp = 0,64$
		Lichttransmissionsgrad der Verglasung	$\tau_{D65} = 0,59$	$\tau_{D65} = 0,59$
1.8	Fenster, Fenstertüren (siehe auch Zeile 1.14)	Wärmedurchgangskoeffizient	$U_W = 1,3$ W/(m²·K)	$U_W = 1,9$ W/(m²·K)
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_\perp = 0,60$	$g_\perp = 0,60$
		Lichttransmissionsgrad der Verglasung	$\tau_{D65} = 0,78$	$\tau_{D65} = 0,78$

Zeile	Bauteile/Systeme	Eigenschaft (zu Zeilen 1.1 bis 1.13)	Referenzausführung/Wert (Maßeinheit)	
			Raum-Solltemperaturen im Heizfall ≥ 19 °C	Raum-Solltemperaturen im Heizfall von 12 bis < 19 °C
1.9	Dachflächenfenster (siehe auch Zeile 1.14)	Wärmedurchgangskoeffizient	U_W = 1,4 W/(m²·K)	U_W = 1,9 W/(m²·K)
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_\perp$ = 0,60	$g_\perp$ = 0,60
		Lichttransmissionsgrad der Verglasung	τ_{D65} = 0,78	τ_{D65} = 0,78
1.10	Außentüren	Wärmedurchgangskoeffizient	U = 1,8 W/(m²·K)	U = 2,9 W/(m²·K)
1.11	Bauteile in Zeilen 1.1 und 1.3 bis 1.10	Wärmebrückenzuschlag	ΔU_{WB} = 0,05 W/(m²·K)	ΔU_{WB} = 0,1 W/(m²·K)
1.12	Gebäudedichtheit	Kategorie nach DIN V 18599-2: 2011-12 Tabelle 6	Kategorie I *	
1.13	Tageslichtversorgung bei Sonnen- oder Blendschutz oder bei Sonnen- und Blendschutz	Tageslichtversorgungsfaktor $C_{TL,Vers,SA}$ nach DIN V 18599-4: 2011-12	• kein Sonnen- oder Blendschutz vorhanden: 0,70 • Blendschutz vorhanden: 0,15	
1.14	Sonnenschutzvorrichtung	Für das Referenzgebäude ist die tatsächliche Sonnenschutzvorrichtung des zu errichtenden Gebäudes anzunehmen; sie ergibt sich gegebenenfalls aus den Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz nach Nummer 4 oder aus Erfordernissen des Blendschutzes. Soweit hierfür Sonnenschutzverglasung zum Einsatz kommt, sind für diese Verglasung folgende Kennwerte anzusetzen: • anstelle der Werte der Zeile 1.2 - Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung $g_\perp$ $g_\perp$ = 0,35 - Lichttransmissionsgrad der Verglasung τ_{D65} τ_{D65} = 0,58 • anstelle der Werte der Zeilen 1.8 und 1.9: - Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung $g_\perp$ $g_\perp$ = 0,35 - Lichttransmissionsgrad der Verglasung τ_{D65} τ_{D65} = 0,62		
2.1	Beleuchtungsart	- in Zonen der Nutzungen 6 und 7**: wie beim ausgeführten Gebäude - im Übrigen: direkt/indirekt jeweils mit elektronischem Vorschaltgerät und stabförmiger Leuchtstofflampe		
2.2	Regelung der Beleuchtung	Präsenzkontrolle: - in Zonen der Nutzungen 4, 15 bis 19, 21 und 31** mit Präsenzmelder - im Übrigen: manuell Konstantlichtkontrolle/tageslichtabhängige Kontrolle - in Zonen der Nutzungen 5, 9, 10, 14, 22.1 bis 22.3, 29, 37 bis 40**: - Konstantlichtkontrolle gemäß DIN V 18599-4: 2011-12 Abschnitt 5.4.6 - in Zonen der Nutzungen 1 bis 4, 8, 12, 28, 31 und 36**: tageslichtabhängige Kontrolle, Kontrollart „gedimmt, nicht ausschaltend“ gemäß DIN V 18599-4: 2011-12 Abschnitt 5.5.4 (einschließlich Konstantlichtkontrolle) - im Übrigen: manuell		
3.1	Heizung (Raumhöhen ≤ 4 m) - Wärmeerzeuger	Brennwertkessel „verbessert“ nach DIN V 18599-5: 2011-12 Tabelle 47 Fußnote a, Gebläsebrenner, Heizöl EL, Aufstellung außerhalb der thermischen Hülle, Wasserinhalt > 0,15 l/kW		

Zeile	Bauteile/Systeme	Eigenschaft (zu Zeilen 1.1 bis 1.13)	Referenzausführung/Wert (Maßeinheit)
3.2	Heizung (Raumhöhen ≤ 4 m) - Wärmeverteilung	- bei statischer Heizung und Umluftheizung (dezentrale Nachheizung in RLT-Anlage): Zweirohrnetz, außen liegende Verteilleitungen im unbeheizten Bereich, innen liegende Steigstränge, innen liegende Anbindeleitungen, Systemtemperatur 55/45 °C, hydraulisch abgeglichen, Δp konstant, Pumpe auf Bedarf ausgelegt, Pumpe mit intermittierendem Betrieb, keine Überströmventile, für den Referenzfall sind die Rohrleitungslängen und die Umgebungstemperaturen gemäß den Standardwerten nach DIN V 18599-5: 2011-12 zu ermitteln. - bei zentralem RLT-Gerät: Zweirohrnetz, Systemtemperatur 70/55 °C, hydraulisch abgeglichen, Δp konstant, Pumpe auf Bedarf ausgelegt, für den Referenzfall sind die Rohrleitungslängen und die Lage der Rohrleitungen wie beim zu errichtenden Gebäude anzunehmen.	
3.3	Heizung (Raumhöhen ≤ 4 m) - Wärmeübergabe	- bei statischer Heizung: freie Heizflächen an der Außenwand (bei Anordnung vor Glasflächen mit Strahlungsschutz); P-Regler (1K), keine Hilfsenergie - bei Umluftheizung (dezentrale Nachheizung in RLT-Anlage): Regelgröße Raumtemperatur, hohe Regelgüte.	
3.4	Heizung (Raumhöhen > 4 m)	Dezentrales Heizsystem: Wärmeerzeuger gemäß DIN V 18599-5: 2011-12 Tabelle 50: - Dezentraler Warmlufterzeuger - nicht kondensierender Betrieb - Leistung 25 bis 50 kW - Energieträger Erdgas - Leistungsregelung 1 (einstufig oder mehrstufig/modulierend ohne Anpassung der Verbrennungsluftmenge) Wärmeübergabe gemäß DIN V 18599-5: 2011-12 Tabelle 13: - Radialventilator, seitlicher Luftauslass, ohne Warmluftrückführung Raumtemperaturregelung P-Regler	
4.1	Warmwasser - zentrales System	Wärmeerzeuger: Solaranlage mit Flachkollektor in Standardausführung nach DIN V 18599-8: 2011-12, berichtigt durch DIN V 18599-8 Berichtigung 1: 2013-05, jedoch abweichend auch für zentral warmwasserversorgte Nettogrundflächen über 3000 m² Restbedarf über Wärmeerzeuger der Heizung Wärmespeicherung: bivalenter, außerhalb der thermischen Hülle aufgestellter Speicher nach DIN V 18599-8: 2011-12 Abschnitt 6.3.1, berichtigt durch DIN V 18599-8 Berichtigung 1: 2013-05 Wärmeverteilung: mit Zirkulation, für den Referenzfall sind die Rohrleitungslänge und die Lage der Rohrleitungen wie beim zu errichtenden Gebäude anzunehmen.	
4.2	Warmwasser - dezentrales System	elektrischer Durchlauferhitzer, eine Zapfstelle und 6 m Leitungslänge pro Gerät	
5.1	Raumlufttechnik - Abluftanlage	spezifische Leistungsaufnahme Ventilator	P_{SFP} = 1,0 kW/(m³/s)

Zeile	Bauteile/Systeme	Eigenschaft (zu Zeilen 1.1 bis 1.13)	Referenzausführung/Wert (Maßeinheit)
5.2	Raumlufttechnik - Zu- und Abluftanlage ohne Nachheiz- und Kühlfunktion	Soweit für Zonen der Nutzungen 4, 8, 9, 12, 13, 23, 24, 35, 37 und 40 ** eine Zu- und Abluftanlage vorgesehen wird, ist diese mit bedarfsabhängiger Luftvolumenstromregelung gemäß DIN V 18599-7: 2011-12 Abschnitt 5.8.1 auszulegen. Spezifische Leistungsaufnahme - Zuluftventilator - Abluftventilator Zuschläge nach DIN EN 13779: 2007-09 Abschnitt 6.5.2 können nur für den Fall von HEPA-Filtern, Gasfiltern oder Wärmerückführungsklassen H2 oder H1 angerechnet werden. - Wärmerückgewinnung über Plattenwärmeübertrager (Kreuzgegenstrom) Rückwärmzahl Druckverhältniszahl Luftkanalführung: innerhalb des Gebäudes	 P_{SFP} = 1,5 kW/(m³/s) P_{SFP} = 1,0 kW/(m³/s) η_t= 0,6 f_p = 0,4
5.3	Raumlufttechnik - Zu- und Abluftanlage mit geregelter Luftkonditionierung	Soweit für Zonen der Nutzungen 4, 8, 9, 12, 13, 23, 24, 35, 37 und 40 ** eine Zu- und Abluftanlage vorgesehen wird, ist diese mit bedarfsabhängiger Luftvolumenstromregelung gemäß DIN V 18599-7: 2011-12 Abschnitt 5.8.1 auszulegen. Spezifische Leistungsaufnahme - Zuluftventilator - Abluftventilator Zuschläge nach DIN EN 13779: 2007-09 Abschnitt 6.5.2 können nur für den Fall von HEPA-Filtern, Gasfiltern oder Wärmerückführungsklassen H2 oder H1 angerechnet werden. - Wärmerückgewinnung über Plattenwärmeübertrager (Kreuzgegenstrom) Rückwärmzahl Zulufttemperatur Druckverhältniszahl Luftkanalführung: innerhalb des Gebäudes	 P_{SFP} = 1,5 kW/(m³/s) P_{SFP} = 1,0 kW/(m³/s) Φ_{rec} bzw. η_t= 0,6 18 °C f_p = 0,4
5.4	Raumlufttechnik - Luftbefeuchtung	für den Referenzfall ist die Einrichtung zur Luftbefeuchtung wie beim zu errichtenden Gebäude anzunehmen	
5.5	Raumlufttechnik - Nur-Luft-Klimaanlagen	als Variabel-Volumenstrom-System ausgeführt: Druckverhältniszahl Luftkanalführung: innerhalb des Gebäudes	 f_p = 0,4
6	Raumkühlung	- Kältesystem: Kaltwasser-Ventilatorkonvektor, Brüstungsgerät Kaltwassertemperatur - Kaltwasserkreis Raumkühlung: Überströmung spezifische elektrische Leistung der Verteilung hydraulisch abgeglichen, geregelte Pumpe, Pumpe hydraulisch entkoppelt, saisonale sowie Nacht- und Wochenendabschaltung	 14/18 °C 10% $P_{d,spez}$ = 30 $W_{el}/kW_{Kälte}$

Zeile	Bauteile/Systeme	Eigenschaft (zu Zeilen 1.1 bis 1.13)	Referenzausführung/Wert (Maßeinheit)
7	Kälteerzeugung	Erzeuger: Kolben/Scrollverdichter mehrstufig schaltbar, R134a, luftgekühlt Kaltwassertemperatur: - bei mehr als 5 000 m² mittels Raumkühlung konditionierter Nettogrundfläche, für diesen Konditionierungsanteil 14/18 °C - im Übrigen: 6/12 °C Kaltwasserkreis Erzeuger inklusive RLT-Kühlung: Überströmung 30 % spezifische elektrische Leistung der Verteilung $P_{d,spez}$ = 20 $W_{el}/kW_{Kälte}$ hydraulisch abgeglichen, ungeregelte Pumpe, Pumpe hydraulisch entkoppelt, saisonale sowie Nacht- und Wochenendabschaltung, Verteilung außerhalb der konditionierten Zone. Der Primärenergiebedarf für das Kühlsystem und die Kühlfunktion der raumlufttechnischen Anlage darf für Zonen der Nutzungen 1 bis 3, 8, 10, 16 bis 20 und 31** nur zu 50 % angerechnet werden.	
8	Gebäudeautomation	- Summand $\Delta\theta_{EMS}$: gemäß Klasse C - Faktor adaptiver Betrieb f_{adapt}: Klasse C jeweils nach DIN V 18599-11: 2011-12	

* Die Angaben nach Anlage 4 zum Überprüfungsverfahren für die Dichtheit bleiben unberührt.
** Nutzungen nach Tabelle 5 der DIN V 18599-10: 2011-12.

D Nachweis der visuellen Anforderungen

D.1 Nachweis der geometrischen Anforderungen

In der Arbeitsstättenverordnung und in der DIN 5034-1 sind Anforderungen an den Fensterabmessungen im Verhältnis zu den Arbeitsraummaßen definiert. In der Folge wird der Nachweis dieser Anforderungen für das 2.OG geführt. Die Tabelle in diesem Abschnitt beinhalten die notwendigen Größen für den Nachweis von folgenden Kriterien:

- Fensterfläche ≥ Raumfläche/10 (Arbeitsstättenverordnung und DIN 5034-1)
- $\sum F \geq 0{,}3.b.h$ mit F den durchsichtigen Fensterflächen, b der Breite der Raumes und h der Höhe des Raumes
- Breite der Fenster $b_F \geq 55\%$ der Breite des Arbeitsraumes (DIN 5034-1)

In Rot sind die Werte angezeigt, die die oben genannten Anforderungen nicht erfüllen. Folgende Abbildung zeigt die Nummerierung der Arbeitsräume.

Abbildung 91: Nummerierung der Arbeitsräume im 2. OG

Tabelle 46: Arbeitsraummaße und Fensterabmessungen im Ist-Zustand

	Raumfläche	Soll (1:10)	Ist (Fensterfläche F)	b	h	0,3.b.h	b_F	0,55.b
1	74,3	7,43	21,98	12,10	2,9	10,53	7,95	6,66
2	21,10	2,11	5,53	3,40	2,9	2,96	2,00	1,87
3	93,7	9,37	38,43	15,65	2,9	13,62	13,90	8,61
4	24,3	2,43	7,33	5,48	2,9	4,77	2,65	3,01
5	12,6	1,26	7,33	2,69	2,9	2,34	2,65	1,48
6	27	2,7	7,33	5,60	2,9	4,87	2,65	3,08
7	34,5	3,45	20,18	6,20	2,9	5,39	7,30	3,41
8	73,1	7,31	21,98	13,15	2,9	11,44	7,95	7,23
9	15	1,5	5,53	2,70	2,9	2,35	2,00	1,49
10	22,70	2,27	7,33	4,10	2,9	3,57	2,65	2,26
11	13,3	1,33	12,72	5,52	2,9	4,80	4,60	3,04
12	69	6,9	36,50	14,35	2,9	12,48	13,20	7,89
13	24,8	2,48	3,59	4,00	2,9	3,48	1,30	2,20
14	22,5	2,25	5,53	4,97	2,9	4,32	2,00	2,73
15	45	4,5	16,45	7,60	2,9	6,61	5,95	4,18
16	19,9	1,99	7,33	3,99	2,9	3,47	2,65	2,19
17	13,1	1,31	3,59	2,69	2,9	2,34	1,30	1,48
18	13,1	1,31	3,59	2,69	2,9	2,34	1,30	1,48
19	43,5	4,35	16,45	8,98	2,9	7,81	5,95	4,94
20	26,3	2,63	11,06	5,53	2,9	4,81	4,00	3,04
21	18,5	1,85	1,80	2,24	2,9	1,95	0,65	1,23
22	14,4	1,44	5,53	2,83	2,9	2,46	2,00	1,56

Tabelle 47: Arbeitsraummaße und Fensterabmessungen für die Elementfassade

	Raumfläche	Soll (1:10)	Ist (Fensterfläche F)	b	h	0,3.b.h	b_F	0,55.b
1	74,3	7,43	22,45	12,10	2,9	10,53	11,08	6,66
2	21,10	2,11	6,31	3,40	2,9	2,96	3,16	1,87
3	93,7	9,37	41,00	15,65	2,9	13,62	14,33	8,61
4	24,3	2,43	10,17	5,48	2,9	4,77	5,06	3,01
5	12,6	1,26	4,99	2,69	2,9	2,34	2,51	1,48
6	27	2,7	10,39	5,60	2,9	4,87	5,12	3,08
7	34,5	3,45	18,92	6,20	2,9	5,39	5,72	3,41
8	73,1	7,31	24,39	13,15	2,9	11,44	12,07	7,23
9	15	1,5	5,01	2,70	2,9	2,35	2,52	1,49
10	22,70	2,27	7,61	4,10	2,9	3,57	3,80	2,26
11	13,3	1,33	15,32	5,52	2,9	4,80	5,10	3,04
12	69	6,9	26,62	14,35	2,9	12,48	13,15	7,89
13	24,8	2,48	7,42	4,00	2,9	3,48	3,70	2,20
14	22,5	2,25	9,22	4,97	2,9	4,32	4,55	2,73
15	45	4,5	20,15	7,60	2,9	6,61	7,00	4,18
16	19,9	1,99	7,40	3,99	2,9	3,47	3,69	2,19
17	13,1	1,31	4,99	2,69	2,9	2,34	2,51	1,48
18	13,1	1,31	4,99	2,69	2,9	2,34	2,51	1,48
19	43,5	4,35	16,66	8,98	2,9	7,81	8,26	4,94
20	26,3	2,63	10,26	5,53	2,9	4,81	5,11	3,04
21	18,5	1,85	4,16	2,24	2,9	1,95	2,06	1,23
22	14,4	1,44	5,25	2,83	2,9	2,46	2,59	1,56

Tabelle 48: Arbeitsraummaße und Fensterabmessungen für die Fensterband-Fassade

	Raumfläche	Soll (1:10)	Ist (Fensterfläche F)	b	h	0,3.b.h	b_F	0,55.b
1	74,3	7,43	18,15	12,10	2,9	10,53	10,40	6,66
2	21,10	2,11	5,10	3,40	2,9	2,96	3,00	1,87
3	93,7	9,37	33,15	15,65	2,9	13,62	13,45	8,61
4	24,3	2,43	8,22	5,48	2,9	4,77	4,78	3,01
5	12,6	1,26	4,04	2,69	2,9	2,34	2,39	1,48
6	27	2,70	8,40	5,60	2,9	4,87	4,80	3,08
7	34,5	3,45	15,30	6,20	2,9	5,39	5,40	3,41
8	73,1	7,31	19,73	13,15	2,9	11,44	11,35	7,23
9	15	1,5	4,05	2,70	2,9	2,35	2,40	1,49
10	22,70	2,27	6,15	4,10	2,9	3,57	3,60	2,26
11	13,3	1,33	12,39	5,52	2,9	4,80	4,82	3,04
12	69	6,9	21,53	14,35	2,9	12,48	12,35	7,89
13	24,8	2,48	6,00	4,00	2,9	3,48	3,50	2,20
14	22,5	2,25	7,46	4,97	2,9	4,32	4,27	2,73
15	45	4,5	16,29	7,60	2,9	6,61	6,60	4,18
16	19,9	1,99	5,99	3,99	2,9	3,47	3,49	2,19
17	13,1	1,31	4,04	2,69	2,9	2,34	2,39	1,48
18	13,1	1,31	4,04	2,69	2,9	2,34	2,39	1,48
19	43,5	4,35	13,47	8,98	2,9	7,81	7,78	4,94
20	26,3	2,63	8,30	5,53	2,9	4,81	4,83	3,04
21	18,5	1,85	3,36	2,24	2,9	1,95	1,94	1,23
22	14,4	1,44	4,24	2,83	2,9	2,46	2,43	1,56

D.2 Berechnung des Tageslichtquotienten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Tageslichtberechnung im 2.OG mit DIALux gezeigt.

Tabelle 49: Tageslichtquotient in den Arbeitsräumen im 2.OG im Ist-Zustand

	Tageslichtquotient in %		
	Berechnungspunkt 1	Berechnungspunkt 2	Mittelwert
Raum 1	2,08	2,39	2,24
Raum 3	1,87	6,66	4,27
Raum 4	2,59	2,21	2,40
Raum 5	3,88	3,81	3,85
Raum 6	1,54	1,67	1,60
Raum 7	6,38	2,88	4,63
Raum 8	1,96	2,14	2,05
Raum 10	1,78	2,26	2,02
Raum 12	3,11	2,08	2,59
Raum 13	0,57	0,59	0,58
Raum 14	0,56	0,83	0,70
Raum 15	0,71	4,46	2,59
Raum 16	0,76	1,63	1,20
Raum 19	1,26	1,02	1,14

Im Ist-Zustand ist der Nachweis in den Arbeitsräumen 13, 14 und 15 nicht erfüllt.

Tabelle 50. Tageslichtquotient in den Arbeitsräumen im 2.OG mit der Elementfassade

	Tageslichtquotient in %		
	Berechnungspunkt 1	Berechnungspunkt 2	Mittelwert
Raum 1	2,74	1,63	2,18
Raum 3	3,12	14,53	8,83
Raum 4	4,47	4,16	4,31
Raum 5	3,74	3,66	3,70
Raum 6	3,45	3,19	3,32
Raum 7	7,37	3,29	5,33
Raum 8	3,28	2,76	3,02
Raum 10	3,61	4,22	3,91
Raum 12	3,38	3,19	3,29
Raum 13	1,12	0,92	1,02
Raum 14	1,13	1,11	1,12
Raum 15	1,06	5,23	3,15
Raum 16	1,48	1,68	1,58
Raum 19	1,25	1,92	1,58

Für die Elementfassade ist der Nachweis in allen Arbeitsräumen erfüllt.

Tabelle 51: Tageslichtquotient in den Arbeitsräumen im 2.OG mit der Fensterband-Fassade

	Tageslichtquotient in %		
	Berechnungspunkt 1	Berechnungspunkt 2	Mittelwert
Raum 1	2,05	2,02	2,03
Raum 3	2,33	10,74	6,53
Raum 4	3,40	3,10	3,25
Raum 5	2,86	2,80	2,83
Raum 6	2,46	2,41	2,43
Raum 7	6,40	2,55	4,48
Raum 8	2,48	2,08	2,28
Raum 10	2,26	2,14	2,20
Raum 12	2,45	2,49	2,47
Raum 13	0,77	0,64	0,70
Raum 14	0,73	0,73	0,73
Raum 15	0,75	3,38	2,06
Raum 16	0,99	1,06	1,02
Raum 19	1,21	1,41	1,31

Für die Fensterband-Fassade ist der Nachweis in den Arbeitsräumen 13 und 14 nicht erfüllt.