

DIPLOMARBEIT

Bewertung verschiedener Berechnungsansätze für Energiebilanzen am
Beispiel der Sanierung eines denkmalgeschützten Bestandsgebäudes

Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. John Grunewald

Betreuer: Dr.-Ing. Ayman Bishara
Dipl.-Ing. Dirk Weiß

Bearbeiter: Mandy Drechsel
Matrikelnr. 3518839

Eingereicht am: 10.02.2014



Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Nr. 3518839

Name: Frau Cand. Ing. Mandy Drechsel

Vertiefung: GEM

Thema: **Bewertung verschiedener Berechnungsansätze für Energiebilanzen am Beispiel der Sanierung eines denkmalgeschützten Bestandsgebäudes**
(Evaluation of different calculation approaches for energy balances of an existing historical example building)

Zielsetzung:

Im Zuge der zunehmenden energetischen Sanierung denkmalgeschützter Altbauten gewinnt die fundierte Analyse der Gesamtenergiebilanz Nutz-, End- und Primärenergiebilanzen an Bedeutung. Auf dem Markt existiert bereits eine Vielzahl an Berechnungswerkzeugen, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Ansätze jedoch schwer vergleichbar sind.

Im Rahmen der Diplomarbeit sollen die beiden Berechnungsprogramme PHPP und EnergyPlus/Designbuilder gegenübergestellt werden. Betrachtet wird die Analyse der Energiekennwerte in der Betriebsphase eines denkmalgeschützten Gebäudes.

Ausgehend von einer Literatur- und Internetrecherche sind zunächst die Grundlagen, die für die Bearbeitung des Themas erforderlich sind, zusammenzustellen. Dabei sollen die Programme in Hinblick auf ihren Hintergrund, ihre geschichtliche Entwicklung und ihre Funktionsweise untersucht werden. Insbesondere ist auf Stärken und Schwächen einzugehen.

Die Bearbeitung erfolgt an einem ausgewählten Bestandsgebäude aus dem europäischen Projekt 3ENCULT.

Der Diplomand erhält die Aufgabe eine Analyse auf Gebäudeebene: (A) der energetischen Bestandssituation sowie (B) der energetischen Situation nach der Sanierung durchzuführen. Optional hinzukommend: (C) die Evaluation weiterer Maßnahmen, mit welchen die Erreichung des Passivhausstandards ermöglicht werden kann. Abschließend ist ein Vergleich der Ergebnisse mit Messwerten zu führen, wobei keine Validierung sondern maximal eine Kalibrierung durch Justierung vorhandener Parameter auf Grundlage der Messwerte durchzuführen ist. Auch die Fragestellung ob gegebenenfalls abweichende Ergebnisse beider Programme zu stark unterschiedlichen Schlussfolgerungen führen oder global ähnliche Ansätze ausbilden, ist zu untersuchen.

Wiss. Betreuer TU Dresden: Dr.-Ing. Ayman Bishara
Wiss. Betreuer TU Dresden: Dipl.-Ing. Dirk Weiss

ausgehändigt am:
einzureichen am:

Prof. Dr.-Ing. John Grunewald
Verantwortlicher Hochschullehrer
Direktor des Instituts für Bauklimatik
Technische Universität Dresden

Dresden, den 10.02.2014

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Diplomarbeit zum Thema:

„Bewertung verschiedener Berechnungsansätze für Energiebilanzen am Beispiel der Sanierung eines denkmalgeschützten Bestandsgebäudes“

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsinstitution vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Mandy Drechsel

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei meinem Erstbetreuer, Herrn Dr.-Ing. Ayman Bishara, für seine Unterstützung sowie die vielen Anmerkungen und Hinweise zum wissenschaftlichen Arbeiten bedanken.

Meinem Zweitbetreuer, Herrn Dipl.-Ing. Dirk Weiß, danke ich für seine fachliche Betreuung und seine eingebrachten Ideen. Seine ansteckende Begeisterung für dieses Diplomthema erleichterte die Arbeit selbst in schwierigen Momenten.

Ein besonderer Dank gilt dem Eigentümer des in dieser Arbeit betrachteten Gebäudes für die Bereitstellung der Verbrauchsmessungen. Desweiteren bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Hartmut Kecke der NKG Ingenieurgesellschaft mbH für die Hilfe bei der Zuordnung der Messdaten.

Abschließend möchte ich mich bei Professor Dr.-Ing. John Grunewald für sein entgegengebrachtes Vertrauen in meine Arbeit bedanken.

Kurzfassung

Mit zunehmendem Interesse an der energetischen Situation von Gebäuden, gewinnt die kritische Auseinandersetzung mit den zugrundeliegenden Berechnungsansätzen der Energiebilanzen an Bedeutung. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem vereinfachten Modell des Passivhausprojektierungspaketes und der dynamischen Simulation von EnergyPlus. Aufbauend auf eine Beschreibung beider Programme, werden deren Berechnungsansätze analysiert, um möglichst identische Randbedingungen für die anschließende Simulation herauszuarbeiten. Diese erfolgt an einem im Rahmen des europäischen Projektes 3ENCULT ausgewähltem denkmalgeschützten Gebäude im Zustand vor und nach der Sanierung. Davon ausgehend werden vier Varianten erstellt, mit deren Hilfe der Einfluss der unterschiedlichen Parameter Fläche, Volumen und Wärmebrücken auf die Ergebnisse ermittelt wird.

Abstract

With the increasing interest in energy consumption of buildings, the critical analysis of different calculation approaches for energy balances is gaining in importance. This paper presents an overview of the simplified method used by the Passivhausprojektierungspaket (Passive house Planning Package) and the dynamic simulation of EnergyPlus. After a short review of the historical background and structure of the programs, their calculation approaches are analysed in order to approximate boundary conditions. The following simulation is done on a historical building chosen out of the 3ENCULT European Project before and after its renovation. Furthermore, four variations are developed to determine the influence of parameters concerning surface, volume and thermal bridges affecting the obtained result.

Récapitulatif

Avec l'intérêt montant de connaître la situation énergétique des bâtiments, l'analyse critique des approches de calcul des bilans énergétiques gagne en importance. Ce mémoire compare la méthode simplifiée de Passivhausprojektierungspaket (pack de projection des maison passive) et la simulation dynamique d'EnergyPlus. Après un bref aperçu sur le développement et la structure des logiciels, leurs approches de calcul sont examinées afin d'adapter les données le plus possibles. La simulation est effectuée avec un bâtiment classé monument historique choisi parmi le projet européen 3ENCULT avant et après sa rénovation. En outre, quatre variations sont créées en raison de déterminer l'influence des paramètres surface, volume et ponts thermiques sur le résultat final.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	V
Einleitung	1
1 Theoretische Grundlagen	3
1.1 EnergyPlus	3
1.2 DesignBuilder	9
1.3 Passivhausprojektierungspaket	10
2 Gebäude und Projekt	14
2.1 Das Projekt 3ENCULT	14
2.2 Informationen zum Gebäude	19
3 Gebäudesimulation	22
3.1 Passivhausprojektierungspaket	22
3.1.1 Das unsanierte Gebäude im PHPP	22
3.1.2 Das sanierte Gebäude im PHPP	28
3.2 Energyplus / Designbuilder	32
3.2.1 Das unsanierte Gebäude in E+	32
3.2.2 Das sanierte Gebäude in E+	36
3.3 Auswertung der Gebäudesimulation	38
3.3.1 Klimadaten	38
3.3.2 Auswertung	42
3.3.3 Zeittabelle	48
4 Varianten und Messwerte	50
4.1 Variantenanalyse	50
4.2 Vergleich mit Messwerten	61

5	Evaluation des approches de calcul de bilan énergétique.....	63
5.1	Développement des Logiciels PHPP et EnergyPlus.....	64
5.2	Le Projet 3ENCULT et le bâtiment	66
5.3	Elaboration des simulations	68
5.4	Exploitation des données	73
5.5	Résumé	76
6	Zusammenfassung.....	77
7	Ausblick	78
	Literaturverzeichnis	79
	Anhang	81

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Überblick Programmstruktur von EnergyPlus [1].....	6
Abbildung 2 Auszug der Ergebnisse des ASHRAE 140P Case [1]	8
Abbildung 3 Vergleich Messwerte mit DYNBIL-Simulation [5]	11
Abbildung 4 Übersicht Workpackages [11]	16
Abbildung 5 Arbeitsverfahren Fallstudie [11]	17
Abbildung 6 Ansicht Nord, Sept. 2013.....	19
Abbildung 7 thermische Hülle unsaniert	22
Abbildung 8 thermische Hülle im Untergeschoss, unsaniert	23
Abbildung 9 thermische Hülle saniert	28
Abbildung 10 thermische Hülle im Untergeschoss, saniert	29
Abbildung 11 Gegenüberstellung U-Werte in $W/(m^2K)$	31
Abbildung 12 Ansicht Südseite im DesignBuilder	33
Abbildung 13 Ansicht Nordseite im DesignBuilder.....	33
Abbildung 14 Innenansicht im DesignBuilder	33
Abbildung 15 Gegenüberstellung U-Werte Zwischendecken in $W/(m^2K)$	37
Abbildung 16 Schwankung der Strahlungswerte in $kWh/(m^2 \times Zeit)$	43
Abbildung 17 Spezifische Gewinne und Verluste im unsanierten Zustand im PHPP in kWh/m^2	45
Abbildung 18 Spezifische Gewinne und Verluste im sanierten Zustand im PHPP in kWh/m^2	45
Abbildung 19 Spezifische Gewinne und Verluste im unsanierten Zustand nach E+ in kWh/m^2	46
Abbildung 20 Spezifische Gewinne und Verluste im sanierten Zustand nach E+ in kWh/m^2	46
Abbildung 21 Senkung der Transmissionsverluste in Folge der Sanierung in kWh/a	47
Abbildung 22 Senkung der U-Werte von Hüllfläche und Zwischendecken in %	47
Abbildung 23 Dauer der Simulationsschritte in Stunden.....	49
Abbildung 24 Energiebilanz 1.Variante in kWh/a	53
Abbildung 25 Annäherung durch Abwandlung der 1.Variante in kWh/a	54
Abbildung 26 Übersicht horizontale Wärmebrücken	55
Abbildung 27 Außenecke.....	56
Abbildung 28 veränderte Ergebnisse durch Wärmebrücken in der 2.Variante.....	57
Abbildung 29 Vergleich Variante 2 und 3 im EnergiePlus mit PHPP.....	58
Abbildung 30 Vergleich Variante 4 in EnergiePlus mit PHPP	60
Abbildung 31 Vergleich Heizwärmebedarf der Simulationen mit Messwerten	62

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Ergebnisse unterschiedlicher Methoden zur Nordausrichtung	36
Tabelle 2 Außentemperaturen Dresden nach DIN 4108-6 Tabelle A.3 in °C	38
Tabelle 3 Anteile der maximalen Verluste und Strahlungsfaktoren	39
Tabelle 4 Werte der Globalstrahlung im PHPP in kWh/(m²xMonat)	39
Tabelle 5 Bodentemperaturen PHPP im unsanierten Fall (Bodenplatte im Erdreich) in °C	41
Tabelle 6 Bodentemperaturen PHPP im sanierten Fall (Bodenplatte im Erdreich) in °C.....	41
Tabelle 7 Ergebnisse PHPP und E+ nach dem ersten Simulationsgang in kWh/a	42
Tabelle 8 errechnete Strahlungswerte in kWh/(m²xMonat).....	43
Tabelle 9 Ergebnisse PHPP und E+ in der verbesserten Simulation	43
Tabelle 10 Zeitwerte für beide Simulationen in h	48
Tabelle 11 Ergebnisse PHPP und E+ in der ersten Variante	52
Tabelle 12 Einfluss der geänderten Wetterdaten im E+	54
Tabelle 13 Einfluss der Wärmebrücken im sanierten Zustand	56
Tabelle 14 Ergebnisse Variante 3 im sanierten Zustand	57
Tabelle 15 Ergebnisse Variante 4 im Vergleich.....	59
Tabelle 16 errechneter Heizwärmebedarf und Messwerte im Vergleich.....	61

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

DOD	US Department of Defense
DOE	US Department of Energy
E+	EnergyPlus
HVAC	Heating Ventilation and Air-Conditioning
CFD	Computational Fluid Dynamics
PHPP	Passivhausprojektierungspaket
WP	Workpackage
OG	Obergeschoss
UG	Untergeschoss
DG	Dachgeschoss
EG	Erdgeschoss
EBF	Energiebezugsfläche
DB	DesignBuilder
EMS	Energy Management System
Stb.	Stahlbeton
HB	Holzbalken
T	Temperatur (in °C wenn nicht anders angegeben)
T-Verluste	Transmissionsverluste
V-Verluste	Lüftungsverluste
IWG	Interne Wärmegewinne
usw.	und so weiter
bzw.	beziehungsweise
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

EINLEITUNG

Bauen ist eine der elementarsten Tätigkeiten der Menschheit und begleitet Menschen aller Kulturen. Vom Bau der ersten Behausung bis zu den Wolkenkratzern der heutigen Zeit vollzog sich eine beeindruckende Entwicklung, in deren Folge sich die an Gebäude gestellten Ansprüche veränderten. Die ursprüngliche Schutzfunktion vor Wind und Wetter erweiterte sich um Charakteristika wie Prestige, Komfort oder Individualität.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels müssen diese Eigenschaften um das Kriterium der Nachhaltigkeit ergänzt und klassische Bauformen aus einem neuen Blickwinkel betrachtet werden. In keinem anderen Bereich in Europa wird soviel Energie verbraucht wie im Gebäudesektor [14]. Gleichzeitig ist er von elementarer Präsenz, denn ob in der Mietwohnung, im Eigenheim oder in öffentlichen Einrichtungen, wir verbringen 90% unserer Zeit in Gebäuden [15]. Wie die steigende Zahl der Neubauten im Passivhausstandard zeigt, gewinnt nachhaltiges Bauen bereits an Bedeutung. Doch auch im Bestand muss diese Idee verfolgt werden, da Bestandsgebäude nicht nur einen erhöhten Energieverbrauch aufweisen sondern gleichzeitig den Großteil der insgesamt vorhandenen Bausubstanz in Deutschland darstellen [16]. Die verbreitetste Maßnahme zur Energieeinsparung bildet das Anbringen eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) an der Außenfassade. Dies ist jedoch bei 40% der Gebäude nicht möglich [17]. Gründe dafür ergeben sich aus dem Wunsch hochwertige Naturstein- oder Ziegelfassaden zu erhalten oder aus Richtlinien des Denkmal- und Ensembleschutzes. Besonders im Bereich der Denkmalsanierung, in dem neben der energetischen Optimierung vor allem der Erhalt der Bausubstanz in ihrer ursprünglichen Form im Vordergrund steht, sind Lösungsansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz noch nicht ausreichend erprobt. Das europäische Projekt 3ENCULT will hier Abhilfe schaffen und anhand von Referenzobjekten Lösungsmethoden erarbeiten. Eines dieser Objekte ist die in dieser Arbeit vorgestellte Gründerzeitvilla im Dresdner Stadtteil Blasewitz. Das 1870 erbaute Gebäude ist Bestandteil der Fallstudie Nr.6 und wurde im Jahr 2009 saniert. Zusätzlich zur Analyse bautechnischer Möglichkeiten werden in den einzelnen Studien auch Werkzeuge der Langzeitüberwachung, Evaluierung und Berechnung untersucht. Insbesondere in letzterem Bereich existiert eine Vielzahl an Programmen, welche aufgrund ihrer unterschiedlichen Rechenmodelle jedoch schwer vergleichbar sind. Das Ziel dieser Arbeit besteht daher in der Untersuchung zwei solcher Modelle. Zum einen handelt es sich um das Passivhausprojektierungspaket, welches speziell für die Berechnung von Passivhäusern entwickelt wurde, zum anderen um das Programm EnergyPlus. Während ersteres seine

Ergebnisse über ein Ein-Zonen-Modell und im Monatsverfahren ermittelt, führt das zweite eine dynamische Simulation an einem 3D Modell durch. Beide Ansätze sind somit grundverschieden und die vorliegende Arbeit soll neben den wesentlichen Unterschieden auch die daraus resultierenden Stärken und Schwächen aufzeigen. Die zur Analyse der Rechenmodelle notwendigen Simulationen werden beispielhaft an der Dresdner Gründerzeitvilla durchgeführt, wobei der energetische Zustand sowohl vor als auch nach der Sanierung ermittelt wird. Neben der Beschreibung programmspezifischer Eigenschaften bei der Erstellung der Simulationen und der Beurteilung der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen, dient dieser Schritt der Erarbeitung eines Grundmodelles, welches den Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen darstellt. In Kapitel 4 werden anschließend einzelne Parameter der Simulation variiert, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu analysieren. Zusätzlich werden die gewonnenen Werte mit im Gebäude erhobenen Messdaten verglichen.

Das vereinfachte Rechenverfahren des Passivhausprojektierungspaketes nutzt eine Vielzahl von aus Messwerten gewonnenen Faktoren, deren Entstehung und Verwendung für Anwender schwer nachvollziehbar sind, sodass sich die Frage stellt, ob es unter identischen Randbedingungen möglich ist, die Ergebnisse des Paketes mit einem anderen Programm zu reproduzieren. Nicht zuletzt soll geklärt werden, ob sich das Projektierungspaket überhaupt zur Berechnung von Gebäuden eignet, deren Energieverbrauch weit über den für Passivhäuser üblichen Werten liegt.

Im Rahmen des Doppeldiplomstudiums an der Technischen Universität Dresden und der École supérieure des Travaux Publiques (ESTP) in Paris, enthält die vorliegende Arbeit eine gekürzte Fassung in französischer Sprache. Diese befindet sich im fünften Kapitel.

1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Programme zur Gebäudesimulation, EnergyPlus und Passivhausprojektierungspaket, geben. Dabei wird neben der geschichtlichen Entwicklung und deren Hintergrund auch auf die Funktionsweise der Programme eingegangen. Ein weiterer Abschnitt widmet sich dem Programm DesignBuilder, dessen Verwendung für die Simulation mit EnergyPlus notwendig war.

1.1 ENERGYPLUS

Das Simulationswerkzeug EnergyPlus [1] basiert größtenteils auf den Programmen BLAST und DOE-2. Beide existierten schon vor dessen Entstehung über 20 Jahre nebeneinander und wurden weltweit genutzt. BLAST ist die Entwicklung vom US Department of Defense (DOD) und geht zurück auf das NBSLD Programm, welches das US National Bureau of Standards (heute NIST) in den frühen 1970ern entwickelte, während DOE-2 vom US Department of Energy (DOE) stammt. Seine Anfänge liegen im Post Office Programm, welches bereits in den späten 1960ern durch das US Post Office entstand. Im Gegensatz zu BLAST berechnet DOE-2 die Lasten im Gebäude über den Raumwichtungsfaktor (Room Weighting Factor) und nicht über den Wärmebilanzansatz (Heat Balance Approach), was den Hauptunterschied zwischen beiden bildet. Je nach Fall liefert entweder das eine oder das andere Programm genauere Ergebnisse. Die Gemeinsamkeit beider besteht in der Weiterentwicklung ihres Quellcodes über mehrere Jahrzehnte durch verschiedene Autoren, sodass sie beständig umfangreicher und damit auch unübersichtlicher wurden. Die Arbeit am Quellcode erfordert daher sehr gut ausgebildetes Personal, Zeit und vor allem Geld, was die Frage aufwarf, ob weiterhin beide Programme nebeneinander erhalten bleiben sollten. Die Antwort war ein ab 1994 stattfindender und vom DOD gesponserter Workshop, welcher die Möglichkeiten zur Zusammenlegung von BLAST und DOE-2 ausloten sollte. Obwohl dieser anfänglich ohne Ergebnis blieb, beendete das DOD 1995 die Unterstützung für BLAST. 1996 begann das DOE unter Beteiligung der US Army Construction Engineering Research Laboratories (CERL), der University of Illinois (UI), des Lawrence Berkely National Laboratory (LBNL) sowie der Oklahoma State University (OSU) und GARD Analytics mit der Entwicklung eines neuen Programmes namens EnergyPlus (E+). Im Frühjahr 1998 erschien die letzte Version von BLAST und ebenso die letzte vom DOE geförderte Version von DOE-2. Noch im Dezember des gleichen Jahres war die Alpha Version von EnergyPlus bereit für den internen Test. E+ wurde zwar komplett neu in Fortran 90 geschrieben, nutzt jedoch Ressourcen aus BLAST und DOE-2, wodurch seine Entwicklung

schneller und günstiger war als eine Zusammenlegung beider Programme. Die modulare, strukturierte Form des Quellcodes ermöglicht dabei zugleich eine einfache Bearbeitung als auch Erweiterung des Codes. Als Ein- und Ausgabeformat dienen ASCII Textdateien, was ebenfalls eine Vereinfachung im Vergleich zu BLAST und DOE-2 darstellt. Da es sich bei E+ um einen reinen Rechenkern handelt, gibt es keine graphische Benutzeroberfläche. Die Möglichkeit Eingabeoberflächen und weitere Programmwerkzeuge anderweitig zu entwickeln wurde jedoch offengelassen. Nach der Freigabe der Testversion für fremde Entwickler im Mai 1999, wurde Ende desselben Jahres die Beta Version für potentielle Nutzer veröffentlicht.

Schwerpunkt bei der Entwicklung war neben der übersichtlichen Quellcodestruktur, welche eine einfache Erweiterung sowie Verbindung zu anderen Programmen ermöglicht, die Implementierung einer integrierten Simulation von Lasten und Systemen. Dies ist besonders für den Planer interessant, um bereits während des Planungsprozesses möglichst detaillierte Informationen zu erhalten. Die Simulation erfolgt in bestimmten Zeitintervallen, welche sowohl selbstständig gewählt als auch als voreingestellt mit 15-Minuten-Schritten übernommen werden können. Bei der integrierten Simulation werden die berechneten Lasten eines Zeitschrittes für den entsprechend gleichen Zeitschritt direkt an das Gebäudesimulationsmodul übergeben, welches basierend auf dieser Angabe zum Beispiel den Heizbedarf berechnet. Lasten und System sind somit miteinander verbunden. Des Weiteren verfügt EnergyPlus über Werkzeuge zur Abbildung diverser Heizungs- und Kühlsysteme, Schimmel Ad- und Desorption sowie Interzonenlüftung und realistische Systemkontrolle [1].

Aufbau

Grundlegend besteht EnergyPlus aus drei Komponenten: dem Simulationsmanager, dem Zonenbilanzierungsmodul und der Anlagenmodellierung. Ersterer kontrolliert den Ablauf der Simulation und überwacht dabei insbesondere die Kommunikation der Simulationsschleifen sowohl in den vom Nutzer festgelegten Zeitschritten als auch während des gesamten Simulationszeitraumes. Er ermöglicht einen kontrollierten Datenzugang und einfache Erweiterung, da er ein in sich geschlossenes und aus objektbasierten Modulen aufgebautes Element bildet, wobei die Hauptschleifen wiederum in einem Modul zusammengefasst sind.

Die zweite Komponente, das Zonenbilanzierungsmodul, stammt von IBLAST, welches eine Entwicklungsvariante von BLAST mit integriertem HVAC¹ System und Lastensimulation darstellt. Es erfüllt die Aufgabe der thermischen Zonenberechnung mit der wichtigen Eigenschaft, dass

¹ HVAC: kurz für Heating Ventilation und Air Conditioning, entspricht HKL (Heizung, Kühlung, Lüftung)

Luft in jeder Raumzone als durchmischt aber mit einheitlicher Temperatur modelliert werden kann. Dies ist physikalisch jedoch nicht korrekt. Eine Alternative dazu stellt die Berechnung mit Hilfe der Computational Fluid Dynamics (CFD) dar, welche allerdings eine komplexe und somit rechenintensive Simulation erfordern. Aufgrund der einfachen Erweiterbarkeit besteht die Möglichkeit in der Zukunft neu entwickelte, bessere Modelle in E+ zu integrieren. Neben dem BLAST basierten Zonenbilanzierungsmodul kommen weitere Module auf der Grundlage von DOE-2 zum Einsatz. Zu diesen gehören unter anderem Werkzeuge für Betrachtungen zum Tageslicht und zum anisotropischen Himmel sowie für Fensterberechnungen nach WINDOW ². Außerdem wurden Sonnenschutzeinrichtungen von BLAST und Berechnungen zur Wärmeleitungsübertragung von IBLAST eingefügt. Im verwendeten Wärmeausgleichsmodell wird neben uniformen Oberflächentemperaturen auch von einer identischen lang- und kurzwelligigen Strahlung ausgegangen. Weitere Hauptannahmen sind diffuse Strahlungsoberflächen sowie eindimensionale Wärmeleitung. Somit erfüllt die in E+ verwendete Zonenbilanzierung die gleiche Funktion wie das ebenfalls von der UI entwickelte Loads Toolkit, welches im ASHRAE³ Research Project 987 Verwendung findet.

Das Anlagenmodul kontrolliert die Kommunikation zwischen Zonenbilanzierungsmodul, diversen HVAC Modulen und Schleifen. Die Überwachung der Interaktion und des Datenaustausches mit anderen Programmen wie TRNSYS, SPARK oder COMIS⁴ und die Kontrolle der Ein- und Ausgabedatenstrukturen des HVAC Moduls gehören ebenfalls zu seinen Aufgaben. Die Abbildung der nächsten Seite zeigt in einer Übersicht die Verknüpfung der Systemkomponenten.

Funktionsweise

Ist die Simulation eines bestimmten Zeitschrittes durch das Zonenbilanzierungsmodul ausgeführt, wird die Anlagenmodellierung aufgerufen, welche die Berechnungen der Anlagentechnik (HVAC System) überprüft und die Luftbedingungen in der Zone kontrolliert. Es handelt sich wie bereits erwähnt um eine integrierte Simulation.

² WINDOW 4: Programm zur Durchführung thermischer Berechnung an Fenstern, LBNL 1994

³ ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, gegründet 1959

⁴ TRNSYS, SPARK und COMIS: 3 weitere Programme zur Gebäudesimulation

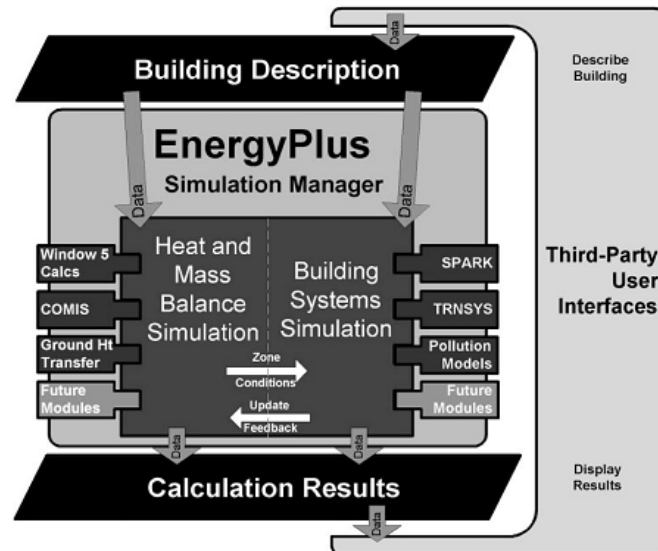


Abbildung 1 Überblick Programmstruktur von EnergyPlus [1]

Um Rohrnetze abzubilden, werden in der Gebäudesimulation Schleifen (Loops) genutzt. Dies betrifft vorwiegend Luft- und Wasserschleifen sowie Schleifen für HVAC. Der Air Loop im E+ folgt dabei einem iterativen Lösungsansatz, welcher auch die Ermittlung unbekannter Festwerte erlaubt, während er in DOE-2 und BLAST als "single pass", d.h. mit nur einem Durchlauf, arbeitet. Die Elemente der technischen Gebäudeausrüstung werden anschließend über Knoten mit der Schleife verbunden, wobei jeder Knoten eine eindeutige Identifikationsnummer aufweist und an einer Schlüsselposition definiert sein muss. Über den Knoten werden Variablen der Schleife und Set Point Informationen zur Lokalisierung der Schleife gespeichert. Das HVAC-System wird über eine primäre Schleife für Versorgungselemente und eine sekundäre Schleife für, zum Beispiel, Wärmerückgewinnung abgedeckt.

EnergyPlus macht dabei keine Einschränkung bezüglich der Systeme und der Nutzer kann die Eingabevorlagen für die wichtigsten Systemtypen in BLAST und DOE-2 als Ausgangspunkt für von den Voreinstellungen abweichende selbstgewählte Einstellungen nutzen.

Wie bereits erwähnt, ermöglicht E+ den Datenaustausch mit dem rechenbasierten Programm SPARK. Dieses kann bessere Lösungen für komplexe iterative Probleme bieten und enthält eine Bibliothek von HVAC-Komponenten auf der Grundlage der ASHREA Toolkits. Über eine Verbindung zum Programm TRNSYS können zudem auch solar thermische Simulationsmodelle genutzt werden. Es enthält außerdem Module zur Berechnung der technischen Gebäudeausrüstung, insbesondere der Photovoltaik.

Ein- und Ausgabe

Während die Eingabe in BLAST und DOE-2 durchstrukturiert und lesbar für den Nutzer erfolgt, erscheint die E+ Eingabedatei kryptisch. Im Vergleich zu erstgenannten muss die Eingabedatei alle Informationen in expliziter Form enthalten. Die Syntax spielt dabei keine Rolle, da beim Programmdurchlauf automatisch mit einem Eingabedatenwörterbuch abgeglichen wird. Insgesamt entsteht eine große Datenmenge, deren Inhalt durch Kommata getrennt wird. In nachfolgendem Beispiel wird die Eingabe näher erläutert:

LOCATION, A1[Location Name], N1[Latitude], N2[Longitude], N3[TimeZone], N4[Elevation];

An erster Stelle befindet sich das "Object", der vordefinierte Name einer Gebäudekomponente, wie zum Beispiel SURFACE oder MATERIAL. Im Anschluss folgen Eigenschaften und Beschreibungen. In diesem Fall folgt mit A1 ein Textfeld, dann vier numerische Angaben, wobei sich in den eckigen Klammern Hinweise zu Variablen und Einheiten befinden. Beendet wird die Eingabe durch ein Semikolon.

Eine besondere Eingabe bilden die Wetterdaten. Bereits vorhandene Datensätze stammen dabei aus dem TMY2⁵, wobei die ersten acht Zeilen allgemeine Informationen zum Standort der Klimastation enthalten. E+ braucht nicht die vollständigen Jahresdaten und liest neben Teilstücken von Jahren (Subsets) auch unterstündliche Daten ein. Zudem gibt es eine Komponente mit welcher weitere Standardwetterdateien eingelesen werden können.

Im Hinblick auf die Ausgabe bietet EnergyPlus neben Standardformaten auch visuelle, wie zum Beispiel das DXF-Format, an. Aufgrund der Einfachheit der Struktur ist das Bearbeiten der Ausgabedaten in Postprozessoren möglich, um höherwertige Berichte und Übersichten zu erstellen.

Überprüfung und Vergleiche

Bevor ein neuentwickeltes Programm auf den Markt kommt, durchläuft es eine Testphase. In dieser werden durchgehende Versuche auf verschiedenen Ebenen durchgeführt. Neben dem komparativen Test, bei dem die Algorithmen zur Ermittlung der Lasten mit den ASHRAE

⁵ TMY2: typical meteorological year, Wetterdaten eines typischen Jahres für die USA (vgl. test reference year, TRY), 2 steht für die Erweiterung mit Daten zur Solarstrahlung

Standard 140P Testserien⁶ verglichen wurden, erfolgte die analytische Untersuchung mit Hilfe des BEPAC Conduction Test⁷. Bei den 62 Beispielrechnungen des ASHRAE Standards ergaben sich 6 abweichende Simulationen [2], für einfache Fälle liefert E+ im Vergleich mit anderen Programmen gute Übereinstimmungen [1].

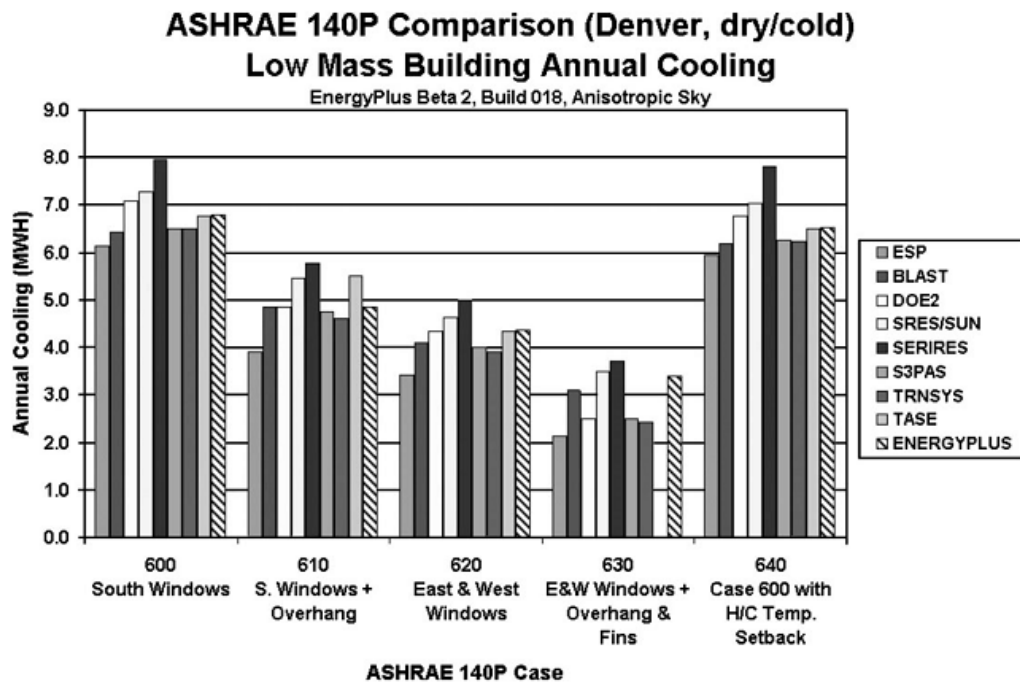


Abbildung 2 Auszug der Ergebnisse des ASHRAE 140P Case [1]

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für die Berechnung des jährlichen Kühlbedarfes der ASHRAE 140P Testserie in MWh. Dargestellt sind verschiedene Fenstersituationen am Standort Denver (USA): Fenster Süd, Fenster Süd mit Auskragung, Fenster Ost- und Westseite und Fenster Ost und West mit Auskragung und Fensterlamellen. Der fünfte Fall entspricht dem Fall Fenster Süd jedoch mit eingestellter Absenkttemperatur für Kühlung und Heizung. Insgesamt werden neun Gebäudesimulationsprogramme verglichen, unter ihnen auch BLAST, DOE-2 und EnergyPlus. Die Ergebnisse von E+ liegen dabei für jede der fünf abgebildeten Varianten zwischen den denen der andern Programme.

Ähnlich der ASHRAE Tests gibt auch die VDI 6020⁸ Mindestanforderungen an Rechenverfahren zur thermischen und energetischen Bewertung von Gebäuden an. Bei einer durchgeführten Analyse [2] wurde EnergyPlus mit dieser verglichen. Anhand von 13 Beispielfällen werden dazu

⁶ ASHRAE Standard 140P Testserie: standardisierte Methode zur Evaluation analytischer Gebäudesimulationsprogramme

⁷ BEPAC Conduction Test: ermittelt Leitungsfähigkeit verschiedener Materialien unterschiedlicher Dicken

⁸ VDI: Verbund Deutscher Ingenieure e.V., Publikation von Fachinformationen und Richtlinien

in Fall 1-7 die Raumreaktion auf innere Belastungen und Sollwertänderungen, in Fall 8-11 die solare Einstrahlung und in den letzten beiden Fällen die Ganzjahressimulation überprüft. Allerdings gelten die Ergebnisse der Richtlinie nur unter gegebenen Randbedingungen. Sie dienen neben der Fehlersuche, der Plausibilitäts- und Sensitivitätsanalyse [2]. Im ersten Testbereich, Raumreaktion auf innere Belastungen und Sollwertänderung, erzielte EnergyPlus in 17 Vergleichen 12 Abweichungen vom Referenzbereich anderer Programme. Dem Autor des Artikels [2] zufolge können die Simulationsergebnisse jedoch in allen Fällen an die Vergleichswerte durch die Änderung von Absorptions- und Emissionskoeffizienten für kurzwellige bzw. langwellige Strahlung der Materialien und die Nutzung eines veränderten Fenstermodells herangeführt werden. Der zweite Bereich überprüft in 40 Beispielen die Umrechnung der Solarstrahlung auf die Außenfläche. Hier zeigte E+ eine starke Reaktion auf das verwendete Fenstermodell, wobei die Ergebnisse über einen höheren g-Wert angepasst werden konnten [2]. In Bezug auf die Ganzjahressimulation liegt E+ im Vergleichsbereich. Insgesamt ergeben sich 28 Abweichungen in 60 Versuchen, womit die Differenz zur VDI 6020 größer ist als die zum ASHRAE Standard. Während die Randbedingungen in ASHRAE genau definiert werden, erfolgt dies nur unzureichend in der VDI 6020, sodass die Übereinstimmung der vom Nutzer gewählten Parameter mit den in der Richtlinie beabsichtigten Randbedingungen nicht sicher ist [2].

1.2 DESIGNBUILDER

Entwickelt wurde der DesignBuilder von der in Großbritannien ansässigen DesignBuilder Software Ltd, welche es sich zum Ziel gesetzt hat, qualitativ hochwertige und einfach zu bedienende Softwarelösungen für die Darstellung der energetischen Performance von Gebäuden zu entwickeln [3]. Das Unternehmen ist führender Anbieter bei der Überprüfung von Energieausweisen unter Einhaltung der nationalen Bauordnungen in Großbritannien, Frankreich, Irland und Portugal.

Der DesignBuilder ist ein Programm zur 3D-Modellierung von Gebäuden. Als er 2005 auf den Markt kam, stellte er die erste graphische Oberfläche für EnergyPlus dar. 2009 erschien eine zweite Version, welche den BIM⁹ Standard und eine mit E+ verknüpfte 3D CFD Berechnung beinhaltet. Die neueste Version ist seit 2011 verfügbar und bietet zusätzlich ein Werkzeug zur Tageslichtberechnung und eine Oberfläche für das HVAC-System in E+. Bis heute stellt der DesignBuilder eines der wichtigsten Eingabewerkzeuge für EnergyPlus dar.

⁹ BIM: Building Information Modelling, Methode zur Erstellung von Gebäudemodellen

1.3 PASSIVHAUSPROJEKTIERUNGSPAKET

Das Passivhausprojektierungspaket (PHPP) ist ein speziell vom Passivhaus Institut entwickeltes Simulationswerkzeug für Passivhäuser. Es basiert auf einem Tabellenkalkulationsprogramm (Excel oder Ähnliche) und liefert daher sofortige Ergebnisse, was den Vergleich verschiedener Varianten ohne großen Aufwand ermöglicht [4].

Das erste anerkannte Passivhaus in Deutschland befindet sich in Darmstadt-Kranichstein. Als es 1991 errichtet wurde, standen nur aufwendige instationäre Simulationsprogramme zur Verfügung und die bestehenden Normen und Verordnungen erwiesen sich als zu ungenau, um ein Gebäude mit solch niedrigem Energieverbrauch abzubilden [5], was die Notwendigkeit eines neuen Rechenmodells begründete. Bereits Mitte der 1980er Jahre beschrieb Conrad U. Brunner ein jahreszeitliches Energiebilanzverfahren, welches 1988 durch eine Empfehlung in der SIA¹⁰ 380/1 "Energie im Hochbau" als Verfahren in der Schweiz anerkannt wurde und später am Institut für Wohnen und Umwelt¹¹ vor allem durch Wolfgang Feist, Witta Ebel und Tobias Loga weiterentwickelt wurde. Ziel war die Entwicklung eines Modells, das mit geringem Aufwand für die Datenaufnahme und zuverlässiger Bilanzierung mit einer für praktische Planungszwecke ausreichenden Genauigkeit arbeitet. Neben dem eben erwähnten jahreszeitlichen Energiebilanzverfahren wurde noch ein anderes Computermodell zur Projektierung des ersten Passivhauses genutzt. Dieses benötigte 2000 unabhängige Eingabedaten (ohne den Klimadatensatz), deren korrekte Eingabe notwendig war, um die Geometrie des Gebäudes zu erfassen. Dass dies prinzipiell möglich ist, verdeutlicht nachfolgende Graphik, welche errechnete Werte des Simulationsprogrammes DYNBIL im Vergleich mit Messungen zeigt.

¹⁰ SIA: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Publikation von Fachinformationen

¹¹ Institut für Wohnen und Umwelt (IWU): Durchführung von Grundlagenforschung zum Thema Wohnen, Sitz in Darmstadt

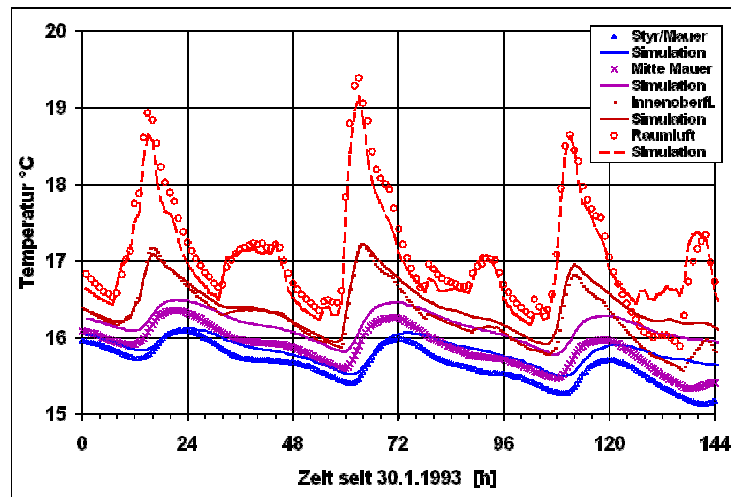


Abbildung 3 Vergleich Messwerte mit DYNBIL-Simulation [5]

Diese Herangehensweise ist allerdings mit großem Aufwand verbunden. Zudem weisen nicht alle Eingaben den gleichen Stellenwert auf, wobei selbst falsche Eingaben für sekundäre Angaben verfälschte Ergebnisse erzeugen können [6]. Durch den Vergleich verschiedener Simulationsprogramme wurde daher versucht die primär wichtigsten Größen herauszufiltern, welche in einem vereinfachten Modell zusammengeführt wurden. Dieses Modell bildet das gesamte Gebäude als eine Zone ab und nutzt ein monatliches Bilanzverfahren anstelle einer instationären Simulation. Die reduzierte Berechnung machte die Simulation zum einen einfacher überprüfbar und zum anderen weniger fehleranfällig. Im folgenden Entwicklungsverlauf wurde das Verfahren weiter an die Eigenschaften eines Passivhauses als Gebäude ohne separates Heizsystem angepasst. Die Kalibrierung erfolgte anhand von Simulationen instationär rechnender Programme, wobei nur Modelle, welche vorher an gebauten Passivhäusern validiert wurden, Verwendung fanden. 1998 erschien die erste Auflage des Passivhausprojektierungspaketes, welches mit einem stationären, jahreszeitlichen Energiebilanzverfahren ausreichend genaue Ergebnisse erzeugt [6]. Einen weiteren wichtigen Prüfstand bot das CEPHEUS¹² Projekt, welches im Rahmen der EU in den Ländern Deutschland, Frankreich, Österreich, Schweden und der Schweiz als Partner durchgeführt wurde [9]. An insgesamt 14 Standorten wurden Siedlungen und größere Wohngebäude im Passivhausstandard errichtet und wissenschaftlich begleitet. Durch einen Vergleich der in den Gebäuden durchgeführten Messungen mit den Berechnungen des PHPP konnte seine Eignung zur Auslegung von Passivhäusern erwiesen werden [10]. Mit dem in der Passivhaussiedlung Hannover gemessenen Stromverbrauch ergaben sich die internen Wärmequellen zu $2,13\text{W/m}^2$, was den Ansatz für des im Projektierungspaket verwendeten Wertes von $2,1\text{W/m}^2$ bestätigt. Desweiteren

¹² CEPHEUS: Cost Efficient Passive Houses as European Standards, Projekt Nr. BU/0127/97 [9]

sanken die in den Gebäuden ermittelten Raumtemperaturen nicht unter die vom PHPP verwendeten 20°C und lagen in den deutschen Projekten sogar um 21°C. Der Zusatzluftwechsel, welcher in der Vornorm der DIN 4108¹³ Teil 6 mit 0,2 h⁻¹ angegeben ist, konnte nicht beobachtet werden, sodass die Verwendung des PHPP Ansatzes empfohlen wird [10].

Das Projektierungspaket umfasst neben dem Rechenwerkzeug auch ein ausführliches Handbuch, welches sowohl Erläuterungen zum Projektierungsverfahren als auch Hinweise zum Bau von Passivhäusern gibt. Mit Hilfe des PHPP lassen sich Einzelelemente wie Bauteilaufbauten samt U-Wert, Fenster, Verschattung und Komfortlüftung projizieren. Außerdem können Heiz- und Kühllast sowie die gesamte Haustechnik mit Heizung, Warmwasseraufbereitung und Kühlgeräten ausgelegt werden.

Die verwendeten Rechenalgorithmen sind dabei mit kleinen Ausnahmen an der aktuellen internationalen Normung ausgerichtet [4]. Eine solche Ausnahme bildet die aufgrund des niedrigen Energiebedarfs eines Passivhauses veränderte asymptotische Formel des Ausnutzungsgrades. Die Randbedingungen sind ebenfalls speziell abgestimmt und weichen gegebenenfalls von der aktuellen Normung, der EnEV¹⁴, ab [7]. Die internen Wärmegewinne in der Heizperiode werden auf 2,1W/m² gesenkt, da ein zu hoher Wert rechnerisch zu einem Nullheizenergiehaus führen kann, während die mittlere Innenraumtemperatur von 19°C auf 20°C erhöht wird. Desweiteren gibt es Ansätze für die Abbildung verschmutzter Außenflächen und realistischer Verschattungsfaktoren bei der Berechnung der solaren Gewinne. Die meist zu niedrigen Temperaturfaktoren wurden ebenfalls korrigiert. Der von der EnEV verwendete Wert für die zusätzliche Luftwechselrate infolge von Undichtheiten und Fensteröffnung wird als zu hoch eingestuft, da als Ausgangspunkt die erreichte Luftdichtheit und somit der n₅₀-Wert verwendet werden soll.

Mittlerweile ist ein steigendes Interesse an Passivhäusern zu verzeichnen und sie bilden einen nennenswerten Anteil am Neubauvolumen in Deutschland, Österreich und Norditalien [6]. Daneben gibt es Pilotprojekte in den USA, Südkorea und China. Auf dieses Interesse und die zunehmende Verbreitung reagierte das Passivhaus Institut, indem es das Projektierungspaket erweiterte. Um es für jeden Standort und jedes Klima einsetzbar zu machen, wurden Orientierung, Verschattung und Wärmeverluste ans Erdreich umgestaltet sowie ein Rechenalgorithmus für eine hocheffiziente, aktive Kühlung eingefügt. Außerdem erfolgte die

¹³ DIN 4108: Norm zum Wärmeschutz im Hochbau, herausgegeben durch das Deutsche Institut für Normung e.V.

¹⁴ EnEV: Energieeinsparverordnung der Bundesrepublik Deutschland

Validierung der Berechnungsalgorithmen für den Kühl- und Entfeuchtungsbedarf in heißen und tropischen Klimazonen.

Ein- und Ausgabe

Über eine Auswahl an thematischen Tabellenblättern im Projektierungspaket erfolgen die Eingaben in direkter Art und Weise. Die Ausgaben sind sofort ersichtlich und werden aus den einzelnen Reitern zusätzlich in einer Übersicht zusammengestellt. Wesentliche Angaben sind dabei der jährliche Heizwärmebedarf und die maximale Heizlast sowie der jährliche Primärenergiebedarf. Für den Sommerkomfort bei aktiver Kühlung kommen außerdem der jährliche Kühlbedarf und die maximale Kühllast, bei passiver Kühlung die Übertemperaturhäufigkeit hinzu. Des Weiteren kann ein Nachweis für die Förderung von Passivhäusern und ein vereinfachter EnEV Nachweis ausgegeben werden.

Rahmenbedingungen des PHPP

Laut den Zertifizierungskriterien des Passivhaus Institutes für Gebäude mit Wohnnutzung [8] darf in einem Passivhaus entweder der Energiekennwert der Heizwärme bei maximal $15\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ oder die Heizwärmelast bei maximal $10\text{W}/\text{m}^2$ liegen. Für den Kühlbedarf ergeben sich maximal $15\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a}) + 0,3\text{W}/(\text{m}^2\text{aK}) \cdot \text{TGH}$ oder eine Kühllast von maximal $10\text{W}/\text{m}^2$ und ein Kühlbedarf mit $4\text{kWh}/(\text{m}^2\text{aK}) \cdot \theta_e + 1 \cdot 0,3\text{W}/(\text{m}^2\text{aK}) \cdot \text{TGH} - 75\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ jedoch höchstens $45\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a}) + 0,3 \cdot \text{TGH}$. Dabei entspricht θ_e der Außentemperatur im Jahresmittel in $^{\circ}\text{C}$ und TGH den Trockengradstunden, also dem Zeitintegral der Differenz von Taupunkttemperatur und einer Bezugstemperatur von 13°C , über alle Zeiträume, in denen diese Differenz positiv ist. Die Teilanforderung an die Entfeuchtung wird durch den Term " $0,3\text{W}/(\text{m}^2\text{aK}) \cdot \text{TGH}$ " beschrieben. Des Weiteren darf der Druckluftwechsel n_{50} höchstens bei $0,6\text{ h}^{-1}$ liegen. Die Höchstgrenze des Energiekennwertes des gesamten Primärenergiebedarfs für Heizen, Kühlen, Trinkwarmwasser, Hilfs-, Haushalts- und Gemeinstrom ist mit $120\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ angegeben.

2 GEBÄUDE UND PROJEKT

In diesem Kapitel wird das in dieser Arbeit verwendete Gebäude näher vorgestellt. Die an ihm erfolgten Untersuchungen finden im Rahmen des europäischen Projektes 3ENCULT statt, auf welches zunächst eingegangen wird.

2.1 DAS PROJEKT 3ENCULT



Hinter dem Akronym 3ENCULT verbirgt sich der offizielle Name "Efficient Energy for EU Cultural Heritage". Dieses Projekt mit der Nummer 260162 läuft von Oktober 2010 bis April 2014 mit dem Ziel Lösungen für die Sanierung europäischer Baudenkmäler zu entwickeln und aufzuzeigen.¹⁵

Historische Gebäude gelten, wie in [11] erläutert, als das Kennzeichen europäischer Städte und vereinen sowohl kulturelles Erbe als auch gesellschaftliche Identität. Vor dem Hintergrund des Klimawandels stellt sich die Frage nach dem Erhalt dieser Bausubstanz nun völlig neu, denn der Energieverbrauch in historischen Gebäuden ist sehr hoch. Gleichzeitig können sie aber nur bestehen wenn sie weiterhin als Wohnraum erhalten bleiben [11], was eine Reihe geführter Beispiele von Sanierungsarbeiten in diesem Feld notwendig macht. Das Projekt 3ENCULT will mit Hilfe von Beispielgebäuden eine solche Referenz erstellen. In Abhängigkeit der Randbedingungen soll eine Reduzierung des Energieverbrauchs von Faktor 4 bis Faktor 10, d.h. auf ein Viertel bzw. Zehntel des Ausgangswertes, machbar sein. Die energieeffiziente Nachrüstung soll zudem die Konstruktion schützen und den Komfort der Bewohner erhöhen. Am Projekt beteiligt sind neben Wissenschaftlern verschiedener Universitäten auch Interessensgemeinschaften, welche vorwiegend aus dem Mittelstand kommen und deren Tätigkeitsfelder von Bauphysik über Nachhaltigkeit, Architektur, Diagnose von Schäden und Sanierung bis hin zu Regelungstechnik reichen.

Unterschiedliche Teams arbeiten unter Einbezug lokaler Denkmalschutzstellen und der Eigentümer an insgesamt acht verschiedenen Fallstudien. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Entwicklung aktiver und passiver Lösungen unter Verwendung vorhandener Produkte und

¹⁵ nebenstehende Abbildung: Logo 3ENCULT [11]

Neuentwicklungen der beteiligten Unternehmen. Zudem sollen Diagnoseverfahren und Monitoring, Langzeitüberwachung, Planungs- und Evaluierungswerkzeuge, Anwendungskonzepte und Maßnahmen zur Qualitätssicherung sowie Erfolgskontrollen zum Einsatz kommen.

Am Ende steht die Herausgabe von Standards (Position Papers) zur Eingliederung und Umsetzung in aktuellen Regelwerken. Diese umfassen die verbesserte Energieeffizienz denkmalgeschützter Gebäude in städtischen Räumen, die Bewertung des Umwelteinflusses sowie die Aalborg commitments¹⁶ und die Leipzig Charta¹⁷.

Arbeitsstruktur: Workpackages

Im Fokus dieses Projektes stehen zum einen sogenannte "Hard Facts", welche die Kennzahlen der Energieeffizienz beschreiben, und zum anderen die "Soft Systems", also Systeme zur intelligenten Gebäudeüberwachung und Messung. Ziel ist es neue Systeme und Technologien zu entwickeln und aufzuzeigen

Das Projekt ist in unterschiedliche Arbeitsabläufe, sogenannte Workpackages (WP), untergliedert. In der ersten Phase, dem WP 1 Management, wird die Organisation des Projektzusammenschlusses und ihrer Mitglieder untereinander geregelt. In Workpackage 2 erfolgt die Analyse und Diagnose der Gebäude auf verschiedenen Untersuchungsebenen mit dem Ziel wiederkehrende Elemente zu erkennen und daraus allgemeinen Zusammenhänge abzuleiten. Phase 3 und 4 unterstützen WP 2 indem sie sich sowohl mit den Hard Facts als auch mit den Soft Systems auseinandersetzen, welche im Fokus des Projektes liegen. Erstere beschreiben technische Lösungen zur Energieeinsparung in historischen Gebäuden in aktiver und passiver Form und finden sich in WP 3 wieder. Unter der Zielsetzung Energiekosten zu senken und den Nutzerkomfort zu erhöhen, beschäftigt sich WP 4 mit passivem und aktivem Monitoring sowie Steuerungssystemen für Diagnose, Beurteilung und Management des Gebäudes, welche den zweiten Bereich der Soft Systems abdecken. Die Beschreibung und Vorstellung der entwickelten Ansätze erfolgt anschließend in WP 5. Workpackage 6 startet mit Projektausführung, ermöglicht jedoch eine Rückkopplung auf die in Phase 3 und 4 entwickelten theoretischen und experimentellen Lösungen und gibt ein Feedback über die in den einzelnen Fallstudien angewendeten Überwachungs- und Steuerungssysteme. Die Zielsetzung von WP 7 ist die Aufbereitung und Weitergabe der aus den vorherigen Phasen erarbeiteten Informationen

¹⁶ Aalborg Commitments: Charta zur Stärkung nachhaltiger Entwicklung in Städten, 1994 [20]

¹⁷ Leipzig Charta: Charta zur Umsetzung europäischer Stadtentwicklungspolitik, 2007 [21]

an die Eigentümer und die Erstellung eines internationalen Zertifizierungsschemas, um die Qualität der Ausführung zu sichern und gleichzeitig Transparenz auf dem Markt herzustellen.

Abschließend sollen die Qualitätssicherungsmethoden, Projektierungswerkzeuge und bautechnischen Verfahren, welche sich im Versuch bewährt haben, eine Grundlage für die Aufnahme der Thematik in Normen und Richtlinien schaffen. Dies betrifft zum Beispiel die EU-Gebäuderichtlinie.

WP 8 widmet sich der Verbreitung weiterer Ergebnisse, welche für die drei Bereiche Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft eine Rolle spielen. Insbesondere wird auf Gebäudetechnik und Materialwissenschaft, den Immobilienfinanzierungsmarkt, gesellschaftliches Umdenken und den Einbezug der Regierungen eingegangen, um mit innovativen Ansätzen sowohl einen Beitrag zum europäischen Energie- und Klimapaket als auch zum wirtschaftlichen Aufschwung zu leisten und den Austausch in diesem Gebiet zu vereinfachen. Nachstehende Graphik zeigt eine Zusammenstellung der Workpackages.

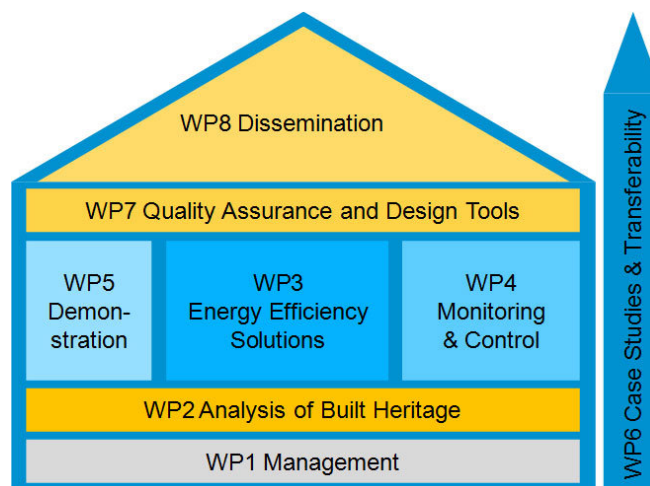


Abbildung 4 Übersicht Workpackages [11]

Workpackage 6 - Fallstudien und Übertragbarkeit

Die Zusammenstellung der Fallstudien erfolgte auf Grundlage der Parameter Klima, Nutzung, Erbauungsepoche und Denkmalaufgaben. Desweiteren spielen der Bedarfs- bzw. Planungsstatus der zu erfolgenden Maßnahme sowie der dafür vorgesehene Zeitplan eine Rolle.

Folgende Fallstudien wurden festgelegt:

- Case Study 1: Public Weigh House, Bozen
- Case Study 2: Palazzo d'Accursio, Bologna
- Case Study 3: Palazzina della Viola, Bologna
- Case Study 4: The Material Court of the Fortress, Copenhagen
- Case Study 5: Monumental School, Innsbruck
- Case Study 6: Warehouse City Potsdam and other, Germany
- Case Study 7: Industrial Engineering School, Salamanca
- Case Study 8: Strickbau Appenzell, Switzerland

Die in dieser Arbeit als Beispielgebäude dienende Gründerzeitvilla ist in der Fallstudie Nr. 6 "Hafenstadt Potsdam und andere" enthalten.

Wie in Abbildung 5 dargestellt beinhaltet die Arbeit an den Fallstudien unter anderem die Erstellung eines Anwendungs- und Überwachungsschemas, eine ausführliche Diagnose mit Blick auf Energieeinsparung und Erhalt der ursprünglichen Substanz sowie die Unterstützung der Entwicklungs- und Planungsphase. Außerdem, den Test ausgewählter 3ENCULT Produkte und Werkzeuge sowie die Dokumentation des Zustandes sowohl vor als auch nach der Sanierung. Um die Anwendung in der städtischen Raumplanung und in Klimaplänen zu unterstützen, werden die Ergebnisse für Gemeinden und Städte zusammengefasst. Masterstudenten der Technischen Universität Dresden untersuchen zudem exemplarisch die Anwendung der Ergebnisse auf andere Gebäude und Stadtviertel.

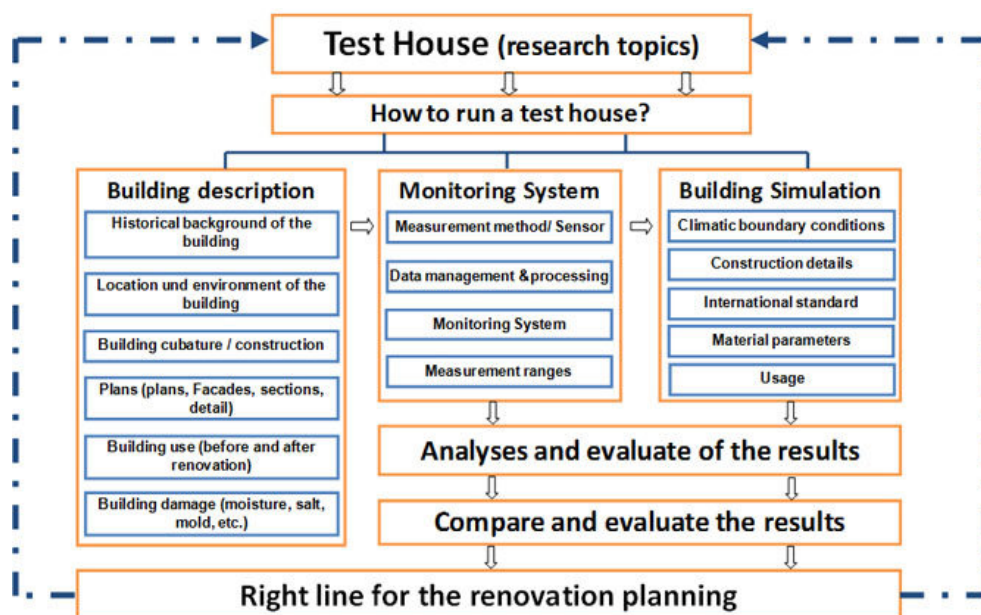


Abbildung 5 Arbeitsverfahren Fallstudie [11]

Die Durchführung des Projektes und der beinhalteten Maßnahmen wird von sogenannten "Local Case Study Teams" begleitet. Diese arbeiten mit dem jeweiligen Partner von 3ENCULT zusammen, um zum einen die Unterstützung aller lokaler Parteien und zum anderen die Vereinbarkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen mit örtlichen Denkmalregelungen und Bedürfnissen der Eigentümer sicherzustellen.

Die Case Study Teams setzen sich aus dem Eigentümer des Gebäudes, Vertretern der Denkmalbehörde sowie anderer lokaler Stellen, Sponsoren und Vertretern der an der Sanierung beteiligten Gewerke zusammen. Nach Möglichkeit kommt noch ein Vertreter einer öffentlichen Denkmalgesellschaft hinzu. Der für die Fallstudie verantwortliche 3ENCULT Partner ist gleichzeitig der Verantwortliche für die Zusammensetzung und Einbindung des lokalen Case Study Teams.

Im Fall des Beispielgebäudes dieser Arbeit fungiert die Firma Remmers als Projektpartner von 3ENCULT. Das 1949 durch Bernhard Remmers gegründete Unternehmen ist unter anderem auf Bautenschutz und Instandhaltung spezialisiert und entwickelte eine neuartige Innendämmung namens iQ Therm [12], welche in der Gründerzeitvilla zum Einsatz kommt. Diese PUR-Hartschaumplatte mit mineralischer Füllung besitzt einen Wärmeleitwert von $\lambda=0,031 \text{ W/mK}$. Zudem sind sie dampfdiffusionsoffen und kapillaraktiv, wobei letztere Eigenschaft auf senkrecht zur Plattenoberfläche verlaufende und mit silikatischem Mörtel verfüllten Lochungen beruht [17]. Ausführlichere Produktinformationen zu iQ Therm befinden sich im Anhang. Die Befestigung der Platten erfolgt mithilfe von iQ Fix, einem hydraulisch abbindenden Ansetzmörtel, durch Verkleben auf dem Untergrund. Abschließend wird mit iQ Top verputzt. Alle drei genannten Komponenten entstammen dem Hause Remmers.

Als Bestandteil des Case Study Teams begleitete das Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden ebenfalls die Sanierungsarbeiten an der Gründerzeitvilla. Mit dem Ziel eine Langzeitmessung durchzuführen, wurden an besonders kritischen Stellen am Gebäude Sensoren angebracht. Diese sollen die Funktionstüchtigkeit des Innendämmsystems überprüfen, denn obwohl es bereits seit einigen Jahren erfolgreich auf dem Markt ist, wurde bisher kein praktischer Nachweis erbracht [17].

2.2 INFORMATIONEN ZUM GEBÄUDE



Abbildung 6 Ansicht Nord, Sept. 2013

Bei dem Gebäude handelt es sich um eine Villa im Dresdner Stadtteil Blasewitz. Während der Gründerzeit wurden dort sehr viele Villen gebaut, sodass Blasewitz den Beinamen Villenvorort Dresdens erhielt. Die Villa liegt an der Loschwitzer Straße und grenzt südlich an den Waldpark, welcher ebenfalls in dieser Zeit entstand, an.

Nebensiehende Fotografie zeigt das Gebäude nach der Sanierung. Die Aufnahme entstand vom Waldpark aus.

GESCHICHTE DES GEBÄUDES

Laut Schätzung des Architekturbüros wurde das Objekt in den 1870er Jahren errichtet und war ursprünglich für eine einzige Familie konzipiert. Im Obergeschoss (OG) befanden sich drei herrschaftliche Repräsentationsräume, während im Untergeschoss (UG) Wirtschaftsräume und im Dachgeschoss (DG) Kammern vorgesehen waren. Das Erdgeschoss (EG) kennzeichnete sich durch drei straßenseitig angeordnete Räume aus, welche durch eine für die damalige Zeit typische Enfilade¹⁸ verbunden waren. Um 1912 erfolgte ein erster Umbau, der die Nutzung des Gebäudes für zwei Parteien ermöglichte. In den 1980er Jahren waren das Erdgeschoss, erstes und zweites Dachgeschoss sowie teilweise das Untergeschoss bewohnt während sich im Obergeschoss die Räumlichkeiten der Firma Pentacon¹⁹ befanden. Nach der politischen Wende 1989 erfolgten mehrere Eigentümerwechsel.

SANIERUNG

Zu Beginn der Sanierungsarbeiten im Jahre 2009 befand sich das Objekt in einem desolaten Zustand. Ausgebrochene Fenster und mittig auf der Fassade endende Fallrohre waren nur einige Indizien für viele im und am Haus begonnene aber unvollendete Sanierungen. Als Kontrast dazu fanden sich neben einem gut erhaltenen Tafelparkett, intakte Innentüren und

¹⁸ barockes Architekturmittel, Aneinanderreihung von Räumen zu einer Zimmerflucht

¹⁹ Unternehmen für Fotokameraherstellung in Dresden

Sandsteinwände. Diese und andere ursprüngliche Details wurden weitestgehend beibehalten und nur im Notfall ausgetauscht, was zum Beispiel das Parkett im EG betraf.

Neben dem Erhalt der Bausubstanz stand auch die energetische Nachhaltigkeit im Vordergrund, da auf lange Sicht bezahlbarer Wohnraum geschaffen werden sollte. Aufgrund der großen Geschossnutzfläche, wurde eine Wohneinheit pro Etage angeordnet. Die weitere Gebäudestruktur blieb jedoch unberührt, sodass historische Merkmale wie die großen Dielen und die vielen Zwischentüren auch weiterhin erhalten bleiben. Das teilweise bewohnte Untergeschoss wurde im Zuge der Sanierungsarbeiten vollständig zur Nutzung als Neben- und Lagerraum umgewandelt.

Die Deckenbalkenlage aus Holz und das Ziegelgewölbe im UG wurden durch eine Stahlbetondecke ersetzt, wobei die alten Balkenkopfaufleger der Herstellung wärmedämmter Auflagertaschen dienten. An der Deckenunterseite wurde zudem eine Wärmedämmung angebracht während im Bereich des Gewölbes mit einem für seine Dämmeigenschaften zertifizierten Leichtbeton gearbeitet wurde. Das bestehende Sandsteinmauerwerk blieb unverputzt. Ein vorgelagerter Luftschacht, welcher im Kellerbereich als Vertikalsperre diente, wurde instandgesetzt und gegebenenfalls ergänzt.

Im Dachgeschoss kam es zur Entkernung, was den Raumverbund zwischen 2. DG und dem Spitzboden ermöglichte. Neben der Ausbesserung des Dachstuhles erfolgte die Erneuerung der Dachhaut und Ergänzung des Dachaufbaues durch 210mm Zellulose- Einblasdämmung und eine 35mm starke HWF Platte²⁰. Die Dachterrasse wurde als abgehängte Wanne in die bestehende Konstruktion eingegliedert. Außerdem kam es zur Instandsetzung der alten Giebelanker und Blitzschutzfahnen. Die Schornsteinzüge wurden durch Versorgungsschächte ersetzt, wobei ein einzelner Zug instandgesetzt wurde, um den Einsatz von Feststofföfen als Zusatzheizung zu ermöglichen.

Die dekorativ gestaltete Fassade ist mit einer kapillaraktiven, diffusionsoffenen Innendämmung versehen, wobei neben Calciumsilikat- auch neuartige Pirschaumplatten zum Einsatz kamen. Einzelne Fassadenelemente mussten durch Verankerung auf den Deckenbalkenlagen neu gesichert werden. Bekrönungen und andere Sandsteinelemente blieben bestehen und wurden durch Vierungen ergänzt. Auf eine Erneuerung des gut erhaltenen, sehr festen Außenputzes wurde verzichtet. Als Anstrich kam eine einkomponentige Silikatfarbe nach historischen Vorbild zum Einsatz.

²⁰ HWF Platte: Holzweichfaserplatte, Holzwerkstoffplatte mit guten Dämmeigenschaften

Neben der Instandsetzung der Loggia auf der Ostseite erfolgte auch die Sanierung des Sandsteinbalkons auf der Südseite. Des Weiteren wurden die Türen aufgearbeitet, wobei die Türzargen im EG ersetzt werden mussten. Im gesamten Gebäude, bis auf das Treppenhaus, wurden die alten Fenster durch Standardprofile mit Zweischeibenisolierverglasung ausgetauscht. Im Treppenhaus kam es zur Instandsetzung der Bleiglasfenster und der Eichenholztreppe. Der Treppenlauf musste aus Brandschutzgründen teilweise erneuert werden.

HAUSTECHNIK UND BAUPHYSIK

Das Gebäude verfügt über vier Geothermiesonden, welche 100 bis 120 m in die Tiefe reichen und über eine Wärmepumpe Warmwasser erzeugen. Ergänzend existiert eine Gasbrennwerttherme mit welcher nachgeheizt werden kann. Die Wärmeverteilung erfolgt über Flächenheizungen. Fußbodenheizungen sind im EG in Zementestrich und im DG in Trockenestrich verlegt. Im OG gibt es aufgrund des Tafelparketts eine Wandheizung und in den Bädern kommt es zu Kombinationen aus beiden Heizungstypen.

Der sommerliche Wärmeschutz wird über nach historischem Vorbild rekonstruierte Markisen an der Südfassade und eine passive Kühlung im DG realisiert. Die zur Sonne exponierten Dachflächenfenster verfügen ebenfalls über Verschattungselemente.

Auf eine Raumlüftungsanlage wurde gezielt verzichtet, stattdessen sind die Fenster mit Air-Regel-Elementen versehen. Eine Fensterlüftung durch den Nutzer wird jedoch auch weiterhin vorausgesetzt.

Die Einhaltung von Brand- und Schallschutzvorschriften erforderte zusätzliche Maßnahmen. Neben dem Einbau von Brandschutzschotts und lokalen Rauchmeldern wurde auf die Schallschutzklasse der Fenster geachtet. Bei den Anschlüssen an die Außenwand wurde die Porschaumdämmung durch Calciumsilikatplatten, welche sich durch einen höheren Feuerwiderstand auszeichnen ersetzt. Da an den Decken weder Stuck noch andere Zierelemente vorhanden waren und die Räume über eine ausreichende Höhe verfügten, konnten sie abgehängt werden und dienen nun der Installationsführung und dem Schallschutz. Desweiteren wurden raumspezifische Schallschutzmaßnahmen ergriffen, welche sich in verschiedenen Schüttungen und Einschüben in den Holzbalkendecken widerspiegeln. Der im Dachgeschoss verwendete Trockenestrich aus Ziegelplatten besitzt ebenfalls schalldämmende Eigenschaften.

3 GEBÄUDESIMULATION

Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen bei der Erstellung der Gebäudesimulationen. Neben den Eingabewerten wird auch der entsprechende Eingabebereich der Programme kurz erläutert.

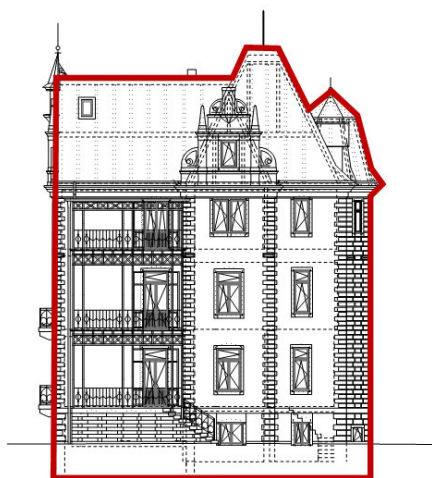
3.1 PASSIVHAUSPROJEKTIERUNGSPAKET

Das PHPP besteht aus einer Excel-Tabelle mit insgesamt 35 Tabellenblättern, welche verschiedenen Themen zugeordnet sind. Gearbeitet wird mit der thermischen Hüllfläche, welche die inneren, warmen Zonen des Gebäudes von den äußeren, kalten trennt. Sie bildet die Grundlage der Berechnungen und muss daher so exakt wie möglich abgebildet werden. Alle inneren Bauteile, wie Innenwände oder Türen, werden nicht betrachtet und ihre thermischen Speichermassen bleiben somit auch unberücksichtigt. Desweiteren sind die Bauteile im Außenmaß anzugeben.

3.1.1 Das unsanierte Gebäude im PHPP

Die Gründerzeitvilla verfügt im Gegensatz zu einem Passivhaus über eine komplexere Geometrie, sodass die Bestimmung der Eingabeparameter etwas Zeit erfordert.

GEOMETRISCHE UND KONSTRUKTIVE EINGABEN



Im unsanierten Zustand wird die thermische Hülle des Gebäudes durch Außenwände, Dach und erdberührte Konstruktionen abgegrenzt. Die im Folgenden ermittelten Flächen werden im gleichnamigen Tabellenblatt eingetragen.

Abbildung 7 thermische Hülle unsaniert

Flächenermittlung

Zuerst gilt es die Energiebezugsfläche zu bestimmen. Sie ist der innerhalb der thermischen Hülle liegende Anteil der Wohnfläche nach Wohnflächenverordnung (WoflV) und wird im Gegensatz zu anderen Flächen in lichtem Maß angegeben. Räume mit einer Höhe von mindestens 2m werden vollständig erfasst wohingegen Räume mit einer Höhe zwischen 1 und 2m nur zur Hälfte und niedrigere Räume gar nicht betrachtet werden.

Im unsanierten Fall liegt wie in der Abbildung erkennbar der Keller vollständig innerhalb der thermischen Hülle und mit einer Raumhöhe größer als 2m wird seine Grundfläche gemäß PHPP-Richtlinie zu 60% berücksichtigt, was einer Fläche von 88,06m² entspricht

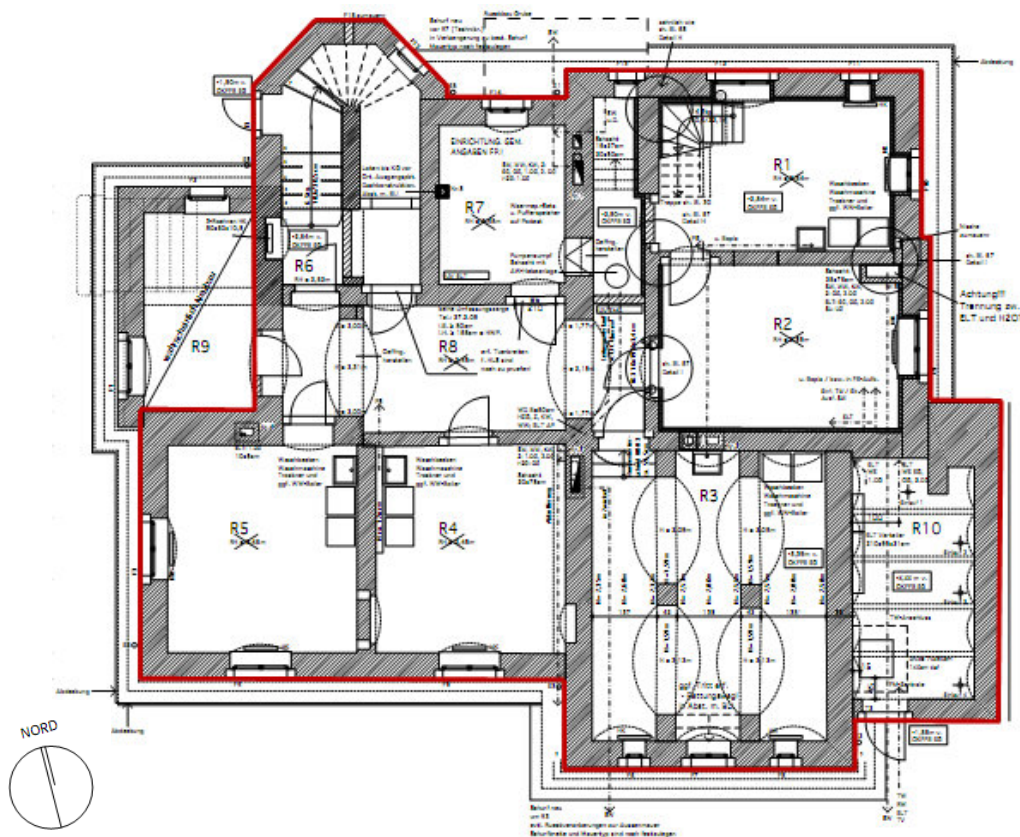


Abbildung 8 thermische Hülle im Untergeschoss, unsaniert

Im Erdgeschoss beträgt die ermittelte Nutzfläche 141,16m², im Obergeschoss 152,45m² und im Dachbereich 143,31m² auf erster Ebene, 87,29m² auf der zweiten und 26,04m² im dritten Dachgeschoss. Die Treppen werden jeweils abgezogen, da sie bei der Ermittlung entfallen. Insgesamt ergibt sich damit eine Energiebezugsfläche von 638,31m².

Die Flächen der Außenwände werden, da sie sich baukonstruktiv unterscheiden, anteilig den jeweiligen Konstruktionen zugewiesen. Zur Übersichtlichkeit werden sie nach Himmelsrichtungen geordnet im Tabellenblatt eingetragen. Der Anteil an erdberührter Fläche beträgt insgesamt $51,53\text{m}^2$. Für die restliche Kellerfläche ergeben sich $119,88\text{m}^2$ und für das EG $239,03\text{m}^2$. Das OG und das 1.DG haben den gleichen Wandaufbau und werden zusammen mit $357,64\text{m}^2$ angegeben. Abschließend das 2.DG mit $28,17\text{m}^2$. Diese Angaben enthalten nur senkrechte Flächen, Dachschrägen werden entsprechend ihres konstruktiven Aufbaus der Dachfläche zugerechnet. Für die Eingabe im PHPP müssen die Türen noch von den Flächen abgezogen werden während die Fensterflächen automatisch berücksichtigt werden.

Ein weiteres Element der thermischen Hülle bildet der Bodenabschluss des Kellers zum Erdreich hin. Diese Fläche wird über den Außenmaßbezug der Bodenplatte bzw. des Kellers ermittelt und beträgt in diesem Fall $219,36\text{m}^2$, wobei zwei verschiedenen Bodenaufbauten unterschieden werden.

Die Flächenangaben für das Dach können aufgrund des komplexen Dachaufbaus über drei Etagen und die vielen Dachgauben nur näherungsweise ermittelt werden. Dabei ergeben sich folgende Werte: $149,37\text{m}^2$ West, $88,56\text{m}^2$ Süd, $88,08\text{m}^2$ Ost und $89,46\text{m}^2$ Nord. Die fast verdoppelte Fläche auf der Westseite erklärt sich durch die zusätzliche Dachfläche im 1.DG, welche für die anderen Seiten entfällt. Zu beachten ist außerdem, dass die hier angegebenen Himmelsrichtungen nur aus Übersichtsgründen verwendet werden, da die Ausrichtung der opaken Hüllfläche im PHPP nicht erfasst wird.

Verluste gegen Erdreich

Vorerst werden die Standarteinstellungen des PHPP für die Bodeneigenschaften mit einer Wärmeleitfähigkeit von $2,0\text{ W/(mK)}$ und einer Wärmekapazität von $2,0\text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ übernommen. Das Untergeschoss ist bis zu einer Höhe von $0,86\text{m}$ erdberührt. Die Bodenplatte weist eine Fläche von $219,36\text{m}^2$ und einen Umfang von $67,35\text{m}$ auf. Ihr U-Wert liegt bei $3,797\text{W/(m}^2\text{K)}$.

U-Werte und Aufbau der Konstruktionen

Bei der Bodenplatte wird nach zwei Ausführungen unterschieden: einer 7cm dicken Ziegelschicht mit einem U-Wert von $3,797\text{W/(m}^2\text{K)}$ und ein höherwertiger 19cm dicker Aufbau bestehend aus Parkett, Lagenholz und Estrich mit einem U-Wert von $1,502\text{W/(m}^2\text{K)}$. Beide

Konstruktionen sind erdberührt und besitzen einen inneren Wärmeübergangswiderstand R_{Si} von $0,17(m^2K)/W$ und einen äußeren Wärmeübergangswiderstand von R_{Se} gleich 0.

Die Außenwand im UG aus 53,5cm Sandstein hat im erdberührten Teil einen U-Wert von $1,68W/(m^2K)$ mit $R_{Si}=0,13(m^2K)/W$ und $R_{Se}=0$, im oberirdischen Bereich einen U-Wert von $1,574W/(m^2K)$, da die Wärmeübergangswiderstände $0,13$ und $0,04(m^2K)/W$ betragen.

Im Erdgeschoss sind die Wände von innen nach außen wie folgt aufgebaut: Kalkzementputz, Vollziegel, Zementmörtel, Vollziegel und Kalkzementmörtel. Mit einer Dicke von 55,5cm liegt der U-Wert bei $1,103W/(m^2K)$. Es gelten die Wärmeübergangswiderstände für luftberührte, senkrechte Bauteile $R_{Si}=0,13$ und $R_{Se}=0,04(m^2K)/W$.

Die gleiche Materialabfolge und identische Widerstände finden sich im Obergeschoss und im ersten Dachgeschoss, wobei die Wandstärke 44,5cm und der U-Wert $1,318W/(m^2K)$ beträgt.

Im zweiten Dachgeschoss bestehen die Wände nur aus Kalkzementputz (innen), Vollziegel und Kalkzementmörtel. Mit einer Dicke von 30cm und zu den vorherigen Konstruktionen identischen Wärmeübergangswiderständen ergibt sich ein U-Wert von $1,784W/(m^2K)$.

Der Dachaufbau setzt sich zusammen aus einer Innenverkleidung, dem Dachbalken, Lattung sowie Konterlattung und schließt nach außen mit Dachziegeln ab. Als Gesamtdicke ergeben sich 4,5cm und ein U-Wert von $1,905W/(m^2K)$, wobei der Wärmeübergangswiderstand innen $0,10(m^2K)/W$ und außen $0,13(m^2K)/W$ beträgt.

Im Anhang befindet sich eine tabellarische Übersicht der eben genannten Angaben.

Fenster und Türen

Im PHPP existiert ein zusätzliches Tabellenblatt für die Eingabe der Fenster. Dabei wird jedes Fenster einzeln mit seinen geometrischen Abmaßen, seiner Neigung und Ausrichtung erfasst. Im unsanierten Zustand sind alle Fenster senkrecht und weisen Ausrichtungen von 15° , 105° , 195° oder 285° für die Himmelsrichtungen Nord, Ost, Süd und West auf, da das Gebäude um 15° zur Nordachse gedreht ist. Außerdem wird angegeben in welcher Teilfläche der thermischen Hüllfläche sich die Öffnung befindet, wobei jedoch nicht auf die genaue Einbauhöhe über dem Erdboden eingegangen wird. Das PHPP unterscheidet zwischen Einzelfenstern und Reihenfenstern, da dies den U-Wert des Fensterrahmens beeinflusst. Insgesamt gibt es $107m^2$ Fensterfläche, von denen $24,3 m^2$ nach Norden und $25,6 m^2$ nach

Osten weisen. Der größte Fensteranteil befindet sich vorteilhafter Weise im Süden wohingegen der kleinste Anteil von 16,5 m² gen Westen zeigt.

In einem nächsten Tabellenreiter wird der Verglasungstyp und der Fensterrahmen festgelegt. Gewählt wurde der Typ Nr.12 Einfachverglasung aus den PHPP Vorgaben mit einem g-Wert von 0,87 und U-Wert der Verglasung U_g von 5,8 W/(m²K). Die Holzkastenfenster werden durch die Auswahl Nr.142 Holzfenster mit einem U-Wert des Rahmens U_f von 2,5 W/(m²K) und einer Rahmendicke von 14cm abgebildet. Ebenfalls in diesem Blatt aufgeführt sind die Wärmebrückenverlustkoeffizienten am Glasrand und für den Fenstereinbau, welche mit 0,05 und 0,04 W/(mK) voreingestellt sind.

Das Gebäude verfügt neben dem großen Eingangsportal auf der Westseite über zwei weitere Außentüren. Die Fläche all dieser Türen von insgesamt 8,02m² ist im Blatt Flächen vermerkt, ihr U-Wert beträgt 0,9 W/(m²K).

Verschattung

Das PHPP bietet die Möglichkeit im zugehörigen Tabellenblatt zwischen verschiedenen Verschattungssituationen zu unterscheiden. In dieser Arbeit wird die Verschattung jedoch nicht betrachtet.

NUTZERBEZOGENE UND TECHNISCHE ANGABEN

Im Blatt "Nachweis" werden zunächst nutzerbezogene Daten und allgemeine Informationen zum Gebäude eingetragen. Dazu gehört unter anderem die Innentemperatur, die mit 20°C angegeben wird und der Wert der Personenbelegung 35 m²/Person. Beide Werte entsprechen dem Standard für Nachweis und Projektierung eines Passivhauses und sind voreingestellt. Rechnerisch ergibt daraus sich eine Anzahl von 18,2 Personen im Gebäude. Alternativ kann auch eine andere Belegungszahl eingetragen werden, welche jedoch bei mindestens 20m²/Person und maximal 50 m²/Person liegen sollte.

Desweiteren sind die Gewinne aus internen Wärmequellen vermerkt, welche aus dem Tabellenblatt "Interne Wärmegewinne" übernommen werden. In diesem ist bereits eine Auswahl von Wärmequellen mit voreingestellten Werten als Standard für den Passivhausnachweis hinterlegt. Wichtig ist hierbei ob sich das Objekt, zum Beispiel eine Waschmaschine, innerhalb der thermischen Hülle befindet oder nicht, da nur innenliegend ein innerer Wärmegewinn

erzeugt werden kann. Diese Angabe wird ebenso wie der Normverbrauchswert [kWh/d], der Nutzungsfaktor und die Häufigkeit [d/a] aus dem Tabellenblatt "Strombedarf" übernommen.

$$\text{Strom} - / \text{ Nutzenergiebedarf} = \text{Normverbrauchswert} \times \text{Nutzungsfaktor} \times \text{Häufigkeit} \quad (1)$$

Um die internen Wärmequellen zu berechnen wird der nach obiger Formel ermittelte Strombedarf [kWh/a], auch Nutzenergiebedarf genannt, nun mit dem Verfügbarkeitsfaktor der Abwärme multipliziert und durch die Betriebsdauer [kh/a] geteilt. Zur Bestimmung des Kennwertes der internen Wärmequellen [W/m²] werden die Ergebnisse summiert und durch die Energiebezugsfläche dividiert. Das Wärmeangebot aus den internen Wärmequellen berechnet sich dann aus der Multiplikation von Kennwert mit der Heizperiode [d/a] und dem Faktor 0,024. Dieser leitet sich aus der Umrechnung von Heiztagen [Kd/a] in Heizstunden her. Mit d=24h und k =1000 ergibt sich: 1 d/a =0,024 kh/a.

In die Berechnung der internen Wärmegewinne fließt zudem jede Person mit einem Normverbrauchswert von 80 W, einem Nutzungsfaktor von 1,0 und einer Häufigkeit von 8,76 kh/a ein, was einen Nutzenergiebedarf von 701 kWh/a ergibt. Mit einer Verfügbarkeit von 0,55 und geteilt durch die Nutzungsdauer von 8,76 kh/a erhält man 44 W als Wärmeleistung für eine Person.

Beleuchtung wird mit einem Normverbrauchswert von 60 W, einer Häufigkeit von 2,9 kh/P*a und somit einem Nutzenergiebedarf von 174 kWh/a angenommen, da der Nutzungsfaktor 1,0 ist. Die Verfügbarkeit beträgt 1,0 und die Nutzungsdauer 8,76 kh/a und die interne Wärmequelle damit 20 W. Zu beachten ist jedoch der Zusammenhang von Häufigkeit und Personenanzahl. Für die hier berechneten Werte wird eine Person angenommen.

Im Fall der elektrischen Geräte liegt der Normverbrauch bei 80 W, die Häufigkeit bei 0,55kh/P*a und der Nutzungsfaktor bei 1,0. Wie schon bei der Beleuchtung steht die Häufigkeit im Zusammenhang mit der Personenanzahl. Unter der Ein-Personen-Annahme ergibt sich für den Nutzenergiebedarf 44 kWh/a und mit einer Verfügbarkeit von 1,0 und der Nutzungsdauer von 8,76 kh/a eine Wärmequelle von 5 W. Desweiteren werden im Tabellenblatt betrachtet: Geschirrspülen, Waschen, Trocknen, Kühlen, Gefrieren, Kochen, Klein- und Hilfsgeräte, sonstige Einrichtungen sowie Kaltwasser und Verdunstung, wobei letztere negativ in die Bilanz eingehen.

Für die Simulation wurden vorerst die Standardwerte des PHPP übernommen, womit die internen Wärmegewinne bei $2,1\text{W/m}^2$ liegen.

Lüftung

Das PHPP geht standardmäßig davon aus, dass der Luftwechsel über die für Passivhäuser übliche Lüftungsanlage realisiert wird. Im unsanierten Gebäude ist dies nicht der Fall und es wird ein Luftwechsel durch Infiltration von $0,3\text{ 1/h}$ angegeben.

3.1.2 Das sanierte Gebäude im PHPP

Die Eingabe des Gebäudes nach der Sanierung erfolgt auf der Grundlage des unsanierten Zustandes und wird entsprechend den veränderten Bedingungen angepasst.

GEOMETRISCHE UND KONSTRUKTIVE EINGABEN

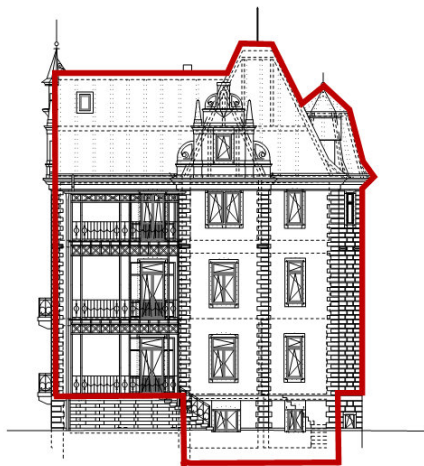


Abbildung 9 thermische Hülle saniert

Im Zuge der Sanierung wurde das Gebäude mit einer Innendämmung versehen, wobei der Keller teilweise gedämmt wurde. Die thermische Hülle folgt nun der Dämmebene und es ergibt sich eine neue Energiebezugsfläche. Es gelten die gleichen Kriterien wie im unsanierten Fall: lichte Raummaße, Abzug der Treppen bei mehr als 3 Stufen. Der gedämmte Bereich des Kellers geht wie bereits im unsanierten Fall mit einem Faktor von $0,6$ ein, was $18,9\text{m}^2$ ergibt. Die restlichen Geschosse bleiben unverändert: $141,16\text{m}^2$ EG und $152,45\text{m}^2$ OG, $143,31\text{m}^2$ 1.DG und $87,29\text{m}^2$ 2.DG sowie $26,04\text{m}^2$. Insgesamt ergibt sich die Energiebezugsfläche somit zu $569,15\text{m}^2$.

Die Außenwandflächen im UG ändern sich ebenfalls mit der Verschiebung der thermischen Hülle, sodass erdberührte Wände nur noch an der Nord- und Ostseite des Gebäudes vorliegen, insgesamt $12,34\text{m}^2$. Die restlichen Wände, welche die gedämmten Räume vom restlichen Keller abgrenzen, werden als an Außenluft grenzend betrachtet. Auf diese Weise ergeben sich nach Süden hin $17,25\text{m}^2$ und nach Westen $23,6\text{m}^2$. Der oberirdische Bereich wird nach Norden mit

11,98m², nach Osten mit 16,72m² angegeben. Abbildung 10 der nächsten Seite verdeutlicht den Verlauf der thermischen Hülle im Untergeschoss. Für die weiteren Geschosse bleibt die Außenfläche mit dem unsanierten Zustand identisch.

Der Bodenabschluss des Kellers umfasst nur noch die gedämmten Räume, was einer Fläche von 48,33m² entspricht. Hinzu kommen allerdings 171,03m² Decke KG, um die thermische Hüllfläche zu schließen, wobei diese als an Außenluft grenzend betrachtet wird. Den Abschluss bildet das Dach, dessen Fläche im Vergleich zum unsanierten Fall unverändert bleibt.

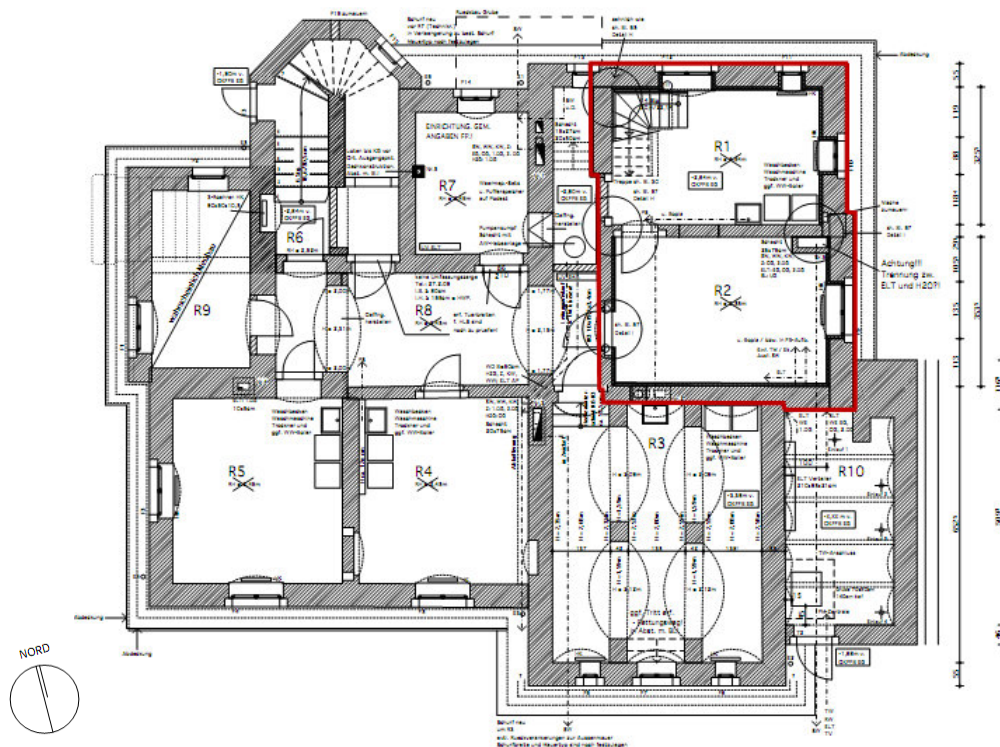


Abbildung 10 thermische Hülle im Untergeschoss, saniert

Verluste gegen Erdreich

Für die Bodeneigenschaften werden wieder die Standardwerte des PHPP übernommen. Die Bodenplatte weist eine Fläche von 48,33m² und einen Umfang von 28,7m auf. Der U-Wert der Kellerdecke, welche im sanierten Fall Teil der thermischen Hülle ist, beträgt 0,709W/(m²K). In einem Bereich von 0,86m ist die Kellerwand erdberührt, der U-Wert der oberirdischen Wand wird mit 0,406W/(m²K) angegeben. Weitere Angaben werden nicht benötigt, da der Keller beheizt wird.

U-Werte und Aufbau der Konstruktionen

Die Bodenplatte besteht aus einer Sauberkeitsschicht unter der sich eine PE-Folie befindet. Nach oben hin schließen sich Abdichtung, Dämmung, Zementstrich und Fliesen an. Da es sich um ein erdberührtes, horizontales Bauteil handelt betragen die Wärmeübergangswiderstände innen $0,17\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ und außen 0. Die Gesamtdicke der Konstruktion beträgt 29,5cm mit einem U-Wert von $0,733\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Aufgebaut aus Stahlbeton, Trittschalldämmung, Estrich und Parkett besitzt die Decke zwischen Keller und Erdgeschoss einen U-Wert von $0,709\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei einer Dicke von 29cm. Der innere Wärmeübergangswiderstand R_{Si} beträgt $0,13(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ und der äußere R_{Se} $0,04(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$.

Die Wandaufbauten entsprechen dem unsanierten Fall mit dem Unterschied, dass eine Innendämmung angebracht ist. Diese besteht aus iQ Fix Kleber, iQ Therm Dämmung und abschließend iQ Top Putz. Alle Wände haben die gleichen Wärmeübergangswiderstände von R_{Si} $0,13(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ und R_{Se} $0,04(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$. Wandstärken und U-Werte ändern sich wie folgt:

Der erdberührte Teil der Kellerwand besitzt eine Dicke von 63,6cm und einen U-Wert von $0,407\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Zum Boden hin ist der Wärmeübergangswiderstand Null, an der Wandinnenseite $0,13(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$. Für den nicht erdberührten Teil ändert sich der Widerstand außen auf den genannten Wert von $0,04 (\text{m}^2\text{K})/\text{W}$, wodurch der U-Wert auf $0,400\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sinkt.

Im Erdgeschoss sind die Wände nach der Sanierung 63,1cm dick, ihr U-Wert beträgt $0,369\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Für das Obergeschoss und das 1.Dachgeschoss ergeben sich 52,1cm und $0,390\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ währenddessen die Werte für das 2.Dachgeschoss bei 37,6cm und $0,423\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegen.

Das Dach erhielt eine Zwischensparrendämmung aus Zellulosefasern, welche durch eine nach außen hin anschließende Holzfaserplatten zusätzlich verstärkt wurde. An der Innenseite der Dämmung befinden sich erst Dampfbremse, dann Innenbekleidung. Nach außen schließen Lattung, Konterkattung und Dachziegel ab. Die Gesamtdicke beträgt 33cm mit einem U-Wert von $0,142\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Eine Übersicht der verwendeten Konstruktionen befindet sich im Anhang.

Nachstehende Abbildung zeigt die Veränderung der U-Werte der verwendeten Konstruktionen.

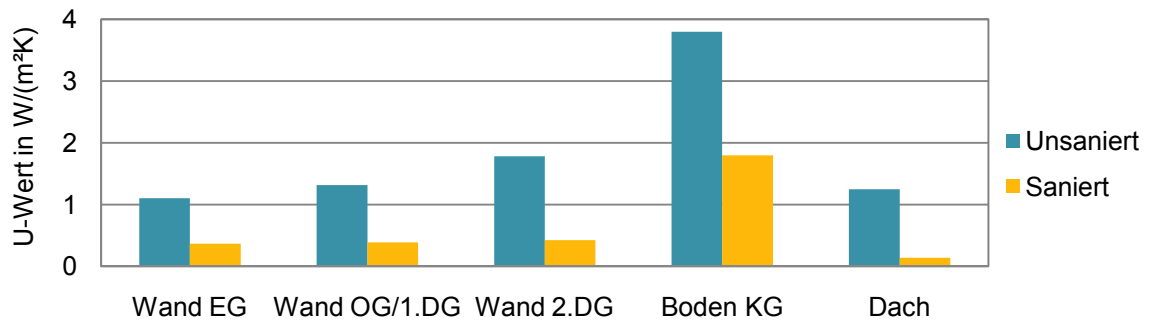


Abbildung 11 Gegenüberstellung U-Werte in W/(m²K)

Fenster und Türen

Wie auch im unsanierten Zustand weisen die Fenster Ausrichtungen von 15°, 105°, 195° oder 285° auf, da das Gebäude in einem Winkel von 15° zur Nordachse steht. An einigen Fenstern wurden Veränderungen vorgenommen. Im Erd- und Obergeschoss wurde jeweils das äußerste Fenster an der Nordseite, Ecke Ostseite zugemauert. Zudem wurden einige Fenster im Untergeschoss verkleinert. Im Dachbereich sind insgesamt fünf Dachfenster mit einer Neigung von ca. 65° eingebaut worden. Drei davon verteilt mit Ausrichtung nach Nord, West und Süd im 2.DG und weitere 2 nach Nord und Ost im 3.DG. Die gesamte Fensterfläche beträgt 96,39m², von denen 20,15m² auf der Nord- und 22,57m² auf der Ostseite liegen. Mit 37,58m² befindet sich der größte Flächenanteil im Süden während der kleinste mit 16,09m² nach Westen zeigt.

Als Verglasung kommt eine mit Argon gefüllte Double low-e²¹ zum Einsatz, welche im PHPP Tabellenblatt FenTyp unter der Nummer 22 zu finden ist. Sie besitzt einen g-Wert von 0,56 und einen U-Wert von $U_g = 1,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Der ausgewählte Holzrahmen weist einen U-Wert U_f von $1,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Eingetragen mit der Nummer 143 und einer Dicke von 14cm besitzt er einen Wärmebrückenverlustkoeffizienten von $0,04 \text{ W/(mK)}$ für die Übergänge vom Glas zum Rahmen und vom Rahmen zur Wand.

Die Gesamtfläche in Bezug auf die Außentüren beträgt nur noch 4,78m², da neben dem Eingangsportal keine weiteren Türen in der thermischen Hüllfläche liegen. Ihr U-Wert wurde unverändert bei $0,9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ belassen.

Die Verschattung wird auch im sanierten Fall, aus Gründen der Vereinfachung, nicht betrachtet.

²¹ Zweiseibenisolierverglasung mit Beschichtung zur Reduktion der Emissivität (low emissivity)

NUTZERBEZOGENE UND TECHNISCHE ANGABEN

Wie bereits im unsanierten Fall wurden vorerst die vom PHPP voreingestellten Werte verwendet. Dazu gehört die Innentemperatur von 20°C, eine Personenbelegung von 35 m²/Person und interne Wärmegewinne von 2,1W/m². Aufgrund der veränderten Energiebezugsfläche werden 18,2 Personen im Haus angenommen.

3.2 ENERGYPLUS / DESIGNBUILDER

Inhalt dieses Kapitels ist die Abbildung der Gründerzeitvilla in EnergyPlus, wobei die Eingabedaten nach Möglichkeit den im PHPP verwendeten Werten angeglichen werden.

3.2.1 Das unsanierte Gebäude in E+

EnergyPlus fungiert als reiner Rechenkern und verfügt daher über keine zur Eingabe von Geometrien geeignete Oberfläche²². Um das Gebäude abzubilden wird das Programm DesignBuilder²³ genutzt, welches ein 3D Modell erzeugt und im Gegensatz zum PHPP den Innenmaßbezug fordert.

Modellierung im Designbuilder

Die Gebäudegeometrie kann mit Hilfe von Zeichenblöcken schnell etagenweise aufgebaut werden. Der DesignBuilder unterscheidet dabei verschiedene Blöcke mit unterschiedlichen Eigenschaften und Bearbeitungsmöglichkeiten. Für die Dachkonstruktion kommen sogenannte "Component Blocks" zum Einsatz, da diese anders als die normalen Gebäudeblöcke ("Building Blocks") durch diverse Befehle modelliert werden können. Dies ist notwendig, um die Form des Daches über Hilfslinien aus Quadern herauszuschneiden. Anschließend werden diese Einzelblöcke über den Befehl Verbinden ("Boolean") zusammengefasst und in einen Building Block umgewandelt. In einigen Fällen, wird dieses Verschmelzen jedoch nicht umgesetzt, sodass die Blöcke über eingefügte Löcher in ihren Trennwänden und die Auswahl "über Löcher verbundene Zonen verbinden" zusammengefügt werden. Im weiteren Verlauf werden sie als eine Zone betrachtet. Um die komplexe Form des Daches zu vereinfachen, werden jeweils die kleinsten Gauben der Nord-, Süd- und Westseite durch schräge Dachfenster ersetzt. Dies ist

²² vgl. Absatz "EnergyPlus", Kapitel 1

²³ vgl. Absatz "DesignBuilder", Kapitel 1

möglich, da der entstehende Fehler in Bezug zum gesamten Gebäude sehr gering ausfällt. Der Kontakt der erdberührten Wände wird mit Hilfe von Bodenblöcken(Groundblocks) modelliert, welche in einer Höhe von 0,86m um das Gebäude verlaufen. Diese Höhe entspricht der auch im PHPP verwendeten einheitlich angenommenen Tiefe der erdberührten Wände.

Anschließend folgt die Eingabe von Innenwänden, Fenstern, Türen und Konstruktionsaufbauten. Nebestehende Abbildungen zeigen das fertige Modell. Für die Außenwände, die Bodenplatte und das Dach werden die im PHPP verwendeten Materialeigenschaften als Vorlage genutzt. Im Vergleich zum PHPP, welches lediglich die thermische Hüllfläche des Gebäudes nutzt, müssen im DesignBuilder zusätzlich noch die Zwischendecken bestimmt werden.

Diese werden zur Vereinheitlichung in zwei Konstruktionstypen unterschieden: die Gewölbedecke des Kellers und eine Holzbalkendecke (HB-Decke) als Referenz für die weiteren Etagen.

Die Gewölbedecke besteht vereinfacht aus einem 11,5cm starken Ziegelgewölbe, auf welchem sich 10,2cm Blähton und abschließend je 3cm Holzschalung und Parkett befinden. Mit einer Gesamtdicke von 27,7cm liegt der U-Wert bei $0,747 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Der Raum zwischen den Balken der HB-Decke ist mit einer 7,9cm hohen Schüttung gefüllt, sodass der eigentliche Balken nur 3,5cm herausragt bevor nach oben hin eine 3cm starke Holzverkleidung und 3cm Parkett abschließen. Im Falle der Holzbalkendecke befindet sich über dem 11,4cm starken

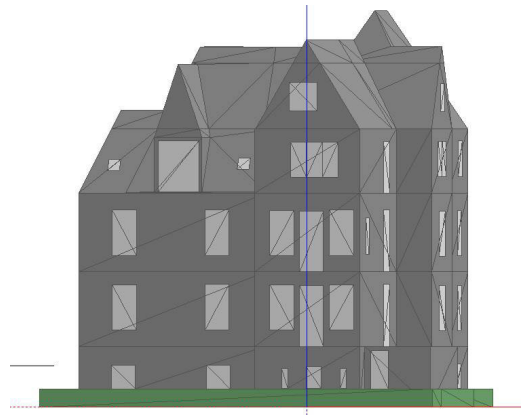


Abbildung 12 Ansicht Südseite im DesignBuilder

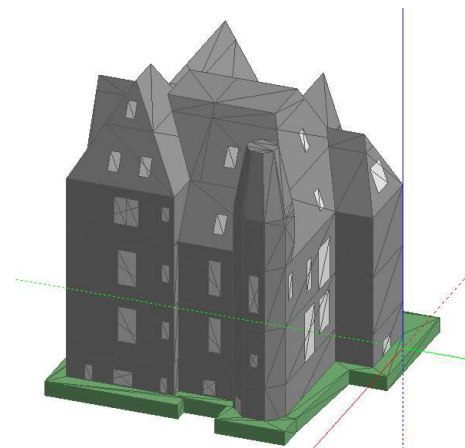


Abbildung 13 Ansicht Nordseite im DesignBuilder

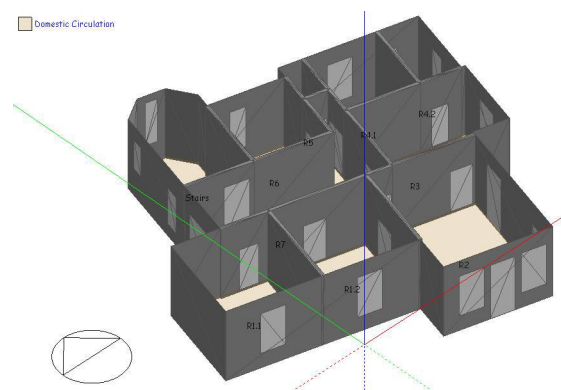


Abbildung 14 Innenansicht im DesignBuilder

Balken eine 7,9cm Schüttung, welche mit Holz verkleidet ist und mit Parkett abschließt. In einem Abstand von 10,9cm unterhalb zum Balken ist eine 1,8cm dicke Holzverkleidung angebracht, welche mit 2,5cm Schilfputz verkleidet ist. Insgesamt besitzt die Decke eine Dicke von 32,6cm und einen U-Wert von 0,694 W/(m²K).

Um die wirkliche Nordausrichtung des Gebäudes abzubilden, wird es gedreht. In einer weiteren Variante, soll diese Korrektur nicht in der Zeichenebene, sondern in EnergyPlus erfolgen. Anschließend erfolgte der Export der beiden Dateien Losch.idf und Losch_gedreht.idf. Das verwendete Dateiformat IDF (Input Data File) ist das Eingabedatenformat von E+.

Da zwischen dem DesignBuilder und EnergyPlus eine Datenaustauschlücke besteht [18], werden die Dateien mit dem Werkzeug SimplifyIDF²⁴ bearbeitet, um ihre Lesbarkeit zu erhöhen. Dabei werden die Modellinstanzen in Klassen eingeordnet und ihre Elemente weitestgehend zusammengefasst.

Alle weiteren Eingaben erfolgen entweder über den IDF Editor von E+ oder direkt mit einem Text Editor. Im unsanierten Zustand ist das Gebäude in 39 Zonen eingeteilt. Diese sind wichtig, da jedem Ereignis (Heizen, Lüften,..usw.) ein Ort und darüber hinaus noch eine Zeit zugeordnet werden muss. Einzelne Zonen können dabei zu Zonenlisten zusammengefasst werden, Zeitverläufe im Bereich "Schedules" eingegeben werden.

Die im PHPP verwendete Energiebezugsfläche wird über die Erstellung einer speziellen Zonenliste ohne Treppenhaus und mit nur 60% der Zonen des Untergeschosses abgebildet. In EnergyPlus bereits voreingestellte Werte für interne Wärmegevinne, Beleuchtung, Elektronik und Personen werden gelöscht und der PHPP Standardwert von 2,1W/m² eingestellt. Ebenso wird die Lüftung auf einen Luftwechsel von 0,3 1/h angepasst und auf die kreierte Zonenliste angewendet. Während für eben genannte Umstellungen der bereits vorhandene Zeitplan "On", Anwendung jeden Tag 24h, genutzt werden kann, muss für das Ereignis Heizung ein neuer erstellt werden. E+ arbeitet für gewöhnlich mit einer Nachtabsenkung der Heizung, welche im PHPP nicht vorkommt. Um dies Umzusetzen wird ein Zeitplan namens "Heating Setpoint" kreierte, welcher die Innenraumtemperatur permanent auf mindestens 20°C hält. Auf die voreingestellte Kühlung wird nicht weiter eingegangen, da das Gebäude nicht aktiv gekühlt wird. Der Zeitplan für die Heizung wird anschließend im Punkt "Dual Setpoints" hinterlegt, welcher wiederum unter "Zone HVAC Controls and Thermostats" mit dem zugehörigen Thermostat verbunden wird.

²⁴ SimplifyIDF: Werkzeug für IDF Dateien, Dirk Weiß, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 2013

Um in beiden Programmen mit einem einheitlichen Klima zu rechnen, werden die Klimadaten des PHPP in E+ übernommen. Dazu wird im Unterpunkt "Energy Management System (EMS)" ein Programm geschrieben, welches die bereits vorhandenen Daten überschreibt. Insgesamt werden folgende Angaben verändert: Außentemperatur, Taupunkt, direkte und diffuse Solarstrahlung sowie Luftfeuchtigkeit.

Erstere können einfach ersetzt werden. Da das PHPP jedoch nicht wie E+ diffuse und direkte Strahlung sondern nur Globalstrahlung angibt, wird die direkte Strahlung gleich null gesetzt und die diffuse mit den PHPP Werten überschrieben. Die relative Luftfeuchtigkeit wird mit 80% eingetragen. Außerdem wird der Standardwert der Bodentemperatur von 18°C auf die PHPP-Werte geändert. Dies ist problemlos im IDF-Editor, Unterpunkt "Location and Climate", möglich. Im Kapitel 3.3.1 Klimadaten können die detaillierten Werte für die Größen Außentemperatur, Taupunkt, Strahlung und Bodentemperatur nachgelesen werden.

Als nächstes erfolgt die Anpassung der äußeren und inneren Wärmeübergangswiderstände R_{se} , und R_{si} , da diese nicht voreingestellt sind. Die Einstellung wird unter "Advanced Construction, Surfaces, Zone Concepts" entweder über einzelne oder gruppierte Oberflächen vorgenommen. Alle Flächen in der X-Y-Ebene erfasst der DesignBuilder automatisch als erdberührt mit $R_{se}=0$. Den Oberflächen der erdberührten Wände hingegen muss diese Eigenschaft unter "Surface Property" erst zu gewiesen werden. Im erdberührten Bereich gilt $R_{se}=0$ und $R_{si}=0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Außenluft berührte Wände und Dachflächen können mit Hilfe von "Multiple Surface" gebündelt geändert werden, wobei der äußere Wärmeübergangswiderstand R_{se} gleich $0,04 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und der innere R_{si} im Falle der Außenwand $0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und im Falle des Daches $0,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ist. Abschließend wird der voreingestellte Minimalwiderstand von $0,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ herabgesetzt, um Fehlermeldungen zu vermeiden. Dies geschieht im "Heat Balance Algorithm", der bei den Simulationsparametern zu finden ist.

Während in der Datei Losch1_gedreht das Gebäude bereits über die richtige Nordausrichtung verfügt, muss es in der anderen Datei über die Simulationsparameter des Gebäudes noch gedreht werden. Wichtig ist hierbei, dass die Drehung als Drehung zweier Koordinatensysteme zueinander betrachtet wird, da das Gebäude ebenfalls über ein eigenes Koordinatensystem verfügt. Die Richtigkeit der Drehung kann über die von E+ ausgegebene DXF-Datei²⁵ visuell überprüft werden. Nachfolgende Tabelle zeigt die Simulationsergebnisse beider Methoden im Vergleich. Es gibt eine Abweichung, welche jedoch sehr gering ausfällt.

²⁵ DXF: Drawing Interchange File Format, von Zeichenprogrammen verwendetes Datenformat

	Transmission [kWh]	Lueftung [kWh]	interne Gewinne [kWh]	Heizlast [kWh]
Losch_ems_result	-92100	-24600	26100	94100
Losch_gedreht_ems_result	-92088	-24622	26063	94043
Anteil	0,9999	1,0009	0,9986	0,9994

Tabelle 1 Ergebnisse unterschiedlicher Methoden zur Nordausrichtung

In der Rubrik "Outputs" werden anschließend die benötigten Ausgaben festgelegt. Neben einigen bereits vorausgewählten werden noch Strahlungsgewinne und -verluste der Innenoberflächen opaker Bauteile, Wärmegewinne und -verluste über Fenster und durch Lüftung, Interne Wärmegewinne sowie Heizlast eingetragen.

Der Simulationszeitraum beträgt ein Jahr und wird mit sechs Zeitschritten pro Stunde berechnet. Als "Weather file" werden die Klimadaten des Testreferenzjahres 2010 für Potsdam genutzt. Dies ist möglich, da die meteorologischen Daten von Potsdam und Dresden sehr ähnlich sind²⁶.

Wie im ersten Kapitel bereits erwähnt, erzeugt EnergyPlus bei der Simulation verschiedene Ausgabedateien, von denen sich einige zur Weiterverarbeitung in Postprozessen eignen. Eine dieser Ausgaben stellt die CSV (Comma Separated Values) Datei dar. Das Tool resultCSV²⁷, welches mit dem bereits verwendeten Tool SimplifyIDF vernetzt ist, greift die Flächen aus einer von SimplifyIDF generierten Datei und bilanziert auf Grundlage ihrer Eigenschaften und der Daten aus der CSV deren Gewinne und Verluste. Die Ergebnisse werden anschließend in einer übersichtlichen Zusammenstellung ausgegeben. Das Werkzeug resultCSV ermöglicht eine schnelle und genaue Ausgabe von Daten, deren händige Zusammenführung zwar möglich aber aufwendig und umständlich ist.

3.2.2 Das sanierte Gebäude in E+

Als Grundlage für den Zustand nach der Sanierung dienen neben dem bereits erstellten Gebäudemodell, die im PHPP verwendeten Angaben, welche im DesignBuilder übernommen werden. Für die im PHPP nicht aufgeführten Zwischendecken werden zwei repräsentative Fälle zusammengestellt. Die ehemalige Gewölbedecke wird durch eine Stahlbetondecke (Stb.-Decke) ersetzt, welche neben 18cm Stahlbeton aus 3cm Trittschalldämmung und 6,5cm Estrich

²⁶ vgl. Werte DIN 4108-6 Anhang A - meteorologische Daten

²⁷ resultCSV: im Alpha-Stadium befindliches Tool für CSV Dateien, Dipl.-Ing. Dirk Weiß, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 2014

aufgebaut ist und mit 1,5cm Dielenparkett abschließt. Der U-Wert beträgt $0,725 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und die Dicke 29cm. Im Fall der Holzbalkendecke (HB-Decke) wird unter dem Parkett eine Schicht von 4,5cm Heizestrich eingezogen, wodurch sich eine Gesamtdicke von 37,1 cm und ein U-Wert von $0,679 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ergibt.

Nachstehende Grafik zeigt die Veränderung der U-Werte der Zwischendecken.

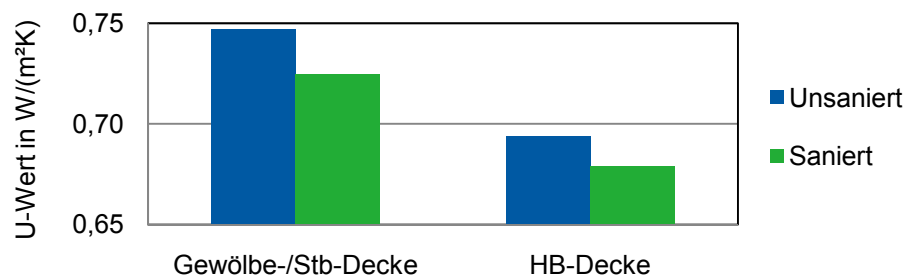


Abbildung 15 Gegenüberstellung U-Werte Zwischendecken in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

Die Veränderungen an der Verglasung des Gebäudes werden ebenfalls ins Modell übertragen und betroffene Fenster entfernt oder in ihrer Größe verändert. Im Dachbereich werden 5 neue Fenster eingefügt. Anschließend erfolgt der Export der Daten, wobei identisch zum unsanierten Zustand das Tool SimplifyIDF genutzt wird, um die Lesbarkeit der IDF-Datei zu erhöhen.

Das Klima wird wie bereits im unsanierten Gebäudezustand über das EMS erzeugt und die Werte für Außentemperatur, Taupunkt und Strahlung dem PHPP angepasst. Gleiches gilt für die Bodentemperaturen. Exakte Werte für eben genannte Größen sind im Kapitel 3.3.1 Klimadaten nachzulesen. Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt 80%. Für die internen Wärmegewinne werden $2,1 \text{ W}/\text{m}^2$, für die Luftwechselrate $0,3 \text{ 1/h}$ verwendet. Die Voreinstellung zur Heizung wird analog zum unsanierten Fall verändert. Alle erwähnten Änderungen sind der jeweiligen Zonenliste und dem entsprechenden Zeitplan zugeordnet, wobei aufgrund der verkleinerten Energiebezugsfläche eine neue Zonenliste erstellt wird.

Anschließend werden identisch dem unsanierten Zustand Wärmeübergangswiderstände und Ausgaben festgelegt. Die Simulation erfolgt über den Verlauf eines Jahres in sechs Schritten pro Stunde. Als Wetterdatei werden erneut die meteorologischen Daten des Testreferenzjahres 2010 für Potsdam verwendet. Identisch zur vorherigen Simulation wird das Tool resultCSV genutzt, um die Ausgaben der CSV Datei übersichtlich zusammenzustellen.

3.3 AUSWERTUNG DER GEBÄUDESIMULATION

Ziel dieses Kapitels ist die Auswertung der bisher erstellten Simulation und die Vorstellung der untersuchten Varianten sowie ihrer Ergebnisse. Um die unterschiedlichen Ansätze von Gebäudesimulationsprogrammen zu vergleichen, ist ein geeigneter Bezugspunkt erforderlich [19]. Dieser wird neben dem Gebäude durch die PHPP Standardwerte gegeben, welche vom PHPP in EnergyPlus übertragen wurden. Nach den bereits beschriebenen baukonstruktiven und nutzungsbedingten Angaben, wird im Folgenden näher auf das verwendete Klima eingegangen.

3.3.1 Klimadaten

Als ausgewählte Wetterdatei im EnergyPlus wird das Klima von Potsdam verwendet. Um in beiden Programmen mit einem einheitlichen Klima zu rechnen, werden einige Klimadaten des PHPP ins E+ übernommen. Dazu gehören Außenlufttemperatur, Taupunkt, Strahlung und Bodentemperatur.

Das PHPP bietet neben der Möglichkeit eigene Klimadaten zu verwenden, insbesondere für den Standort Deutschland bereits eine Auswahl an Datensätzen an. Im gleichnamigen Tabellenblatt wurde mittels Drop-Down Menu das regionale Klima für den Standort Dresden ausgewählt.

Grundlage der im PHPP hinterlegten Werte ist die Vornorm DIN 4108-6 Wärme- und Energiebedarf. Diese unterteilt Deutschland in 15 Referenzregionen mit jeweils vereinheitlichten meteorologischen Daten, wobei Dresden der Region 5 zugehört. In der Tabelle A.1 werden für jede dieser Regionen die Strahlungsintensitäten pro Monat in W/m^2 und im Verlauf eines Jahres in kWh/m^2 angegeben. Die im PHPP verwendeten Strahlungsangaben entsprechen den Monatswerten für die 90° Neigung und sind in kWh/m^2 umgerechnet. Die Außenlufttemperaturen des PHPP stammen aus Tabelle A.3.

Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
-0,7	0,4	3,9	8,1	13,1	16,5	18	17,7	14,2	9,8	4,4	1

Tabelle 2 Außentemperaturen Dresden nach DIN 4108-6 Tabelle A.3 in $^\circ\text{C}$

Um den Wert für die jährliche Strahlung zu erhalten, werden die monatlichen Angaben im PHPP mit dem Strahlungsfaktor multipliziert, welcher wiederum vom Anteil der maximalen Verluste

(max.V) abhängig ist. Diese berechnen sich in Funktion der mittleren Außenlufttemperatur (T) nach folgendem Schema:

$$\text{wenn } T < 10^{\circ}\text{C} \text{ dann } \max.V = 1 \text{ und} \quad (2)$$

$$\text{wenn } T > 16^{\circ}\text{C} \text{ dann } \max.V = 0 \quad (3)$$

$$\text{sonst } \max.V = 0,000038 \times T^4 - 0,0014 \times T^3 + 0,0116 \times T^2 - 0,032 \times T + 1 \quad (4)$$

Für die Monate April und Mai wird die Temperaturuntergrenze laut PHPP auf 6°C herabgesetzt:

$$\text{wenn } T < 6^{\circ}\text{C} \text{ dann } \max.V = 1 \quad (5)$$

Von Juni bis einschließlich September ist der Verlustanteil vorab gleich Null gesetzt, wodurch vorausgesetzt wird, dass während dieser Zeit überhaupt keine Verluste auftreten. Es zeigt sich, dass der Anteil maximaler Verluste bei Temperaturanstieg sinkt und mit Temperaturabfall wieder steigt, womit er sich ähnliche der Gradtagszahl verhält. Aus den errechneten Werten lässt sich der Strahlungsfaktor bestimmen.

Strahlungsfaktor

$$= 0,4 \times \max.V \times (0,78 \times \max.V + 0,22) + 0,6 \times (0,78 \times \max.V + 0,22) \times \max.V \quad (6)$$

Im Jahresverlauf ergibt sich Folgendes:

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
max.V	1	1	1	0,924	0,543	0	0	0	0	1	1	1
Strahlungs-faktor	1	1	1	0,818	0,259	0	0	0	0	1	1	1

Tabelle 3 Anteile der maximalen Verluste und Strahlungsfaktoren

Die monatlichen Strahlungsintensitäten multipliziert mit den zugehörigen Strahlungsfaktoren ergeben aufsummiert den Jahreswert der Globalstrahlung von 351 kWh/(m²a). Im Klimadatenblatt des PHPP sind folgende monatliche Werte hinterlegt:

Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
22	39	70	112	153	145	153	132	83	51	24	13

Tabelle 4 Werte der Globalstrahlung im PHPP in kWh/(m²xMonat)

Gradtagszahl²⁸ und Heiztage²⁹

In der Vornorm DIN 4108 Teil 6 Tabelle D.5 wird die Gradtagszahl mit 2900 Kd, entspricht 69,9kKh/a, angegeben, während der im PHPP nach folgender Formel berechnete Wert bei 84kKh/a liegt.

$$\text{Gradtagszahl} = \left(\sum_{i=1}^{12} \max.V_i \times (20 - T) \times \text{Anzahl der Tage} \right) \times 0,024 \quad (7)$$

Der Faktor 0,024 entsteht aus der Umrechnung der Kd in kKh und die 20 entsprechen der Standardinnenraumtemperatur eines Passivhauses von 20°C.

Ebenso weichen die Angaben der Heiztage in DIN und PHPP voneinander ab. In den Anmerkungen zu Tabelle D.5 der DIN ist eine Heizperiode von 185 Tagen vermerkt, welche in etwa dem Zeitraum von Oktober bis März entspricht, während das PHPP mit 219 Tagen rechnet. Diese, um 34 Tagen längere Periode, reicht in Anbetracht der Werte der maximalen Verlustanteile ebenso von Oktober bis März enthält jedoch noch Anteile der Monate April und Mai. Die Berechnung der Heiztage erfolgt im PHPP über den HT-Faktor auf Grundlage der Anteile an maximalen Verlusten.

$$\text{HT - Faktor} = (0,78 \times \max.V + 0,22) \times \max.V \quad (8)$$

$$\text{Heiztage} = \sum_{i=1}^{12} \text{HT - Faktor} \times \text{Anzahl der Tage} \quad (9)$$

Bodentemperaturen

Die Bodentemperaturen werden im Tabellenblatt "Boden" jeweils für den Winter- und Sommerfall berechnet. In Abhängigkeit der Außentemperatur werden sie dann in das Blatt "Klimadaten" überführt. Für $T < 15^\circ\text{C}$ nutzt das PHPP die Temperatur im Winter, sonst die des Sommerfalles, sodass diese einzig in den Monaten Juni, Juli und August verwendet wird. Im Blatt "Boden" werden die Werte wie folgt berechnet:

²⁸ Gradtagszahl: Hilfsmittel zur Berechnung diverser Größen (z.B. Heizkosten), stellt den Zusammenhang zwischen Raum- und Außenlufttemperatur dar

²⁹ Heiztage: Anzahl der Tage, an denen die Außentemperatur unterhalb der Heizgrenze liegt und somit geheizt wird

$$T_{Boden} = T_i - \left(\frac{L_S \times (T_i - T_{g,ave}) + L_{ep} \times T_{g,A} \times \cos\left(2\pi \times \frac{(Monat-1-\beta)}{12}\right)}{\Psi_B^* \times A + \Psi_{P,stat}^* + (U_{WB} \times z \times P)} \right) \quad (10)$$

Zeichen	Definition	Wert	Einheit
L_S	Stationaler Leitwert	227,00	W/K
L_{pe}	außer harmonischer Leitwert	184,81	W/K
$T_{g,ave}$	mittl. Erdoberflächentemperatur	9,9	°C
T_i	mittl. Innentemperatur Sommer	25,0	°C
T_i	mittl. Innentemperatur Winter	20,0	°C
$T_{g,\wedge}$	Amplitude von $T_{g,ave}$	9,4	°C
Ψ_B^*	Wärmebrücken Bodenplatte	0	
A	Fläche Bodenplatte	219,4	m ²
$\Psi_{P,stat}^*$	stationärer Anteil der Wärmebrückenverluste	0	
U_{WB}	U-Wert Kellerwand unterirdisch	1,680	W/(m ² K)
z	Tiefe Keller	0,86	m
P	Umfang Keller	67,4	m

Der Faktor $(U_{WB} \times z \times P)$ kommt nur zum Tragen wenn es sich um einen beheizten Keller oder um eine sich im Erdreich befindliche Bodenplatte handelt.

Sowohl im unsanierten als auch im sanierten Fall befindet sich die Bodenplatte des Gebäudes im Erdreich. Aufgrund der unterschiedlichen Werte für U_{WB} und des veränderten Kellerumfangs ergeben sich mit obiger Formel verschiedene Bodentemperaturen wie Tabelle 5 und 6 zeigen.

Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
15,5	15,3	15,6	16,1	16,9	21,0	21,5	21,7	18,0	17,4	16,7	16,0

Tabelle 5 Bodentemperaturen PHPP im unsanierten Fall (Bodenplatte im Erdreich) in °C

Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
11,58	11,41	12,22	13,79	15,71	20,01	21,12	21,30	17,93	16,36	14,44	12,69

Tabelle 6 Bodentemperaturen PHPP im sanierten Fall (Bodenplatte im Erdreich) in °C

3.3.2 Auswertung

Ziel dieses Unterpunktes ist die Bewertung der bisher erstellten Gebäudesimulationen im sanierten und unsanierten Zustand sowie die Einschätzung der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen.

Während PHPP über die angegebene Heizperiode von 219 Tagen bilanziert, simuliert EnergyPlus über ein gesamtes Jahr. Um die Werte anzupassen, werden die monatlichen Ausgaben von E+ mit den vom PHPP berechneten Verlustfaktoren³⁰ multipliziert.

Im ersten Simulationsgang ergeben sich folgende Ergebnisse, wobei sich die Bezeichnung "Losch" auf den unsanierten und "LoschSan" auf den sanierten Zustand bezieht.

	Name der Simulation	Transmission [kWh/a]	Lüftung [kWh/a]	interne Gewinne [kWh/a]	Heizbedarf [kWh/a]
Uns.	E+Losch1_rsi	-79243	-18375	8265	91317
	PHPP_Losch	-157688	-15333	7025	165995
%	E+/PHPP	50%	120%	118%	55%
San.	E+LoschSan1_rsi	-49254	-16719	7516	60703
	PHPP_LoschSan	-43439	-13698	6276	50863
%	E+/PHPP	113%	122%	120%	119%

Tabelle 7 Ergebnisse PHPP und E+ nach dem ersten Simulationsgang in kWh/a

Besonders markant ist die Abweichung der Transmissionsverluste zwischen E+ und PHPP im unsanierten Fall und der daraus resultierende Heizbedarf.

Nach einer kritischen Überprüfung der Eingaben der ersten Fassung, werden noch einmal die Bodenwerte korrigiert und falsche Angaben bei Lambda-Werten und dem g-Wert der Verglasung verbessert. Bezüglich der Strahlungswerte wurde folgender Modellunterschied festgestellt: Während das PHPP mit einem Monatsmittelwert rechnet, bildet EnergyPlus die Strahlung dynamisch schwankend ab und verwendet den eingegebenen Wert als Maximum.

Abbildung 16 auf der nächsten Seite stellt dies schematisch dar, wobei E+Alt für den verwendeten Wert und für E+Neu den gewünschten Wert steht.

³⁰ vgl. max. Verluste im Kapitel 3.3.1 Klimadaten

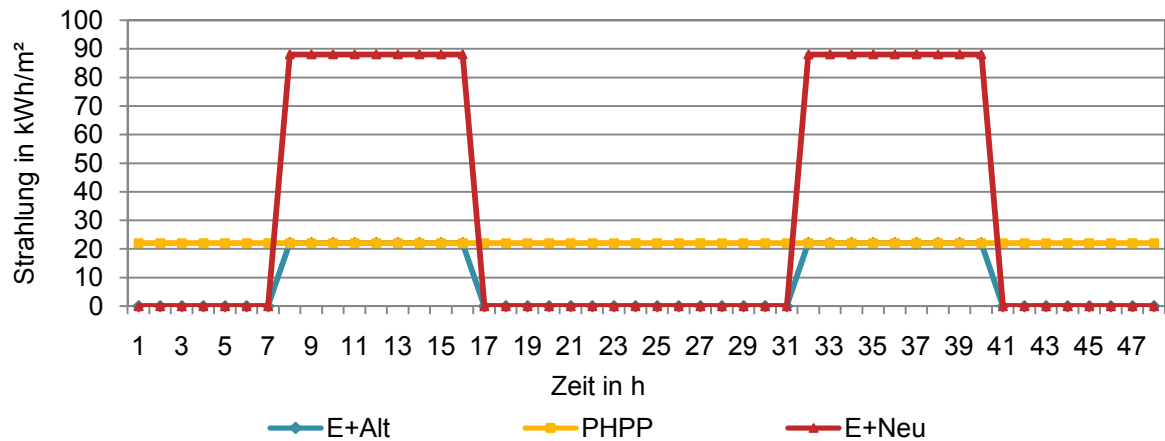


Abbildung 16 Schwankung der Strahlungswerte in kWh/(m²xZeit)

Der Übertrag der Mittelwerte in EnergyPlus ist somit falsch. Um die Schwankung zu ermitteln, wird anhand der von E+ berechneten Strahlung die Anzahl der Sonnenstunden berechnet. Der Monatsmittelwert geteilt durch die Sonnenstunden pro Monat ergibt die neuen Strahlungswerte.

Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
88	144	194	273	319	294	307	294	221	157	93	56

Tabelle 8 errechnete Strahlungswerte in kWh/(m²xMonat)

Des Weiteren erwies sich die Eingabe der Wärmeübergänge als fehlerhaft, da EnergyPlus nicht mit den Wärmeübergangswiderständen sondern den Wärmeübergangskoeffizienten, den Reziproken der Widerstände, arbeitet. Nach beschriebenen Korrekturen ergeben sich folgende Werte:

	Name der Simulation	Transmission [kWh/a]	Lüftung [kWh/a]	interne Gewinne [kWh/a]	Heizbedarf [kWh/a]
Uns.	E+Losch1_fil	-167042	-18778	8265	178301
	PHPP_Losch1	-177215	-15333	7025	185524
%	E+/PHPP	94,26%	122,47%	117,66%	96,11%
San.	E+LoschSan1_fil	-39547	-17197	7516	53474
	PHPP_LoschSan1	-44028	-13698	6276	51452
%	Saniert_fil/PHPP	89,82%	125,55%	119,76%	103,93%

Tabelle 9 Ergebnisse PHPP und E+ in der verbesserten Simulation

Erkennbar sind die verringerten Abweichungen zwischen PHPP und EnergyPlus, welche sich in einem nachvollziehbaren Rahmen bewegen. Die Differenz der Transmissionsverluste kann

durchaus aus der unterschiedlichen Geometrieingabe resultieren. Zudem basiert das 3D-Modell auf den realen Raumhöhen während das PHPP standardmäßig 2,5m angibt. Dies führt zu unterschiedlichen Volumenangaben, was der Grund für die abweichenden Lüftungsverluste sein kann. Die Differenzen der internen Wärmegewinne ergeben sich im Zusammenhang mit der im PHPP verwendeten Energiebezugsfläche aus den verschiedenen Flächenangaben. Insgesamt liegen die Abweichungen in einem akzeptablen Bereich, sodass von diesen Simulationen ausgehend der Einfluss der eben genannten und weiterer Faktoren im Kapitel 4 "Varianten und Messwerte" genauer untersucht werden kann. Die erstellten Ausgangsvarianten werden fortfolgend als E+0 und PHPP-0 bezeichnet.

ENERGIEBILANZ

Das PHPP ermöglicht die Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs sowohl mit dem monatlichen Verfahren nach EN13790³¹ als auch mit dem monatlichen PHPP-Verfahren, welches eine abgewandelte Heizperiode nutzt. Unter Verwendung des erstgenannten liegt der Wert für den Jahresheizwärmebedarf des unsanierten Gebäudes bei 312 kWh/(m²a) und im sanierten Fall bei 93 kWh/(m²a). Nach dem PHPP Verfahren ergeben sich 291 kWh/(m²a) im unsanierten Zustand und 90 kWh/(m²a) nach der Sanierung. Die Differenz beider Methoden beträgt im Bestandsgebäude 21 kWh/(m²a) und lediglich 3 kWh/(m²a) im sanierten Gebäude. Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen kann der Jahresheizwärmebedarf auf weniger als ein Drittel des Ursprungwertes abgesenkt werden. In ähnlichem Maße wurde der Heizwärmebedarf von 107W/m² auf 37 W/m² herabgesetzt.

Die auf den nächsten Seiten folgenden Diagramme geben einen Überblick über die Verteilung der Wärmegewinne und Verluste im Jahresverlauf. Sie zeigen jeweils den unsanierten und sanierten Zustand; sowohl im PHPP als auch in E+. Im Passivhausprojektierungspaket wird diese Übersicht standardisiert erzeugt, sodass sie dem PHPP direkt entnommen werden konnte. Sie bildet die Vorlage für die Darstellung in E+.

Die angetragenen spezifischen Wärmegewinne umfassen die Wärmegewinne durch solare Strahlung und interne Wärmequellen. Transmissions- und Lüftungsverluste sind zu den spezifischen Verlusten zusammengefasst.

³¹ EN 13790: Europäische Norm, Titel: Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs von Heizung und Kühlung

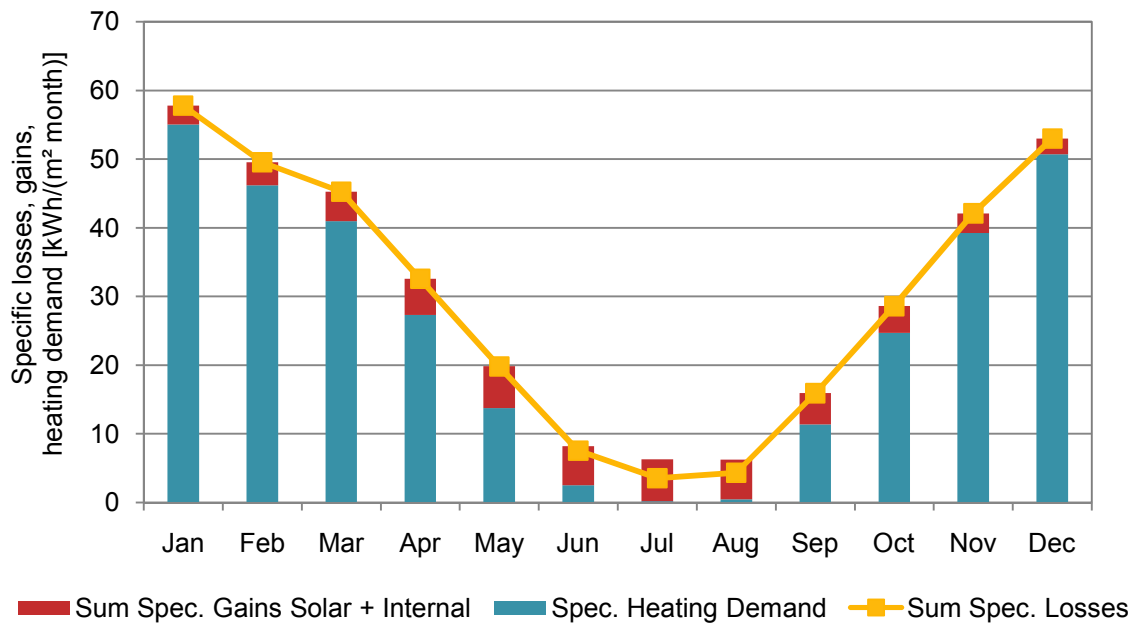


Abbildung 17 Spezifische Gewinne und Verluste im unsanierten Zustand im PHPP in kWh/m²

In den Diagrammen wird deutlich erkennbar, dass die Summe der Wärmeverluste des Gebäudes infolge der Sanierungsmaßnahmen sinkt. Der Anteil der Gewinne an der Deckung der Verluste steigt, wodurch der Heizbedarf deutlich fällt. Während in den Monaten Juni und August im unsanierten Fall noch ein geringer Heizbedarf auftritt, ist dieser nach der Sanierung im genannten Zeitraum gleich Null.

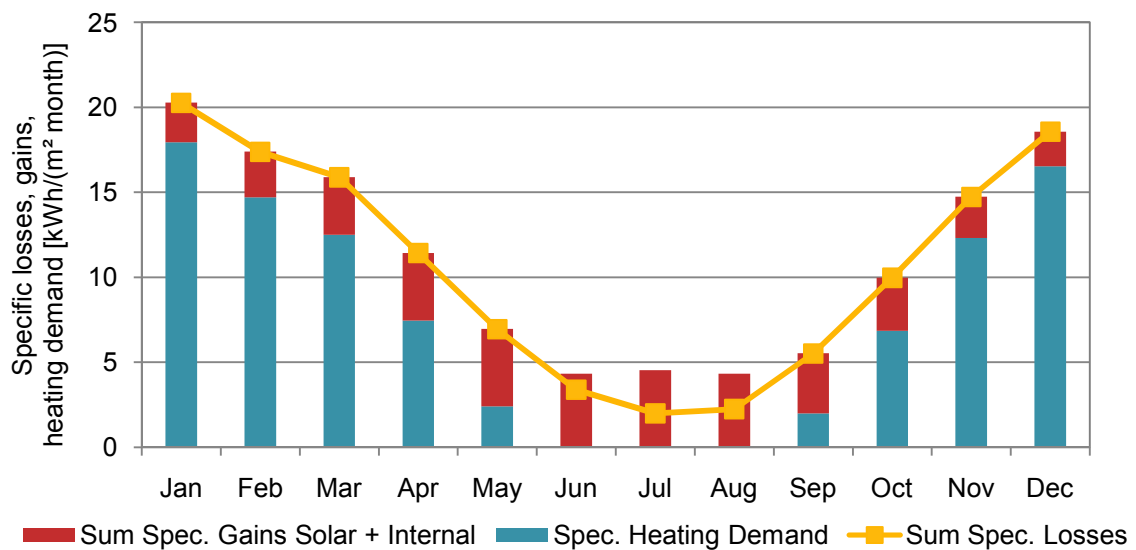
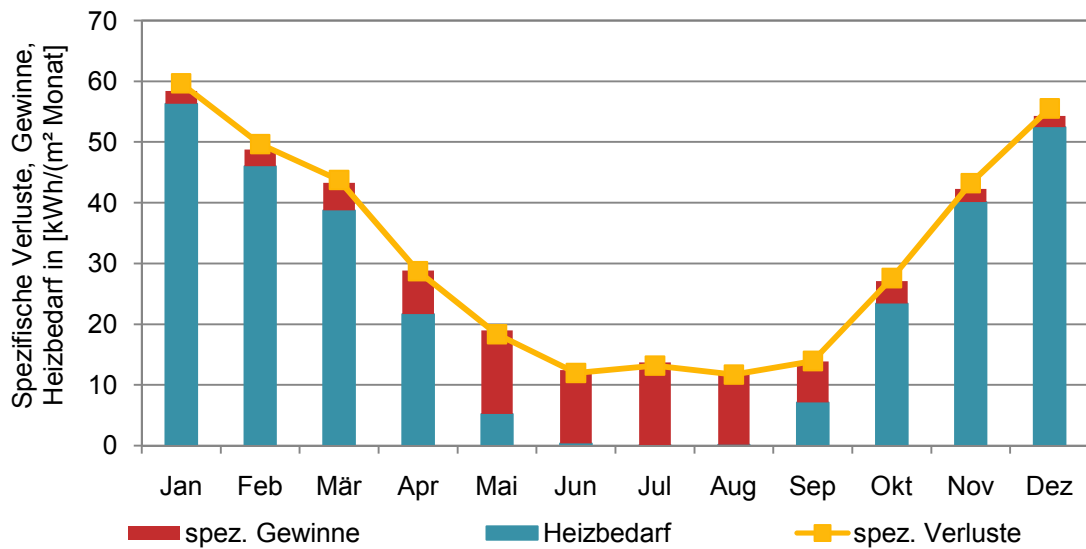
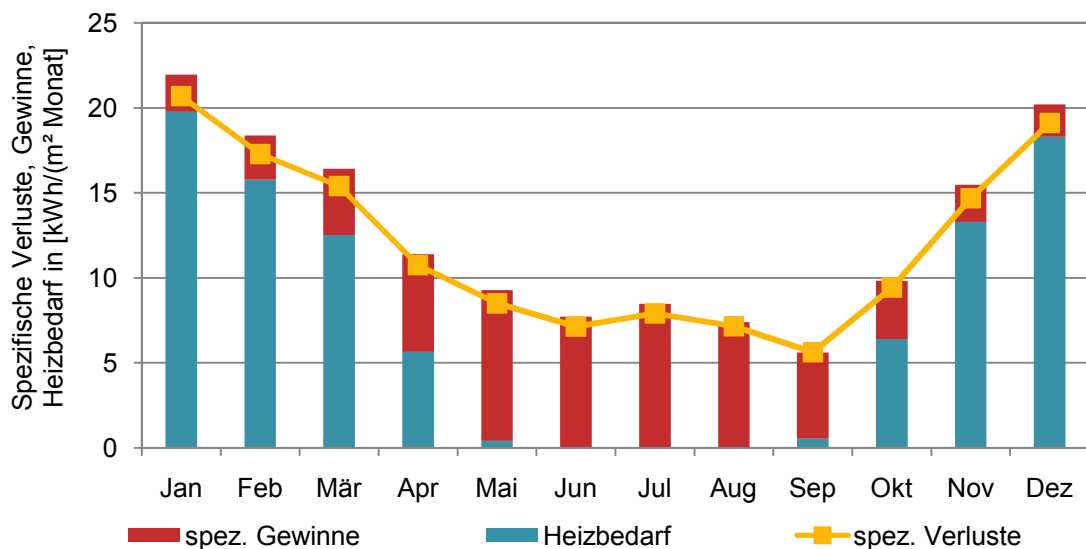


Abbildung 18 Spezifische Gewinne und Verluste im sanierten Zustand im PHPP in kWh/m²

Abbildung 19 Spezifische Gewinne und Verluste im unsanierten Zustand nach E+ in kWh/m^2

Im Vergleich zu den Werten aus dem PHPP liegen die spezifischen Verluste in den Sommermonaten höher. Insgesamt ist der Anteil der spezifischen Wärmegewinne in E+ jedoch größer, sodass der Heizbedarf im unsanierten Fall in den Monaten Juni, Juli und August gegen Null geht. Im sanierten Zustand reicht diese Periode von Mai bis September.

Abbildung 20 Spezifische Gewinne und Verluste im sanierten Zustand nach E+ in kWh/m^2

Die im Verlauf der Sanierungsmaßnahmen erreichte Reduzierung der spezifischen Verluste wird vor allem durch den Rückgang der Transmissionsverluste erreicht. Diese sinken infolge der Innendämmung des Gebäudes auf ein Viertel ihres Ausgangswertes. Die folgende Abbildung verdeutlicht diese Entwicklung.

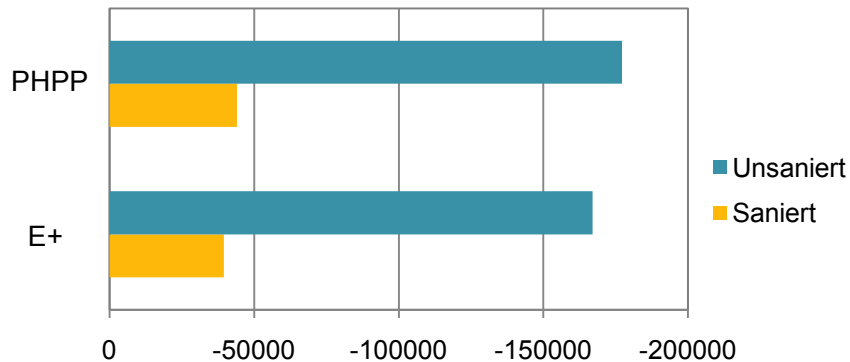


Abbildung 21 Senkung der Transmissionsverluste in Folge der Sanierung in kWh/a

Das im PHPP verwendete Ein-Zonen-Modell vernachlässigt die internen Speichermassen des Gebäudes, wodurch die Hüllfläche einen besonderen Stellenwert bekommt. Bei Vorhandensein einer gut gedämmten thermischen Hülle sind Wärmeabgabe und Speichereffekte über innere Wände gering, da die Schwankungen der Innenraumtemperatur durch die Dämmung gedämpft werden. In der Umsetzung einer energetischen Sanierung wird eben genanntes Verhalten angestrebt, indem die die verschiedenen Temperaturzonen abgrenzenden äußeren Flächen (Außenwände, Dach und Bodenplatte) energetisch ertüchtigt werden während interne Elemente kaum Veränderungen erfahren. Das Annähern des Gebäudes an ein Ein-Zonen-Modell wie es im PHPP verwendet wird, stellt demnach die Zielstellung einer energetischen Optimierung dar. Nachstehende Abbildung zeigt diesen Ansatz am Beispiel der durchschnittlichen Senkung der U-Werte von Hüllfläche und Zwischendecken in der Gründerzeitvilla.

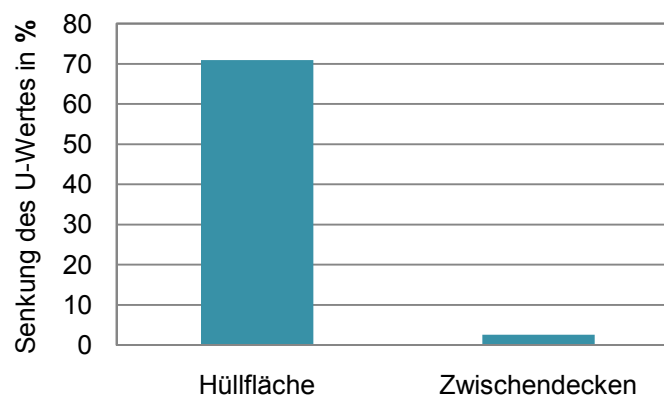


Abbildung 22 Senkung der U-Werte von Hüllfläche und Zwischendecken in %

Eine mögliche Fehlerquelle besteht dabei in der korrekten Erfassung aller Hüllflächen des Gebäudes. Für die Eingabe im PHPP muss diese vom Nutzer selbstständig ermittelt werden, was für ein Passivhaus aufgrund seiner möglichst kompakten Formgebung in der Regel keine Schwierigkeit darstellt. Ganz anders hingegen gestaltet sich diese Aufgabe für die meisten Bestandsgebäude. Neben verwinkelten Dächern verfügen sie über Erker, Mauervorsprünge oder weitere dekorative Elemente, was die Zusammenstellung der Flächen erschwert. Im Vergleich zu dieser händigen Ermittlung, erfolgt die Übergabe der Daten aus einem 3D Gebäudemodel, unter Annahme einer korrekten Abbildung des Gebäudes, schneller und präziser.

3.3.3 Zeittabelle

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die zur Erstellung der Simulationen benötigten Zeit. Im Text finden sich ebenfalls Anhaltspunkte zur Bearbeitungsdauer der einzelnen Schritte. Insgesamt ist zu bemerken, dass die Komplexität des darzustellenden Gebäudes sowie die Bereitstellung der Daten seitens des Architekten einen maßgeblichen Einfluss hat. Die in Tabelle 10 angegebenen Zeitwerte sind beispielhaft für die Dauer der Bearbeitung zu verstehen.

	Dateneingabe/Modellierung	Änderungen	Ergebnis
PHPP	30h	2h	0h
DB/E+	24h (DB)	42h (E+)	4h (E+)

Tabelle 10 Zeitwerte für beide Simulationen in h

Die Erstellung der Eingaben im Passivhausprojektierungspaket gestalten sich durch die Tabellenblätter in übersichtlicher Form, wobei die Anzahl der Reiter sehr groß ist. Nicht immer ist auf den ersten Blick ersichtlich, welche Angaben zur Berechnung notwendig sind und an welchen Stellen auf Standardwerte zurückgegriffen werden kann. Das Handbuch zum Projektierungspaket gibt Hilfestellung.

Um die Eingaben zur Gebäudegeometrie zusammenzustellen, wurden in etwa drei Tage benötigt. Materialeigenschaften und Fenster erforderten einen weiteren Tag, da die Fensterabmessungen einer bereits erstellten Fensterliste entnommen werden konnten und nicht separat ermittelt werden mussten. Im Tabellenreiter "Klimadaten" wird anschließend der entsprechende Klimadatensatz ausgewählt. Werden wie in dieser Arbeit die PHPP-

Standardwerte für interne Wärmegewinne, Heizung und Lüftung verwendet, sind bereits alle Eingaben komplett. Die Ergebnisse sind sofort ersichtlich. Änderungen wie die Eingabe der Wärmebrücken können bei vorher ermittelten Längen und Psi-Werten innerhalb weniger Stunden durchgeführt werden. Die Auswirkung der veränderten Werte kann wieder sofort beurteilt werden, eine Simulationszeit existiert praktisch nicht.

Die 3D-Modellierung der Gründerzeitvilla erfolgte mit Hilfe des Programmes DesignBuilder. Ist die Arbeit mit 3D-Zeichenprogrammen bekannt, kann auch ein Erstbenutzer zügig ein Modell aufbauen. Die Erstellung des Gebäudemodellbes beanspruchte zwei Tage, ein weiterer wurde für die Festlegung der Materialien benötigt. Nach dem Export der Daten in EnergyPlus erfolgte die Annäherung an das PHPP. Dieser nicht triviale Prozess nahm sehr viel Zeit in Anspruch. Für die Abbildung der Wärmebrücken und die Anpassung von Strahlung und Temperatur wurden eigens Programmeabläufe in EnergyPlus geschrieben. Durch die Trennung von E+ und DesignBuilder wird es schwierig, verschiedene Änderungen, zum Beispiel an der Geometrie, vorzunehmen ohne in den DesignBuilder zurück zu wechseln. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Simulationszeit, welche im Bereich einer halben Stunde pro Simulation lag. Insgesamt sind Änderungen langwieriger in ihrer Durchführung, da jedes Mal neu simuliert werden muss. Durch den Einsatz des Tools resultCSV kann eine übersichtliche Zusammenstellung der Ausgaben erzeugt werden, sodass eine schnelle Auswertung der Ergebnisse möglich ist. Die Abbildung zeigt noch einmal die Dauer der Einzelschritte im Verlauf der Simulation, wobei sich die abgebildete Dateneingabe unter EnergyPlus auf die Erstellung des Modells im DesignBuilder bezieht.

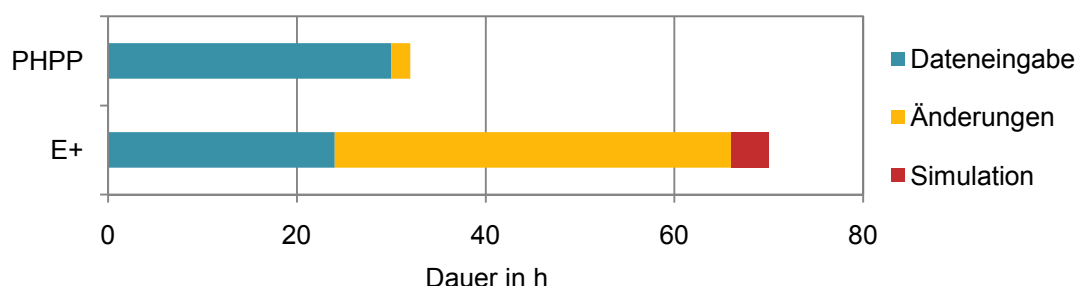


Abbildung 23 Dauer der Simulationsschritte in Stunden

Abschließend lässt sich erkennen, dass die Simulation im PHPP aufgrund des vereinfachten Modells schneller erfolgt, in Anbetracht der komplexen Geometrie des untersuchten Gebäudes jedoch fehleranfälliger bei der Eingabe der Flächen ist.

4 VARIANTEN UND MESSWERTE

Dieses Kapitel dient der Vorstellung der durchgeführten Varianten und ihrer Ergebnisse. Anschließend werden diese mit im Gebäude aufgenommenen Messwerten verglichen.

4.1 VARIANTENANALYSE

In diesem Unterpunkt werden verschiedene Variationen der bereits im Kapitel 3 beschriebenen Simulationen durchgeführt, um den Einfluss ausgewählter Faktoren näher zu untersuchen. In den einzelnen Paragraphen finden sich Ergebnistabellen.

Untersuchte Varianten:

- Variante 1: Implementierung der Energiebezugsfläche des PHPP in E+
- Variante 2: Eingabe der Wärmebrücken in PHPP und E+
- Variante 3: kombinierte Eingabe von Energiebezugsfläche und Wärmebrücken in E+
- Variante 4: vereinfachte Anpassung an PHPP im DesignBuilder/E+

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in den Tabellen folgende Abkürzungen genutzt:

E+	Änderung in EnergyPlus
PHPP	Änderung im Passivhausprojektierungspaket, "-" als Trennungszeichen
0	Ausgangsvariante
1	Variante 1
1.1	Abwandlung von Variante 1
2	Variante 2 usw.
Unsan.	Unsanziert
San.	Saniert
V. bzw. %	Verhältnis in %

Ein Verzeichnis aller Variantenabkürzungen sowie eine Übersicht aller Ergebnisse befinden sich im Anhang Teil D.

VARIANTE 1: PHPP ENERGIEBEZUGSFLÄCHE

Betrachtet man nur die Grundflächenangaben beider Programme so sind diese annähernd identisch, da für die Bestimmung der Energiebezugsfläche (EBF) im PHPP ausnahmsweise und im DesignBuilder immer der Innenmaßbezug verwendet wird. Allerdings werden für die EBF nicht alle Räume und Flächen erfasst. In der Ausgangssimulation wird eine erste Annäherung an dieses Problem unternommen, indem die Auswahl der Räume über eine Zonenliste dem PHPP angepasst wird. Um noch präziser zu werden und auch um zeichnerische Abweichungen auszuschließen, werden in dieser Variante die Grundflächen im EnergyPlus durch die im PHPP eingegeben Werte ersetzt. Im Untergeschoss werden die Flächen auf 60% ihrer Größe verkleinert, um die Energiebezugsfläche korrekt abzubilden. Des Weiteren werden die Volumina der Zonen nach den realen Höhen im Gebäude neu berechnet und eingesetzt. Die entstehenden E+ Dateien tragen den Namen E+1.

Die Größe der Grundfläche beeinflusst unter anderem die internen Wärmegewinne und über das Volumen auch die Lüftung. Die vertikalen Flächen, welche für Wärmeabgabe und solare Strahlung zur Verfügung stehen, weisen jedoch nach wie vor unterschiedliche Werte auf. Aufgrund des Außenmaßbezuges sind sie im PHPP größer als in EnergyPlus.

Da das PHPP statt der realen Raumhöhe einen Standardwert nutzt, wird zusätzlich die Variante PHPP-1 mit der gemittelten realen Höhe von 2,9 m erstellt. Der Standardwert liegt bei 2,5 m und soll laut Projektierungshandbuch nicht verändert werden. Im Fall der Gründerzeitvilla, welche über hohe Decken verfügt, ist er jedoch nicht zutreffend.

Tabelle 10 auf der nächsten Seite stellt die Transmissions- und Lüftungsverluste, die internen Wärmegewinne und den Heizbedarf der Ausgangssimulation und der ersten Variante im Vergleich dar. Die Grundvariante des Passivhausprojektierungspaketes ist in Kapitel 3.1 beschrieben und wird unter PHPP-0 in der Tabelle geführt während die in Kapitel 3.2 erarbeitete Ausgangsvariante von EnergyPlus die Bezeichnung E+0 erhält.

	Name der Variante	Transmission [kWh/a]	Lüftung [kWh/a]	interne Gewinne [kWh/a]	Heizbedarf [kWh/a]
Unsan.	E+0	-167042	-18778	8265	178301
	E+1	-167041	-16527	6791	177525
	PHPP-0	-177215	-15333	7025	185524
	PHPP-1	-177215	-17787	7025	187977
V. in %	E+0/PHPP-0	94,26%	122,47%	117,66%	96,11%
	E+1/PHPP-0	94,26%	107,78%	96,68%	95,69%
	E+1/PHPP-1	94,26%	92,92%	96,68%	94,44%
Saniert	E+0	-38117	-17204	7516	52053
	E+1	-38097	-15930	6407	51874
	PHPP-0	-44028	-13698	6276	51452
	PHPP-1	-44028	-15889	6276	53643
V. in %	E+0/PHPP-0	86,57%	125,60%	119,76%	101,17%
	E+1/PHPP-0	86,53%	100,25%	102,09%	100,82%
	E+1/PHPP-1	90,51%	111,67%	102,09%	102,74%

Tabelle 11 Ergebnisse PHPP und E+ in der ersten Variante

Im unsanierten Fall nähern sich die Lüftungsverluste und die internen Wärmegewinne an die PHPP-Werte an, die Abweichung des Heizwärmebedarfes vergrößert sich jedoch durch die geänderten Flächen und Volumina. Bezüglich der Änderung der Raumhöhe im PHPP zeigt sich keine Annäherung der Ergebnisse im unsanierten Fall. Die Abweichung bleibt weiterhin erhalten mit dem Unterschied, dass der PHPP-Wert den EnergyPlus-Wert übersteigt. Wie in [6] beschrieben, besteht die Tendenz eines überhöhten Luftvolumenstromes.

Im sanierten Fall werden durch die Variante 1 die Lüftungsverluste und die internen Wärmegewinne an die PHPP-Werte herangeführt, während sich die Abweichung im Bezug auf den Heizwärmebedarf nur minimal verbessert. Im Vergleich mit der PHPP-Variante der angepassten Raumhöhen wird für den Lüftungsverlust, die internen Wärmegewinne und den Heizwärmebedarf eine fast 100%ige Übereinstimmung erreicht. Eine Überhöhung des Luftvolumenstromes nach [6] findet nicht statt.

Die folgende Abbildung zeigt alle Simulationen, wobei die Transmissionsverluste (T-Verluste) und die Lüftungsverluste (L-Verluste) zur Übersichtlichkeit ebenfalls positiv angetragen sind. Interne Wärmegewinne werden unter IWG dargestellt.

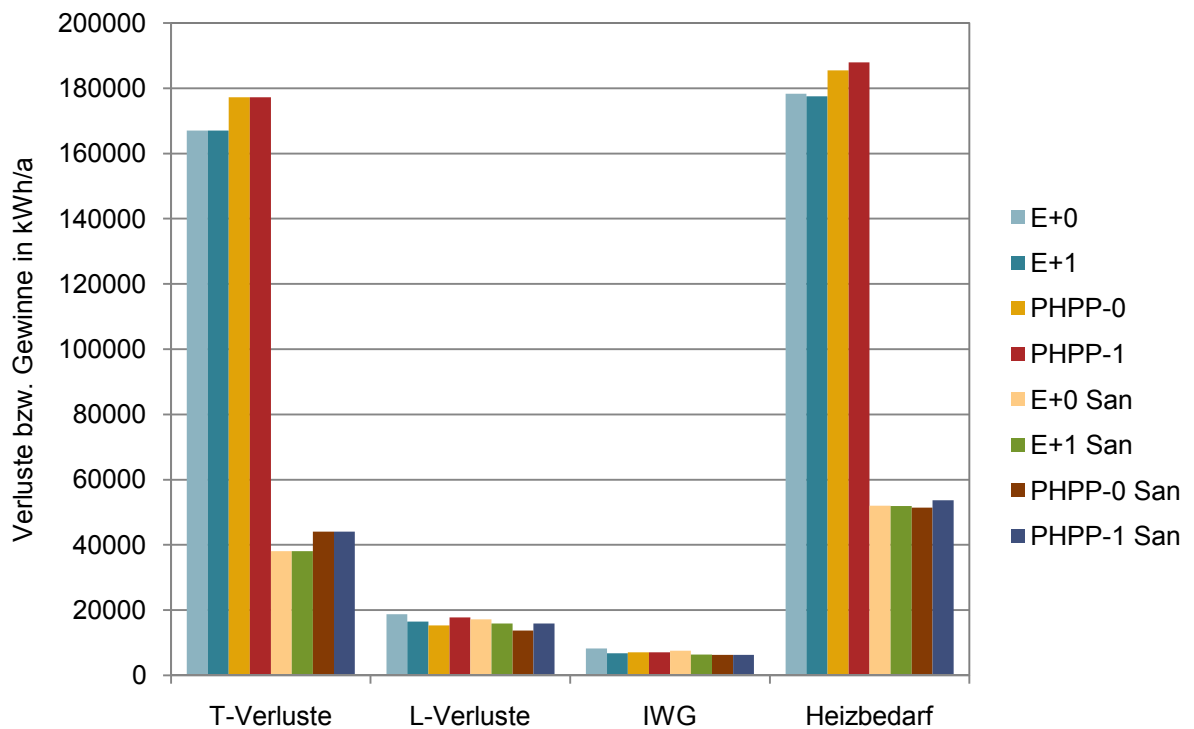


Abbildung 24 Vergleich 1.Variante und Ausgangssituation

Untervariante - klimatische Bedingungen

Um sowohl dem PHPP als auch EnergyPlus möglichst identische Randbedingungen zu geben, wurden die Außentemperaturen, die Strahlungswerte und die Taupunkttemperaturen eigens mit einem im EnergyPlus eingebauten Algorithmus auf die PHPP-Werte abgeändert. Unabhängig davon werden alle Simulationen mit dem Wetterdatensatz von Potsdam durchgeführt. Da sich die im PHPP verwendeten Klimadaten auf die Vornorm DIN 4108 Teil 6 und somit auch auf das Testreferenzjahr von Potsdam beziehen, bleibt die Notwendigkeit der Abänderung der Werte zu überprüfen. Es wird eine Abwandlung der ersten Variante ohne diese simuliert, welche die Namenskürzung E+1.1 trägt. Anzumerken bleibt, dass die im PHPP ermittelten Bodentemperaturen jedoch unverändert in EnergyPlus enthalten sind. Ausführliche Werte sind im Kapitel 3.3.1 Klimadaten nachzulesen. Die Tabelle der nächsten Seite zeigt die Werte beider Varianten im unsanierten Zustand, wobei dieser als repräsentativ betrachtet werden kann.

	Name der Variante	Transmission [kWh/a]	Lüftung [kWh/a]	interne Gewinne [kWh/a]	Heizbedarf [kWh/a]
Uns.	E+1	-167041	-16527	6791	177525
	E+1.1	-169273	-15916	6791	178894
%	E+1/E+1.1	98,68%	103,83%	100,00%	99,24%

Tabelle 12 Einfluss der geänderten Wetterdaten im E+

Wie die Ergebnisse zeigen, stimmen beide Varianten fast vollständig überein. Die Nutzung eines Wetterprogrammes ist somit nicht notwendig. Im Vergleich dieser Abwandlung von Variante 1 mit dem PHPP Ausgangswert wird, wie in der folgenden Abbildung erkennbar, die Annäherung von E+ und PHPP verbessert. Ausführliche Werte befinden sich im Anhang.

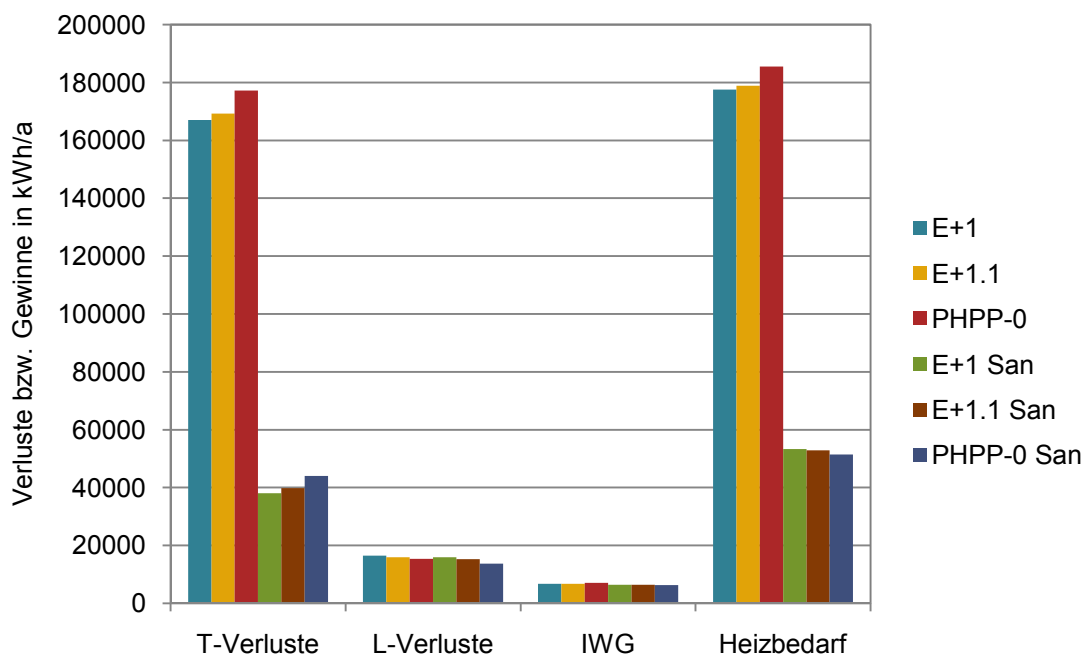


Abbildung 25 Annäherung durch Abwandlung der 1. Variante

VARIANTE 2: EINFLUSS DER WÄRMEBRÜCKEN

Diese Variante widmet sich jenen Bereichen am Gebäude, die aufgrund von Geometrie oder Materialzusammenstellung veränderte U-Werte aufweisen und dadurch sogenannte Wärmebrücken bilden. Für die Berechnung der Wärmebrückenfaktoren, der Psi-Werte, wurde das Programm THERM zu Hilfe genommen. Ursprünglich für die Berechnung von Fenstern konzipiert, ermittelt es in 2D die U-Werte, der durch die Wärmebrücke beeinflussten Konstruktion. Per Formel können anschließend die Psi-Werte ausgerechnet werden. Die Berechnungen dazu befinden sich im Anhang.

In dieser Variante soll nur beispielhaft der Einfluss der Wärmebrücken auf die Ergebnisse beider Programme untersucht werden. Es werden daher nur ausgewählte längenbezogene Wärmebrücken am Gebäude betrachtet. Dies betrifft Übergänge an Böden, Decken und Außenecken. Zudem erfolgt die Simulation nur am sanierten Fall, da der Einfluss dort größer ist als im unsanierten Zustand. Abbildung 26 zeigt eine Übersicht der horizontalen Wärmebrücken, ein Schaubild der Wärmebrücken an Außenecken befindet sich im Anhang.

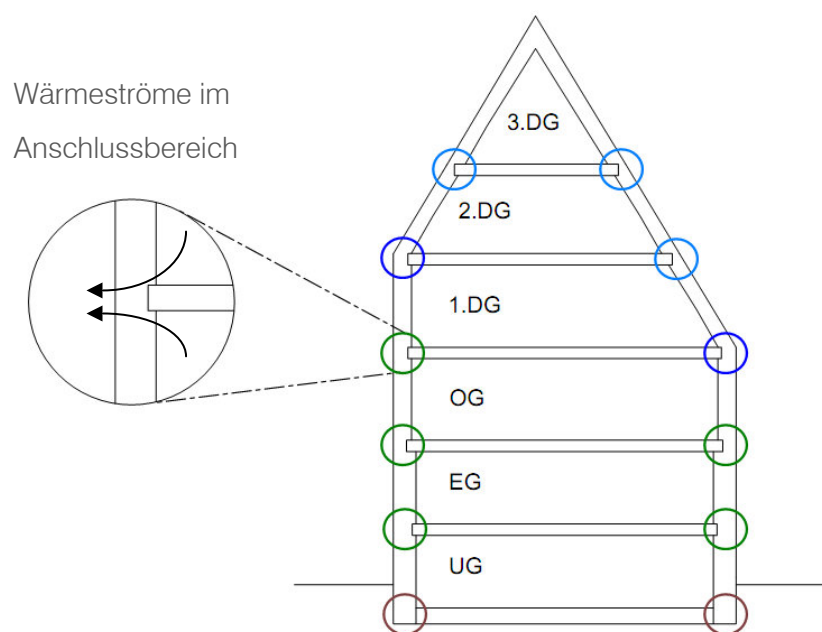


Abbildung 26 Übersicht horizontale Wärmebrücken

Während die Psi-Werte und die zugehörigen Längen der Wärmebrücken im PHPP direkt im Tabellenblatt "Flächen" eingegeben werden, wird für die Eingabe in EnergyPlus ähnlich der Eingabe der Klimadaten ein Programm im Unterpunkt "Energy Management System"

geschrieben. Zu beachten ist außerdem, dass die Längen im PHPP außenmaßbezogen und in E+ innenmaßbezogen angegeben werden.

Tabelle 13 vergleicht die Basisvariante mit Variante 2 für den sanierten Fall. Dargestellt wird der Einfluss der Wärmebrücken auf das Ausgangsergebnis und auf die Annäherung von PHPP und EnergyPlus.

	Name der Variante	Transmission [kWh/a]	Lüftung [kWh/a]	interne Gewinne [kWh/a]	Heizbedarf [kWh/a]
Saniert	E+0	-38117	-17204	7516	52053
	PHPP-0	-44028	-13698	6276	51452
	E+2	-42368	-17165	7516	56233
	PHPP-2	-44737	-13698	6276	53643
%	E+2/E+0	111,15%	99,77%	100,00%	107,81%
	PHPP-2/PHPP-0	101,61%	100,00%	100,00%	101,38%
	E+2/PHPP-2	94,71%	125,31%	119,76%	107,81%

Tabelle 13 Einfluss der Wärmebrücken im sanierten Zustand

Wie in der Tabelle erkennbar, fällt die Reaktion auf die Wärmebrücken im PHPP geringer aus als in E+. Die Ursache dafür liegt in der Verwendung der unterschiedlichen Maßbezüge begründet. Im PHPP wird der Außenmaßbezug verwendet, wodurch die Außenwände eine größere Fläche besitzen und dementsprechend höhere Transmissionsverluste aufweisen. In EnergyPlus wird im Gegensatz dazu mit dem Innenmaßbezug gearbeitet. Die innenliegende Seite der Außenwand

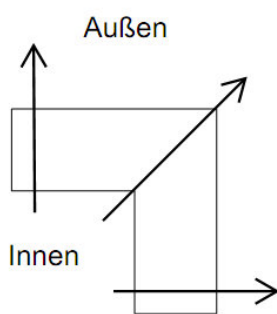


Abbildung 27 Außenecke

bietet eine kleinere Fläche und daraus resultierend geringere Transmissionsverluste. Über die Wärmebrücken wird dieser Effekt wieder ausgeglichen, da der Verlust über die Wärmebrücke im Innenmaßbezug größer ist als im Außenmaßbezug. Nebenstehenden Abbildung verdeutlicht den Vorgang. Die innenliegende Fläche, welche für den Wärmetransport zur Verfügung steht, ist kleiner als die außenliegende Fläche. Da der Wärmestrom gleich bleibt, muss der innenmaßbezogene Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmebrücke größer sein als der Außenmaßbezogene.

In einem physikalisch idealen Modell käme es durch die Verwendung der Wärmebrücken zu einer Übereinstimmung der Transmissionsverluste. Die vorliegende Variante nähert die Werte bereits deutlich an, wie auch die Abbildung der folgenden Seite zeigt.

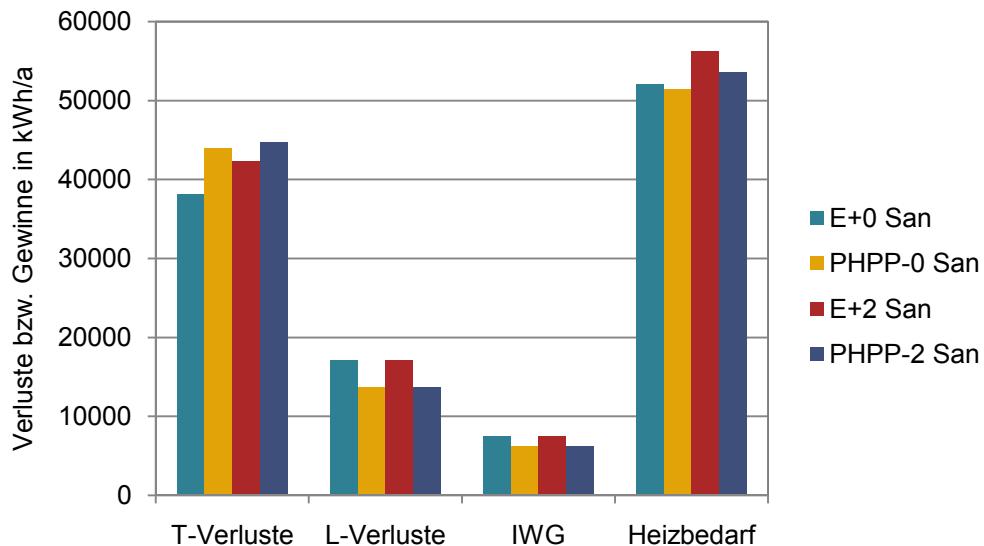


Abbildung 28 Vergleich Ausgangssituation und 2. Variante

VARIANTE 3: KOMBINATION WÄRMEBRÜCKEN UND PHPP ENERGIEBEZUGSFLÄCHE

Diese Variante bildet eine Kombination aus den vorherigen Varianten, das bedeutet, dass zum einen Flächen und Volumina aus dem PHPP übertragen werden und zum anderen die Wärmebrücken berücksichtigt werden. Aufgrund letzterer erfolgt die Simulation wie bereits in Variante 2 nur für den sanierten Fall, da der Einfluss der Wärmebrücken dort bedeutender ist als im unsanierten Zustand.

	Name der Variante	Transmission [kWh/a]	Lüftung [kWh/a]	interne Gewinne [kWh/a]	Heizbedarf [kWh/a]
Saniert	E+2	-42368	-17165	7516	56233
	E+3	-42368	-15893	6407	56052
	PHPP-2	-44737	-13698	6276	53643
%	E+2/PHPP-2	94,71%	125,31%	119,76%	107,81%
	E+3/PHPP-2	94,66%	116,03%	102,09%	107,46%

Tabelle 14 Ergebnisse Variante 3 im sanierten Zustand

In Tabelle 14 wird die Wärmebrückenvariante (Variante 2) mit der kombinierten Variante verglichen und die Annäherung der Ergebnisse dargestellt.

Es zeigt sich, dass durch Übertragung der Flächen und Volumina, wobei E+ die reale Raumhöhe verwendet, die Übereinstimmung von E+ und PHPP verbessert werden kann. Besonders die Werte für Lüftungsverluste und internen Gewinne haben sich, wie in der Abbildung der folgenden Seite erkennbar, angenähert. Dieser Effekt konnte bereits in Variante 1

beobachtet werden. Beide Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Bezugsfläche und die Unterschiede im Innen- und Außenmaßbezug, welche durch die Übertragung von Flächen und Volumina übergangen werden.

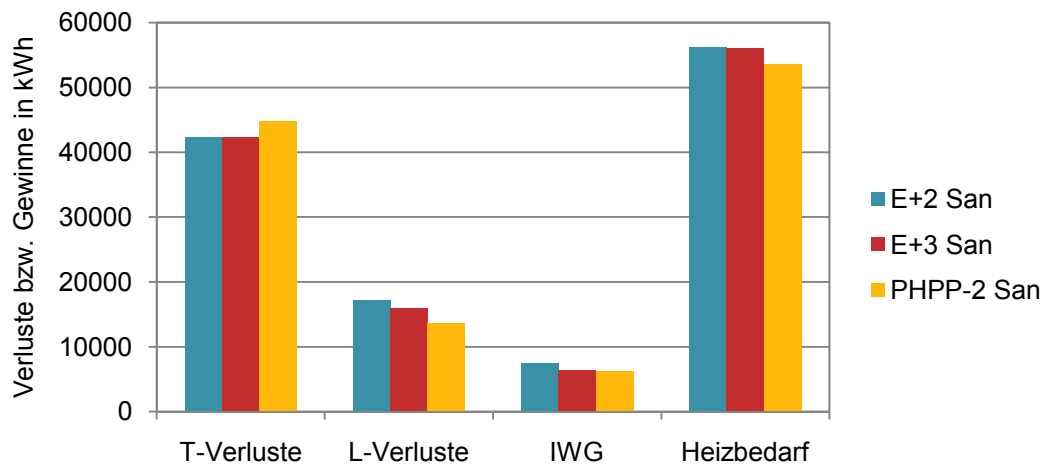


Abbildung 29 Vergleich Variante 2 und 3 in EnergiePlus mit PHPP

VARIANTE 4: DESIGNBUILDER STANDARD

Nachdem die vorherigen Varianten bereits zeigten, dass E+ mit Hilfe von an das PHPP angepassten Werten Ergebnisse erzeugt, die nur geringfügig vom PHPP abweichen, soll diese Variante klären wie sich die Ergebnisse ohne diese Modifikationen entwickeln. Modifikationen meint in diesem Zusammenhang Änderungen in E+ wie das Überschreiben vorhandener Daten, da ein durchschnittlicher Nutzer diese in der Regel nicht ausführt. Im DesignBuilder ist neben der Gebäudemodellierung auch die Eingabe von Nutzungsdaten und Angaben zur Gebäudetechnik möglich, welche über diverse Fenster angewählt werden können. Als Nutzungsart wird Wohngebäude eingestellt. Die Personenanzahl wird auf die im PHPP verwendeten Werten angepasst. Im unsanierten Fall befinden sich rechnerisch 18,2 Personen im Gebäude, woraus sich mit der im DesignBuilder ermittelten Fläche von 860m² eine flächenbezogene Personenbelegung von 0,021163 Personen pro m² ergibt. Aufgrund der veränderten Energiebezugsfläche rechnet das PHPP nach der Sanierung mit 16,3 Personen. Auf die Nutzfläche bezogen ergeben sich 0,01895 Personen pro m². Der DesignBuilder weist den Personenangaben automatisch Zeitpläne für Anwesenheit, Aktivität und Kleidung zu. Über die Zonenliste wird zudem eingestellt, dass die Personen sich im gesamten Gebäude aufhalten. Der vorgeschriebene Zeitplan gibt die Anwesenheit an Wochentagen von 7 Uhr bis 10 Uhr mit eins, das heißt Anwesenheit aller Personen, und von 19 Uhr bis 23 Uhr mit 0,2 an. In den

restlichen Zeitintervallen sind keine Personen anwesend. Am Wochenende sind alle Personen von 7 Uhr bis Mitternacht anwesend. Der Fraction Radiant, ein Faktor zur Beschreibung der von den Personen abgegebenen Wärme in einer Zone, wird mit 0,3 angegeben. Die Aktivitätsrate, welche die gesamten Wärmegewinne (Strahlung, latent und konvektiv) pro Person widerspiegelt, liegt ganztags bei 162, was einer leichten Betätigung entspricht. Für die Bekleidung gilt vom 30.09. bis 31.03. ein clo Faktor³² von 1, für das restliche Jahr von 0,5. Die Infiltrationsrate wird im unsanierten Fall entgegen der PHPP-Annahme von 0,3 1/h mit dem für ein unsaniertes Bestandsgebäude realistischen Wert von 0,7 1/h angegeben. Im sanierten Fall wird der PHPP-Wert 0,3 1/h übernommen, da durch die Sanierungsarbeiten von einer verbesserten Dichtheit des Gebäudes ausgegangen wird. Außerdem wurde die Heizgrenze auf die im PHPP verwendeten 20°C gestellt und die voreingestellte Nachtabsenkung deaktiviert. In Bezug auf die internen Wärmegewinne werden die vorausgewählten Geräte aus der Berechnung entfernt während die angegebenen 5 W/m² zur Beleuchtung unverändert bleiben. Die Beleuchtung findet mit Anwesenheit der Personen statt.

In der EnergyPlus-Datei werden nur die Angaben für die Bodentemperaturen geändert und die Schedules (Zeitpläne) für die Personen zugewiesen, da diese Verknüpfung durch SimplifyIDF gelöscht, die Schedules in zusammengefasster Form jedoch erhalten bleiben. Die entstehende Simulation erhält das Namenskürzel E+4. In Tabelle 15 wird sie im Vergleich mit der PHPP-Ausgangsvariante gezeigt.

	Name der Variante	Transmission [kWh/a]	Lüftung [kWh/a]	interne Gewinne [kWh/a]	Heizbedarf [kWh/a]
Uns.	E+4	-197380	-52830	9645	236258
	PHPP-0	-177215	-15333	7025	185524
%	E+4/PHPP-0	111,38%	344,55%	137,30%	127,35%
San.	E+4	-71671	-23776	9645	86714
	PHPP-0	-44028	-13698	6276	51452
%	E+4/PHPP-0	162,78%	173,58%	153,68%	168,53%

Tabelle 15 Ergebnisse Variante 4 im Vergleich

Im unsanierten Zustand liegt allein die Abweichung der Transmissionsverluste in einem akzeptablen Bereich. Die große Differenz der Lüftungsverluste erklärt sich aus der in EnergyPlus verwendeten Luftwechselrate von 0,7 1/h. Der vom PHPP vorgegebene Wert von 0,3 1/h stellt keinen realistischen Wert für ein Bestandsgebäude dar, womit das PHPP-Ergebnis falsch ist.

³² clo: Maßeinheit für die Bekleidung von Personen, angegeben zwischen 0 (nackt) und 2 (mehrere Kleidungsschichten)

Hinzu kommt, dass beide Programme unterschiedliche Flächenangaben verwenden und somit ein vollkommen anderes Luftvolumen austauschen. Mit 860m² ist die in E+ betrachtete Fläche rund 200m² größer als die Energiebezugsfläche des PHPP, was sich auch in der Differenz der internen Wärmegewinne widerspiegelt. Aus den hohen Lüftungsverlusten resultierend, liegt der Heizbedarf in E+ über dem PHPP-Wert.

Bedeutend größer gestalten sich die Abweichung im sanierten Fall. Die Luftwechselrate wird sowohl im PHPP als auch in E+ mit 0,3 1/h angegeben, sodass die unterschiedlichen Ergebnisse auf die abweichenden Flächen und Volumina zurückgeführt werden können. In Bezug auf die internen Wärmegewinne gilt Ähnliches, denn während die Grundfläche in E+ identisch zur unsanierten Variante bleibt, verkleinert sich die Energiebezugsfläche des PHPP. Dies verdeutlicht den besonderen Stellenwert der Flächenanpassung bei der Reproduktion von PHPP-Ergebnissen. Für die große Abweichung der Transmissionsverluste von PHPP und EnergyPlus konnte zum jetzigen Stand keine Erklärung gefunden werden.

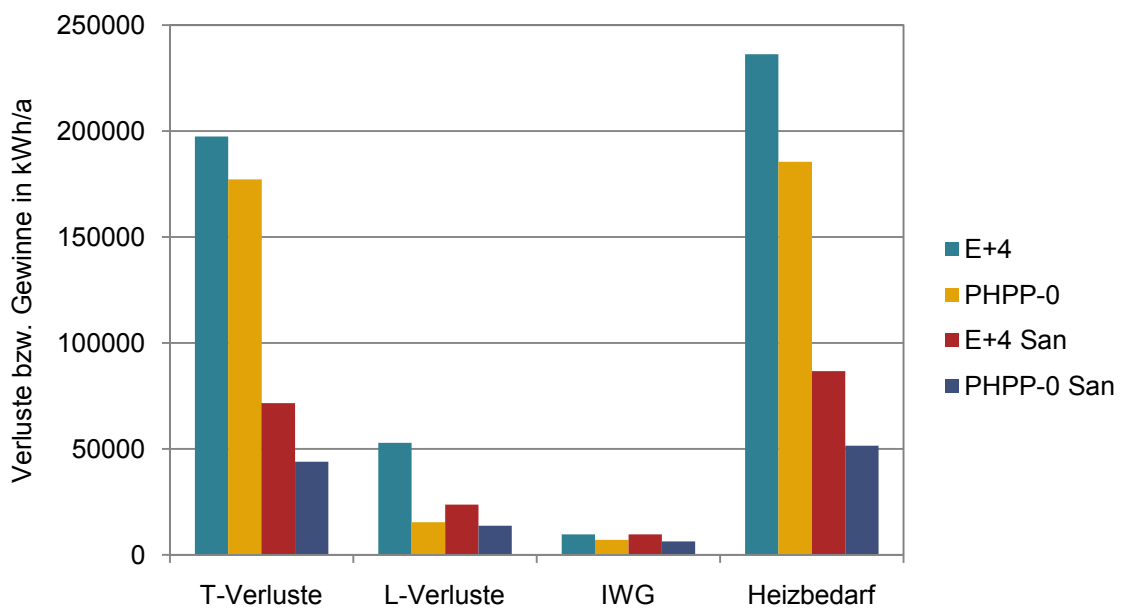


Abbildung 30 Vergleich Variante 4 in EnergiePlus mit PHPP

Wie aus der Abbildung erkennbar, eignet sich das PHPP in seiner Standard-Form nicht um ein Bestandsgebäude realistisch abzubilden. Im Gegenzug sind für die Annäherung an das PHPP umfassende Änderungen an der DesignBuilder-Ausgabe notwendig. Die betrifft insbesondere die Flächen und Volumina.

4.2 VERGLEICH MIT MESSWERTEN

Insgesamt liegen gemessene Verbrauchsdaten für die Jahre 2011 und 2012 vor. Die Daten wurden vom Eigentümer des Gebäudes zur Verfügung gestellt, wobei die Werte von 2011 im Rahmen der Sanierung von der NKG Ingenieurgesellschaft mbH bereits aufbereitet wurden.

Die für die Erfassung der Daten notwendigen Wärmemengenzähler (WMZ) wurden Ende Januar des Jahres 2011 montiert, sodass für das Jahr 2011 nur unvollständige Werte vorliegen. Hinzukommt, dass nach Angaben des Eigentümers, die Wohnungen im Gebäude erst im Verlauf des Jahres bezogen wurden. Die gewonnenen Messwerte sind somit im Jahresvergleich nicht aussagekräftig. Entsprechend der aufbereiteten Daten des Ingenieurbüros erzeugte die Gasbrennwerttherme 13512,30 kWh an Heizenergie und die Wärmepumpe 23117,90 kWh. Der Anteil für die Warmwasserbereitung ist in diesen Werten nicht enthalten.

Die Angaben zum Jahr 2012 stützen sich auf die Abrechnung des Energieversorgers. Die Gasbrennwerttherme ist mit 15170,19 kWh und die Wärmepumpe mit 31733,00 kWh aufgelistet.

Nachstehende Tabelle zeigt die errechneten Werte für den Heizbedarf im sanierten Zustand in der Gegenüberstellung mit den gemessenen Verbrauchswerten.

	Heizenergie in kWh/a	Verhältnis zu 2011 in %	Verhältnis zu 2012 in %
2011	36630	100%	78%
2012	46903	128%	100%
E+0	52053	142%	111%
E+1	51874	142%	111%
E+1.1	52862	144%	113%
E+2	56233	154%	120%
E+3	56052	153%	120%
E+4	86714	237%	185%
PHPP-0	51452	140%	110%
PHPP-1	53643	146%	114%
PHPP-2	53643	146%	114%

Tabelle 16 errechneter Heizwärmebedarf und Messwerte im Vergleich

Wie in Tabelle 16 erkennbar, erreichen die Grundvarianten E+0 und PHPP-0 sowie die erste Variation in EnergyPlus eine sehr gute Annäherung an den Verbrauchswert von 2012. Die

Abweichung zwischen Rechnung und Messung für das Jahr 2011 gehen aus den nicht repräsentativen Messdaten hervor.

Die Ergebnisse aus Tabelle 16 der vorherigen Seite sind in folgender Abbildung dargestellt.

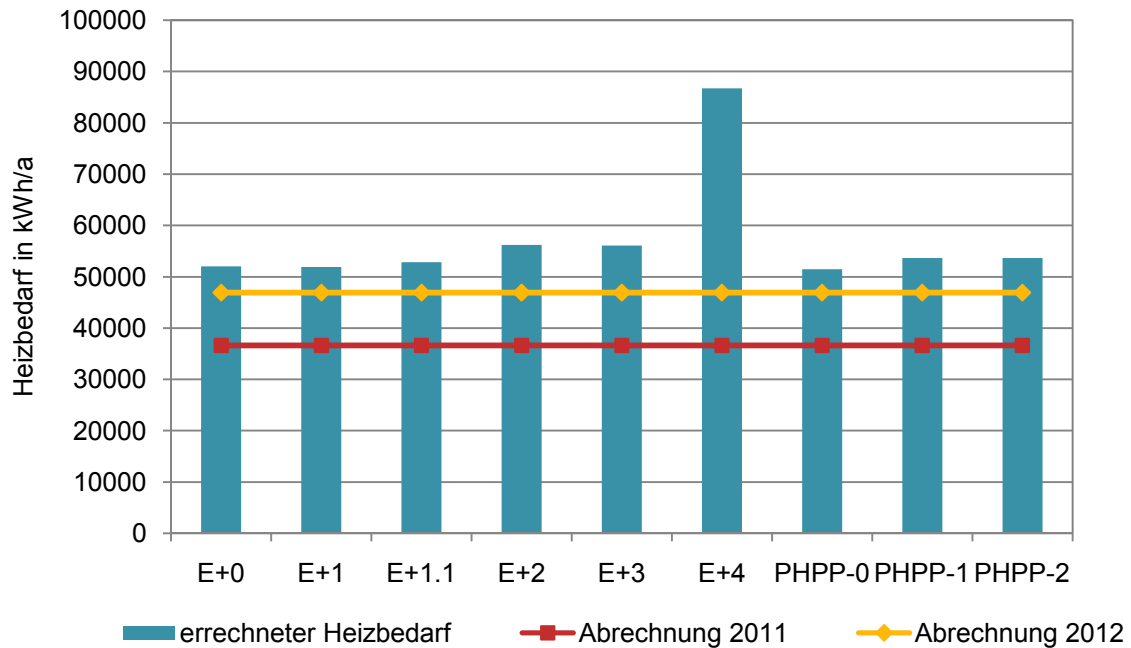


Abbildung 31 Vergleich Heizwärmebedarf der Simulationen mit Messwerten

Besonders markant zeigt sich die Abweichung der vierten Variante von EnergyPlus. Diese wurde nur vereinfacht an das Passivhausprojektierungspaket angeglichen, was die Notwendigkeit einer umfassenden Anpassung der Randbedingungen verdeutlicht. Insgesamt nähern alle anderen Simulationen den Heizbedarf an die Werte von 2012 gut an. Dies zeigt die Qualität der erstellten Simulationen und unterstreicht die Richtigkeit der aus ihnen gewonnenen Erkenntnisse.

5 EVALUATION DES APPROCHES DE CALCUL DE BILAN ENERGETIQUE

INTRODUCTION

Avec le changement climatique, l'intérêt d'économiser de l'énergie gagne de l'importance. Parmi tous les autres, le secteur résidentiel tertiaire est celui qui consomme le plus d'énergie primaire en Europe [14]. L'augmentation des chiffres des bâtiments neufs passifs est déjà une réorientation vers une construction plus durable au niveau énergétique. Cette idée doit aussi s'appliquer aux bâtiments existants, car ils ne représentent pas uniquement une consommation d'énergie importante mais également un pourcentage conséquent sur le marché immobilier allemand [16]. La mise en place d'une isolation thermique à l'extérieur est une méthode courante pour baisser le besoin énergétique du bâtiment. Cependant, cette mesure n'est pas applicable à 40% des immeubles existants allemands, favorisant la conservation de la façade initiale [17]. Surtout concernant la rénovation des bâtiments classés monument historique, il n'existe pas encore des solutions assez éprouvées. C'est là où le projet européen 3ENCULT agit avec l'objectif d'élaborer des méthodes de rénovation en étudiant des objets de référence. Parmi ces objets, se trouve la maison d'habitation présentée dans cette thèse. Mise à part d'analyser les possibilités constructives, les études sur les outils de surveillance à long terme et de calcul de bilans énergétiques sont réalisés. Surtout dans ce dernier secteur, il existe un grand nombre de logiciels qui sont, dû à leurs approches de calcul, difficile à comparer. Ainsi, le but de ce mémoire est l'évaluation de deux de ces modèles. Ils s'agit du *Passivhausprojektierungspaket*, un outil conçu spécialement pour les maison passives, et d'*EnergyPlus*. Tandis que les calculs du premier sont basés sur le modèle d'une zone et sur des valeurs moyennes mensuelles, le deuxième effectue une simulation dynamique à l'aide d'un modèle 3D du bâtiment. Par conséquent, les approches sont très différentes et ce travail a non seulement l'objectif de montrer les différences principales mais aussi leurs points forts et faibles. L'analyse des méthodes de calcul de bilan énergétique s'effectue d'une façon exemplaire par la simulation de la maison d'habitation, sélectionnée dans le projet 3ENCULT, à l'état initial ainsi qu'après la rénovation. Cela permet la description des caractéristiques au niveau de l'élaboration de la simulation et l'évaluation des mesures de la rénovation. La simulation sert ensuite à analyser l'influence sur le résultat de certains paramètres en les modifiant.

Cette partie en français revient sur les grands axes de ce mémoire.

5.1 DEVELOPPEMENT DES LOGICIELS PHPP ET ENERGYPLUS

Ce chapitre consiste à présenter les logiciels utilisés lors de l'élaboration de ce mémoire.

ENERGYPLUS

L'outil de simulation du comportement thermique d'un bâtiment, EnergyPlus [1], est basé sur les deux autres logiciels BLAST et DOE-2, conçus aux Etats-Unis et utilisés dans le monde entier. Ces derniers existaient déjà depuis plus que 20 ans lors de la création d'EnergyPlus. BLAST fut développé par le département de la défense des Etats-Unis (US Department of Defense, DOD) et est basé sur un logiciel datant des années 1970, tandis que DOE-2 fut créé par le département de l'Energie des Etats-Unis (US Department of Energy). La grande différence entre ces logiciels se base sur leur mode de calcul. BLAST utilise une approche liée à l'équilibre de chaleur (heat balance approach) tandis que DOE-2 effectue les calculs grâce à un facteur de la masse thermique (room weighting factor). La conséquence est que, selon les conditions, l'un des deux donnera un résultat plus précis que l'autre. Au fil des années et suite aux modifications de différentes personnes, le code informatique de ces logiciels est devenu de plus en plus illisible. Sa maintenance, nécessitant beaucoup de temps ainsi qu'un personnel spécialisé et qualifié, fut très onéreux, ce qui a soulevé la question du besoin de garder les deux logiciels. À partir de 1994 le DOD a organisé un 'workshop' ayant pour but de trouver des méthodes de combinaison de BLAST et DOE-2. Bien qu'il n'y ait pas de solutions, le support du DOD pour BLAST prit fin en 1995 et un an plus tard, en 1996, le DOE a lancé le développement du logiciel EnergyPlus avec la participation des Laboratoires de la recherche d'ingénierie en construction (US Army Construction Engineering Research Laboratories, CERL). L'université d'Illinois (University of Illinois, UI), le laboratoire nationale de Lawrence Berkeley (Lawrence Berkely National Laboratory, LBNL), l'université d'état d'Oklahoma (Oklahoma State University, OSU) et GARD Analytics ont également participé au projet. Contrairement à l'idée initiale de combiner BLAST et DOE-2, le code source d'EnergyPlus a été écrit intégralement. Cette solution était moins coûteuse et plus rapide. Fortran 90 fut choisi comme langage de programmation afin d'obtenir une forme de structure modulable et facile à entretenir. L'avantage d'un code source simple est la possibilité d'agrandir le logiciel à l'aide d'additifs. N'étant qu'un moyen de calcul, EnergyPlus n'a pas d'interface. Les fichiers d'entrée et de sortie sont des fichiers ASCII. En 1999 EnergyPlus était accessible pour les utilisateurs.

EnergyPlus est constitué de trois composants: le manager de la simulation, le module de bilan de chaleur et le module des systèmes techniques (cf. image 1, page 6). Les calculs proviennent d'une simulation des systèmes et charges intégrés, ce qui signifie que les charges calculées à un moment précis sont transférée directement au module des systèmes techniques

du bâtiment qui les utilise pour ses calculs. Le fichier de données contient des informations sous forme explicite, séparées par une virgule, ce qui résulte en fichiers très lourds. Concernant les fichiers de résultats, EnergyPlus offre non seulement des formats standards, mais également des formats visuels. De plus, la simplicité des fichiers permet une modification avec d'autres logiciels afin d'obtenir un aperçu des résultats de meilleure qualité.

EnergyPlus fut validé grâce à la série de vérifications 140P du standard d'ASHRAE, une méthode d'évaluation analytique normée de logiciels de simulation thermique. Ce standard est fixé par la société américaine des ingénieurs du chauffage, refroidissement et ventilation artificiels (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) fondée en 1959.

PASSIVHAUSPROJEKTIERUNGSPAKET (PHPP)

Le PHPP est un paquet de projection de maisons passives conçu par l'Institut des Maisons Passives. Cet outil, spécialement conçu pour les maisons passives, est basé sur un tableur de type Excel.

La première maison passive reconnue en Allemagne est située à Darmstadt-Kranichstein. Lors de la construction de ce bâtiment en 1991, les outils de calculs des besoins thermiques étaient très lourds, ne faisant que des simulations non-stationnaires. De plus, les réglementations et les normes n'étaient pas assez précises pour être appliquées à des maisons individuelles dont la consommation en énergies était trop basse, d'où la nécessité de créer un nouveau logiciel [4]. Dès les années 1980, Monsieur Conrad U. Brunner avait décrit une méthode de calcul des bilans énergétiques annuels, qui deviendrait la base des futures recherches de l'Institut du Logement et de l'Environnement (*Institut für Wohnen und Umwelt*) par Wolfgang Feist, Witta Ebel et Tobias Loga. Leur but était de trouver une méthode entraînant des efforts minimaux en créant une base de données et en utilisant un bilan vérifié, tout en donnant un résultat assez précis.

Afin de projeter la première maison passive, ils ont notamment utilisé le logiciel DYNBIL. En comparant différents logiciels de simulation, ils ont filtré les données les plus importantes, désormais réunies dans un modèle simplifié. Ce modèle admet que le bâtiment soit composé d'une seule zone et utilise une méthode de bilan mensuel au lieu d'une simulation non stationnaire. Ce calcul réduit, révisable plus facilement et produisant des erreurs moins élevées, était adapté aux caractéristiques d'une maison passive sans système de chauffage séparé. Le

calibrage était effectué à l'aide de logiciels non-stationnaires à condition qu'ils soient validés sur des maisons passives construites. En 1998 la première version du paquet de projection des maisons passives (PHPP), donnant des résultats suffisamment corrects en utilisant une méthode de bilans énergétiques annuels et stationnaires [5], était disponible sur le marché.

Les données nécessaires sont (sans prendre en compte le climat) la description de l'enveloppe thermique et de la ventilation. Ces données sont entrées directement dans les feuilles du tableur puis ordonnées par thématiques. Les valeurs calculées seront affichées instantanément et assemblées sur une feuille de résultats. Les sorties les plus importantes sont les besoins de chaleur pour le chauffage, la charge calorifique maximum et le besoin d'énergie primaire par an. En plus d'un outil de calcul, le PHPP contient un manuel expliquant la méthode de projection d'une maison passive ainsi que des renseignements relatifs à la construction.

Entre temps, l'intérêt pour les maisons passives augmente et leur part dans la construction neuve en Allemagne, Autriche et Italie du nord est importante [5]. Existent également des projets pilotes aux Etats Unis, en Corée du Sud et en Chine. Ce vif intérêt suppose l'agrandissement du PHPP afin que son utilisation puisse s'appliquer à n'importe quels emplacements et climats.

5.2 LE PROJET 3ENCULT ET LE BATIMENT

Dans ce chapitre des information sur projet 3ENCULT ainsi que sur la rénovation du bâtiment seront données.

LE PROJET 3ENCULT

L'acronyme 3ENCULT signifie *Efficacité d'énergie pour l'héritage culturel de l'Union Européenne* (Efficient Energy for EU Cultural Heritage). Ce projet s'étend d'octobre 2010 à avril 2014, dans le but de développer des solutions pour le renouvellement des monuments historiques. Les bâtiments historiques sont les emblèmes des villes européennes mais, sur le fond du changement climatique, la question de leur préservation se pose à nouveau, car leur consommation d'énergie est très importante. De plus, ils ne peuvent qu'être conservés sous la condition d'être accessibles au marché du logement [11] qui requiert une augmentation du confort, donc un renouvellement des bâtiments. Grâce à la création d'exemples de réhabilitations, ce projet se veut une référence pour d'autres projets futurs. Les points importants sont : la réduction des besoins énergétiques, la préservation du bâti et le confort

des habitants. 3ENCULT crée un lien entre la théorie et la pratique et encourage la collaboration des scientifiques de différentes universités avec les communautés d'intérêts, composées d'entreprises de la classe moyenne (pouvant aller de PME à de grandes entreprises) et dont le champ de travail s'étend jusqu'à l'architecture, le diagnostic des dégâts ou encore les techniques de régulation. Les entreprises productrices participant au projet fournissent leurs produits afin de mettre en place une surveillance à long terme. Au total, on comptabilise huit cas d'étude. Le bâtiment figurant dans la thèse est inclus dans l'étude numéro six *Warehouse City Potsdam and other, Germany*. Dans ce contexte, la préparation de standards normés est prévue, au vue de les intégrer dans les normes actuelles. Ces standards incluent l'efficacité d'énergie évaluée des bâtiments classés monuments historiques dans le contexte urbain, l'évaluation des impacts sur l'environnement, les *Aalborg Commitments* ainsi que la *Charte de Leipzig*. L'élaboration du projet se déroule en huit séquences (cf. image 4, page 16) supportées par des équipes d'étude locales. Ces équipes travaillent sur place avec les autorités en charge du patrimoine, les propriétaires et un partenaire du 3ENCULT qui assure la compatibilité des mesures proposées avec la réglementation patrimoniale et les besoins des propriétaires. Concernant le bâtiment analysé dans le cadre de cette thèse, l'entreprise *Remmers* est le partenaire du projet 3ENCULT. Fondée en 1949, cette entreprise est spécialisée dans la protection et la maintenance du bâti. Elle est notamment à l'origine du développement d'un nouveau système d'isolation intérieure nommé iQ THERM, utilisé dans le bâtiment en question. Étant membre de l'équipe d'étude locale, l'institut de la thermique du bâtiment (*Institut für Bauklimatik*) surveille aussi les travaux et a mis en place des instruments de mesure pour effectuer une surveillance à long terme.

INFORMATIONS SUR LE BATIMENT

Le bâtiment figurant dans cette thèse est une villa situé à Dresde, en Allemagne (cf. image 6, page 19). Elle se trouve à côté du *Waldpark* dans un quartier composé exclusivement de villas : *Blasewitz*. La villa et son entourage étaient construits vers 1870 pendant la période dite *Gründerzeit*, qui se traduit notamment par un démarrage économique.

Quand les travaux de renouvellement ont commencé en 2009, le bâtiment était dans un très mauvais état. Des fenêtres détachées et des gouttières cassées étaient le reflet des travaux jadis commencés demeurant inachevés. Contrastant avec cela, les éléments intérieurs comme le parquet et les portes étaient en bon état. Pendant les travaux, l'accent a été mis sur la

préservation de l'existant et la durabilité au niveau énergétique, afin d'assurer la maintenance du logement à un prix modéré.

Au sous-sol, le plafond en bois et la voûte en tuile ont été remplacés par du béton armé. En supplément, une isolation thermique a été mise en place en dessous du plafond. Les murs en grès, uniquement présent au sous-sol, sont restés non traités. Les combles ont été énucléés et en plus d'un renouvellement de la charpente, la structure du toit a été complétée avec 210mm de ouate de cellulose et un panneau de fibres à l'extérieur. La façade décorée a été munie d'une isolation intérieure laissant passer la vapeur et permettant le transport capillaire. Les matériaux utilisés sont, soit des plaques de calcium silicate, soit de nouvelles plaques élaborées par l'entreprise *Remmers*, à base de mousse de polyuréthane. Toutes les vieilles fenêtres du bâtiment ont été remplacées par des fenêtres double vitrage. Les fenêtres en cristal de la cage d'escalier ont été préservées, ainsi que l'escalier en chêne.

Au niveau des installations techniques, le bâtiment dispose de quatre sondes géothermiques d'une profondeur de 100 à 120m qui produisent, grâce à une pompe à chaleur, l'eau chaude sanitaire. En guise de chauffage d'appoint, une chaudière gaz à condensation se met en route si nécessaire. La distribution de chaleur s'effectue par des planchers chauffants et à l'étage par des murs chauffants, afin de préserver le parquet. Pour réduire la surchauffe en été, des bâches fideles à un modèle historique et un refroidissement passif dans les combles ont été mis en place. Les châssis à tabatière possèdent également des éléments protecteurs du soleil. Une ventilation mécanique a été volontairement exclue au profit de fenêtres avec des éléments de régulation d'air.

5.3 ELABORATION DES SIMULATIONS

Ce chapitre décrit les étapes de la réalisation des simulations avec les logiciels PHPP et E+. La base de données sera expliquée ainsi que la surface utilisateur.

PASSIVHAUSPROJEKTIERUNGSPAKET

Le PHPP est un table d'EXEL de 35 feuilles traitant chacune un sujet différent. Afin d'assembler les données à rentrer, l'enveloppe thermique est à définir. Cette dernière sépare les zones chaudes intérieures des zones froides extérieures. Elle est la base du calcul et pour cette raison l'exactitude en la déterminant est important.

La maison à l'état initial

L'enveloppe thermique inclue la totalité du bâtiment à l'état initial, ainsi elle se compose des murs extérieurs, du toit et des surfaces en contact avec la terre (cf. images 7, p. 22). Les données concernant des surfaces déterminées dans ce qui suit sont à rentrer dans la feuille réservée à cet effet. D'abord la surface de référence d'énergie (*Energiebezugsfläche*) doit être calculée. Elle contient la surface habitable définie par la réglementation sur les surfaces habitables (*Wohnflächenverordnung*) à dans l'enveloppe thermique et sera indiquée en mesures intérieurs. La surface des pièces avec une hauteur de 2m sera prise en compte à 100% tandis que celle des pièces d'une hauteur entre 1 et 2 m sera comptée à 50%. Les pièces d'une hauteur plus petite ne seront pas considérés. À l'état initial, le sous-sol est compris dans l'intérieur de l'enveloppe thermique et avec une hauteur de plus de 2m, la surface serait considérée à 60% d'après les règles de calcul du PHPP. Les escaliers ne sont pas pris en compte. Dû à leurs différences constructives, les surfaces des murs extérieurs sont calculées séparément.

Les coefficients de transfert thermique

Concernant la dalle, deux constructions sont différenciées. La première comporte des tuiles avec un coefficient U de $3,797\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ et l'autre, de qualité supérieure, un coefficient U de $1,502\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Le coefficient de transfert thermique de film extérieur a la valeur zéro. Les murs du sous-sol en grès ont un coefficient de transfert thermique de $1,68\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ dans la section entourée par le sol et $1,574\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ dans la partie en surface. Au rez-de-chaussee les murs sont en maçonnerie avec un coefficient U de $1,103\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ tandis qu'au premier étage et au premier comble, en raison d'une épaisseur moins importante, le coefficient U est de $1,318\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Les murs du deuxième comble sont encore de la maçonnerie moins épaisse et par conséquent ils ont un coefficient de transfert thermique de $1,784\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Le coefficient U de la construction du toit est de $1,905\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. L'ensemble de ces données se trouve dans l'annexe (*Anhang*).

Les ouvertures

Les informations concernant des fenêtres seront entrées dans une feuille de calcul appropriée. Le PHPP demande les dimensions de chaque fenêtre ainsi que leur orientation vers le soleil. Dans la feuille suivante, le type de vitrage et de cadre sera choisi. L'utilisateur a la possibilité soit de regarder parmi les données existantes soit d'entrer ces propres caractéristiques. Pour le projet, un simple vitrage et un cadre en bois sont sélectionnés. Le coefficient de transfert

thermique est de $4,71\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. La maison dispose d'une grande porte d'entrée située sur le côté ouest et deux portes secondaires possédant un coefficient U de $0,9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Les données techniques et utilisateur

La température intérieure de 20°C utilisée dans ce projet, correspond à la température standard d'une maison passive. Le nombre standard de m^2 par personne est de 35 m^2 , ce qui donne un chiffre calculé de 18,2 personnes dans le cas de la villa. Il y a la possibilité de rentrer ses propres données mais il est toutefois conseillé qu'elles soient situées entre $20\text{m}^2/\text{personne}$ et $50\text{m}^2/\text{personne}$. Les personnes ainsi que les appareils électroniques, comme des ordinateurs, produisent de la chaleur et chauffent le bâtiment. Tous ces bénéfices de chaleur interne sont rassemblés dans un seul chiffre de $2,1\text{ W}/\text{m}^2$. Cette donnée standard du PHPP peut aussi être changée afin de mettre en place des valeurs individuelles. Un autre standard est l'utilisation d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC). Ceci n'est pas le cas dans le bâtiment du projet et pour cette raison, un changement d'air par infiltration de $0,3\text{ l/h}$ est choisi.

La maison post-rénovation

Les données s'effectuent en se servant de l'étude de l'état initial comme modèle et en le réajustant aux nouvelles conditions. Dû à la mise en place d'une isolation intérieure, l'enveloppe thermique du bâtiment a changé. Une partie du sous-sol n'est pas chauffée et ne sera donc pas comprise dans l'enveloppe thermique (cf. image 9 et 10). Par conséquent, la surface de référence d'énergie (*Energiebezugsfläche*) est modifiée. Les critères restent les mêmes qu'à l'état initial. La partie du sous-sol à l'intérieur de l'enveloppe thermique sera prise en compte à 60% de sa surface tandis que les autres surfaces restent identiques à l'état initial.

Les coefficients de transfert thermique

La dalle a subi une rénovation profonde et le coefficient U s'améliore à $0,733\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Le plafond entre sous-sol et rez-de-chaussée a un coefficient de transfert thermique de $0,709\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. À part la mise en place du système d'isolation intérieure, la construction des murs extérieurs reste inchangée et les coefficients U se composent de la façon suivante: $0,407\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ pour la partie du mur contre la terre au sous-sol et $0,400\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ pour la partie du mur au sous-sol donnant à l'air libre. Au rez-de-chaussée il est de $0,369\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, à l'étage et en premier comble de $0,390\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ et pour le deuxième comble de $0,423\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Le toit obtient $0,142\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ après la rénovation. Les coefficients de transfert thermique de toutes ces constructions s'améliorent grâce aux travaux effectués (cf. image 11, p. 31)).

Les ouvertures

En comparaison avec l'état initial, certaines fenêtres sont condamnées ou réduites dans leur taille. Dans les combles, cinq fenêtres à tabatière sont mise en place. Un double vitrage à l'isolation renforcée (VIR) avec une lame d'argon ainsi qu'un cadre en bois plus performant que celui d'origine sont employés. Le coefficient U est de $1,53 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Parmi les portes, seule la porte d'entrée est gardée dans l'enveloppe thermique, son coefficient de transfert thermique reste à $0,9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Les données techniques et d'utilisateur

Comme à l'état initial, les données standard du PHPP seront utilisées. La température intérieure reste à 20°C , les bénéfices de chaleur interne à $2,1 \text{ W/m}^2$ et le nombre des personnes à une personne pour 35m^2 . En raison de la modification de la surface de référence d'énergie (*Energiebezugsfläche*), le nombre de personnes calculé est de 18,2 personnes pour la maison.

ENERGYPLUS/DESIGNBUILDER

Étant donné que le logiciel EnergyPlus ne possède pas d'un interface aidant à rentrer les données, le modèle 3D du bâtiment sera réalisé avec le logiciel DesignBuilder.

La maison à l'état initial

Après avoir réalisé la forme extérieure de la maison, la partition intérieure et les fenêtres sont mises. La composition des murs, du toit et de la dalle est identique avec celle utilisée dans le PHPP. Cependant, le DesignBuilder demande aussi les caractéristiques de l'ensemble des plafonds l'intérieurs de la villa. Deux compositions seront différenciées: le plafond voûté au sous-sol et un plafond en bois étant référence aux autres étages. Le premier a un coefficient de transfert thermique de $0,747 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ tandis que celui du plafond en bois est de $0,694 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Le modèle complet (cf. images 12 à 14, p. 33) sera exporté en fichier IDF (*Input Data File*), le format de données d'EnergyPlus. Pour augmenter la lisibilité des fichiers, ces derniers seront modifiés par l'outil simplifyIDF qui abrège les données en les regroupant. À l'état initial, le bâtiment est divisé en 39 zones. Chaque action (chauffer, ventiler etc.) nécessite l'attribution d'un lieu et d'un emploi du temps.

Afin d'assimiler la surface de référence d'énergie (*Energiebezugsfläche*), une liste des zones correspondantes sera créée. Les bénéfices de chaleur interne sont adaptées au standard de PHPP qui est de $2,1 \text{ W/m}^2$. La ventilation sera réglée à $0,3 \text{ l/h}$ et la température intérieure à 20°C . Le refroidissement ne sera pas pris en compte.

Pour favoriser la comparaison des résultats, les données de climat du PHPP seront importées en EnergyPlus. Celles-ci concernent la température extérieure, le point de condensation, le rayonnement direct et diffus et l'humidité de l'air. Les températures du sol seront aussi remplacées par les valeurs utilisées dans le PHPP.

Tandis que le PHPP effectue ses calculs en utilisant la résistance thermique, EnergyPlus utilise les coefficients de transmission thermique surfacique qui, par conséquent, doivent être mis en place. La simulation sera exécutée sur une période d'un an. Un des fichiers output d'EnergyPlus est le fichier CSV (*Comma Separated Values*). À la base de ce fichier, l'outil resultCSV réalise l'assemblage des résultats. Il est lié avec l'outil SimplifyIDF et crée un bilan des pertes et des bénéfices.

La maison post-rénovation

Les données du PHPP serviront de base pour la composition des constructions. Au niveau des plafonds qui ne sont pas pris en compte dans le PHPP, deux constructions seront différenciées. Le plafond voûté sera remplacé par un plafond en béton armé ayant un coefficient de transfert thermique de $0,725 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Le plafond en bois sera également renforcé et obtient un coefficient U de $0,679 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Les modifications des fenêtres seront effectuées similairement au PHPP. Avant d'importer le fichier IDF en EnergyPlus, l'outil SimplifyIDF sera utilisé en faveur d'une bonne lisibilité.

Les bénéfices de chaleur internes sont réglés, identiquement au PHPP, à $2,1 \text{ W/m}^2$ et la ventilation à $0,3 \text{ l/h}$. En raison de la réduction de la surface de référence d'énergie (*Energiebezugsfläche*), une nouvelle liste des zones sera créée.

Afin d'assimiler les conditions du climat, les données du PHPP seront rapportées en EnergyPlus. Cette procédure, plus détaillée dans le paragraphe précédent, concerne aussi le coefficient de transmission thermique surfacique. La simulation s'exécute sur une période d'un an. L'outil resultCSV sera, similairement à la simulation précédente, utilisé pour assembler les données du fichier output CSV.

5.4 EXPLOITATION DES DONNEES

Pour de comparer des approches de calcul de bilan énergétique, un point de départ approprié est nécessaire [19]. Dans ce travail, le bâtiment ainsi que les valeurs standard de PHPP servent comme point de départ. L'adaptation des données techniques, climatiques et d'utilisateur est déjà décrite dans le chapitre précédent. La période de chauffage du PHPP est de 219 jour tandis qu' EnergyPlus exécute un calcul annuel. L'assimilation est faite en multipliant les résultats mensuels d'E+ avec un facteur de pertes maximum utilisé par le PHPP.

Le tableau 9, p. 43 montre les résultats de la simulation. Les valeurs obtenus sont à peu près du même ordre et la simulation peut servir comme base pour les variations. Le besoin annuel en chauffage calculé par le PHPP est de 312 kWh/(m²a) à l'état initial et de 93 kWh/(m²a) après la rénovation. Une baisse d'environ deux tiers peut être constaté. Le cours annuel est désigner dans les images 17 et 18, p. 45. Grâce aux mesures de rénovation prisent en compte, les pertes par transmission sont réduites à un quart de la valeur à l'état initial (cf. image 21, p. 47).

ELABORATION DES VARIATIONS

Dans ce chapitre, sur la base des simulations déjà effectuées, quatre variantes sont réalisées. La première variation assimile d'avantage la surface de référence énergétique en remplaçant les surfaces utilisées dans le logiciel EnergyPlus par les valeurs PHPP. L'influence des ponts thermiques sera analysée dans la deuxième variation. La troisième variation est une combinaison des deux premiers. Dans la dernière variation, une adaptation simplifiée du PHPP sera évaluée. Dans les tableaux et les diagrammes, les noms suivant seront appliqués aux simulation afin de les distinguer:

- E+ simulation d'EnergyPlus
- PHPP- simulation d'PHPP (le trait servira de séparateur)
- 0 simulation de base
- 1 variante 1
- 2 variante 2 etc.

Unsan. l'état initial

San. l'état après la rénovation

V. ou % proportion en %

Un tableau des tous les résultats se trouvent dans l'annexe (*Anhang*).

VARIATION 1

Les surfaces dans EnergyPlus seront remplacées par les valeurs du PHPP afin de préciser la surface de référence énergétique. De même, les vrais volumes seront appliqués de façon qu'EnergyPlus effectue ses calculs avec la hauteur réelle. Ceci n'est pas considéré par le PHPP, car une valeur standard de 2,5m est utilisée. Dans cette première variante de PHPP, la hauteur standard sera remplacée par le moyen arithmétique de la hauteur des étages qui est de 2,9m. Le tableau 11, p. 52 montre les pertes de transmission et de ventilation ainsi que les bénéfices de chaleur interne et le besoin en chauffage. À l'état initial, les pertes par ventilation et les bénéfices de chaleur interne s'accordent tandis que le besoin de chauffage diverge plus avec le changement des surfaces et des volumes. Concernant la variation du PHPP, la différence ne peut pas être diminuée. Après la rénovation, les pertes causées par la ventilation et les bénéfices de chaleur interne, se rapprochent aux valeurs du PHPP. La variation de la hauteur au PHPP assimile les pertes de ventilation, les bénéfices de chaleur interne et le besoin de chauffage à presque 100%. Le diagramme 24, p. 53 présente les pertes de transmission (T-Verluste) et de ventilation (V-Verluste) ainsi que les bénéfices de chaleur interne (IWG) et le besoin de chauffage (Heizbedarf).

Dans une modification de la première variante d'EnergyPlus, le calcul sera exécutée sans appliquer les données du climat de PHPP (voir chapitre 5.3). Ce dernier est, avec des petits changements, basé sur le climat de *Potsdam*. Ainsi, les données climatiques de *Potsdam* seront utilisées. Le diagramme 25, p. 54 montre que cette modification (E+1.1) assimile bien les pertes de transmission. En conséquences, l'application des valeurs du PHPP n'est pas nécessaire en ce qui concerne la température extérieure, le point de condensation, le rayonnement direct et diffus ou encore l'humidité de l'air.

VARIANTION 2

Grâce au logiciel THERM, les coefficients U perturbés des constructions seront calculé. Ensuite, les valeurs linéiques Ψ sont déterminées avec une formule. Les calculs détaillés se trouvent dans l'annexe (*Anhang*).

Les ponts thermiques sont traitées d'une façon exemplaire et c'est pour cette raison que seulement les côtés extérieurs et les jonctions entre les planchers et les murs extérieurs seront prises en compte. Ces dernières sont indiquées dans l'image 26, p. 55. Etant donné que les déperditions thermiques sont plus importantes à l'état poste-rénovation, celles-ci seront simulées. Comme illustré dans le tableau 13, p. 56, EnergyPlus réagit d'un ordre plus important

que PHPP. En effet les pertes par transmission s'assimilent plus qu'auparavant (cf. image 28, p. 57).

VARIATION 3

Cette variation est une synthèse des variations précédentes. Ainsi, les surfaces et les volumes sont remplacés et les ponts thermiques sont mis en place dans EnergyPlus. Dû à l'influence des ponts thermiques, la simulation ne sera exécuté qu'à l'état post-rénovation. Les résultats sont assemblés dans le tableau numéro 14 p.47. Au niveau des pertes par ventilation et des bénéfices de chaleur interne, les valeurs s'approchent (cf. image 29, p.58). Cet effet, déjà produit dans la première variation, souligne l'influence importante de la surface de référence (*Energiebezugsfläche*).

VARIATION 4

Dans cette variante, seules des modifications simples seront effectuées. Ce qui concerne entre outre le nombre des personnes et la température intérieure de 20°C. Les coefficients de transmission surfacique seront aussi appliqués ainsi que les températures du sol. La ventilation est mise à 0,7 1/h à l'état initial et à 0,3 1/h après la rénovation.

Le tableau numéro 15, p.59, montre les résultats. La grande différence des pertes causé par la ventilation à l'état initiale est dû au facteur de changement d'air de 0,7 1/h. La valeur du PHPP est de 0,3 1/h, ce qui ne correspond pas à un bâtiment ancien. Cette différence cause également le plus grand besoin de chauffage d'EnergyPlus. Tandis que PHPP utilise la surface de référence d'énergie, cette variante d'EnergyPlus prend en compte la totalité de la surface. Celle-ci est environ 200m² plus grande. Par conséquent, les bénéfices de chaleur interne augmente. Après la rénovation, la différence des surfaces devient plus importante. La surface de référence d'énergie diminue tandis que la surface d'EnergyPlus reste identique. Cela prouve l'importance de l'accord des surfaces dans la reproduction des résultats du PHPP. Comme le diagramme 30, p.60, le montre, la configuration standard du PHPP n'est pas apte à calculer les besoins d'un bâtiment ancien d'une façon réaliste. En contrepartie, de lourdes modifications sont nécessaires afin de reproduire les résultats de PHPP avec EnergyPlus.

COMPARAISON AVEC DES VALEURS MESUREES

Grâce à la mise à disposition des chiffres de la consommation du bâtiment par le propriétaire et le bureau d'étude *NKG Ingenieurgesellschaft mbH*, une évaluation des calculs peut être réalisée. Les données contiennent les années 2011 et 2012 en sachant que les valeurs de 2011 ne sont pas complètes. Le tableau numéro 16 p.61 présente la comparaison des calculs avec les deux échantillons. Les variantes des bases ainsi que la première variante d'EnergyPlus produisent une bonne concordance à la consommation mesurée en 2012. Puisque les données de 2011 ne sont pas représentatives, la grande différence entre les valeurs mesurées et calculées ne peut pas être prise en compte. Comme le diagramme numéro 31 p.62 montre, seule la variation 4 d'E+ produit une grande différence. Cette variante n'a subi que des adaptations légères au standard du PHPP. Ceci souligne l'importance de la mise en place de conditions de base similaires. Les autres variantes montrent une bonne concordance qui prouve leur qualité.

5.5 RESUME

Le but de ce mémoire était l'évaluation des approches de calcul de PHPP et d'EnergyPlus. En vu de la comparabilité de leurs résultats, tous les deux produisent des valeurs similaires. Le succès des mesures de rénovation est interprété de la même façon par les logiciels.

Dans le premier chapitre, la théorie sur le PHPP et EnergyPlus est expliquée. Les informations concernant le bâtiment et le projet sont traitées au deuxième chapitre tandis que dans le troisième figurent la mise au point des simulations. L'exploitation correspondante des données montre l'aptitude conditionnelle du PHPP à calculer un bilan énergétique d'un bâtiment ancien. La comparaison des résultats, avant et après la rénovation, illustre le succès des mesures employées. Le besoin d'énergie a pu être baissé de deux tiers. Dans le quatrième chapitre, l'analyse de variation prouve la possibilité de reproduire des résultats du PHPP par EnergyPlus à l'exemple des ponts thermiques. Grâce à la comparaison des calculs avec des valeurs mesurées la qualité des simulations a pu être prouvée.

Les approches de calcul de bilan énergétique doivent rester le sujet de la recherche afin d'étudier l'influence de leurs caractéristiques de plus près. Le projet 3ENCULT suit déjà ce chemin et met les résultats à la disposition du publique.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war die Bewertung der Berechnungsansätze der Gebäudesimulationsprogramme PHPP und EnergyPlus im Hinblick auf die Vergleichbarkeit ihrer Ergebnisse. Wie sich zeigt, erzeugen beide Programme unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen sehr ähnliche Werte, welche den Erfolg der Sanierungsmaßnahme auf gleiche Art und Weise interpretieren.

Im ersten Kapitel wurde auf das theoretische Wissen zu den verwendeten Programmen näher eingegangen. Neben dem historischen Hintergrund, wurden auch die Funktionsweise sowie die Berechnungsgrundlagen erläutert. Informationen zum Gebäude und über die erfolgten Sanierungsmaßnahmen sind Inhalt des zweiten Kapitels. Ebenso wird die Position der Gründerzeitvilla im europäischen Projekt 3ENCULT sowie dessen Ziele und Umsetzung vorgestellt.

Zum Vergleich von Berechnungsansätzen gleich welcher Art, ist die Schaffung möglichst ähnlicher Randbedingungen Grundvoraussetzung und die Verwendung einheitlicher Klimadaten unabdingbar. Das dritte Kapitel beschäftigt sich eingehend mit diesem Thema und erklärt notwendige Schritte zur Angleichung der Randbedingungen, wobei detailliert auf die im Passivhausprojektierungspaket verwendeten Klimadaten eingegangen wird. Wie aus der anschließenden Auswertung der gewonnenen Ergebnisse hervorgeht, eignet sich das Ein-Zonen-Modell auch bedingt für die Berechnung der Energiebilanz unsanierter Bestandsgebäude. Der Vergleich der Ergebnisse vor und nach der Sanierung zeigt zudem den Erfolg der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen. Insgesamt konnte der Energiebedarf auf ein Drittel des ursprünglichen Wertes reduziert werden. Das vierte Kapitel schließt mit der Variantenanalyse an, welche am Beispiel der Wärmebrücken veranschaulicht, dass es möglich ist, mit EnergyPlus die Berechnungsergebnisse des Projektierungspaketes in ähnlicher Form zu reproduzieren. Der abschließende Vergleich mit den im Gebäude gemessenen Verbrauchswerten bestätigt die Qualität der erstellten Simulationen und unterstreicht die Richtigkeit der aus ihnen gewonnenen Schlussfolgerungen.

In der Zukunft müssen noch weitere Informationen über die Reaktion verschiedener Simulationsprogramme unter möglichst unterschiedlichen Bedingungen gesammelt werden, um den Einfluss ihrer spezifischen Eigenschaften herauszuarbeiten. Im Rahmen des Projektes 3ENCULT werden bereits solche Daten erfasst und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

7 AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit konnte bereits zeigen, dass EnergyPlus unter bestimmten Randbedingungen in der Lage ist, die Ergebnisse des Passivhausprojektierungspaketes zu reproduzieren. Dieses Ergebnis bleibt durch weitere Simulationen zu bestätigen, bietet jedoch bereits Grundlagen für weitere Untersuchungen. Ansätze für deren Durchführung werden im Folgenden erläutert.

Mit Hilfe der in Variante 1 erwähnten Anpassung der Raumhöhen im PHPP, kann teilweise eine vollkommene Übereinstimmung der Lüftungsverluste von PHPP und E+ erzeugt werden. Da die vom PHPP vorgeschriebene Raumhöhe nicht mit dem realen Gebäude korrespondiert, bleibt zu Prüfen unter welchen Umständen eine Korrektur des PHPP-Standards sinnvoll ist. Desweiteren kann eine umfangreichere Erfassung der Wärmebrücken klären, ob eine weitere Annäherung der Ergebnisse von PHPP und E+ in Bezug auf die Transmissionsverluste möglich ist. Dadurch könnte die Differenz der Maßbezüge minimiert werden. Neben den erwähnten Parametern, sind auch komplexere technische Gebäudeausstattungen zu simulieren, da diese durch ihren zunehmenden Einsatz an Bedeutung gewinnen.

Variante 4 kann den Ausgangspunkt für detailliertere Untersuchungen zum DesignBuilder bilden und sollte daher genauer analysiert und wiederholt werden. Dabei muss insbesondere auf die an EnergyPlus übergebene Datenbasis eingegangen werden.

Nicht zuletzt kann eine Methode entwickelt werden, mit welcher EnergyPlus in automatisierter Art und Weise den PHPP-Standard anwendet. Dazu müssen die in dieser Arbeit vorgestellten Maßnahmen an weiteren Objekten bestätigt und zusammengefasst werden. Gegebenenfalls ist zu prüfen, ob die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse mit Hilfe zusätzlicher Maßnahmen weiter verbessert werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **EnergyPlus**, 2001, Crawley und andere, Aufsatz,
EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program
- [2] **Technik am Bau**, 2004, Beisteiner und andere, Zeitschrift, Jahrgang 35, Nr.1,
Seite 49-53, Untersuchung der Gebäudesimulationssoftware EnergyPlus anhand der
Richtlinie VDI 6020
- [3] **DesignBuilder Software Ltd**, Onlinequelle, 24.01.2014
<http://www.designbuilder.co.uk/content/view/1/12/>
- [4] **Passipedia**, Onlinequelle, 13.01.2014
[http://www.passipedia.de/passipedia_de/planung/energieeffizienz_ist_berechenbar/
energiebilanzen_mit_dem_php](http://www.passipedia.de/passipedia_de/planung/energieeffizienz_ist_berechenbar/energiebilanzen_mit_dem_php)
- [5] **Passivhaustagung**, Onlinequelle, 13.01.2014
http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/PHPP.html
- [6] **Passivhausprojektierungspaket 2007**, 2007, Feist, Passivhaus Institut, Handbuch,
PHPP 2007 - Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser
- [7] **Passipedia**, Onlinequelle, 13.01.2014
[http://www.passipedia.de/passipedia_de/planung/energieeffizienz_ist_berechenbar/
energiebilanzen_mit_dem_php/php_-_das_passivhaus_planungstool](http://www.passipedia.de/passipedia_de/planung/energieeffizienz_ist_berechenbar/energiebilanzen_mit_dem_php/php_-_das_passivhaus_planungstool)
- [8] **Zertifiziertes Passivhaus**, 2013, Feist, Passivhaus Institut (Hrsg.)
Zertifizierungskriterien für Passivhäuser mit Wohnnutzung
- [9] **Cepheus**, Onlinequelle, 13.01.2014
<http://www.cepheus.de/>
- [10] **EnergieEffizientes Bauen**, 2002, Feist, Zeitschrift, Jahrgang 3, Nr. 1, Seite 7-15
Passivhausprojektierungspaket und Vornorm DIN-V-4108-6:2001
- [11] **3ENCULT**, Onlinequelle, 08.11.2013
<http://www.3encult.eu>
- [12] **Remmers**, Onlinequelle, 10.12.2013, Produktbeschreibung iQ-Therm,
<http://www.remmers.de/>

- [13] **Metamorphose - Bauen im Bestand**, 2011, Kohlhammer (Hrsg.), Zeitschrift, Ausgabe 05/11, Seite 59
- [14] **Ventilation et lumière naturelles**, 2011, Roditi, Edition Eyrolles
- [15] **Guide Basse Consommation**, 2009, Fanguin und Grivet, Maisons Bois Outils Concept®, Éditions du CNDB (Comité National pour le Développement du Bois)
- [16] **dena Gebäudereport**, 2012, Deutsche Energie Agentur, Broschüre, Seite 23
<http://www.zukunft-haus.info/gesetze-studien-verordnungen/studien/dena-gebaudereport.html>
- [17] **Remmers**, Onlinequelle, 02.02.2014, Produktvideo iQ-Therm - die intelligente Innendämmung,
<http://www.remmers.de/4421.0.html>
- [18] **Präsentation zum IDF Tool SimplifyIDF**, 2013, Weiß, Institut für Bauklimatik, Technische Universität Dresden
- [19] **Thermische Gebäudesimulation**, 1994, Feist, Verlag C.F. Müller, Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze
- [20] **Ökostation**, Onlinequelle, 07.02.2014, Lokale Agenda 21 und Freiburger Nachhaltigkeitsrat
http://oekostation.de/de/themen/lokale_agenda_21.htm
- [21] **Bundesarchitektenkammer**, Onlinequelle, 07.02.2014, Leipzig Charta
<http://www.bak.de/architekten/europa/baukultur-und-stadtentwicklung/leipzig-charta/>

ANHANG

A. Ansichten und Grundrisse des Gebäudes

Die verwendeten Zeichnungen sind den Plänen des Architekturbüros ATEA GmbH entnommen.

B. PHPP Tabellenblatt "Nachweis" des unsanierten Gebäudes

Übersicht Konstruktionen im unsanierten Zustand

PHPP Tabellenblatt "Nachweis" des sanierten Gebäudes

Übersicht Konstruktionen im sanierten Zustand

C. Formeln zur Berechnung des Psi-Wertes

Auszug aus THERM

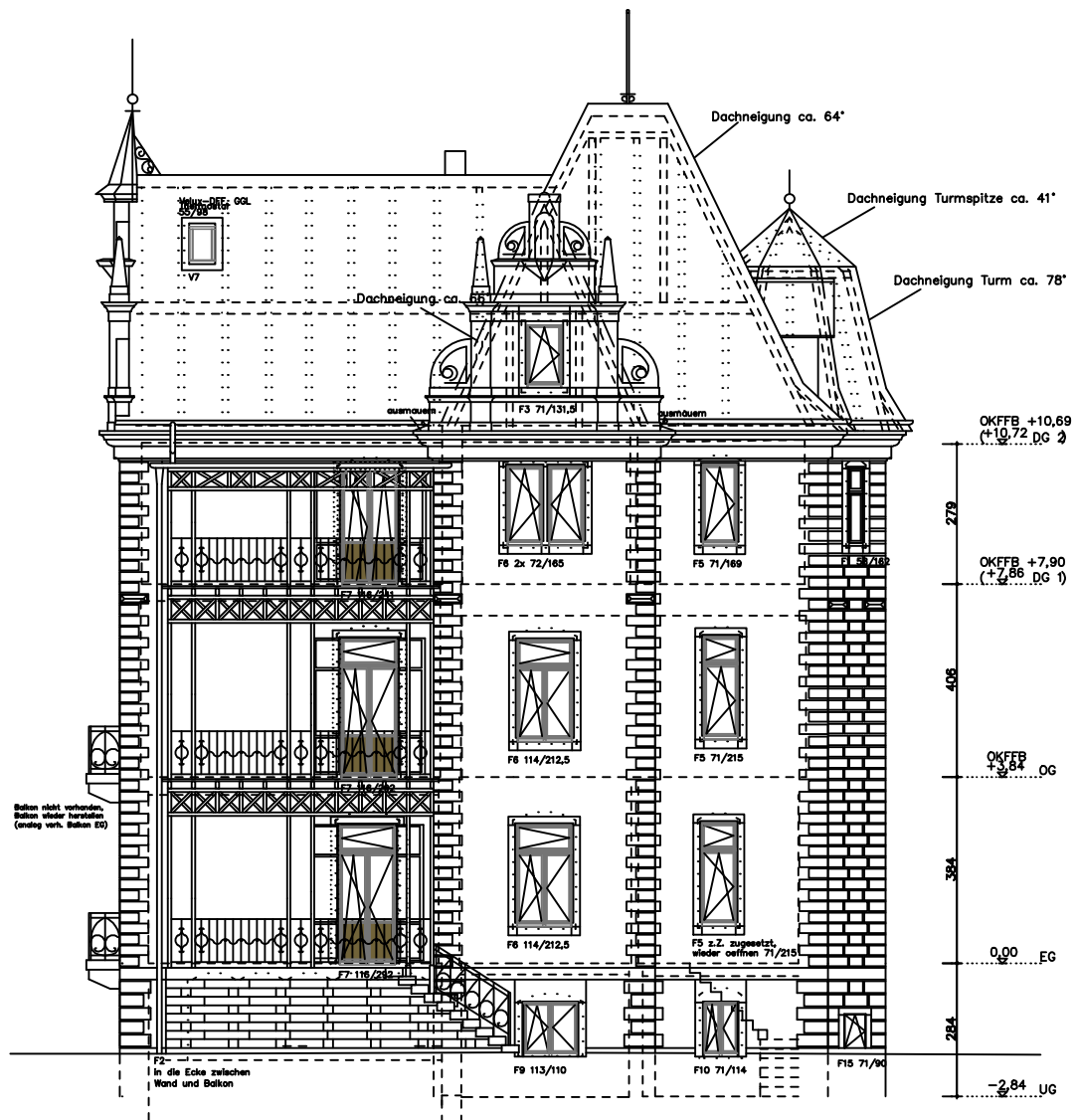
Schaubild Wärmebrücken an Außenecken

Berechnung der Wärmebrücken

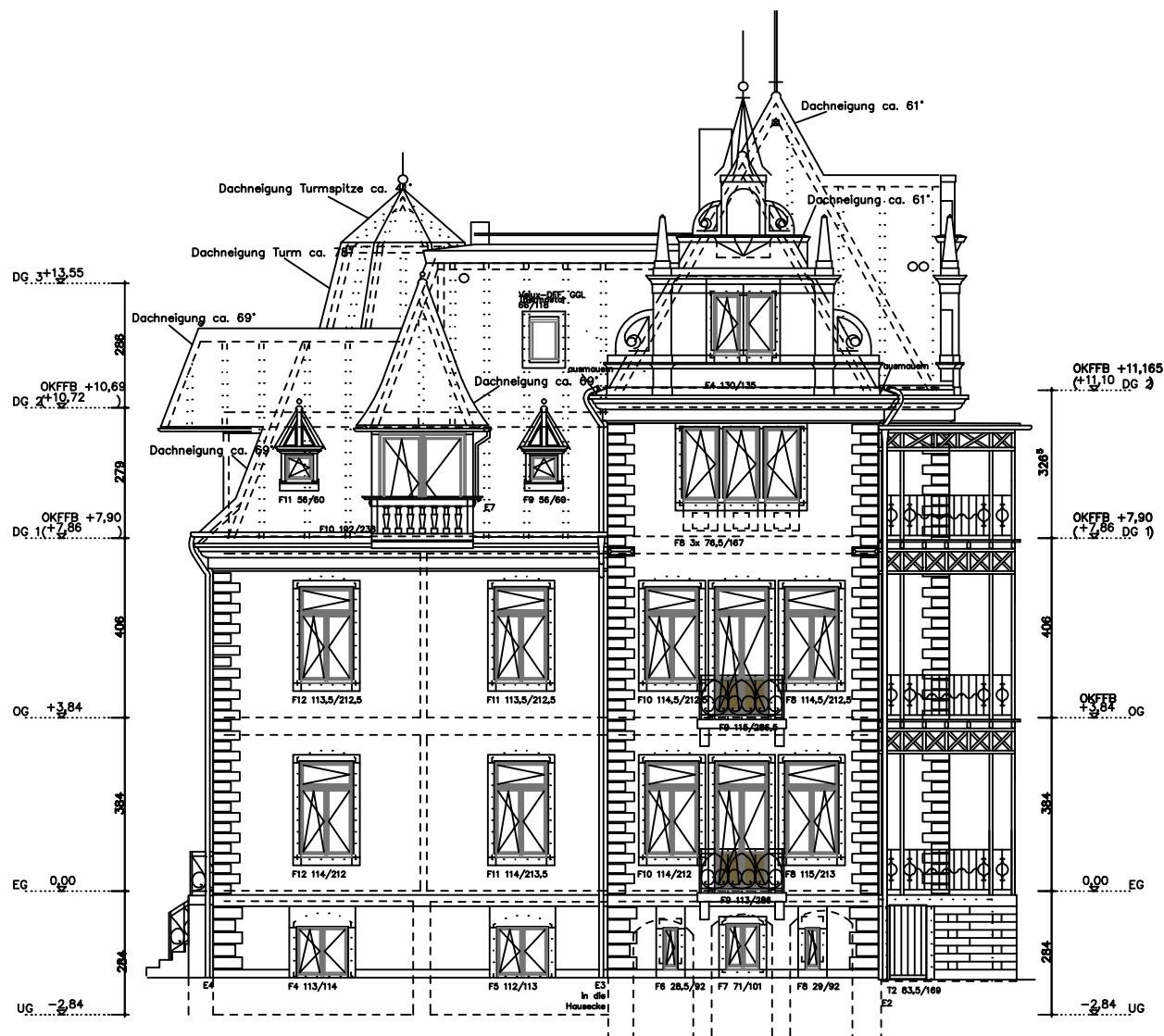
D. Ergebnistabelle

E. Produktinformation zu iQ-Therm der Firma Remmers

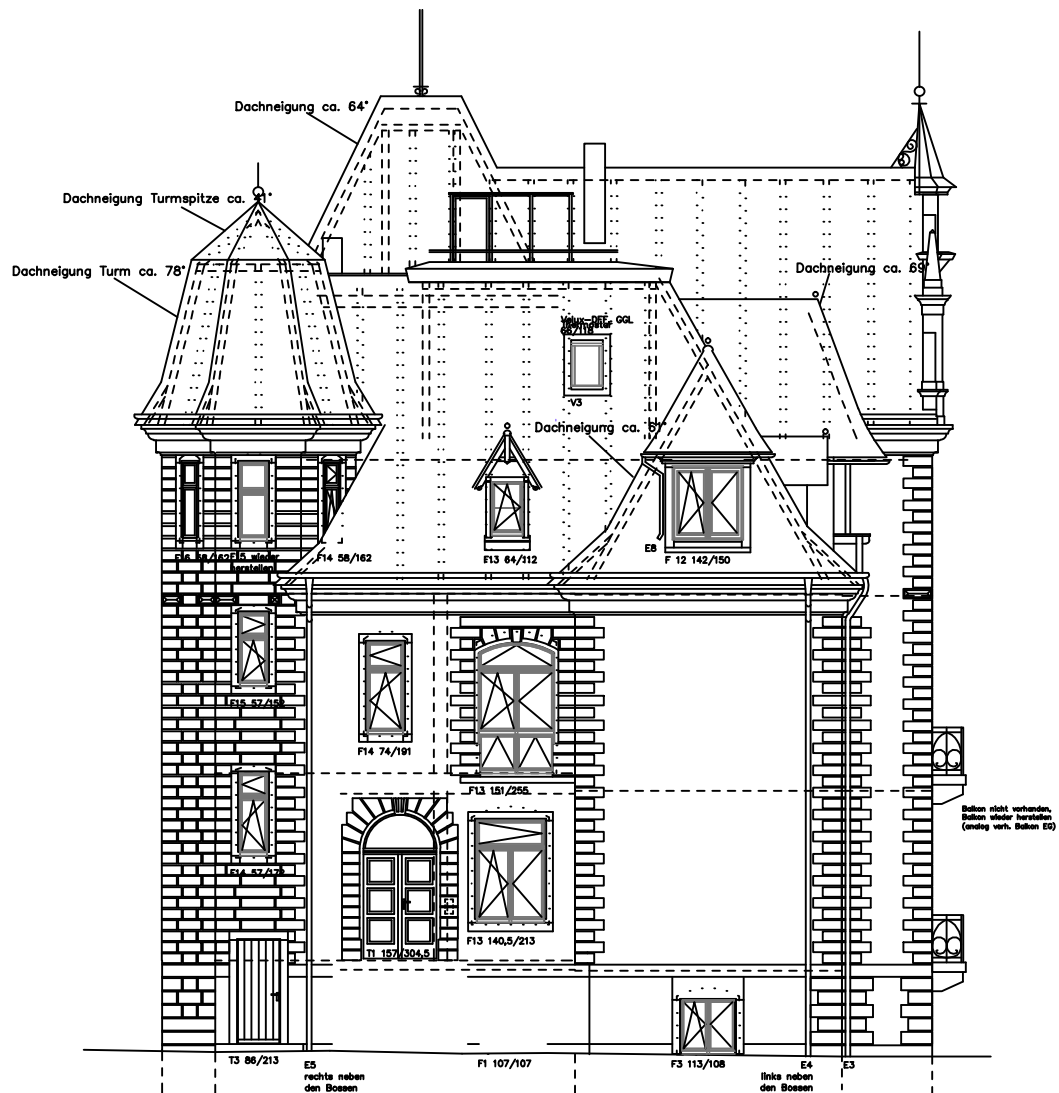
F. Datenträger



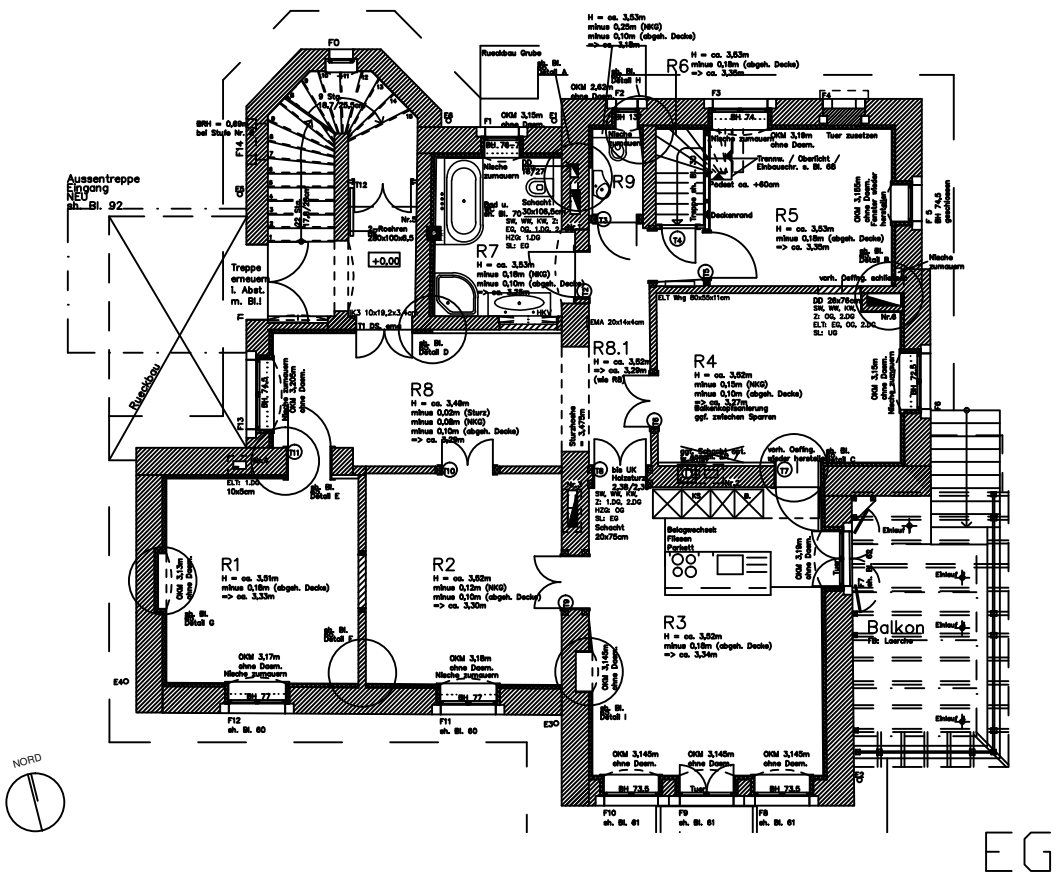
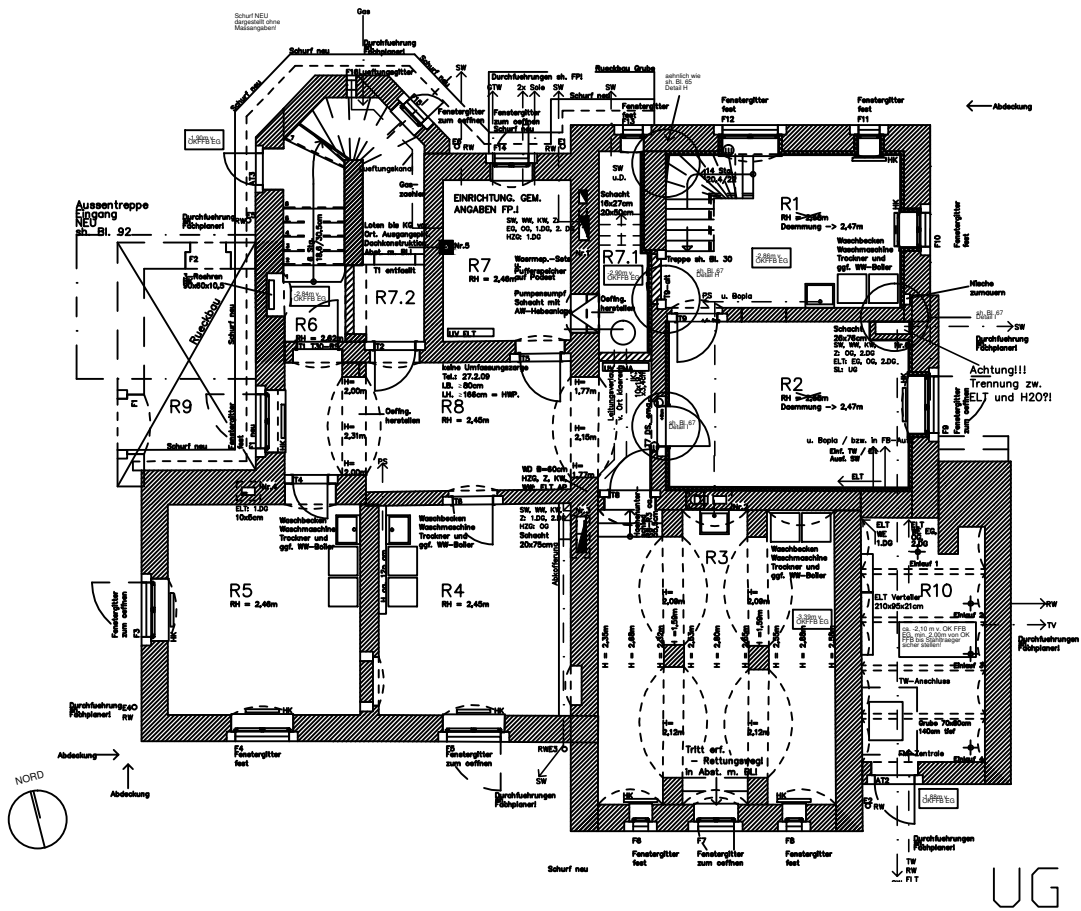
Ansicht Ost

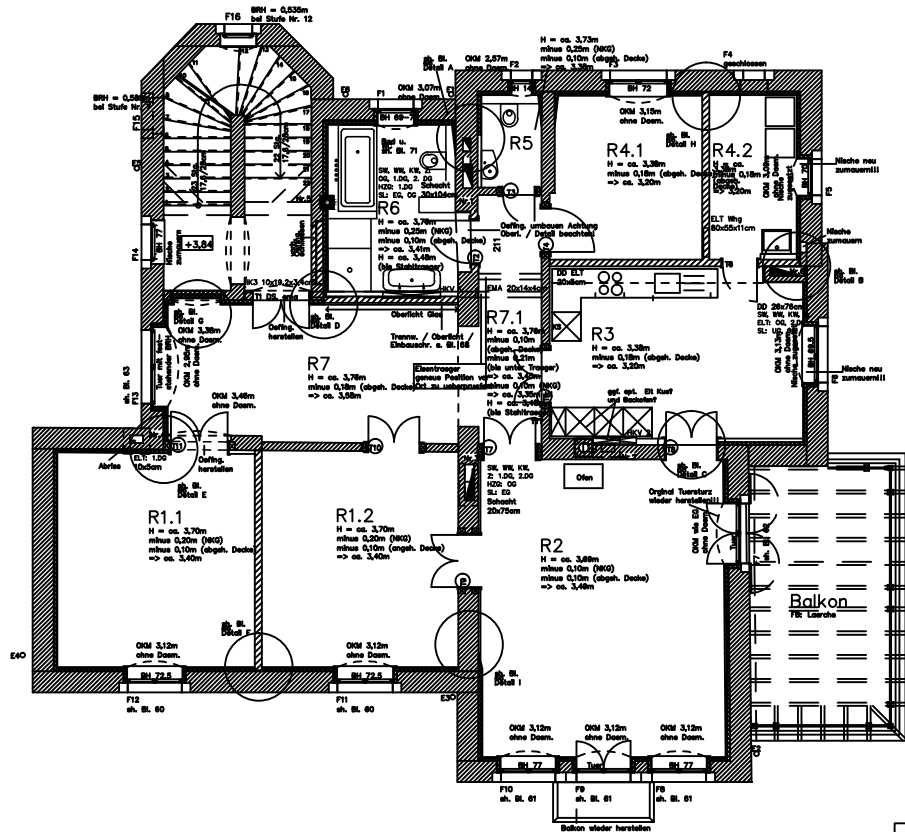


Ansicht Süd

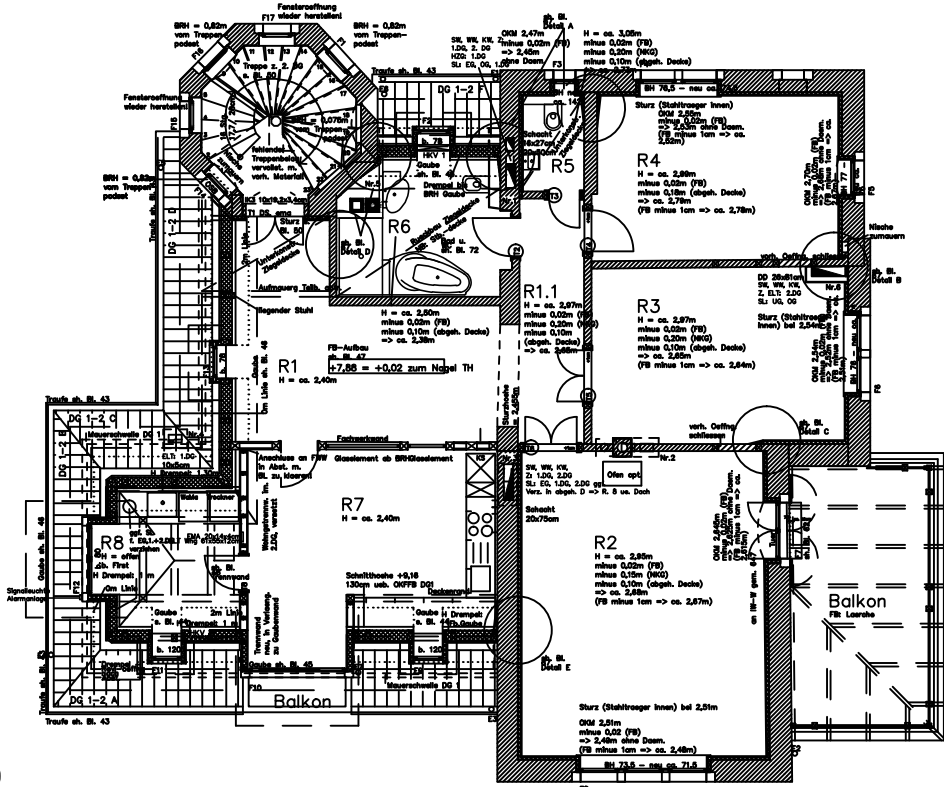


Ansicht West

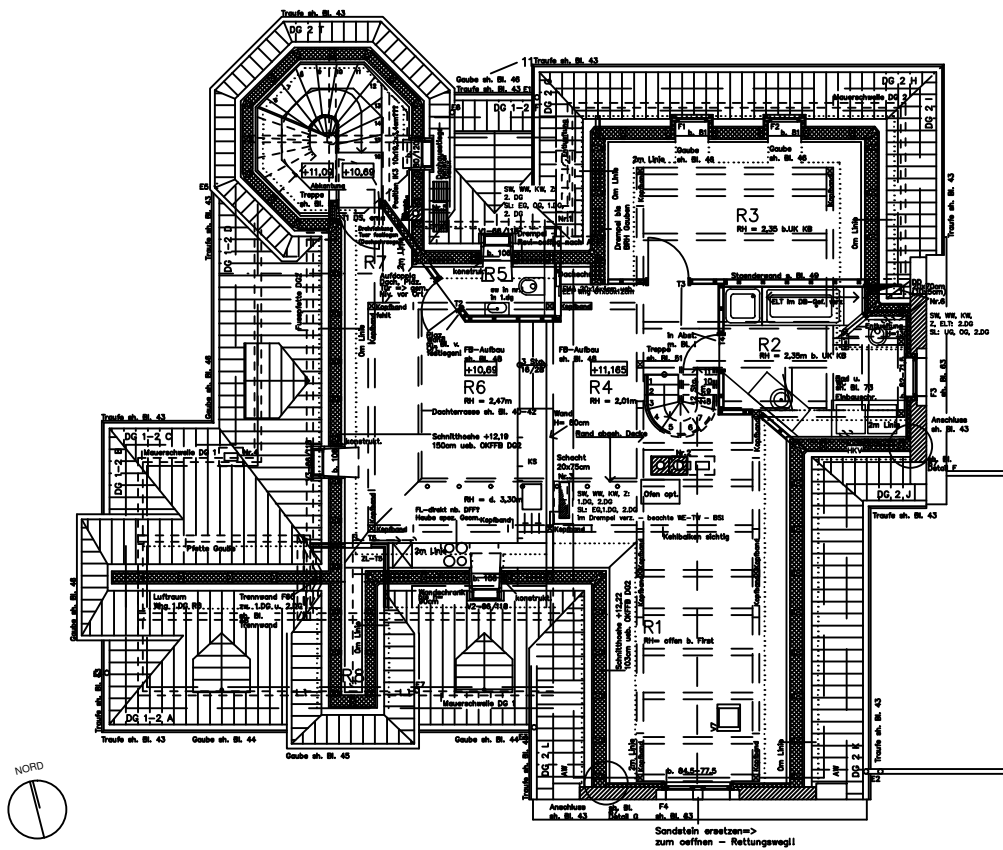




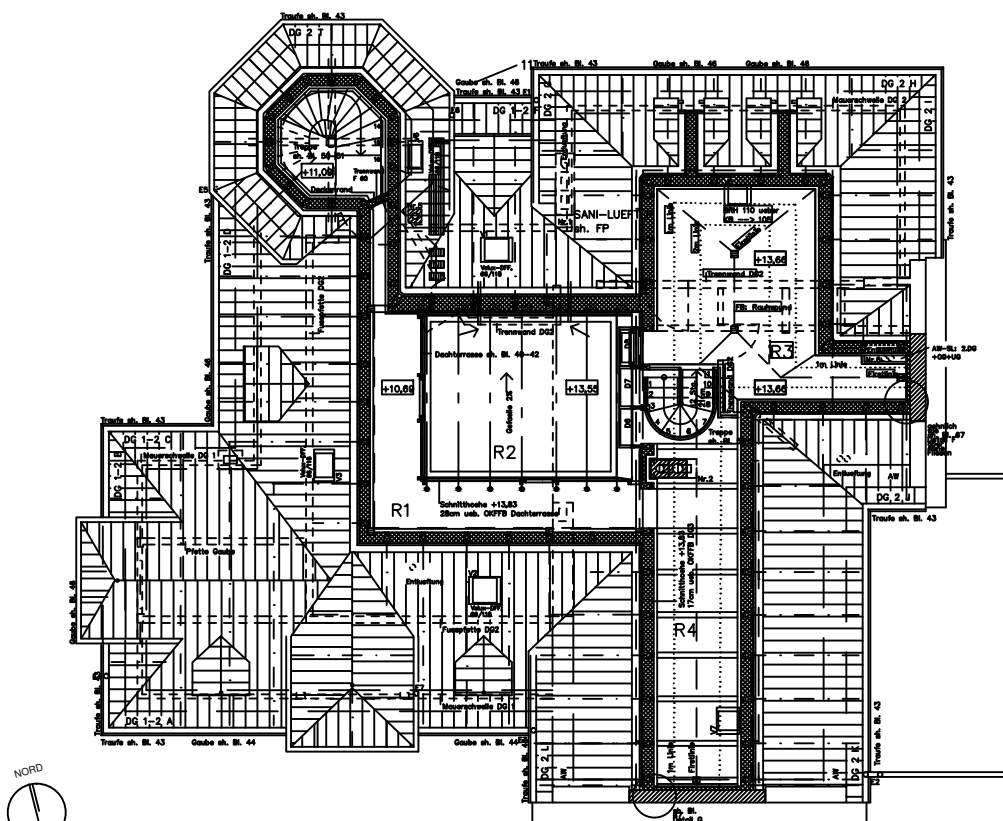
OG



1. DG

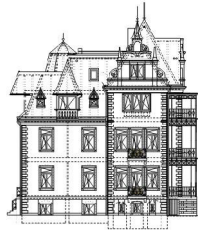


2. DG



3. DG

Passive House verification



Building:	Gründerzeitvilla, unsaniert		
Street:	Loschwitzerstraße		
Postcode/City:	01309 Dresden (Blasewitz)		
Country:	Germany		
Building Type:	Residential		
Climate:	Dresden		
Home Owner(s) / Client(s):			
Street:			
Postcode/City:			
Architect:			
Street:			
Postcode/City:			
Mechanical System:			
Street:			
Postcode/City:			
Year of Construction:	1870	Interior Temperature:	20,0 °C
Number of Dwelling Units:		Internal Heat Gains:	2,1 W/m²
Enclosed Volume V _e :	1916,0		
Number of Occupants:	18,2		

Specific building demands with reference to the treated floor area				use: Monthly method	
		Treated floor area		Requirements	Fulfilled?*
Space heating		637,1	m²		
	Annual heating demand	312	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	no
	Heating load	107	W/m²	10 W/m²	no
Space cooling	Overall specific space cooling demand		kWh/(m²a)	-	-
	Cooling load		W/m²	-	-
	Frequency of overheating (> 25 °C)	0,0	%	-	-
Primary Energy	Space heating and cooling, dehumidification, household electricity.		kWh/(m²a)	120 kWh/(m²a)	
	DHW, space heating and auxiliary electricity		kWh/(m²a)	-	-
	Specific primary energy reduction through solar electricity		kWh/(m²a)	-	-
Airtightness	Pressurization test result n ₅₀		1/h	0,6 1/h	

* empty field: data missing, "-": no requirement

Passive House?

☐

We confirm that the values given herein have been determined following the PHPP methodology and based on the characteristic values of the building. The PHPP calculations are attached to this application.

Name:

Registration number PHPP:

Surname:

Issued on:

Company:

Signature:

Passive House verification

U-VALUES OF BUILDING ELEMENTS

Building: **Gründerzeitvilla, unsaniert**

Wedge shaped building element layers and
still air spaces -> Secondary calculation to the right

Assembly No. Building assembly description						Interior insulation?
1 Wall construction groundfloor						
Heat transfer resistance [m²K/W] interior R _{si} : 0,13						
exterior R _{se} : 0,04						
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Lime cement plaster	0,850					20
2. Solid brick	0,750					250
3. Lime mortar	0,700					40
4. Solid brick	0,750					220
5. Lime cement mortar	0,850					25
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						55,5 cm
U-Value: 1,103 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description						Interior insulation?
2 Wall construction firstfloor + 1st attic						
Heat transfer resistance [m²K/W] interior R _{si} : 0,13						
exterior R _{se} : 0,04						
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Lime cement plaster	0,850					20
2. Solid brick	0,750					250
3. Lime mortar	0,700					35
4. Solid brick	0,750					110
5. Lime cement mortar	0,850					30
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						44,5 cm
U-Value: 1,318 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description						Interior insulation?
3 Wall construction 2nd attic						
Heat transfer resistance [m²K/W] interior R _{si} : 0,13						
exterior R _{se} : 0,04						
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Lime cement plaster	0,850					30
2. Solid brick	0,750					240
3. Lime cement mortar	0,850					30
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						30,0 cm
U-Value: 1,784 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description

Interior insulation?

Passive House verification

U-VALUES OF BUILDING ELEMENTS

Building: **Gründerzeitvilla, unsaniert**

Wedge shaped building element layers and
still air spaces -> Secondary calculation to the right

4		Wall construction basement ground					
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R _{si} :		0,13			
		exterior R _{se} :		0,00			
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]	
1. Sandstone	1,150					535	
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total	
						53,5 cm	
				U-Value: 1,680 W/(m²K)			

5		Wall construction basement					Interior insulation?
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R _{si} :		0,13			
		exterior R _{se} :		0,04			
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]	
1. Sandstone	1,150					535	
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total	
						53,5 cm	
				U-Value: 1,574 W/(m²K)			

6		Floor construction basement of higher value					Interior insulation?
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R _{si} :		0,17			
		exterior R _{se} :		0,00			
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]	
1. Parquet flooring	0,130					30	
2. Flooring sleeper (Air)	0,450					100	
3. Floor screed	1,400					60	
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total	
						19,0 cm	
				U-Value: 1,502 W/(m²K)			

Assembly No. Building assembly description

Interior insulation?

Passive House verification

U-VALUES OF BUILDING ELEMENTS

Building: **Gründerzeitvilla, unsaniert**

Wedge shaped building element layers and
still air spaces -> Secondary calculation to the right

7 Floor construction basement

Heat transfer resistance [m²K/W] interior R_{si} : **0,17**
exterior R_{se} : **0,00**

Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Solid brick	0,750					70
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						7,0 cm
U-Value: 3,797 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description

8 Roof construction

Interior insulation?

Heat transfer resistance [m²K/W] interior R_{si} : **0,13**
exterior R_{se} : **0,10**

Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Sheating	0,200					25
2. Rafter (Air)	0,063					10
3. Tile cover	0,900					10
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						4,5 cm
U-Value: 1,905 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description

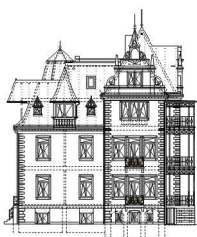
9

Interior insulation?

Heat transfer resistance [m²K/W] interior R_{si} :
exterior R_{se} :

Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
U-Value: W/(m²K)						

Passive House verification



Building:	Gründerzeitvilla, saniert		
Street:	Loschwitzerstraße		
Postcode/City:	01309 Dresden (Blasewitz)		
Country:	Germany		
Building Type:	Residential		
Climate:	Dresden		
Home Owner(s) / Client(s):			
Street:			
Postcode/City:			
Architect:			
Street:			
Postcode/City:			
Mechanical System:			
Street:			
Postcode/City:			
Year of Construction:	1870	Interior Temperature:	20,0 °C
Number of Dwelling Units:		Internal Heat Gains:	2,1 W/m²
Enclosed Volume V _e :	1819,9		
Number of Occupants:	16,3		

Specific building demands with reference to the treated floor area

use: Monthly method

		Treated floor area		Requirements	Fulfilled?*
		569,2	m²		
Space heating	Annual heating demand	93	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	no
	Heating load	37	W/m²	10 W/m²	no
Space cooling	Overall specific space cooling demand	0	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	yes
	Cooling load	5	W/m²	-	-
	Frequency of overheating (> 25 °C)		%	-	-
Primary Energy	Space heating and cooling, dehumidification, household electricity.		kWh/(m²a)	120 kWh/(m²a)	
	DHW, space heating and auxiliary electricity		kWh/(m²a)	-	-
	Specific primary energy reduction through solar electricity		kWh/(m²a)	-	-
Airtightness	Pressurization test result n ₅₀	1/h		0,6 1/h	

* empty field: data missing, "-": no requirement

Passive House?

☐

We confirm that the values given herein have been determined following the PHPP methodology and based on the characteristic values of the building. The PHPP calculations are attached to this application.

Name:

Registration number PHPP:

Surname:

Issued on:

Company:

Signature:

Passive House verification

U-VALUES OF BUILDING ELEMENTS

Building: **Gründerzeitvilla, saniert**

Wedge shaped building element layers and
still air spaces -> Secondary calculation to the right

Assembly No. Building assembly description						Interior insulation?
1 Wall construction groundfloor renovated						x
Heat transfer resistance [m²K/W] interior R _{si} : 0,13						
exterior R _{se} : 0,04						
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Plaster IQ TOP	0,111					20
2. Insulation IQ THERM	0,031					50
3. Adhesive IQ FIX	0,497					6
4. Lime cement plaster	0,850					20
5. Solid brick	0,750					250
6. Lime mortar	0,700					40
7. Solid brick	0,750					220
8. Lime cement mortar	0,850					25
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						63,1 cm
U-Value: 0,369 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description						Interior insulation?
2 Wall construction firstfloor + 1st attic renovated						x
Heat transfer resistance [m²K/W] interior R _{si} : 0,13						
exterior R _{se} : 0,04						
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Plaster IQ TOP	0,111					20
2. Insulation IQ THERM	0,031					50
3. Adhesive IQ FIX	0,497					6
4. Lime cement plaster	0,850					20
5. Solid brick	0,750					250
6. Lime mortar	0,700					35
7. Solid brick	0,750					110
8. Lime cement mortar	0,850					30
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						52,1 cm
U-Value: 0,390 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description						Interior insulation?
3 Wall construction 2nd attic renovated						x
Heat transfer resistance [m²K/W] interior R _{si} : 0,13						
exterior R _{se} : 0,04						
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Plaster IQ TOP	0,111					20
2. Insulation IQ THERM	0,031					50
3. Adhesive IQ FIX	0,497					6
4. Lime cement plaster	0,850					30
5. Solid brick	0,750					240
6. Lime cement mortar	0,850					30
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						37,6 cm
U-Value: 0,423 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description

Interior insulation?

Passive House verification

U-VALUES OF BUILDING ELEMENTS

Building: **Gründerzeitvilla, saniert**

Wedge shaped building element layers and
still air spaces -> Secondary calculation to the right

4	Wall construction ground renovated					x
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R _{si} :		0,13		
		exterior R _{se} :		0,00		
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Plaster IQ TOP	0,111					20
2. Insulation IQ THERM	0,031					50
3. Adhesive IQ FIX	0,497					6
4. Bitumen	0,145					5
5. Plaster	0,850					20
6. Sandstone	1,150					535
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						63,6 cm
		U-Value:		0,407 W/(m²K)		

5	Wall construction basement renovated					x
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R _{si} :		0,13		
		exterior R _{se} :		0,04		
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Plaster IQ TOP	0,111					20
2. Insulation IQ THERM	0,031					50
3. Adhesive IQ FIX	0,497					6
4. Bitumen	0,145					5
5. Plaster	0,850					20
6. Sandstone	1,150					535
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						63,6 cm
		U-Value:		0,400 W/(m²K)		

6	Floor insulated					
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R _{si} :		0,17		
		exterior R _{se} :		0,00		
Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Flagstone	1,300					15
2. Cement screed	1,400					55
3. Insulation	0,100					100
4. Waterproofing	0,145					5
5. Blinding layer	1,100					120
6. PE sheet	0,500					0
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						29,5 cm
		U-Value:		0,733 W/(m²K)		

Assembly No. Building assembly description

Interior insulation?

Passive House verification

U-VALUES OF BUILDING ELEMENTS

Building: **Gründerzeitvilla, saniert**

Wedge shaped building element layers and
still air spaces -> Secondary calculation to the right

7 **Floor Groundfloor**

Heat transfer resistance [m²K/W] interior R_{si} : **0,13**
exterior R_{se} : **0,04**

Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Parquet flooring	0,130					15
2. Floor screed	1,400					65
3. Impact sound insulation	0,030					30
4. Reinforced concrete	2,300					180
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						29,0 cm
U-Value: 0,709 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description

8 **Roof construction insulated**

Interior insulation?

Heat transfer resistance [m²K/W] interior R_{si} : **0,13**
exterior R_{se} : **0,04**

Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Sheating	0,200					25
2. Vapor retarder	0,150					0
3. Cellulosic insulation	0,040					250
4. Wood fibre insulation	0,110					35
5. Air	0,063					10
6. Tile cover	0,900					10
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
						33,0 cm
U-Value: 0,142 W/(m²K)						

Assembly No. Building assembly description

9

Interior insulation?

Heat transfer resistance [m²K/W] interior R_{si} :
exterior R_{se} :

Area section 1	λ [W/(mK)]	Area section 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Area section 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Percentage of Sec. 2		Percentage of Sec. 3		Total
U-Value: W/(m²K)						

Theorie zur Berechnung der längenbezogenen Psi-Werte mit THERM

Folgende Formel wurde zur Berechnung der längenbezogenen Psi-Werte genutzt:

$$\Psi = \frac{\left(\sum_{i=1}^N b_i \cdot U_i \cdot \Delta T_i - \sum_{k=1}^K b_k \cdot U_k \cdot \Delta T_k \right)}{\Delta T_{\max}}$$

mit b= Bauteilabmessung, U= U-Wert der Konstruktion und ΔT= Temperaturdifferenz. Der Index i steht für den durch die Wärmebrücke gestörten Bauteilabschnitt und der Index k für den ungestörten Bereich.

Liegen nur zwei verschiedene Temperaturen vor, gilt alle ΔT_i sind gleich, ΔT_k=ΔT_i und ΔT_i=ΔT_{max}, sodass die Formel wie folgt vereinfacht werden kann:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N b_i \cdot U_i - \sum_{k=1}^K b_k \cdot U_k$$

Sind verschiedene Temperaturdifferenzen vorhanden, richtet sich THERM bei der Berechnung der U-Werte nach der groten Differenz. Es gilt: alle ΔT_i sind gleich, verschiedene ΔT_k und ΔT_{max}=ΔT_i.

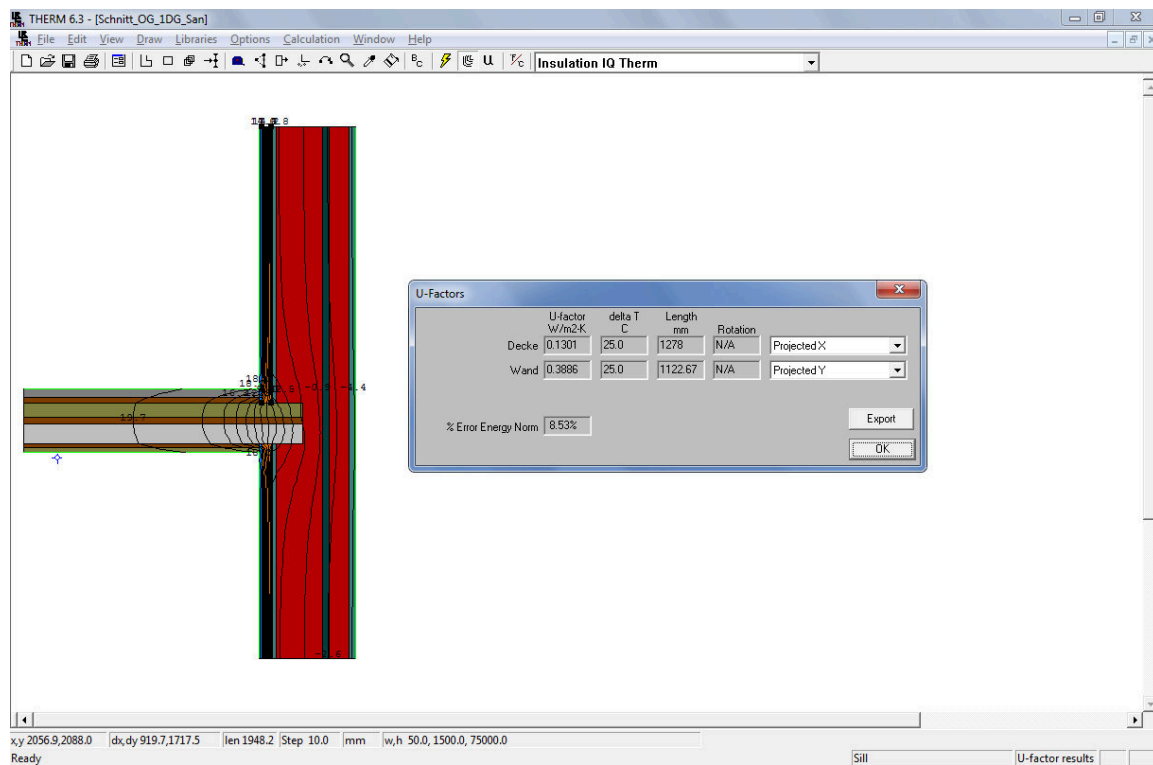
$$\Psi = \frac{\left(\sum_{i=1}^N b_i \cdot U_i \cdot \Delta T_{\max} - \sum_{k=1}^K b_k \cdot U_k \cdot \Delta T_k \right)}{\Delta T_{\max}}$$

Vergleich Innen- und Außenmaß

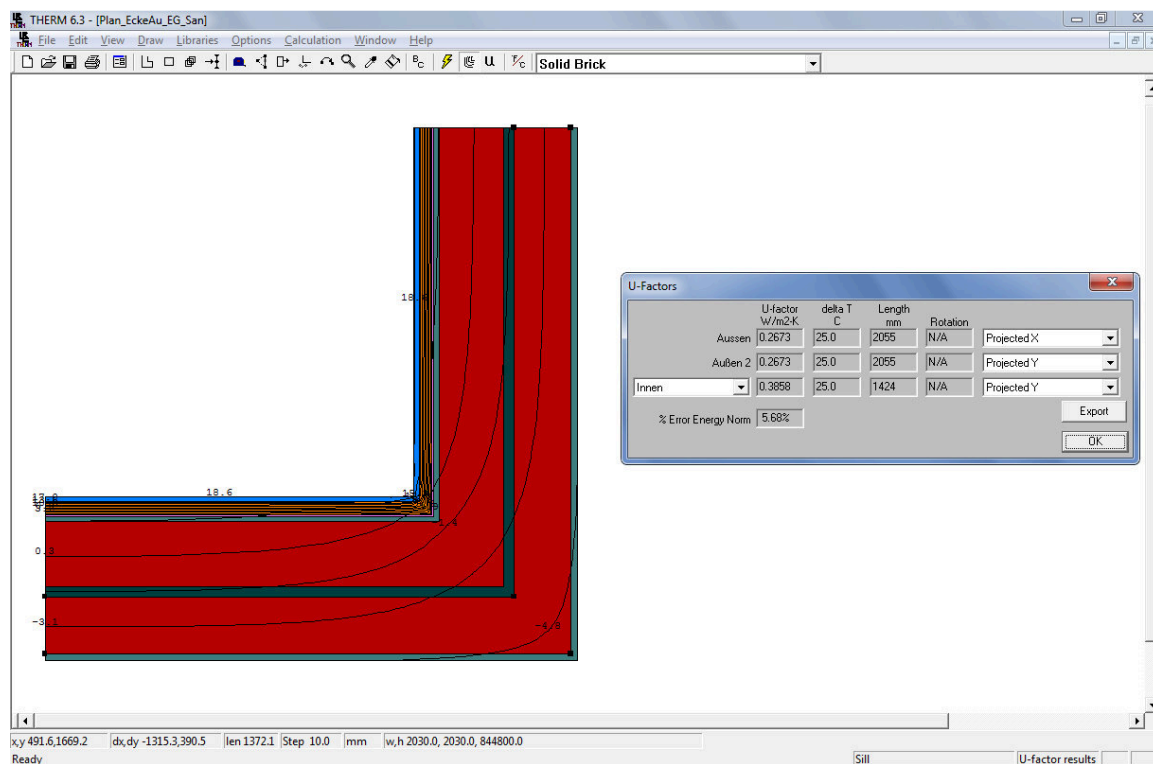
Während das Maß b_i des gestörten Bereiches stets im Innenmaß verwendet wird, kann b_k sowohl im Innen- als auch im Außenmaß angegeben werden. Wird für b_k der Innenmaß genutzt, ergeben sich der innenmabezogene Wrmebrckenverlustkoeffizient, bei Nutzung des Auenmaes für b_k der auenmabezogene.

Diese Zusammenstellung basiert auf der Vorlesung "Wärmebrücken mit THERM" der Veranstaltung "Sonderthemen Bauklimatik" gehalten im Sommersemester 2012 von Dipl. Ing. Heiko Fechner an der Technischen Universität Dresden.

Ausschnitte aus THERM

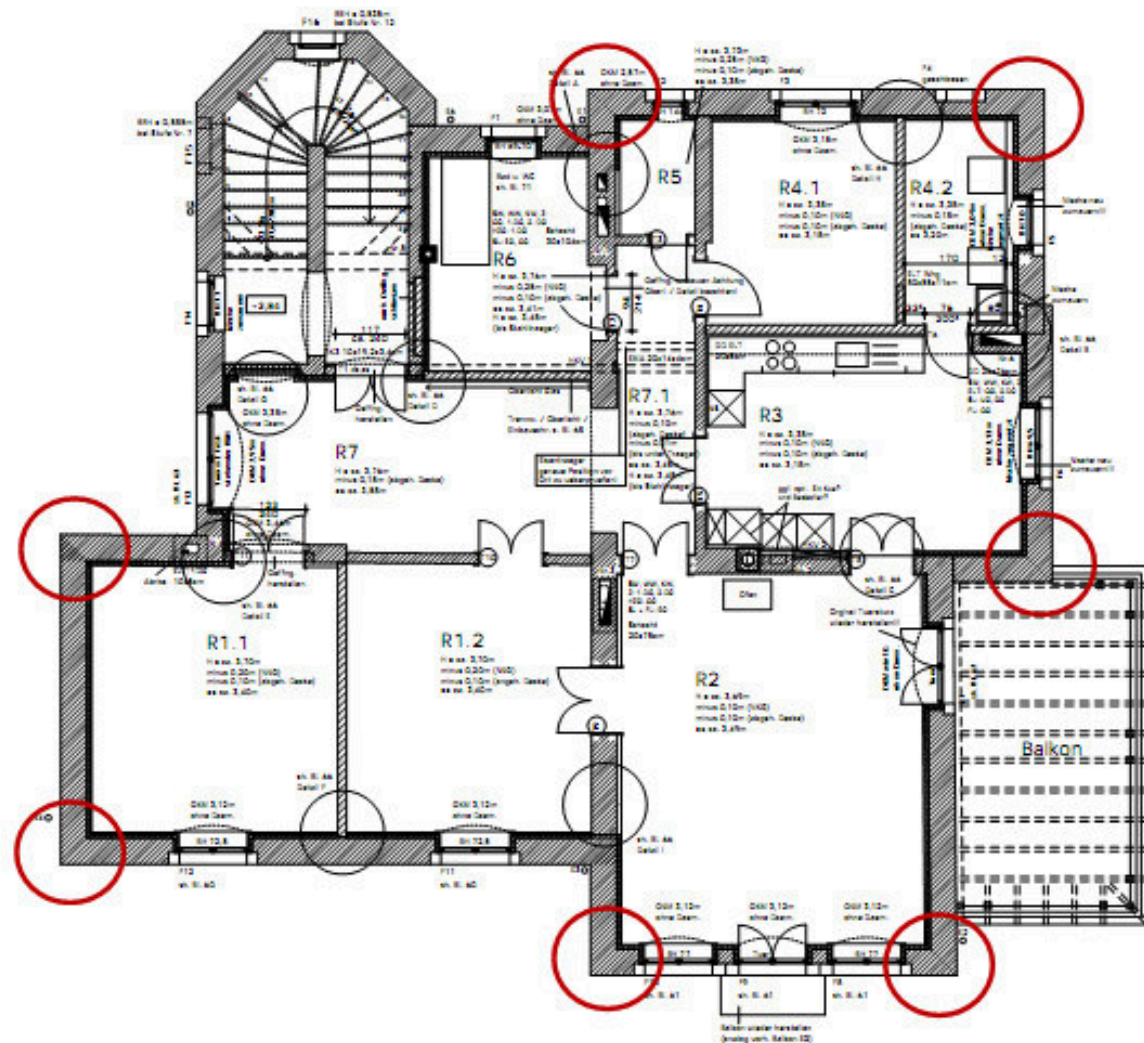


Anschluss der Geschossdecke im Vertikalschnitt



Außenecke im Horizontalschnitt

Schaubild Wärmebrücken an Außenecken



Die Wärmebrücken sind beispielhaft am Obergeschoss dargestellt (rote Kreise).

Berechnung der Psi-Werte

	U _k ungestört	L _{Wand}		U _i gest.	Psi -Werte	
	PHPP W/(m²K)	Innenmaß m	Außenmaß m	Therm W/(m²K)	Innenmaßbez. W/(mK)	Außenmaßbez. W/(mK)
Außenecken						
Plan_EckeAu_Boden_San	0,406	1,8	2,436	0,4134	0,0133	-0,2449
Plan_EckeAu_UG_San	0,4	1,8	2,436	0,4192	0,0346	-0,2198
Plan_EckeAu_NR_UG_San	0,4	1,8	2,436	0,4009	0,0016	-0,2528
Plan_EckeAu_OG_San	0,39	2,848	3,89	0,4047	0,0419	-0,3645

Wärmebrücken im Anschlussbereich Decke/Fußboden	U _{k,Wand} ungest.	L _{k,Wand}		U _{k,FB} ungest	L _{k,FB}	
	PHPP W/(m²K)	Innenmaß m	Außenmaß m	Therm W/(m²K)	Innenmaß m	Außenmaß m
Schnitt_UG/Boden_San	0,406	1,205	1,5	0,733	0,899	1,535
Schnitt_EG/UG_San	0,369	1,39	1,5	0,709	1,014	1,014
Schnitt_UG/EG_San	0,4	1,32	1,5	0,709	0,924	1,014
Schnitt_1DG/OG_San	0,39	1,425	1,579	0,679	1,278	1,278
Schnitt_OG/1DG_San	0,39	1,123	1,275	0,679	1,278	1,278
Schnitt_Dach/OG_San	0,139	0,708	1,097	0,679	1,453	1,453
Schnitt_OG/Dach_San	0,39	1,123	1,343	0,679	1,278	1,453

Ergebnisse	U _{i,Wand} gest.	U _{i,FB} gest.	T _k	Δt _{max}	Psi -Werte	
	Therm W/(m²K)	Therm W/(m²K)	°C	°C	Innenmaß W/(mK)	Außenmaß W/(mK)
Schnitt_UG/Boden_San	0,4196	0,4711	10	25	0,1763	-0,1299
Schnitt_EG/UG_San	0,3818	0,0956	0	25	0,1147	0,0741
Schnitt_UG/EG_San	0,3928	0,4864	0	25	0,4399	0,3679
Schnitt_1DG/OG_San	0,3894	0,0804	0	25	0,1019	0,0418
Schnitt_OG/1DG_San	0,3886	0,1301	0	25	0,1647	0,1054
Schnitt_Dach/OG_San	0,1183	0,0753	0	25	0,0948	0,0407
Schnitt_OG/Dach_San	0,3652	0,0838	0	25	0,0792	-0,0066

Zusammenstellung der Ergebnisse der durchgeführten Simulationen

	unsaniert				saniert			
	Transmission [kW]	Lueftung [kW]	interne Gewinne [kW]	Heizbedarf [kW]	Transmission [kW]	Lueftung [kW]	interne Gewinne [kW]	Heizbedarf [kW]
E+0	-167042	-18778	8265	178301	-38117	-17204	7516	52053
E+1	-167041	-16527	6791	177525	-38097	-15930	6407	51874
E+1.1	-169273	-15916	6791	178894	-39849	-15297	6407	52862
E+2				nur saniert	-42368	-17165	7516	56233
E+3				nur saniert	-42347	-15893	6407	56052
E+4	-197380	-52830	9645	236258	-71671	-23776	9645	86714
PHPP-0	-177215	-15333	7025	185524	-44028	-13698	6276	51452
PHPP-1	-177215	-17787	7025	187977	-44028	-15889	6276	53643
PHPP-2				nur saniert	-44737	-13698	6276	52160
E+0/PHPP-0	94,26%	122,47%	117,66%	96,11%	86,57%	125,60%	119,76%	101,17%
E+0/E+1	100,00%	113,62%	121,70%	100,44%				
E+1/PHPP-0	94,26%	107,78%	96,68%	95,69%	86,53%	116,29%	102,09%	100,82%
E+1/PHPP-1	94,26%	92,92%	96,68%	94,44%	86,53%	100,25%	102,09%	96,70%
E+1.1/PHPP-0	95,52%	103,80%	96,68%	96,43%	90,51%	111,67%	102,09%	102,74%
E+2/E+0					111,15%	99,77%	100,00%	108,03%
PHPP-2/PHPP-0					101,61%	100,00%	100,00%	101,38%
E+2/PHPP-2					94,71%	125,31%	119,76%	107,81%
E+3/PHPP-2					94,66%	116,03%	102,09%	107,46%
E+4/PHPP-0	111,38%	344,55%	137,30%	127,35%	162,78%	173,58%	153,68%	168,53%
E+4/E+0	118,16%	281,34%	116,69%	132,50%	188,03%	138,20%	128,33%	166,59%

Legende

E+0	Ausgangsvariante EnergyPlus
E+1	1.Variante EnergyPlus: Energiebezugsfläche aus PHPP, mit wahren Raumhöhen berechnetes Volumina
E+1.1	Variation der ersten Variante: ohne an das PHPP angepasstes Wetter
E+2	2.Variante EnergyPlus: mit ausgewählten Wärmebrücken
E+3	3.Variante EnergyPlus: Kombination aus Variante 1 und 2
E+4	4.Variante EnergyPlus: stark vereinfachte Anpassung an PHPP
PHPP-0	Ausgangsvariante PHPP
PHPP-1	1.Variante PHPP: Anpassung Mittelwert der Raumhöhe auf wahren Wert
PHPP-2	2.Variante PHPP: mit ausgewählten Wärmebrücken



Technisches Merkblatt Artikelnummer 0241, 0242, 0243

iQ-Therm 30 / 50 / 80

Kapillaraktive PUR-Hartschaumplatte zur Erstellung hochwärmedämmender diffusionsfähiger Innendämmungen mit kapillarem Feuchtetransport

Anwendungsgebiete

iQ-Therm verbindet Kapillarität, Wärmedämmung und Luftfeuchtigkeitsregulierung in einem System. Zur Realisierung dieser multifunktionalen Anforderungen ist eine hoch wärmedämmende Polyurethanschaumplatte mit regelmäßigen, senkrecht zur Oberfläche stehenden Lochungen versehen. Diese Lochungen sind werksseitig mit einem speziellen, hoch kapillaraktiven mineralischen Material verfüllt. Die Platten werden mit iQ-Fix auf die Innenwandoberflächen angebracht und abschließend mit iQ-Top überputzt. Mit einer Dicke von 1,0 cm stellt iQ-Top die Sorptionsschicht dar.

Produkteigenschaften

Remmers iQ-Therm 30, 50 oder 80 besteht aus einer gelochten hochwärmedämmenden PUR-Hartschaumplatte mit mineralischer, kapillarleitender Füllung. Die Hartschaumplatten werden ausschließlich im System verarbeitet. Das iQ-Therm-System ist B1 schwerentflammbar nach DIN 4102-1.



Produktkenndaten

PUR-Hartschaumplatte nach Abmessungen:	EN 13165
- Länge	1200 mm +/- 2 mm
- Breite	600 mm +/- 2 mm
- Dicke iQ-Therm 30	30 mm +/- 2 mm
- Dicke iQ-Therm 50	50 mm +/- 2 mm
- Dicke iQ-Therm 80	80 mm +/- 2 mm
Trockenrohdichte	ca. 45 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	0,031 W/mK
Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	ca. 115 kPa
Wasserdampfdiffusion	$\mu = \text{ca. } 27$
W_{80}	0,0026 m ³ /m ³
W_{sat}	0,98 m ³ /m ³
Aw- Wert	0,774 kg/(m ² h ^{0,5})
Baustoffklasse	B2 normalentflammbar nach DIN 4102-1

Systemkomponenten

- iQ-Fix
- iQ-Therm 30, 50 oder 80
- iQ-Therm L15
- iQ-Therm K50
- iQ-Top
- iQ-TEX
- iQ-Fill
- iQ-Paint

Hinweise

Vor der Verarbeitung müssen die Platten 48 Stunden in dem zu dämmenden Raum bei oberhalb 5 °C gelagert werden. Die Technischen Merkblätter der Systemkomponenten sind zu beachten.

Verarbeitung

- Egalisieren und Ausgleichen stark unebener Untergründe – Fugenverschluss und Flächenausgleich mit Grundputz, Art.-Nr. 0401.
- Vollflächige Verklebung von Remmers iQ-Therm mit Remmers iQ-Fix, einem hydraulisch abbindenden Ansetzmörtel
- iQ-Fix auf ebenen Untergrund und auf iQ-Therm mittels Zahnkelle gleichmäßig im Buttering-Floating-Verfahren auftragen. Die iQ-Therm-Platten in das frische Klebebett eindrücken. Kreuzfugen ver-

meiden. Eine Verdübelung ist nicht erforderlich.

- iQ-Therm wird nach dem Anbringen mit iQ-Top vollflächig 1,0 cm dick überputzt.

Lieferform, Lagerung

Lieferform:

Plattendicke 30 mm, 50 mm oder 80 mm

iQ-Therm 30 = 14 Platten im Paket
= 1200 x 600 x 420 mm
= 10,08 m²

iQ-Therm 50 = 8 Platten im Paket
= 1200 x 600 x 400 mm
= 5,76 m²

iQ-Therm 80 = 5 Platten im Paket
= 1200 x 600 x 400 mm
= 3,60 m²

Lagerung:

Frostfrei

Sicherheit, Ökologie, Entsorgung

Nähere Informationen zur Sicherheit bei Transport, Lagerung und Umgang sowie zur Entsorgung und Ökologie können dem aktuellen Sicherheitsdatenblatt entnommen werden.



Vorstehende Angaben wurden aus unserem Herstellerbereich nach dem neuesten Stand der Entwicklung und Anwendungstechnik zusammengestellt.

Da Anwendung und Verarbeitung außerhalb unseres Einflusses liegen, kann aus dem Inhalt des Merkblattes keine Haftung des Herstellers abgeleitet werden. Über den Inhalt des Merkblattes hinausgehende oder abweichende Angaben bedürfen der schriftlichen Bestätigung durch das Stammwerk.

Es gelten in jedem Fall unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen. Mit Herausgabe dieses technischen Merkblattes verlieren vorangegangene ihre Gültigkeit.

0241-0242-0243-TM-02 11 Bo

