



DIPLOMARBEIT

Ökologische Gebäudeevaluierung in BIM-Umgebung während der frühen Entwurfsphase

**ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs / Diplom-Ingenieurin
unter der Leitung**

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Iva Kovacic

E234 – Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement
Industriebau und interdisziplinäre Bauplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Sebastian Hepp

1015083

Wien, am 26.09.2016

KURZFASSUNG

Durch immer komplexer werdende Bauvorhaben, auch auf dem vermehrten Wunsch nach nachhaltigeren, ökologischeren Gebäuden begründet, verändern sich die Planungsprozesse und deren Werkzeuge. Wogegen vorher ein Projekt schrittweise von verschiedenen Fachplanern an verschiedenen Programmen bearbeitet wurde, soll Building Information Modeling (BIM) möglich machen, digitale Projekte in derselben Software-Umgebung gleichzeitig von verschiedenen Beteiligten bearbeiten zu können. Der Planungsprozess soll somit schneller und effizienter werden. Dadurch, dass Dateien nicht mehr in andere Formate konvertiert und Informationen nicht in mehreren Dateiformaten parallel gepflegt werden müssen, wird es erst praktikabel, Projekte mehrfach zu ändern, zu reevaluieren und so das Projekt als Gesamtes schrittweise zu verbessern – ein iterativer Planungsprozess wird ermöglicht.

In Bezug auf diese Entwicklung soll in dieser Arbeit der Aspekt der Gebäudenachhaltigkeit näher betrachtet werden. Aus der Sicht eines Architekten soll untersucht werden, inwieweit für diesen eine ökologische Gebäudeevaluierung schon innerhalb der frühen Entwurfsphase in BIM-Umgebung durchführbar ist und dadurch eine Optimierung des Entwurfes ermöglicht wird. Eine Gebäudeevaluierung soll in diesem Fall aus der Erfassung des Energiebedarfs, der Ökobilanz und daraus folgend der CO₂-Bilanz des Projektes bestehen.

Dazu wurden Möglichkeiten zur Energiesimulation und CO₂-Bilanzierung eines Projektes in Autodesk Revit als BIM-Applikation untersucht und Methoden entwickelt, die dann an drei Fallstudien angewendet wurden.

Im Schluss konnte eine erfolgreiche Methodik gefunden werden, die allerdings Einschränkungen, insbesondere bezüglich der Komplexität des Projektes, unterworfen ist.

ABSTRACT

By increasingly complex construction projects – what is also caused by the greater demand for more sustainable, ecological buildings – the planning processes and their tools are changing. Whereas a project was developed sequentially by different planners in different applications before, Building Information Modelling (BIM) is now expected to enable for all involved to work on a digital project simultaneously in one software environment. Therefore the planning process becomes faster and more efficient. Since it is not necessary to convert files to other formats and maintain information in several applications concurrently, it then becomes feasible to modify and re-evaluate projects repeatedly and thus gradually improve the project over-all – an iterative planning process was made possible.

Regarding this development, in this thesis the aspect of building sustainability is to be approached. From the perspective of an architect, it will be examined, to which extent he or she is able to perform an ecological building analysis and hence to optimise the design already in the early design stage. The building analysis will be comprised of obtaining the energy demand and life cycle assessment and consequently determining the carbon footprint of the project.

To achieve this, options for energy simulation and assessing the carbon footprint of a project in Autodesk Revit as BIM-application have been analysed and methodologies developed, which have been applied to three case studies.

In conclusion one successful methodology could be found, which however, is subjected to restrictions, especially regarding the complexity of a project.

ERLÄUTERUNGEN

A. ABKÜRZUNGEN

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEM	Building Energy Model (Energiemodell für die Energiesimulation)
BIM	Building Information Modeling <i>oder</i> Building Information Model
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BPA	Building Performance Analysis (Synonym zu BPS, hauptsächlich von Autodesk verwendet)
BPS	Building Performance Simulation
DB	DesignBuilder (Energiesimulationssoftware)
DPV	Design Performance Viewer (Energiesimulationssoftware)
EPD	Environmental Product Declaration
GBS	Green Building Studio (Energiesimulationswerkzeug von Autodesk)
GWP	Global Warming Potential (Globales Erwärmungspotential)
HKLS	Heizung, Klima, Lüftung, Sanitär (Bereich der Gebäudetechnik)
HVLS	High Volume – Low Speed (Ventilatorkonzept)
IES-VE	Integrated Environmental Solutions – Virtual Environment (Energiesimulationssoftware)
IFC	Insulated Concrete Form (Gedämmtes Bauteilsystem)
KWL	Kontrollierte Wohnraumlüftung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
TABS	Thermoaktive Bauteilsysteme
TGA	Technische Gebäudeausrüstung

B. VERZEICHNIS VERWENDETER PROGRAMME

- Autodesk Revit 2016
<http://www.autodesk.de/products/revit-family/overview>
(Zugegriffen am 02.09.16)
- EnergyPlus 8.5.0
<https://energyplus.net> (Zugegriffen am 02.09.16)
- OpenStudio 1.10.0 mit SketchUp Plug-in
<https://www.openstudio.net>
(Zugegriffen am 02.09.16)
 - Trimble SketchUp 2016
<https://www.sketchup.com/de/products/sketchup-pro/new-in-2016>
(Zugegriffen am 02.09.16)
- DesignBuilder 4.5.0.148
<http://www.designbuilder.co.uk>
(Zugegriffen am 02.09.16)
- Integrated Environmental Solutions – Virtual Environment (IESVE) 2015.2.0.0
<https://www.iesve.com/software/ve-for-architects>
(Zugegriffen am 02.09.16)
- Design Performance Viewer (DPV) 2014 (für Autodesk Revit 2014)
<http://www.systems.arch.ethz.ch/de/research/abgeschlossene-projekte/dpv.html>
(Zugegriffen am 02.09.16)
- Autodesk Green Building Studio (GBS) 2016.104.16.29 (DOE-2.2-48r)
<https://gbs.autodesk.com/GBS>
(Zugegriffen am 02.09.16)
- Microsoft Excel des Microsoft Office Professional Plus 2013
<https://products.office.com/en-us/microsoft-office-2013>
(Zugegriffen am 02.09.16)

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	I
Abstract	II
Erläuterungen	III
A. Abkürzungen	III
B. Verzeichnis verwendeter Programme	IV
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einführung	1
1.1 Bedarf für Untersuchungen	1
1.2 Forschungsziel	2
1.3 Aktueller Forschungsstand	5
1.4 Vorgehensweise	6
2 Maßnahmen für ökologisches Bauen	8
2.1 Kategorisierung ökologischer Gebäude	9
2.1.1 Passivhaus	9
2.1.2 (Net-)Zero-Energy-Building	9
2.1.3 Plus-Energie-Haus	10
2.2 Optimierung der Energieeffizienz	11
2.2.1 Entwurf und Gestaltung	12
2.2.1.1 Passive solare Erwärmung	12
2.2.1.2 Zonierung	13
2.2.1.3 Vertikaler Transport	13
2.2.2 Bauelemente	14
2.2.2.1 Fassadensysteme	14
2.2.2.2 ICF (Insulated Concrete Form)	17
2.2.2.3 Begrünte Dächer und Fassaden	17
2.2.3 Heizen und Kühlen	18
2.2.3.1 Flächenheizungen an Boden und Decke	18

2.2.3.2	Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS).....	19
2.2.3.3	High-Volume-Low-Speed (HVLS) Ventilator	19
2.2.4	Lüftung	20
2.2.4.1	Kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) oder Komfortlüftung.....	20
2.2.4.2	Natürliche Lüftung.....	21
2.2.4.3	Hybride Lüftung	21
2.2.5	Licht	22
2.2.5.1	Lichtdecke	22
2.2.5.2	Lichtlenkkonzept	22
2.2.5.3	Verglasung	24
2.2.6	Gebäudeausstattung	25
2.2.6.1	Energieeffiziente Aufzugsanlagen	25
2.2.6.2	Energy Management	26
2.2.7	Energiegenerierung.....	26
2.2.7.1	Durch Brennstoffzellen betriebene Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.....	26
2.2.7.2	Erdwärme	27
2.2.7.3	Photovoltaik-Fassaden.....	28
2.3	Reduktion der CO ₂ -Emissionen.....	30
2.3.1	Niedrige CO ₂ -Äquivalente der Baustoffe.....	31
2.3.2	Kurze Transportwege.....	32
2.3.3	Verringerung der CO ₂ -Emissionen während des Bauprozesses.....	32
2.3.4	Reduzierung des Energieverbrauches während des Gebäudebetriebes	33
2.3.5	End-of-Life-Strategien.....	33
2.3.6	Beispiele für Umsetzung	33
3	Methoden zur Planung ökologischer Gebäude	35
3.1	Building Performance Simulation.....	35
3.1.1	BPS von BIM-Projekten und Datenaustausch.....	37

3.1.2	Mögliche Informationen in einem Revit-Projekt mit Einfluss auf die Energiesimulation.....	39
3.1.3	Programme für Building Performance Simulation.....	40
3.1.3.1	EnergyPlus	41
3.1.3.2	OpenStudio.....	42
3.1.3.3	DesignBuilder	43
3.1.3.4	Integrated Environmental Solutions – Virtual Environment.....	45
3.1.3.5	Sefaira	46
3.1.3.6	Design Performance Viewer (DPV).....	47
3.1.3.7	Autodesk Green Building Studio (GBS)	49
3.1.3.8	Vergleich der betrachteten Simulationsprogramme	50
3.1.4	Genauere Betrachtung von Green Building Studio	52
3.1.4.1	Zur Wahl von Green Building Studio.....	52
3.1.4.2	Zuverlässigkeit von Green Building Studio	53
3.1.4.3	In Revit und GBS einbeziehbare Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz.....	54
3.1.5	Energieanalyse durch Green Building Studio.....	56
3.1.5.1	Erstellung des Energiemodells in Revit.....	56
3.1.5.2	Auswertungsgraphiken der Project Solon Internetplattform.....	61
3.1.5.3	Auswertung durch Green Building Studio in Revit.....	65
3.1.5.4	Auswertung durch das Green Building Studio Internetportal.....	66
3.1.5.5	Präzisierung der Analyseergebnisse in Green Building Studio.....	68
3.1.5.6	Verwendung der Analyseergebnisse in Green Building Studio.....	69
3.2	CO ₂ -Bilanzierung	73
3.2.1	Sammeln ökologischer Produktdaten.....	74
3.2.1.1	Verwendete Datenbank: ÖKOBAUDAT	75
3.2.2	Verwenden des Kalkulationswerkzeuges.....	75
3.2.3	Einschränkungen.....	81

3.2.4	Evaluierung der CO ₂ -Bilanz des Projektes	82
4	Fallstudien	83
4.1	Fallstudie 1: Industriebau – Großbäckerei.....	85
4.1.1	Projektbeschreibung.....	85
4.1.2	Arbeitsablauf.....	86
4.1.2.1	Vorbereitung der Projektdateien	87
4.1.2.2	Building Performance Simulation.....	87
4.1.2.3	CO ₂ -Bilanzierung.....	93
4.1.3	Ergebnisse.....	95
4.2	Fallstudie 2: Wohnbau – Einfamilienhaus	96
4.2.1	Projektbeschreibung.....	96
4.2.2	Arbeitsablauf.....	97
4.2.2.1	Modellierung des Gebäudes.....	97
4.2.2.2	Building Performance Simulation.....	98
4.2.2.3	CO ₂ -Bilanzierung.....	108
4.2.3	Ergebnisse.....	109
4.3	Fallstudie 3: Bürobau.....	110
4.3.1	Projektbeschreibung.....	111
4.3.2	Arbeitsablauf.....	111
4.3.2.1	Modellierung des Gebäudes.....	112
4.3.2.2	Building Performance Simulation.....	112
4.3.2.3	CO ₂ -Bilanzierung.....	115
4.3.3	Optimierung.....	117
4.3.3.1	Building Performance Simulation.....	118
4.3.3.2	CO ₂ -Bilanz	122
4.3.4	Ergebnisse.....	123
4.4	Vergleich der Fallstudien	124
5	Diskussion.....	126

5.1	Möglichkeiten und Einschränkungen	127
5.2	Problematiken.....	128
5.3	Weiterführende Untersuchungen	130
6	Verzeichnis.....	132
6.1	Literatur	132
6.2	Abbildungen.....	138
Anhang.....		A1
I	Ergebnisberichte Fallstudie 1: Industriebau - Großbäckerei.....	A2
I.A	Gebäudepläne.....	A2
I.B	Building Performance Simulation.....	A3
I.B.1	Green Building Studio Internetportal.....	A3
I.C	CO ₂ -Bilanzierung.....	A5
II	Ergebnisberichte Fallstudie 2: Wohnbau – Einfamilienhaus.....	A8
II.A	Gebäudepläne.....	A8
II.B	Building Performance Simulation.....	A9
II.B.1	Green Building Studio Internetportal.....	A9
II.B.2	Design Builder.....	A11
II.C	CO ₂ -Bilanzierung.....	A13
III	Ergebnisberichte Fallstudie 3: Bürobau	A14
III.A	Gebäudepläne.....	A14
III.B	Building Performance Simulation.....	A16
III.B.1	Green Building Studio Internetportal.....	A16
III.C	CO ₂ -Bilanzierung.....	A22

1 EINFÜHRUNG

1.1 BEDARF FÜR UNTERSUCHUNGEN

Gebäude sind in der Europäischen Union für 40% des Energieverbrauches und 36% der CO₂-Emissionen verantwortlich. Schon der geringere Energieverbrauch von neuen, energieeffizienten Gebäuden kann dabei von etwa 20% bis sogar unter 5% von dem alter Gebäude liegen. (European Commission 2016)^[1]

Daher wird durch die EU angestrebt, den Energieverbrauch bis 2020 um 20% geringer zu halten, als 2007 prognostiziert. Die CO₂-Emissionen sollen bis 2030 um 40%, im Vergleich zu 1990, reduziert werden. Zu dem ökologischen Aspekt kommt auch eine ökonomische Zielvorstellung: Zum Beispiel konnten 2012 11% der EU-Bürger ihre Wohnungen aus finanziellen Gründen nicht ausreichend beheizen. Für jedes Prozent reduzierten Energieverbrauchs, könnten, laut Prognose, bis 2030 der Gaspreis um etwa 0,4% und der Ölpreis um etwa 0,1% gesenkt werden. (European Commission 2014: 4-7)^[2]

Auch in Österreich ist der Endenergieverbrauch zwar rückläufig, der Stromverbrauch steigt aber kontinuierlich um geschätzte 15-20% zwischen 2010 und 2050. Im privaten Gebäudesektor ist dies zum einen zurückzuführen auf ein Bevölkerungswachstum bei größer werdendem Anteil von Einpersonenhaushalten und größer werdender Wohnnutzfläche pro Person und zum anderen auf die zunehmende elektronische Ausstattung der Haushalte. Im öffentlichen Sektor ist es unter anderem durch den wachsenden Dienstleistungssektor begründet. (Renner et al. 2010: 1 f.)^[3]

Dadurch wird klar, dass der Energieverbrauch von Gebäuden stark gesenkt werden kann und dies, insbesondere im Wohnbau und bei Bürogebäuden, zunehmend wichtiger wird. Barbour et al. (2016: 33)^[4] gehen davon aus, dass durch einen konsequenten Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Optimierung der Energieeffizienz bei Neubauten und Renovierungen allein bei Gewerbebauten in den USA bis 2030 etwa 220 TWh pro Jahr an Energie eingespart werden könnten.

Durch Gesetze, ökonomische Erwartungen und eine zunehmend umweltbewusstere Mentalität von Bauherren und Nutzern, steht der Bausektor

unter Druck dem Bedarf nach möglichst energieeffizienten Gebäuden nachzukommen, diese aber auch möglichst kostenoptimiert umzusetzen. Je komplexer dabei das Bauvorhaben, desto wichtiger, aber auch kostenintensiver, ist eine umfassende Performance-Analyse. Die Kosten für solch eine Energieanalyse können in den USA zum Beispiel bei 5.000 bis über 20.000 US-Dollar für Gewerbebauten liegen (Barbour et al. 2016: 35)^[4]. Der Zeitaufwand für einen erfahrenen Anwender, ohne dass größere Probleme auftreten, kann dabei Umfragen zufolge 18 bis 44 Stunden betragen, je nach Detaillierungsgrad und Umfang (Barbour et al. 2016: 45)^[4].

Die Suche nach einer zeit- und somit kosteneffizienten Methode zur Analyse und Optimierung eines Projektentwurfes und auch seiner Entwurfsalternativen ist der zentrale Teil dieser Arbeit.

1.2 FORSCHUNGSZIEL

Das Ziel der Untersuchungen baut auf der Vision und Tendenz der Bauindustrie auf, an einem einzelnen digitalen Projektmodell arbeiten zu können:

Zwei stetig wichtiger werdende Faktoren im Entstehungsprozess von Gebäuden sind iterative Planungsprozesse und Building Information Modeling (BIM).

Beim iterativen Planungsprozess wird der immer komplexer werdende Planungsprozess (welcher auch die höher werdenden Anforderungen an die Energieeffizienz umfasst) zunehmend von einem sequentiellen zu einem iterativen Prozess umgestellt. Wo zum Beispiel zuvor der Architekt¹ den Entwurf fertigstellte und der Gebäudetechniker daraufhin die TGA plante, wird heute angestrebt, dass nach Änderungen von Seiten des Gebäudetechnikers, parallel dazu auch Architekt oder Statiker Details ändern.

Das Building Information Modeling dient als Werkzeug für diesen neuen Planungsprozess. Denn damit dieser zeiteffizient möglich ist, sollen alle, am aktuellen Projektstadium Beteiligten, an einem gemeinsamen digitalen Gebäudemodell arbeiten können. So wird sichergestellt, dass die Modelle, Pläne

¹ Die im Verlauf der Arbeit verwendeten Berufsgruppenbezeichnungen sind grammatisch bewusst im generischen Maskulinum gehalten und sind daher stets geschlechtsunabhängig zu verstehen.

und Informationen aller Beteiligten stets konsistent sind. Im klassischen Planungsprozess dagegen mussten, nach Änderungen von einer Partei, alle anderen eventuell ihr eigenes Modell anpassen, was die Arbeitsmenge quasi vervielfachte.

Das digitale Gebäudemodell oder BIM (Building Information Model) kann neben einer dreidimensionalen Repräsentation des Gebäudes und der zugehörigen technischen Pläne auch Materialien mit physikalischen Eigenschaften, Bauteile, technische Ausstattung, Möblierung, statische Informationen, Kosten und geografische Standortinformationen enthalten und ist je nach Bedarf, durch benutzerdefinierte Eingaben, fast endlos erweiterbar.

In dieser Masterarbeit soll nun untersucht werden, ob und wie effizient der Bereich der ökologischen Gebäudeanalyse in dieses Planungsprinzip integrierbar ist.

Als Basis für die Untersuchung wurde die BIM-Applikation Revit von Autodesk gewählt. Revit ist international stark verbreitet und wird mit immer stärkerem Fokus auf Energiesimulation weiterentwickelt. Die Energiesimulationssoftware Green Building Studio wurde speziell für Revit weiterentwickelt, was optimale Kompatibilität gewährleistet.

Die Untersuchung soll, aufgrund der Wichtigkeit von Nachhaltigkeit, besonders auf die frühe Entwurfsphase Bezug nehmen, wo Anpassungen am einfachsten und wirkungsvollsten sind. Die Untersuchung wird sich auf den Standpunkt des Architekten beziehen, um schließlich festzustellen, inwieweit es diesem möglich ist, die Architektur des frühen Entwurfes bezüglich Nachhaltigkeit zu optimieren. Da umfassende Simulationswerkzeuge generell sehr spezifische Informationen und eine hohe Expertise benötigen und daher nur von, speziell in diesem Bereich ausgebildeten, Planern verwendet werden, ist die Frage auch, inwiefern Werkzeuge existieren, mit denen eine zuverlässige Gebäudeanalyse mit den Informationen der frühen Entwurfsphase und den Fähigkeiten eines entwerfenden Architekten möglich ist. Diese Phase des „frühen Entwurfes“ geht im besten Fall bis zur Einreichung.

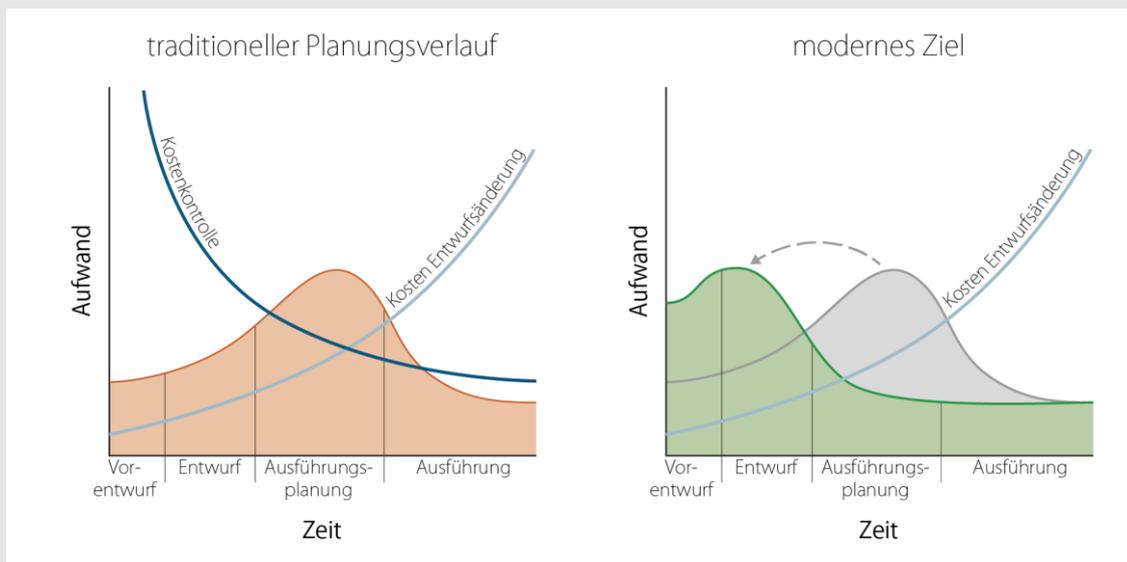


Abb.1 Angestrebter Planungsprozess: Entscheidungen so früh wie möglich evaluieren und umsetzen senkt Gesamtplanungskosten (nach Ghiassi 2013)^[5]

Für eine erfolgreiche Studie soll es auf jeden Fall möglich sein, ein Gebäudemodell zeiteffizient mehrfach zu evaluieren: Zum einen immer wenn Änderungen durch Architekt, Statiker, Bauphysiker oder Gebäudetechniker an der Architektur vorgenommen oder vorgeschlagen wurden und zum anderen um Entwurfsalternativen zu prüfen. Ziel soll sein, den Entwurf abgeschlossen zu haben und das digitale Modell dann zu einer umfassenden Analyse zu einem Bauphysiker zu senden, um die genauen endgültigen Werte zur Rückversicherung zu erhalten und etwaige Konflikte der Gebäudetechnik mit dem architektonischen Konzept zu finden. Dem Architekten soll somit eine iterative ökologische Gebäudeoptimierung ermöglicht werden, ohne die zeit- und kostenintensive Evaluierung durch einen Bauphysiker mehrfach durchführen lassen zu müssen.

Die Arbeit umfasst also, durch folgende Faktoren definierten, Teilbereich:

- Iterative ökologische Gebäudeoptimierung in BIM-Umgebung
- Ökologische Gebäudeanalyse während der frühen Entwurfsphase
- Ökologische Gebäudeanalyse durch den entwerfenden Architekten

Die ökologische Gebäudeanalyse soll dabei folgende Faktoren beinhalten:

- Energieeffizienz anhand des Energieverbrauchs und des Potentials zur Energieproduktion optimieren
- CO₂-Bilanz minimieren

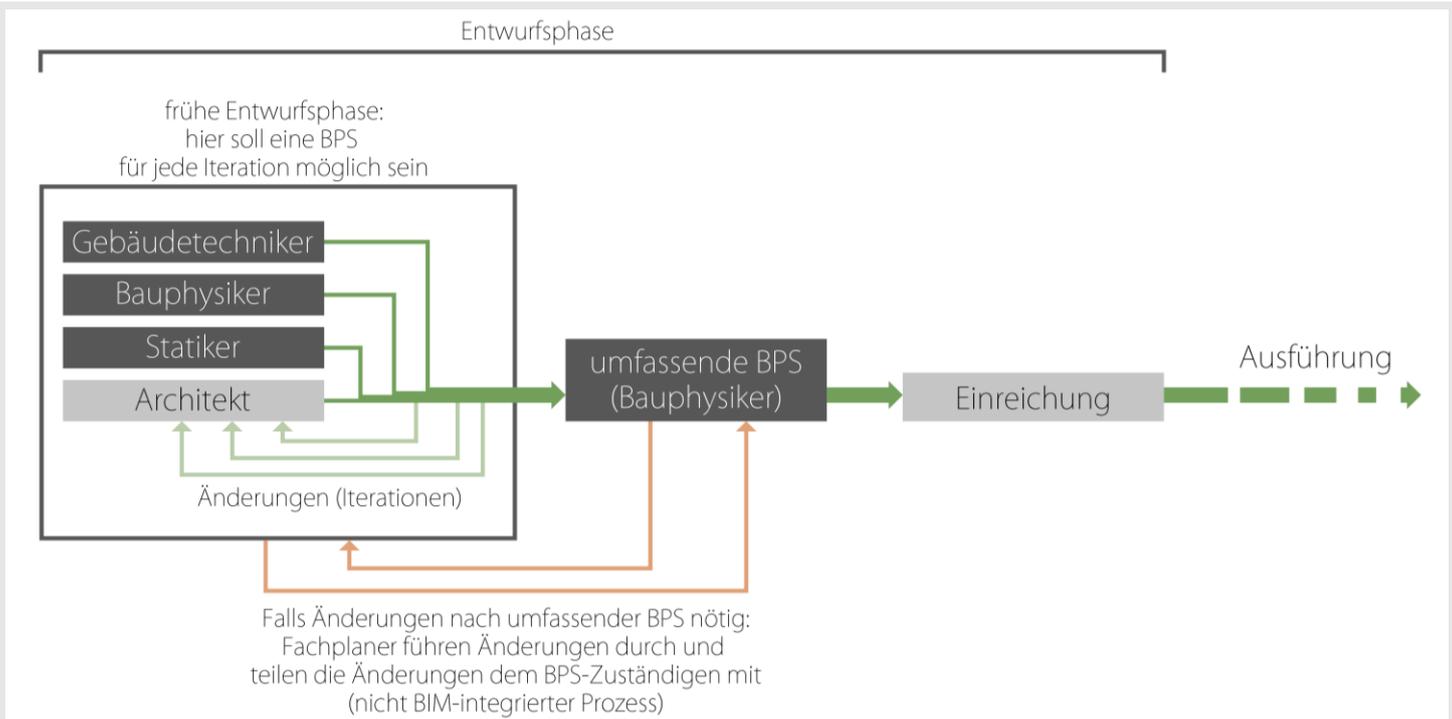


Abb.2 Iterativer Entwurfsprozess: Schnelle Analysen in der frühen Entwurfsphase, eine umfassende Evaluierung danach.

1.3 AKTUELLER FORSCHUNGSSTAND

Eine Vielzahl von Methodiken und Programmstrukturen wurden entwickelt, um BIM- und BPS-Applikationen möglichst effizient zu verknüpfen und Vorgänge zu automatisieren:

Schlueter und Thesseling (2008)^[6] entwickelten den in Revit integrierten Design Performance Viewer, ein Werkzeug zur unmittelbaren Energie- und Exergiekalkulation innerhalb der BIM-Applikation. Es wurde bis 2012 zu einem Plug-In mit umfassendem Eingabeinterface und detailliertem graphischen Output entwickelt. Es ermöglichte eine einfache, schnelle Simulation mit wenigen Inputs; da die Version von 2012 allerdings nicht weiterentwickelt wurde, ist es mit Revit nicht mehr kompatibel.

Bazjanac (2008)^[7] entwickelte eine semi-automatisierte Methodik zur Energiesimulation von BIM-Projekten. Diese sollte alle Prozesse, wo möglich, automatisieren. Die Methodik umfasste das Einpflegen aller wichtigen Daten in das digitale Modell, dessen Export ins IFC-Format, die Transformation der Daten für das Simulationsprogramm EnergyPlus, die Fehlerüberprüfung des Modells

und schließlich die Simulation. Da allerdings im BIM keine spezifischen HVAC-Daten implementiert werden können, mussten diese Informationen händisch in EnergyPlus eingegeben werden. Abgesehen davon konnte eine drastische Zeitersparnis von 70-80% erzielt werden.

Ghiassi (2013)^[5] arbeitete mit dem internetbasierten Evaluierungswerkzeug SEMERGY, für welches allerdings ein neues Dateiformat zum Datenaustausch entwickelt werden musste. Das neue Dateiformat SBM (SEMERGY Building Model) basierte sowohl auf Daten, die über IFC- und gbXML-Format dem BIM-Modell entnommen wurden, als auch auf händischen Eingaben.

Cemesova et al. (2015)^[8] arbeiteten an einem Austausch zwischen BIM-Programm und dem Simulationswerkzeug PHPP auf Grundlage des IFC-Formats. Um durch das IFC-Format ein vollständiges Building Energy Model zu erhalten, wurde eine Erweiterung des IFC-Formats entwickelt.

1.4 VORGEHENSWEISE

In der Arbeit soll nun zu Beginn gesammelt werden, welche Technologien und architektonische Eigenschaften, die während der Entwurfsphase planbar sind, die ökologische Effizienz eines Gebäudes beeinflussen können. Im späteren Verlauf soll dann geprüft werden, welche Maßnahmen sich über Revit planen lassen.

Im nächsten Abschnitt werden die Möglichkeiten der Building Performance Simulation (BPS) untersucht. Zuerst wird geklärt, welche Informationen in Revit für eine Energiesimulation benötigt werden. Dann werden die am weitesten verbreiteten und für das Forschungsziel vielversprechendsten Simulationsprogramme miteinander verglichen um das Geeignetste zu finden. Das für die Fallstudie ausgewählte Simulationsprogramm Green Building Studio, wird dann intensiv bezüglich Genauigkeit und Umfang betrachtet. Schließlich werden die notwendigen Arbeitsschritte für die Erstellung eines validen Revit-Modells, die Energiesimulation durch die beiden BPS-Programme und deren Auswertung und Darstellung beschrieben.

Im darauffolgenden Abschnitt wird die CO₂-Bilanz untersucht und eine Möglichkeit zur Bilanzierung durch eine semi-automatisierte Kalkulationstabelle vorgestellt.

Die entwickelten Arbeitsabläufe werden daraufhin auf drei Fallstudien unterschiedlicher Gebäudetypologien angewendet. Die Energiesimulation durch Green Building Studio wird dabei mit Ergebnissen aus dem alternativen Simulationsprogramm DesignBuilder verglichen, um die Effizienz und Zuverlässigkeit im Vergleich zu evaluieren. Es soll somit geklärt werden, inwieweit, mit der entwickelten Methodik, das Forschungsziel erfüllt werden kann und welche Beschränkungen bestehen.

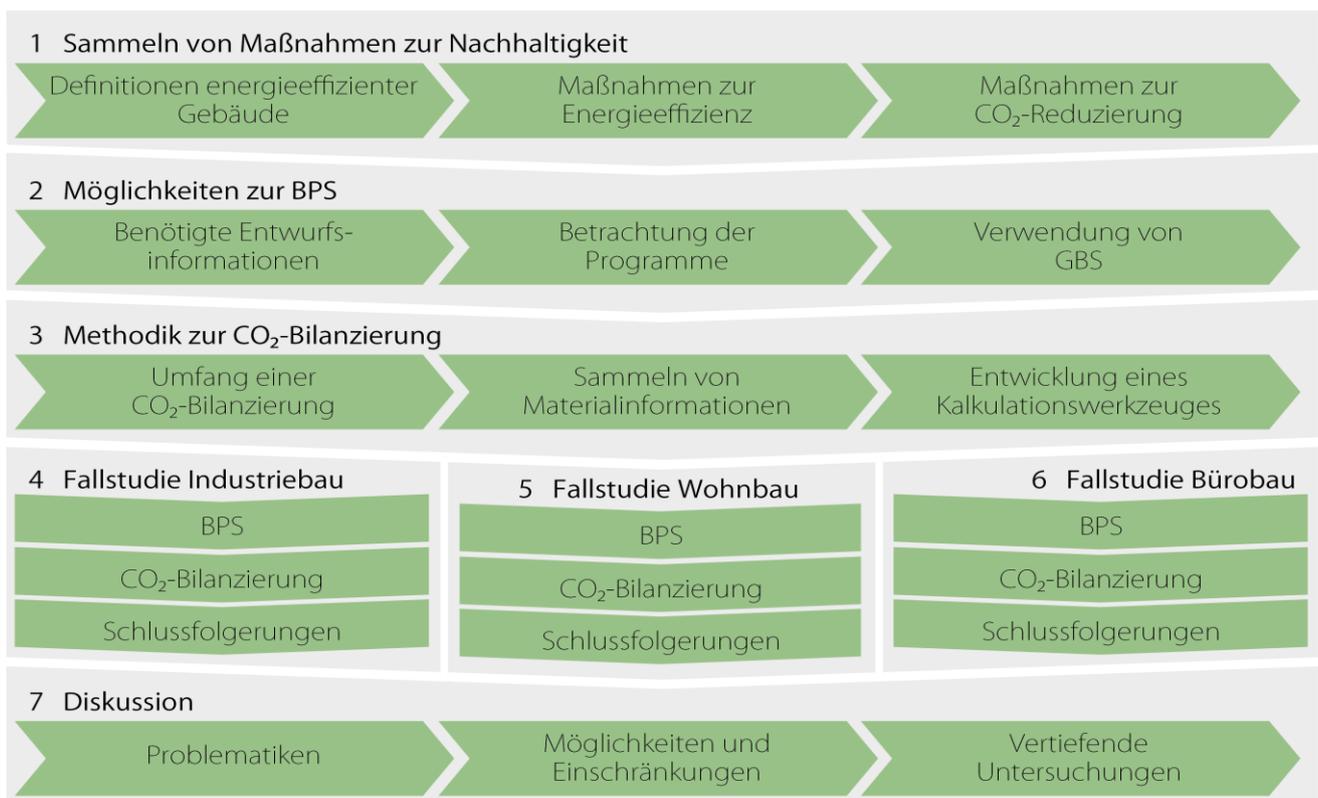


Abb.3 Untersuchungsablauf

2 MAßNAHMEN FÜR ÖKOLOGISCHES BAUEN

Ziel ist den Verbrauch während des gesamten Lebenszyklus zu reduzieren: Von der Errichtung und anschließenden Nutzung bis zur Instandhaltung und Rückbau. Neben des minimierten Energieverlustes durch die Gebäudehülle und der optimierten Effizienz der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), sind weiterführende Aspekte der Energieaufwand zur Produktion der Baumaterialien inklusive deren Transport, die Lebensdauer der einzelnen Bauelemente und die Möglichkeit Baumaterialien aus dem Rückbau wieder zu verwerten.

Es kann beobachtet werden, dass Gebäudevarianten mit einer geringeren Betriebsenergie (also einem geringeren Energiebedarf während der Gebäudenutzung, auch *Operational Energy*) mehr Graue Energie verursachen. Graue Energie (auch *Embodied Energy*) ist die Energie, die für die Produktion der Gebäudeteile aufgewendet werden muss und mit in die CO₂-Bilanz eines Gebäudes einfließt. Der Grund für erhöhte Graue Energie ist, dass die Senkung der Betriebsenergie unter anderem durch verstärkte Wärmdämmung und komplexere Gebäudetechnik erreicht wird, wofür allerdings ein erhöhter Material- und Produktionsaufwand einhergeht. Die Graue Energie eines Gebäudes erhöht sich somit.

Daher sollte für ein nachhaltig-ökologisches Projekt die Optimierung des Energieverbrauches durch Energiesimulation stets mit einer Optimierung der Grauen Energie durch CO₂-Bilanzierung der Materialien und Systeme einhergehen. So kann sichergestellt werden, dass der positive ökologische Effekt durch geringeren Energieverbrauch nicht durch eine erhöhte Graue Energie wieder „aufgefressen“ wird.

In diesem Kapitel werden zunächst drei Kategorien energieeffizienter Gebäude betrachtet und deren Eigenschaften aufgeführt, durch welche diese sich auszeichnen müssen. Danach werden die optimierbaren Gebäudesysteme und baulichen Eigenschaften gesammelt, durch welche sich zunächst der Energieverbrauch und danach die C2-Bilanz minimieren lassen.

2.1 KATEGORISIERUNG ÖKOLOGISCHER GEBÄUDE

Im Bereich ökologischer Gebäude hat sich eine Reihe von definierten Kategorien herausgebildet. Die Charakteristiken von Dreien mit unterschiedlich hoch bewertetem ökologischem Potential sollen in diesem Abschnitt kurz erläutert werden.

2.1.1 Passivhaus

Laut dem Passivhaus Institut (PHI) in Darmstadt und Innsbruck ist ein Passivhaus ein Gebäude, welches so wenig Energiezufuhr benötigt, dass keine herkömmliche Heizung und Klimaanlage notwendig sind. Dazu wird eine benötigte Heizlast von weniger als 10 W/m² angestrebt, welche durch eine Nacherwärmung (durch einen Nachheizregister) der Zuluft über das Lüftungssystem abgedeckt werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, wird der Energieverbrauch durch hocheffiziente Bauteildämmung und Hitzeschutz- und Beschattungsmaßnahmen möglichst stark reduziert. Zusätzlich wird eine Kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) benötigt, welche die Wärmeverluste bei konventioneller Fensterlüftung stark verringert. Die KWL muss eine gleichmäßige Belüftung aller Räume, eine Zulufttemperatur von über 17°C und eine sehr geringe Schallbelastung garantieren und durch Wärmerückgewinnung die im Inneren bestehende Energie wiederverwendbar machen. (Passivhaus Institut 2015)^[9]

2.1.2 (Net-)Zero-Energy-Building

Ein Net Zero Energy Building (NZEB) oder Nullenergiehaus soll über das Jahr gerechnet mindestens genauso viel Energie erzeugen, wie es verbraucht. Dazu darf es, wenn notwendig auch Strom aus dem öffentlichen Stromnetz „ausleihen“, solange es mindestens dieselbe Strommenge später wieder in das Netz einspeist.

Ein Spezialfall ist das Net Zero Energy Emissions Building, bei dem darüber hinaus entweder keine Energieformen verwendet werden, welche Emissionen verursachen, oder zumindest der Verbrauch von Energieformen, welche Emissionen verursachen, ausgeglichen wird, indem dieselbe Menge

emissionsfreier Energie in das Netz eingespeist wird. (Steven Winter Associates Inc. 2014)^[10]

Das U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratory klassifiziert NZEB in vier Kategorien: (So et al. 2014: 8 f.)^[11]

- A: Maximale Energieeffizienz und Energie-Produktion innerhalb der Grundfläche des Gebäudes
- B: Maximale Energieeffizienz und Energie-Produktion auf dem Grundstück
- C: Maximale Energieeffizienz und Zukauf externer erneuerbarer Ressourcen für eine Energie-Produktion am Standort
- D: Maximale Energieeffizienz und Zukauf extern produzierter erneuerbarer Energie

2.1.3 Plus-Energie-Haus

Das Plus-Energie-Haus (besonders in Deutschland auch Effizienzhaus Plus) ist Momentan der höchste angestrebte Standard, an dem noch viel entwickelt wird, aber der auch schon zahlreich umgesetzt werden konnte. Das Plus-Energie-Haus ist wie ein NZEB ebenfalls maximal auf Energieeffizienz ausgelegt und soll darüber hinaus auch Energie selbst produzieren, aber mit dem Ziel, einen Energieüberschuss zu produzieren, der dann ins öffentliche Stromnetz eingespeist wird.

Laut des deutschen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) muss ein Effizienzhaus Plus sowohl einen negativen Jahres-Endenergieverbrauch, als auch einen negativen Jahres-Primärenergieverbrauch aufweisen. Es soll zudem ausschließlich auf dem eigenen Grundstück erwirtschaftete Energie verbrauchen oder ins Netz einspeisen und nur mit Haushaltsgeräten der Effizienzklasse A++ oder besser ausgestattet sein. (Erhorn & Bergmann 2014: 9)^[12]

2.2 OPTIMIERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ

Der erste Bereich, in dem ein Gebäude optimiert werden soll, ist der Bedarf an Betriebsenergie.

Mittlerweile kann nicht nur der Energieverbrauch eines Gebäudes reduziert werden, sondern es kann auch selbst Strom produzieren. Anfangs wurden solche Gebäude als vom öffentlichen Stromnetz autarke Systeme betrachtet. Da aber die Maßnahmen, durch die Energie am Gebäude produziert wird, zum Teil nicht immer auf konstantem Niveau arbeiten können (man denke an Photovoltaik während einer Phase starker Bewölkung), ist inzwischen klar, dass die Fähigkeit der Energieproduktion erst dann maximal effizient ist, wenn das Gebäude an ein Netz angeschlossen ist, welches Angebots- und Nachfrageschwankungen ausgleichen kann. Solch ein Netz wird häufig „*Smart Grid*“ genannt. Es soll überschüssig produzierte Energie einsammeln und verteilen aber auch speichern können und bei einer zeitweisen Unterversorgung des entsprechenden Gebäudes zusätzlichen Strom liefern. (EnOB 2016)^[13]

Der Energieverbrauch lässt sich reduzieren, indem zum einen effizientere Gebäudetechnik weniger Energie benötigt und zum anderen durch effizientere Bauelemente weniger Energie durch die Gebäudehülle verloren geht. Dies kann als Optimierung der passiven oder bedarfsweckenden Maßnahmen bezeichnet werden.

Dem minimierten Energieverbrauch gegenüber steht die Energieerzeugung aus nachhaltigen Energiequellen am Gebäude oder auf dem Grundstück. Dies kann als aktive oder bedarfsdeckende Maßnahmen bezeichnet werden.

Passive Maßnahmen

Reduzierung Energieverbrauch	Reduzierung Energieverlust
Passive solare Erwärmung	Optimale Zonierung
Vertikaler Transport ohne Technik	Optimale Fassadensysteme
Flächenheizungen	IFC
TABS	Begrünte Dächer
HVLS-Ventilatoren	Optimale Verglasung
KWL	

Natürliche/Hybride Lüftung
Lichtdecke
Lichtlenkkonzept
Energieeffiziente Aufzugsanlagen
Energy Management

Aktive Maßnahmen

KWKK und Brennstoffzellen
Erdwärmenutzung
Photovoltaik-Anlagen

Es ist allerdings wichtig darauf zu achten, dass, auch wenn mittlerweile viele parallele Systeme existieren, die den Energieverbrauch senken, die TGA so schlank wie möglich bleibt. Denn eine zu hohe Komplexität führt oftmals dazu, dass die einzelnen Systeme weniger effizient arbeiten, es leichter zu Betriebsstörungen kommen kann, das Gesamtsystem schwieriger zu installieren und zu warten ist und dessen Effizienz im Entwurfsstadium schwerer abzuschätzen ist, sodass es in der Praxis möglicherweise eine weitaus geringere Effizienz besitzt wie angenommen. (Schoof 2013)^[14]

2.2.1 Entwurf und Gestaltung

2.2.1.1 *Passive solare Erwärmung*

Durch die optimale Gestaltung des Gebäudes kann die Energie der Sonne genutzt werden um das Gebäudeinnere im Winter zu erwärmen und so Heizkosten zu sparen. Während im Sommer das Sonnenlicht durch Beschattungsmaßnahmen abgeschirmt wird, soll es im Winter in den Raum hineingelassen werden. Die solare Erwärmung eignet sich besonders für Wohn- und Aufenthaltsräume oder große Räume und Hallen wie zum Beispiel Atrien, aber weniger für Büroflächen.

Passive Maßnahmen, also Gestaltungsmaßnahmen am Gebäude, können sein: (Fosdick 2012)^[15]

- Orientierung des Gebäudes bzw. seiner Räume

- Anpassung der Fensterflächen an den Unterschiedlichen Sonnenlichteinfall im Norden und Süden
- Zum Himmel geneigte Flächen sammeln mehr Licht, während sich zur Erde geneigte Flächen selbst beschatten
- Vorsprünge schirmen die hochstehende Sonne im Sommer ab, lassen aber die tiefstehende im Winter hineinscheinen
- Thermische Masse (bei Baumaterialien/Bauteilen mit hoher Wärmespeicherkapazität) kann Wärme speichern und den Raum noch bis in die Nacht hinein temperieren

2.2.1.2 Zonierung

Zonierung bezieht sich darauf ein Gebäude beziehungsweise den Grundriss so zu planen, dass sich Bereiche mit raumklimatisch ähnlichen Räumen bilden, also Räume mit ähnlichen Anforderungen an Nutzungszeiten, Belichtung, Raumtemperatur und Belüftung. Eine solche Gruppierung ist wichtig, zum Beispiel, wenn ein Bereich stärker beheizt werden soll als der andere; ein offener Grundriss ist aus energieeffizienten Gründen meist nur innerhalb einer Zone ratsam. (Erhorn & Bergmann 2014: 11)^[12]

Ein Beispiel, welches die Wichtigkeit einer klimatischen Zonierung zeigt, ist das Versuchshaus Effizienzhaus Plus des BMVBS in Berlin: Da sich durch den offenen Grundriss in sämtlichen Räumen eine etwa gleiche Raumtemperatur einstellte, stellten die Benutzer die Heizung in den Schlafzimmern ab, wodurch die Heizung im Erdgeschoss, aufgrund des nun größeren Versorgungsbereiches, mit höheren Vorlauftemperaturen arbeitete. Durch diese Erhöhung der Vorlauftemperatur benötigte die Wärmepumpe überproportional mehr Energie als vorhergesehen. Durch eine gebäudeklimatische Zonierung in Wohn- und Schlafbereiche wäre dieses Effizienzproblem zu beseitigen gewesen. (Schoof 2013)^[14]

2.2.1.3 Vertikaler Transport

In großen mehrstöckigen Büros werden Aufzüge zu einem großen Teil, während des Arbeitstages, zum Verkehr zwischen, miteinander in Verbindung stehender, Abteilungen benötigt. Indem solche Abteilungen direkt übereinanderliegend

organisiert werden und durch einladend positionierte und gestaltete Treppen verbunden werden, kann auch die Nutzung der Aufzüge stark reduziert werden. Solche Treppen sollten natürlich nicht in einem dunklen Treppenhaus, sondern zum Beispiel in einem zentralen Lichthof liegen und von Galerie zu Galerie führen.



Abb.4 Beispiel einladender Treppenverbindungen zwischen Stockwerken (Entwurf für den Sitz des Green Climate Fund in Bonn)

2.2.2 Bauelemente

2.2.2.1 Fassadensysteme

Neben ihrer Grundfunktion als tektonisches Gebäudeelement, kann die Fassade auch dem Zweck der Wärmedämmung, Belichtung und Sonnenschutz, Belüftung, des Schallschutzes und der Energiegewinnung dienen. Je nach Zweck ist dabei wichtig die geeignete Konstruktionsvariante zu wählen.

Grundlegend können Fassaden in zwei Konstruktionsprinzipien unterteilt werden:

■ Einschalige Fassade:

Einteilige Fassadenelemente bilden die äußere Hülle. Einschalige Fassaden sind konstruktiv einfacher und flexibel gestaltbar, sind in ihrer Funktion aber eingeschränkter als Doppelfassaden.

■ Doppelfassade:

Die Fassade besteht aus einer inneren Schicht, welche meist für die Statik und Wärmedämmung vorgesehen ist, und einer äußeren, welche meist als Wetterschutz dient. Durch Doppelfassaden können zum Beispiel hohe Wärmedämmung und Belichtung mit guter Belüftung und Hitzeschutz realisiert werden. Bei hohen Gebäuden mit starken Windkräften kann sie dem Windschutz und besserer Belüftung dienen.

(Girmscheid & Lunze 2010: 102-103)^[16]

Eine Vielzahl verschiedener Fassadenarten haben Vorteile in verschiedenen Szenarien. Die Fassadenart muss daher sorgfältig in Hinblick auf die Ansprüche des jeweiligen Fassadenbereiches ausgewählt werden. Einige Fassadenarten mit ihren Funktionen sind folgende:

■ Lochfassade:

Fassade mit vorgehängtem Lochblech

Vorteile: Geringer Platzbedarf, geringe Überhitzung, geringer Reinigungsaufwand

Nachteile: geringe Zuluftregelbarkeit, geringe Schalldämmung, geringer Verglasungsanteil

■ Elementfassade:

Fassade aus Einzelementen

Vorteile: Geringer Platzbedarf, geringe Überhitzung, mittlerer Reinigungsaufwand, mittlerer bis hoher Verglasungsanteil

Nachteile: geringe Zuluftregelbarkeit, geringe Schalldämmung

■ Prallscheibe:

Fassade mit vorgehängten Glasscheiben

Vorteile: Geringer Platzbedarf, geringe Überhitzung, mittlerer Reinigungsaufwand,

Nachteile: mittlere Zuluftregelbarkeit, mittlere Schalldämmung, geringer bis mittlerer Verglasungsanteil

■ Wechselfassade:

Wechselnde Fassadenelemente

Fassade mit vorgehängten Glasscheiben

Vorteile: Hohe Zuluftregelbarkeit, mittlerer Platzbedarf, geringe Überhitzung, mittlerer Reinigungsaufwand, mittlerer bis hoher Verglasungsanteil

Nachteile: Mittlere Schalldämmung

■ Kastenfenster:

Fensterelemente mit inneren und äußeren Flügeln

Fassade mit vorgehängten Glasscheiben

Vorteile: Hohe Zuluftregelbarkeit, mittlerer Platzbedarf, mittlerer Reinigungsaufwand, mittlerer bis hoher Verglasungsanteil

Nachteile: Mittlere Überhitzung, mittlere Schalldämmung

■ Korridorfassade:

Doppelfassade mit horizontal durchgängigen und vertikal getrennten Zwischenräumen

Vorteile: Mittlerer Reinigungsaufwand, hoher Verglasungsanteil

Nachteile: Mittlere Zuluftregelbarkeit, hoher Platzbedarf, mittlere Überhitzung, mittlere Schalldämmung

■ Steuerbare Doppelfassade:

Vorteile: Geringe Überhitzung, hoher Verglasungsanteil

Nachteile: Mittlere Zuluftregelbarkeit, hoher Platzbedarf, hoher Reinigungsaufwand, mittlere Schalldämmung

(Girmscheid & Lunze 2010: 106)^[16]

Durch eine geeignete Fassadenart kann die Fassade folgende bedarfsdeckende Funktionen erfüllen:

- Stromerzeugung durch gebäudeintegrierte Photovoltaik oder Photovoltaik-Paneele als (beschattende) Fassadenelemente
- Passiver solarer Wärmegewinn: Reduzierung der benötigten Heizlast bei kalten Außentemperaturen
- Lichtlenkung: Reduzierung der benötigten künstlichen Innenbeleuchtung
- Natürliche Belüftung zum Beispiel durch Kaminwirkung

2.2.2.2 ICF (Insulated Concrete Form)

ICF ist quasi ein Sandwichbauteil aus Beton zwischen zwei Dämmplatten. Die Systembauteile, die an die Baustelle geliefert werden, bestehen aus zwei Dämmplatten mit einer Verbindungsstruktur. Die Bauteile lassen sich durch Steckverbindungen zusammenfügen und werden dann vor Ort mit Beton gefüllt. Die Vorfertigung erfordert zwar einen gewissen Aufwand, dafür existieren gegenüber herkömmlicher Ortbeton-Bauweise auf der Baustelle einige Vorteile:

- Dämmplatten müssen nicht nachträglich montiert werden, sondern sind bereits fest mit der Betonwand verbunden
- Eine zusätzliche Schalung entfällt
- Die Dämmplattenmodule lassen sich im Gegensatz zu Schalungsplatten einfacher als gebogene Elemente ausführen

Die Arbeitszeit auf der Baustelle lässt sich dadurch reduzieren, wodurch Kosten gespart werden. Nachteil ist, dass die Wärmespeicherwirkung der Betonwand für den Innenraum geringer ist. (Rajagopalan et al. 2009)^[17]

Neben dem ökonomischen Benefit, bietet die Dämmung der Innenseite auch einen ökologischen Vorteil: Durch die Dämmung wird der Wärmetransfer zwischen der Betonwand als Wärmespeicher und dem Innenraum verzögert, wodurch Temperaturspitzen ausgeglichen werden. (ICFA 2008: 2)^[18]

2.2.2.3 Begrünte Dächer und Fassaden

Begrünung hat einige ökonomische wie ökologische Vorteile: Gründächer schützen die Dachabdichtung und bieten zusätzliche Wärmedämmung. Die Bepflanzung bindet außerdem Staub und Schadstoffe und reinigt somit die Luft. Die durch den Bau verlorengegangenen Grünflächen lassen sich zurückgewinnen – die Lebensqualität steigt durch die Vegetation und das Angebot von grünen Aufenthaltsflächen. Das Mikroklima verbessert sich durch Ausgleich von Temperaturextremen und Luftfeuchtigkeit und Verminderung von Rückstrahlung und Heat-Island-Effekt. An heißen Tagen bringt die verdunstende Feuchtigkeit einen Kühleffekt, welcher stärker ist je höher die Masse der Bepflanzung ist.

Auch begrünte Fassaden bieten zusätzliche Dämmung und einen Kühleffekt, schlucken Schall und reinigen die Luft. Um den Wandaufbau oder die Konstruktion darunter nicht zu beschädigen, werden entweder Kletterpflanzen an montierten Seilkonstruktionen oder Gerüsten gewählt oder mit Substrat gefüllte Module auf Unterkonstruktionen auf der Fassade angebracht. (Jim 2015)^[19]

2.2.3 Heizen und Kühlen

2.2.3.1 Flächenheizungen an Boden und Decke

Fußboden- und Deckenheizungen als Flächenheizungen, verteilen die Wärme über dünne Schläuche in Fußboden oder Decke. Da sie großflächig heizen, können sie mit einer geringen Vorlauftemperatur von unter 35°C auskommen, wodurch sie effizient durch Solaranlagen und Wärmepumpen betrieben werden können und somit ideal für Niedrigstenergiehäuser sind. (BVF 2014: 9)^[20]

Flächenheizungen sind sehr träge Systeme, das heißt, dass keine groben spontanen Temperaturänderungen möglich sind. Ökonomisch ist das in einem Niedrigstenergiehaus kein Problem, da durch die sehr geringen Energieverluste, das Gebäude konstant auf Idealtemperatur gehalten werden kann, ohne nennenswert mehr Energie zu verbrauchen, als wenn man die Heizung temporär abstellen würde. Für die Behaglichkeit ist allerdings eine Zonierung (siehe weiter unten) sehr wichtig, damit keine Bereiche mitbeheizt werden, die kühler bleiben sollen (was dann eventuell durch Fensterlüftung ausgeglichen wird und den Energieverbrauch der Heizung stark ansteigen lässt). (Schoof 2013)^[14]

Flächenheizungen lassen sich in spezieller Ausführung auch zur Kühlung im Sommer verwenden.

Fußbodenheizungen erzeugen durch die aufsteigende warme Luft Konvektion und durch die Abstrahlung direkte Strahlungswärme. Deckenheizungen erzeugen nur Strahlungswärme, die aber von oben kommend effektiver wirkt als von unten (durch die höhere Wärmeempfindlichkeit und leichtere Bekleidung des Kopfes und Oberkörpers im Gegensatz zu Unterkörper). Die Deckenheizung hat somit gegenüber der Bodenheizung die Vorteile, dass die Strahlungswärme stärker empfunden wird und die Leistung der Heizung entsprechend verringert werden kann und es durch die fehlende Konvektion weniger ungleichmäßig

erwärmte Bereiche gibt. Nachteil ist allerdings, dass die Decke möglichst unverbaut sein muss – im Idealfall sichtbeton. Auf jeden Fall aber machen abgehängte Decken, Lichtdecken oder Akkustikdecken die Deckenheizung meist ineffizient. (Streicher et al. 2004: 122-124^[21]; Pech & Jens 2005: 100^[22])

2.2.3.2 Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS)

Bauteilaktivierung bedeutet, dass Bauteile als Wärme- oder Kältespeicher nutzbar gemacht werden. Dazu werden, meist in die Betondecken, wasserführende Rohrschlangen eingelegt. Beton hat eine besonders hohe Wärmespeicherkapazität. Das Wasser kann aus Erdwärmepumpen gefördert werden. Die Vorteile sind, dass durch die besonders große speichernde und abgebende Masse der Betondecke, schon bei geringen Temperaturdifferenzen nennenswerte Änderungen des Raumklimas erzielt werden können. Nachteil ist, dass durch die Trägheit der Speichermasse-Temperierung keine kurzfristige individuelle Temperaturanpassung möglich ist – das System muss also intelligent gesteuert werden. Auch sollte die Decke nicht verkleidet sein (Sichtbeton im Bestfall) – Schall absorbierende Flächen sollten daher auf Trennwänden angebracht werden. (Pfafferott & Kalz 2007: 6-9)^[23]

Eine Variante ist die Zwei-Flächen-Bauteiltemperierung, bei der, zusätzlich zur thermisch aktivierten Decke, Kapillarrohrmatten an Decke oder Fußboden verlegt sind, welche eine spontane Regelung und individuelle Anpassung des Raumklimas ermöglichen. (Meyer 2003: 2 f.)^[24]

2.2.3.3 High-Volume-Low-Speed (HVLS) Ventilator

HVLS-Ventilatoren haben im Vergleich zu konventionellen Ventilatoren besonders große, speziell geformte Rotorblätter mit einer Länge von mindestens 1,2m, die trotz langsamerer Drehgeschwindigkeit mehr Luftvolumen bewegen, welches sich über weitere Entfernung verteilen kann. Der große Rotor kann unter geringerem Energieverbrauch weit mehr Luft bewegen und einen größeren Bereich abdecken. Durch die langsamere Drehung ist die Geschwindigkeit der bewegten Luft geringer, wodurch Luftzugerscheinungen verringert werden, wobei durch das größere bewegte Volumen, der Kühleffekt sogar zunimmt.

HVLS-Ventilatoren eignen sich daher zur Unterstützung oder Ersetzung der Klimaanlage für große Räume. (ZCB 2012a^[25]; House 2003^[26])

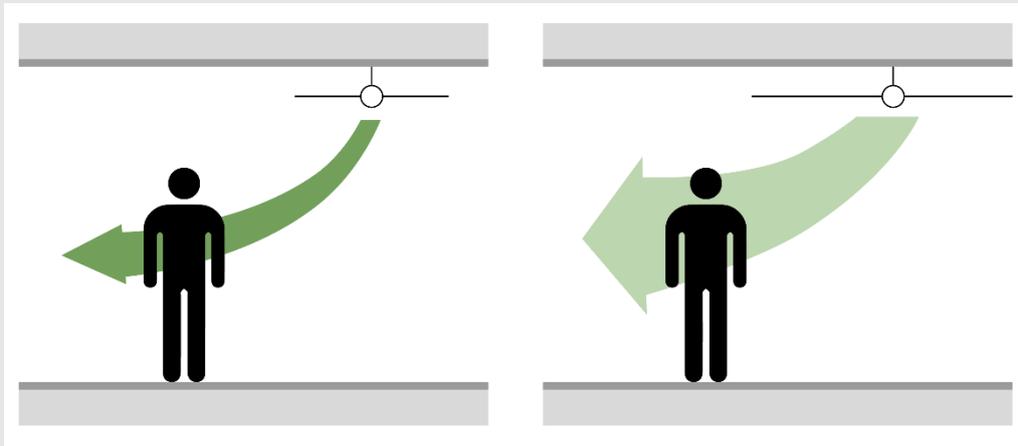


Abb.5 Ein schnellbewegendes, aber geringeres Luftvolumen kühlt weniger als ein langsames aber größeres Volumen.

2.2.4 Lüftung

2.2.4.1 Kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) oder Komfortlüftung

Die KWL ist eine Anlage, die die Wohnräume kontinuierlich mit der notwendigen Menge Frischluft versorgt und das richtige Maß an Luftfeuchtigkeit erhält. Im Gegensatz zur Fensterlüftung entsteht dabei keine Zugluft und es geht keine Wärme vom Wohnraum nach draußen verloren. Die Zuluft wird dabei vorgewärmt oder vorgekühlt und der Abluft wird die Wärme wieder entzogen.

Die Außenluft wird durch ein Ansaugrohr auf dem Grundstück zum Wärmetauscher geleitet – indem das Ansaugrohr möglichst weit/tief durch die Erde geführt wird, wird die Luft bereits vorgewärmt oder vorgekühlt; die Installation eines Erdwärmetauschers erzielt denselben Effekt. Im Wärmetauscher kann die Zuluft die Wärme der Abluft aus dem Innenraum übernehmen. Dadurch wird nur sehr wenig zusätzliche Energie benötigt um die Luft auf die gewünschte Raumtemperatur zu bringen. Die Zuluft kommt dann durch die Schlafräume in die Wohnung und wird in Bad und Küche wieder abgesaugt.

Eine zusätzliche geregelte Be- und Entfeuchtung kann dabei die benötigte Heiz- bzw. Kühlleistung weiter reduzieren, da zum Beispiel im Sommer trockene Luft weniger kühl sein muss um dem Menschen dieselbe gefühlte Temperatur zu vermitteln. Neben der Energieeffizienz der Anlage ist besonders der

Geräuschpegel im Innenraum zu beachten, welcher laut Passivhaus Institut unter 25dB liegen sollte. (Verein komfortlüftung.at 2014)^[27]

2.2.4.2 Natürliche Lüftung

Natürliche Lüftung kann in warmem Klima im Vergleich zu mechanischer Lüftung eine energiesparende und kostengünstige Alternative sein. Eine Methode (wie seit Jahrhunderten im persisch-arabischen Raum angewandt) ist Wind durchs Gebäude zu leiten. Dazu wird der Wind an der Luvseite eingefangen und durch das Erdreich geführt, um die Luft abzukühlen. Im Innenraum nimmt die Luft Wärme auf, steigt nach oben und wird durch den Windturm an der Leeseite durch Unterdruck hinausgezogen.

Eine andere Methode ist durch Kaminwirkung eine Konvektionsströmung zu erzeugen. Die Luft wird hierzu in einem kaminartigen, zumindest teilweise verglasten Gebäudeteil, durch die Sonne erwärmt. Die warme Luft steigt nach oben aus dem Kamin heraus und zieht kühlere Luft von unten nach.

In trockenem Klima kann so die kalte Nachtluft genutzt werden um das Gebäude auszukühlen, welches dann tagsüber von der warmen Außenluft abgeschlossen wird. In feuchtem Klima, wo es nachts nicht nennenswert kühler wird, kann zumindest eine stetige Luftströmung aufrechterhalten werden, um die Innentemperatur auf Außentemperaturniveau zu halten. (Walker 2014)^[28]

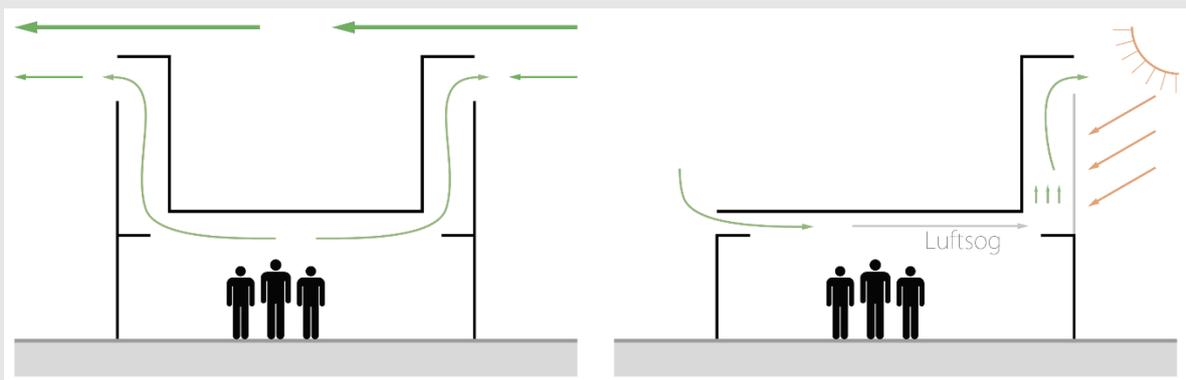


Abb.6 Funktion von Windturm und Kaminwirkung

2.2.4.3 Hybride Lüftung

Die Vorteile der energieeffizienten natürlichen Lüftung und die der leistungsstärkeren mechanischen Lüftung lassen sich auch kombinieren. So werden erst bei extremeren Temperaturen, wie im Winter oder im Hochsommer,

oder wenn kein ausreichender Luftfluss erreicht werden kann, die technischen Komponenten zur Lufterwärmung (z.B. Erdwärmepumpe), Luftkühlung (Kühlmaschine) und Luftbeschleunigung (Ventilatoren) zugeschaltet. Dazu benötigt es ein zuverlässiges Regelsystem, welches die aktuellen Werte misst und im Bedarfsfall die mechanischen Komponenten steuert.

2.2.5 Licht

2.2.5.1 Lichtdecke

Lichtdecken sind abgehängte transluzente Decken, die mit LEDs hinterleuchtet werden. Sie können als vereinzelte Elemente oder als eine flächige Decke ausgeführt sein. Bei Lichtdecken wird das Licht einiger Lichtquellen durch die transluzenten Flächen so gestreut, dass sich eine homogene Leuchtfläche über dem gesamten Raum bilden kann. Vorteil ist, dass der Raum gleichmäßig ausgeleuchtet wird, das Licht der Leuchtmittel effizient gestreut und verteilt wird und die Decke auch über Tageslicht beleuchtet werden kann, welches durch seitlich umlaufende Lichtbänder eingefangen wird. (Taylor 2013)^[29]

2.2.5.2 Lichtlenkkonzept

Um das Tageslicht optimal in den Innenraum zu bekommen, ist ein Lichtlenksystem nötig. Dazu gehören Reflektoren an der Fassade, die das Licht in den Innenraum lenken und die Decke, welche mit reflektierendem Anstrich, Material oder Reflexionselementen versehen sein kann. Die Decke soll das Licht tief und gleichmäßig in den Raum verteilen.

Je mehr Tageslicht in den Innenraum gelangt, desto höher ist allerdings auch die Gefahr für Überhitzung und Blendung. Daher sollten zum einen Beschattungsmaßnahmen den Lichteinfall regulieren - also im Sommer weniger Lichteinfall als im Winter, zur Mittagszeit weniger als am Abend oder Morgen. Zum anderen sollte das Licht nur indirekt den Raum ausleuchten. Also die Sonne sollte nicht direkt in den Raum scheinen und Licht nicht direkt auf die Personen reflektiert werden, sondern davor gestreut werden. Dazu können zum Beispiel im oberen Bereich der Fenster Lamellen angebracht werden, die das Licht in den Raum reflektieren, während im unteren Bereich (auf Augenhöhe) das

Sonnenlicht abgelenkt wird. Sonnenschutzlamellen können durch die richtige Formgebung, den idealen Sonnenlichteinfall zu jeder Tageszeit gewährleisten. So können unbeweglich horizontal angebrachte Lamellen das steil einfallende Licht zur Mittagszeit wieder vollständig nach draußen reflektieren, während sie das flach einfallende Licht am späten Nachmittag oder im Winter komplett in den Innenraum reflektieren.

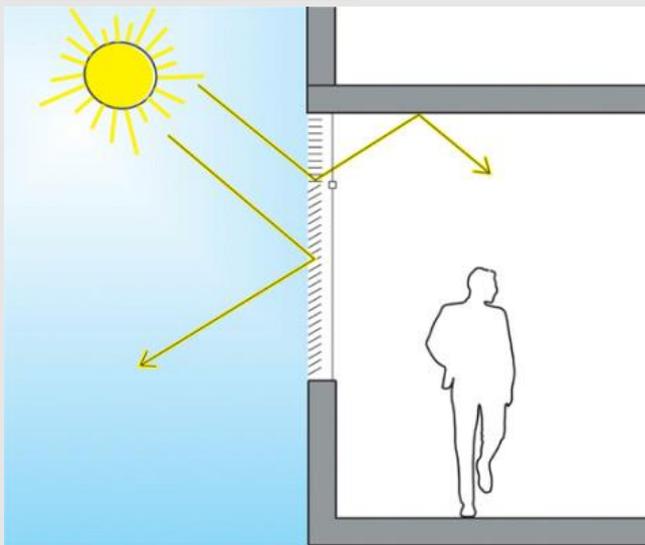


Abb.7 Ideale Sonnenschutzlamellen

Auf der Nordhalbkugel sollte bei Nordfassaden generell geringere Beschattungsmaßnahmen angewandt werden, wogegen an Südfassaden die Beschattungselemente auch verdichtet werden können – durch eine Perforation kann trotzdem ein guter Blick nach Draußen gewährleistet werden. (Ruck 2000: 5-13)^[30]

Durch Lichtleitung kann auch Tageslicht in fensterlose Räume gebracht werden. Das Sonnenlicht wird hierzu meistens am Dach durch Heliostaten eingefangen und in ein, mit reflektierender Folie ausgekleidetes, Lichtrohr gelenkt, welches zu dem auszuleuchtenden Raum führt. Die Heliostaten sind allerdings wartungsaufwendig und müssen kontinuierlich zur Sonne ausgerichtet werden. Durch Lichtkamine kann man allerdings auch auf die Spiegel verzichten. Das Sonnenlicht wird dabei von einer kuppelförmigen lichtbündelnden Linse am Dach in ein Leiterrohr eingefangen und im entsprechenden Raum durch ein lichtstreuendes Gegenstück wieder ausgelassen. (Ruck 2000: 93-98)^[30]

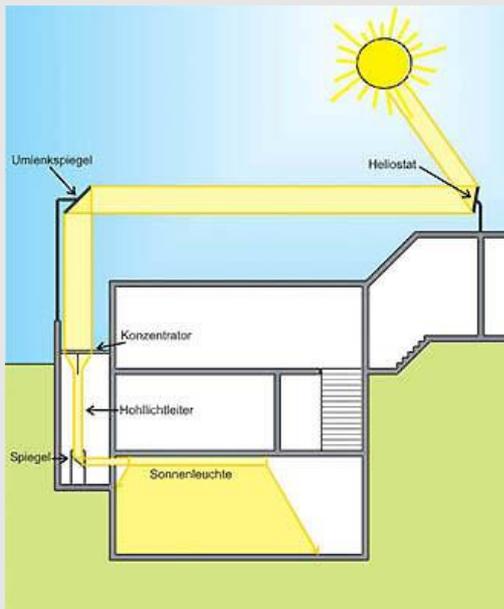


Abb.8 Lichtlenkung durch Heliostaten in ein Lichtrohr

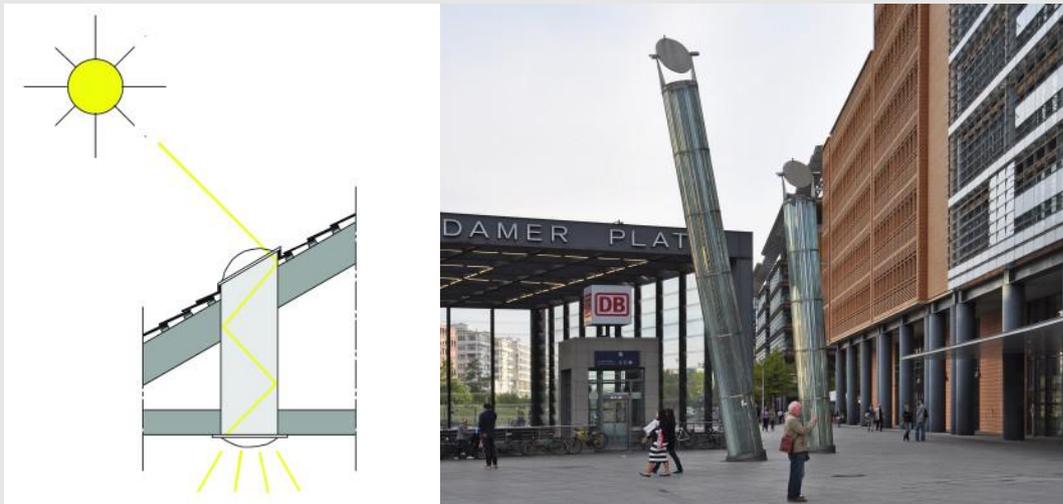


Abb.9 Lichtkamin im Prinzip und in der Praxis am Potsdamer Platz

2.2.5.3 Verglasung

Durch Verglasung soll zwar möglichst viel Tageslicht in den Innenraum gelassen werden, allerdings muss eine Überhitzung durch die thermische Strahlung der Sonne und eine Blendung durch direktes Sonnenlicht vermieden werden. Auch sollte das System im Optimalfall nicht statisch sein. Denn (auf der Nordhalbkugel) sollte in kalten Wintern thermische Strahlung gesammelt werden, um den Heizbedarf zu verringern, während sie in heißen Sommern, abgeschirmt werden sollte, um den Kühlungsbedarf zu reduzieren. Zudem sollte auf der Nordseite mehr Tageslicht eingefangen werden, um den Kunstlichtbedarf zu verringern,

während auf der Südseite, wegen Hitze- und Blendschutz weniger Tageslicht durchgelassen wird.

Heutzutage ist bei Minimalenergiegebäuden weniger die Belichtung als die Überhitzung ein Problem. Daher wird von Ganzglasfassaden abgeraten und ein Fenster-Wand-Verhältnis von 25% als ideal angesehen. (So et al. 2014: 12-15)^[11]

Falls die Tageslichtausbeute zu gering sein sollte, kann der Fensteranteil aber auch erhöht werden, indem Sonnenschutzglas verwendet wird. Dieses, auch als Low-E-Glass bezeichnete, Glas hat einen geringeren Emissionsgrad, das heißt, dass weniger Wärmestrahlung (sowohl in Form von Infrarot- als auch UV-Licht) hindurchgelangt, ohne die Transmission sichtbaren Lichts zu verringern. (Ander 2014)^[31]

Der Nachteil in Klimata mit stark differierenden Temperaturextremen ist, dass man damit lediglich entweder auf Hitzeschutz im Sommer oder auf solaren Wärmegewinn im Winter optimieren kann. Eine Möglichkeit, die gerade in der Einführungsphase steckt, sind „schaltbare Gläser“ (Dynamic Windows) mit elektrochromen Schichten. Diese Schichten regeln durch elektrische Spannung den Lichtdurchlassgrad des Fensters auf 10 bis 60%. Photochrome und thermochrome Schichten sind zurzeit in Entwicklung. (EnOB o.J.)^[32]

2.2.6 Gebäudeausstattung

2.2.6.1 Energieeffiziente Aufzugsanlagen

Aufzüge benötigen ca. 3 bis 5% des Gesamtstromverbrauchs eines Gebäudes. Durch neue Technologien soll es möglich sein den Verbrauch um die Hälfte zu reduzieren - vor allem den Verbrauch im Ruhezustand mit einem Anteil von 40% am Gesamtverbrauch der Aufzugsanlage in Bürogebäuden und 70% in Wohngebäuden. (BINE Informationsdienst 2010)^[33]

Solche neuen Technologien beinhalten nach So et al. (2014: 14)^[11] unter anderem:

- Intelligente Steuertechnik, die den Fahrtweg des Aufzuges besonders zu Stoßzeiten minimiert
- Rekuperationsbremsen
Erzeugen beim Abbremsvorgang durch Induktion Strom (Solberg 2007)^[34]

- PMSM-Antrieb (Permanent Magnet Synchronous Motor)
Kleiner, leichter Hochleistungs-Servomotor, der besonders leise und energieeffizient arbeitet (Microchip Technology Inc., ohne Jahr)^[35]
- VVVF-Antrieb (Variable Voltage Variable Frequency)
Inverter regeln die Eingangsfrequenz und Spannung während der Fahrt, wodurch sich der Stromverbrauch während Beschleunigungs- und Abbremsvorgang stark verringern lässt (EMSD 2015)^[36]
- Regenerative Elevator
Erzeugt bei Aufwärtsbewegung in leichtbeladenem/unbeladenem Zustand oder schwerbeladen bei Abwärtsbewegung zusätzlich Strom (ZCB 2012)^[25]

2.2.6.2 Energy Management

Dass sämtliche Systeme der TGA optimal eingestellt sind, ist ein wichtiger Faktor. Sensoren, die Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt der Luft und Helligkeit im Innenraum messen, sind nötig um Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung perfekt zu regeln, damit kein System mehr arbeitet, wie nötig.

Zusätzlich ist Software sinnvoll – Building Management System (BMS) und Key Performance Indicator (KPI) Dashboards - die den Energieeinsatz täglich, monatlich und jährlich misst und auswertet und dadurch mittelfristig die optimale Balance aus Leistung und Energieverbrauch der technischen Anlagen findet. (So et al. 2014: 14)^[11]

Zusätzlich sollte auch der Energieverbrauch sämtlicher Haushalts- und Bürogeräte überwacht werden. Da der Standby-Verbrauch in der Nacht sich stark summiert, können zum Beispiel in der Nacht alle nicht verwendeten Geräte (außer es stehen Updates an, von welchen die Regelsoftware informiert sein sollte) automatisiert heruntergefahren und vom Netz genommen werden.

2.2.7 Energiegenerierung

2.2.7.1 Durch Brennstoffzellen betriebene Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

KWKK ist das Konzept die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme als Heizwärme und zum Betreiben einer Kältemaschine zu nutzen. Die hier

interessanteste Methode zur Stromerzeugung sind biogas-betriebene Brennstoffzellen: Dem Aufbau aus Reformier und Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle wird Methan zugeführt, welches aus Wasseraufbereitungsanlagen oder Biomasse gewonnen wird. Der Prozess gibt Wasserdampf und in geringer Menge CO₂ aus - was ökologisch gesehen, aufgrund seiner geringeren Treibhauswirkung im Vergleich zu Methan, immer noch eine deutlich positive Bilanz ergibt. Die Vorteile der Brennstoffzellen sind ihre Umweltfreundlichkeit, da Biogase verwertet werden können und kaum Schadstoffe produziert werden, der fast lautlose Betrieb und die hohe Verwertungseffizienz bei jedem Auslastungsmaß. Die Betriebstemperatur beträgt ca. 80°C, welche mit Hilfe eines Wärmetauschers direkt für das Heizsystem genutzt werden kann oder in heißen Monaten eine Kältemaschine antreiben kann. Die Effizienz der Kältemaschine ist bei diesem Aufbau, wegen der Betriebstemperatur von unter 100°C, allerdings nicht optimal, sollte für ein Niedrigstenergiehaus jedoch ausreichen. (Schmidt-Pleschka & Milles 2006^[37]; Milles 2006^[38])

2.2.7.2 Erdwärme

Um Erdwärme zu nutzen, werden Rohre in der Erde verlegt, in denen Wasser oder eine Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert. Die erwärmte Flüssigkeit gibt in der Wärmepumpe ihre Wärme an ein Kältemittel ab, welches durch einen Kompressor und schließlich in die Heizungsanlage geführt wird. Wichtig ist, dass die strombetriebene Wärmepumpe mit dem Kompressor möglichst energieeffizient arbeitet. (Sass et al. 2013: 4)^[39]

Ein Vergleichstest zeigte dabei, dass Wärmepumpen, die mit dem Erdreich als Wärmequelle arbeiten, in der Regel um einiges effizienter sind, als Luft- oder Grundwasser-Wärmepumpen. (Schoof 2013)^[14]

Die für Gebäude sinnvollen Möglichkeiten der Erdwärmennutzung eignen sich für Heizung und Kühlung, jedoch nicht für Stromerzeugung, da hierfür um einiges höhere Temperaturen und somit tiefere Bohrungen und ein größerer technologischer Aufwand erforderlich sind. Wegen der relativ geringen erreichbaren Maximaltemperatur, sollte die Heizungsanlage möglichst geringe

Vorlauftemperaturen haben, wie sie bei Flächenheizungen (30-40°C) gegeben ist. (Büttner & Fritzer 2010: 3)^[40]

Erdwärmesonden

Sind einzelne Rohre, die senkrecht in die Erde gebohrt werden. Da die Erdwärme mit zunehmender Tiefe ansteigt, sind sie die effizienteste Möglichkeit, allerdings kann die Bohrtiefe eventuell wegen Grundwasserschutz begrenzt sein. (Sass et al. 2013: 4-6)^[39]

Dabei gibt es Tiefe Erdwärmesonden, welche in eine Tiefe von über 400m reichen. Die Bohrung ist zwar kostenintensiv, dafür sind die Temperaturen mit 40-100°C relativ hoch. Flache Erdwärmesonden sind meist nur 100m (maximal 400m) tief, um einiges günstiger zu installieren und können aufgrund der Erdtemperaturen von 10-14°C sowohl zum Heizen im Winter, als auch zum Kühlen im Sommer verwendet werden. (Büttner & Fritzer 2010: 3, 7)^[40]

Erdregister oder Erdwärmekollektoren

Sind oberflächennah flächig verlegte Schläuche. Sie sind zwar wegen der geringeren Wärme, weniger effizient, aber dafür kostengünstig und unbedenklich für Grundwasservorkommen. Es ist allerdings eine Fläche notwendig, die später nicht bebaut werden darf. (Sass et al. 2013: 7)^[39]

2.2.7.3 Photovoltaik-Fassaden

Gebäudeintegrierte Photovoltaik (GiPV) an sonnenzugewandten Fassaden können – trotz der, durch den flacheren Einfallswinkel der Sonne, reduzierten Leistungsaufnahme – genauso zur Energieerzeugung in die Planung miteinbezogen werden wie PV-Anlagen am Dach. Sie bieten sogar zusätzliche Vorteile wie Sonnen- und Schallschutz, oder als Vorhangfassade. Besonders an Fassaden sollte darauf geachtet werden die PV-Module in ästhetischen Einklang mit dem Gebäude zu bringen, wozu sich aber vielfältige Möglichkeiten finden lassen. Sie lassen sich als konventionelle flächige Photovoltaik-Paneele zwischen den Fenstern oder auf Brüstungen installieren oder als transparente oder semitransparente PV-Module ausführen. Letztere sind in die Verglasung

einlamierte Zellen, die entweder flächig aber lichtdurchlässig erscheinen oder in Mustern angeordnet sind, wobei der Abstand zwischen den Zellen entsprechend der gewünschten Lichtdurchlässigkeit der Verglasung variiert werden kann. Auch möglich sind PV-Module auf Beschattungselementen, insbesondere wenn jene stetig der Sonne nachgeführt werden. (FEMP 2012)^[41]

2.3 REDUKTION DER CO₂-EMISSIONEN

Wie bereits angesprochen ist festzustellen, dass beim derzeitigen Stand der Technik bei einer Reduktion des Energieverbrauches (der Betriebsenergie) eines Gebäudes, die Höhe dessen Grauer Energie und somit dessen *embodied carbon* zunimmt. Der Begriff *embodied carbon* soll dabei die CO₂-Menge angeben, die aus der Bereitstellung Grauer Energie (die zur Produktion der Materialien benötigte Energie) und aus den chemischen Prozessen zur Produktherstellung resultiert. Es wird, zusammen mit anderen, durch die Herstellung entstehender, Treibhausgasen, in Form der *CO₂-Äquivalenz* numerisch ausgedrückt und stellt die allgemein anerkannte Einheit zur Einschätzung der Klimaeinwirkung eines Produktes dar. (Lockie & Berebecki 2014: 5)^[42]

Diese Steigerung des *embodied carbon* ist darauf zurückzuführen, dass für energieeffizientere Bauwerke ein größerer Produktionsaufwand einhergeht. Es wird mehr Material benötigt (dickere Dämmung, 3-Scheiben- statt 2 Scheiben-Verglasung, Gebäudeabdichtung), Details und Bauteile müssen komplexer ausgeführt werden (zur Wärmebrückenvermeidung, effizientere Fenster- und Fassadenbauteile) und auch die Gebäudetechnik wird komplexer. (Lockie & Berebecki 2014: 10)^[42]

Die Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), eine weltweite Vereinigung von Fachkräften aus dem Umfeld der Bauwirtschaft mit Sitz in Großbritannien, hat sich in einer Richtlinie dem Thema der CO₂-Bilanzierung angenommen. Demzufolge sind, um die vollständige CO₂-Bilanz eines Bauprojektes feststellen zu können, fünf Faktoren zu betrachten: (Lockie & Berebecki 2014: 8)^[42]

1. Das CO₂-Äquivalent eines Baustoffes
2. Das verursachte CO₂ beim Transport des Materials an den Bauort
3. Das durch den Bauvorgang erzeugte CO₂
4. Das durch die Bereitstellung von Energie für das Gebäude erzeugte CO₂
5. Die Wiederverwertbarkeit von Baumaterial und Bauteilen



Abb.10 Aufteilung des durch ein Gebäude verursachten CO₂

2.3.1 Niedrige CO₂-Äquivalente der Baustoffe

Das *CO₂-Äquivalent* setzt die Klimawirkung der *Sachbilanzen* des Produktes in Relation zu CO₂ (so entspricht zum Beispiel einem Kilogramm ausgestoßenem Methan die 25-fache Menge CO₂). (Lockie & Berebecki 2014: 5)^[42]

Es gibt die Menge eines CO₂-Ausstoßes an (meist in kg), der dieselbe Auswirkung auf das Klima hat, wie die Herstellung des entsprechenden Produktes. Das Globale Erwärmungspotenzial (GWP) umfasst sowohl das erzeugte CO₂ während aller für die Produktion benötigten Arbeitsschritte (Rohstoffgewinnung, Produktion, Zwischentransporte), als auch vermiedene Treibhausgas-Emissionen (z.B. durch Aufforstung für Bauholz oder Wiederverwertung von Abfallstoffen). Es ist für viele Materialien und Bauteile in entsprechenden Datenbanken zu finden.

Sich als nachhaltig qualifizierende Materialien, sollten aus schnell (laut LEED: weniger als 10 Jahre) nachwachsenden Rohstoffen bestehen und bei Förderung, Verarbeitung und Transport möglichst wenig Energie benötigen und Treibhausgase erzeugen und keine umweltschädlichen Nebenprodukte (z.B. Flüchtige Organische Verbindungen) aufweisen oder zur Herstellung benötigen. Solche Materialien sind unter anderem: (Saylor, o.J.^[43]; ZCB 2012b^[44])

- Baum- und Schafwolle als Dämmmaterial
- Agrifiber:
Ein ökologischer Faserplattenwerkstoff aus landwirtschaftlichen Restprodukten
- Linoleum
- Wheatboard:
Ein ökologischer Plattenwerkstoff aus vom Ernten zurückbleibenden Weizenstängeln (Kirei USA 2011)^[45]
- Strawboard
- Kork
- Bambus oder Fichte (als schnellnachwachsender Holzrohstoff)
- Recycelte Materialien für Innenausstattung und Innenraumgestaltung

- Verwendung wiederverwerteten oder aufbereiteten Bauschutts für die Außengestaltung und Baumaterials aus Abrissen für Bauteile
- Verwendung von Flugasche aus industriellen Verbrennungsprozessen als Betonbeifügung
- Lokal produzierte oder abgebaute Materialien und Rohstoffe

2.3.2 Kurze Transportwege

Der Transport von Baumaterial ist im Entwurfsstadium kaum zu beeinflussen. Worauf geachtet werden kann, um das derart erzeugte CO₂ zu minimieren ist, keine exotischen Materialien, die von weither transportiert werden müssen, zu verwenden. Ansonsten sollte während der Vergabe darauf geachtet werden, Materialien möglichst aus der Nähe zu beziehen, um sowohl Transportkosten als auch CO₂-Bilanz niedrigzuhalten.

2.3.3 Verringerung der CO₂-Emissionen während des Bauprozesses

Das während dem Bauvorgang erzeugte CO₂ ist ein geringer Anteil, der ebenfalls während der Entwurfsphase durch kaum mehr als die Komplexität des Entwurfes beeinflussbar ist. Vor allem durch ein optimales Management des Baudurchführungsprozesses kann es reduziert werden. Vorschläge der RICS-Richtlinie sind unter anderem: (Lockie & Berebecki 2014: 20)^[42]

- Verwendung mobiler Transportmischanlagen anstatt stetiger Flüssigbetonlieferung durch Fahrmischer
- Logistikmanagement zur optimalen Auslastung von Transportern, zum Einsatz von Just-In-Time-Lieferungen oder zur Vermeidung von Lieferungen während starker Verkehrsaufkommen
- Abfall- und Überschussvermeidung
- Anlagen ausschalten, wenn sie nicht benötigt werden
- Abdeckung des Energiebedarfs der Baustelle durch erneuerbare Energien

2.3.4 Reduzierung des Energieverbrauches während des Gebäudebetriebes

Der Energieverbrauch des Gebäudes – genauer die verbrauchte Energie aus nicht-erneuerbaren Energiequellen – ist ein wesentlicher Faktor während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. Dieser wird in Kapitel 3 minimiert werden. Darüber hinaus ist es wichtig zu wissen, welchen Anteil der benötigten Energie das Gebäude selbst produzieren kann (z.B. durch Solarzellen, Erdwärme, siehe Abschnitt 2.2.6) und wie viel eingekauft werden muss. In der Entwurfsphase ist die zugekaufte Energie erst einmal der wichtige Faktor für die CO₂-Bilanzierung. Später kann anhand des Portfolios des Stromanbieters dann zusätzlich der Anteil fossiler Brennstoffe am zugekauften Strom und die daraus resultierende CO₂-Emission festgestellt werden.

2.3.5 End-of-Life-Strategien

Für einen vollständigen Lebenszyklus eines Gebäudes (in diesem Kontext als *cradle-to-grave* bezeichnet) ist außerdem der Abbauprozess zu betrachten. Dazu zählen Emissionen, die durch Abrissarbeiten, Abtransport und Abfallaufbereitung entstehen. Weitergehend kann zudem die Wiederverwendung oder Wiederaufbereitung von Materialien für ein neues Bauprojekt miteinbezogen werden (bezeichnet als *cradle-to-cradle*). Die Abfallaufbereitung ist für Materialien in entsprechenden Datenbanken miteinbezogen; das spätere Wiederverwertungspotential ist dagegen kaum numerisch zu erfassen und vermutlich auch schwierig mit Sicherheit für den Zeitpunkt des Abrisses vorherzusagen. (Lockie & Berebecki 2014: 9)^[42]

2.3.6 Beispiele für Umsetzung

Die 2016 in Kraft tretende „Zero Carbon Homes Policy“ des Vereinigten Königreiches schreibt die Verwendung hocheffizienter Bauteile, erneuerbarer Energiequellen und möglichst effizienter Heiz- und Kühlsysteme vor. Dadurch sollen Energieverbrauch und Energiebedarf minimiert werden und zumindest die CO₂-Emissionen des Gebäudes selbst auf null gebracht werden. (Zero Carbon Hub 2013: 4-6)^[46]

Das ZCB in Hong Kong ist ein Zero-Carbon-Building, bei dem nicht nur ein Nullenergiestandard angestrebt wurde, sondern auch Nullemission im gesamten, das Bauwerk betreffenden, Kontext. Das 3-stöckige Gebäude beherbergt Ausstellungsflächen, eine Muster-Wohnung und Muster-Büros, ein Café und eine Mehrzweckhalle. Auf dem Grundstück befindet sich zudem eine Veranstaltungsfläche und eine „urbanes natives Waldstück“, welches ausschließlich heimische oder bereits angepasste Pflanzen beherbergt. Durch effiziente Gebäudeformgebung, Bauteile und Gebäudetechnik wurde der Energiebedarf minimiert, welcher durch vor Ort produzierter Energie gedeckt wird. Zusätzlich wurde darauf geachtet, Baumaterialien aus nachhaltigen Rohstoffen zu verwenden. Die Rohstoffe und Materialien kommen aus der Region, um kurze Transportwege zu ermöglichen. Sie stammen aus möglichst energiearmer und umweltfreundlicher Produktion und sollen entweder recycelbar sein oder aus recycelten Materialien produziert worden sein. Zudem können sie CO₂ aufnehmen und binden. (ZCB 2012c)^[47]



Abb.11 Das Zero Carbon Building in Hong Kong

3 METHODEN ZUR PLANUNG ÖKOLOGISCHER GEBÄUDE

Im Folgenden werden Möglichkeiten zur Erfassung der Nachhaltigkeit eines Gebäudeentwurfes untersucht. Die Nachhaltigkeit des Gebäudeentwurfes soll sich hier aus einem möglichst geringen Endenergiebedarf und einer möglichst geringen CO₂-Bilanz zusammensetzen.

Zur Evaluierung des Endenergiebedarfs, bestehend aus prognostiziertem Energieverbrauch und möglichen Energiegewinnen durch Erzeugung am Gebäude, werden eine Reihe von Programmen zur Building Performance Simulation (BPS) untersucht. Mit dem bestgeeigneten Werkzeug wird dann eine Methodik erstellt.

Zur Bewertung der CO₂-Bilanz wird ein Werkzeug auf Basis einer Kalkulationstabelle entwickelt, welches das prognostizierte verursachte CO₂ im Lebenszyklus des Gebäudes nach dem *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen* (BNB) bewertet. Dazu werden zunächst Methoden zur Erfassung des Treibhauspotenzials der Baumaterialien gesucht. Das CO₂-Äquivalent der Materialien wird dann mit dem, durch den Endenergiebedarf verursachten, CO₂ kombiniert und auf den Lebenszyklus hochgerechnet.

3.1 BUILDING PERFORMANCE SIMULATION

Building Performance Simulation (BPS) soll mit Hilfe spezieller Programme den Energieverbrauch eines (digital vorhandenen) Gebäudes errechnen. Solche Programme können dabei auf zwei verschiedenen Methoden basieren:

Beim physikalischen Modell (auch White-Box-Approach) wird das Gebäude als eine digitale Repräsentation eines physischen Modelles mit seinen thermischen Eigenschaften erstellt. Die Ausgabe erfolgt in Form von physikalischen Werten. Solche Programme sind besonders geeignet für Simulationen während des Planungsprozesses, wo ein digitales Gebäudemodell vorliegt. (Foucquier et al. 2013: 274)^[48]

Bei der statistischen oder probabilistischen Methode (auch Black-Box-Approach) wird dagegen kein physikalisches Modell benötigt. Anstatt aus Berechnungen

anhand der Gebäudetektonik und der thermischen Eigenschaften, werden die Vorhersagen aus gemessenen Werten spezifischer Systeme abgeleitet, welche einer Datenbank entnommen werden. Es wird daher eine extensive Datenbank mit Messdaten benötigt. Die Ergebnisse müssen fallspezifisch interpretiert werden. Diese Herangehensweise ist besonders für Bestandsgebäude mit unbekanntem Parametern und Datenerfassungen im größeren Maßstab (z.B. städtebaulich) geeignet. (Foucquier et al. 2013: 278)^[48]

Alle in 3.1.3 untersuchten BPS-Programme arbeiten auf Grundlage eines physikalischen Modelles.

Anhand simulierter Ergebnisse können Eigenschaften des Projektes geändert werden, um den Energieverbrauch zu optimieren. Das Programm benötigt dazu, neben einem digitalen Modell des Gebäudes oder zumindest seiner geometrischen Daten, eine Vielzahl an Informationen zu folgenden Eigenschaften:

- Standortdaten (Klimadaten)
- Belegungsplan (Nutzungsintensität in Abhängigkeit von Wochentag und Uhrzeit)
- Konstruktionen und Bauelemente und deren thermische Eigenschaften
- Luftdichtigkeit des Gebäudes
- Beleuchtung und andere elektrische Ausstattung
- Technische Gebäudeausrüstung (insbesondere HKLS)

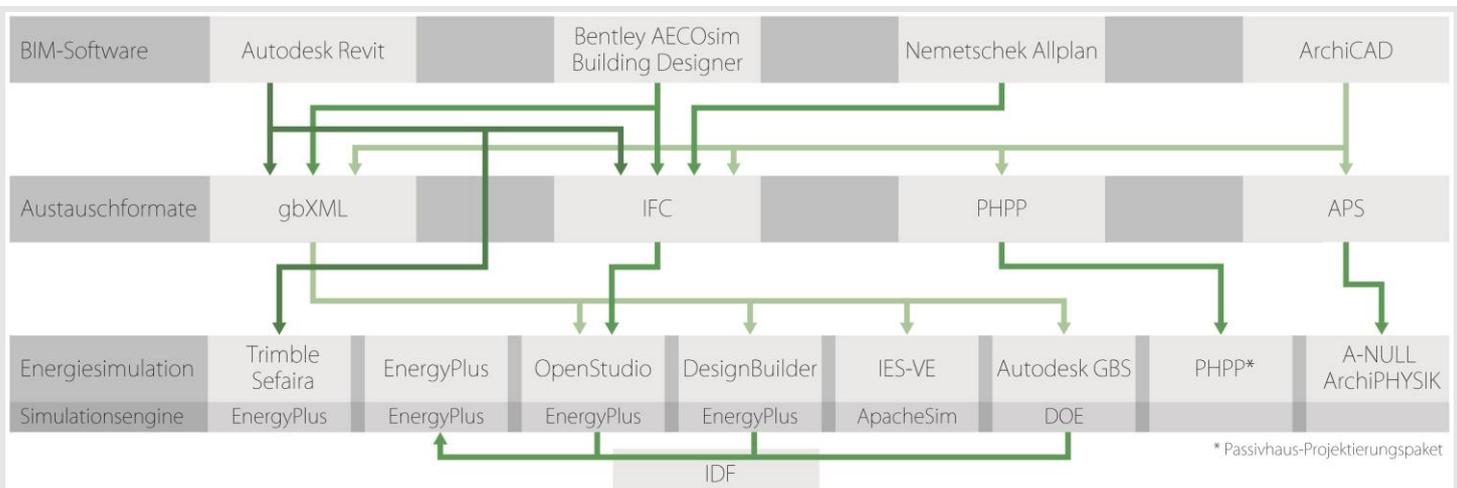


Abb.12 Mögliche Kombinationen von manchen BIM- und BPS-Programmen

Abb.12 zeigt eine Auswahl von BIM-Programmen und Anwendungen zur Energiesimulation mit der jeweiligen Simulations-Engine, die Dateiformate zum Austausch und wie diese kombiniert werden können. Als BIM-Applikation für die Untersuchung wurde Autodesk Revit gewählt. Das gbXML-Format erscheint aus dieser Graphik als das vielseitigste hervor; es wird in 3.1.1 mit dem zweiten, weitverbreiteten, Format IFC verglichen. Das unter Experten verbreitete EnergyPlus als Standalone-Software kann nur das IDF-Format verwenden, welches nicht direkt aus BIM-Programmen exportiert werden kann. Die Simulationsprogramme (außer das fallspezifische PHPP) werden in 3.1.3 genauer betrachtet.

3.1.1 BPS von BIM-Projekten und Datenaustausch

Bislang ist es meist üblich ein zu analysierendes Projekt direkt in einem Programm für Building Performance Simulation zu erstellen. Ist das Projekt lediglich anhand von 2D CAD-Plänen und 3D Visualisierungsmodellen entworfen, ist das auch die einzige Möglichkeit. Da aber inzwischen immer mehr Bauprojekte in BIM-Umgebung entwickelt werden, wo ein Projekt bereits umfangreich digital definiert vorliegt, ist die Möglichkeit eines Datenaustauschs zwischen BIM-Programm und dem Programm für Energiesimulation ein zeitsparender Vorteil. Die Idee ist, dass möglichst viele Informationen, die für die BPS benötigt werden, dem BIM-Projekt entnommen und in einem Dateiformat abgespeichert werden können, welches dann in ein Simulationsprogramm eingelesen werden kann. Ein solcher Datenaustausch ist sowohl durch das IFC-Format als auch durch das speziell für Energiesimulation entwickelte gbXML-Format möglich.

IFC (Industry Foundation Class):

IFC ist ein Format zum Aus

tausch von Daten aus dem Bereich Bauwerks- und Anlagenmanagement zwischen verschiedenen Programmen (derzeit kompatibel mit 183 Programmen).

Es wurde ab 1995 von der gemeinnützigen Gesellschaft „buildingSMART“ entwickelt. Durch die komplexen und bei jedem

Softwareentwickler anders aufgebauten Datenbanken auf denen ein BIM-Programm basiert, entstand der Bedarf nach einem programmunabhängigen Format für den Austausch der in einem Building Information Model (BIM) gespeicherten Informationen. IFC ist objekt-basiert und repräsentiert durch Klassen-Definitionen die einzelnen Objekte aus denen das BIM besteht. Es enthält dabei nicht nur geometrische Informationen, sondern auch alphanumerische Informationen (z.B. physische Eigenschaften, Quantitäten, semantische Objektinformationen).

IFC-Dateien können von den meisten BPS-Programmen (OpenStudio ermöglicht es mithilfe von BIMServer) nicht direkt importiert werden. Sie können aber mit dem Space Boundary Tool, welches von der Simulation Research Group des Berkeley Lab entwickelt wurde, ins IDF-Format konvertiert werden. (buildingSMART International Ltd., o.J.)^[49]

gbXML (green building Extensible Markup Language):

Das, im Jahr 2000 von der gleichnamigen gemeinnützigen Gesellschaft eingeführte, gbXML-Format wurde speziell für den Informationsaustausch zwischen BIM-Programmen verschiedener Hersteller und Analyse-Programmen (z.B. für Energieanalysen und Beleuchtungsanalysen) entwickelt. Es kann sowohl die geometrischen Informationen eines BIM (Räume und Flächen), als auch dessen für die Simulation benötigten Eigenschaften (Standortdaten, physische Eigenschaften, Nutzungs- und Ausstattungsinformationen) enthalten. (gbXML.org, o.J.)^[50]

Problematisch bei IFC ist, dass es noch nicht in der Lage ist, die gesamte Fülle an Informationen zu verarbeiten, die von den unterschiedlichen BIM-Programmen generiert wird. Daher kommt es öfter vor, dass bestimmte Elemente nicht oder fehlerhaft in die IFC-Datei aufgenommen werden.

Dadurch dass gbXML nur alphanumerische Daten und die verhältnismäßig simple Geometrie aus Räumen und deren Teilflächen eines BEM verarbeiten muss, ist es weniger fehleranfällig.

Nach Vergleichen von Energiesimulationen verschiedener Modelle in EnergiePlus, welche jeweils als gbXML und als IFC aus Revit und ArchiCAD exportiert wurden, kam Ivanova (2014: 76)^[51] zu dem Ergebnis, dass gbXML das sicherere Format für den Datenaustausch zwischen BIM- und BPS-Applikation darstelle. Auch wenn IFC zu diesem Zeitpunkt geometrische Daten zuverlässiger übertrug, konnten durch gbXML dennoch in mehr Fällen akzeptable und im Schnitt exaktere Ergebnisse erzielt werden.

Aufgrund dessen und weil IFC-Dateien vor dem Import in IDF-Dateien konvertiert werden müssen, wurde im Weiteren mit dem gbXML-Format gearbeitet.

3.1.2 Mögliche Informationen in einem Revit-Projekt mit Einfluss auf die Energiesimulation

Da das BIM-Modell immer als zentrales Modell gedacht ist, ist es wichtig möglichst viele Informationen in das BIM-Projekt eingeben zu können. Wird das Modell innerhalb des BIM-Programms analysiert, erhöht dies die Genauigkeit der Energieanalyse. Wird das BIM-Modell in ein externes Simulationsprogramm importiert, verringert dies den Aufwand, für die Simulation jeder Entwurfsalternative, Informationen erneut im Simulationsprogramm eingeben zu müssen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Informationen im BIM-Modell auch exportiert und importiert werden können.

Im Folgenden finden sich die Informationen, welche relevant für die Energieanalyse sind und in Revit eingegeben werden können. Auf sie wird später noch einmal Bezug genommen.

A. Geometrie

1. Raumgeometrie
2. Fensterflächen
3. Beschattungselemente

B. Position

1. Standort mit den entsprechenden Klimadaten
2. Ausrichtung zu den Himmelsrichtungen

C. Materialien

1. Thermische Eigenschaften der Baumaterialien

2. Bauelemente/Baukonstruktionen
- D. Nutzungsinformationen
1. Benötigte Fläche pro Person
 2. Wahrnehmbarer Wärmegewinn pro Person
 3. Latenter Wärmegewinn pro Person
 4. Beleuchtungslast pro Fläche
 5. Versorgungsleistung pro Fläche
 6. Beitrag eines Luftraumes zur Beleuchtung
 7. Belegungsplan (Nutzungsintensität in Abhängigkeit der Uhrzeit)
 8. Beleuchtungsplan (Beleuchtungsintensität in Abhängigkeit der Uhrzeit)
 9. Stromversorgungsplan (Strombedarf in Abhängigkeit der Uhrzeit)
 10. Öffnungszeiten (Nutzungszeitraum pro Tag)
 11. Sollwert der Kühlung bei nichtbelegtem Zustand
- E. Gebäudeversorgung
1. Gebäudebetriebsdauer pro Tag, Woche und Jahr
 2. Lüftungssystem
 3. Von Luftversorgung geforderte Außenluftmenge

3.1.3 Programme für Building Performance Simulation

Es gibt zahlreiche Programme für Energiesimulation und einige davon beschäftigen sich auch damit eine effiziente Verbindung zwischen BIM und BPS zu ermöglichen. Eine Reihe der Vielversprechendsten wurden im Folgenden in unterschiedlichem Ausmaß betrachtet. Die Vorauswahl wurde in Hinblick auf Verbreitung bzw. Reputation und Interoperabilität bzw. Kompatibilität mit Autodesk Revit getroffen. Ziel war es, anhand folgender Faktoren, das bestgeeignete Simulationsprogramm für Architekten an Revit zu finden, welche insbesondere während der Entwurfsphase schon das Projekt evaluieren und optimieren wollen:

- Eignung für Architekturbüros jeder Größe bezüglich Einlerndauer und Lizenzkosten

- Von Architekten ohne tiefgreifende Fachkenntnisse in Bauphysik verwendbar
- Möglichst fehlerfreie Übertragung der Daten von Revit zum Simulationsprogramm
- Möglichst viele Informationen sollen dem BIM-Projekt entnommen werden und möglichst wenige Eingaben sollen somit im Simulationsprogramm notwendig sein (dies soll es vereinfachen, angepasste Entwürfe erneut zu analysieren)
- Nachweisliches Potenzial zuverlässige Ergebnisse zu liefern
- Qualität, Umfang und Lesbarkeit der Simulationsergebnisse

3.1.3.1 EnergyPlus

EnergyPlus versteht sich als „Whole Building Performance Simulation“-Programm, welches den Energieverbrauch durch Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und elektrische Ausstattung und den Wasserverbrauch eines Gebäudemodells simulieren kann. Die Open-Source-Software wird vom U.S. Department of Energy (DOE) finanziert und ist kostenlos erhältlich. Es ist daher zwar ein häufig verwendetes und zuverlässiges Simulationswerkzeug, ist aber aufgrund des minimalen Interfaces schwierig zu verwenden. Die textbasierte Eingabe erfolgt durch eine tabellarische Darstellung, die Ausgabe erfolgt ebenfalls lediglich textbasiert. Das Programm ist in erster Linie als reine Simulations-Engine intendiert, auf der viele andere BPS-Programme aufbauen. Das größere Hindernis besteht aufgrund der hohen Komplexität des Programmes: Dadurch dass das BEM äußerst genau definiert werden kann und muss, benötigt es lange Zeit und auch tiefgreifende Kenntnisse im Bereich Gebäudetechnik um das Programm zu beherrschen. (EnergyPlus, o.J.)^[52]

EnergyPlus arbeitet mit dem IDF-Format, welches über Green Building Studio aus Revit exportiert werden kann oder aus einer IFC-Datei konvertiert werden kann. Green Building Studio beschreibt die herunterladbare IDF-Datei zwar als „bereit zur Analyse in EnergyPlus“, dies ist sie jedoch nicht; es müssen vorher zusätzliche Einstellungen im IDF-Editor von EnergyPlus vorgenommen werden. Wegen der schwierigen Verwendbarkeit für Architekten, entfällt daher EnergyPlus als geeignete Option.

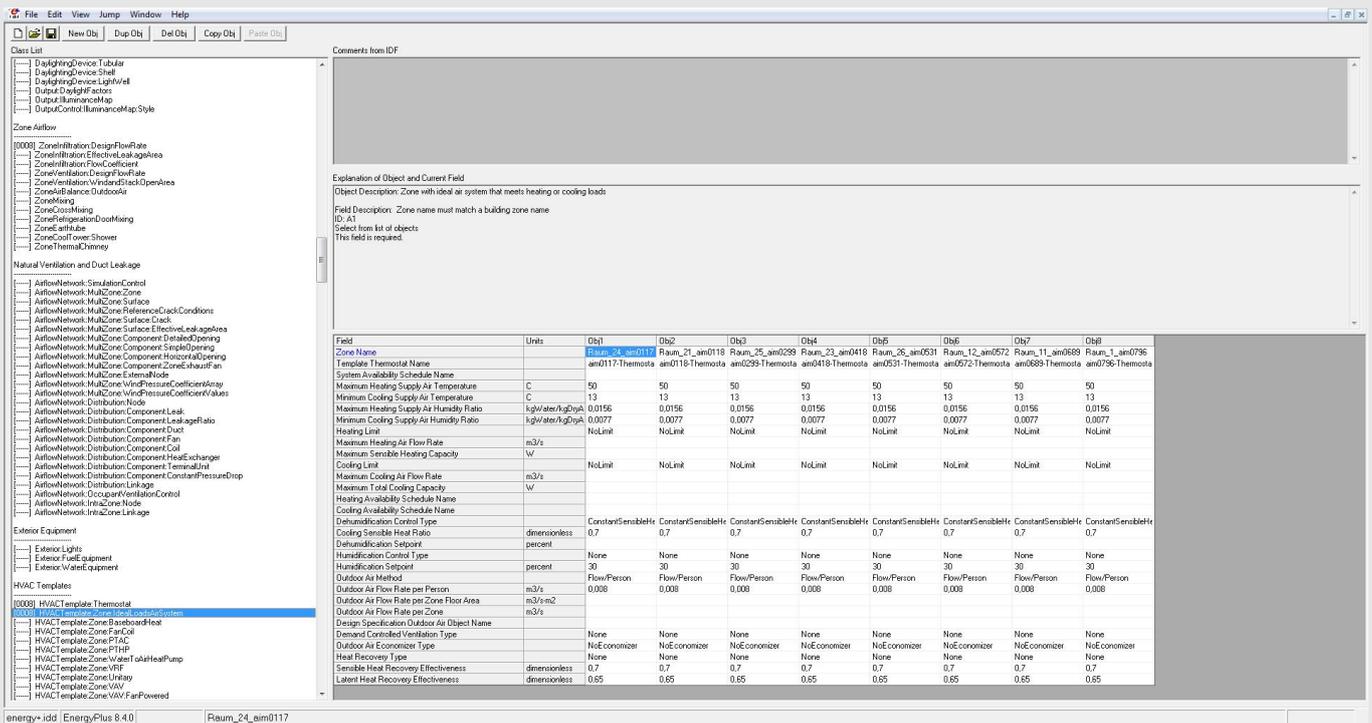


Abb.13 Interface des IDF Editors, dem Hauptmodul für die Bearbeitung in EnergyPlus

3.1.3.2 OpenStudio

OpenStudio ist ebenfalls ein kostenfreies Open-Source-Softwarepaket auf der Basis von EnergyPlus, welches neben einem übersichtlicheren Interface auch graphische Darstellungen der Analyseergebnisse bietet. Bezüglich Komplexität und Anspruch an den Nutzer ähnelt es aber EnergyPlus. Es wird unter anderem vom National Renewable Energy Laboratory (NREL), Teil des DOE, entwickelt.

Das Paket beinhaltet ebenfalls ein SketchUp-Plugin, durch welches sich in SketchUp erstellte oder importierte Projekte an die OpenStudio-Applikation transferieren lassen. Damit dies allerdings fehlerfrei möglich ist, müssen in SketchUp mitunter spezielle Modellierfunktionen des Plugins verwendet werden um ein gültiges Modell zu erstellen. Der Import von BEMs, zum Beispiel aus BIM-Programmen, in SketchUp ist ebenfalls fehleranfällig.

Ein weiteres Zusatzprogramm ist das Parametric Analysis Tool, welches anhand eines OpenStudio-Projektes eine Reihe an Entwurfsalternativen simulieren kann, indem verschiedene Parameter (sogenannte „Measures“) angewendet werden.

(OpenStudio, o.J.)^[53]

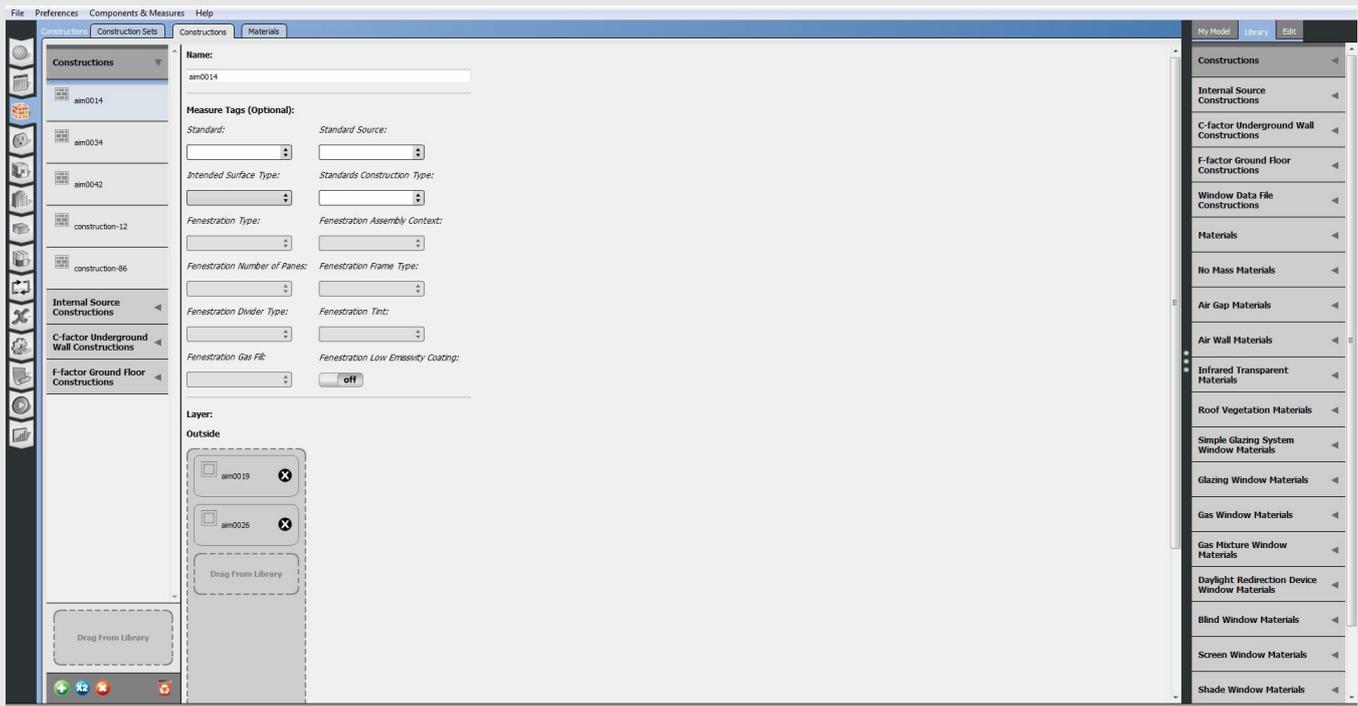


Abb.14 Interface von OpenStudio

OpenStudio ist zwar aus Architektensicht ähnlich komplex wie EnergyPlus, ist jedoch durch die Benutzeroberfläche um einiges einfacher verständlich. Besonders durch die „Measures“, welche sich aus einer webbasierten Bibliothek herunterladen lassen und verschiedenste Gebäudeeigenschaften repräsentieren, wäre es nach einer gewissen Einlernzeit auch für entwerfende Architekten nutzbar.

3.1.3.3 DesignBuilder

DesignBuilder ist eine proprietäre Anwendung für Energiesimulation mit einer umfassenden graphischen Wiedergabe. Es ist sowohl möglich Gebäude innerhalb des Programms mithilfe graphischer Werkzeuge zu erstellen, als auch Projekte aus BIM-Programmen zu importieren. Für den Datenaustausch mit solchen Programmen wurde ein Plugin entwickelt, welches bekannte Konvertierungsfehler der Geometrie beim Export korrigiert und zum Überprüfen der Geometrie eine Vorschau des BEM anzeigt, wie es in DesignBuilder importiert werden wird. In der DesignBuilder-Anwendung werden dann automatisch fehlende Informationen durch Standardwerte ersetzt, wodurch ein sofortiger Simulationsdurchlauf möglich ist.

Durch eine noch klarer organisierte Benutzeroberfläche als bei OpenStudio und eine extensive Bibliothek bei gleicher technischer Tiefe, besitzt es ebenfalls eine annehmbare Einlernzeit. Nachteil sind hier allerdings die hohen Lizenzkosten, die es nur für, auf diesen Bereich spezialisierte, Anwender in Frage kommen lassen.

(Design Builder Software Ltd, o.J.)^[54]

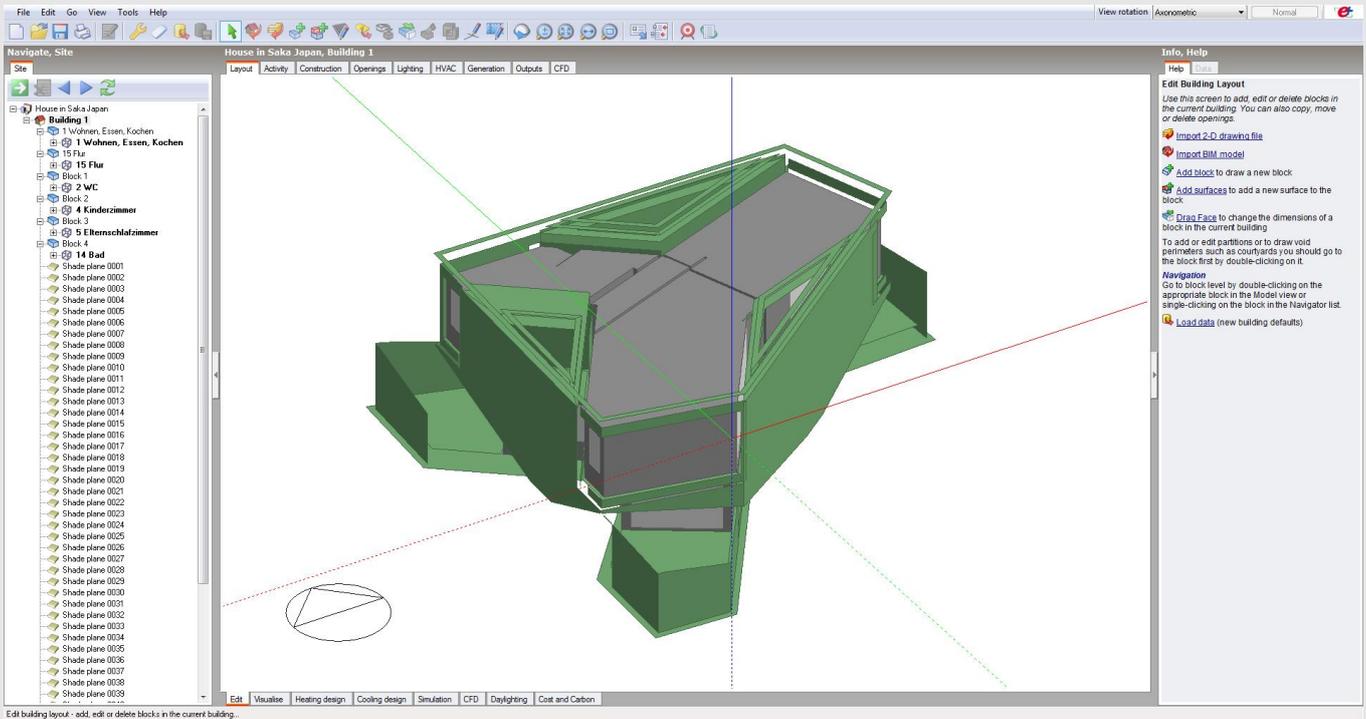


Abb.15 Interface von DesignBuilder in der Modellierungsansicht

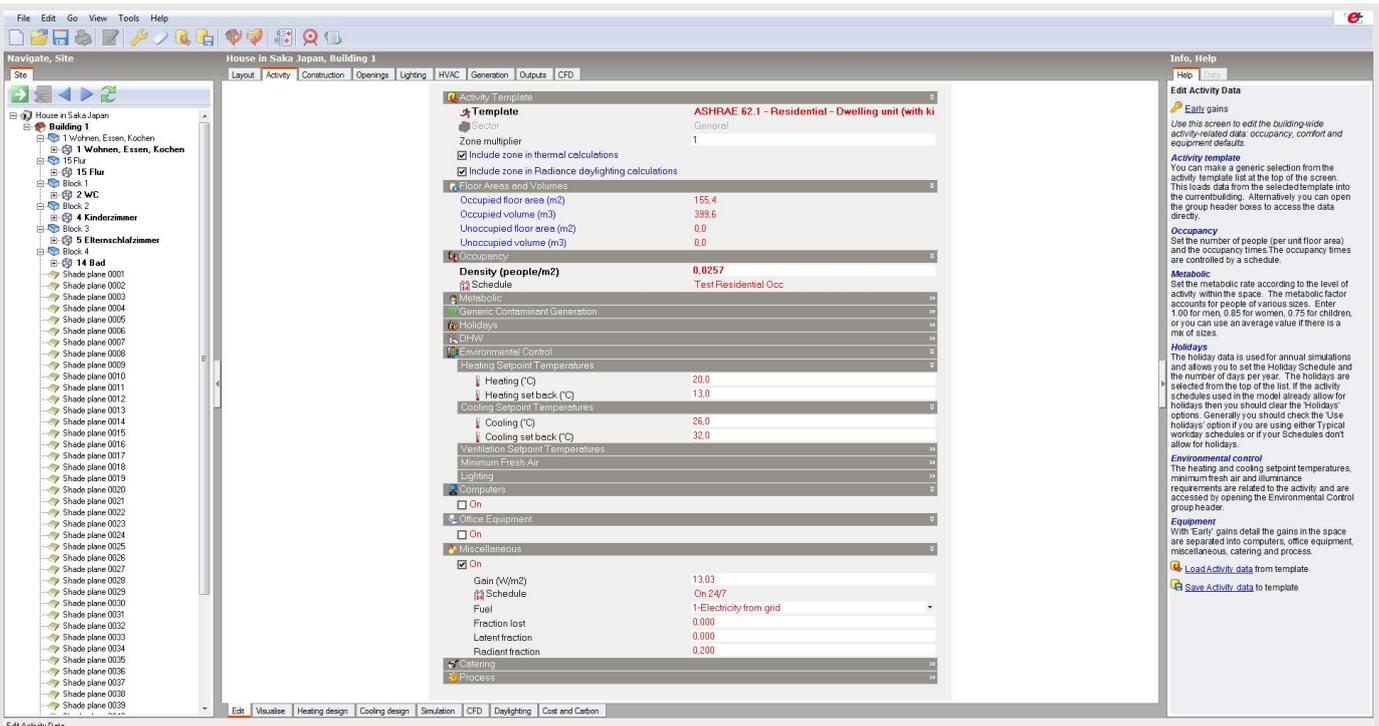


Abb.16 Interface von DesignBuilder in einer der Einstellungsansichten

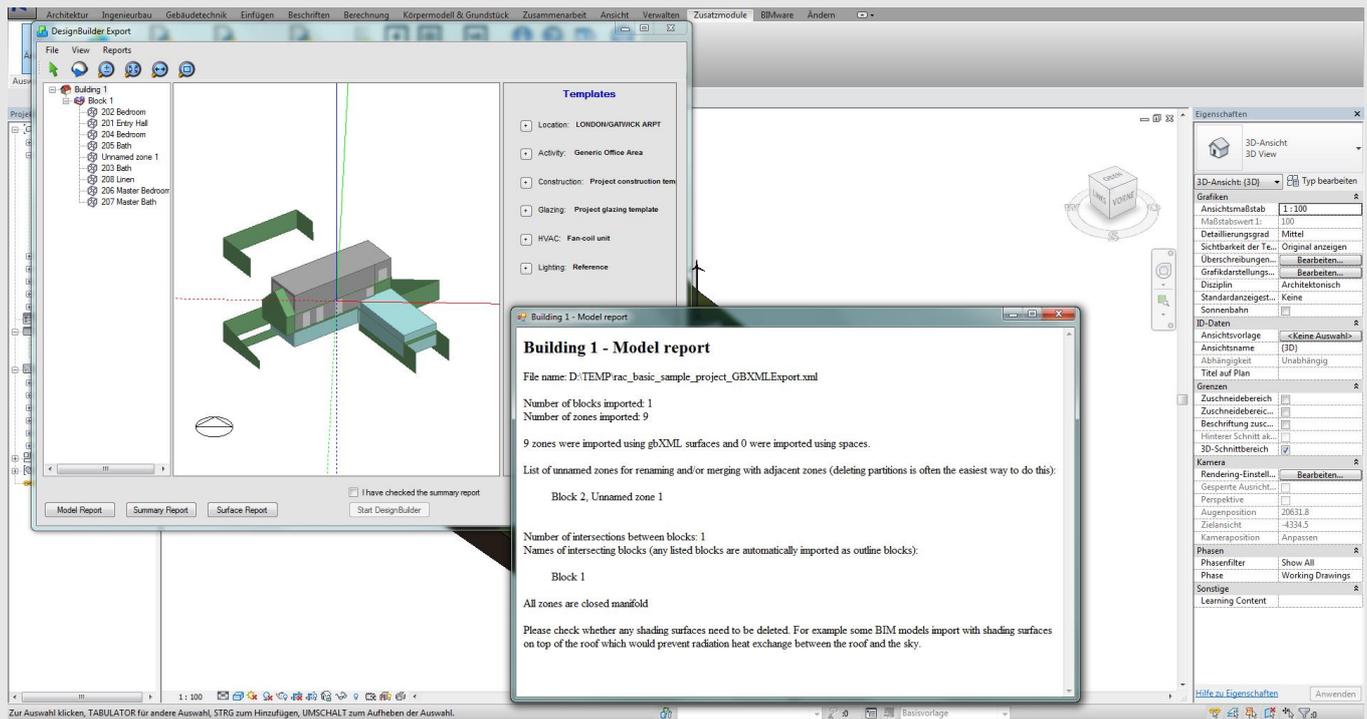


Abb.17 Das Übertragungs-Plug-in von Revit zu DesignBuilder

3.1.3.4 Integrated Environmental Solutions – Virtual Environment (IES-VE)

IES-VE ist ein proprietäres BPS-Programm, welches mit einem Plugin für Revit geliefert wird. Es korrigiert, ähnlich wie DesignBuilder, vor der Analyse eventuelle Fehler im Energiemodell. Das im Plugin beinhaltete VE-Ware ist kostenlos nutzbar. Es analysiert allerdings nur anhand der grundlegendsten Einstellungen und liefert lediglich den jährlichen Gesamtenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen. Mit einer Lizenz kann das Revit-Projekt durch das Plugin via gbXML-Format an die IES-Applikation gesendet werden, um sehr tiefgehende Simulationen durchzuführen. Die Kosten für eine solche Lizenz sind jedoch ebenfalls sehr hoch. (Integrated Environmental Solutions Limited, o.J.)^[55]

Die Vollversion wurde nicht getestet. Die hohen Lizenzkosten lassen es universell aber nicht in Frage kommen.

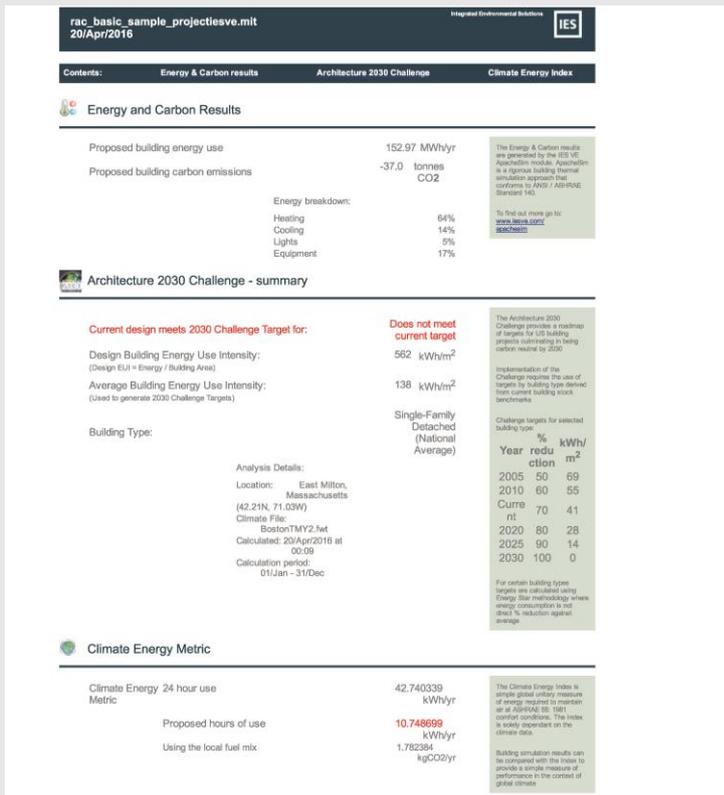


Abb.18 VE-Ware Ergebnisbericht

3.1.3.5 Sefaira

Sefaira verspricht mit seinem Plugin für Revit, auf einer Webcloud basierende, Analysen für Energiebedarf und Tageslichteinfall in Echtzeit innerhalb der Revit-Umgebung. Dadurch ist es nicht mehr notwendig, dass BIM-Modell in ein anderes Programm zu exportieren – die häufigste Ursache fehlerhafter oder unvollständiger Daten. Die Benutzeroberfläche soll auf den Bedarf entwerfender Architekten ausgerichtet und intuitiv erlernbar sein. Es stellt somit möglicherweise das vielversprechendste Simulationswerkzeug für die Arbeit mit Revit dar, kommt allerdings auch mit sehr hohen Lizenzkosten einher. Das Programm konnte nicht getestet werden. (Trimble Navigation Limited, o.J.^[56]; Voshage 2014^[57]; Goyal 2015^[58])

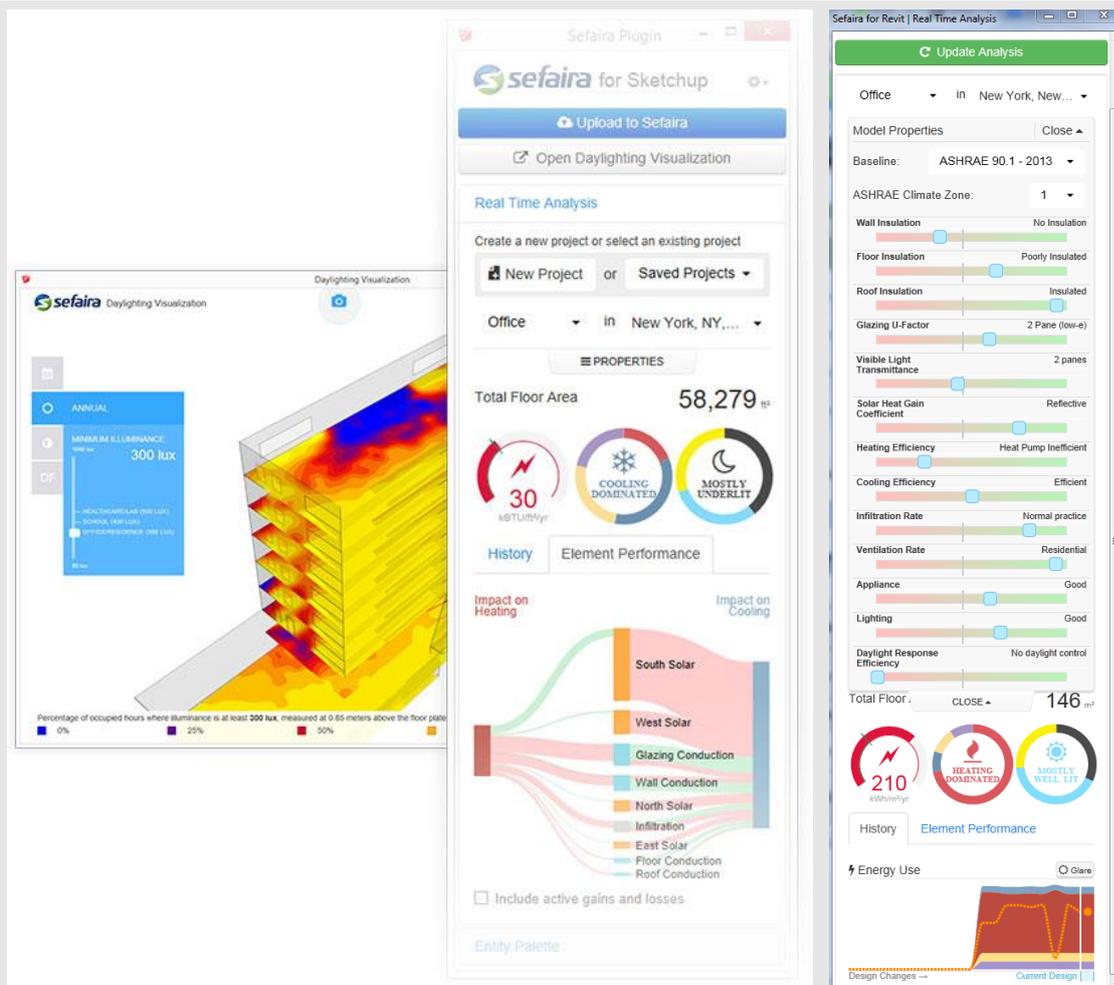


Abb.19 Interfaces von Sefaira

3.1.3.6 Design Performance Viewer (DPV)

Der DPV ist ein vom Institute of Technology in Architecture der ETH Zürich entwickeltes Plug-in für Revit und basiert ebenfalls auf der EnergyPlus-Engine. Er bietet keine extensive, aber eine interessante und die wesentlichen Informationen umfassende Analyse des Projektes mit minimalen Inputs. In den Einstellungen des Plugins, sind zudem einige sinnvolle Zusatzeingaben möglich, um die Versorgungstechnik des Projektes noch mehr zu spezifizieren, ohne mit Details zu überfordern. Nachteil ist hier allerdings, dass die Möglichkeiten des Plug-ins schnell ausgeschöpft sind und auch die Ergebnisberichte umfassen nur relativ wenige Informationen. Leider bietet die einzige momentan öffentlich verfügbare Version (für Revit 2014) weniger als ihre Vorgänger (für Revit 2008 und 2010), jedenfalls aber zu wenig für eine brauchbare Energiesimulation.

(Professorship of Architecture and Building Systems (A/S), o.J.^[59]; ETH Zurich & KEOTO AG 2010^[60]; Schlueter & Thesseling 2008^[6])

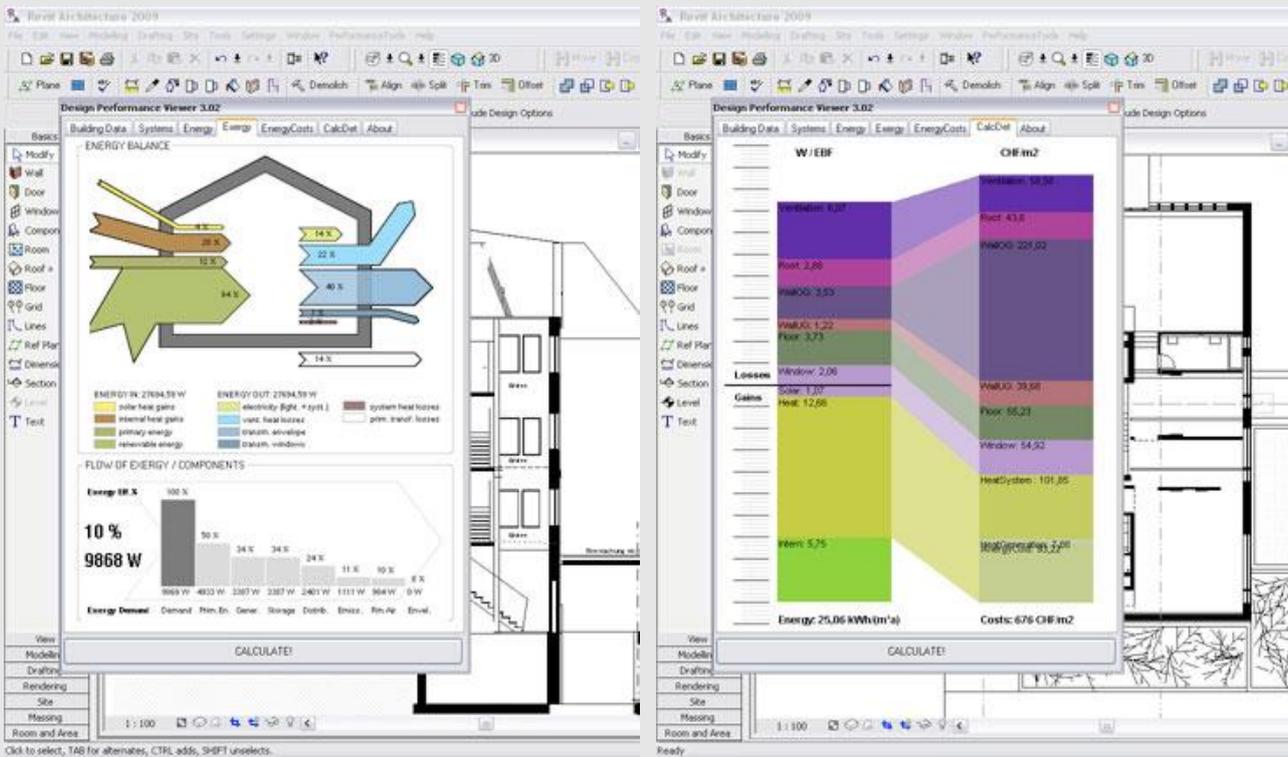


Abb.20 Interfaces der Version für Revit 2009

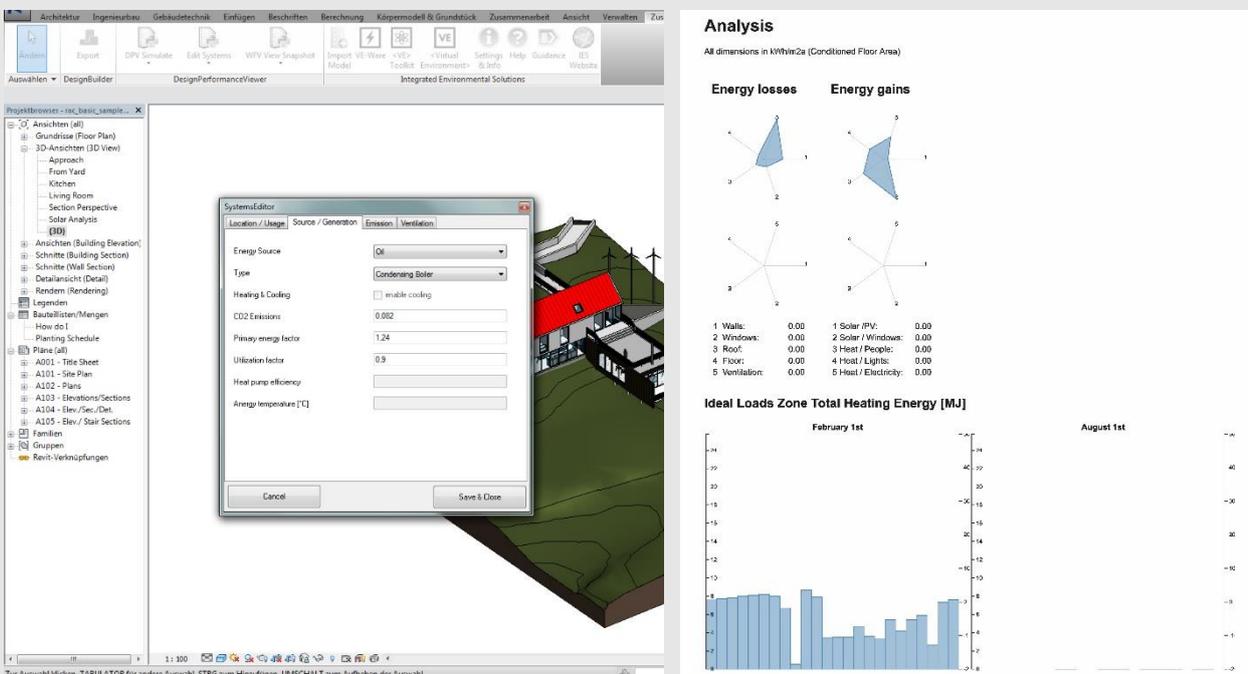


Abb.21 Interface und Ergebnisbericht der Version für Revit 2014

3.1.3.7 Autodesk Green Building Studio (GBS)

GBS ist ein Web-basiertes Analysewerkzeug auf Basis der DOE-2.2 Simulations-Engine und steht Autodesk-Subscription-Kunden kostenlos zur Verfügung. Es wurde von Autodesk speziell für die Energieanalyse in Revit (vom selben Entwickler) vorgesehen. Dadurch arbeitet es so problemlos mit Revit zusammen, wie es für ein Programm eines Drittanbieters unmöglich ist. Der Datenaustausch erfolgt durch das gbXML-Format, welches im Hintergrund an den GBS-Server zur Verarbeitung gesendet wird. Die umfassenden Ergebnisse lassen sich, graphisch gut lesbar aufbereitet, in einem separaten Fenster oder über die GBS-Internetseite betrachten und vergleichen. Über die Internetseite lassen sich zudem eine Reihe von Eigenschaften nachjustieren. Sie bietet außerdem zusätzliche Informationen zu Wasserverbrauch, möglichen Erträgen durch Photovoltaikanlagen und den erreichten LEED-Credits für Tageslichtertrag. (Autodesk Inc., o.J. a)^[61]

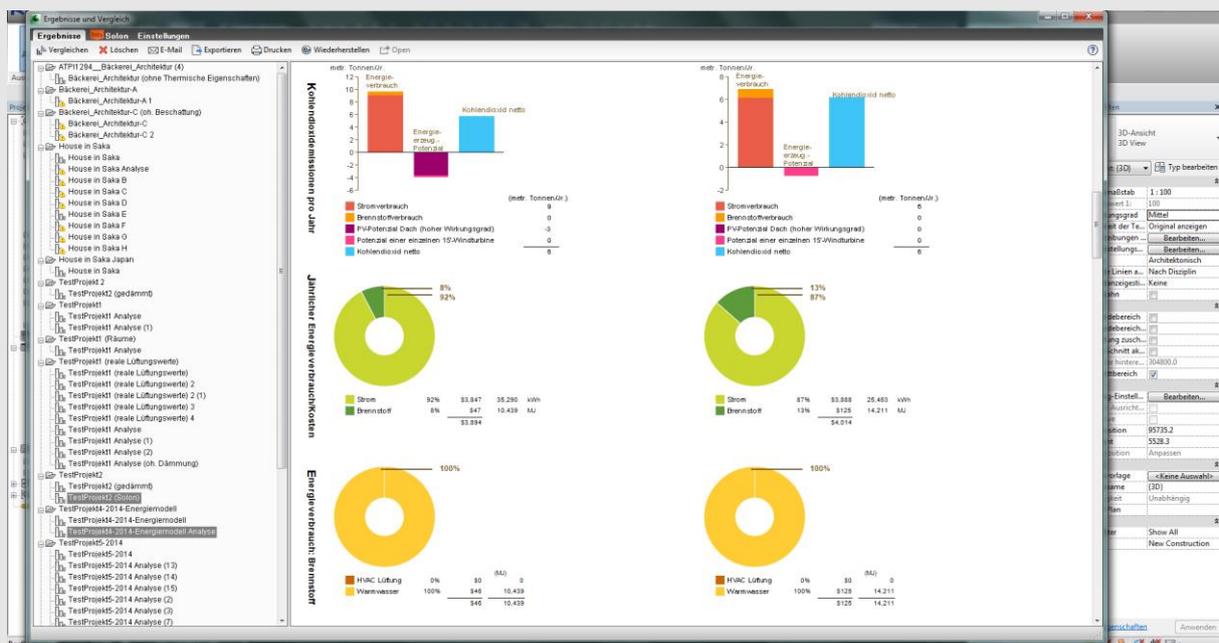


Abb.22 Vergleichender Ergebnisbericht in Revit

3.1.3.8 Vergleich der betrachteten Simulationsprogramme

Die folgende Tabelle stellt noch einmal vergleichend dar, inwieweit die getesteten BPS-Programme die, unter 3.1.3 beschriebenen, Voraussetzungen für Architekten in der Entwurfsphase erfüllen können.

	EnergyPlus	OpenStudio	DesignBuilder	IES-VE ¹	DPV	GBS
Einlerndauer	sehr lang	lang	lang	keine	keine	kurz
Lizenzkosten	null	null	hoch	null	null	null ²
benötigte Fachkenntnisse	hoch	mittel	mittel	wenig	wenig	wenig
Datenübertragung	fehlerhaft	korrekt	korrekt	korrekt (Revit-intern)		
Zuverlässigkeit	hoch	hoch ³	hoch ³	mittel	gering ⁴	hoch ⁵
Ergebnisbericht	detailliert	detailliert	detailliert	sehr kurz	sehr kurz	detailliert
Darstellung Ergebnisbericht	Tabelle (unformatiert)	graphisch	graphisch	Textform	graph. (simpel)	graph.

Anmerkungen:

¹ Nur das kostenlose VE-Ware wurde betrachtet

² Mit Autodesk-Subscription

³ OpenStudio und DesignBuilder simulieren mithilfe der EnergyPlus-Simulationsengine

⁴ Der DPV für Revit 2014 lieferte keine zusammenfassenden Ergebnisse. Sie waren schwierig zu lesen, einzuordnen und somit zu vergleichen. Der Versuch die Einzelergebnisse zusammenzurechnen ergab eine große Abweichung von anderen Simulationen.

⁵ Die Genauigkeit von GBS wird unter 3.1.4.2 noch genauer betrachtet.

In der zweiten Tabelle ist zu sehen, welche, für die Energieanalyse relevanten, Informationen aus der Revit-Umgebung (vgl. Abschnitt 3.1.2) mithilfe des gbXML-Formats in die getesteten Simulationsprogramme transferiert bzw. verarbeitet werden können.

Information	Energy Plus ¹	Open Studio	Design Builder	IES-VE ²	DPV	GBS ³
A1 Raumgeometrie	✓	✓	✓		✓	✓
A2 Fensterflächen	✓	✓	✓		✓	✓
A3 Beschattungselemente	✓	✓	✓		✓	✓
B1 Klimadaten	✗	✗	✗		✓	✓
B2 Orientierung	✓	✓	✓		✓	✓
C1 Thermische Eigenschaften	✓	(✓) ⁴	(✓) ⁴		(✓) ⁵	✓
C2 Bauelemente und Konstruktionen	✓	(✓) ⁴	(✓) ⁴		(✓) ⁵	✓
D1 Fläche pro Person	✗	✗	✗		✓	✗
D2 Wahrnehmbarer Wärmegewinn	✓	✗	✗	?	✓	?
D3 Latenter Wärmegewinn	✓	✗	✗		✗	
D4 Beleuchtungslast	✓	✗	✗		✓	✗
D5 Versorgungsleistung	✓	✗	✗		✓	✗
D6 Belichtung durch Luftraum	✗	✗	✗		✗	
D7 Belegungsplan	✓	✗	✗		✓	
D8 Beleuchtungsplan	✓	✗	✗		✓	
D9 Stromversorgungsplan	✓	✗	✗		✓	?
D10 Öffnungszeiten	✓	✗	✗		✓	
D11 Sollwert Kühlung	✓	✓	✗		✗	
E1 Gebäudebetrieb	✓	✗	✗	✓	✓	✓
E2 Lüftungssystem	✗	✗	✗		✗	✓
E3 Außenluftmenge	✓	✓	✗	?	✓	✓

Anmerkungen:

¹ Anhand einer, von GBS generierten, IDF-Datei

² Nur das kostenlose VE-Ware wurde betrachtet

³ Laut Autodesk Inc. (o.J. b)^[62]

⁴ Unvollständig (z.B. keine Fensterkonstruktionen und deren Materialien)

⁵ Materialien und Konstruktionen müssen parallel in der Bibliothek von Revit und einer eigenen Bibliothek des DPV erstellt/geändert werden

? Da die Verarbeitung Revit-intern stattfindet und keine Exportdatei generiert wird, sind manche Vorgänge nicht nachzuprüfen.

3.1.4 Genauere Betrachtung von Green Building Studio

3.1.4.1 Zur Wahl von Green Building Studio

Für die im weiteren Verlauf ausgearbeitete Evaluierungsmethodik für Gebäudeentwürfe fiel die Wahl schließlich auf Autodesk's Green Building Studio als verwendetes BPS-Werkzeug.

Im Vergleich zu fortgeschrittenen Programmen wie EnergyPlus bietet GBS um einiges weniger Einstellmöglichkeiten und macht mehr Annahmen, die sich nicht anpassen lassen. Das ist zum Großteil jedoch eher von Vorteil für entwerfende Architekten, da sie sich nicht mit Details der Technik beschäftigen müssen, die im aktuellen Entwurfsstadium noch längst nicht zur Überlegung stehen.

Dadurch dass GBS einfach zu bedienen ist, keine detaillierten gebäudetechnischen Eingaben benötigt und alle benötigten Informationen aus Revit entnimmt, ist es ideal für das Entwurfsstadium. Falls bestimmte Annahmen, die GBS für die Simulation macht, geändert werden wollen, stehen über das Internetportal zu jeder Eigenschaft eine Reihe von Alternativeingaben zur Verfügung. Mit seiner engen Verknüpfung mit Revit, kommt es zu weniger Fehlern bei der Datenübertragung von BIM- zu BPS-Anwendung. Die Ergebnisse der Energieanalyse sind ansprechend, leserlich und detailliert aufbereitet und zudem in ihrer Zuverlässigkeit anderen Simulationsprogrammen gleichwertig. Die Ergebnisse verschiedener Entwurfsalternativen können zudem vergleichend gegenübergestellt werden. (Salmon 2013: 30 f.)^[63]

Vielversprechende Alternative scheint – bei ausreichendem Budget – Sefaira zu sein, welches als Revit-Plugin eine ähnlich stabile Datenübertragung hat und intuitiv bedienbar ist und vor allem Ergebnisse in quasi Echtzeit liefert. Auch DesignBuilder, wenn auch komplexer, ist dank seiner großen Auswahl an Einstellungsvorlagen auch dann gut geeignet, wenn nicht jedes Detail selbst eingestellt werden will.

Die aktuell verwendete Simulationsengine (DOE-2.2 48r 64-bit) von GBS besitzt folgende Beschränkungen bezüglich der Komplexität der zu analysierenden Modelle:

■ Max. Anzahl Räume:	9.999
■ Max. Anzahl Außenwände:	64.000
■ Max. Anzahl Fenster:	64.000
■ Max. Anzahl Innenwände:	64.000
■ Max. Anzahl unterirdische Wände:	10.000
■ Max. Anzahl Türen:	4.096
■ Max. Anzahl Gebäudeschatten:	10.000
■ Max. Anzahl Polygone:	120.000

(Autodesk Inc. 2014a)^[64]

3.1.4.2 Zuverlässigkeit von Green Building Studio

Die Validität von GBS wurde Anfang 2014 nach der Aktualisierung seiner DOE-Simulations-Engine auf die neueste Version DOE-2.2 48r 64-bit einem Vergleichstest gemäß des „*Standard 140 – Testmethode zur Evaluierung von Building-Energy-Analysis-Computerprogrammen*“ des ANSI (American National Standards Institute) und der ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) unterzogen. Die Ergebnisse erfüllten die vom *Standard 140* vorgegebenen Ziele und ergaben keine nennenswerten Unterschiede zu anderen Simulationsprogrammen. (Autodesk Inc. 2014a^[64]; Autodesk 2014b^[65])

Die Version 3.4 von GBS wurde 2008 vom U.S. Department of Energy als *Qualifiziertes Computerprogramm zum Nachweis der Voraussetzungen für bundesstaatliche Steuervergünstigungen* zertifiziert. Für die Validierungstests der nachfolgenden Versionen wurden die Ergebnisse von 3.4 als Benchmarks verwendet. Durch Regressionstests wird eine konsistente Verbesserung gewährleistet. (U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy 2008)^[66]

Die Berechnungsmethode für das Photovoltaik-Potential wurde anhand von Kalkulationsmethoden des NREL validiert. (Autodesk Inc., o.J. c)^[67]

3.1.4.3 In Revit und GBS einbeziehbare Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

Die folgende Tabelle listet die möglichen Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauches eines Gebäudes (siehe Abschnitt 2.2) und gibt an, ob sie in Revit oder in GBS für die Energieanalyse miteinbeziehbar sind.

Maßnahme	in Revit	in GBS
2.2.3 Fußboden- oder Deckenheizung		✗
Thermoaktive Bauteilsysteme		✗
HLVS-Ventilator		✗
2.2.4 Kontrollierte Wohnraumlüftung	✓	
Natürliche Lüftung	✓	
Hybride Lüftung		✗
2.2.5 Lichtdecke		✗
Lichtlenkkonzept		✗
Verglasung	✓	
2.2.1 Passive solare Erwärmung		✓
Zonierung	✓	
Energy Management		✓
2.2.2 ICF (Insulated Concrete Form)	✓	
Begrünte Dächer und Fassaden	✓	
Energieeffiziente Aufzugsanlagen		✗
2.2.6 Brennstoffzellen KWKK		✗
Erdwärme		✗
Photovoltaik Dach		✓
Photovoltaik Fassade		✗
----- Orientierung	✓	
Luftdichtigkeit		✓ (Project Solon)
Dämmung	✓	
Beschattungselemente	✓	

Anmerkungen

■ Lichtdecken:

Das Beleuchtungskonzept kann nicht festgelegt werden. Die Effizienz einer Lichtdecke kann aber indirekt berücksichtigt werden, indem die Leistungsdichte für Beleuchtung in GBS angepasst wird.

■ Energieeffiziente Aufzugsanlagen:

Technische Ausstattung aller Art kann nicht bestimmt werden. Die Effizienz der Ausstattung kann aber indirekt berücksichtigt werden, indem die Leistungsdichte für Equipment in GBS angepasst wird.

■ Photovoltaik Fassade:

Autodesk gibt zwar an, dass GBS für alle Flächen mit einer Neigung zwischen Innenfläche und Boden von weniger als 120° das Potential angebrachter Photovoltaikpaneele berechnen kann, in den Testprojekten bezog GBS allerdings nur die horizontalen Dachflächen mit ein.

3.1.5 Energieanalyse durch Green Building Studio

Im Folgenden wird der Arbeitsablauf vom Erstellen eines für Energiesimulation validen BIM-Modells in Revit bis zur erweiterten Analyse im GBS-Internetportal beschrieben.

Begriffe aus dem Vokabular der Programme sind *kursiv* dargestellt.

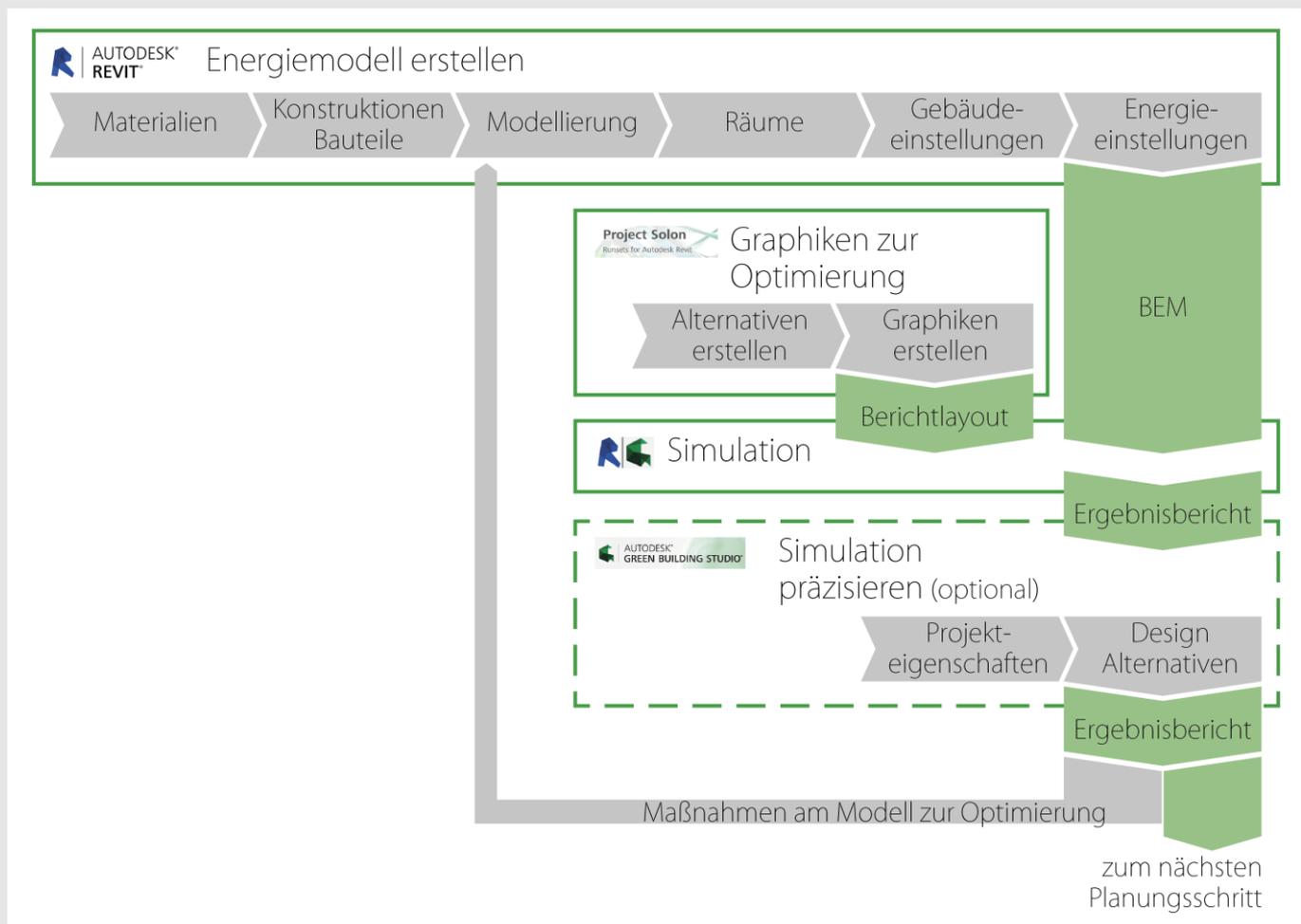


Abb.23 Arbeitsablauf einer Energiesimulation mit Revit und GBS

3.1.5.1 Erstellung des Energiediagramms in Revit

1) Standort

Geografische Position festlegen

- Variante *Internet-Kartendienst* ist laut Revit am besten für Energieanalyse geeignet.
- Wenn nötig können im Reiter *Wetter* die Informationen der nächstliegenden Wetterstation angepasst werden.

2) *Position* ► *Geografischer Norden drehen*

Geografische Orientierung festlegen

3) *Modellierung* von Gebäude und Grundstück

- Geometrie
- *Geschossdecken* dürfen keinen Versatz zu ihrer *Ebene* haben.
- Zwischendeckenräume:
Für abgehängte Decken und andere horizontale Hohlräume muss bei der *Decke* die Option *Raumbegrenzung* deaktiviert sein.
- Bauelemente (Wände, Dächer, Fenster, Türen etc. inklusive Schichtenaufbauten und *Funktion Innen* oder *Außen*)
- Beschattungselemente können nur in Form von *Wänden*, *Geschossdecken*, *Dächern* oder *Fassadenpfosten* erstellt werden. *Raumbegrenzung* muss aktiviert sein. Die *Materialien* der Konstruktionen dürfen dabei keine *thermischen Objekte* beinhalten. Sie werden immer in ihrer Originalform (also nicht in nachbearbeitete *Teilelemente* zerlegt) exportiert.
- Thermische Eigenschaften der *Materialien* (das sind Dicke, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme und Dichte) müssen für die U-Werte korrekt eingestellt sein.

4) *MEP-Einstellungen* ► *Gebäude-/Raumtypeinstellung*

Hier können die Eigenschaften des Gebäudetypus, insbesondere Belegungsplan und Öffnungszeiten eingestellt werden.

5) *Energieeinstellungen*

- *Gebäudetyp*
Der in (4) eingestellte Gebäudetypus wird hier zugewiesen.
- *Exportkategorie*
Sind *Räume* gewählt können die thermischen Eigenschaften der Bauelemente im Revit-Projekt verwendet werden. Sind *MEP-Räume* gewählt, werden die thermischen Eigenschaften der, unter *Gebäudekonstruktion* ausgewählten, Bauelementtypen verwendet. *Räume* sind hier also vorzuziehen, da die thermischen Eigenschaften der Bauelemente des Entwurfes mitexportiert werden können.
- *Export-Komplexität*

Enthält das Modell *Fassaden* sollte *Komplex* gewählt werden. Sind nur normale Fenster vorhanden, reicht die Option *Einfach* aus. Bei *mit Schattierungsfläche* werden auch Bauteile, die nur eine Funktion als Beschattungselemente aber nicht als Gebäudehülle haben, mitexportiert.

- *Thermische Eigenschaften einbeziehen*

Wenn aktiviert, bezieht es die thermischen Eigenschaften, der im Modell eingesetzten Bauelemente, mit in die Energieanalyse ein. Ansonsten werden die unter *Gebäudekonstruktion* festgelegten Standardwerte verwendet.

- *Projektphase*

Gibt die *Phase* des Revit-Projekts an, für welche eine Energieanalyse durchgeführt werden soll.

- *Polygonnetztoleranz*

Räume zwischen Bauteilen mit Abständen unterhalb der Toleranz (in Meter) werden automatisch von der Energieanalyse ignoriert. Dadurch müssen kleine Restvolumen wie z.B. in kleinen Schächten nicht explizit als *Räume* definiert werden.

- *Gebäudehülle*

Bei *Funktionsparameter verwenden* werden *Wände* und *Decken* nach ihrer, in den Eigenschaften festgelegten, *Funktion* als innenliegend oder als außenliegend identifiziert.

Bei *Äußere Elemente identifizieren* werden sie automatisch identifiziert. Dabei kann dann unter Zellengröße für analytisches Raster die Toleranz für anliegende Außenräume eingestellt werden, ab welcher das Bauteil als außenliegend identifiziert wird.

Ersteres ist wegen der Kontrolle durch den Nutzer zuverlässiger.

- *Analysemodus*

Legt fest, ob *Gebäudeelemente*, *Entwurfkörper* oder beide verwendet werden sollen. Ersteres wird bei einem bereits vollständig zugrundeliegenden BIM-Modell verwendet, wogegen Zweites für eine anfängliche Konzeptstudie in Form von *Körpermodellen* verwendet

werden kann. Hier wird Letzteres verwendet, da es die größte Flexibilität bietet.

- *Entwurfskonstruktionen*

Die Eigenschaften der hier festgelegten Bauelemente werden verwendet, wenn thermische Eigenschaften in den Bauelementen des Modells fehlen sollten oder *Thermische Eigenschaften einbeziehen* in den *Energieeinstellungen* deaktiviert ist.

- *Gebäudebetrieb*

Legt die Nutzungsdauer pro Woche in Stunden pro Tag und Tage pro Woche fest.

- *Lüftungssystem*

Legt ein vorläufiges Lüftungskonzept fest.

- *Außenluftdaten*

Legt die Luftwechselrate fest.

6) *Raum & Fläche* ➤ *Flächen- und Volumenberechnung*

Flächen und Volumina muss ausgewählt sein, damit die berechneten Raumvolumina an Bauteilen, statt an den Ebenen-Markierungen, abschließen.

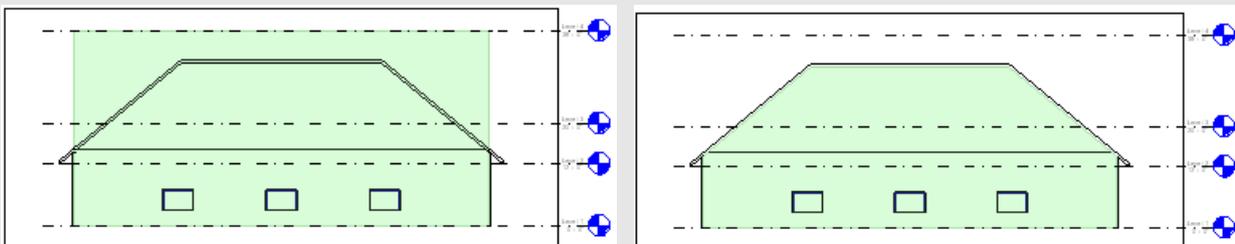


Abb.24 Volumenberechnung: Links aus, rechts aktiviert.

7) *Räume* erstellen

- Jedem tektonisch, gebäudetechnisch oder nutzungstechnisch abgetrennten Volumen soll ein eigener *Raum* zugeordnet werden. Ein Volumen kann auch mehrfach unterteilt werden, um die Genauigkeit der Energieanalyse zu erhöhen. Es dürfen keine Volumina im Gebäude vorhanden sein, denen keine *Räume* zugewiesen sind.
- Ein *Raum* muss immer über mehr als 72,5cm *Raumhöhe* besitzen, da er sonst nicht ignoriert wird und eine Öffnung verursacht.

- Ein tektonischer Raum kann durch *Raumtrennungslinien* in mehrere Bereiche geteilt werden. Dies macht insbesondere bei Räumen Sinn, in denen Bereiche unterschiedlicher klimatischer Bedingungen vorhanden sind (z.B. damit bei der Energieanalyse von großen Räumen Bereiche nahe den Außenwänden und Bereiche im Rauminnen separat berechnet werden).
- Ein *Raum* darf einen anderen *Raum* nicht vollständig einschließen. Der umschließende *Raum* sollte daher in mindestens zwei Teilräume getrennt werden.
- Ein *Raum* sollte nicht in zu kleine Bereiche unterteilt werden, da diese im Energiemodell dann eventuell wieder zusammengelegt werden und Ungenauigkeiten verursachen können.
- *Räume* können über *Eigenschaften* ➤ *Abhängigkeiten* ➤ *Obergrenze* auch über mehrere Geschosse reichen. Für die Energieanalyse ist dies jedoch nicht zu empfehlen, da hohe Räume, aufgrund stark variierender klimatischer Eigenschaften im oberen und unteren Bereich (z.B. Stack-Effect), besser vertikal unterteilt werden sollten.

8) Alternativ zu *Räumen*: Thermische Zonierung mittels *Körperformen*
Sollten im Energiemodell in einem Bereich des Gebäudes die *berechneten Räume* nicht wie beabsichtigt erzeugt werden können, kann ein tektonischer Raum statt durch *Raumtrennungslinien* und *Räume* auch durch mehrere *Projektkörper* unterteilt werden.

Körper eliminieren Ungenauigkeiten bezüglich Zonierung im Energiemodell, bringen aber auch einen höheren Modellieraufwand mit sich.

Die *Körper* sollten dabei immer exakt von einer *Ebene* bis zur Nächsthöheren extrudiert sein. Ein, an einer Außenwand liegender, *Körper* sollte zudem stets bis zur Außenkante einer *Wand* reichen. Innerhalb des Gebäudes sollten die *Körper* immer ohne Lücke aneinander liegen.

(Autodesk Inc., o.J. d)^[68]

3.1.5.2 Auswertungsgraphiken der Project Solon Internetplattform

Project Solon ist ein, derzeit in der Entwicklung befindliches, internetbasiertes, graphisches Evaluierungswerkzeug für die Energieeffizienz eines Revit-Entwurfes innerhalb des Green-Building-Studio-Dienstes.

Es können *Dashboards* erstellt werden, auf denen Graphiken, *Widgets* genannt, platziert werden können. Die *Widgets* können selbst erstellt werden, wobei bislang nur der Energiekosten-Graphik alternative *Runsets* zugeordnet werden können. *Runsets* sind, ähnlich wie *Design Alternatives*, veränderte Parameter eines Projektes um schnell die Auswirkung bestimmter Änderungen am Entwurf feststellen und vergleichen zu können. Ein fertig erstelltes Dashboard lässt sich in Revit über das Fenster *Ergebnisse & Vergleiche* einer Energiesimulation zuordnen.

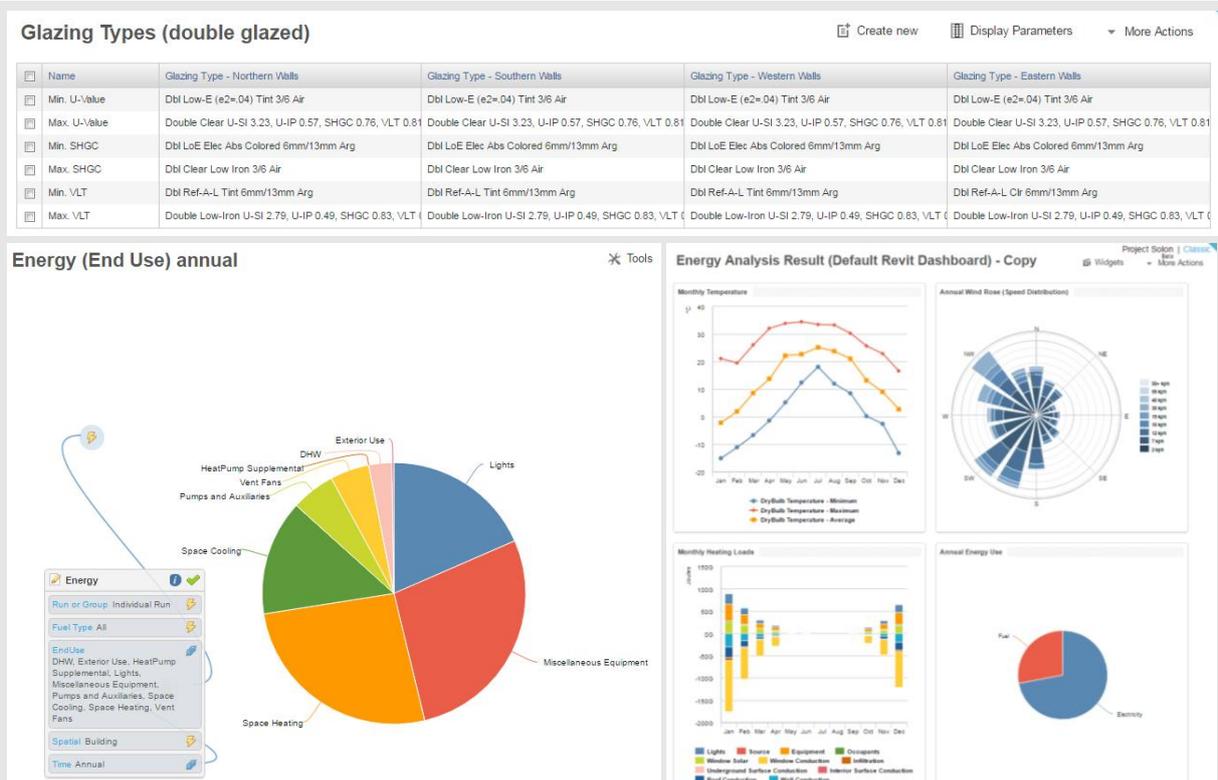


Abb.25 Runset (oben), Widget (links) und Dashboard (rechts) in Project Solon

Als nächster Schritt für die frühe Entwurfsoptimierung sollte direkt mit *Project Solon* weitergearbeitet werden. Es stellt die einfachste Möglichkeit zur Verfügung, jene Parameter des Entwurfes zu finden, welche die Energieeffizienz am stärksten beeinflussen. Der Arbeitsablauf dazu wird im Folgenden beschrieben:

- 1) Zuerst sollen die *Runsets* genannt werden, welche Parameter beinhalten, über die der Architekt in der Entwurfsphase zu entscheiden hat. Das heißt, dass zum Beispiel Parameter zur TGA für das aktuelle Entwurfsstadium nicht von Interesse sind.

Parameter	Zuständigkeit	Anmerkung
Rotation	Architekt	
Glazing Type Roof		
Glazing Type North		
Glazing Type South		
Glazing Type West		
Glazing Type East		
Infiltration Value		
Daylighting Control		
Occupancy Sensor		
WWR ¹ North		
WWR ¹ South		
WWR ¹ West		
WWR ¹ East		
LPD ²		
Construction Roof		
Wallconstruction North		
Wallconstruction South		am einfachsten anfangs anhand der U-Werte zu entscheiden
Wallconstruction West		
Wallconstruction East		
HVAC-Type	Gebäudetechniker	
Operating Schedule	Bauherr	sollte von Beginn an geklärt sein
EPD ³		abhängig von Nutzung und Nutzerzahl

¹ WWR = Window-to-Wall Ratio

² LPD = Lighting Power Density

³ EPD = Equipment Power Density

- 2) Benötigt werden *Runsets* zu den, in der vorherigen Tabelle dunkelgrün markierten, Parametern. Diese sind bereits automatisch angelegt. Um diese jedoch für die eigenen Zwecke benutzen zu können, muss eine Kopie erstellt und veröffentlicht werden. Dazu muss ein Wert verändert werden (z.B. auch der Name), wodurch automatisch eine Kopie erstellt wird. Dann muss über *More Actions* ► *Publish* der *Runset* veröffentlicht werden.
- 3) Unter *Widgets* kann jetzt über *Create new* für jeden *Runset* ein *Widget* erstellt werden, welches die resultierenden Energiekosten aus den unterschiedlichen Werten in einem *Runset* miteinander vergleicht:
 - Unter *Tools* ► *Result Types* das Modul für *Energiekosten* auswählen
 - Unter *Run or Group* einen in (2) erstellten *Runset* auswählen
 - Die restlichen Einstellungen nach Bedarf festlegen
 - Zu jeder Koordinatenachse jeweils ein Einstellungsfeld ziehen
 - Unter *More Actions* ► *Publish* das *Widget* veröffentlichen
 - Unter *Tools* ► *Chart Types* ist außerdem die Art des Diagrammes anpassbar.
- 4) Schließlich kann über *Create new* ein neues *Dashboard* erstellt werden, zu welchem über *Widgets* die in Schritt 3 erstellten *Widgets* hinzugefügt werden können. Über *More Actions* ► *Assign to Application* muss es dann der Revit-Anwendung zugeordnet werden.
Das *Dashboard* muss ebenfalls veröffentlicht werden.
- 5) Nun kann in Revit mit Energiesimulation durchführen das Energiemodell erstellt und für die Energiesimulation an GBS gesendet werden. Dazu muss ein Name für die *Ausführung* gewählt werden und einem bestehenden oder neuen *Green Building Studio-Projekt* zugewiesen werden.
- 6) In einem *GBS-Projekt* bleibt für jede *Ausführung Gebäudetyp, Standort* und *Gebäudebetrieb* (aus den *Energieeinstellungen*) gleich. Generell sollte für jedes Revit-Projekt ein *GBS-Projekt* erstellt werden. Jeder Simulationsdurchgang, nach Änderungen im Projekt, kann dann

demselben *GBS-Projekt* zugewiesen werden (solange sich die grundlegenden, oben genannten Einstellungen nicht ändern).

7) Für eine spätere Präsentation stellen folgende Konfigurationen von *Widgets* alle Informationen optimal dar:

- Cooling Load (stacked bar/column), monatliche Einzelwerte
Zeigt positive und negative Komponenten bezüglich Kühlbedarf pro Monat an.
- Heating Load (stacked bar/column), monatliche Einzelwerte
Zeigt positive und negative Komponenten bezüglich Heizbedarf pro Monat an.
- Cooling Load (pie chart), jährliche Einzelwerte
Zeigt die Anteile verschiedener Komponenten am Gesamtkühlbedarf an.
- Heating Load (pie chart), jährliche Einzelwerte
Zeigt die Anteile verschiedener Komponenten am Gesamtheizbedarf an.
- Cooling Load und Heating Load (bar/column), jährliche Gesamtwerte
Zeigt den jährlichen Kühl- und Heizaufwand im Vergleich an.
- Cooling Load und Heating Load (bar/column), monatliche Gesamtwerte
Zeigt den monatlichen Kühl- und Heizaufwand im Vergleich an.
- Energy (pie chart), jährliche Einzelwerte Fuel Type
Zeigt den Anteil fossiler Brennstoffe am Gesamtenergieverbrauch an – nützlich für CO₂-neutrales Bauen.
- Energy (pie chart), jährliche Einzelwerte End Use
Zeigt die größten Energieverbraucher im Gebäude an.
- Energy (stacked bar/column), monatliche Einzelwerte nach Fuel Type
Zeigt den Energieverbrauch pro Monat und den Anteil fossiler Brennstoffe an.
- Energy (stacked bar/column), monatliche Einzelwerte nach End Use
Zeigt den Energieverbrauch pro Monat und den Anteil der Verbraucher an.

- Energy Cost (bar/column), monatliche Einzelwerte nach Fuel Type
 Zeigt die monatlichen Kosten für jeden Energieträger an.
- Energy Cost (bar/column), monatliche Einzelwerte nach End Use
 Zeigt die monatlich verursachten Kosten von jeden Energieverbraucher an.
- Energy Cost (pie chart), jährliche Einzelwerte End Use
 Zeigt die teuersten Energieverbraucher im Gebäude an.
- Dry Bulb Temperature (line), monatliche Maximal-, Minimal- und Durchschnittstemperaturen
 Zeigt die Temperaturdaten zum Standort an.

3.1.5.3 Auswertung durch Green Building Studio in Revit

Über *Ergebnisse & Vergleiche* können die Analyseergebnisse, nach GBS-Projekt gruppiert, aufgerufen werden.

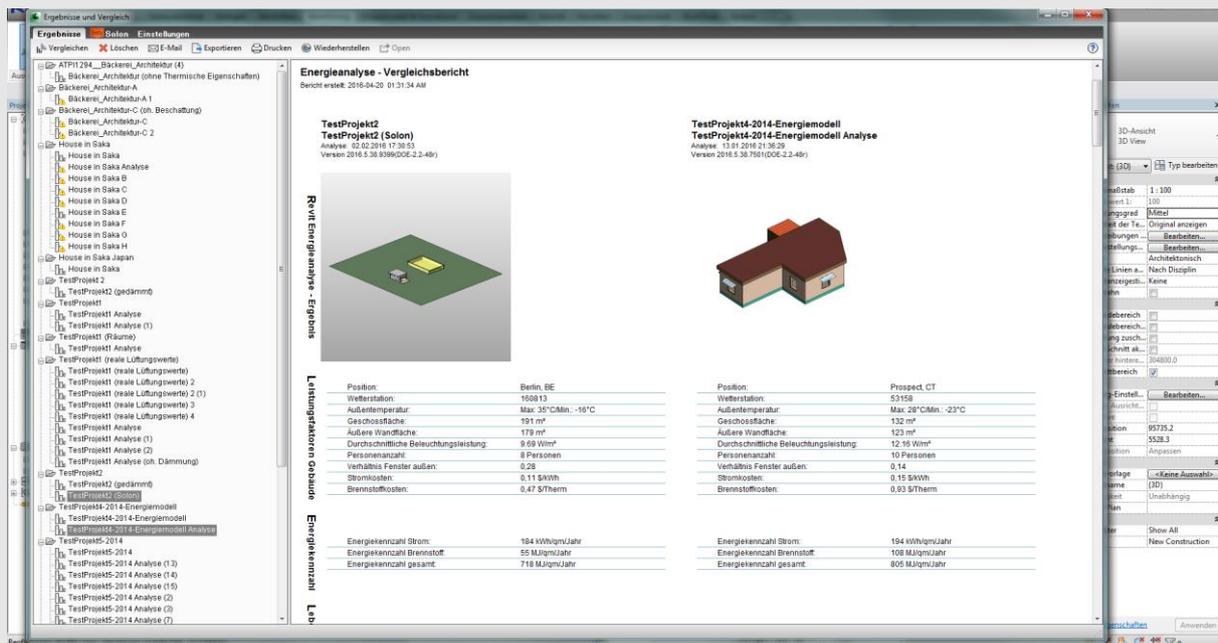


Abb.26 Fenster *Ergebnisse & Vergleiche* in Revit

Über *Exportieren* können die Graphiken als PDF exportiert werden. Das Building Energy Model kann als gbXML, IDF oder INP exportiert werden. Die Geometrie des BEM kann als DWFX in CAD-Programme exportiert werden.

Durch *Vergleichen* können die Ergebnisse mehrerer Simulationen ausgewählt und nebeneinander oder untereinander angeordnet gegenübergestellt werden.

Durch *Open* kann das Projekt auf der GBS-Internetseite angezeigt oder das BEM in Autodesk DesignReview geöffnet werden.

In der Registerkarte *Project Solon* ist das selbst erstellte *Dashboard* einsehbar. Die Graphiken zeigen nun die Ergebnisse der Energiesimulation an. Aus den Graphiken kann schnell zu jedem Entwurfsparameter der Wert herausgelesen werden, welcher die geringsten Energiekosten verursacht. Die Architektur des Gebäudeentwurfes kann dann so angepasst werden, dass er die optimalen Werte erfüllt. Durch eine erneute Simulationsdurchführung können die Ergebnisse der Entwurfsanpassung dann kontrolliert und weiterverwendet werden.

3.1.5.4 Auswertung durch das Green Building Studio Internetportal

Im GBS-Internetportal² stehen weitere Analyseergebnisse zur Verfügung. Zudem können über *Design Alternatives* bei Bedarf *Daylighting Controls* und *Occupancy Sensors* aktiviert werden um die Analyseergebnisse zu präzisieren. Der *Infiltration Value* kann für die Energiesimulation nicht direkt in GBS verändert werden; er kann lediglich in der gbXML-Datei händisch verändert werden (Stein 2013)^[69].

GBS-Projekt – Ausführung/Base Run – Alternate Runs

Unter *My Projects* werden die GBS-Projekte aufgelistet. Jedes GBS-Projekt enthält die verschiedenen *Ausführungen* von Simulationen in Revit, *Base Runs* genannt. Zu jedem *Base Run* werden zudem bis zu 110 *Alternate Runs* berechnet. Diese sind automatisierte Simulationen, bei denen bestimmte Parameter verändert sind.

² <https://gbs.autodesk.com>

Run List														Run Charts	Project Defaults	Project Details	Project Members	Utility Information	Weather Station						
Actions														Display Options											
Name	Date	User Name	Floor Area (m ²)	Energy Use Intensity (MJ/m ² /year)	Electric Cost (kWh)	Fuel Cost (MJ)	Total Annual Cost ¹			Total Annual Energy ¹			Carbon Emissions (Mg)	Potential Energy Savings											
Project Default Utility Rates														Weather Data: GBS_06M12_11_080060											
Project Default Utility Rates														--	--	--	--	\$0.23	\$0.002	--	--	--	--	--	--
Base Run																									
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan	4/16/2016 2:35 PM	tandimonium	155	564.7	\$0.23	\$0.002	\$4,319	\$38	\$4,357	18,976	19,208	4.5												
Alternate Run(s) of House in Saka Japan																									
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_ASHRAE 90.1-2010	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	533.0	\$0.23	\$0.002	\$2,361	\$89	\$2,450	10,372	45,265	3.3												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_0%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	563.4	\$0.23	\$0.002	\$4,306	\$38	\$4,344	18,919	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_15%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	564.8	\$0.23	\$0.002	\$4,320	\$38	\$4,358	18,981	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_30%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	566.7	\$0.23	\$0.002	\$4,338	\$38	\$4,376	19,060	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_40%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	568.7	\$0.23	\$0.002	\$4,358	\$38	\$4,396	19,149	19,208	4.6												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_50%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	570.3	\$0.23	\$0.002	\$4,373	\$38	\$4,411	19,215	19,208	4.6												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_65%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	572.2	\$0.23	\$0.002	\$4,393	\$38	\$4,431	19,300	19,208	4.6												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_80%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	574.5	\$0.23	\$0.002	\$4,415	\$38	\$4,453	19,398	19,208	4.6												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_95%	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	576.8	\$0.23	\$0.002	\$4,438	\$38	\$4,476	19,498	19,208	4.7												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_Uninsulated	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	565.7	\$0.23	\$0.002	\$4,329	\$38	\$4,367	19,019	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_R10	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	565.7	\$0.23	\$0.002	\$4,329	\$38	\$4,367	19,019	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_R19	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	565.7	\$0.23	\$0.002	\$4,329	\$38	\$4,367	19,019	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_R38	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	565.7	\$0.23	\$0.002	\$4,329	\$38	\$4,367	19,019	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_R60	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	565.7	\$0.23	\$0.002	\$4,329	\$38	\$4,367	19,019	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_10.25-Inch SIP	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	565.7	\$0.23	\$0.002	\$4,329	\$38	\$4,367	19,019	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_R15	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	565.7	\$0.23	\$0.002	\$4,329	\$38	\$4,367	19,019	19,208	4.5												
<input type="checkbox"/>	House in Saka Japan_247	4/16/2016 2:36 PM	tandimonium	155	566.7	\$0.23	\$0.002	\$4,339	\$38	\$4,377	19,063	19,208	4.5												

Abb.27 Base Run mit Alternate Runs

Design Alternatives

Über *Design Alternatives* können eine Vielzahl von Parametern der Simulation verändert werden. Hier können unter *Lighting* ➤ *Lighting Control* auch *Daylighting Controls* und *Occupancy Sensors* eingestellt werden. Der neue Simulationsdurchlauf für die *Design Alternative* findet sich dann unter den *Alternate Runs*.

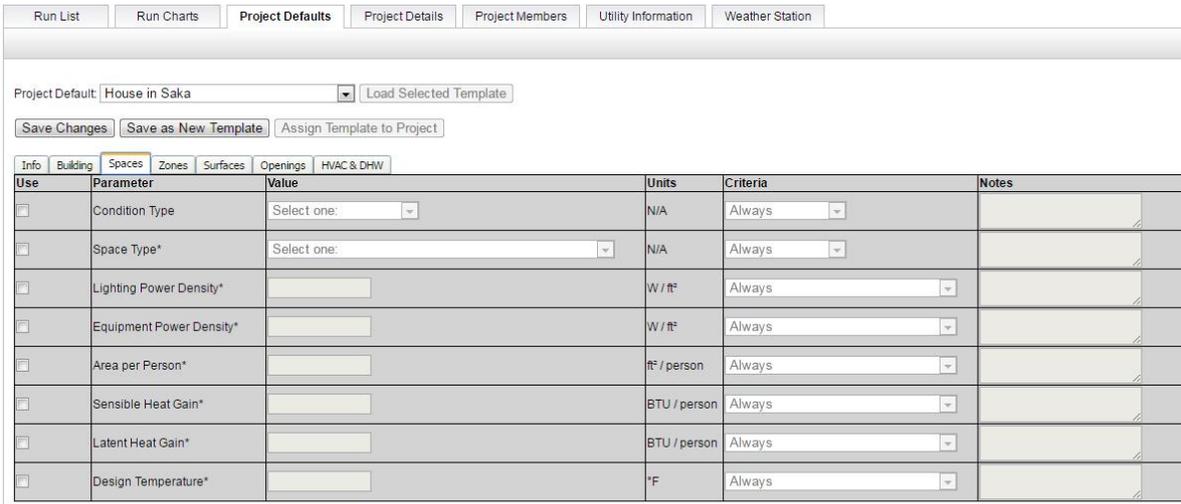
Energy and Carbon Results														US EPA Energy Star	Water Usage	Photovoltaic Analysis	LEED Daylight	3D VRML View	Export and Download Data Files	Design Alternatives		
Design Alternatives														Demo: Design Alternatives				<input type="button" value="Play (sim file)"/>				
Adjust parameters from the table below, enter the alternative name, then select the "Add Alternative" button. After all alternatives are added to the list below, select the "Run Added Alternatives" button.																						
Project: House in Saka Japan														Run List	Base Run: House in Saka Japan, Energy Cost: \$4,357	Project settings						
General		Lighting			Roof		Northern Walls		Southern Walls		Western Walls		Eastern Walls									
Rotation	Lighting Efficiency	Construction																				
0	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change								
HVAC	Lighting Control	Glazing Type																				
No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change	No change								
Outside Air Flow Per Person Value	Equipment Power Density Value	Window to Wall Ratio																				
Default	Default	No change																				
Infiltration	Light Power Density Value	Daylighting Control																				
No Reduction	Default	Off																				
Infiltration/Value	Equipment Efficiency	Occupancy Sensor																				
Default	No change	Off																				
Outside Air Flow Per Floor Area Value	Number of People	Daylighting Control																				
0 CFM/sqft	Default	Off																				
Outside Air Change Per Hour Value	Occupancy	Occupancy Sensor																				
0 ACH	No change	Off																				
Outside Air Flow Per Person	Daylighting Control	Occupancy Sensor																				
No change	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off								
Outside Air Flow Per Floor Area	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor								
No change	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off								
Occupancy Schedule	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor	Occupancy Sensor								
Default	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off								
1. Select Changes Below. 2. Enter Alternative Name: <input type="text"/> 3. Add Alternative 4. Run Added Alternatives																						
Reset Dropdown Selections Below. Save Added & Unrun Alternatives. Cancel & Don't Save Added Alternatives																						
General		Lighting			Roof		Northern Walls		Southern Walls		Western Walls		Eastern Walls									
Alternative	Energy Cost	Lighting	Roof	Northern Walls	Southern Walls	Western Walls	Eastern Walls	Lighting	Roof	Northern Walls	Southern Walls	Western Walls	Eastern Walls	Lighting								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off	No Reduction	Default	Default	Default	Default	Off								
House in Saka Japan_247	4,377	Off	No Reduction																			

3.1.5.5 Präzisierung der Analyseergebnisse in Green Building Studio

Wenn noch weitere zukünftige Parameter des Entwurfes bekannt sind (z.B. die Beleuchtungs- und Gerätelast als zwei wichtige Komponenten), können die Simulationseigenschaften noch weiter präzisiert werden um wahrheitsgetreue Ergebnisse zu erhalten. Dies ist zum einen über *Design Alternatives* möglich, zum anderen müssen die *Project Defaults* geändert werden.

Project Defaults

Unter *Project Defaults* lassen sich *Project Templates* erstellen oder verändern. Ein *Project Template* kann für ein GBS-Projekt bestimmte Parameter aus dem entsprechenden Revit-Projekt überschreiben. Um ein Template anzuwenden oder wird das Template nachträglich verändert, muss erneut eine Simulation durchgeführt werden. Dazu muss das zu ändernde Projekt über GBS im gbXML-Format exportiert werden. Die gbXML-Datei kann dann als neues GBS-Projekt hochgeladen oder einem bestehenden Projekt als *Base Run* hinzugefügt werden. Bevor die gbXML-Datei aber hochgeladen wird, also bevor die Simulation beginnt, muss dem GBS-Projekt das vorher erstellte oder geänderte *Project Template* zugewiesen werden.



Use	Parameter	Value	Units	Criteria	Notes
<input type="checkbox"/>	Condition Type	Select one: ▾	N/A	Always ▾	
<input type="checkbox"/>	Space Type*	Select one: ▾	N/A	Always ▾	
<input type="checkbox"/>	Lighting Power Density*		W / ft ²	Always ▾	
<input type="checkbox"/>	Equipment Power Density*		W / ft ²	Always ▾	
<input type="checkbox"/>	Area per Person*		ft ² / person	Always ▾	
<input type="checkbox"/>	Sensible Heat Gain*		BTU / person	Always ▾	
<input type="checkbox"/>	Latent Heat Gain*		BTU / person	Always ▾	
<input type="checkbox"/>	Design Temperature*		*F	Always ▾	

* Applied only to spaces whose heights are over 2 meters or not unconditioned.

Abb.29 *Project Defaults* Einstellungen

3.1.5.6 Verwendung der Analyseergebnisse in Green Building Studio

Im GBS-Fenster in Revit werden die Eigenschaften und Analyseergebnisse der Projekte tabellarisch aufgeführt. Zudem sind eine Reihe nützliche Diagramme dargestellt. Diese Übersicht kann als PDF-Datei exportiert werden. Sie kann jedoch nur die Analyseergebnisse des Revit-Projektes anzeigen. Wurde über die GBS-Internetseite eine *Design Alternative* erstellt, kann diese nur über das Internetportal evaluiert werden. Diagramme können dabei dann über *Project Solon* erstellt werden.

Im GBS-Internetportal stehen weitreichende Analyseergebnisse zur Verfügung. Die detaillierten Graphiken und Tabellen der einzelnen *Runs* sind leider nicht exportierbar; es kann aber die Druckfunktion des Browsers verwendet werden. Lediglich die zusammenfassende, tabellarische Übersicht über alle *Runs* eines GBS-Projektes ist im CSV-Format exportierbar.

Folgende Analysefunktionen bietet das Internetportal:

Run Charts

Unter Run Charts werden alle *Alternate Runs* bezüglich Energieverbrauch, Energiekosten und EUI (Energy Use Intensity = Energieverbrauch pro Flächeneinheit und Jahr) vergleichend dargestellt. Zu jedem *Run* können auch die monatlichen Verbrauchswerte angezeigt werden. Die Gesamtwerte sind nach Verursacher aufgegliedert und können nach jedem Wert sortiert werden. Die Diagramme können einzeln ausgedruckt oder als Vektor- oder Rastergraphiken exportiert werden.

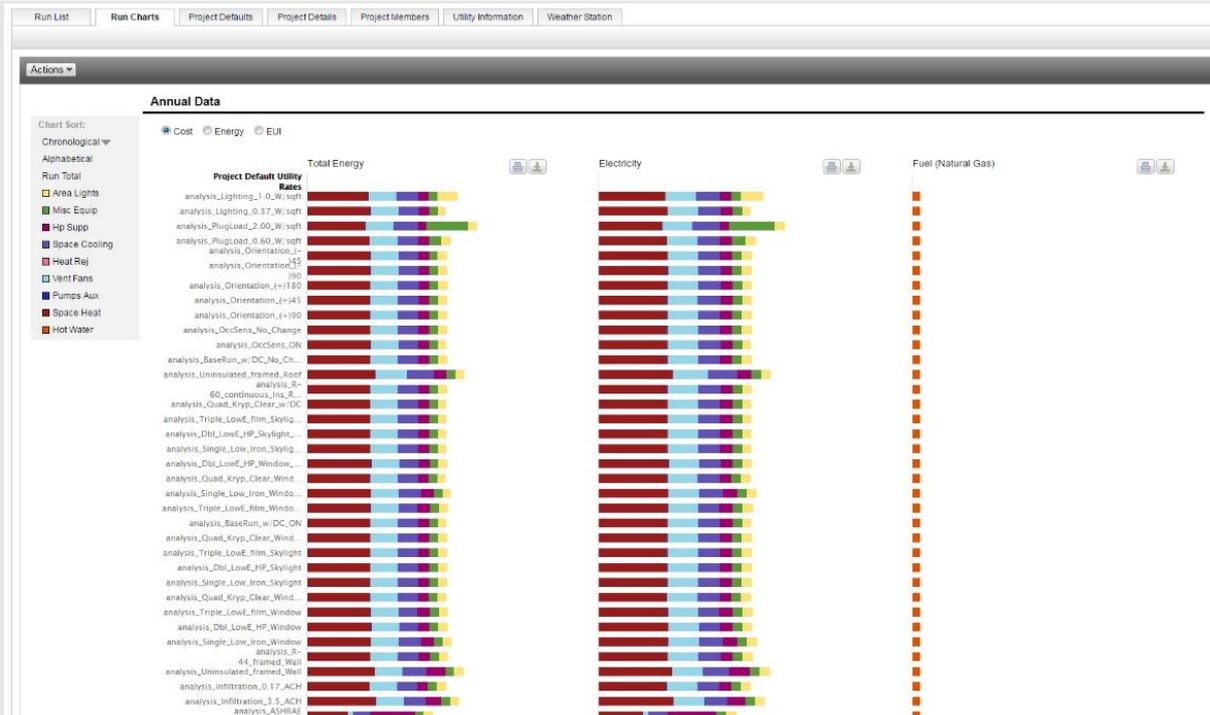


Abb.30 Run Charts

Energy and Carbon Results

Hier werden sämtliche Ergebnisse als tabellarische Übersicht dargestellt. Bei Bedarf sollten vor einer Verwendung die Reiter *Water Usage*, *Photovoltaic Analysis* und *LEED Daylight* kontrolliert werden. Die Übersicht eignet sich gut als Datenblatt für den abgeschlossenen Entwurf. Leider lässt sie sich nicht exportieren; die Druckfunktion des Browsers ist aber ausreichend.

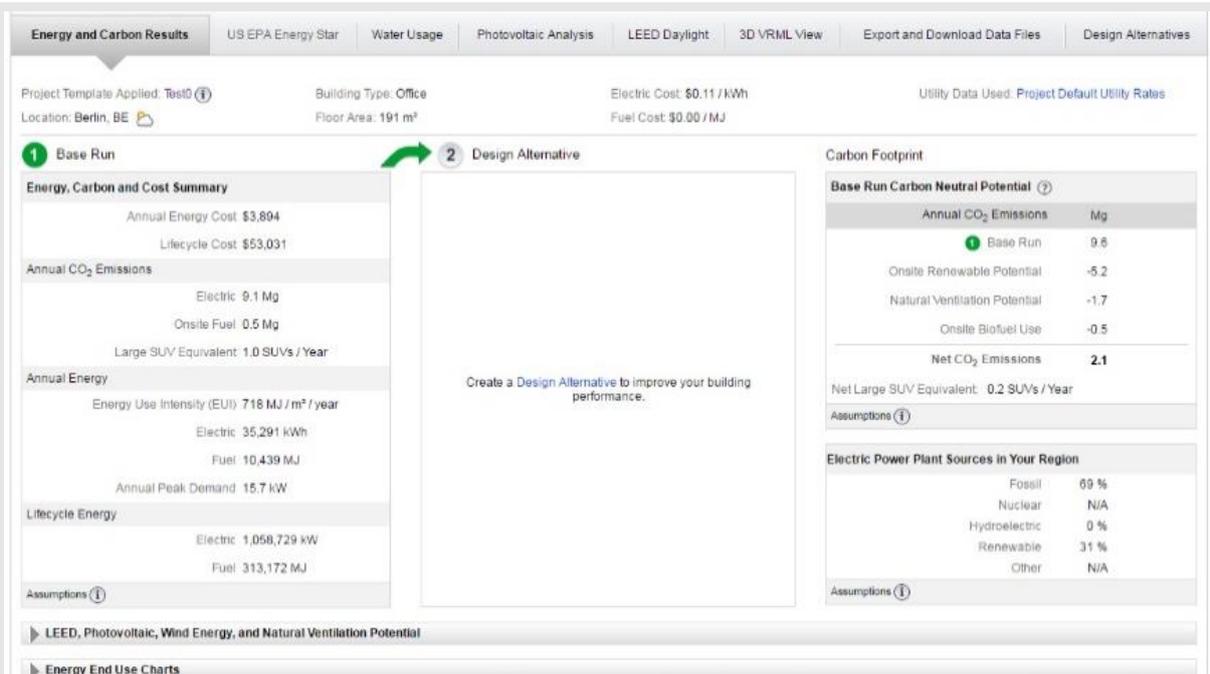


Abb.31 Energy and Carbon Results Bericht

Water Usage

Basierend auf Informationen zu Grundstück, Sanitäreanlagen und Rückgewinnungsmaßnahmen werden hier der Gesamtwasserverbrauch und die resultierenden Kosten und erreichbaren LEED-Punkte geschätzt.

Water Usage and Costs

Total:	733,511 L / yr	\$772 / yr
Indoor:	289,455 L / yr	\$466 / yr
Outdoor:	444,056 L / yr	\$306 / yr
Net Utility:	733,511 L / yr	\$772 / yr

General Information

Project Title: House in Saka Japan
 Run Title: House in Saka Japan
 Building Type: Single Family
 Floor Area: 155 m²

Water Usage Estimator

Number of People: 4
 Percent of Time Occupied (%): 49

Indoor Water Factors

Outdoor Water Factors

Irrigated Area* (m²): 1000
 Timed Sprinklers: Yes
 Pool: No
 Other Equipment/Fixtures: No
 Usage: 25 L / day

Building Summary

	Total	Male	Female	Employee Only	Efficiency	Percent of Indoor Usage (%)	Gallons per Year	Annual Cost Savings (\$)
Toilets:	2	1	1	0	Standard	0	0	0
Urinals:	0	0		0	Standard	0	0	0
Sinks:	2	1	1	0	Standard	0	0	0
Showers:	2	1	1		Standard	0	0	0
Clothes Washers:	1				Standard	0	0	0
Dishwashers:	1				Standard	0	0	0
Cooling Towers:	0				Standard	0	0	0
Total Efficiency Savings:					0%		0	\$0

Net-Zero Measures

	Annual Rainfall (mm)*	Catchment Area (m ²)	Surface Type	Liters per Year	Annual Cost Savings (\$)
Rainwater Harvesting:	1538	0	Gravel/Tar	0	0
Native Vegetation Landscaping:				0	0
Greywater Reclamation:				0	0
Site Potable Water Sources:		Yield: 50 L / day		0	0
Total Net-Zero Savings:				0	\$0

Abb.32 Water Usage Bericht

Photovoltaic Analysis

Anhand der Dachfläche wird das Potential zur Stromgewinnung durch Solarzellen und deren Amortisationszeit berechnet.

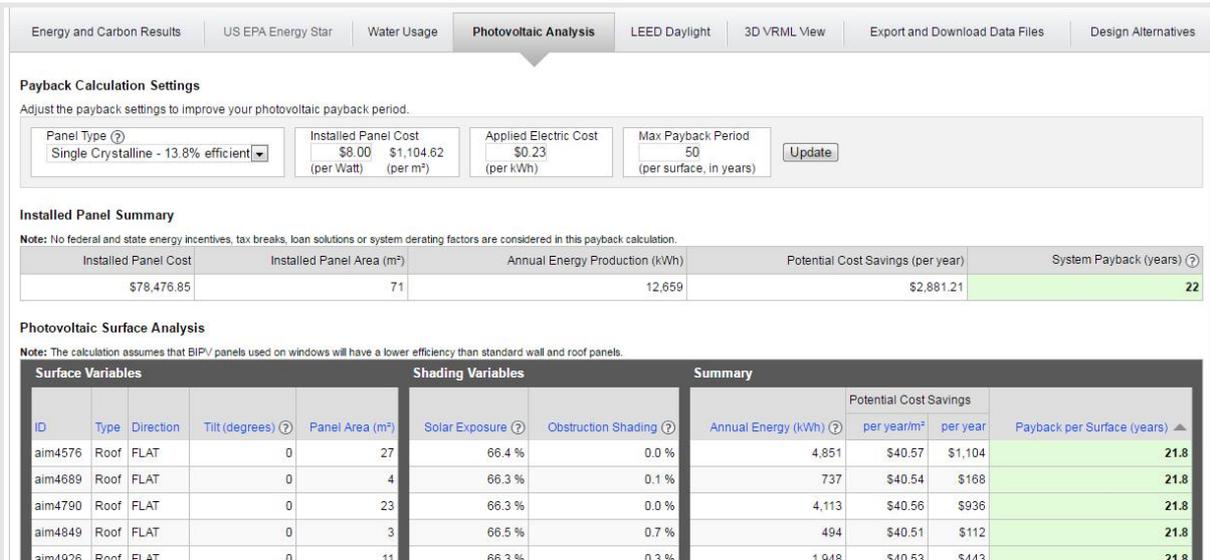


Abb.33 Photovoltaic Analysis Bericht

LEED Daylight

Bei der Tageslichtanalyse wird der Anteil der Verglasung an der Gesamtgebäudeoberfläche berechnet und die damit erzielten LEED-Punkte angegeben.

Diese Funktion dient jedoch nur zum Vergleich mit Entwurfsalternativen, da der tatsächliche Prozentteil höher ist, wie berechnet. Das liegt daran, dass GBS die Funktion der Räume nicht kennt und alle miteinkalkuliert, für die LEED-Credits aber Räume die meist unbelichtet sind, wie Flure, Lagerräume oder Pausenräume, nicht miteinbezogen werden. (Autodesk Inc., o.J. e)^[70]

Eine Möglichkeit ist, die tabellarische Auflistung manuell zu bearbeiten (z.B. alle unbelichteten Räume auszuschließen, wenn feststeht, dass alle diese Räume Nebenräume sind) und den Wert für die LEED-Credits neu zu berechnen.

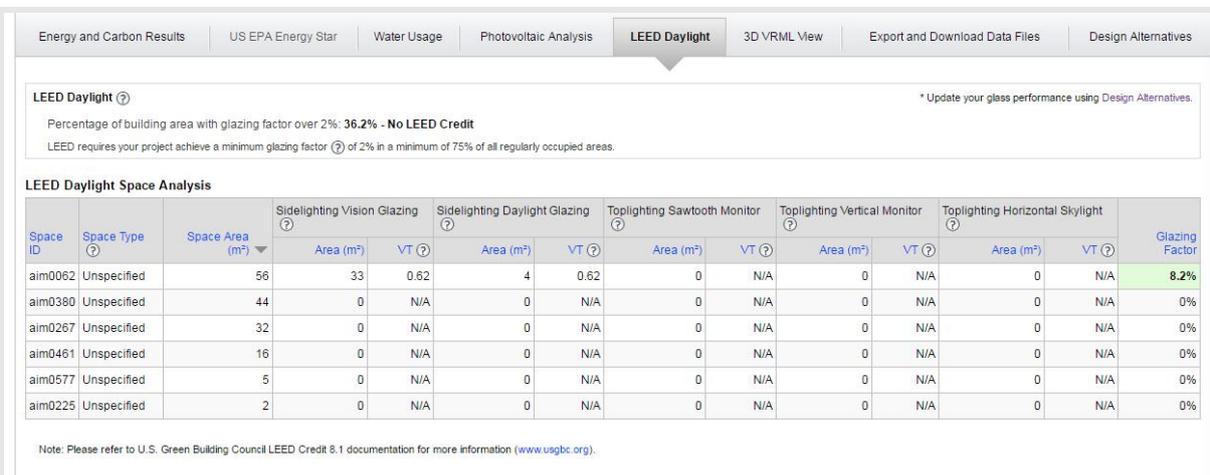


Abb.34 LEED Daylight Bericht

3.2 CO₂-BILANZIERUNG

Die Ökobilanz (auch Lebenszyklusanalyse) als Teilbereich des Umweltmanagements ist in der ISO 14044 als eine „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Output-Flüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ definiert. (DIN 2006: 8)^[71]

Eine vollständige Ökobilanz muss demnach folgende Bereiche enthalten: (DIN 2006: 7)^[71]

- Den Untersuchungsrahmen und das Ziel der Bilanzierung
- Die Sachbilanz
- Die Wirkungsabschätzung
- Die Auswertung

Die *Sachbilanz* muss sämtliche Prozesse der Produktherstellung beschreiben. Alle Energieflüsse, physikalische Inputs, Rohstoffinputs, Nebenprodukte, Abfallprodukte und Emissionen werden hier erfasst. (DIN 2006: 24)^[71]

Danach wird die Wirkung dessen auf die Umwelt festgestellt. Dies wird je nach Sachbilanzposten in einem entsprechenden Potential ausgedrückt, zum Beispiel Versauerungspotential oder Globales Erwärmungspotential. Die Klimawirkung eines auszuwertenden Stoffes wird hierbei mit einem festgelegten Stoff (zum Beispiel CO₂) verglichen. Die resultierenden Potentiale können dann einfach miteinander verglichen werden. (DIN 2006: 35 f.)^[71]

Eine CO₂-Bilanz ist somit der Teil einer Ökobilanz, der die *Sachbilanz* in Korrelation mit CO₂ setzt. Dies wird als *Globales Erwärmungspotential (GWP)* in Form einer sogenannten *CO₂-Äquivalenz* ausgedrückt.

Anhand der Feststellungen aus Kapitel 2.3 zur Minimierung der CO₂-Bilanz, ist im Weiteren ein Evaluationswerkzeug entwickelt worden, welches zum einen die CO₂-Bilanz eines Bauprojektes in Form des GWP, wie es aus den Faktoren aus Abschnitt 2.3.1 (Niedrige CO₂-Äquivalente der Baustoffe) und 2.3.4 (Reduzierung des Energieverbrauches während des Gebäudebetriebes) resultiert, und zum anderen die Ökobilanz der benötigten Materialien errechnet.

Das Evaluationswerkzeug wurde in Form einer Kalkulationstabelle (in Excel) realisiert, welche im späteren Verlauf des Projektes problemlos erweitert werden kann, sobald neue Entscheidungen anstehen und neue Informationen vorliegen.

3.2.1 Sammeln ökologischer Produktdaten

Die für Ökobilanzen benötigten Daten sind in sogenannten Environmental Product Declarations (EPDs) für die jeweiligen Produkte festgehalten. Sie sind zum Teil vom Produkthersteller erhältlich. Wurde sich noch nicht auf ein spezifisches Produkt festgelegt, sind solche Deklarationen bzw. deren Inhalte auch über Internetdatenbanken abrufbar. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Großzahl der Einträge in diesen Datenbanken keine spezifischen Produkte, sondern generische Materialien repräsentieren und die Werte eines konkreten Produktes unter Umständen stark davon abweichen kann. (Lockie & Berebecki 2014: 15)^[42]

Einige EPD-Datenbanken sind folgende:

- **Embodied Carbon Database**³ des UK Green Building Council und der britischen gemeinnützigen Organisation WRAP (Waste & Resources Action Programme)
Eine kostenlose Anmeldung wird benötigt.
- **baubook Oekoindex**⁴ des Energieinstituts Vorarlberg und dem IBO (Institut für Bauen und Ökologie)
- Das **Inventory of Energy and Carbon**⁵ der University of Bath ist kostenlos als Excel-Datei herunterladbar, enthält allerdings nur CO₂-Äquivalent und Graue Energie der Materialien.
- **Ökobaudat**⁶ ist eine kostenlose Onlinedatenbank des BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit)
Diese wurde gewählt um in das entwickelte Evaluierungswerkzeug einzubinden.

³ <http://ecdb.wrap.org.uk>

⁴ <http://www.baubook.at/oekoindex>

⁵ <http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database>

⁶ <http://www.oekobaudat.de/>

3.2.1.1 Verwendete Datenbank: ÖKOBAUDAT

Die online verfügbare und herunterladbare Datenbank Ökobaudat des BMUB wurde ausgewählt und deren Werte in das Kalkulationswerkzeug integriert, da sie als verbindlich zu nutzende Grundlage für das *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen* (BNB) gilt. Sie enthält Informationen zu 700 verschiedenen Produkten und entspricht der DIN EN 15804 (Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte). Die Datenbank wurde vom Softwareentwickler aus dem Bereich Nachhaltigkeit *thinkstep*, dem Institut für Angewandte Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie und dem Web-Entwickler *online now!* ins Leben gerufen. (BMUB, o.J.)^[72]

3.2.2 Verwenden des Kalkulationswerkzeuges

Das entwickelte Kalkulationswerkzeug wertet zwei ökologische Teilbereiche des Projektes aus: Unter „CO₂-Bilanz“ wird das GWP eines Bauprojektes dargestellt, wie es aus dessen Energieverbrauch und der Baumaterialien resultiert. Unter „Ökobilanz“ werden die Wirkungspotentiale der Projektmaterialien aufgeführt:

- Globales Erwärmungspotential
- Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht
- Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon
- Versauerungspotenzial von Boden und Wasser
- Eutrophierungspotenzial
- Einsatz nicht-erneuerbarer Energie

Die Systematik der Ökobilanzierung (wie auch die Materialbibliothek) basiert auf dem BNB des BMUB. Dieses ist zwar momentan auf den Bereich von Bürogebäuden und Ein- bis Fünffamilienhäusern beschränkt, lässt sich aber gut als Vergleichsmaßstab im deutschsprachigen Raum verwenden. Der Bewertungsmaßstab des BNB zur Nachhaltigkeit eines Gebäudes wurde auch für die CO₂-Bilanz des Kalkulationswerkzeuges verwendet, um den Bedarf für eine Optimierung besser einschätzen zu können. Er setzt sich zusammen aus der

verursachten CO₂-Äquivalenz pro Quadratmeter Nettogrundfläche (aller vollständig umschlossenen Bereiche) und Jahr, wobei die Errichtungsemissionen auf den Lebenszyklus gerechnet werden. Die Werte werden dann ins Verhältnis zu einem maximalen verlangten Wert gesetzt. Der Erfüllungsgrad dieses Wertes bestimmt das mögliche Zertifizierungsniveau für den Teilbereich des GWP. (BMUB, 2015)^[73]

Zertifizierungsniveau	Bürogebäude ¹	Kleinwohnbau ²
100% – maximal	25 kg CO ₂ /(m ² •a)	9,44 kg CO ₂ /(m ² •a)
80% – Gold	≤ 31,4 kg CO ₂ /(m ² •a)	≤ 12,8 kg CO ₂ /(m ² •a)
65% – Silber	≤ 36,2 kg CO ₂ /(m ² •a)	≤ 15,32 kg CO ₂ /(m ² •a)
50% – Bronze	≤ 41 kg CO ₂ /(m ² •a)	≤ 17,84 kg CO ₂ /(m ² •a)
unzureichend	> 41 kg CO ₂ /(m ² •a)	> 17,84 kg CO ₂ /(m ² •a)

Anmerkungen:

¹ BMUB, 2015^[73]

² BMUB, o.J.^[74]

Das Kalkulationswerkzeug ist auf Materiallisten mit bis zu 20.000 und Tür- und Fensterlisten mit insgesamt maximal 1000 Elementen ausgelegt, kann aber durch erweiteren der entsprechenden Listen und anpassen der entsprechenden Formeln erweitert werden.

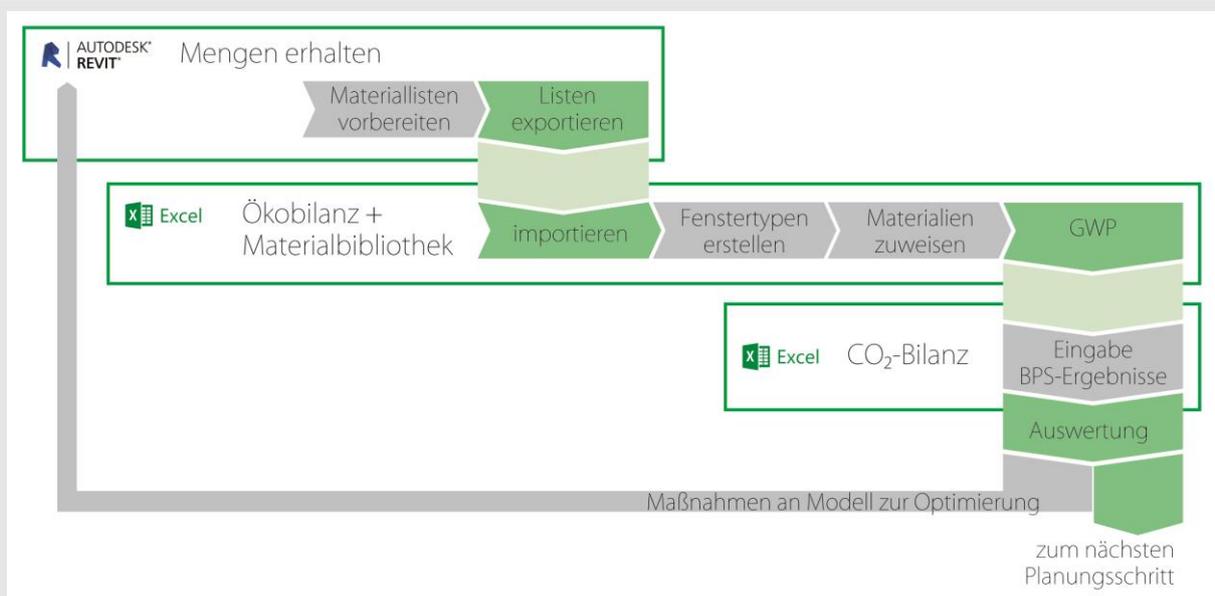


Abb.35 Arbeitsablauf der CO₂-Bilanzierung

Die benötigten Arbeitsschritte zur Verwendung der Kalkulationstabelle sind im Folgenden erklärt:

1. Zunächst müssen alle Modellkategorien ausgewählt werden, die nicht in die CO₂-Bilanz aufgenommen werden können oder sollen. Das sind zum Beispiel Außenbauteile, die nur für eine Präsentation im Modell sind, oder technische oder elektronische Komponenten, die zu komplex im Aufbau sind, als dass sich ihr GWP in hier ermitteln ließe.
Am einfachsten ist dies in einer *Ansicht*, in deren *Ansichtseinstellungen* nur diese *Modellkategorien* aktiv sind. Diese Elemente sind dann unter *Kommentar* mit einer Kennzeichnung zu versehen (z.B. „keine CO₂-Bilanz“).
2. Bei den übrigen Elementen muss dann kontrolliert werden, ob jedem die benötigten korrekten Materialien zugewiesen sind.
3. Die korrekt formatierte *Materialliste*, *Türliste* und *Fensterliste* können aus der Vorlagedatei importiert werden. Das Layout der zu exportierenden Materialliste sollte nicht verändert werden.
4. Bei der Materialliste sollen alle Elemente aus Schritt 1 ausgeschlossen werden, was ebenfalls über den Ausschluss des entsprechenden Kommentarwerts erfolgt.
5. Die Listen können dann als Textdateien (.txt) exportiert werden (alle Häkchen gesetzt, Feldtrennzeichen: (TAB), Textkennzeichner: ").
6. Im Arbeitsblatt *Import Material* der Kalkulationstabelle unter *Daten* ► *Verbindungen* über *Aktualisieren* die verknüpfte Materialliste mit der gerade exportierten Revit-Materialliste ersetzen.
Analog zu Vorherigem im Arbeitsblatt *Import Bauteile* die *Fensterliste* und *Türliste* importieren.
7. Die verwendeten Materialien und Bauteile werden nun automatisch in die anderen Arbeitsblätter mit ihren Mengen übernommen.
8. Arbeitsblatt **Ökobilanz Bauelemente**:
Die Revit-Materialien sind nun hier aufgeführt. Zu jedem davon muss im Arbeitsblatt *Materialbibliothek* das entsprechende Material gefunden werden (über die Filter kann gesucht werden). Die Zeilennummer des

Materials in der *Materialbibliothek* muss dann im Arbeitsblatt *Ökobilanz Bauelemente* in der Spalte *Zeilen-Nr.* neben dem entsprechenden Revit-Material eingetragen werden. Die EPD-Werte werden automatisch aus der *Materialbibliothek* übernommen und für die verwendeten Materialmengen aufsummiert. Eventuell muss unter *Umrechnung* ein Umrechnungsfaktor eingetragen werden, wenn ein Material in Revit und der Materialbibliothek in verschiedenen Einheiten angegeben ist. In der untersten Zeile werden die Summen der Wirkungspotentiale für das gesamte Projekt errechnet.

The screenshot displays a detailed spreadsheet titled 'Ökologische Bilanz von Bauteilen und Baustoffen'. The table is organized into columns for different environmental impact categories: CO₂-Bilanz, Abgaspotenzial, Bildungspotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Fließenergie, and Umrechnung. Each row represents a specific material, such as 'Glas-Viel', 'Alu-Struktur', and 'Keramikfliese'. The final rows provide a 'Summe im Projekt' (Project Total) for each category. Below the main table, there is a section for 'Bauelemente' (Building Elements) with columns for 'Zeile Nr.', 'Name', 'Verhältnis', 'Flächen', 'Beschlag', and 'Gefälle'. This section lists elements like 'Fenster-Bau' and 'Fenster-Obj' with their respective ratios and area values.

Abb.36 Arbeitsblatt *Ökobilanz Bauelemente*

9. Arbeitsblatt *Materialbibliothek*:

Hier sind die benötigten ökologischen Wirkungspotentiale aller Materialien, wie sie der Ökobaudat des BMUB entnommen wurden, aufgeführt. Jeder Eintrag ist zusätzlich über die Spalte *Link* mit seiner entsprechenden Internetseite verknüpft.

The screenshot shows a spreadsheet application with a detailed table of material data. The table is titled 'EPD Materialbibliothek' and lists various door types (e.g., 'Vollmassenholztür VPE', 'Vollmassenholztür VPE mit Beschichtung', etc.) and their associated energy and CO2 emissions. The columns include 'Name', 'Fläche', 'Einheit', 'Anmerkung', 'Erneuerbare Primärenergie', 'Nicht-erneuerbare Primärenergie', 'Total erneuerbare Primärenergie', 'Nicht-erneuerbare Primärenergie', 'Total nicht-erneuerbare Primärenergie', 'Erneuerbare Sekundärenergie', 'Nicht-erneuerbare Sekundärenergie', 'SUMME Erneuerbare Energie', 'SUMME Nicht-erneuerbare Energie', 'Einsatz von Wasser', 'Komponenten für die Herstellung', 'Stoffe für die Herstellung', 'SUMME CO2e', 'Globales Erwärmungspotential', 'Abbaupotential', 'Bildungspotential', 'Versauerungspotential', and 'Entropiepotenzial'. The table is organized into sections like 'Stabilität mit Bewehrung', 'Feuchtigkeit', and 'Fensterbank'.

Abb.37 Arbeitsblatt Materialbibliothek

10. Arbeitsblatt CO₂-Bilanz:

Die benötigten Daten können aus dem GBS-Internetportal entnommen werden. In der Übersicht *Energy and Carbon Results* des entsprechenden Projektdurchlaufes sind folgende Werte wichtig:

- Unter *Energy, Carbon and Cost Summary*
 - Annual CO₂ Emissions: Onsite Fuel
 - Annual Energy: Electric
 - Annual Energy: Fuel
- Unter *LEED, Photovoltaic, Wind Energy, and Natural Ventilation Potential*
 - Photovoltaic Potential: Annual Electric Energy Savings
 - Wind Energy Potential: Annual Electric Generation
 - Natural Ventilation Potential: Possible Annual Electric Energy Savings

Die Werte sind im Arbeitsblatt in den entsprechenden, grau unterlegten Feldern einzutragen. Der Anteil an erneuerbarer Energie am Energiemix des Stromanbieters kann zusätzlich bestimmt werden. Die CO₂-Bilanz der Elektrizität wurde anhand der CO₂-Berichterstattung des E.ON-Konzerns für 2014 bestimmt (siehe dazu: E.ON 2014^[75]). Welche

Energieerzeugungsmaßnahmen am Grundstück miteinander verbunden werden sollen, lässt sich durch Aktivieren des entsprechenden Kontrollkästchens einstellen. Gesamtwerte für das Projekt werden dann anhand des eingegebenen Lebenszyklus errechnet.

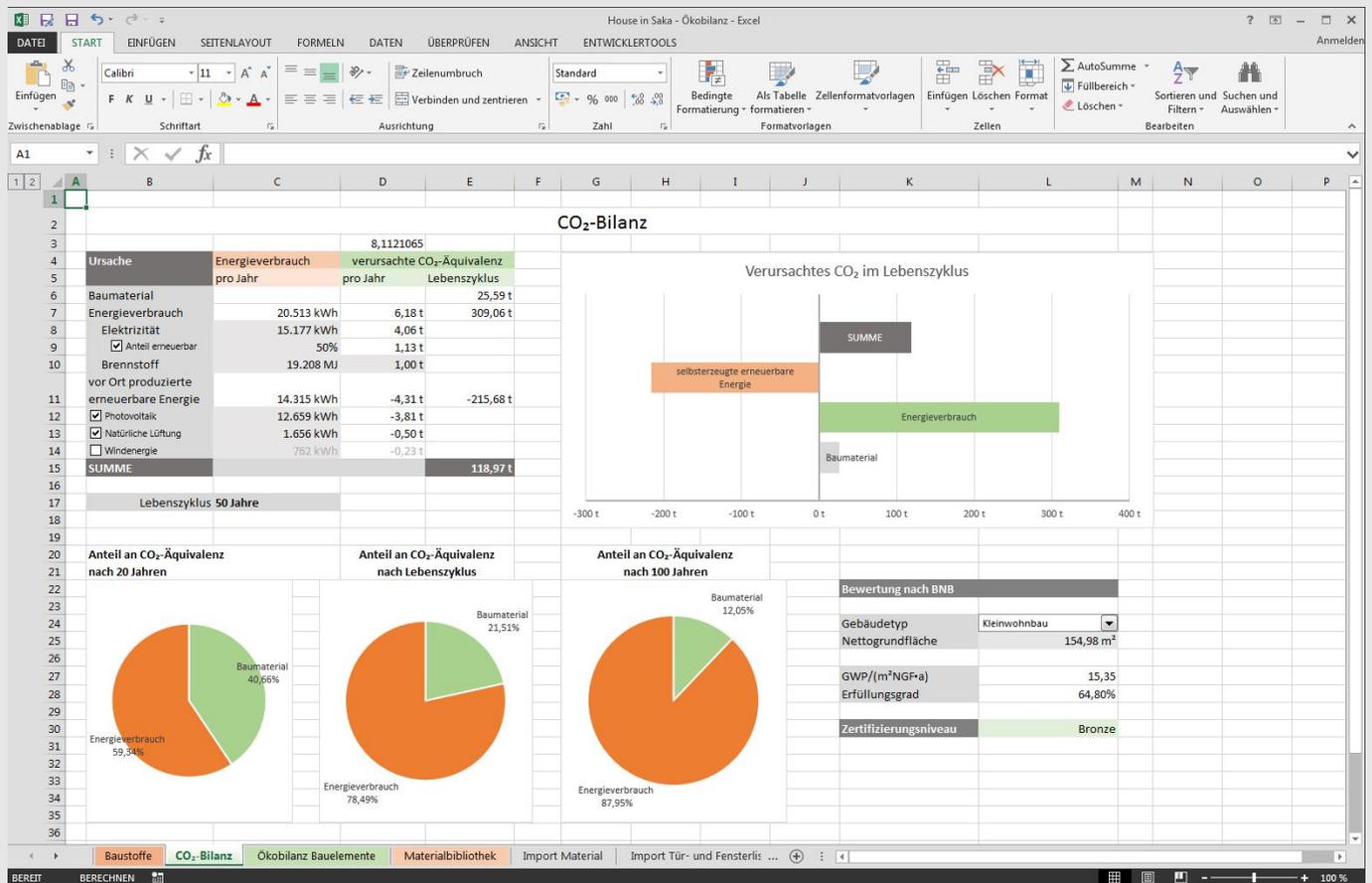


Abb.38 Arbeitsblatt *CO₂-Bilanz*

Materialbibliothek: Erweiterte Materialien

Material für Stahlbeton:

Die Betonbewehrung macht einen beträchtlichen Anteil in der Ökobilanz eines Betonbauwerks aus. Daher wurde ein Sondermaterial für Stahlbeton in der *Materialbibliothek* angelegt, welches die Wirkungspotentiale unter Berücksichtigung von Beton und Bewehrung kalkuliert. Der Anteil an Bewehrung in Kilogramm pro Kubikmeter Beton muss dazu bekannt sein. Eine Beispieltabelle dazu wurde unter *Beispiele* inkludiert.

Es ist somit auch ratsam in Revit verschiedenen Bauteilarten (Wände, Stützen, Decken) verschieden benannte Betonmaterialien zuzuweisen (z.B. benannte Kopien).

In der *Materialbibliothek* kann bei den Stahlbetonarten in den orange eingefärbten Feldern dann jeweils der Bewährungsanteil und die Zeilennummer des zu verwendenden Betons eingegeben werden (am Einfachsten die Liste nach „beton“ filtern). Danach können die Materialien regulär in *Ökobilanz Bauelemente* den Revit-Betonmaterialien zugewiesen werden.

Fenster:

Um Fenster zu kalkulieren gibt es ebenfalls ein Kombinationsmaterial in der *Materialbibliothek*. Hier muss in den orange eingefärbten Feldern für jeden Fenstertyp die Zeilennummer der Verglasung, des Rahmens, der Beschläge und der Griffe aus der *Materialbibliothek* eingegeben werden (am Einfachsten nach „fenster“ filtern). Wurden die Fenstertypen erstellt, müssen im Arbeitsblatt *Ökobilanz Bauelemente* in der unteren Liste „Fenster im Projekt“ die Fenstertypen präzisiert werden: Unter *Zeile* muss die Zeilennummer jedes Fenstertyps im Projekt aus der *Ökobilanz*-Liste darüber eingegeben werden. Unter *Zeile (Mat.bibliothek)* muss die Zeilennummer des Fenstertyps aus der *Materialbibliothek*, der dem entsprechenden Projektfenster zugewiesen werden soll, eingegeben werden. Es werden nun die Materialmengen für die entsprechenden Fensterabmessungen errechnet. Es ist darauf zu achten, dass die Fensterabmessungen im Arbeitsblatt *Baustoffe* angegeben sind. In der *Ökobilanz*-Liste kann dann, wie bei den anderen Materialien, bei jedem Projektfenstertypen die Zeilennummer des Fenstertyps aus der *Materialbibliothek* zugewiesen werden.

Je nach Anzahl unterschiedlicher Fenster müssen die Fensterlisten eventuell erweitert werden.

3.2.3 Einschränkungen

Zwei wichtige Elementgruppen können nicht in die CO₂-Bilanz miteinbezogen werden:

Die erste umfasst komplexere Objekte, wie Möbel, Leuchten und Schalter, Sanitärinstallationen und Anlagen der Gebäudetechnik. Einige wenige solche

Objekte sind in der Materialbibliothek enthalten. Das GWP der übrigen wäre jedoch zu aufwändig zu erfassen.

Eine zweite Elementgruppe sind insbesondere Komponenten der Haustechnik, darunter auch Rohre und viele benutzerspezifische Elemente. Problem ist, dass diese entweder kein Materialfeld enthalten oder dass keine Fläche oder kein Volumen errechnet wird, womit die Materialmenge unbekannt ist.

Dadurch wird praktisch sämtliche Innenausstattung und Gebäudetechnik von der CO₂-Bilanz ausgeschlossen, welche für die Erfassung des Gesamtprojektes wichtig wäre. Die entwickelte Methodik ist also ähnlich wie die der BPS nur geeignet, die Architektur vergleichend zu analysieren, nicht aber um die Gebäudetechnik mitzuevaluieren oder endgültige und vollständige Analyseberichte zu erhalten.

3.2.4 Evaluierung der CO₂-Bilanz des Projektes

Der wichtigste Output ist im Tabellenblatt CO₂-Bilanz in Form von Tabellen und Diagrammen dargestellt. Sie zeigen die erzeugte CO₂-Äquivalenz durch Baustoffe und Energieverbrauch und das zurückgehaltene CO₂ durch selbsterzeugte Energie an.

In Kapitel 3 wurde mit Hilfe der Energiesimulation bereits der Energiebedarf des Projektes minimiert. Daher soll das Ziel für einen ökologischen Entwurf in diesem Abschnitt sein, die CO₂-Äquivalenz der Baustoffe möglichst gering zu halten. Dazu könnten unter Ökobilanz die Materialien mit den stärksten Auswirkungen festgestellt werden. Für diese könnte dann in der Materialbibliothek nach ökologischeren Alternativen gesucht (z.B. Baumwolle statt Mineralwolle), andere Bauweisen überlegt (z.B. Holz statt Beton oder Stahl) oder die Architektur angepasst werden, damit weniger Material benötigt wird.

Wichtig ist allerdings, dass nach einer Änderung der Architektur stets eine erneute Energiesimulation durchgeführt wird, um negative Auswirkungen auf die Energiebilanz zu vermeiden.

4 FALLSTUDIEN

Die entwickelte Methode zur Evaluierung der ökologischen Nachhaltigkeit wurde schließlich an drei Fallstudien angewendet.

Die Analyse wurde gemäß der Vorgehensweisen in Abschnitt 3.1.5 und 3.2.2 durchgeführt: Zunächst musste das Revit-Projekt für eine Energiesimulation angepasst und das Energiemodell erstellt werden. In Projekt Solon (siehe Abschnitt 3.1.5.2) wurden die Vorlagen für Graphiken erstellt, welche später die Analyseergebnisse aus GBS darstellen sollen; diese Vorlagen müssen lediglich einmalig erstellt werden und können dann auf beliebige Projekte angewendet werden. Nachdem die Energiesimulation in GBS durchgeführt wurde, wurde eine weitere mit DesignBuilder durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Zuletzt wurde eine CO₂-Bilanzierung durchgeführt und die Analyse der Fallstudie schließlich bewertet.

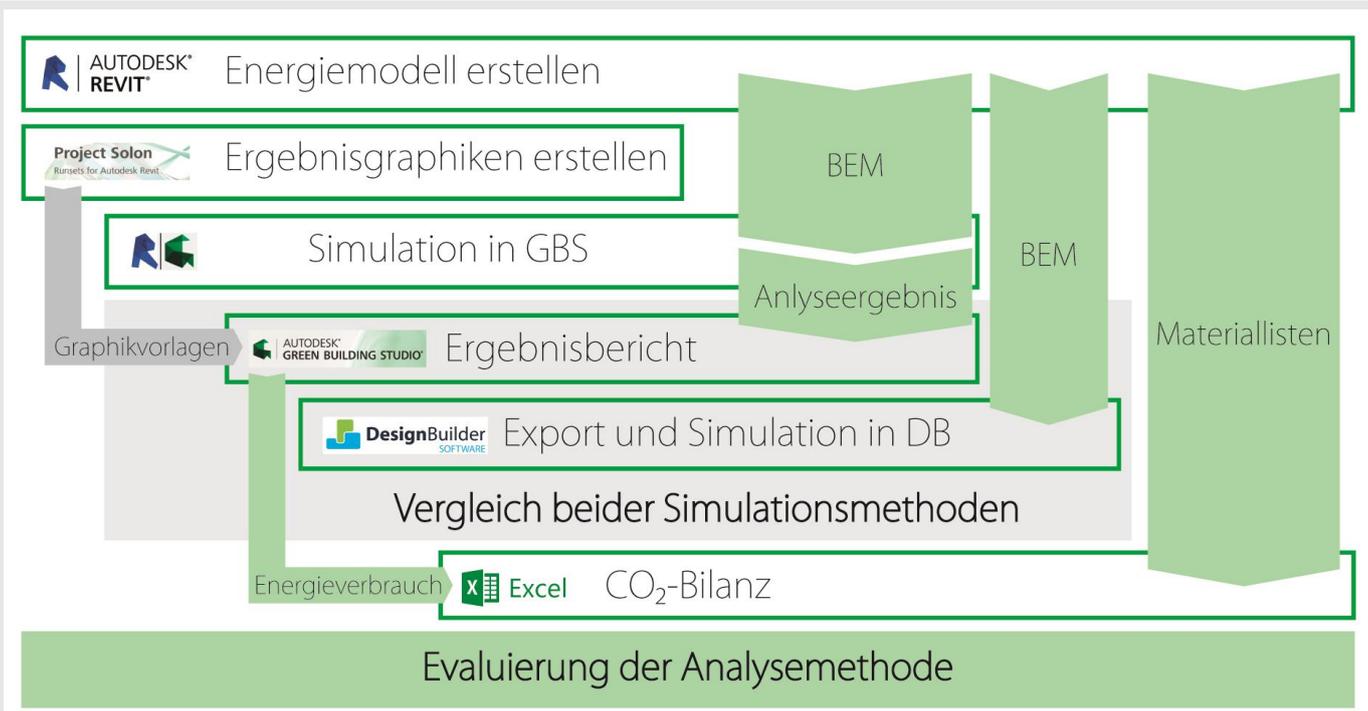


Abb.39 Arbeitsablauf: Anwendung der entwickelten Analysemethode an die Fallstudien

Um den Umfang der Anwendbarkeit bewerten zu können, wurden drei Projekte unterschiedlicher Nutzungstypen, Größe und Komplexität in Projekt-Dateien unterschiedlicher Herkunft und Modellierweisen herangezogen.

Die Charakteristika der Projekte bzw. Projektdateien der drei Fallstudien sind in der folgenden Tabelle vergleichend dargestellt.

	5.1 Fallstudie 1	5.2 Fallstudie 2	5.3 Fallstudie 3
Name	MPreis Bäckerei	House in Saka	Büroturm
Gebäudetyp	Industriebau	Einfamilienhaus	Bürohochhaus
Projektstatus	gebaut	gebaut	Entwurf
Herkunft BIM	Architekturbüro	selbst erstellt	selbst erstellt
Dateigröße	92,3 MB	17,8 MB	89,4 MB
NGF	26.379 m ²	155 m ²	40.873 m ²
Zonen	305	6	812
NGF / Zone	86,5 m ²	25,8 m ²	50,3 m ²

4.1 FALLSTUDIE 1: INDUSTRIEBAU – GROßBÄCKEREI

Anhand eines bestehenden einreichfertigen Revit-Projekts eines Industriebaus, soll das Potential der Ökobilanz-Methodik beurteilt werden. Bezüglich Building Performance Simulation wird Green Building Studio dann mit der Alternative DesignBuilder verglichen.

Die erste Fallstudie besitzt folgende besonderen Charakteristika:

- Industriebau:
 - Große und nicht physisch getrennte thermische Zonen
 - Große Bereiche zwischen Innen- und Außenräumen (z.B. Entladerampen, Garagen)
 - Große Hitzequellen durch Produktionsmaschinen
- Einreichfertig vorhandenes Revit-Projekt
 - Beschattungselemente nicht getrennt modelliert
 - Benutzerspezifische Materialien beinhalten keine thermischen Eigenschaften
 - Art und Weise der Modellierung der Bauteile nicht für eine Simulation geeignet
 - Raumzonierung entspricht nicht der benötigten thermischen Zonierung
 - Gebäudetechnik zum Teil vorhanden

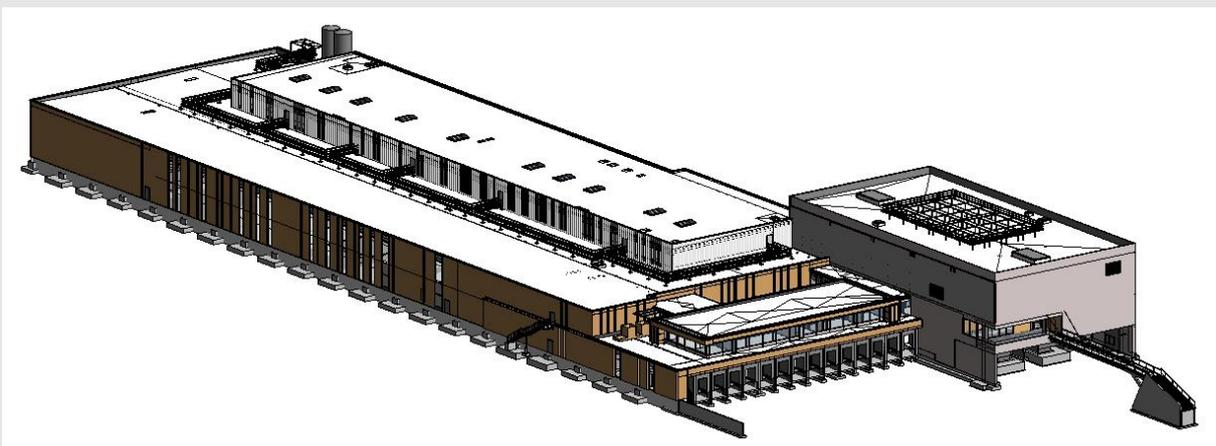


Abb.40 Revit-Darstellung des Projektes

4.1.1 Projektbeschreibung

Bei dem Industriebau in Innsbruck-Völs, Österreich, des Architekturbüros *ATP* handelt es sich um eine Großbäckerei mit Büros im obersten Stock des größeren

Baukörpers und in einem seitlich angesetzten kleineren Baukörper. An den kürzeren Seiten des größeren Baukörpers, vorne und hinten, befinden sich Warenein- und. Warenausgang mit Laderampen für LKWs.

Die Produktionsstätte ist auf einen 24-Stunden-Betrieb mit bis zu 100 Mitarbeitern ausgelegt. Der Energieverbrauch soll zum Großteil durch ein eigenes Blockheizkraftwerk, durch am Dach installierte Photovoltaikanlagen und durch Kühlung über Grundwasser abgedeckt werden.

Die tragenden Elemente sind in Stahlbeton ausgeführt. Die Fassade besteht aus einer hinterlüfteten Holzverschalung und vertikalen Fensterbändern vom Erdgeschoss bis zur Attika. Für den Büroteil wurde eine Bauteilaktivierung eingeplant.

4.1.2 Arbeitsablauf

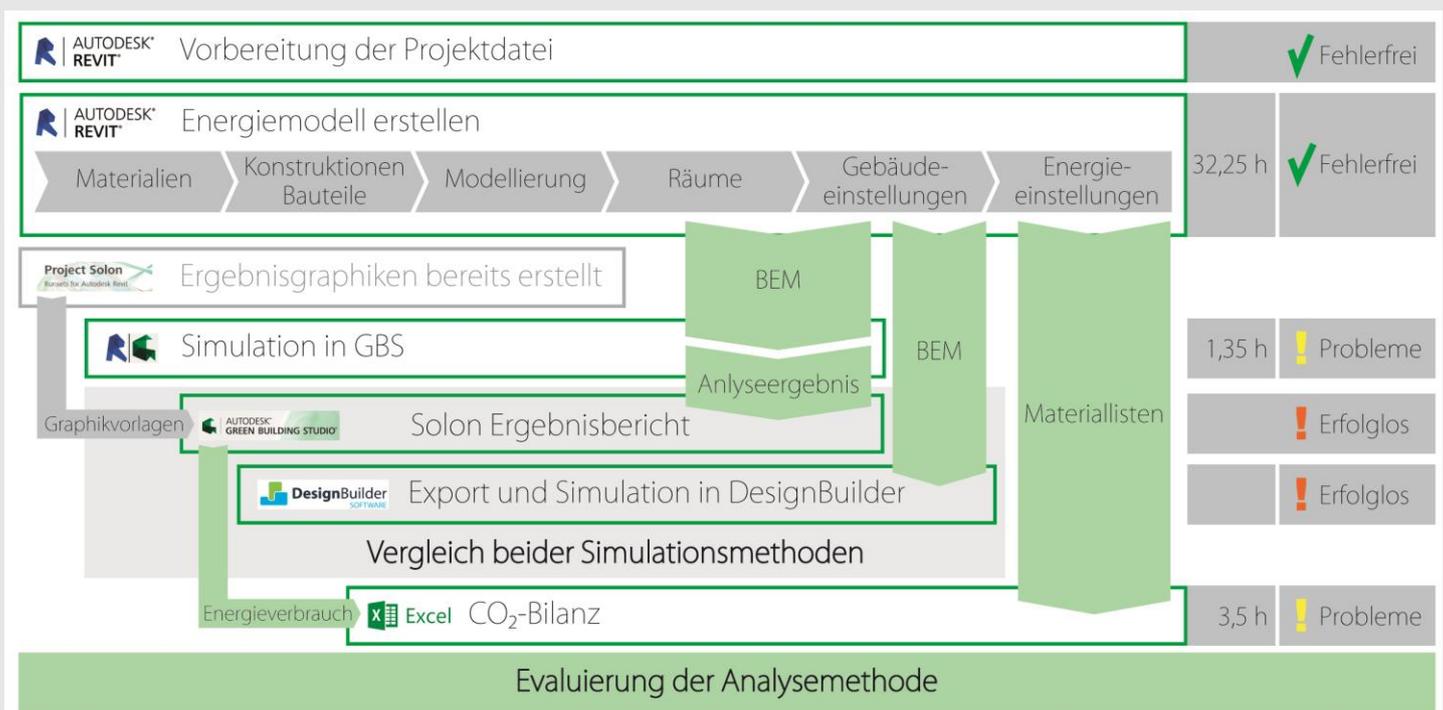


Abb.41 Arbeitsablauf Fallstudie 1

(Gelbe Markierung zeigt Einschränkungen oder stark erhöhten Arbeitsaufwand an)

Für den ersten Teil, der Building Performance Simulation, muss zuerst das BEM in Revit erstellt werden. Dazu müssen Einstellungen vorgenommen werden, die enthaltenen Informationen überprüft bzw. vervollständigt werden und

gegebenenfalls auch Änderungen an der Modellierung vorgenommen werden (zum Beispiel bei beschattenden Auskragungen).

Schließlich wird versucht eine Energiesimulation in Green Building Studio und DesignBuilder durchzuführen und die verschiedenen Simulationsmethoden werden miteinander verglichen.

Für den zweiten Teil müssen aus Revit Material- und Bauteillisten exportiert werden, die dann in die Excel-Datei zur Ökobilanzierung importiert werden.

Abschließend wird geklärt inwiefern zufriedenstellende Ergebnisse in Bezug auf die Charakteristika des Revit-Projektes erzielt werden konnten und wo eventuelle Probleme und Unzulänglichkeiten bestehen.

4.1.2.1 Vorbereitung der Projektdateien

Das Revit-Projekt lag in mehreren Teildateien vor, welche innerhalb Revits untereinander verlinkt waren. Bevor mit der Vorbereitung zur Entwurfsanalyse begonnen wurde, wurden die Dateien zu zwei Projektdateien zusammengefasst: Eine enthält die Architektur, die andere ausschließlich die Gebäudetechnik. Das Revit-Modell mit der Architektur enthält schließlich alle bestehenden Informationen für eine Energieanalyse und für die vollständigen Mengenlisten, während es möglichst schlank gehalten ist. Die Projektdatei für die Gebäudetechnik wird lediglich zur Erstellung der Materialliste für die CO₂-Bilanz benötigt.

4.1.2.2 Building Performance Simulation

Erstellung des Energiemodells

1) Standort

- Standort festgelegt

1 Minute

Quelle: Projektprotokoll

2) Position

- Geographischer Norden überprüft

1 Minute

3) Modellierung des Gebäudes

- | | |
|--|--------|
| ▪ Geometrie vollständig | 0,3 h |
| ▪ Geschossdecken sind korrekt | |
| ▪ Raumbegrenzung bei abgehängten Decken deaktiviert | |
| ▪ Bauelemente sind definiert | |
| ▪ Beschattungselemente überprüft | 21,5 h |
| ▪ Thermische Eigenschaften zu Materialien hinzugefügt | 3 h |
| ▪ Thermische Eigenschaften zu Fenstern und Türen hinzugefügt | |
| Quelle: Dokument zu U-Wert-Berechnung und Bauteildaten | |

Schwierigkeiten:

- Einzelne Schichten mancher Bauteile konnten nicht eindeutig identifiziert werden und mussten angenommen werden.

Fehlende Informationen:

- Thermische Eigenschaften der Türen

4) Gebäudetypus

- | | |
|--|--------------------|
| ▪ Gebäudetypus Fabrik eingestellt und festgelegt | 0,2 h ¹ |
|--|--------------------|

Annahmen:

- 100 Mitarbeiter² auf 28,526 m²³
- Nutzungsplan: 24 Stunden³

Fehlende Informationen:

- Wärmegewinn durch Personen und Maschinen
- Beleuchtungslast
- Versorgungslast

5) Energieeinstellungen

- | | |
|---|--------|
| ▪ Export-Komplexität <i>Komplex mit Schattierungsfläche</i> eingestellt | 0,25 h |
| ▪ Gebäudehülle: <i>Äußere Elemente identifizieren</i> wurde gewählt, da alle Wände mit Außen-Funktion definiert waren | |
| ▪ Analysemodus <i>Gebäudeelemente</i> ausgewählt | |

Annahmen:

- Gebäudebetrieb: 24/7
- Außenluftdaten auf 87,48 L/(s·m²) überschlagen mit 10 m³/h für die Produktion und 4 m³/h für andere Räume⁴

Fehlende Informationen:

- Lüftungssystem: 12 SEER/8.3 HSPF Kompakt-Wärmepumpe (Packaged Terminal Heat Pump, PTAC) gewählt

6) Flächen- und Volumenberechnung

- Einstellung überprüft 1 Minute

7) Räume

- Zonierung durch Räume wurde vorgenommen 7 h

8) Erstellung des Energiemodells

0,1 h

Gesamtzeitbedarf

32,35 h

Anmerkungen:

¹ Mit Recherche

² Beate Troger 2014^[76]

³ Laut ATP 2014^[77]

⁴ Arbeitskreis Technik des FVLR 2014: 27^[78]

Green Building Studio

1) Erstellung der *Runsets*

- Ein einmaliges Erstellen der *Runsets* reicht aus, sie sind dann auf jedes Projekt anwendbar. 0,4 h
- Alle *Runsets* bis auf die zu den *Glazing Types* sind bereits in GBS verfügbar.

2) Erstellung der *Widgets*

- Ein einmaliges Erstellen der *Widgets* reicht aus, sie sind dann auf jedes Projekt anwendbar. 0,3 h
- Es wurden zu jedem der dreizehn, unter 3.1.5.2 (1) genannten, wesentlichen Parameter zur Optimierung, ein Energiekosten-Widget erstellt.

3) Erstellung des *Dashboards*

- Auch ein einmalig erstelltes *Dashboard* ist auf jedes Projekt anwendbar. 0,1 h

4) Energiesimulation durchführen

- Initialisierung 0,05 h
- Berechnung durch den Internetdienst 0,5 h

Gesamtzeitbedarf 1,35 h

Probleme:

1. Versuch wurde mit Fehlermeldung abgebrochen, daraufhin wurde folgendes durchgeführt:

- Tragwerksstützen sind nicht mehr raumteilend
- Ein Raum, der einen anderen vollständig umschließt, wurde geteilt.

2. Versuch wurde erneut mit Fehlermeldung abgebrochen. Vermutet wurde ein Problem mit Beschattungselementen, das heißt alle Bauteile, die nicht an einem vollständig umschlossenen Raum liegen. Alle solche Bauelemente wurden daraufhin abgetrennt und entfernt. Das Energiemodell verfügte dann über keine Schattierungsflächen mehr.

3. Versuch war dennoch erneut nicht erfolgreich. Der GBS-Internetplattform war folgende Fehlermeldung zu entnehmen:

```
Issue: An error has occurred related to the DOE-2 simulation. It is below and may be of assistance in determining the issue with your building model. If it is unclear what the issue is, please submit the issue at the link below and include the gbXML file used for this run. <br/> *1965 * ..<br/> >*ERROR*****<br/>*ERROR*****Can not simulate LAYERS aim1322 as given. The wall is too thick or<br/> too dense.<br/>*ERROR*****<br/>*ERROR*****Can not simulate LAYERS aim1322 as given. The wall is too thick or<br/> *2015 * ..<br/>*ERROR*****<br/>*ERROR*****Can not simulate LAYERS aim1367 as given. The wall is too thick or<br/> *2339 * ..<br/>*ERROR*****
```

Der vollständige Fehlerbericht konnte im Verzeichnis von GBS unter

Installationslaufwerk*\Users*Benutzername\AppData\Roaming\Autodesk\Revit\Autodesk Revit *Jahr*\CEA\DB*Name des GBS-ProjektsName des Simulationsdurchgangs** gefunden werden. Anhand der Codes konnten die fehlerverursachenden Elemente in der gbXML-Datei identifiziert werden.

Versuche ergaben, dass zum einen eine Wand, eine Geschossdecke oder ein Dach in maximal drei separate, aneinander liegende Wandbauteile geteilt werden darf und zum anderen eine maximale Dicke eingehalten werden muss, welche mit zunehmender Anzahl von Wandschichten geringer wird. Solche mehrfachen und dicken Wandgruppen kommen in der Projektdatei häufig vor.

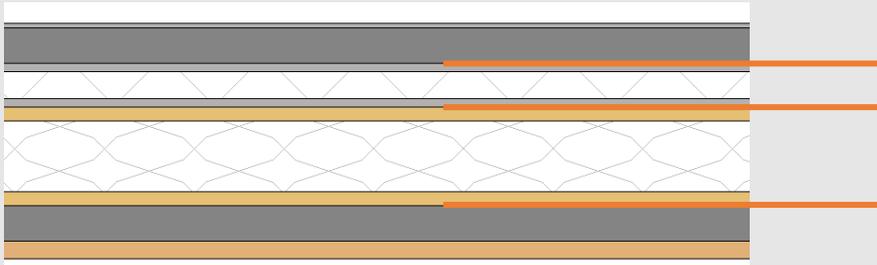


Abb.42 Eine tektonische Wand, die aber aus vier separaten Revit-Wandelementen zusammengesetzt ist.

Aufgrund zahlreicher solcher mehrfachen Wände im Projekt und der Schwierigkeit, deren Positionen zu finden, hätte für die Behebung aller Fehlerquellen das Modell praktisch von Grund auf neu modelliert werden müssen. Die Simulation wurde daher dann ohne das Einbeziehen der durch die Bauteile festgelegten thermischen Eigenschaften durchgeführt, was problemlos funktionierte.

Ergebnisse der Energiesimulation

Die Simulation ergab einen Energieverbrauch von 75.112 MJ pro Jahr und Quadratmeter bei 17.275 m² und 376 Personen. Über 50% davon werden dabei durch die Beheizung verursacht. Da die Wärmeabgabe der Produktionsanlagen, insbesondere Öfen, nicht miteinbezogen werden konnte, da der Wärmegewinn unbekannt war, dürfte der Heizbedarf aber bei weitem niedriger liegen. Dafür könnte sich aber auch der Kühlbedarf von laut GBS lediglich 5% stark erhöhen. Da die thermischen Eigenschaften der Entwurfsbauteile nicht verwendet werden konnten und GBS Standardkonstruktionen mit teilweise hohen U-Werten verwendet, dürfte die Dämmleistung der Gebäudehülle ebenfalls um einiges höher liegen. Die absoluten Energiekennwerte aus GBS sind aufgrund dieser Vereinfachungen kaum von Nutzen.

Interessant sind allerdings die automatisch generierten alternativen Simulationsdurchgänge, insbesondere jene, die verschiedene HKLS-Systeme simulieren. So könnte laut GBS der Energiekennwert durch die *High Eff. VAV*-Konfiguration um 44% auf 41.709 MJ pro Jahr und Quadratmeter verringert werden. Die Details zu den Einstellungen der Alternative Runs sind – nach einigem Suchen – unter *Runsets* auf der *Project Solon*-Internetseite zu finden. Die *High Eff. VAV*-Option enthält demnach ein HKLS-System mit den Spezifikationen

Central VAV , Underfloor Air Distribution System, COP 7.5 Chiller efficiency, 95% Eff Gas Boiler, Dry bulb economizer (68F limit), VAV.

Die Diagramme, die durch Project Solon zur Optimierung hätten generiert werden sollen, konnten in Revit leider nicht geladen werden. Das Problem tritt, dem Support-Forum von Autodesk zu Folge, häufiger auf, konnte aber noch nicht behoben werden.

Für den detaillierten Ergebnisbericht siehe Anhang I.B.1.

DesignBuilder

1) Exportieren des Energiemodells aus Revit als gbXML-Datei	0,1 h
2) Neues Projekt erstellen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Location Template: Innsbruck Verfügbar über die EnergiePlus-Internetseite 	0,05 h
3) Add building	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type: Architect early stage design ▪ Activity Template: General Industrial – Food preparation area ▪ Construction Template: Project Template ▪ Glazing Template: Project Template ▪ Lighting Template: ASHRAE 90.1-2007 – Building Area Method, Manufacturing Facility, 11.9 W/m² at 300 lux 	0,1 h
4) Import BIM/gbXML model	0,5 h
5) Einstellungen: Activity	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Process aktiviert Fuel Type: 2 – Natural Gas 	1 Minute
6) Einstellungen: Lighting	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lighting Control aktiviert ▪ Exterior Lighting aktiviert Design Level: 240 W 	1 Minute

7) Einstellungen: HVAC

- | | |
|--|----------|
| ▪ HVAC-Template: Heating and ventilation ducted supply | 1 Minute |
| ▪ Heating – Fuel: 11 – Waste Heat | |
| ▪ Cooling – Fuel: 11 – Waste Heat | |
| ▪ DHW – Fuel: 11 – Waste Heat | |

8) Energiesimulation durchführen

Abgebrochen

Gesamtzeitbedarf

Die Simulation konnte nicht durchgeführt werden. Die EnergyPlus-Engine gab eine Fehlermeldung aus. Zahlreiche Zonen schienen als nicht vollständig geschlossen exportiert worden zu sein. Vermutet werden nicht erkannte Bauteile oder Materialien im Modell oder eine nicht erlaubte Art der Modellierung der Bauteile.

4.1.2.3 CO₂-Bilanzierung

1) Kennzeichnen von nicht zu erfassenden Elementen	0,1 h
2) Kontrollieren der Materialien	0,25 h
3) Importieren der Listen	1 Minute
4) Einstellen der Listen	0,05 h
5) Exportieren der Listen	1 Minute
6) Importieren der Listen in die Kalkulationstabelle	0,3 h
8) Zuweisen der Materialien	2,75 h
10) Eingeben der Ergebnisse der Building Performance Simulation	0,05 h
Gesamtzeitbedarf	3,5 h

Probleme:

Eine vollständige und zuverlässige Feststellung der CO₂-Bilanz war aus zwei Gründen nicht möglich:

Erstens waren bei einigen benutzerspezifisch erstellten Revit-Materialien nicht erkennbar, welchen echten Materialien sie entsprechen. Hier mussten Annahmen getroffen werden.

Zweitens waren für außenliegende Schotte und die meisten Türen keine entsprechenden Objekte in der Materialbibliothek der Kalkulationstabelle vorhanden. Solche müssten nachträglich gesucht oder optimalerweise einem Produktdatenblatt entnommen werden.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.3 vorhergesagt, konnte aus der Revit-Datei mit der Gebäudetechnik keine Materialliste exportiert werden, da keine Materialien bzw. keine Mengen definiert waren.

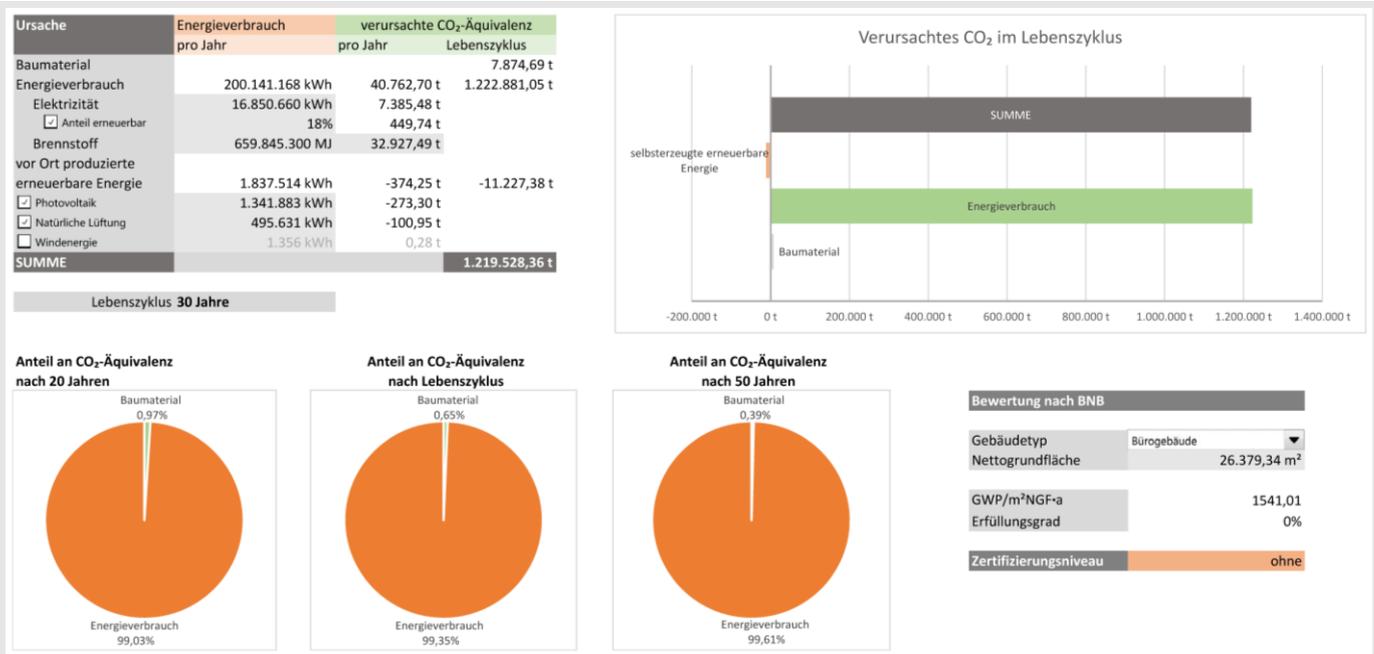


Abb.43 Ergebnisbericht der CO₂-Bilanzierung

Erkenntnisse für eine Optimierung:

Im Vergleich zu dem hohen Energieverbrauch, ist die CO₂-Äquivalenz der Baumaterialien verschwindend gering. Dennoch entfallen von der gesamten erfassten CO₂-Äquivalenz der Baumaterialien von ca. 7.875t CO₂, 86,7% auf Betonbauteile und lediglich 3,6% auf die Dämmung. Für eine ökologische Optimierung könnte demnach überlegt werden, zum einen die Dämmung (im Bürobereich) zu verstärken, um den Energieverlust zu verringern, und zum anderen, wo möglich, ökologischere Alternativen für Betonbauteile zu finden.

Für die detaillierte Aufstellung der Ökobilanz siehe Anhang I.C.

4.1.3 Ergebnisse

Die Besonderheit von Industriebauten für eine BPS sind die Produktionsanlagen, die viel Hitze produzieren und viel Energie benötigen. Sind die genauen Werte davon aber bekannt, lassen diese sich über die *Project Defaults* auch in GBS integrieren. Das heißt, GBS ist durchaus auch für solche Projekte geeignet.

Größere Probleme kann der Zustand der Datei machen: Dadurch, dass das Projekt ohne Hinblick auf eine BPS mit benutzerdefinierten Bauteilen und Materialien und vielen einzeln erstellten Wandschichten modelliert wurde, konnte die Simulation mit GBS nur eingeschränkt durchgeführt werden, mit DesignBuilder überhaupt nicht.

Ebenfalls unzureichend ist GBS, wenn sich das Projekt stark auf Technologien zur Reduzierung des Energiebedarfs stützt. So war es zum Beispiel nicht möglich eine geplante Kühlung durch Grundwasser miteinzubeziehen.

Die CO₂-Bilanzierung ist für Industriebauten nur teilweise möglich. Da Industriebauten meist sehr viel Gebäudetechnik benötigen, fehlt ein großer Teil, wenn diese nicht miteinbezogen werden kann.

Für eine reine Optimierung der Architektur anhand der Baumaterialien war das Werkzeug jedoch problemlos verwendbar.

4.2 FALLSTUDIE 2: WOHNBAU – EINFAMILIENHAUS

In der zweiten Fallstudie wird die Methodik anhand eines Revit-Projekts eines architektonischen Entwurfes für ein Einfamilienhaus beurteilt.

Das Projekt besitzt folgende Charakteristika:

- Wohnbau:
 - Kleine thermische Zonen
 - Klare thermische Trennung zwischen innen und außen
 - Wohnküche als schwierig erfassbare Mischzone
- Revit-Projekt in Form eines architektonischen Entwurfes
 - Beschattungselemente nicht getrennt modelliert
 - Standardmaterialien beinhalten thermische Eigenschaften
 - Geringe Komplexität der Modellierung verringert die Fehleranfälligkeit bezüglich der Simulation



Abb.44 Revit-Darstellung und Rendering des Projektes

4.2.1 Projektbeschreibung

Das hochbautechnisch veränderte Projekt auf Basis des „House in Saka“ des japanischen Architekturbüros *Suppose Design Office* ist ein Einfamilienhaus für vier Personen in Saka, Japan, nahe Hiroshima. In der, etwa 1 Meter unterhalb des Erdbodenniveaus liegenden, unteren Ebene befinden sich der offene Wohnbereich mit Küche und ein kleines WC. In der oberen Etage sind das Bad mit einer Terrasse, Schlafzimmer und Kinderzimmer.

Der untere Bereich ist in Beton ausgeführt und besitzt große Fensterflächen. Der obere Teil ist in Holzbauweise mit Hanfdämmung ausgeführt; Fassade und Dach sind hinterlüftet. Die obere, fensterlose Holzfassade ist an drei Punkten bis zum Erdboden hinuntergezogen. Innerhalb dieser Fassade befinden sich drei Lichthöfe unter offenen Dach. Durch diese Tektonik wird eine direkte Sonneneinstrahlung fast vollständig vermieden.

4.2.2 Arbeitsablauf

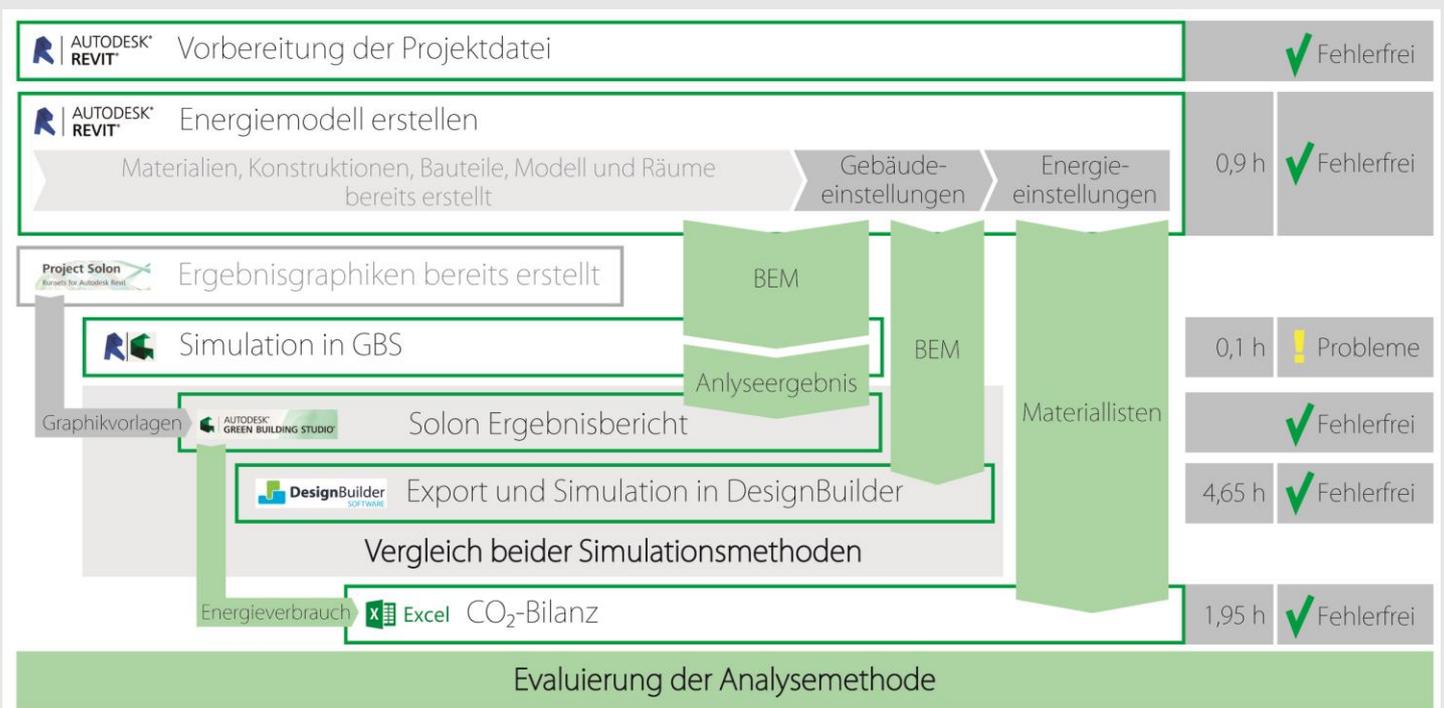


Abb.45 Arbeitsablauf Fallstudie 2

(Gelbe Markierung zeigt Einschränkungen oder stark erhöhten Arbeitsaufwand an)

Der Arbeitsablauf wird analog zum unter 4.1.2 beschriebenen Ablauf der ersten Fallstudie sein.

4.2.2.1 Modellierung des Gebäudes

Das Modell wurde vor der Erstellung des Energiemodells leicht verändert, indem getrennte Bauteilschichten zusammengefasst und beschattende Bauteile abgetrennt wurden.

Die Verglasung im Erdgeschoss war ursprünglich als Wand mit Glasmaterial modelliert, was GBS aber nicht simulieren konnte. Sie wurde daher durch Fassadenbauteile mit Glaselementen ersetzt.

4.2.2.2 Building Performance Simulation

Erstellung des Energiemodells

1) Standort

- Standort festgelegt 1 Minute

2) Position

- Geographischer Norden überprüft 1 Minute

3) Überprüfung der Modellierung

- Geometrie vollständig 0,2 h
- Geschosdecken sind korrekt
- Bauelemente sind definiert
- Thermische Eigenschaften zu Materialien überprüft
- Beschattungselemente überprüft während Modellierung

4) Gebäudetypus

- Gebäudetypus *Einzelne Familie* eingestellt und festgelegt 0,1 h

Verwendete Standardeinstellungen:

- Wärmegewinn durch Personen
- Beleuchtungslast
- Versorgungslast

5) Energieeinstellungen

- Export-Komplexität *Einfach mit Schattierungsfläche* eingestellt 0,4 h
- Gebäudehülle: *Funktionsparameter verwenden* gewählt
- Analysemodus *Gebäudeelemente* ausgewählt
- Gebäudebetrieb: 24/7

Annahmen:

- Außenluftdaten auf 5,238 L/(s·m²) und 7,426 LW/h überschlagen¹

Fehlende Informationen:

- Lüftungssystem: *Wohngebäude 14 SEER/8.3 HSPF Kompakt-Wärmepumpe* - verteilt gewählt

6) Flächen- und Volumenberechnung

- Einstellung überprüft 1 Minute

7) Räume

- Zonierung durch Räume wurde vorgenommen 0,1 h

8) Erstellung des Energiemodells

0,1 h

Gesamtzeitbedarf

0,9 h

Anmerkungen:

¹ Arbeitskreis Technik des FVLR 2014: 27^[78]

Green Building Studio

1) Erstellung der *Runsets*

- Bereits in 0 vorgenommen

2) Erstellung der *Widgets*

- Bereits in 0 vorgenommen

3) Erstellung des *Dashboards*

- Bereits in 0 vorgenommen

4) Energiesimulation durchführen

- Initialisierung 1 Minute
- Berechnung durch den Internetdienst 0,1 h

Gesamtzeitbedarf

0,1 h

Probleme:

- Versuche wurden zunächst mit ähnlicher Fehlermeldung wie in 0 abgebrochen. Verantwortlich war eine Luftschicht im Dachbauteil zur Hinterlüftung. Erst nach

vollständigem Entfernen dieser Schicht, konnte eine Energieanalyse abgeschlossen werden.

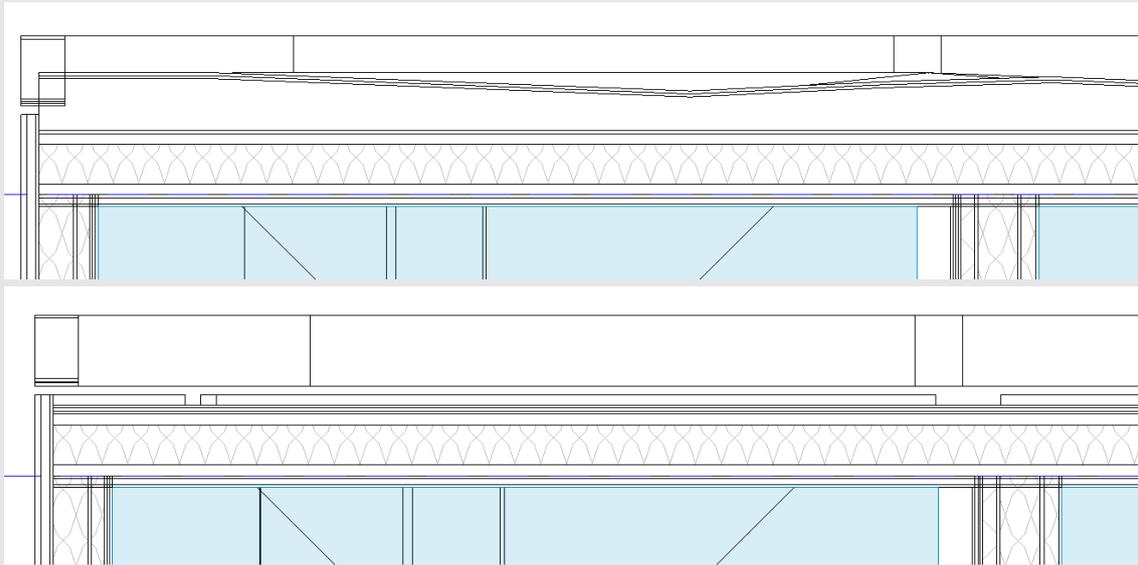


Abb.46 Dachaufbau zu Beginn (oben) und nach der notwendigen Vereinfachung (unten)

- GBS nahm als Anzahl der Bewohner nur eine einzelne Person an. Dies ist auf die hohe angegebene Fläche pro Person zurückzuführen, wie sie im *Gebäudetyp* für Einfamilienhäuser festgelegt ist. Diese wurde in Revit zwar angepasst, aber nicht in die Energiesimulation übernommen. Um dies zu korrigieren, mussten die *Project Defaults* im GBS-Internetportal geändert werden und dann die gbXML-Datei des Revit-Projektes erneut hochgeladen und simuliert werden.

Ergebnisse der Energiesimulation

Die Simulation in Revit mit einem Bewohner ergibt einen Gesamtenergieverbrauch von 1.134 MJ pro m² und Jahr bei einer Fläche von 133m².

Die im GBS-Internetportal angepasste Simulation mit vier Bewohnern dagegen ergibt einen knapp halbierten Gesamtenergieverbrauch von 565 MJ pro m² und Jahr bei einer Fläche von 155m².

Die erhöhte Flächenangabe ist nicht zu erklären. Der erhöhte Energieverbrauch bei einem Bewohner scheint laut GBS auf den stark erhöhten Heizbedarf zurückzuführen zu sein (ca. 14.760 statt 2.160 kWh), was wiederum durch den geringeren Wärmegewinn begründet sein könnte. Allerdings ist bei einem

einzelnen Bewohner auch der Kühlbedarf erhöht angegeben (ca. 4.750 statt 2.660 kWh).

Für die Photovoltaik Analyse konnte GBS für die zweite, manuell hochgeladene, gbXML-Datei keine Installationsflächen finden. Was der Grund dafür ist, dass das Dach nicht als valide Flächen identifiziert wurde, ist unbekannt. Es können zur Feststellung der potentiellen Energieerzeugung aber die Werte des ursprünglichen Simulationsdurchlaufes (mit nur einem Bewohner) verwendet werden.

Für den detaillierten Ergebnisbericht siehe Anhang II.B.1.

Project Solon

Die Diagramme aus Project Solon zeigen die aus dem Energieverbrauch resultierenden Kosten für verschiedene Konfigurationen von folgenden Gebäudeparametern:

- Gebäudeausrichtung
- Tageslicht- und Belegungssensoren
- Window-to-Wall-Ratio für jede Himmelsrichtung
- Eigenschaften der Verglasung für jede Himmelsrichtung:
 - SHGC: Solar Heat Gain Coefficient
 - VLT: Visual Light Transmission
- Maß der Luftinfiltration

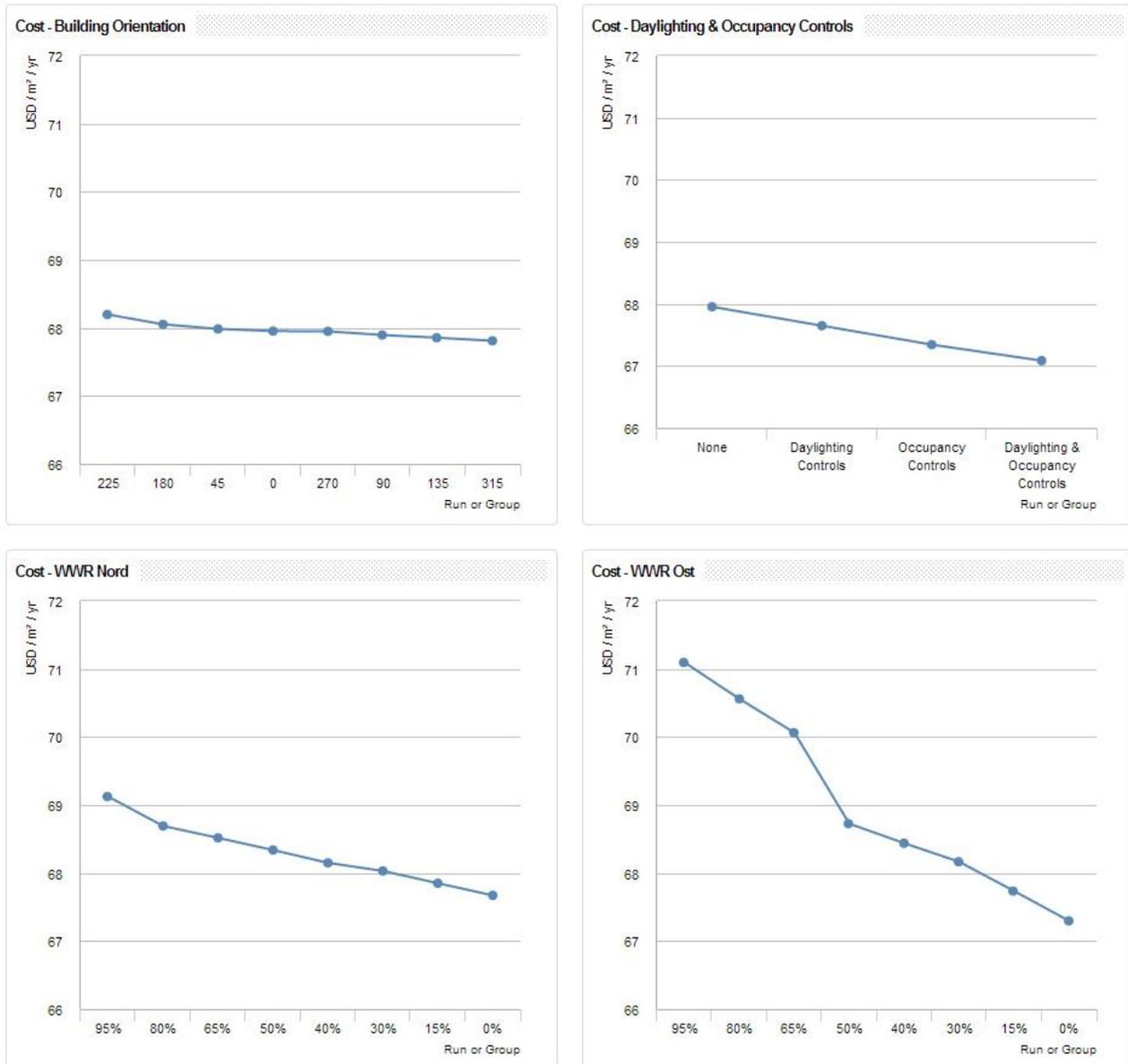


Abb.47 Grafiken aus Project Solon mit Informationen zu Optimierungspotenzial (Teil 1 von 3)

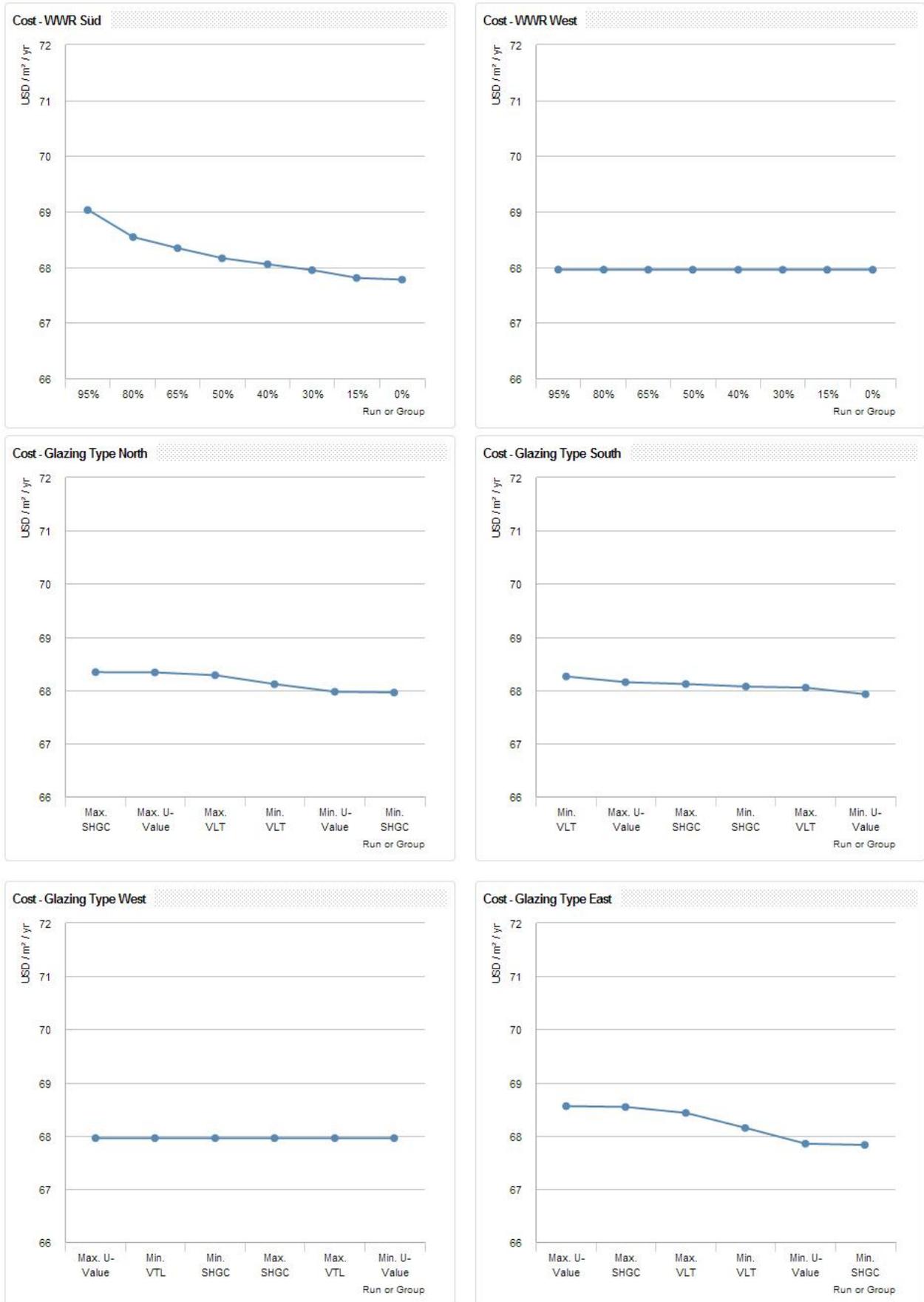


Abb.48 Grafiken aus Project Solon mit Informationen zu Optimierungspotenzial (Teil 2 von 3)

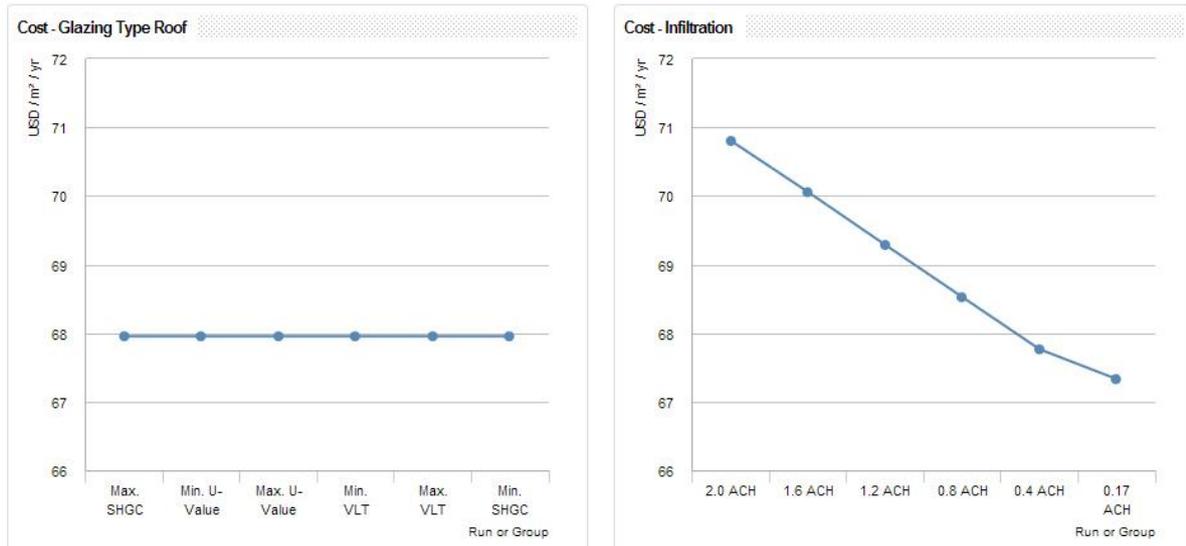


Abb.49 Grafiken aus Project Solon mit Informationen zu Optimierungspotenzial (Teil 3 von 3)

Anhand der Ergebnisse aus Project Solon lässt sich die Architektur optimieren. Erkenntnisse aus den Analyseergebnissen sind:

- Gebäudeorientierung wirkt sich kaum aus; optimal wäre aber wenn um -45° rotiert werden würde.
- Daylighting und Occupancy Controls wirken sich nur gering aus, was vermutlich auf die geringe Nutzfläche und die 24/7 Nutzung zurückzuführen ist.
- Im Norden, Süden und Osten ist ein minimales Fenster-zu-Wand-Verhältnis anzustreben. Das ist auf das heiße Klima im Süden der japanischen Hauptinsel zurückzuführen. Im Westen dagegen hat es keine Auswirkung.
- Bezüglich Verglasung ist beispielsweise im Süden ein maximaler aber im Norden ein minimaler Transmissionsgrad (VLT) anzustreben.
- Bezüglich Luftinfiltration ist eine möglichst hohe Luftdichtigkeit anzustreben.
- Dass sowohl Verglasung als auch Fenster-zu-Wand-verhältnis ausschließlich im Westen keinerlei Auswirkungen haben, könnte auf einen Fehler in der Simulation bei der Westseite schließen lassen.

DesignBuilder

1) Exportieren des Energiemodells aus Revit als gbXML-Datei	1 Minute
2) Neues Projekt erstellen	
▪ Location Template: Hiroshima, Japan	0,05 h
3) Add building	
▪ Type: Architect early stage design	0,1 h
▪ Activity Template: ASHRAE 90.1-2007 – ASHRAE 62.1 - Residential - Dwelling unit (with kitchen)	
▪ Construction Template: Reference, Medium weight	
▪ Glazing Template: Triple glazing, no shading	
▪ Lighting Template: LED	
4) Import BIM/gbXML model	0,5 h
5) Einstellungen: Activity	
▪ Occupancy – Density: 0,0257 People/m ²	1 Minute
▪ Metabolic – Activity: Seated quiet	
6) Einstellungen: HVAC	
▪ Natural Ventilation aktiviert	1 Minute
7) Energiesimulation durchführen	
▪ Verschiedene Berichte wurden nacheinander generiert	4 h
Gesamtzeitbedarf	4,65 h

Ergebnisse der Energiesimulation

Mit Design Builder wurden mit ca. 31.300 kWh Gesamtenergieverbrauch ein fast 30% höherer Verbrauch errechnet. Prozentual gesehen hat die Kühlung mit ca. 13% laut DesignBuilder etwa denselben Anteil am Energiebedarf wie laut GBS (14%). Die Beheizung liegt bei 7,6% in DesignBuilder und 11,4% in GBS. Lüfter und andere technische Ausstattung (ohne Beleuchtung) machen laut DesignBuilder 57% und laut GBS ähnlich hohe 54% aus.

Für detailliertere Ergebnisberichte siehe Anhang II.B.2.

Optimierung mit DesignBuilder

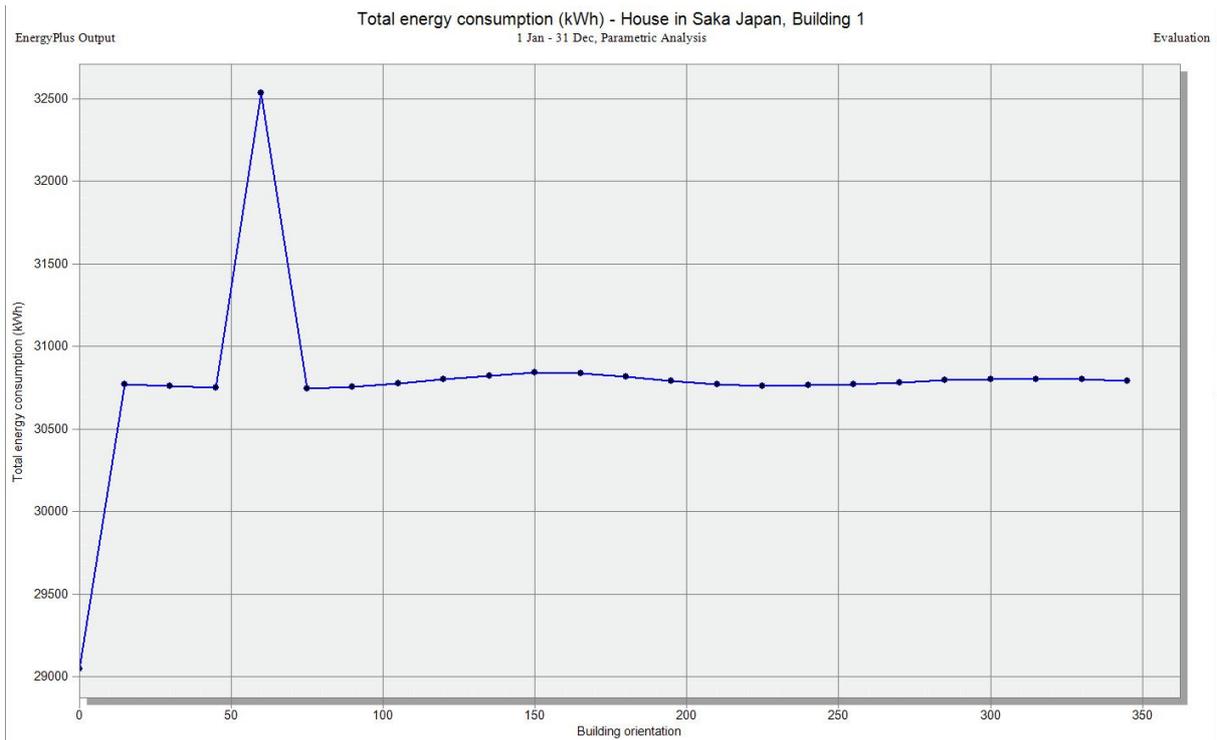


Abb.50 Design Builder: Gesamtenergieverbrauch nach Gebäudeausrichtung

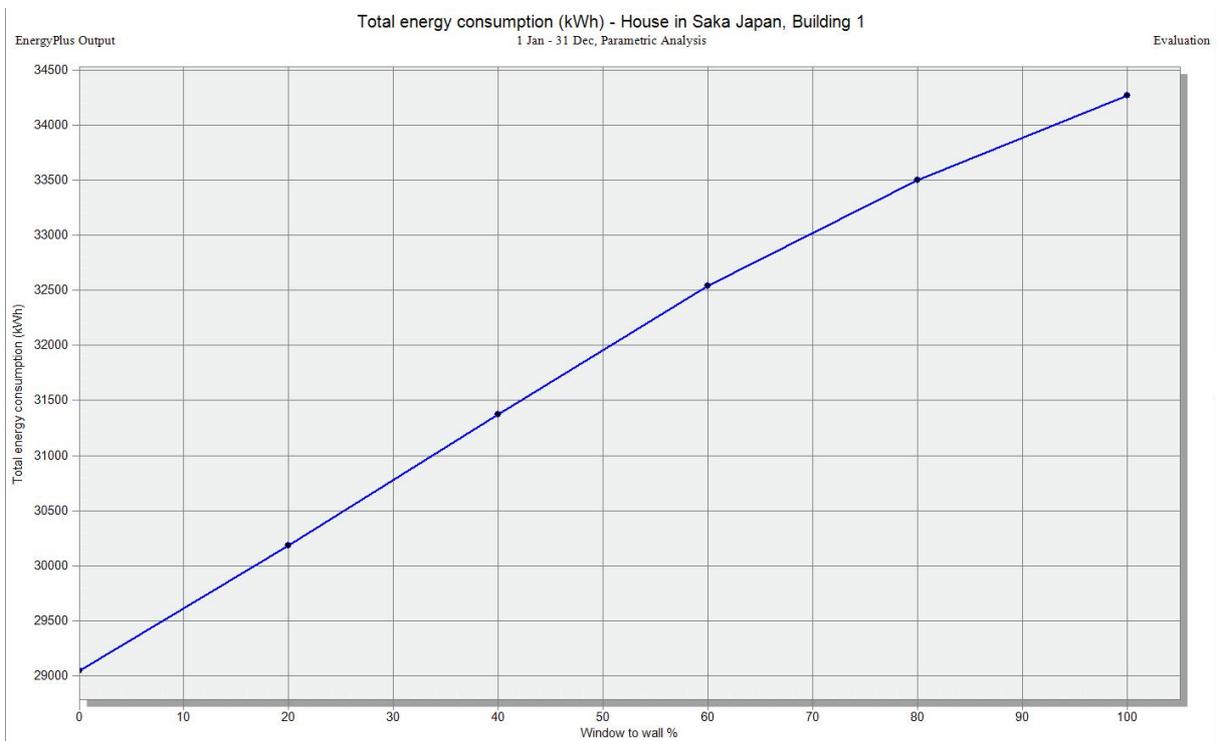


Abb.51 Design Builder: Gesamtenergieverbrauch nach Window-to-Wall-Ratio

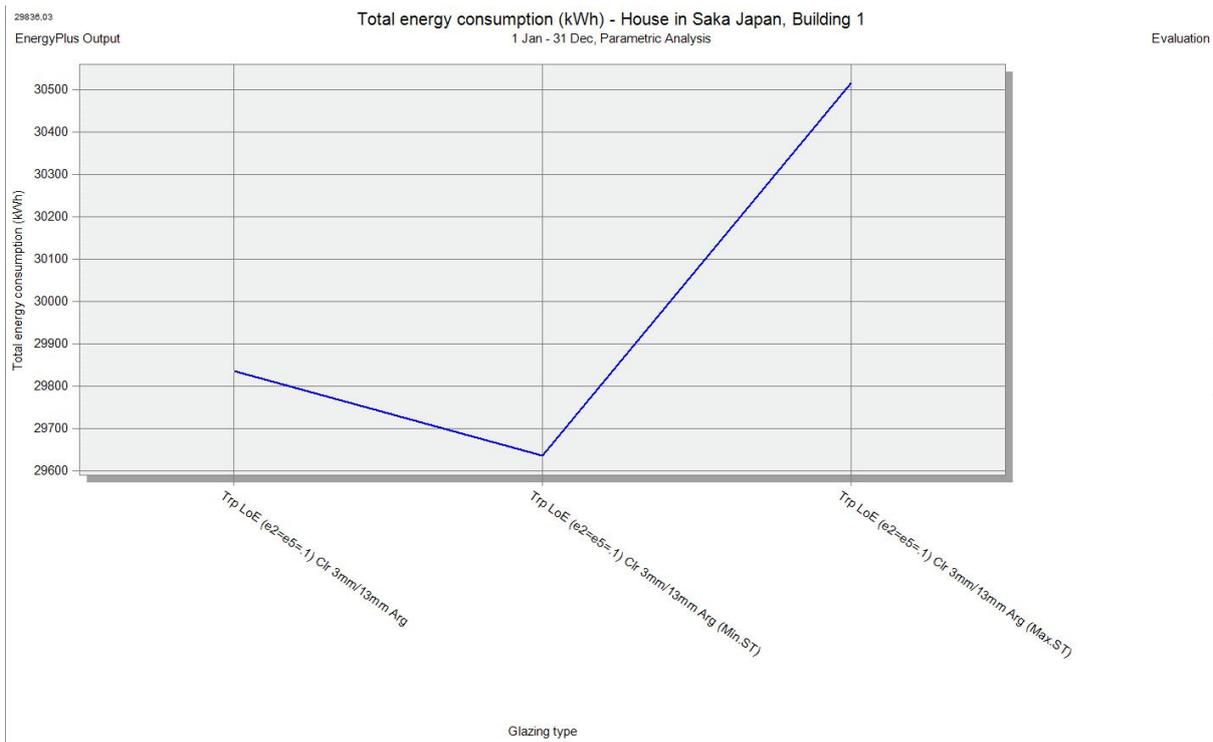


Abb.52 Design Builder: Gesamtenergieverbrauch nach Verglasungstyp

Die Verglasungstypen aus obiger Graphik besitzen, von links nach rechts folgende Eigenschaften:

Kennung	Solar Transmission	Light Transmission	U-Wert
1	0,679	0,738	0,789
2 Min. ST	0,142	0,169	0,789
3 Max. ST	0,470	0,661	0,789

Anhand der Ergebnisse lässt sich die Architektur optimieren und die Erkenntnisse denen aus GBS vergleichen:

- Bei 0° und 60° Gebäuderotation sind relativ starke Spitzen. Sind die Ergebnisse korrekt, ist die aktuelle Gebäudeorientierung optimal. Bei -45° stellt DesignBuilder im Gegensatz zu GBS kaum Unterschied zum Mittelwert fest.
- DesignBuilder erhält wie auch GBS ein minimales Fenster-zu-Wand-Verhältnis als optimalen Wert.
- Die Verglasung war nur für das gesamte Gebäude, nicht aber wie in GBS einzeln nach Orientierungsrichtung analysierbar. DesignBuilder

empfiehlt aber wie auch GBS im Schnitt eher minimale Transmissionswerte.

Vergleich der Simulationsmethoden

Für das kleine Projekt des Einfamilienhauses war GBS vollkommen ausreichend. Die klaren Vorteile von DesignBuilder zur tieferen Spezifikation waren bei diesem Projekt nicht notwendig. Die meisten Ergebnisse waren in beiden Programmen ähnlich. GBS lief problemlos und bei den Optimierungsgrafiken sogar schneller wie DesignBuilder und lieferte zudem unter anderem Vorschläge für das bestgeeignete HKLS-System durch die alternativen Simulationsdurchgänge. Project Solon kann zusätzlich zahlreiche schnell erstellte und ansprechende Diagramme liefern, welche zum Beispiel für eine Präsentation verwendet werden können.

4.2.2.3 CO₂-Bilanzierung

1) Kennzeichnen von nicht zu erfassenden Elementen	0,1 h
2) Kontrollieren der Materialien	0,25 h
3) Importieren der Listen	1 Minute
4) Einstellen der Listen	0,05 h
5) Exportieren der Listen	1 Minute
6) Importieren der Listen in die Kalkulationstabelle	0,25 h
7) Zuweisen der Materialien	1,25 h
8) Eingeben der Ergebnisse der Building Performance Simulation	0,05 h
Gesamtzeitbedarf	1,95 h

Erkenntnisse:

Der Stahlbeton hat mit über 117% der gesamten CO₂-Äquivalenz die bei weitem stärkste negative Auswirkung auf die Bilanz. Die Holzbaustoffe allerdings gleichen mit ihrer negativen CO₂-Äquivalenz die des Stahlbetons zu über 77% wieder aus.

Wie man der CO₂-Bilanz entnehmen kann, haben bei einem 50-jährigen Lebenszyklus des Einfamilienhauses die Baumaterialien lediglich ca. 7% Anteil an der gesamten CO₂-Äquivalenz. Der Energiebedarf wird durch Photovoltaik auf dem Dach zu ca. 50% gedeckt.

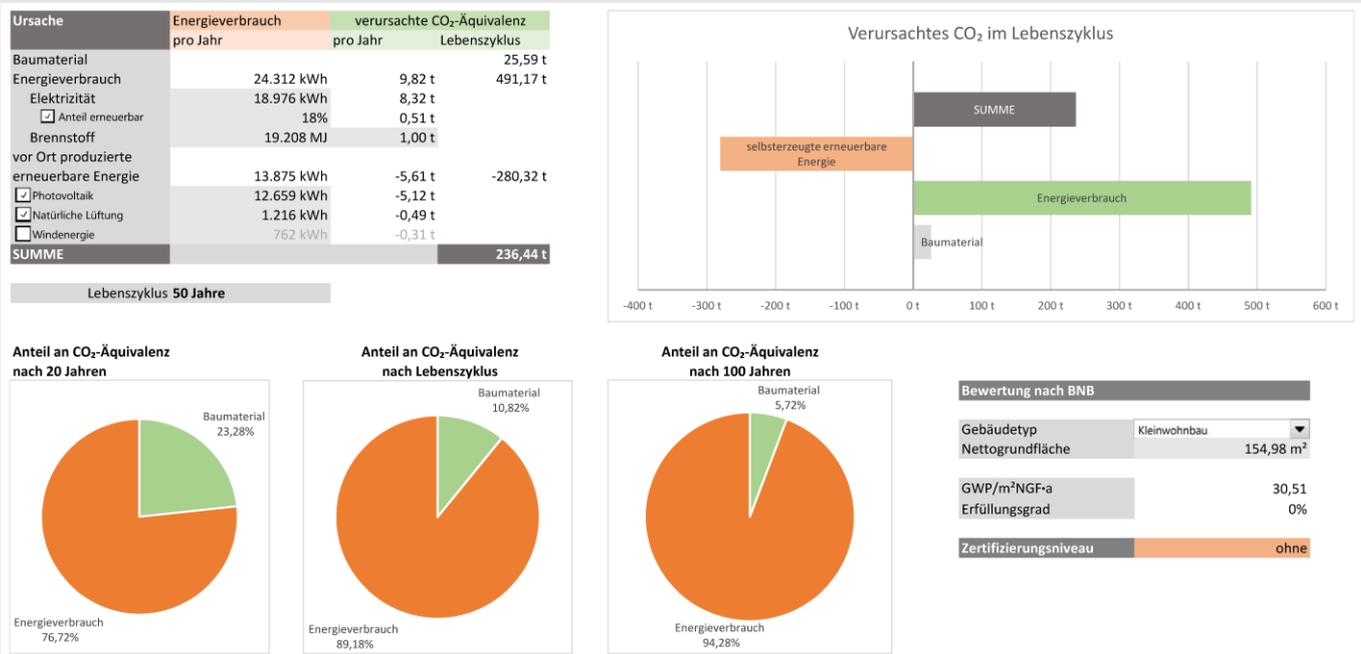


Abb.53 Ergebnisbericht der CO₂-Bilanzierung

Für die detaillierte Aufstellung der Ökobilanzierung siehe Anhang II.C.

4.2.3 Ergebnisse

Bei dem kleinen und wenig komplexen Projekt funktionierte sowohl die Simulation mit GBS als auch Project Solon einwandfrei.

Durch den Zustand des Modelles musste einige Energie, vor allem in die Definierung der Beschattungselemente, investiert werden, die darauffolgende ökologische Analyse lief aber einfach und sehr schnell ab.

4.3 FALLSTUDIE 3: BÜROBAU

In der dritten Fallstudie soll durch die entwickelte Methodik ein Entwurf in Revit für ein Bürohochhaus evaluiert und daraufhin optimiert werden. Der Entwurf wurde von vorneherein mit Rücksicht auf eine spätere Energiesimulation erstellt; alle Regeln zur Modellierung wurden daher bei der Erstellung berücksichtigt.

Das Projekt besitzt folgende besonderen Charakteristika:

- Bürobau:
 - Teilweise große thermische Zonen (Großraumbüros)
 - Hoher Eingangsbereich/Foyer
 - Innenhof
 - Hochhaus: Große sonnenzugewandte Fläche
- In Hinblick auf Energiesimulation erstelltes Revit-Projekt
 - Modellierregeln berücksichtigt: Große Zeitersparnis erwartet



Abb.54 Revit-Darstellung des Grundentwurfes.

Tragende Bauteile: Stahlbeton, Verkleidung: Metall

4.3.1 Projektbeschreibung

Der Entwurf besteht aus einem Hochhausbau mit 25 Stockwerken, hauptsächlich für Büroflächen. Im Erdgeschoss ist bei einer größeren Raumhöhe eine öffentliche Nutzung denkbar. Das Hochhaus steht auf einer Basis, welche zwei vierstöckige Seitenflügel mit jeweils einem Innenhof ausbildet. Zentral im Turm befindet sich ein Lichthof, in dem jeweils 5 Stockwerke durch bequeme Treppen verbunden sind, um Verkehrswege neben den Aufzügen zu schaffen. Der Bau ist zunächst in Stahlbeton ausgeführt; die Fassadenwände sind mit Metallpaneelen verkleidet.

Die Energiesimulation des Gebäudes wurde für den Standort Tokio, Japan, durchgeführt. Der Standort wurde gewählt, wegen der großen jährlichen Amplitude der Temperaturen von leichten Minusgraden bis zu heiß-feuchten 30°C und wärmer.

4.3.2 Arbeitsablauf

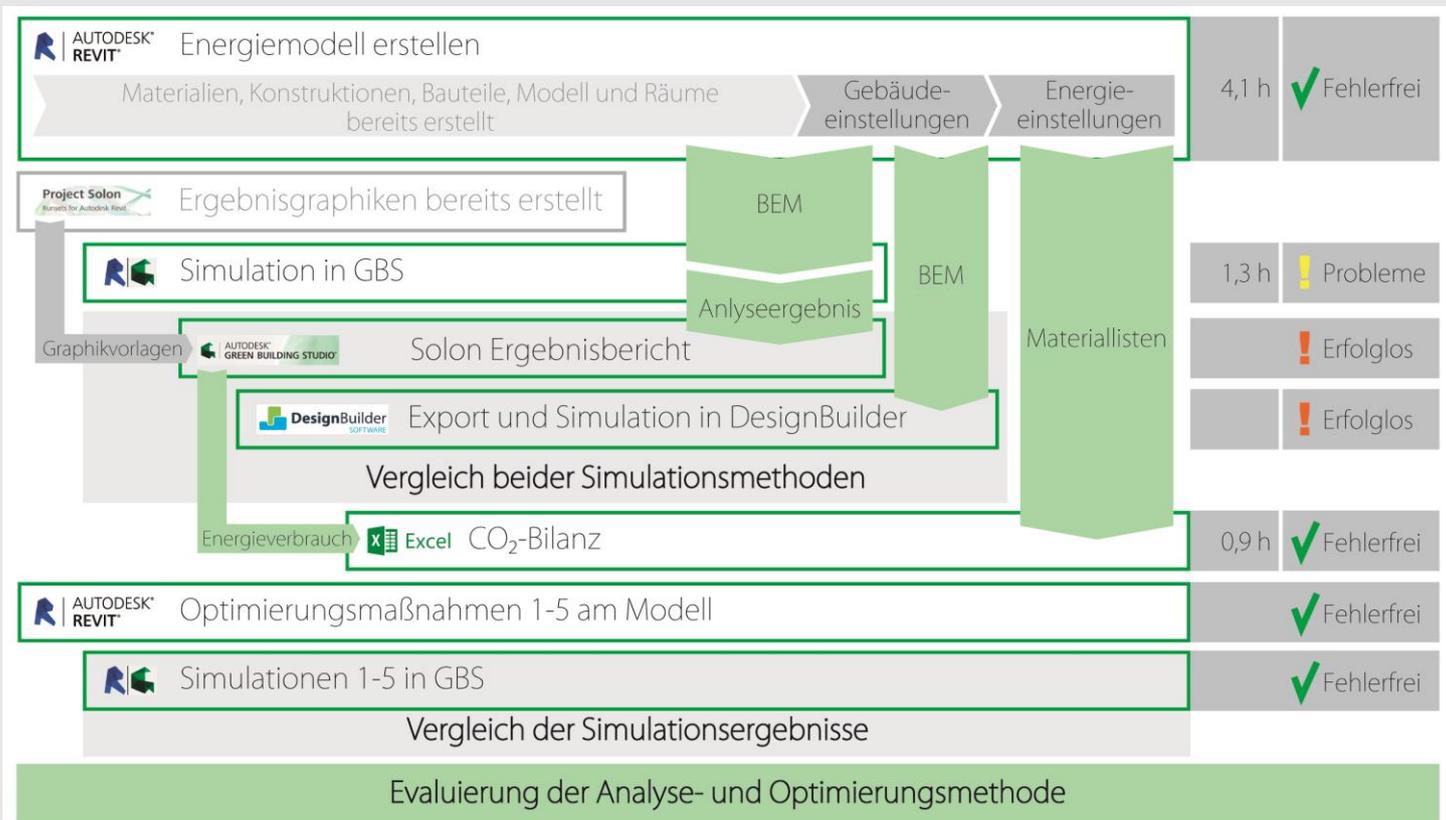


Abb.55 Arbeitsablauf Fallstudie 3

(Gelbe Markierung zeigt Einschränkungen oder stark erhöhten Arbeitsaufwand an)

Nach der Evaluierung des Entwurfes durch Energiesimulation und CO₂-Bilanzierung wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, wird der Entwurf dann anhand der Ergebnisse optimiert und erneut evaluiert werden.

4.3.2.1 Modellierung des Gebäudes

Während der Modellierung wurden alle bekannten Fehlerquellen versucht zu umgehen:

- Beschattende Gebäudeelemente, die nicht Teil einer thermischen Zone sind, sind als abgetrennte Bauteile ohne thermische Eigenschaften modelliert
- Dächer haben keine Hinterlüftung
- Wände sind als Gesamtelement statt als einzelne Schichten erstellt

4.3.2.2 Building Performance Simulation

Erstellung des Energiemodells

1) Standort

- Standort festgelegt 1 Minute

2) Position

- Geographischer Norden überprüft 1 Minute

3) Überprüfung der Modellierung

- Geometrie vollständig korrekt
- Geschossdecken sind korrekt modelliert
- Bauelemente sind definiert
- Thermische Eigenschaften zu Materialien überprüft
- Beschattungselemente überprüft 0,5h

4) Gebäudetypus

- Gebäudetypus *Einzelne Familie* eingestellt und festgelegt 0,1 h

Verwendete Standardeinstellungen:

- Wärmegewinn durch Personen
- Beleuchtungslast
- Versorgungslast

5) Energieeinstellungen

- Export-Komplexität *Einfach mit Schattierungsfläche* 0,25 h
eingestellt
- Gebäudehülle: *Funktionsparameter verwenden* gewählt
- Analysemodus *Gebäudeelemente* ausgewählt
- Gebäudebetrieb: 24/7

Annahmen:

- Außenluftdaten auf 13,89 L/s, 1,389 L/(s·m²) und 6,0 LW/h
überschlagen¹

Fehlende Informationen:

- Lüftungssystem: *Zentraler Volumenstromregler, HW-Wärme,*
Kälteanlage 5,96 COP, Heizkessel 84,5 eff. gewählt

6) Flächen- und Volumenberechnung

- Einstellung überprüft 1 Minute

7) Räume

- Zonierung durch Räume wurde vorgenommen 2,5 h

8) Erstellung des Energiemodells

0,25 h

Gesamtzeitbedarf

4,1 h

Anmerkungen:

² Arbeitskreis Technik des FVLR 2014: 27^[78]

Green Building Studio

1) Erstellung der *Runsets*

- Bereits in 0 vorgenommen

2) Erstellung der *Widgets*

- Bereits in 0 vorgenommen

3) Erstellung des *Dashboards*

- Bereits in 0 vorgenommen

4) Energiesimulation durchführen

- Initialisierung 0,3 h
- Berechnung durch den Internetdienst 1 h

Gesamtzeitbedarf 1,3 h

Probleme:

Versuche wurden zunächst mit ähnlicher Fehlermeldung wie in 4.1.2.2 abgebrochen.

```
Issue: An error has occurred related to the DOE-2 simulation. It is below and may be of assistance in determining the issue with your building model. If it is unclear what the issue is, please submit the issue at the link below and include the gbXML file used for this run. <br/> * 785 * ..<br/>
>*ERROR*****Can not simulate LAYERS aim0506 as given. The wall is too thick
or<br/> * 811 * ..<br/>*ERROR*****Can not simulate LAYERS aim0542 as given.
The wall is too thick or<br/> too dense.<br/>*ERROR*****Can not simulate
LAYERS aim0542 as given. The wall is too thick or<br/> * 821 * ..<br/>*ERROR*****
```

In diesem Fall waren mehrere Geschossdecken zu dick. Die Stahlbetonstärke wurde daher verringert.

Ergebnisse der Energiesimulation

Die Simulation ergab einen jährlichen Energieverbrauch von 1.221 MJ pro Jahr und Quadratmeter bei 33.105 m² und mit 1.298 Nutzern. Der größte Anteil am Gesamtenergieverbrauch wird mit fast 50% durch Heizung verursacht.

Daraufhin wurde der beste alternative Simulationsdurchgang mit einer Kompakt-Wärmepumpe nach ASHRAE-90.1-2010 betrachtet, bei dem der Energiebedarf um fast die Hälfte reduziert werden konnte. Hier wurde insbesondere bei der Heizung sehr stark eingespart, so dass sie nur noch 13% ausmachte. Die elektrische Ausstattung verbrauchte hier mit 31% den größten Anteil, gefolgt von Kühlung und Beleuchtung.

Sind die Werte korrekt, sollte also insbesondere auf ein effizientes Heizungssystem und im Weiteren auf Ausstattung, Energiemanagement Wert gelegt werden. Was getestet werden sollte ist, ob Beschattungsmaßnahmen oder solarer Wärmegewinn im Entwurf bevorzugt werden sollten.

Auch hier konnten, wie in Fallstudie 1, die Diagramme aus Project Solon leider nicht geladen werden.

Für den detaillierten Ergebnisbericht siehe Anhang III.B.1.

DesignBuilder

1) Exportieren des Energiemodells aus Revit als gbXML-Datei	1 Minute
2) Neues Projekt erstellen	
▪ Location Template: Hiroshima, Japan	0,05 h
3) Add building	
▪ Type: Architect early stage design	0,1 h
▪ Activity Template: ASHRAE 90.1-2007 – ASHRAE 62.1 - Residential - Dwelling unit (with kitchen)	
▪ Construction Template: Reference, Medium weight	
▪ Glazing Template: Triple glazing, no shading	
▪ Lighting Template: LED	
4) Import BIM/gbXML model	0,5 h
5) Einstellungen: Activity	
▪ Occupancy – Density: 0,0257 People/m ²	1 Minute
▪ Metabolic – Activity: Seated quiet	
6) Einstellungen: HVAC	
▪ Natural Ventilation aktiviert	1 Minute
7) Energiesimulation durchführen	Abgebrochen

Gesamtzeitbedarf

Die Simulation konnte auch hier nicht durchgeführt werden. Das Programm gab bei mehreren Versuchen mit verschiedenen gbXML-Dateien des Projektes Fehlermeldungen mit „out of memory“ in verschiedenen Variationen aus. Dieses Projekt hatte tatsächlich die größte Dateigröße, weshalb unzureichender Festplatten- oder Arbeitsspeicher auf der Hand liegen. Die Ursache bleibt jedoch zweifelhaft, da die Speicherkapazitäten de facto nicht annähernd ausgeschöpft wurden.

4.3.2.3 CO₂-Bilanzierung

1) Kennzeichnen von nicht zu erfassenden Elementen	keine
2) Kontrollieren der Materialien	bei Modellierung

3) Importieren der Listen	Vorlage
4) Einstellen der Listen	Vorlage
5) Exportieren der Listen	1 Minute
6) Importieren der Listen in die Kalkulationstabelle	0,1 h
7) Zuweisen der Materialien	0,75 h
8) Eingeben der Ergebnisse der Building Performance Simulation	0,05 h
Gesamtzeitbedarf	0,9 h

Erkenntnisse:

Für die Energiekennwerte wurden die Ergebnisse originalen Simulationsdurchlaufs des Entwurfes verwendet. Der zugekauften Energie des Gebäudes von über 10.000 MWh, welche bei einem Anteil erneuerbarer Energien von 18% ca. 148.000 Tonnen CO₂ verursachen würden, gegenübergestellt, ist das GWP der Baumaterialien aber sehr gering.

Der wieder größte CO₂-Verursacher ist auch hier Stahlbeton mit fast 80% der Gesamtmenge an CO₂. Stahlprofile, insbesondere für die Fassaden, machten lediglich ca. 7% aus.

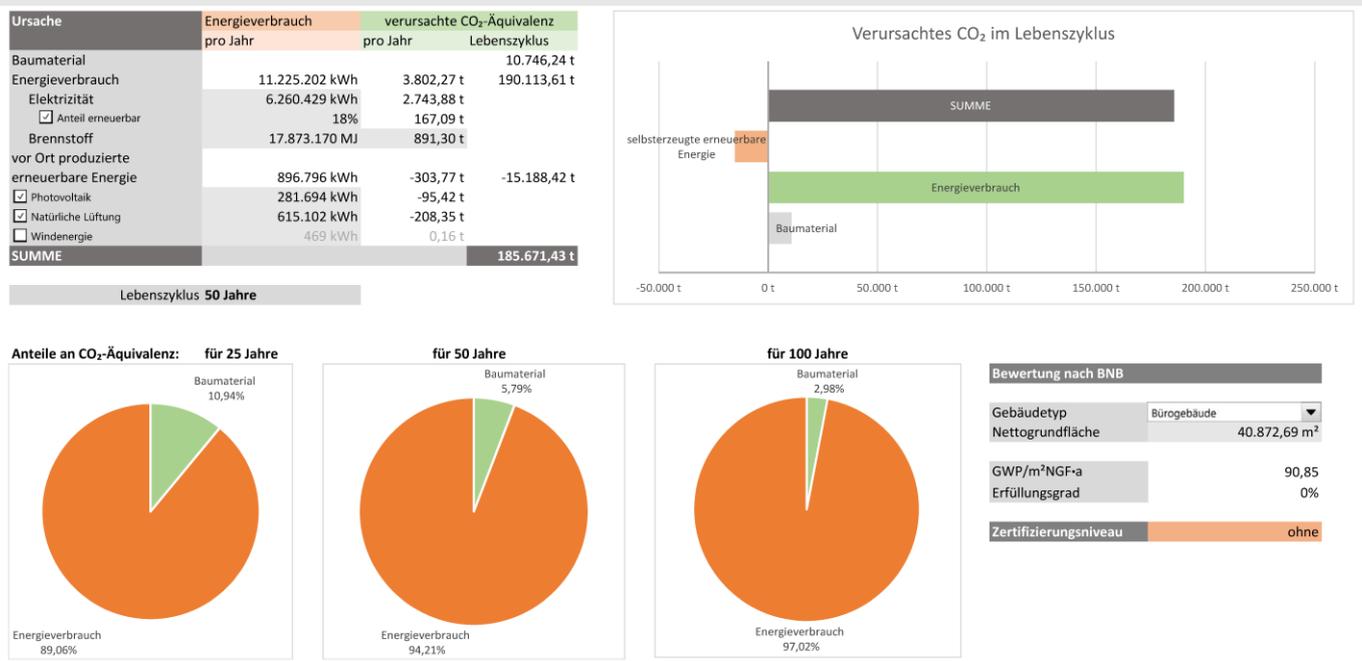


Abb.56 Ergebnisbericht der ersten CO₂-Bilanzierung

Für die detaillierte Aufstellung der Ökobilanzierung siehe Anhang III.C.

4.3.3 Optimierung

Der Entwurf wurde schließlich anhand vorangegangener Erkenntnisse optimiert. Zum einen wurden Maßnahmen aus Abschnitt 2 angewandt, zum anderen wurde der Entwurf, wo möglich, in Holzbauweise ausgeführt. Für die Bauweise wurde das *Timber Tower Research Project* von SOM als Referenz genommen (Skidmore, Owings & Merrill, LLP 2013)^[79], in dem die Möglichkeiten eines Hochhausbaues in Holzbauweise untersucht wurden.

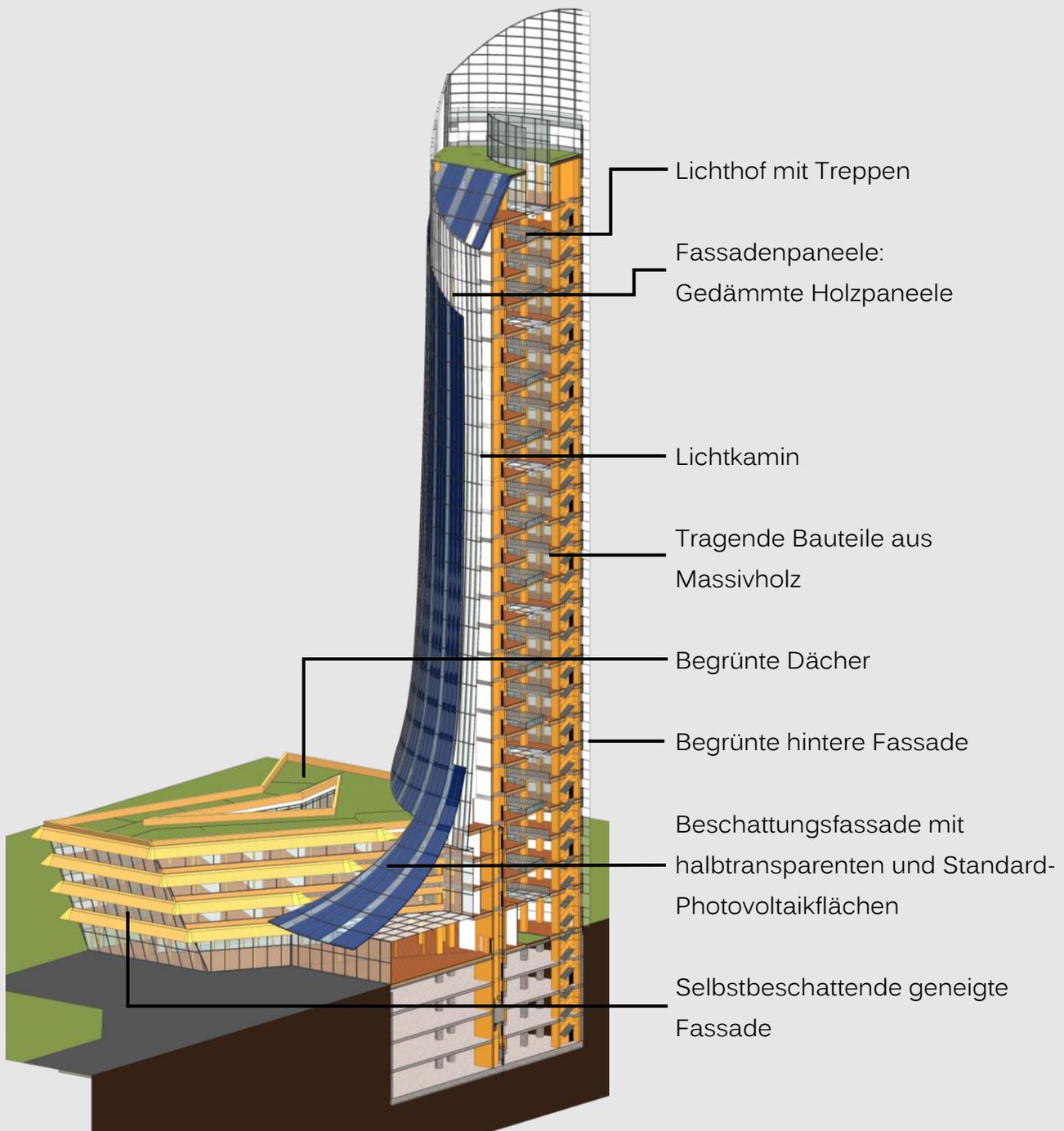


Abb.57 Revit 3D-Schnitt der letzten Optimierungsstufe

4.3.3.1 Building Performance Simulation

Bezüglich Energieeffizienz wurde der Entwurf in vier Schritten optimiert und mit GBS evaluiert, um die Auswirkungen zu sehen:

- 1) Optimierungen nach Project-Solon-Ergebnissen:

Da keine Ergebnisse aus Project Solon erhalten werden konnten, wurde lediglich die Ausrichtung des Gebäudes geändert, in dem die Hauptfassade nach Süden ausgerichtet wurde.

2) Beschattung und solarer Wärmege Gewinn

Es soll herausgefunden werden, ob Beschattungsmaßnahmen zur Reduzierung des Kühlbedarfs oder maximale Glasflächen zur Erhöhung des Wärmege winnes durch Sonneneinstrahlung und somit Reduzierung des Heizbedarfes einen größeren positiven Einfluss auf den Energiebedarf besitzen.

a) Beschattungsflächen hinzugefügt:

Der südlichen Fassade wurde eine beschattende Fassade vorgesetzt, um Überhitzung entgegenzuwirken.

b) Glasflächen maximiert:

Die südliche Fassade wurde vollständig verglast.

3) Lichtkamin hinzugefügt:

An der südlichen Seite wurde ein Lichtkamin erstellt. Das an dieser Stelle auf die Glasfassade auftreffende Sonnenlicht, soll die Luft im Lichtkamin erhitzen, welche sich daraufhin nach oben und schließlich aus dem Gebäude hinaus bewegt. Durch den zentralen Lichthof wird frische Luft von oben nach unten nachgezogen. Dadurch soll eine natürliche Belüftung, weitestgehend ohne mechanische Ventilatoren, möglich sein.

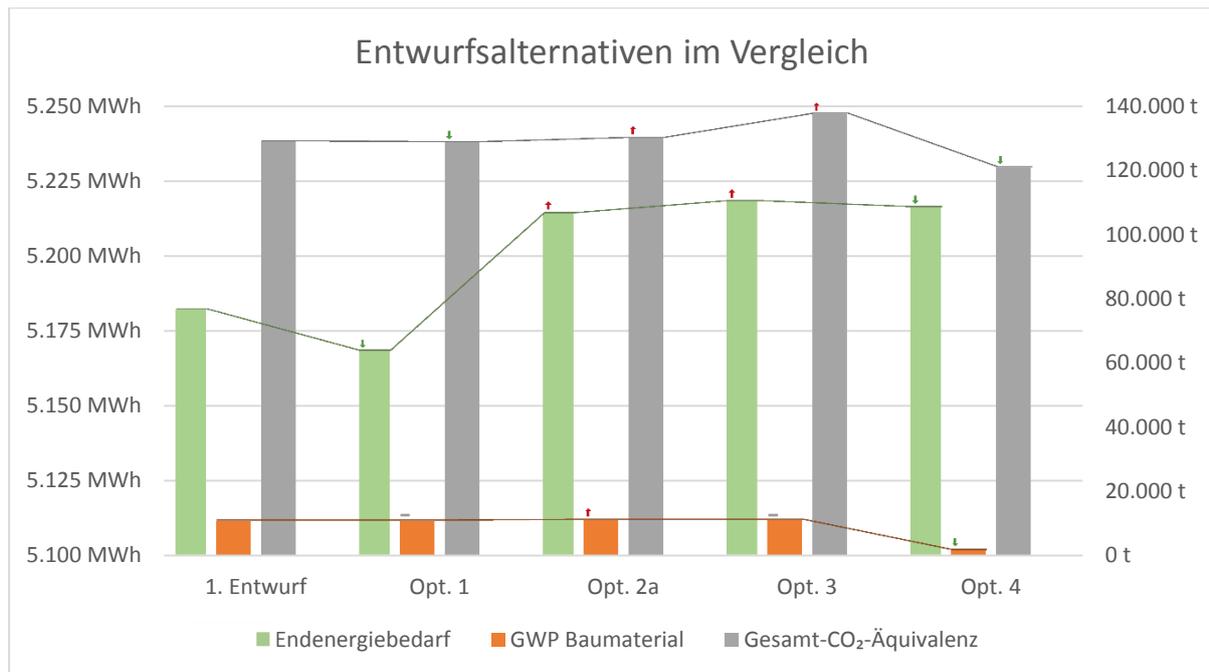
4) Ausführung in Holzbauweise:

Durch höhere U-Werte von Holzbauteilen wird auch erwartet, dass sich der Energieverbrauch reduziert.

Ergebnisse der Simulationsdurchgänge im Vergleich

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der einzelnen Entwurfsvarianten im Vergleich zu sehen. In der obigen sind die Werte der ursprünglichen Simulationen nach den Einstellungen aus Revit, darunter die alternativen Simulationsdurchgänge mit der Kompakt-Wärmepumpe.

Base Runs	1. Entwurf	1.	2.a	2.b	3.	4.	5.
Energiekennwert (in MJ/a/m ²)	1.221	1.245	1.283	1.270	1.286	1.284	1.285
zu vorheriger		+2,0%	+3,1%	-1,0%	+1,3%	-0,2%	+0,1%
Gesamtenergiebedarf (in GJ)	40.411	41.210	42.464	42.411	42.544	42.777	42.803
davon Heizung	44,6%	45,4%	47,1%	45,8%	47,2%	46,7%	46,7%
zu vorheriger		+3,8%	+7,1%	-2,9%	+3,4%	-0,6%	+0,1%
davon Kühlung	15,5%	15,4%	14,9%	15,3%	14,9%	15,2%	15,2%
zu vorheriger		+1,1%	+0,2%	+2,2%	-2,1%	+2,2%	+0,0%
Photovoltaic (in MWh)	281,7	321,5	278,7	318,3	278,7	284,1	284,1
zu vorheriger		+14%	-13%	+14%	-12%	+2%	-0%
Natürliche Belüftung (in MWh)	615,1	605,7	590,2	624,6	590,2	608,0	608,2
zu vorheriger		-1,5%	-2,6%	+5,8%	-5,5%	+3,0%	+0,0%
Alternate Runs	1. Entwurf	1.	2.a	2.b	3.	4.	5.
Energiekennwert (in MJ/a/m ²)	661	663	662	663	662	660	660
zu vorheriger		+0,3%	-0,2%	+0,2%	-0,2%	-0,3%	+0,0%
Gesamtenergiebedarf (in GJ)	21.885	21.941	21.899	22.144	21.913	21.989	21.993
davon Heizung	13,0%	13,1%	13,4%	12,6%	13,4%	12,8%	12,8%
zu vorheriger		+1,0%	+2,0%	-5,5%	+5,9%	-4,0%	+0,0%
davon Kühlung	20,8%	20,8%	20,7%	21,2%	20,7%	21,1%	21,2%
zu vorheriger		+0,3%	-0,7%	+3,5%	-3,3%	+2,2%	+0,5%
Photovoltaic (in MWh)	281,7	321,5	278,7	318,3	0,0	284,1	284,1
zu vorheriger		+14%	-13%	+14%	-100%	-11%	-0%
Natürliche Belüftung (in MWh)	400,0	400,7	394,6	421,4	394,7	415,1	415,4
zu vorheriger		+0,2%	-1,5%	+6,8%	-6,3%	+5,2%	+0,1%



Leider musste festgestellt werden, dass keine Optimierungsmaßnahme einen signifikanten Unterschied der Ergebnisse bewirkte. Auch nicht bei einer fünften Maßnahme, in der, mit der Absicht einer maximalen Beschattung, der Lichtkamin und die Beschattungsfassade vollständig lichtundurchlässig geschlossen wurden. Auch die Energiekennzahlen der besten automatisch generierten alternativen Simulationdurchgänge ergaben keine signifikanten Unterschiede.

Zusätzlich ist auch das Potenzial des intendierten Entwurfes bezüglich Energiegewinne nicht ausreichend erfassbar, da keine Spezifikationen möglich sind. So konnten alle vertikalen Photovoltaikflächen nicht berücksichtigt werden. Die Berechnung der Energieersparnisse durch natürliche Belüftung basiert auf Annahmen, die die tatsächliche Gebäudegeometrie und Belüftungsöffnungen nicht verwenden; der Lichtkamin konnte somit nicht in die BPS miteinbezogen werden.

Die Frage ist nun ob insbesondere die Beschattungsmaßnahmen tatsächlich keine Auswirkung haben, was zweifelhaft erscheint, oder ob GBS nicht in der Lage war diese zu simulieren.

4.3.3.2 CO₂-Bilanz

Die ökologische Nachhaltigkeit des Materialverbrauches soll durch Holzbauweise und Begrünung optimiert werden:

Alle nichttragenden Innenwände, Dächer und die Außenwände der Seitenflügel sind in Leichtbauweise ausgeführt. Tragende Innenwände und Stützen sind aus Massivholz. Die Geschossdecken sind jeweils zu ihrer halben Höhe aus einer Massivholzschicht über einer Stahlbetonschicht. Die Pfosten der Fassaden der Seitenflügel und des Foyers sind ebenfalls aus Holz. Dadurch soll die CO₂-Bilanz bezüglich der Baumaterialien deutlich reduziert werden.

Zusätzlich sind alle Dächer und die nördliche Fassade begrünt. Dies soll durch ein Säubern der Luft durch die Pflanzen die CO₂-Bilanz zusätzlich verbessern.

Für die Energiekennwerte wurden die Ergebnisse des besten alternativen Simulationsdurchlaufes verwendet. Dieser verwendet eine Kompakt-Wärmepumpe nach ASHRAE-90.1-2010 und konnte die Energiekennzahl um fast 50% auf 660 MJ pro Jahr und Quadratmeter reduzieren, was sich hauptsächlich durch einen reduzierten Energiebedarf für Beheizung ergab.

Durch die Realisierung in Holzbauweise konnte die CO₂-Äquivalenz der Baumaterialien um 84% auf ca. 1.700 t reduziert werden. Dies ist zurückzuführen auf den negativen GWP von Holz – allein das in tragenden Bauteilen verwendete Holz besitzt eine gesamte CO₂-Äquivalenz von fast -7 Mio. Tonnen und gleicht somit die Gesamtbilanz aus. Den größten negativen Effekt von über 5 Mio. Tonnen CO₂ hat immer noch der Stahlbeton, der hauptsächlich zur Verstärkung der Massivholzdecken und in den unterirdischen Geschossen verwendet wurde.

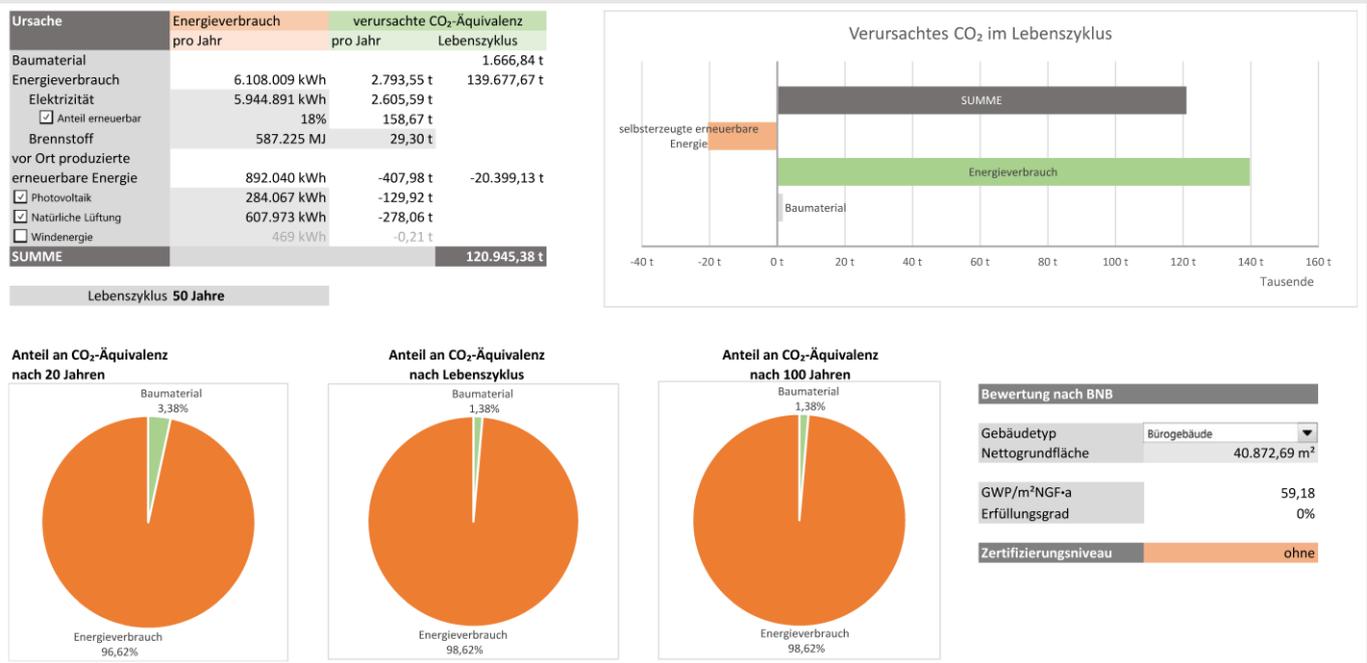


Abb.58 Ergebnisbericht der CO₂-Bilanzierung

4.3.4 Ergebnisse

Gebäudetechnisch war der Bürobau problemlos in GBS zu simulieren, auch die Größe verursachte dabei keine Schwierigkeiten. Es lässt sich jedoch vermuten, dass Project Solon mit der Größe des Projektes überfordert war. Mit DesignBuilder dagegen schienen die Systemressourcen laut Fehlermeldung grundsätzlich nicht auszureichen.

Dadurch, dass das Projekt mit Rücksicht auf die Energiesimulation modelliert wurde und somit alle möglichen Fehlerquellen zu umgehen versucht wurden, benötigten die Vorbereitungen für die Energiesimulation mit vier Stunden relativ wenig Zeit, der Großteil wurde für die Zonierung benötigt.

Unzureichend ist allerdings, wie komplexere architektonische Maßnahmen im Entwurf erfasst werden. Ob und wie die Beschattungsflächen und der Lichtkamin mit in die Simulation einbezogen wurden, ließ sich nicht nachvollziehen. Signifikante Änderungen im Endergebnis konnten nicht festgestellt werden. Da leider auch keine Gegensimulationen mit DesignBuilder gemacht werden konnten, ließ sich die Präzision von GBS in diesem Fall nicht vergleichen.

4.4 VERGLEICH DER FALLSTUDIEN

Auf der folgenden Seite sind die drei Fallstudien vergleichend aufgeführt. Verglichen werden die Erfolge und aufgetretenen Probleme bei der Erstellung des BEM, der BPS mit GBS und DesignBuilder und der CO₂-Bilanzierung und die dafür benötigt Zeit pro Projekt.

Das Projekt aus Fallstudie 1 lieferte die am wenigsten zufriedenstellenden Ergebnisse. Gründe waren die hohe Komplexität, die Art und Weise der Modellierung, die in GBS zu vielen Problemen führte und viele fehlende Informationen.

Fallstudie 2 war vollständig erfolgreich. Probleme konnten aufgrund der geringen Komplexität leicht erkannt, vermieden oder ausgebessert werden. Auch Project Solon und DesignBuilder lieferten zufriedenstellende Ergebnisse, was vermutlich ebenfalls an der geringeren Komplexität lag.

Die Ökobilanzierung von Fallstudie 3 war ebenfalls erfolgreich, auch wenn Project Solon und DesignBuilder keine Ergebnisse liefern konnte. Die Optimierung des Energieverbrauches dagegen war nicht erfolgreich, da keine signifikanten Simulationsergebnisse für die verschiedenen Varianten erzielt wurden.

	Fallstudie 1: Industriebau, externes Projekt, einreichfertig	Fallstudie 2: Einfamilienhaus, bestehendes Projekt, Entwurf	Fallstudie 3: Bürohochhaus, für GBS erstelltes Projekt, Entwurf
Zeit	37,2 h	2,95 h	6,3 h
Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> Simulation ohne thermische Eigenschaften erfolgreich Anregungen zu optimalen HKLS-Systemen Wärmegewinn durch Produktionsanlagen einbeziehbar, solange Daten vorliegen CO₂-Bilanzierung erfolgreich 	<ul style="list-style-type: none"> Simulation erfolgreich Project Solon erfolgreich Anregungen zu optimalen HKLS-Systemen GBS und DesignBuilder lieferten für TGA-Elemente ähnliche Anteile am Energieverbrauch CO₂-Bilanzierung problemlos 	<ul style="list-style-type: none"> Simulation erfolgreich Anregungen zu optimalem HKLS-System und Elektronik CO₂-Bilanzierung problemlos Optimierung der CO₂-Bilanz erfolgreich
Probleme	<ul style="list-style-type: none"> Aufwändige Anpassung der Projektdatei Simulation unter Verwendung thermischer Eigenschaften nicht möglich Project Solon Grafiken nicht generiert Simulation durch DesignBuilder fehlgeschlagen Manche TGA-Elemente nicht miteinbeziehbar Unklare Materialien in der Projektdatei beeinträchtigten CO₂-Bilanzierung Keine GWP für manche Bauteilgruppen 	<ul style="list-style-type: none"> Hinterlüftung im Dach musste entfernt werden Energieverbrauch laut DesignBuilder 30% höher 	<ul style="list-style-type: none"> Dicken von Geschossdecken mussten verringert werden Project Solon Grafiken nicht generiert Simulation durch DesignBuilder fehlgeschlagen Optimierungssimulationen lieferten keine aussagekräftigen Ergebnisse

5 DISKUSSION

Nun soll geklärt werden ob die Forschungsziele, wie in der Einleitung beschrieben, bezüglich einer „ökologischen Gebäudeoptimierung während der frühen Entwurfsphase durch den entwerfenden Architekten“ in der Untersuchung erfüllt werden konnten:

- Ist die Erfassung der Energiebilanz durch die gewählte BPS-Applikation (Green Building Studio) zufriedenstellend möglich?
- Ist die Erfassung der Ökobilanz der verwendeten Baumaterialien durch das entwickelte Werkzeug zufriedenstellend möglich?
- Ist somit eine Erfassung der gesamten CO₂-Bilanz des Projektes möglich?
- Reichen die Kenntnisse bezüglich Bauphysik und Energiesimulation eines entwerfenden Architekten aus?
- Reichen die Projektinformationen in der frühen Entwurfsphase für eine Energiesimulation aus?
- Ist der Zeitaufwand vertretbar, so dass auch mehrfache Analysen möglich sind?
- Kann stets in BIM-Umgebung gearbeitet werden, d.h. müssen keine Dateiformate konvertiert oder parallele Dateien erstellt und bearbeitet werden?

Die Ergebnisse waren überwiegend zufriedenstellend. Die Energiebilanz war immer evaluierbar, wenn auch nicht mit der erhofften Präzision. Öko- und CO₂-Bilanz waren mit ähnlichen Einschränkungen erfassbar. Die Kenntnisse der Zielgruppe und auch die minimalsten Projektinformationen sind vollkommen ausreichend zur erfolgreichen Verwendung der Werkzeuge. Der Zeitaufwand hängt davon ab, wie sehr die Projekt-Datei nachträglich angepasst werden muss. Ist das Projekt von Beginn an mit Rücksicht auf die BPS modelliert, ist der Zeitaufwand für die Evaluierung relativ gering. Das Ziel einer einzelnen Projekt-Datei konnte nicht exakt erfüllt werden, der Aufwand vergrößerte sich aber nur wenig.

5.1 MÖGLICHKEITEN UND EINSCHRÄNKUNGEN

Durch die entwickelte Methodik war es in jedem Fall möglich die frühe Architektur eines Projektes grob bezüglich Ökologie zu evaluieren. GBS lieferte Ergebnisse zu Energieverbrauch und auch zum Teil zu Energieerzeugung am Grundstück. Durch das Ökobilanz-Werkzeug konnte die CO₂-Äquivalenz der für die Architektur verwendeten Materialien erfasst werden und schließlich die CO₂-Bilanz für den Lebenszyklus errechnet werden.

Das Beibehalten einer einzigen (BIM-)Projekt-Datei, war nicht immer vorbehaltlos möglich. So müssen manchmal die Dateien vor der Simulation neu abgespeichert werden um Deckenstärken zu verringern oder Hinterlüftungen zu entfernen.

Ebenfalls nur teilweise (nur bei Fallstudie 2) möglich war die Optimierung, da bei den anderen Projekten Project Solon keine Informationen lieferte und bei Fallstudie 3 keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse bei verschiedenen Entwurfsalternativen gesammelt werden konnten.

Das grobe Überschlagen von Entwürfen ist die Stärke von GBS. Je früher verwendet desto besser, da es sogar mit Modellkörpern zur bloßen Massenstudie verwendet werden kann. Allgemein sind aber selbst ein Hochhaus, wie in der dritten Fallstudie, und ein Industriebau, wie in der zweiten, simulierbar. Bei letzterem wären sogar die Produktionsanlagen miteinbeziehbar, solange ausreichend Informationen dazu vorliegen.

In der Einleitung (Kapitel 1.1) wurde angesprochen, dass der Aufwand für eine Energiesimulation laut Umfragen 18 bis 44 Stunden betrage. Mit einem stimmigen BIM-zu-BEM-Workflow betrug die Zeit im Idealfall (Fallstudie 3) lediglich 5,4 Stunden mit Vorbereitung des BEM. Dabei handelte es sich zwar um ein großes Modell, es wurde aber bereits auf Energiesimulation ausgerichtet modelliert. Somit entfiel der große Aufwand, das Modell im Simulationsprogramm erneut zu modellieren. Selbst bei einem extern erstellten BIM-Projekt, bei welchem noch zahlreiche Änderungen nötig waren, betrug der Zeitaufwand bei mittlerer bis hoher Komplexität 33,2 Stunden, was sich durch

mehr Erfahrung und einen leistungsstärkeren Rechner, als in der Studie verwendet, auch reduzieren lassen kann. Bei dem kleinen Einfamilienhaus-Projekt betrug der Zeitaufwand lediglich eine Stunde. Die Zeitersparnis geht natürlich auch zu Lasten der Ergebnisgenauigkeit und Projektkonfigurierbarkeit, was im frühen Entwurfsstadium aber nur geringe Auswirkungen haben sollte.

Der Zeitaufwand für die CO₂-Bilanzierung lag zwischen einer und 3,5 Stunden, am längsten für das Projekt 1 mit sehr vielen verschiedenen Materialien.

Die alternativen Simulationsdurchgänge und Project Solon sind wertvolle Werkzeuge zur Optimierung des Entwurfes. Hiermit können schnell optimale Parameter erfasst und Vorschläge für spätere gebäudetechnische Spezifikationen gefunden werden. Leider ist es in seiner Beta-Version noch sehr anfällig.

Schwächer wird GBS bei Feinabstimmungen und zunehmender Komplexität des Projektes, insbesondere, da Maßnahmen nur schwer Wirkung zeigen und die Wahl getroffen werden muss, ob Zonen separat konfiguriert oder die thermischen Eigenschaften der Baukonstruktionen verwendet werden sollen.

Daraus folgt, dass das Ziel einer Entwurfsoptimierung durch BPS, wozu mindestens eine der Funktionen zu alternativen Simulationen oder Feinabstimmungen nötig wäre, nur teilweise erfüllt werden kann.

Eine weitere Einschränkung liegt im Umfang der Erfassung der Ökobilanz. Materialien gebäudetechnischer Bauteile (zum Beispiel Rohre) werden in Revit nicht mengenmäßig erfasst (keine Volumina oder Massen) und die Materialbibliothek des Werkzeuges ist noch nicht lückenlos.

5.2 PROBLEMATIKEN

Green Building Studio selbst war insgesamt unkompliziert zu verwenden. Nach einer sorgfältigen Modellierung, waren die einzigen Fehlerquellen Wände und Decken, welche die zulässige Gesamtdicke überschritten. Das wird durch die Simulationsengine DOE-2.2 vorgegeben. Da zur Behebung des Fehlers die

Konstruktionen im Modell geändert werden müssen, bedeutet das, dass vor einer Simulation möglicherweise eine separate Datei mit den geänderten Werten abgespeichert werden muss. Das Ziel einer einzigen Projektdatei kann somit nicht erfüllt werden. Zudem kann es bei vielen betroffenen Konstruktionen im Projekt zeitaufwendig sein, diese zu finden und zu ändern. Ebenfalls mühsam ist das notwendige separate Modellieren von Beschattungselementen, da diesen keine Materialien mit thermischen Eigenschaften zugewiesen werden dürfen.

Diese beiden Fehlerursachen sind nicht dokumentiert, insbesondere letztere muss aber bekannt sein, da hier die Fehlermeldung in GBS keine brauchbaren Hinweise liefert.

Des Weiteren war im dritten Testprojekt erkennbar, dass einige Änderungen keine Auswirkungen in den Analyseergebnissen bewirken. Die These aufstellend, dass insbesondere die Beschattungs- bzw. Ganzglasfassaden-Variante unterschiedliche Ergebnisse hätte liefern müssen, könnte davon ausgegangen werden, dass GBS ein Modell nur sehr grob simuliert, so dass nur sehr schwerwiegende Maßnahmen Auswirkungen zeigen.

Die Fehlermeldungen, auf die Salmon (2013: 25)^[63] in seiner „Comparative Analysis of Energy Modeling Methods“ stieß, traten hier allerdings nicht auf. Einige davon lagen an beschränkten Kapazitäten der Engine, welche nach der letzten Aktualisierung aber stark erhöht wurden. Ähnliches wie „Issue: An unrecoverable internal error has occurred“ (ebd., S.25)^[63] trat zwar auf; ein zweiter Simulationsversuch gelang dann aber stets.

Das Dashboard von Project Solon, welches Grafiken zur Entwurfsoptimierung mit den Daten der jeweiligen Simulation füttert, konnte nur in dem kleineren zweiten Projekt geladen werden. Bei den anderen beiden Projekten blieb das entsprechende Fenster bei jedem der zahlreichen Simulationsversuche leer. Project Solon befindet sich noch in der Entwicklung, so dass neben angekündigter Erweiterungen auch auf einige Fehlerbehebungen gehofft werden darf.

5.3 WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN

Bei den Simulationen mit GBS wurde in der Arbeit der Fokus auf das modellieren mit Räumen gelegt. Dadurch konnten die thermischen Eigenschaften der Bauteile exportiert werden, welche eine wichtige Entscheidung des Architekten darstellen. Eine andere Möglichkeit wäre das modellieren mit MEP-Räumen, bei denen dann jeder Raum spezifisch konfigurierbar ist. Dadurch sollte sich die Genauigkeit der Simulation erhöhen. Ein Thema zur weiterführenden Untersuchung wäre der Vergleich der Simulationsergebnisse von Projekten jeweils mit Räumen und MEP-Räumen. Möglicherweise hat dies auch Auswirkungen darauf, wie präzise Entwurfsänderungen durch die Simulation erfasst werden.

Eine weitere mögliche Untersuchung wäre ein Versuch die Zuverlässigkeit und Präzision von GBS zu erfassen. Als einzige solche Untersuchung konnte die Studie von Yezioro et.al. (2008)^[80] gefunden werden. Zu dieser Zeit waren aber noch kaum selbst Informationen in GBS eingetragbar, so dass, durch die zahlreichen Annahmen des Programmes, die Ergebnisse sich sehr von denen der anderen unterschieden. Hilfreich wäre, die Zuverlässigkeit von GBS durch Vergleich mit anderen BPS-Werkzeugen zu bewerten und zu untersuchen, wie präzise GBS die Projekte und deren Entwurfsalternativen simulieren kann. Dazu sind allerdings weitreichende Kenntnisse im Bereich der Energiesimulation notwendig.

Interessant wäre auch, die Fähigkeiten von GBS zur Berechnung der am Gebäude erzeugbaren Energie auszuweiten. In GBS können Photovoltaikflächen nicht konfiguriert werden und senkrechte Flächen werden nicht verwendet. Das Potential von Windkraftanlagen an Gebäuden ist ebenfalls nicht konfigurierbar. Auch Erdwärme wäre interessant zu erfassen. Dies wäre zum Beispiel durch ein Datenbank- oder Kalkulationswerkzeug denkbar. Die Sonnenintensität auf Gebäudeflächen könnte durch die *Lighting*-Funktion des Revit-Plug-ins Insight 360 erfasst werden und mit Fläche und Photovoltaik-Wirkungsgrad kombiniert werden. Die Werte zu Windstärken befinden sich in den Wetterdaten und könnten

mit Höhenposition und Anzahl von Anlagen kombiniert werden. Das Erdwärmepotential müsste Geothermieinformationen des Standortes entnommen werden.

Zur CO₂-Bilanzierung könnte die Materialbibliothek erweitert werden, insbesondere um Türen, HKLS-Bauteile und Beleuchtungen. Möglich wäre auch noch weitere Datenbanken einzubinden. Ein Problem dabei ist allerdings, dass in unterschiedlichen Datenbanken die Werte oftmals unterschiedlich erfasst werden, so dass sie sich nicht zwischen den Datenbanken vergleichen lassen. Ideal wäre zum einen eine einzelne Norm für die Datenerfassung und zum anderen, wenn es eine zentrale Internetplattform gäbe, zu der alle Hersteller ihre EPD-Informationen hochladen würden.

Der Prozess könnte stark vereinfacht werden, wenn sich die EPD-Informationen in den Revit-Materialien befinden würden, so dass sie als eine Materialliste exportiert werden könnten. Eigenschaftenfelder zu den Materialien hinzuzufügen ist trivial, um die Vielzahl der Daten aber automatisiert in die Materialien zu laden, wären Programmierkenntnisse erforderlich.

6 VERZEICHNIS

6.1 LITERATUR

- [1] European Commission: Energy Efficiency. Buildings. Letzte Aktualisierung: 11.03.2016. URL: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [2] European Commission: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy. Brüssel: 2014.
- [3] Renner, R.; Baumann, M.; Jamek, A.; Lang, B.; Pfaffenbichler, P.: Visionen 2050. Identifikation von existierenden und möglichen zukünftigen Treibern des Stromverbrauchs und von strukturellen Veränderungen bei der Stromnachfrage in Österreich bis 2050. Wien: Austrian Energy Agency 2010.
- [4] Barbour, C. E.; Zogg, R.; Cross, E.; Clark, D.: Research & Development Roadmap for Building Energy Modeling—Draft—for Review Only. Washington: Navigant Consulting Inc. 2016
- [5] Ghiassi, N.: Development of a Building Data Model for a Performance-Based Optimization Environment. Technische Universität Wien 2013.
- [6] Schlueter, A.; Thesseling, F.: Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. In: Automation in Construction 2009, Nr. 18, S.153-163.
- [7] Bazjanac, V.: IFC BIM-Based Methodology for Semi-Automated Building Energy Performance Simulation. University of California: Lawrence Berkeley National Laboratory 2008.
- [8] Cemesova, A.; Hopfe, C. J.; Mcleod, R. S.: PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software. In: Automation in Construction 2015, Nr. 57, S.17-32.
- [9] Passivhaus Institut (PHI) (2015): Informationen zum Passivhaus - Was ist ein Passivhaus?. URL: http://www.passiv.de/de/02_informationen/01_wasistpassivhaus/01_wasistpassivhaus.htm - Zugriffen am 11.03.2016.
- [10] Steven Winter Associates Inc.: Net Zero Energy Buildings. Letzte Aktualisierung: 16.12.2014. URL: <https://www.wbdg.org/resources/netzeroenergybuildings.php> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [11] So, A.; Katz, D.; Wacks, K.: Toward Zero Net Energy (ZNE) Super High-Rise Commercial Buildings. o.O.: Continental Automated Buildings Association 2014.
- [12] Erhorn, H.; Bergmann, A.: Wege zum Effizienzhaus Plus. 3. Auflage, Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2014.

- [13] EnOB: Nullenergie, Plusenergie – Klimaneutrale Gebäude im Stromnetz 2.0. o.J. URL: <http://www.enob.info/de/nullenergie-plusenergie-klimaneutrale-gebäude-im-stromnetz-20> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [14] Schoof, J. (2013): Von der Schwierigkeit, ein Plusenergiehaus zu bauen. URL: <http://www.detail.de/artikel/von-der-schwierigkeit-ein-plusenergiehaus-zu-bauen-10920/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [15] Fosdick, J.: Passive Solar Heating. Letzte Aktualisierung: 24.08.2012. URL: <https://www.wbdg.org/resources/psheating.php> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [16] Girmscheid, G.; Lunze, D.: Nachhaltig optimierte Gebäude. Energetischer Baukasten, Leistungsbündel und Life-Cycle-Leistungsangebote. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2010.
- [17] Rajagopalan, N.; Bilec, M. M.; Landis, A. E.: Comparative life cycle assessment of insulating concrete forms with traditional residential wall sections. In: IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology 2009, S.1-5.
- [18] ICFA (Insulated Concrete Form Association): The ICF Effect. Glenview: 2008.
- [19] Jim, C. Y.: Greenwall classification and critical design-management assessments. In: Ecological Engineering 2015, Nr. 77, S.348-362.
- [20] BVF (Bundesverband Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V.): Flächenheizungen und Flächenkühlungen im Niedrigstenergiegebäude. Ausblick in die Zukunft. Hagen 2014.
- [21] Sreicher, W.; Mach, T.; Schweyer, K.; Heimrath, R.; Kouba, R.; Thür, A.; Jähmig, D.; Bergmann, I.; Suschek-Berger, J.; Rohrer, H.; Krapmeier, H.: Benutzerfreundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser. Graz: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2004.
- [22] Baukonstruktionen / hrsg. von Anton Pech. Band 15: Heizung und Kühlung, Pech, A.; Jens, K. unter Mitarbeit von Harm, J.. Wien: Springer-Verlag 2005.
- [23] Pfafferott, J.; Kalz, D.: BINE **themeninfo** I/2007. Thermoaktive Bauteilsysteme. *Nichtwohnungsbauten energieeffizient heizen und kühlen auf hohem Komfortniveau*. Eggenstein-Leopoldshafen: FIZ (Fachinformationszentrum) Karlsruhe 2007.
- [24] Meyer, F.: BINE **projektinfo** 06/03. Heizen und Kühlen mit Kapillarrohrmatten. Eggenstein-Leopoldshafen: FIZ (Fachinformationszentrum) Karlsruhe 2003.
- [25] ZCB (2012a): ZCB Experience. Active Systems. URL: <https://zcb.hkcic.org/Eng/Features/activesystems.aspx> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [26] House, H. (2003): Large Ceiling Fans Offer Energy-Saving Way to Reduce Dairy Cow Heat Stress. Letzte Aktualisierung: 09.2011. URL: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/livestock/dairy/facts/ceiling.htm> - Zugriffen am 11.03.2016.

- [27] Verein komfortlüftung.at: Was ist eine Komfortlüftung. Funktionsweise. Letzte Aktualisierung: 27.05.2014. URL: <http://www.xn--komfortlftung-3ob.at/was-ist-eine-komfortlueftung/funktionsweise/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [28] Walker, A.: Natural Ventilation. Letzte Aktualisierung: 04.11.2014. URL: <https://www.wbdg.org/resources/naturalventilation.php#> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [29] Taylor, J. (2013): Press Release. LRC Demonstrates Advanced Building Infrastructure for Solid-State Lighting in Hollywood. URL: http://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/pr_story.asp?id=264#.VuNhX_nhCUk - Zugriffen am 11.03.2016.
- [30] Ruck, N. (2000): Chapter 4. Daylighting Systems. URL: <https://facades.lbl.gov/sites/all/files/Downloads/daylighting-c4.pdf> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [31] Ander, G. D.: Windows and Glazing. Letzte Aktualisierung: 04.11.2014. URL: <https://www.wbdg.org/resources/windows.php> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [32] EnOB (o.J.): Projekt: Schaltbare Architekturverglasung mit elektrochromen Schichten. URL: <http://www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/schaltbare-architekturverglasung-mit-elektrochromen-schichten> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [33] BINE Informationsdienst (2010): Energy Efficient Elevators and Escalators. Aufwärts mit halber Energie. URL: <http://www.bine.info/newsuebersicht/news/aufwaerts-mit-halber-energie/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [34] Solberg, G. (2007): The Magic of Tesla Roadster Regenerative Braking. URL: <https://www.teslamotors.com/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [35] Microchip Technology Inc. (o.J.): Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM). URL: <http://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-types/pmsm> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [36] EMSD (Electrical and Mechanical Services Department of the Government of the Hong Kong Special Administrative Region): Appliances and Equipment. Variable Voltage Variable Frequency (VVVF) Lift Drive. Letzte Aktualisierung: 23.11.2015. URL: <http://www.energyland.emsd.gov.hk/en/appAndEquip/equipment/lifts/vvfv.html> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [37] Schmidt-Pleschka, R.; Milles, U.: BINE **basisEnergie 20**. Energie sparen bei der Kälteerzeugung. Eggenstein-Leopoldshafen: FIZ (Fachinformationszentrum) Karlsruhe 2006.
- [38] Milles, U.: BINE **basisEnergie 21**. Kraft und Wärme koppeln. Eggenstein-Leopoldshafen: FIZ (Fachinformationszentrum) Karlsruhe 2006.
- [39] Sass, I.; Schiessl, S.; Grimm, R.; Heske, C.; Popp, T.: Erdwärme. Tipps für Hausbesitzer und Bauherren. 12. Auflage, Berlin: GtV Bundesverband Geothermie e.V. 2013.

- [40] Büttner, W.; Fritzer, T.: Umwelt/Wissen – Klima + Energie. Erdwärme – die Energiequelle aus der Tiefe. 5. Überarbeitung, Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt 2010.
- [41] FEMP (U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program): Photovoltaics. Letzte Aktualisierung: 24.08.2012. URL: <https://www.wbdg.org/resources/photovoltaics.php> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [42] Lockie, S.; Berebecki, P.: RICS Professional Guidance, Global. Methodology to calculate embodied carbon. 1st edition. London: Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) 2014.
- [43] Saylor, D.: LEED Green Associate Course. Lecture 4: Energy & Atmosphere (EA). Materials and Resources (MR). o.J. (Unveröffentlichtes Unterrichtsmaterial).
- [44] ZCB (2012b): ZCB Experience. Passive Design. URL: <https://zcb.hkcic.org/Eng/Features/passivedesign.aspx> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [45] Kirei USA (2011): Kirei Wheatboard. clean, green MDF. URL: http://www.kireiusa.com/wheatboard_viewer/wheatboard.html - Zugriffen am 11.03.2016.
- [46] Zero Carbon Hub: Zero Carbon Strategies. For tomorrow's new homes. Milton Keynes: 2013.
- [47] ZCB (2012c): ZCB Experience. Overview of ZCB. URL: <https://zcb.hkcic.org/Eng/Features/map.aspx> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [48] Fouquier, A.; Robert, S.; Suard, F.; Stéphan, L.; Jay, A.: State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013, Nr. 23, S.272-288.
- [49] buildingSMART International Ltd. (o.J.): faq general questions. General questions about buildingSMART, IAI, and IFC. URL: <http://www.buildingsmart-tech.org/implementation/faq/faq-general-questions> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [50] gbXML.org (o.J.): About gbXML. URL: <http://www.gbxml.org/aboutgbxml.php> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [51] Ivanova, I. V.: DIPLOMARBEIT. Comparison Between Semi-Automated Buildin Energy Simulation Processes Using BIM-Generated gbXML and IFC Formats in EnergyPlus. Technische Universität Wien: 2014.
- [52] EnergyPlus (o.J.): EnergyPlus. URL: <https://energyplus.net/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [53] OpenStudio (o.J.) URL: <https://www.openstudio.net/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [54] DesignBuilder Software Ltd (o.J.): DesignBuilder Software Product Overview. URL: <http://www.designbuilder.co.uk/content/view/144/223/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [55] Integrated Environmental Solutions Limited (o.J.): VE for Architects. URL: <http://www.iesve.com/software/ve-for-architects> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [56] Trimble Navigation Limited (o.J.): SEFAIRA ARCHITECTURE. URL: <http://sefaira.com/sefaira-architecture/> - Zugriffen am 11.03.2016.

- [57] Voshage, J. (2014): BIM / BUILDING PERFORMANCE ANALYSIS. Sefaira Releases Performance Analysis Plug-in for Revit. URL: <http://www.formfollowsperformance.com/2014/09/sefaira-releases-performance-analysis-plug-in-for-revit/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [58] Goyal, A. (2015): Energy Simulation Plug-ins for Revit. URL: <https://lmnarchitects.com/tech-studio/bim/energy-simulation-plug-ins-for-revit/> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [59] Professorship of Architecture and Building Systems (A/S) (o.J.): DPx - Design Performance Viewer. URL: <http://www.sustain.arch.ethz.ch/en/research/design-performance> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [60] ETH Zurich; KEOTO AG (2010): Design Performance Viewer (DPV): Building Energy Performance in Early Design Stages. URL: <https://vimeo.com/13832857> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [61] Autodesk Inc. (o.J. a): Green Building Studio. Overview. URL: <http://www.autodesk.com/products/green-building-studio/overview> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [62] Autodesk Inc. (o.J. b): Assumptions and Default Values in GBS. URL: http://help.autodesk.com/view/BUILDING_PERFORMANCE_ANALYSIS/ENU/?guid=GUID-051B623C-279A-400A-BDE0-06BB54FED673 – Zugriffen am 11.03.2016.
- [63] Salmon, S. M.: A Comparative Analysis of Energy Modeling Methods for Commercial Buildings. Brigham Young University: 2013.
- [64] Autodesk Inc. (2014a): Autodesk Green Building Studio Adopts the newest DOE-2.2 version (48r in 64-bit) for our February 14, 2014 Release. URL: <http://autodesk.typepad.com/bpa/2014/02/autodesk-green-building-studio-adopts-the-newest-doe-22-version-48n-in-64-bit-for-our-february-2014-release.html> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [65] Autodesk Inc. (2014b): ANSI/ASHRAE Standard 140. URL: <http://download.autodesk.com/us/GBS/2014/STD-140-Validation-Testing-GBS-DOE-48r-640bit-release.pdf> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [66] U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy (2008): Tax Deduction Qualified Software. Building Technologies Program. Green Building Studio Web Service version 3.4. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/corporate/ns/qs_greenbuildin_gstudio_v3_4.pdf - Zugriffen am 11.03.2016.
- [67] Autodesk Inc. (o.J. c): Photovoltaic Potential Validation. URL: http://help.autodesk.com/view/BUILDING_PERFORMANCE_ANALYSIS/ENU/?guid=GUID-60277CBF-D220-4EDF-996F-B8E91B1EACC6 – Zugriffen am 11.03.2016.

- [68] Autodesk Inc. (o.J. d): Energy Analysis for Autodesk Revit. URL: <http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/DEU/?guid=GUID-2043E09F-40E5-4155-AE28-134F62E54F54> – Zugriffen am 11.03.2016.
- [69] Stein, M. (2013): Energy Analysis. Re: Questions on changing Air Infiltration Value- Outdoor Air per Area (CFM/SF). URL: <https://forums.autodesk.com/t5/energy-analysis/questions-on-changing-air-infiltration-value-outdoor-air-per/m-p/4530067> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [70] Autodesk Inc. (o.J. e): Regularly Occupied Space Type. URL: http://help.autodesk.com/view/BUILDING_PERFORMANCE_ANALYSIS/ENU/?guid=GUID-0238E9CB-7DA2-4FBD-9551-176AB99A79F7 – Zugriffen am 11.03.2016.
- [71] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006. Berlin: 2006.
- [72] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (o.J.): ÖKOBAUDAT. URL: <http://www.oekobaudat.de/> - Zugriffen am 13.05.2016.
- [73] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) – Büro- und Verwaltungsgebäude – BNB_BN 1.1.1. 2015
- [74] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Neubau Ein- bis Fünffamilienhäuser – BNK_V1.0 – Ökologische Qualität – Ökobilanz: Treibhauspotenzial und andere Umweltwirkungen – 3.1.1. o.J.
- [75] E.ON (2014): CO2-Berichterstattung. Transparenz für systematischen Klimaschutz. URL: <http://www.eon.com/de/nachhaltigkeit/umwelt/klimaschutz/co2-berichterstattung.html> - Zugriffen am 11.03.2016.
- [76] Beate Troger (2014): MPreis steckte 40 Millionen Euro in die neue Bäckerei. Nach dem Großbrand 2011 will die Tiroler Handelskette ihr Brot mit dem neuen Markennamen „Bäckerei Therese Molk“ neu positionieren. URL: <http://www.tt.com/wirtschaft/8221149-91/mpreis-steckte-40-millionen-euro-in-die-neue-b%C3%A4ckerei.csp> – Zugriffen am 23.11.2016.
- [77] ATP (2014): Unveröffentlichtes Projektprotokoll zum MPreis Produktionsbetrieb Bäckerei/Fleischwerk.
- [78] Arbeitskreis Technik des FVLR: FVLR-Richtlinie 10. Natürliche Lüftung großer Räume. Detmold: Fachverband Tageslicht und Rauchschtz e.V. 2014.
- [79] Skidmore, Owings & Merrill, LLP: Timber Tower Research Project. 2013.
- [80] Yezioro, A.; Dong, B.; Leite, F.: An applied artificial intelligence approach towards assessing building performance simulation tools. In: Energy and Building 2008, Nr. 40, S.612-620.

6.2 ABBILDUNGEN

Abb.1	Angestrebter Planungsprozess: Entscheidungen so früh wie möglich evaluieren und umsetzen senkt Gesamtplanungskosten (nach Ghiassi 2013) ^[5]	4
Abb.2	Iterativer Entwurfsprozess: Schnelle Analysen in der frühen Entwurfsphase, eine umfassende Evaluierung danach.....	5
Abb.3	Untersuchungsablauf	7
Abb.4	Beispiel einladender Treppenverbindungen zwischen Stockwerken (Entwurf für den Sitz des Green Climate Fund in Bonn) (http://www.l-a-v-a.net/projects/green-climate-fund-bonn/).....	14
Abb.5	Ein schnellbewegendes, aber geringeres Luftvolumen kühlt weniger als ein langsames aber größeres Volumen.....	20
Abb.6	Funktion von Windturm und Kaminwirkung	21
Abb.7	Ideale Sonnenschutzlamellen (http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Tageslicht_Tageslichtlenkung-durch-Jalousien_167228.html?img=0&layout=galerie).....	23
Abb.8	Lichtlenkung durch Heliostaten in ein Lichtrohr (http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Tageslicht_Prinzip-der-Tageslichtleitung_167232.html?img=0&layout=galerie).....	24
Abb.9	Lichtkamin im Prinzip und in der Praxis am Potsdamer Platz (http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Tageslicht-Tageslichtleitung-durch-Lichtkamine_806541.html).....	24
Abb.10	Aufteilung des durch ein Gebäude verursachten CO ₂ (nach Lockie & Berebecki 2014: 8) ^[42]	30
Abb.11	Das Zero Carbon Building in Hong Kong (http://architecture2030.org/wp-content/uploads/2013/01/tumblr_mh3g49ChnN1qdro6jo3_12801.jpg).....	34
Abb.12	Mögliche Kombinationen von manchen BIM- und BPS-Programmen	36
Abb.13	Interface des IDFEditors, dem Hauptmodul für die Bearbeitung in EnergyPlus	42
Abb.14	Interface von OpenStudio	43
Abb.15	Interface von DesignBuilder in der Modellierungsansicht.....	44
Abb.16	Interface von DesignBuilder in einer der Einstellungsansichten	44
Abb.17	Das Übertragungs-Plug-in von Revit zu DesignBuilder	45
Abb.18	VE-Ware Ergebnisbericht.....	46
Abb.19	Interfaces von Sefaira (http://sefaira.com/sefaira-architecture/).....	47
Abb.20	Interfaces der Version für Revit 2009 (https://bldgsim.wordpress.com/tag/design-performance-viewer/)	48
Abb.21	Interface und Ergebnisbericht der Version für Revit 2014	48
Abb.22	Vergleichender Ergebnisbericht in Revit.....	49
Abb.23	Arbeitsablauf einer Energiesimulation mit Revit und GBS	56

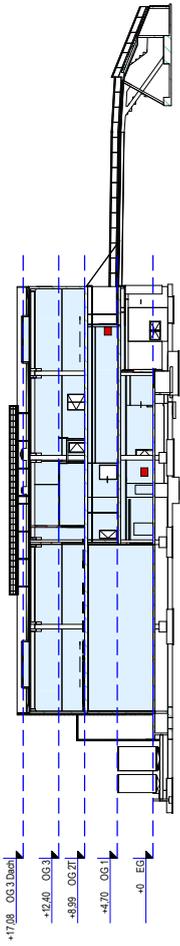
Abb.24	Volumenberechnung: Links aus, rechts aktiviert (http://help.autodesk.com/view/RVT/2015/DEU/?guid=GUID-32EEA5DC-381A-4BCF-A898-F15E98BFC63F).....	59
Abb.25	Runset (oben), Widget (links) und Dashboard (rechts) in Project Solon.....	61
Abb.26	Fenster <i>Ergebnisse & Vergleiche</i> in Revit.....	65
Abb.27	<i>Base Run</i> mit <i>Alternate Runs</i>	67
Abb.28	<i>Design Alternatives</i> Einstellungsbereich.....	67
Abb.29	<i>Project Defaults</i> Einstellungen.....	68
Abb.30	Run Charts.....	70
Abb.31	<i>Energy and Carbon Results</i> Bericht.....	70
Abb.32	<i>Water Usage</i> Bericht.....	71
Abb.33	<i>Photovoltaic Analysis</i> Bericht.....	72
Abb.34	<i>LEED Daylight</i> Bericht.....	72
Abb.35	Arbeitsablauf der CO ₂ -Bilanzierung.....	76
Abb.36	Arbeitsblatt <i>Ökobilanz Bauelemente</i>	78
Abb.37	Arbeitsblatt <i>Materialbibliothek</i>	79
Abb.38	Arbeitsblatt <i>CO₂-Bilanz</i>	80
Abb.39	Arbeitsablauf: Anwendung der entwickelten Analyse­methode an die Fallstudien.....	83
Abb.40	Revit-Darstellung des Projektes.....	85
Abb.41	Arbeitsablauf Fallstudie 1.....	86
Abb.42	Eine tektonische Wand, die aber aus vier separaten Revit-Wandelementen zusammengesetzt ist.....	91
Abb.43	Ergebnisbericht der CO ₂ -Bilanzierung.....	94
Abb.44	Revit-Darstellung und Rendering des Projektes.....	96
Abb.45	Arbeitsablauf Fallstudie 2.....	97
Abb.46	Dachaufbau zu Beginn (oben) und nach der notwendigen Vereinfachung (unten)	100
Abb.47	Grafiken aus Project Solon mit Informationen zu Optimierungspotenzial (1 von 3).....	102
Abb.48	Grafiken aus Project Solon mit Informationen zu Optimierungspotenzial (2 von 3).....	103
Abb.49	Grafiken aus Project Solon mit Informationen zu Optimierungspotenzial (3 von 3).....	104
Abb.50	Design Builder: Gesamtenergieverbrauch nach Gebäudeausrichtung.....	106
Abb.51	Design Builder: Gesamtenergieverbrauch nach Window-to-Wall-Ratio.....	106
Abb.52	Design Builder: Gesamtenergieverbrauch nach Verglasungstyp.....	107
Abb.53	Ergebnisbericht der CO ₂ -Bilanzierung.....	109
Abb.54	Revit-Darstellung des Grundentwurfes.....	110
Abb.55	Arbeitsablauf Fallstudie 3.....	111
Abb.56	Ergebnisbericht der ersten CO ₂ -Bilanzierung.....	116
Abb.57	Revit 3D-Schnitt der letzten Optimierungsstufe.....	118
Abb.58	Ergebnisbericht der CO ₂ -Bilanzierung.....	123

ANHANG

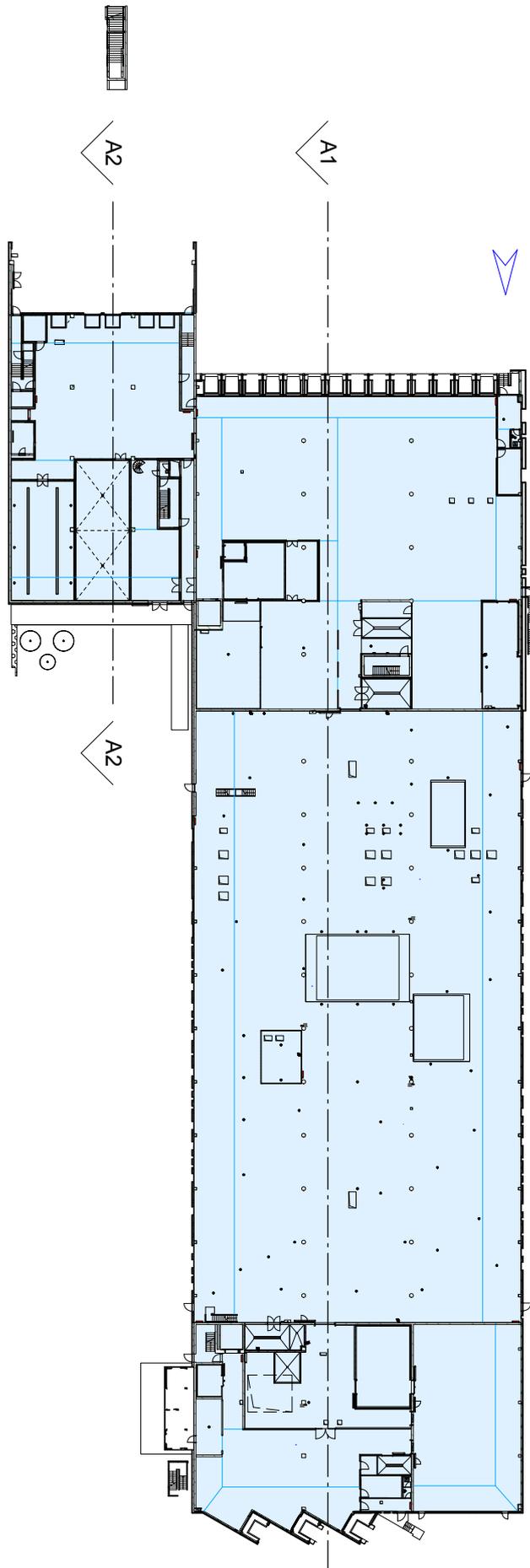
Im Folgenden sind technische Pläne für die Projekte der Fallstudien und die jeweiligen Ergebnisberichte der Energiesimulationen aus dem Green Building Studio Internetportal und DesignBuilder und der Ökobilanzierung zu finden.

I ERGEBNISBERICHTE FALLSTUDIE 1: INDUSTRIEBAU - GROßBÄCKEREI

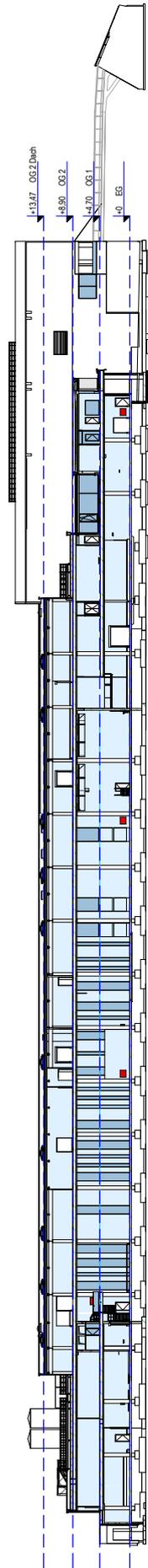
I.A Gebäudepläne



Schnitt A2 (M1:1000)



Grundriss EG (M1:1000)



Schnitt A1 (M1:1000)

I.B Building Performance Simulation

I.B.1 Green Building Studio Internetportal



[Downloads](#) | [Help](#) | [Sign Out](#)
[Project Solon Beta](#) | [Classic](#)

My Projects
Dashboards
My Profile
My Account
Welcome, Sebastian!

My Projects > **ATPI1294__Bäckerei**

Run List
Run Charts
Project Defaults
Project Details
Project Members
Utility Information
Weather Station
Notes

Run Name: ATPI1294__Bäckerei_High Eff. VAV

Energy and Carbon Results
US EPA Energy Star
Water Usage
Photovoltaic Analysis
LEED Daylight
3D VRML View
Export and Download Data Files
Design Alternatives

Project Template Applied:
ATPI1294__Bäckerei_default

Location: Völs, Tyrol

Building Type: Manufacturing

Floor Area: 17,275 m²

Electric Cost: \$0.15 / kWh

Fuel Cost: \$0.00 / MJ

Utility Data Used: [Project Default Utility Rates](#)

1 Base Run

Energy, Carbon and Cost Summary

Annual Energy Cost \$55,484,149

Lifecycle Cost \$755,694,106

Annual CO₂ Emissions

Electric 393.8 Mg

Onsite Fuel 27.5 Mg

Large SUV Equivalent 42.2 SUVs / Year

Annual Energy

Energy Use Intensity (EUI) 41,709 MJ / m² / year

Electric 360,274,300 kWh

Fuel 551,082 MJ

Annual Peak Demand 132,328.3 kW

Lifecycle Energy

Electric 10,808,229,000 kW

Fuel 16,532,451 MJ

Assumptions

2 Design Alternative

Estimated Energy & Cost Summary

Annual Energy Cost \$4,878,198

Lifecycle Cost \$66,441,062

Annual CO₂ Emissions

Electric -91,171.1 Mg

Onsite Fuel 32,907.0 Mg

Large SUV Equivalent -5,838.6 SUVs / Year

Annual Energy

Energy Use Intensity (EUI) 41,709 MJ / m² / year

Electric 16,850,660 kWh

Fuel 659,845,300 MJ

Annual Peak Demand 3,723.9 kW

Lifecycle Energy

Electric 505,519,800 kW

Fuel 19,795,359,000 MJ

Assumptions

Carbon Footprint

Alternate Run Carbon Neutral Potential

Annual CO ₂ Emissions	Mg
1 Base Run	421.3
2 Alternate Run	-58,264.1
Onsite Renewable Potential	-358.1
Natural Ventilation Potential	-131.2
Onsite Biofuel Use	-32,907.0
Net CO₂ Emissions	-91,660.4

Net Large SUV Equivalent: -9,185.3 SUVs / Year

Assumptions

Electric Power Plant Sources in Your Region

Fossil	0 %
Nuclear	N/A
Hydroelectric	98 %
Renewable	1 %
Other	0 %

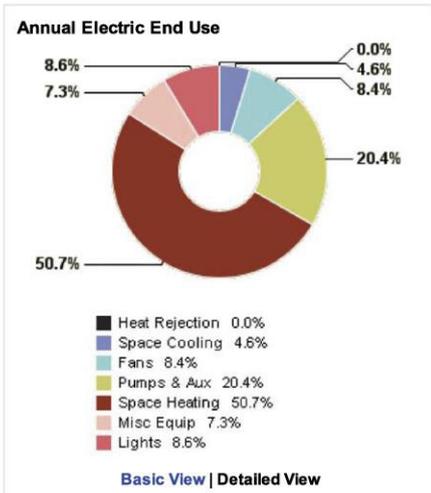
Assumptions

LEED, Photovoltaic, Wind Energy, and Natural Ventilation Potential

Energy End Use Charts

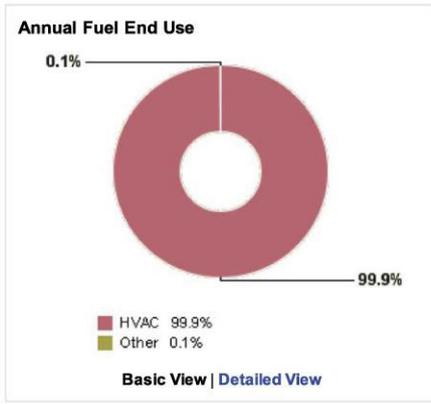
* Note: Details shown below are for the Alternate Run ATPI1294__Bäckerei_High Eff. VAV

Annual Electric End Use



Basic View | Detailed View

Annual Fuel End Use



Basic View | Detailed View

▼ Building Details and Assumptions

★ Note: Details shown below are for the Alternate Run **ATPI1294__Bäckerei_High Eff. VAV**

Updating your building assumptions ⓘ

Building Summary - Quick Stats

Number of People:	376 people ↓
Average Lighting Power Density:	11.97 W / m ² ↓
Average Equipment Power Density:	10.21 W / m ²
	171.1 LPerSec / m ² ↑
Specific Fan Flow:	
Specific Fan Power:	-8,041.093 W / LPerSec ↓
Specific Cooling:	0 m ² / kW ↓
Specific Heating:	0 m ² / kW ↓
Total Fan Flow:	2,710,846 LPerSec
Total Cooling Capacity:	-6,360,336 kW
Total Heating Capacity:	6,472,722 kW

↑ higher than typical value
↓ lower than typical value

Alternate Run Construction

Category	Description	Area
Roofs	R20 over Roof Deck - Cool Roof U-Value: 0.25 ⓘ	9,366 m ²
Ceilings	Interior Drop Ceiling Tile U-Value: 2.60 ⓘ	345 m ²
Exterior Walls	R13 Wood Frame Wall, Wood Shingle U-Value: 0.46 ⓘ	4,959 m ²
	R13 8in Concrete Wall U-Value: 0.42 ⓘ	584 m ²
	R7.5 8in CMU UnderGnd Wall U-Value: 0.10 ⓘ	5 m ²
Interior Walls	Uninsulated Interior Wall U-Value: 2.34 ⓘ	10,295 m ²
	R7.5 8in CMU UnderGnd Wall U-Value: 0.10 ⓘ	6 m ²
Interior Floors	R20 over Roof Deck - Cool Roof U-Value: 0.25 ⓘ	138 m ²
	R0 Wood Frame Carpeted Floor U-Value: 1.16 ⓘ	7,401 m ²
	Uninsulated concrete slab U-Value: 0.16 ⓘ	10 m ²
Raised Floors	R20 over Roof Deck - Cool Roof U-Value: 0.25 ⓘ	344 m ²
	R12.5 Mass Floor U-Value: 0.36 ⓘ	72 m ²
Slabs On Grade	Uninsulated concrete slab U-Value: 0.16 ⓘ	9,505 m ²
Underground Walls	R13 Wood Frame Wall, Wood Shingle U-Value: 0.46 ⓘ	1 m ²
	R7.5 8in CMU UnderGnd Wall U-Value: 0.10 ⓘ	76 m ²
Underground Slabs	R0 Wood Frame Carpeted Floor U-Value: 1.16 ⓘ	346 m ²
	Uninsulated concrete slab U-Value: 0.16 ⓘ	91 m ²
Nonsliding Doors	R5 Door (235 doors) U-Value: 1.05 ⓘ	723 m ²
Air Openings	North Facing Windows: Single Tint Green U-SI 6.17, U-IP 1.09, SHGC 0.61, VLT 0.75 (16 doors) U-Value: 1.09 W / (m ² -K), SHGC: 0.61 , Vit: 0.75	65 m ²
	Non-North Facing Windows: Single Tint Green U-SI 6.17, U-IP 1.09, SHGC 0.61, VLT 0.75 (75 doors) U-Value: 1.09 W / (m ² -K), SHGC: 0.61 , Vit: 0.75	440 m ²
Fixed Windows	North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (4 windows) U-Value: 0.56 W / (m ² -K), SHGC: 0.69 , Vit: 0.78	14 m ²
	North Facing Windows: Pewter Double, U-SI 1.74, U-IP 0.31, SHGC 0.4, VLT 0.6 (27 windows) U-Value: 0.31 W / (m ² -K), SHGC: 0.40 , Vit: 0.60	71 m ²
	Non-North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (10 windows) U-Value: 0.56 W / (m ² -K), SHGC: 0.69 , Vit: 0.78	18 m ²
Operable Windows	Non-North Facing Windows: Pewter Double, U-SI 1.74, U-IP 0.31, SHGC 0.4, VLT 0.6 (108 windows) U-Value: 0.31 W / (m ² -K), SHGC: 0.40 , Vit: 0.60	370 m ²
	North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (1 windows) U-Value: 0.56 W / (m ² -K), SHGC: 0.69 , Vit: 0.78	19 m ²
Operable Skylight	Non-North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (3 windows) U-Value: 0.56 W / (m ² -K), SHGC: 0.69 , Vit: 0.78	6 m ²
	Non-North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (42 skylights) U-Value: 0.56 W / (m ² -K), SHGC: 0.69 , Vit: 0.78	34 m ²

> 3D VRML View

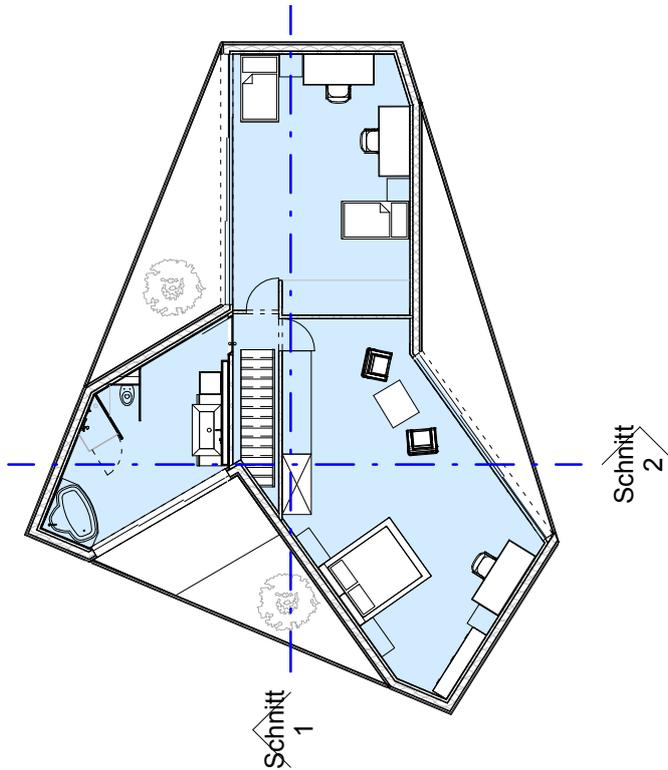
I.C CO₂-Bilanzierung

Ökologische Bilanz von Bauteilen und Baustoffen

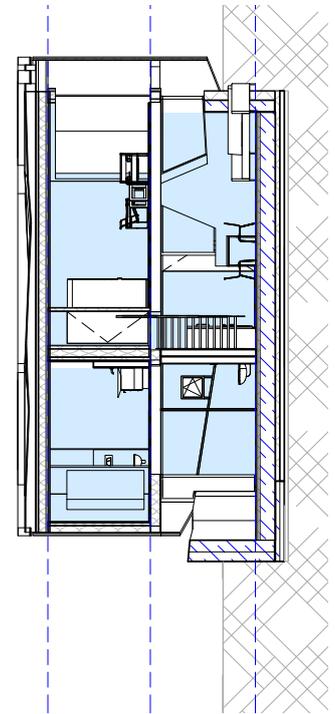
Umrechnungsfaktoren	Zellen-Nr.	Material	Revit	Baustoff	Materialbibliothek	Referenzmenge	Umrechnung	Menge im Projekt	CO ₂ -Bilanz		Summe im Projekt			Recycling Rückgewinnung Recycling [kg]	Energieaufwand gesamt Produktion [MJ]	Weitere Stoffverbrauch Produktion [m ³]
									Erwärmungspotential CO ₂ -Äquivalent [kg]	Globales Erwärmungspotential CO ₂ -Äquivalent [kg]	Abbaupotenzial der Ozonschicht R11-Äquivalent [kg]	Bildungspotenzial Ozon C ₁ H ₄ -Äquivalent [kg]	für LEED Building Life-Cycle Impact Reduction			
	502	1294_ABDICHTUNG(1)		PE-HD mit PP-Vlies zur Abdichtung		1 m ²	1,0 m ²	66,95 m ²	225,886	0,000	0,000	67,047	7,859,813	0,000	8,085,899	0,955
	189	1294_ATP_Fassade_dunkel		Feuerverzinktes Stahlblech		1 m ²	1,0 m ²	101,80 m ²	1,386,689	0,000	0,000	0,172	16,646,331	0,000	17,453,161	6,925
	713	1294_Dach_WDH		XPS-Dämmstoff		1 m ³	1,0 m ³	364,97 m ³	35,369,146	0,000	0,000	13,340	1,060,234,945	0,000	1,095,213,574	167,229
	713	1294_Dach_WDH(1)		XPS-Dämmstoff		1 m ³	1,0 m ³	6,70 m ³	648,812	0,000	0,000	0,245	19,448,975	0,000	20,090,624	3,068
	388	1294_Dach_WDW		Mineralfolle (Flachdach-Dämmung)		1 m ³	1,0 m ³	76,40 m ³	16,371,449	0,000	0,000	0,199	163,559,403	0,000	177,428,886	29,977
	683	1294_Friesen		Steinzeugfliesen glasiert		1 m ²	1,0 m ²	37,64 m ²	2,416,920	0,013	280,193	670,419	38,594,910	0,000	40,427,602	5,087
	356	1294_Gitterrost		Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)		1 kg	0,00013 m ³	1,92 m ³	22,449,899	0,000	6,548	66,365	328,725,980	0,000	359,400,561	180,495
	390	1294_Holz		Nadelstichholz - getrocknet (Durchschnitt)		1 m ³	1,0 m ³	65,61 m ³	-68,564,152	-0,004	10,642	22,054	312,831,104	63,740,115	1,010,754,731	329,748,315
	390	1294_Holz(1)		Nadelstichholz - getrocknet (Durchschnitt)		1 m ³	1,0 m ³	12,65 m ³	-13,223,759	-0,001	2,052	4,254	-60,334,778	12,293,361	194,941,173	63,597,549
	390	1294_Holz_Schindel		Nadelstichholz - getrocknet (Durchschnitt)		1 m ³	1,0 m ³	81,00 m ³	-88,650,241	-0,006	13,138	27,228	-386,235,544	78,694,415	1,247,891,553	407,111,763
	390	1294_Holz_Schindel(1)		Nadelstichholz - getrocknet (Durchschnitt)		1 m ³	1,0 m ³	19,22 m ³	-20,081,220	-0,001	3,117	6,459	-91,022,657	18,668,344	296,032,052	96,577,406
	304	1294_Kies		Kies 2/32		1 kg	0,00071 m ³	41,04 m ³	170,807	0,000	0,000	0,518	2,345,060	0,000	2,752,223	0,421
	304	1294_Kies		Kies 2/32		1 kg	0,00071 m ³	3,35 m ³	13,930	0,000	0,000	0,008	191,250	0,000	224,456	0,034
	304	1294_Kiesstreifen		Kies 2/32		1 kg	0,00071 m ³	0,61 m ³	2,555	0,000	0,000	0,002	35,084	0,000	41,176	0,006
	252	1294_PANEELFASADE		Gipswandauplatte		1 m ²	1,0 m ²	405,76 m ²	9,206,717	0,000	0,094	0,432	144,816,101	0,000	148,164,441	34,080
	356	1294_VZA_gitter		Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)		1 kg	0,00013 m ³	0,03 m ³	323,189	0,000	0,123	0,955	4,732,337	0,000	5,173,928	2,598
	157	1294_WD_FERT		EPS-Hartschaum (Styropor *) für Wände und Dächer W/D-035		1 m ³	1,0 m ³	203,70 m ³	19,541,744	0,000	90,007	17,918	249,942,354	0,000	242,837,839	69,208
	157	1294_WD_FERT(1)		EPS-Hartschaum (Styropor *) für Wände und Dächer W/D-035		1 m ³	1,0 m ³	7,89 m ³	756,624	0,000	3,485	0,694	9,677,349	0,000	9,402,274	2,680
	140	1303_ALUBAND		Elektiertes Aluminiumblech		1 m ²	1,0 m ²	86,87 m ²	580,646	0,000	0,086	0,192	8,773,971	0,000	10,182,150	1,826
	189	UNKEL		Feuerverzinktes Stahlblech		1 m ²	1,0 m ²	3,35 m ²	45,674	0,000	0,001	0,006	548,293	0,000	574,868	0,228
	189	1303_FASADE_GRAU_DUNKEL		Feuerverzinktes Stahlblech		1 m ²	1,0 m ²	54,67 m ²	744,672	0,000	0,011	0,092	8,939,321	0,000	9,372,600	3,719
	189	1303_FASADE_WEISS		Feuerverzinktes Stahlblech		1 m ²	1,0 m ²	300,02 m ²	4,086,849	0,000	0,059	0,508	49,060,055	0,000	51,437,944	20,409
	727	ATP_Beton_Fertigteil		Betonfertigteil Decke 20cm mit Bewehrung		1 m ²	1,0 m ²	0,15 m ²	24,076	0,000	0,002	0,037	233,896	0,000	273,042	0,085
	727	ATP_Beton_Fertigteil(1)		Betonfertigteil Decke 20cm mit Bewehrung		1 m ²	1,0 m ²	86,12 m ²	14,105,042	0,000	1,424	21,609	137,028,186	0,000	159,961,742	49,593
	728	ATP_Beton_Stahlbeton		Transportbeton C20/25 mit Bewehrung		1 m ³	1,0 m ³	5,15 m ³	1,645,038	0,000	1,687	40,079	13,149,915	0,000	14,853,351	4,108
	727	ATP_BFT		Betonfertigteil Decke 20cm mit Bewehrung		1 m ²	1,0 m ²	9115,59 m ²	1,492,983,517	0,000	150,693	2,287,225	14,504,091,396	0,000	16,931,551,002	5,249,340
	727	ATP_BFT(1)		Betonfertigteil Decke 20cm mit Bewehrung		1 m ²	1,0 m ²	3143,55 m ²	514,862,216	0,000	51,967	788,760	5,001,802,464	0,000	5,838,923,046	1,810,259
	189	ATP_Blech		Feuerverzinktes Stahlblech		1 m ²	1,0 m ²	1838,70 m ²	25,046,685	0,000	0,359	3,111	300,069,707	0,000	315,242,849	125,078
	544	ATP_BOD_POLYPHON		PVC Placitol		1 kg	0,00064 m ³	64,27 m ³	243,813,562	0,001	3,737,665	58,762,206	5,736,551,559	0,000	6,023,176,718	1,035,373
	544	ATP_BOD_POLYPHON(1)		PVC Placitol		1 kg	0,00064 m ³	1,18 m ³	4,457,598	0,000	68,335	1,074,339	104,880,315	0,000	110,120,630	18,930
	634	ATP_BOD_STEINBODEN_1		Mehrschichtparkett (Durchschnitt DE)		1 m ²	1,0 m ²	206,53 m ²	1,451,706	0,000	0,375	48,173	23,461,922	0,000	24,472,684	2,790
	375	ATP_Doppelboden		PVC Placitol		1 m ²	1,0 m ²	218,33 m ²	-459,159	0,000	2,868	17,793	46,890,359	-0,100	253,971,320	1,249,485
	544	ATP_Entwurf		Estrichmörtel-Calciumsulfatstrich		1 kg	0,00042 m ³	0,62 m ³	2,363,476	0,000	36,232	569,628	55,008,882	0,000	58,387,364	10,037
	160	ATP_Estrich		Estrichmörtel-Calciumsulfatstrich		1 kg	0,00042 m ³	142,26 m ³	49,365,211	0,000	3,202,815	83,021,524	649,548,849	0,000	686,594,265	43,053
	160	ATP_Estrich(1)		Estrichmörtel-Calciumsulfatstrich		1 kg	0,00042 m ³	7,23 m ³	2,509,260	0,000	162,801	4,220,029	33,016,918	0,000	34,899,957	2,188
	633	ATP_Fliesen		Steinzeugfliesen glasiert		1 m ²	1,0 m ²	1818,58 m ²	11,638,938	0,062	1,349,311	3,228,496	1,85,659,285	0,000	194,684,873	24,496
	505	ATP_Folie		PE-Noppenfolie zur Abdichtung		1 m ²	1,0 m ²	18309,16 m ²	72,390,457	0,000	81,583	266,841	2,175,009,170	0,000	2,232,368,629	309,225
	505	ATP_Folie(1)		PE-Noppenfolie zur Abdichtung		1 m ²	1,0 m ²	628,28 m ²	2,488,173	0,000	2,804	9,172	74,758,464	0,000	76,729,998	10,629
	239	ATP_GIP		Gipskartonplatte (Feuerschutz)		1 m ²	1,0 m ²	316,137 m ²	7,116,242	0,000	-2,950	-19,889	108,751,094	0,000	115,209,770	22,724
	239	ATP_GIP_FLIE		Gipskartonplatte (Feuerschutz)		1 m ²	1,0 m ²	134,05 m ²	-0,125	0,000	-0,071	4,611,458	0,000	4,885,330	0,964	
	356	ATP_Gitterrost		Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)		1 kg	0,00013 m ³	2,63 m ³	30,803,622	0,000	11,728	91,060	451,046,612	0,000	483,135,362	247,658
	356	ATP_Gitterrost_Fluchttreppe		Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)		1 kg	0,00013 m ³	0,88 m ³	10,285,829	0,000	3,916	30,406	150,611,778	0,000	164,665,895	82,697
	356	ATP_Gitterrost_grau		Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)		1 kg	0,00013 m ³	0,15 m ³	1,747,092	0,000	0,665	5,165	25,582,055	0,000	27,969,207	14,046
	356	ATP_Gitterrost_Medientunnel		Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)		1 kg	0,00013 m ³	0,15 m ³	1,718,989	0,000	0,654	5,082	25,170,548	0,000	27,519,300	13,821
	132	ATP_Glas		Fenster: Dreifachverglasung		1 m ²	1,0 m ²	1118,20 m ²	68,571,013	0,000	125,954	1,789	853,138,820	0,000	853,138,820	142,011
	132	ATP_Glas(1)		Fenster: Dreifachverglasung		1 m ²	1,0 m ²	57,21 m ²	3,354,503	0,000	6,444	0,092	41,570,874	0,000	43,645,127	7,265
	312	ATP_Holz		Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)		1 m ³	1,0 m ³	9,58 m ³	-9,487,107	0,000	0,125	1,511	-33,815,825	9,479,665	164,209,777	54,447,479
	312	ATP_Holz(1)		Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)		1 m ³	1,0 m ³	42,64 m ³	-42,241,105	0,000	0,557	6,728	-150,360,933	42,207,082	731,124,484	242,420,920
	312	ATP_Holz_schwarz		Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)		1 m ³	1,0 m ³	0,10 m ³	-98,083	0,000	0,001	0,016	-349,600	98,004	1,697,657	562,897
	258	ATP_Isolierung		Gummi-Bodenbelag profiliert EN 12199		1 m ²	1,0 m ²	28,75 m ²	402,213	0,000	0,114	1,002	8,952,750	0,000	9,359,563	1,456
	356	ATP_Lueftungsgitter		Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)		1 kg	0,00013 m ³	0,04 m ³	421,550	0,000	0,161	1,246	6,172,614	0,000	6,748,602	3,389

II ERGEBNISBERICHTE FALLSTUDIE 2: WOHNBAU – EINFAMILIENHAUS

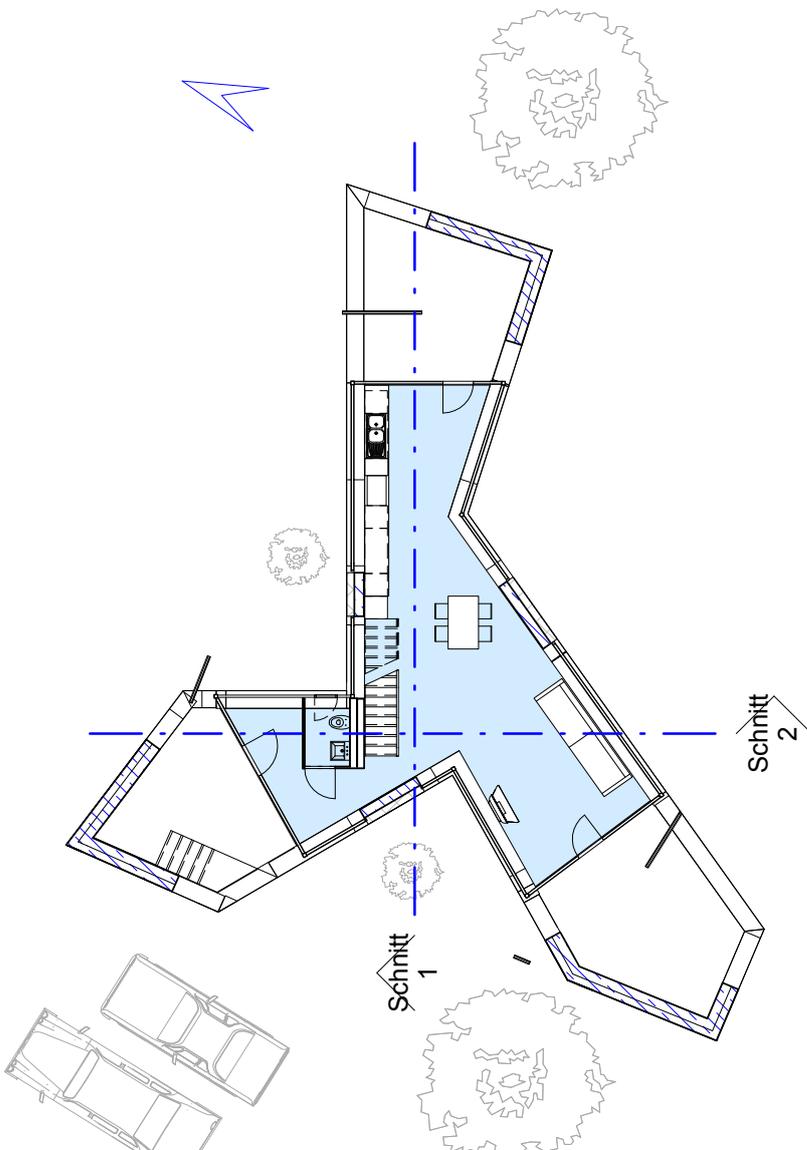
II.A Gebäudepläne



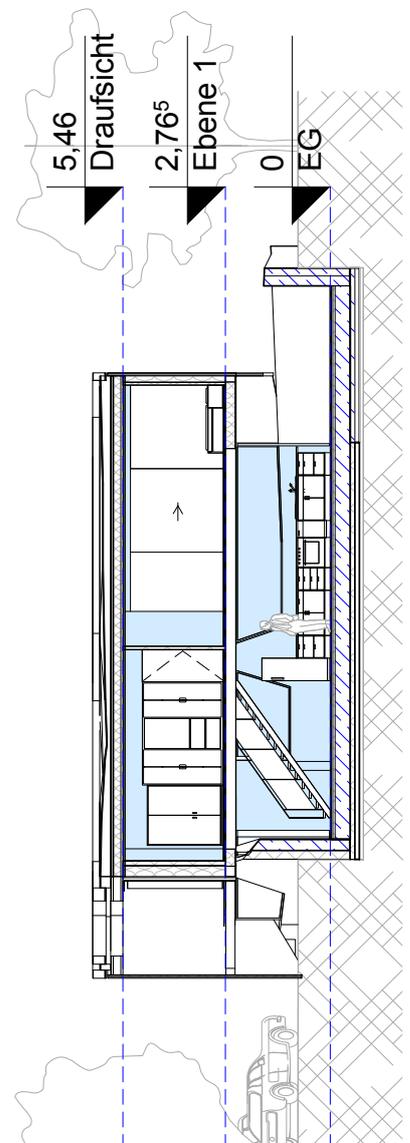
Grundriss OG (M1:200)



Schnitt 2 (M1:200)



Grundriss EG (M1:200)



Schnitt 1 (M1:200)

II.B Building Performance Simulation

II.B.1 Green Building Studio Internetportal



[Downloads](#) | [Help](#) | [Sign Out](#)
[Project Solon Beta](#) | [Classic](#)

My Projects
Dashboards
My Profile
My Account
Welcome, Sebastian!

My Projects > **House in Saka Japan**

Run List
Run Charts
Project Defaults
Project Details
Project Members
Utility Information
Weather Station
Notes

Run Name: House in Saka Japan

Energy and Carbon Results
US EPA Energy Star
Water Usage
Photovoltaic Analysis
LEED Daylight
3D VRML View
Export and Download Data Files
Design Alternatives

Project Template Applied: [House in Saka](#)

Location: ,

Building Type: SingleFamily

Floor Area: 155 m²

Electric Cost: \$0.23 / kWh

Fuel Cost: \$0.00 / MJ

Utility Data Used: [Project Default Utility Rates](#)

1 Base Run

Energy, Carbon and Cost Summary

Annual Energy Cost \$4,357

Lifecycle Cost \$59,340

Annual CO₂ Emissions

Electric 3.6 Mg

Onsite Fuel 1.0 Mg

Large SUV Equivalent 0.5 SUVs / Year

Annual Energy

Energy Use Intensity (EUI) 565 MJ / m² / year

Electric 18,976 kWh

Fuel 19,208 MJ

Annual Peak Demand 3.9 kW

Lifecycle Energy

Electric 569,277 kW

Fuel 576,240 MJ

Assumptions

2 Design Alternative

Create a [Design Alternative](#) to improve your building performance.

Carbon Footprint

Base Run Carbon Neutral Potential

Annual CO ₂ Emissions	Mg
1 Base Run	4.5
Onsite Renewable Potential	-0.2
Natural Ventilation Potential	-0.4
Onsite Biofuel Use	-1.0
Net CO₂ Emissions	3.0

Net Large SUV Equivalent: 0.3 SUVs / Year

Assumptions

Electric Power Plant Sources in Your Region

Fossil	64 %
Nuclear	27 %
Hydroelectric	8 %
Renewable	1 %
Other	N/A

Assumptions

LEED, Photovoltaic, Wind Energy, and Natural Ventilation Potential

* Note: Details shown below are for the Base Run House in Saka

LEED Daylight (more details)

Percentage of building area with glazing factor over 2%: **46.3% - No LEED Credit**

Photovoltaic Potential (more details)

Annual Energy Savings: 12,659 kWh

Total Installed Panel Cost: \$78,477

Nominal Rated Power: 10 kW

Total Panel Area: 71 m²

Maximum Payback Period: 22 years @ \$0.23 / kWh

Natural Ventilation Potential

Total Hours Mechanical Cooling Required: 3,562 Hours

Possible Natural Ventilation Hours: 598 Hours

Possible Annual Electric Energy Savings: 985 kWh

Possible Annual Electric Cost Savings: \$224

Net Hours Mechanical Cooling Required: 2,964 Hours

Assumptions

LEED Water Efficiency (more details)

	L / yr	\$ / yr
Indoor:	98,851	\$159
Outdoor:	444,056	\$305
Total	542,907	\$464

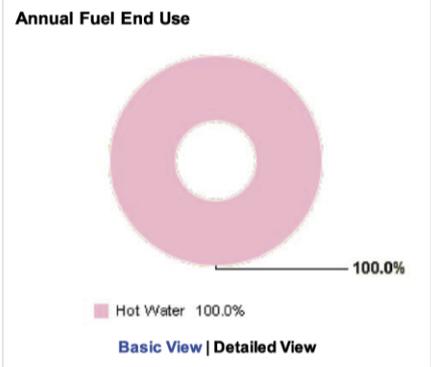
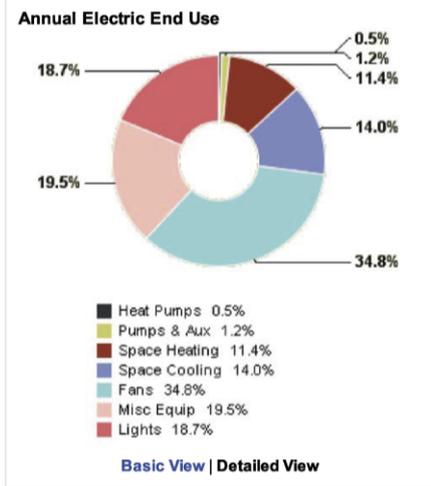
Wind Energy Potential

Annual Electric Generation: 762 kWh

Assumptions

Energy End Use Charts

Note: Details shown below are for the Base Run House in Saka Japan



Building Details and Assumptions

Note: Details shown below are for the Base Run House in Saka Japan

Updating your building assumptions ⓘ

Number of People:	4 people ↓
Average Lighting Power Density:	4.84 W / m ² ↓
Average Equipment Power Density:	4.99 W / m ² ↓
Specific Fan Flow:	3.9 LPerSec / m ²
Specific Fan Power:	-996,176.709 W / LPerSec ↓
Specific Cooling:	0 m ² / kW ↓
Specific Heating:	0 m ² / kW ↓
Total Fan Flow:	602 LPerSec
Total Cooling Capacity:	-175,827 kW
Total Heating Capacity:	175,852 kW

↑ higher than typical value
↓ lower than typical value

Category	Description	U-Value	Area (m ²)	
Exterior Walls	Basiswand: Wand EG	0.17 ⓘ	57 m ²	
	Basiswand: Wand Iso	0.08 ⓘ	1 m ²	
	Basiswand: Holzst?nderwand Hof	0.08 ⓘ	68 m ²	
	Basiswand: Holzst?nderwand Fassade	0.07 ⓘ	37 m ²	
	Basiswand: Holzst?nderwand Hof	0.08 ⓘ	0 m ²	
	R15 Wood Frame Wall	0.31 ⓘ	34 m ²	
	Interior Walls	Basiswand: Holzst?nderwand Toilette	0.56 ⓘ	9 m ²
		Basiswand: Holzst?nderwand Toilette dick	0.14 ⓘ	9 m ²
		Basiswand: GK 10.0	0.46 ⓘ	25 m ²
Basiswand: GK 10.0		0.46 ⓘ	11 m ²	
Basiswand: Vorsatzschale Bad 2		0.17 ⓘ	0 m ²	
Basiswand: Vorsatzschale Bad		0.12 ⓘ	2 m ²	
Uninsulated Interior Wall		2.35 ⓘ	1 m ²	
Interior Floors		Geschossdecke: Decke ged?mmt	0.08 ⓘ	0 m ²
		Geschossdecke: Decke unged?mmt	0.10 ⓘ	7 m ²
	Geschossdecke: Fu?boden OG	1.46 ⓘ	49 m ²	
	Geschossdecke: Fu?boden OG	1.46 ⓘ	33 m ²	
	Geschossdecke: Decke unged?mmt	0.10 ⓘ	0 m ²	
	Basiswand: Vorsatzschale Bad 2	0.17 ⓘ	0 m ²	
	R0 Wood Frame Carpeted Floor	1.16 ⓘ	64 m ²	
	Raised Floors	Geschossdecke: Decke ged?mmt	0.08 ⓘ	13 m ²
	Air Walls	Air Surface	15.32	197 m ²
	Nonsliding Doors	R2 Default Door (16 doors)	2.39 ⓘ	39 m ²
Fixed Windows	North Facing Windows: Low-E-Dreifachverglasung SC=0.4 (2 windows)	U-Value: 1.46 W / (m ² -K), SHGC: 0.41, Vlt: 0.62	9 m ²	
	Non-North Facing Windows: Low-E-Dreifachverglasung SC=0.4 (5 windows)	U-Value: 1.46 W / (m ² -K), SHGC: 0.41, Vlt: 0.62	38 m ²	

> 3D VRML View

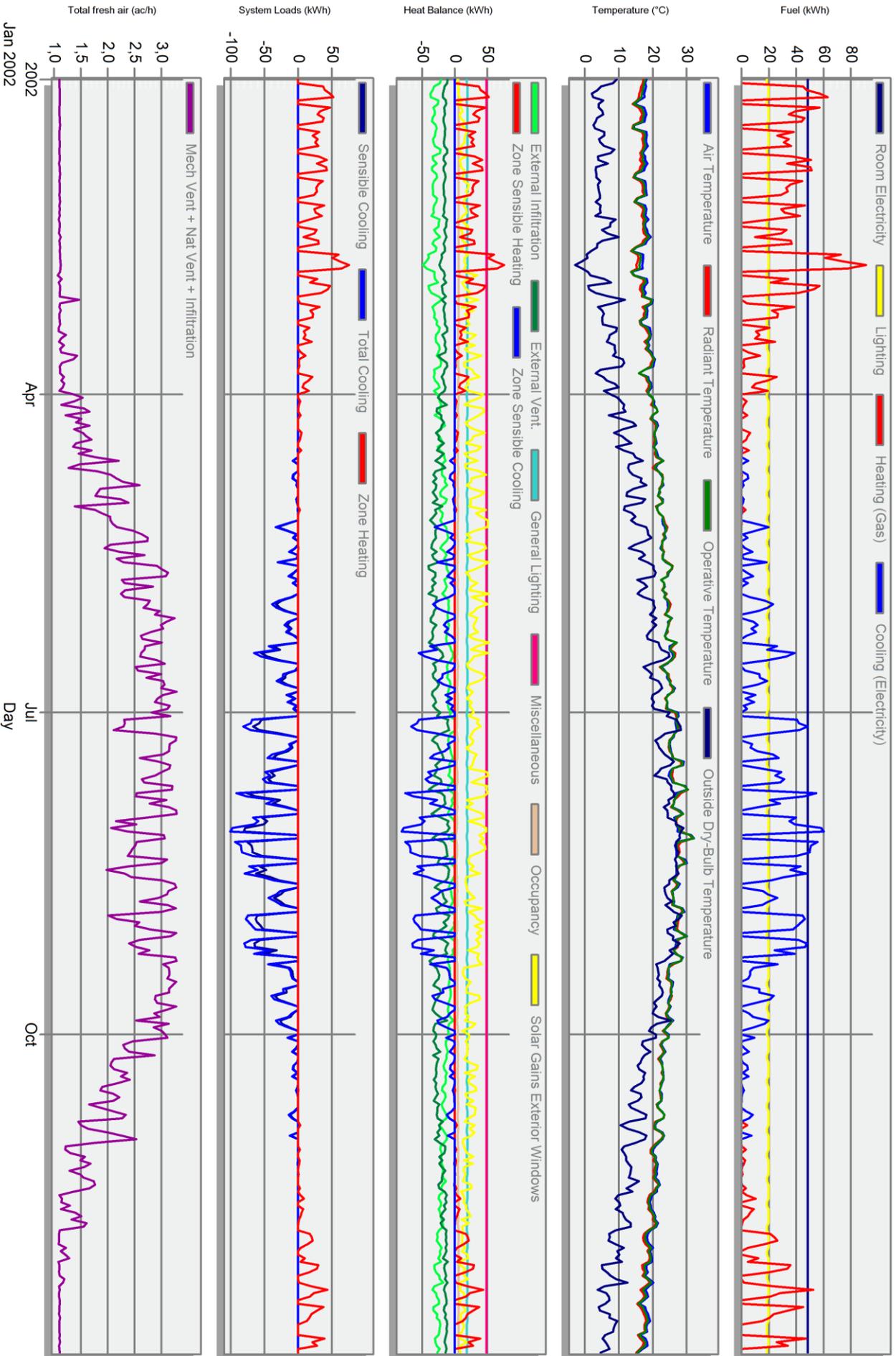
II.B.2 Design Builder

EnergyPlus Output

Temperatures, Heat Gains and Energy Consumption - House in Saka Japan, Building 1

1 Jan - 31 Dec, Daily

Evaluation



Erste Seite der Summary mit Gesamtenergieverbäuchen:

Program Version: **EnergyPlus, Version 8.3.0-6d97d074ea, YMD=2016.04.20 17:20**

[Table of Contents](#)

Tabular Output Report in Format: **HTML**

Building: **Building**

Environment: **HOUSE IN SAKA JAPAN ** MIHO (CIV/JASDF) - JPN IWEC Data WMO#=477430**

Simulation Timestamp: **2016-04-20 17:21:00**

Report: **Annual Building Utility Performance Summary**

[Table of Contents](#)

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2016-04-20 17:21:00**

Values gathered over **8760.00** hours

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	31294.76	201.38	201.38
Net Site Energy	31294.76	201.38	201.38
Total Source Energy	91567.60	589.24	589.24
Net Source Energy	91567.60	589.24	589.24

Site to Source Energy Conversion Factors

	Site=>Source Conversion Factor
Electricity	3.167
Natural Gas	1.084
District Cooling	1.056
District Heating	3.613
Steam	0.250
Gasoline	1.050
Diesel	1.050
Coal	1.050
Fuel Oil #1	1.050
Fuel Oil #2	1.050
Propane	1.050
Other Fuel 1	1.000
Other Fuel 2	1.000

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	155.40
Net Conditioned Building Area	155.40
Unconditioned Building Area	0.00

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	2377.10	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	4075.09	0.00	0.00
Interior Lighting	7104.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	17737.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	24842.57	0.00	0.00	4075.09	2377.10	0.00

Note: District heat appears to be the principal heating source based on energy usage.

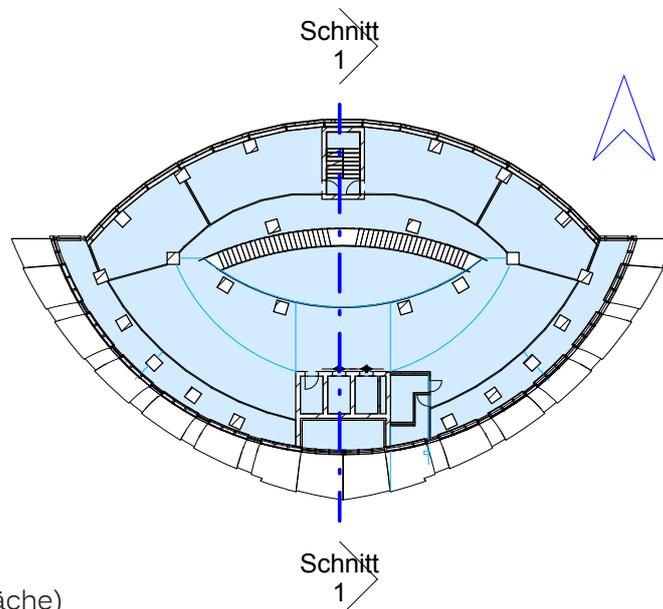
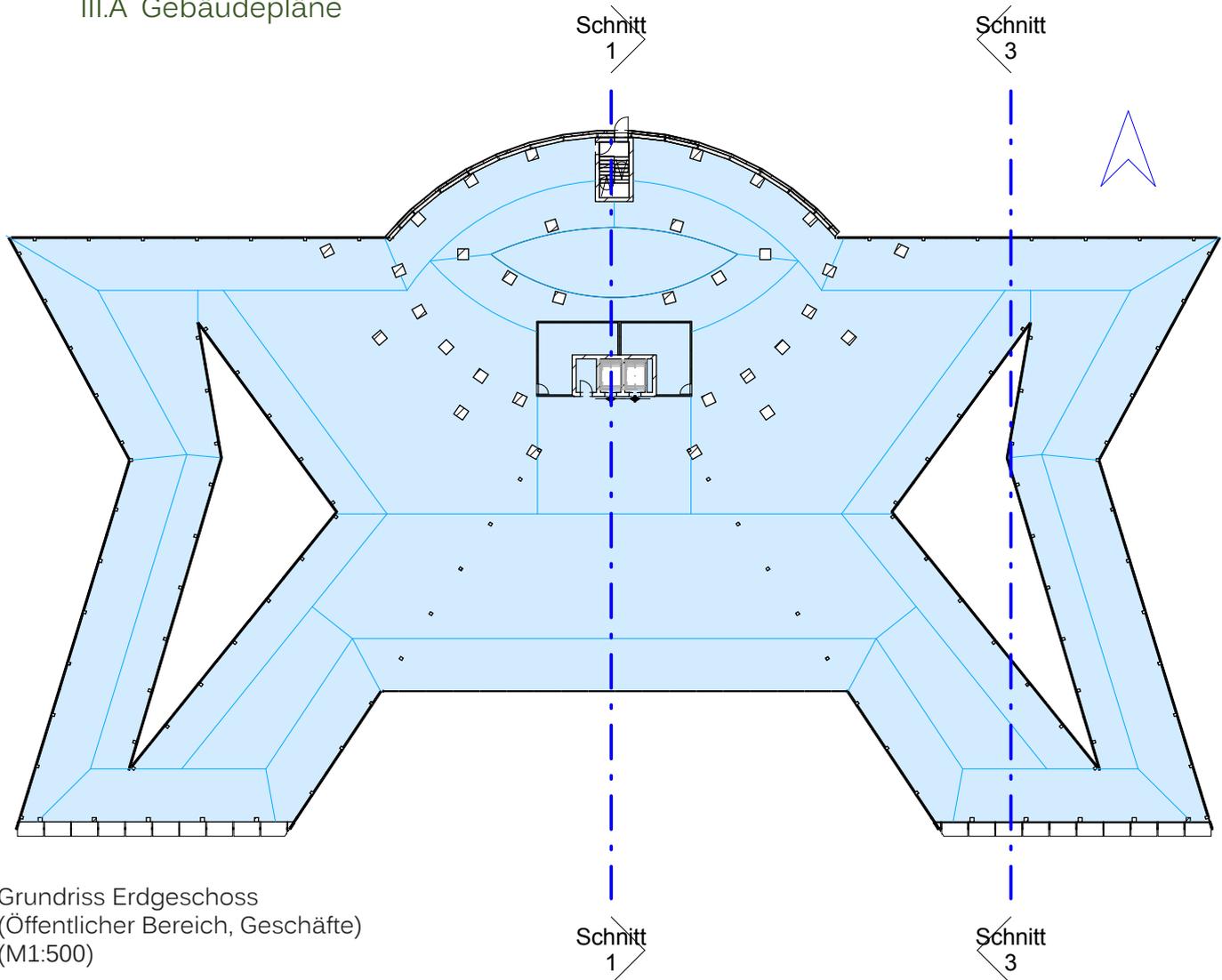
II.C CO₂-Bilanzierung

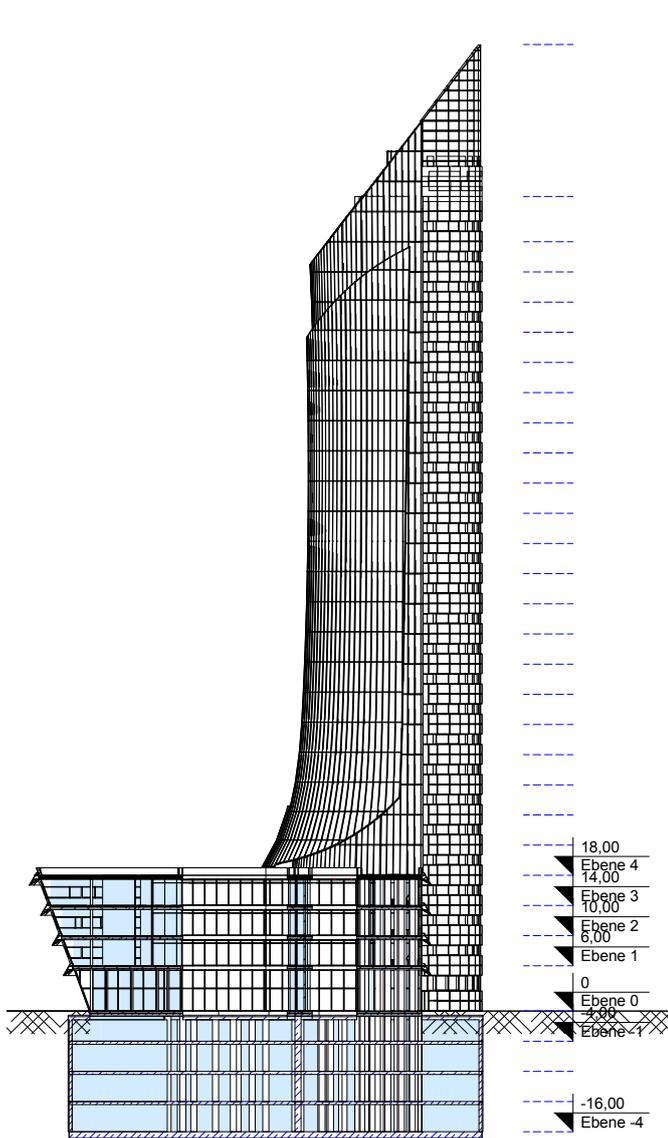
Ökologische Bilanz von Bauteilen und Baustoffen

Zeilen-Nr.	Material	Baustoff	Materialbibliothek	Referenzmenge	Umrechnung	Menge im Projekt	CO ₂ -Bilanz		Summe im Projekt				Recycling		Weitere	
							Globales Erwärmungspotenzial CO ₂ -Äquivalent [kg]	Abbaupotenzial der Ozonschicht R11-Äquivalent [kg]	Bildungspotenzial der Ozonschicht C ₂ H ₄ -Äquivalent [kg]	Versauerungspotenzial für SO ₂ -Äquivalent [kg]	Europhosphierungspotenzial PO ₄ -Äquivalent [kg]	Energieaufwand nicht-erneuerbar Produktion [MJ]	Rückgewinnung Recycling [kg]	Energieaufwand gesamt Produktion [MJ]	Süßwasserverbrauch Produktion [m ³]	
161	Beton - Estrich	Estrichbeton-Zementestrich		1 kg	0,00042 m ³	5,90 m ³	2.500,080	0,000	0,000	31,982	217,189	37,442	19.280,320	0,000	20.684,464	-0,955
161	Beton - Estrich(1)	Estrichbeton-Zementestrich		1 kg	0,00042 m ³	0,76 m ³	322,523	0,000	0,000	4,126	28,018	4,830	4.126	0,000	2.668,398	-0,007
83	Beton - unbewehrt	Betonrohr, unbewehrt		1 kg	0,00042 m ³	9,07 m ³	3.085,960	0,000	0,000	60,661	273,828	27,901	15.155,538	0,000	17.347,455	5,263
83	Beton - unbewehrt(1)	Betonrohr, unbewehrt		1 kg	0,00042 m ³	7,75 m ³	2.637,185	0,000	0,000	51,859	234,006	23,844	12.951,552	0,000	14.824,710	4,497
721	Beton, Sand-Zementabziehböhlen	Zement (CEM III 42,5)		1 kg	0,00042 m ³	0,13 m ³	124,707	0,000	0,000	0,021	0,164	0,019	731,869	0,000	834,250	0,119
721	Beton, Sand-Zementabziehböhlen(1)	Zement (CEM III 42,5)		1 kg	0,00042 m ³	0,18 m ³	175,549	0,000	0,000	0,030	0,231	0,027	1.030,246	0,000	1.174,368	0,168
92	Bitumen	Bitumenbahnen V 60		1 m ²	1,0 m ²	112,91 m ²	246,027	0,000	0,000	15,581	178,750	20,428	21.339,612	0,000	21.604,946	0,417
92	Bitumen(1)	Bitumenbahnen V 60		1 m ²	1,0 m ²	33,31 m ²	72,587	0,000	0,000	4,597	52,738	6,027	6.295,968	0,000	6.374,251	0,123
109	Brettschichtholz - Standardformen	Brettschichtholz - Standardformen		1 m ³	1,0 m ³	15,70 m ³	-13.605,350	-0,001	0,000	3,970	16,725	4,495	-24.406,293	15,977,814	317,313,975	103,010,919
214	Fichte	Furnierschichtholz		1 m ³	1,0 m ³	1,27 m ³	-446,696	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	8.581,293	0,000	47.280,493	3,983
239	Gipskarton	Gipskartonplatte (Feuerschutz)		1 m ²	1,0 m ²	67,68 m ²	152,341	0,000	0,000	-0,063	-0,426	-0,036	2.328,089	0,000	2.466,353	0,486
247	Gipsputz	Gipsputz		1 kg	0,00042 m ³	0,11 m ³	36,667	0,000	0,000	0,005	0,053	0,007	555,238	0,000	610,238	0,076
247	Gipsputz(1)	Gipsputz		1 kg	0,00042 m ³	0,31 m ³	102,000	0,000	0,000	0,015	0,149	0,019	1.544,571	0,000	1.697,571	0,211
185	Glas - klar	Fenster: Fensterglas zweifach		1 m ²	1,0 m ²	11,89 m ²	11,890	0,000	0,000	0,026	0,166	0,012	3.064,211	0,000	3.183,736	0,730
236	Glasfaserbewehrter Gips	Oriented Strand Board (Durchschnitt)		1 m ²	1,0 m ²	314,87 m ²	1.037,808	0,000	0,000	36,150	-8,250	14,903	15.891,438	0,000	16.746,623	2,380
486	Grobspanplatte	Oriented Strand Board (Durchschnitt)		1 m ³	1,0 m ³	7,92 m ³	-4.983,621	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	66.688,659	9,615,090	256.127,245	341.744,177
486	Grobspanplatte(1)	Oriented Strand Board (Durchschnitt)		1 m ³	1,0 m ³	7,37 m ³	-4.639,250	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	62.080,435	8,950,682	238.428,710	318.129,464
714	Halbfestes Dämmmaterial	Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff		1 m ³	1,0 m ³	0,18 m ³	-13,450	0,000	0,000	0,000	0,008	0,001	15,892	0,000	28,978	0,009
633	Keramikfliese	Steinzeugfliesen glasiert		1 m ²	1,0 m ²	63,13 m ²	404,051	0,002	0,000	46,842	112,079	36,608	6.452,193	0,000	6.758,577	0,850
304	Kies(1)	Kies 2/32		1 kg	0,00071 m ³	7,75 m ³	32,259	0,000	0,000	0,098	0,998	0,019	442,899	0,000	519,797	0,080
387	MDF mitdichtete Faserplatte	Mitteldichte Faserplatte (MDF)		1 m ²	1,0 m ²	17,04 m ²	928,774	0,000	0,000	0,001	0,031	0,004	-56.729,452	12,614,577	345.340,709	129.117,719
387	MDF mitdichtete Faserplatte(1)	Mitteldichte Faserplatte (MDF)		1 kg	0,0005 m ³	3,23 m ³	175,964	0,000	0,000	0,000	-10.747,897	0,001	-1.403,863	2.389,943	65.427,856	24.462,495
347	Melamin - Grav	Losemittelack weiß		1 kg	0,0005 m ³	0,02 m ³	88,080	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	2.240,800	0,000	2.240,800	0,374
133	Edelstahl	Edelstahlblech		1 kg	0,00013 m ³	0,05 m ³	284,490	0,000	0,000	0,126	1,179	0,271	4.187,360	0,000	4.734,435	3,639
622	Metall - Lackiert - Weiß	Stahl warmgewalzte Bleche (2-Zömm)		1 kg	0,00013 m ³	0,01 m ³	75,089	0,000	0,000	0,006	0,036	0,008	1.239,206	0,000	1.361,405	0,238
245	Platte, Estrich	Gipsplatte - Trockenestrich		1 m ²	1,0 m ²	95,24 m ²	401,921	0,000	0,000	0,435	1,341	0,975	6.263,114	0,000	6.599,318	2,069
544	PVC-Bodenplatten	PVC Plastisol		1 kg	m ³	0,02 m ³										
727	Stahlbeton - Fertigbeton(1)	Stahlbeton mit Bewehrung (80kg/m ³)		1 m ³	1,0 m ³	0,23 m ³	71,096	0,000	0,000	0,076	1,815	0,069	546,530	0,000	615,096	0,169
727	Stahlbeton - Ortbeton	Stahlbeton mit Bewehrung (80kg/m ³)		1 m ³	1,0 m ³	58,33 m ³	17.799,120	0,000	0,000	19,119	454,402	17,281	136.817,700	0,000	153.982,503	42,195
727	Stahlbeton - Ortbeton(1)	Stahlbeton mit Bewehrung (80kg/m ³)		1 m ³	1,0 m ³	39,90 m ³	12.174,513	0,000	0,000	13,078	310,826	11,821	93.587,914	0,000	105.329,217	28,863
359	Teak	Massivholzparquet (Durchschnitt DE)		1 m ²	1,0 m ²	135,88 m ²	-1.639,852	0,000	0,000	0,289	2,243	0,559	13.226,903	0,091	207.181,402	1.130,587
132	Verglasung - Fensterverglasung	Fenster: Dreifachverglasung		1 m ²	1,0 m ²	75,51 m ²	4.427,672	0,000	0,000	8,505	0,121	3,731	54.870,210	0,000	57.608,058	9,589
713	Wärmedämmung - Hart	XPS-Dämmstoff		1 m ³	1,0 m ³	33,70 m ³	3.265,867	0,000	0,000	0,760	1,232	0,279	97.898,500	0,000	101.128,308	15,441
68	Wärmedämmung - Weich	Baumwolle ökologisch		1 kg	0,025 m ³	59,38 m ³	-2.999,979	0,000	0,000	0,929	22,674	22,727	14.508,210	0,000	71.752,458	2.565,302
68	Wärmedämmung - Weich(1)	Baumwolle ökologisch		1 kg	0,025 m ³	5,75 m ³	-290,288	0,000	0,000	0,090	2,199	2,001	1.403,863	0,000	6.943,007	248,227
734	Fensterelement 1-flg	Fenster Typ Bad		1 Stück	1,0 m ²	1,0 m ²	49,943	0,000	0,000	0,054	0,046	0,027	772,622	0,000	1.139,262	0,289
289	Drehflügel 1-flg - Blockzarge	Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen		1 Stück	1,0 m ²	1,0 m ²	48,969	0,000	0,000	0,008	0,005	0,001	889,770	1,750	3.963,328	0,000
289	Drehflügel 1-flg - Blockzarge	Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen		1 Stück	1,0 m ²	2,0 m ²	97,938	0,000	0,000	0,017	0,010	0,001	1.779,540	3,500	7.926,655	0,000
735	Schiebeflügel 3-flg	Fenstertyp OG 1		1 Stück	1,0 m ²	1,0 m ²	639,133	0,000	0,000	1,233	0,198	0,536	8.655,135	0,000	10.979,886	1,735
736	Schiebeflügel 3-flg	Fenstertyp OG 2		1 Stück	1,0 m ²	1,0 m ²	915,227	0,000	0,000	1,788	0,277	0,775	12.383,718	0,000	15.721,621	2,423
737	Schiebeflügel 3-flg	Fenstertyp OG 3		1 Stück	1,0 m ²	1,0 m ²	1.032,402	0,000	0,000	1,998	0,329	0,870	13.980,468	0,000	17.736,456	2,786
733	Türellement 1-flg - Drehflügel - Glas	Fenstertyp Außentüren		1 Stück	1,0 m ²	3,0 m ²	513,858	0,000	0,000	0,721	0,298	0,351	7.109,464	0,000	8.896,256	2,136
289	Tür mit Winkel	Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen		1 Stück	1,0 m ²	1,0 m ²	48,969	0,000	0,000	0,008	0,005	0,001	889,770	1,750	3.963,328	0,000
Summe							25.592,0 kg	0,0 kg	305,0 kg	1.905,3 kg	236,8 kg	628.217,4 kg	49.555,20 kg	2.177.245,7 MJ	920.540,0 m³	

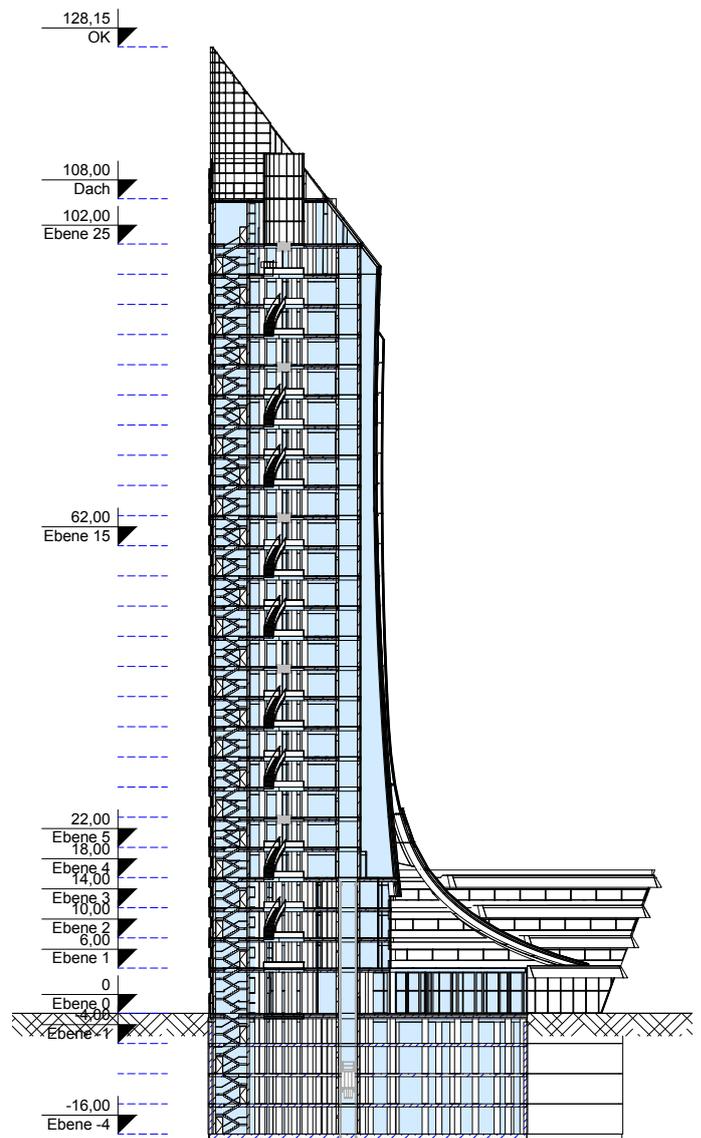
III ERGEBNISBERICHTE FALLSTUDIE 3: BÜROBAU

III.A Gebäudepläne





Schnitt 3 (M1:1000)

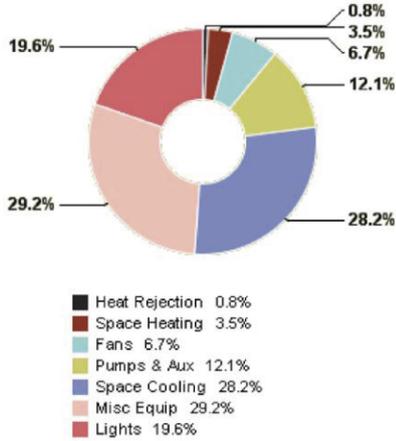


Schnitt 1 (M1:1000)

Energy End Use Charts

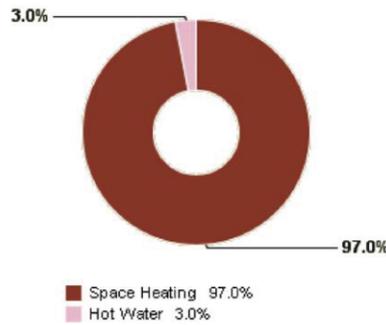
Note: Details shown below are for the Base Run [03-Revit] Büroturm 2.0 (Holz)

Annual Electric End Use



Basic View | Detailed View

Annual Fuel End Use



Basic View | Detailed View

Building Details and Assumptions

Note: Details shown below are for the Base Run [03-Revit] Büroturm 2.0 (Holz)

Updating your building assumptions

Building Summary - Quick Stats

Number of People:	1,313 people	↓
Average Lighting Power Density:	9.69 W / m ²	↓
Average Equipment Power Density:	14.40 W / m ²	
Specific Fan Flow:	6.4 LPerSec / m ²	
Specific Fan Power:	-379,626.996 W / LPerSec	↓
Specific Cooling:	0 m ² / kW	↓
Specific Heating:	0 m ² / kW	↓
Total Fan Flow:	209,940 LPerSec	
Total Cooling Capacity:	-23,351,633 kW	
Total Heating Capacity:	23,360,465 kW	

↑ higher than typical value
↓ lower than typical value

Base Run Construction

Roofs	Geschossdecke: Holz/Beton	2 m ²
	U-Value: 0.30	
	Basisdach: Gr?ndach	1,841 m ²
	U-Value: 0.13	
	Geschossdecke: Verglasung Innen	57 m ²
	U-Value: 22.00	
Exterior Walls	Basisdach: Dreifachverglasung + Basisdach: Dreifachverglasung	163 m ²
	U-Value: 0.35	
	R20 over Roof Deck - Cool Roof	14 m ²
	U-Value: 0.25	
	R13 Wood Frame Wall, Wood Shingle	113 m ²
	U-Value: 0.46	
Ceilings	Interior Drop Ceiling Tile	726 m ²
	U-Value: 2.60	
Exterior Walls	Basiswand: Dreifachverglasung	1,926 m ²
	U-Value: 0.58	
	Basiswand: Fassadenelement Holz	306 m ²
	U-Value: 0.13	
	Basiswand: Fassadenelement Photovoltaik	78 m ²
	U-Value: 0.13	
	Basiswand: Fassadenelement GiPV 40%	31 m ²
	U-Value: 0.70	
	Basiswand: Wand Holzbau	753 m ²
	U-Value: 0.10	
Basiswand: Wand Kamin Holz	27 m ²	
U-Value: 0.16		
Exterior Walls	Basiswand: Gr?nfassade	1,563 m ²
	U-Value: 0.12	
	R13 Wood Frame Wall, Wood Shingle	84 m ²
	U-Value: 0.46	
Exterior Walls	R7.6 8in Concrete	4,478 m ²
	U-Value: 0.67	

Interior Walls	Basiswand: Dreifachverglasung U-Value: 0.58	1 m ²	
	Basiswand: Fassadenelement Holz U-Value: 0.13	10 m ²	
	Basiswand: Wand Holzbau U-Value: 0.10	21 m ²	
	Basiswand: Wand Holzbau U-Value: 0.10	29 m ²	
	Basiswand: Wand Kern Holz U-Value: 0.40	2,916 m ²	
	Basiswand: Wand Kamin Holz U-Value: 0.16	561 m ²	
	Basiswand: Wand Kamin Holz U-Value: 0.16	149 m ²	
	Basiswand: GK 12.5 U-Value: 0.41	535 m ²	
	Basiswand: GK 12.5 U-Value: 0.41	373 m ²	
	Basiswand: GK 25.0 U-Value: 0.16	161 m ²	
	Basiswand: GK 10.0 U-Value: 0.42	423 m ²	
	Basiswand: GK 25.0 U-Value: 0.16	16 m ²	
	Basiswand: GK 10.0 U-Value: 0.42	450 m ²	
	Basiswand: Wand Holz 15.0 + Basiswand: Wand Kern Holz U-Value: 0.27	336 m ²	
	Basiswand: GK 12.5 + Basiswand: GK 12.5 U-Value: 0.21	56 m ²	
	Uninsulated Interior Wall U-Value: 2.35	6,031 m ²	
	Interior Floors	Geschossdecke: EG U-Value: 0.10	2,342 m ²
		Geschossdecke: Holz/Beton U-Value: 0.30	13,940 m ²
		Geschossdecke: Lichthof Garten U-Value: 0.30	56 m ²
		Geschossdecke: STB 40.0 U-Value: 2.61	12,914 m ²
Basisdach: Dreifachverglasung + Basisdach: Dreifachverglasung U-Value: 0.35		196 m ²	
Raised Floors	Geschossdecke: Dreifachverglasung U-Value: 0.58	9 m ²	
Underground Ceilings	Geschossdecke: UG zu EG U-Value: 0.16	1,282 m ²	
Underground Walls	Basiswand: STB 40.0 WD 12.0 2 U-Value: 0.24	4,390 m ²	
	R0 8in (203mm) CMU UnderGnd Wall, assembly U-0.645 U-Value: 0.18	1 m ²	
Underground Slabs	Geschossdecke: Bodenplatte U-Value: 0.26	4,315 m ²	
Nonsliding Doors	R2 Default Door (179 doors) U-Value: 2.39	321 m ²	
Air Openings	Non-North Facing Windows: Single Tint Green U-SI 6.17, U-IP 1.09, SHGC 0.61, VLT 0.75 (153 doors) U-Value: 6.17 W / (m ² -K), SHGC: 0.61, Vlt: 0.75	733 m ²	
Fixed Windows	North Facing Windows: Low-E-Dreifachverglasung SC=0.4 (461 windows) U-Value: 1.46 W / (m ² -K), SHGC: 0.41, Vlt: 0.62	1,674 m ²	
	North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (251 windows) U-Value: 3.16 W / (m ² -K), SHGC: 0.69, Vlt: 0.78	736 m ²	
	Non-North Facing Windows: Low-E-Dreifachverglasung SC=0.4 (1140 windows) U-Value: 1.46 W / (m ² -K), SHGC: 0.41, Vlt: 0.62	4,087 m ²	
	Non-North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (819 windows) U-Value: 3.16 W / (m ² -K), SHGC: 0.69, Vlt: 0.78	3,579 m ²	
> 3D VRML View			

4. (höchste) Optimierungsstufe (Holz-Beton-Bau, Begrünung, Beschattung)



[Downloads](#) | [Help](#) | [Sign Out](#)
[Project Solon Beta](#) | [Classic](#)

My Projects
Dashboards
My Profile
My Account

Welcome, Sebastian!

My Projects > **Büroturm**

Run List
Run Charts
Project Defaults
Project Details
Project Members
Utility Information
Weather Station
Notes

Run Name: [03-Revit] Büroturm 2.0 (Holz)

Energy and Carbon Results
US EPA Energy Star
Water Usage
Photovoltaic Analysis
LEED Daylight
3D VRML View
Export and Download Data Files
Design Alternatives

Project Template Applied: **Büroturm_default**

Location: Tokyo, Tokyo

Building Type: Office

Floor Area: 33,305 m²

Electric Cost: \$0.16 / kWh

Fuel Cost: \$0.01 / MJ

Utility Data Used: [Project Default Utility Rates](#)

1 Base Run

Energy, Carbon and Cost Summary

Annual Energy Cost \$1,222,966

Lifecycle Cost \$16,656,800

Annual CO₂ Emissions

Electric 1,420.6 Mg

Onsite Fuel 985.8 Mg

Large SUV Equivalent 241.1 SUVs / Year

Annual Energy

Energy Use Intensity (EUI) 1,284 MJ / m² / year

Electric 6,391,445 kWh

Fuel 19,767,780 MJ

Annual Peak Demand 1,910.3 kW

Lifecycle Energy

Electric 191,743,350 kWh

Fuel 593,033,400 MJ

Assumptions

2 Design Alternative

Create a [Design Alternative](#) to improve your building performance.

Carbon Footprint

Base Run Carbon Neutral Potential

Annual CO ₂ Emissions	Mg
1 Base Run	2,406.4
Onsite Renewable Potential	-65.2
Natural Ventilation Potential	-139.3
Onsite Biofuel Use	-985.8
Net CO₂ Emissions	1,216.1

Net Large SUV Equivalent: 121.9 SUVs / Year

Assumptions

Electric Power Plant Sources in Your Region

Fossil	97 %
Nuclear	N/A
Hydroelectric	2 %
Renewable	1 %
Other	N/A

Assumptions

LEED, Photovoltaic, Wind Energy, and Natural Ventilation Potential

* Note: Details shown below are for the Base Run [03-Revit] Büroturm 2.0 (Holz)

LEED Daylight (more details)

Percentage of building area with glazing factor over 2%: **Error! Error!**

LEED Water Efficiency (more details)

	L / yr	\$ / yr
Indoor:	28,162,795	\$38,253
Outdoor:	1,063,385	\$730
Total	29,226,181	\$38,984

Photovoltaic Potential (more details)

Annual Energy Savings: 284,067 kWh

Total Installed Panel Cost: \$2,133,206

Nominal Rated Power: 267 kW

Total Panel Area: 1,931 m²

Maximum Payback Period: 33 years @ \$0.16 / kWh

Wind Energy Potential

Annual Electric Generation: 469 kWh

Assumptions

Natural Ventilation Potential

Total Hours Mechanical Cooling Required: 4,801 Hours

Possible Natural Ventilation Hours: 860 Hours

Possible Annual Electric Energy Savings: 607,973 kWh

Possible Annual Electric Cost Savings: \$95,938

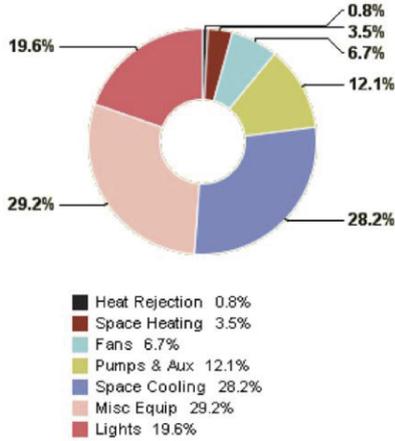
Net Hours Mechanical Cooling Required: 3,941 Hours

Assumptions

Energy End Use Charts

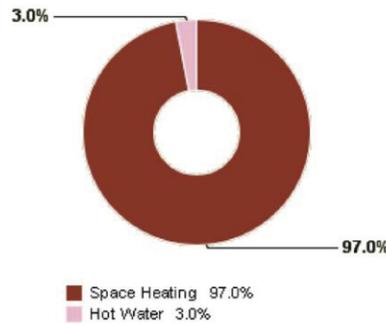
Note: Details shown below are for the Base Run [03-Revit] Büroturm 2.0 (Holz)

Annual Electric End Use



Basic View | Detailed View

Annual Fuel End Use



Basic View | Detailed View

Building Details and Assumptions

Note: Details shown below are for the Base Run [03-Revit] Büroturm 2.0 (Holz)

Updating your building assumptions

Building Summary - Quick Stats

Number of People:	1,313 people	↓
Average Lighting Power Density:	9.69 W / m ²	↓
Average Equipment Power Density:	14.40 W / m ²	
Specific Fan Flow:	6.4 LPerSec / m ²	
Specific Fan Power:	-379,626.996 W / LPerSec	↓
Specific Cooling:	0 m ² / kW	↓
Specific Heating:	0 m ² / kW	↓
Total Fan Flow:	209,940 LPerSec	
Total Cooling Capacity:	-23,351,633 kW	
Total Heating Capacity:	23,360,465 kW	

↑ higher than typical value
↓ lower than typical value

Base Run Construction

Roofs	Geschossdecke: Holz/Beton	2 m ²
	U-Value: 0.30	
	Basisdach: Gr?ndach	1,841 m ²
	U-Value: 0.13	
	Geschossdecke: Verglasung Innen	57 m ²
	U-Value: 22.00	
Ceilings	Basisdach: Dreifachverglasung + Basisdach: Dreifachverglasung	163 m ²
	U-Value: 0.35	
	R20 over Roof Deck - Cool Roof	14 m ²
	U-Value: 0.25	
	R13 Wood Frame Wall, Wood Shingle	113 m ²
	U-Value: 0.46	
Exterior Walls	Interior Drop Ceiling Tile	726 m ²
	U-Value: 2.60	
	Basiswand: Dreifachverglasung	1,926 m ²
	U-Value: 0.58	
	Basiswand: Fassadenelement Holz	306 m ²
	U-Value: 0.13	
	Basiswand: Fassadenelement Photovoltaik	78 m ²
	U-Value: 0.13	
	Basiswand: Fassadenelement GiPV 40%	31 m ²
	U-Value: 0.70	
Basiswand: Wand Holzbau	753 m ²	
U-Value: 0.10		
Basiswand: Wand Kamin Holz	27 m ²	
U-Value: 0.16		
Basiswand: Gr?nfassade	1,563 m ²	
U-Value: 0.12		
R13 Wood Frame Wall, Wood Shingle	84 m ²	
U-Value: 0.46		
R7.6 8in Concrete	4,478 m ²	
U-Value: 0.67		

Interior Walls	Basiswand: Dreifachverglasung U-Value: 0.58	1 m ²	
	Basiswand: Fassadenelement Holz U-Value: 0.13	10 m ²	
	Basiswand: Wand Holzbau U-Value: 0.10	21 m ²	
	Basiswand: Wand Holzbau U-Value: 0.10	29 m ²	
	Basiswand: Wand Kern Holz U-Value: 0.40	2,916 m ²	
	Basiswand: Wand Kamin Holz U-Value: 0.16	561 m ²	
	Basiswand: Wand Kamin Holz U-Value: 0.16	149 m ²	
	Basiswand: GK 12.5 U-Value: 0.41	535 m ²	
	Basiswand: GK 12.5 U-Value: 0.41	373 m ²	
	Basiswand: GK 25.0 U-Value: 0.16	161 m ²	
	Basiswand: GK 10.0 U-Value: 0.42	423 m ²	
	Basiswand: GK 25.0 U-Value: 0.16	16 m ²	
	Basiswand: GK 10.0 U-Value: 0.42	450 m ²	
	Basiswand: Wand Holz 15.0 + Basiswand: Wand Kern Holz U-Value: 0.27	336 m ²	
	Basiswand: GK 12.5 + Basiswand: GK 12.5 U-Value: 0.21	56 m ²	
	Uninsulated Interior Wall U-Value: 2.35	6,031 m ²	
	Interior Floors	Geschossdecke: EG U-Value: 0.10	2,342 m ²
		Geschossdecke: Holz/Beton U-Value: 0.30	13,940 m ²
		Geschossdecke: Lichthof Garten U-Value: 0.30	56 m ²
		Geschossdecke: STB 40.0 U-Value: 2.61	12,914 m ²
Basisdach: Dreifachverglasung + Basisdach: Dreifachverglasung U-Value: 0.35		196 m ²	
Raised Floors	Geschossdecke: Dreifachverglasung U-Value: 0.58	9 m ²	
Underground Ceilings	Geschossdecke: UG zu EG U-Value: 0.16	1,282 m ²	
Underground Walls	Basiswand: STB 40.0 WD 12.0 2 U-Value: 0.24	4,390 m ²	
	R0 8in (203mm) CMU UnderGnd Wall, assembly U-0.645 U-Value: 0.18	1 m ²	
Underground Slabs	Geschossdecke: Bodenplatte U-Value: 0.26	4,315 m ²	
Nonsliding Doors	R2 Default Door (179 doors) U-Value: 2.39	321 m ²	
Air Openings	Non-North Facing Windows: Single Tint Green U-SI 6.17, U-IP 1.09, SHGC 0.61, VLT 0.75 (153 doors) U-Value: 6.17 W / (m ² -K), SHGC: 0.61, Vlt: 0.75	733 m ²	
Fixed Windows	North Facing Windows: Low-E-Dreifachverglasung SC=0.4 (461 windows) U-Value: 1.46 W / (m ² -K), SHGC: 0.41, Vlt: 0.62	1,674 m ²	
	North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (251 windows) U-Value: 3.16 W / (m ² -K), SHGC: 0.69, Vlt: 0.78	736 m ²	
	Non-North Facing Windows: Low-E-Dreifachverglasung SC=0.4 (1140 windows) U-Value: 1.46 W / (m ² -K), SHGC: 0.41, Vlt: 0.62	4,087 m ²	
	Non-North Facing Windows: Double Clear U-SI 3.16, U-IP 0.56, SHGC 0.69, VLT 0.78 (819 windows) U-Value: 3.16 W / (m ² -K), SHGC: 0.69, Vlt: 0.78	3,579 m ²	
> 3D VRML View			

4. (höchste) Optimierungsstufe

Ökologische Bilanz von Bauteilen und Baustoffen

Zellen-Nr.	Material	Baustoff	Referenzmenge	Umrechnung	Menge im Projekt	CO ₂ -Bilanz		Summe im Projekt			Recycling	Energieaufwand gesamt	Weitere		
						Globales Erweitertes Erzeugnis	Globales Erzeugnis	Abbaupotenzial der Ozeanschicht	Bildungspotenzial für Ozon	Entropiepotenzial				Versauerungspotenzial	Energieaufwand nicht-erneuerbar
				Einheiten		CO ₂ -Äquivalent [kg]	CO ₂ -Äquivalent [kg]	R11-Äquivalent [kg]	C ₁ -H ₄ -Äquivalent [kg]	PO ₄ -Äquivalent [kg]	SO ₂ -Äquivalent [kg]	Produktion [kg]	Produktion [kg]	Produktion [m ³]	
Omnits															
161	Beton	Estrichmörtel-Zementestrich	1 kg	0,00042 m ³	1668,97 m ³	707,334,000	0,039	61,448,009	10,593,369	5,454,879,301	0,000	0,000	5,852,146,533	-15,458	
727	Bewurds Dach	Sträucher (Dachbewuchs)	1 m ²	1,0 m ²	3751,29 m ²	-32,861,265	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
726	Bewurds Fassade	Kletterpflanzen (Fassadenbewuchs)	1 m ²	1,0 m ²	2701,46 m ²	-17,748,612	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
89	Blumen	Blumenbahnen G 200 S4	1 m ²	1,0 m ²	2508,17 m ²	6,656,670	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
120	Dach - EPDM-Spiersdicht	Dachbahnen EPDM	1 m ²	1,0 m ²	2619,69 m ²	23,357,147	0,000	32,117	3,746	6,585,589,815	0,000	0,000	673,983,107	14,788	
120	Dach - EPDM-Spiersdicht(1)	Dachbahnen EPDM	1 m ²	1,0 m ²	103,51 m ²	922,931	0,000	1,269	1,269	26,023,420	0,000	0,000	26,631,668	3,088	
132	Dreifachverglasung	Fenster-Dreifachverglasung	1 m ²	1,0 m ²	950,49 m ²	560,627,016	-0,002	15,297	472,365	6,947,606,630	0,000	0,000	7,294,269,924	1,214,182	
252	Glaswandbauplate	Glaswandbauplate	1 m ²	1,0 m ²	6697,12 m ²	151,957,539	0,000	1,031	1,031	2,390,200,344	0,000	0,000	2,445,464,936	562,491	
184	Glas	Fenster: Fensterglas einfach	1 m ²	1,0 m ²	7504,35 m ²	76,619,393	0,000	1,314	1,314	967,310,457	0,000	0,000	1,005,042,319	230,534	
237	Gleisabwehrer Gips	Gipsfaserplatte nach DIN EN 15283-2 oder ETA	1 m ²	1,0 m ²	9740,67 m ²	30,001,267	0,000	1,266,387	194,363	3,880	461,025,968	0,000	0,000	478,948,793	70,347
486	Grobspanplatte	Oriented Strand Board (Durchschnitt DE)	1 m ³	1,0 m ³	257,91 m ³	-162,370,353	0,000	0,091	0,000	0,000	2,172,773,111	313,267,802	8,344,845,087	11,134,315,999	
486	Grobspanplatte(1)	Oriented Strand Board (Durchschnitt DE)	1 m ³	1,0 m ³	28,08 m ³	-17,676,240	0,000	0,001	0,000	0,000	236,535,510	34,103,447	908,449,301	1,212,121,180	
135	Holz - Balken	Einlaidämmung Mineralwolle	1 m ³	1,0 m ³	235,81 m ³	17,351,194	0,000	0,007	0,000	0,001	230,861,906	0,000	251,688,998	63,458	
587	Holz - Birke	Schmittholz trocken	1 m ³	1,0 m ³	6,12 m ³	-8,481,505	0,000	0,005	0,008	0,008	-40,701,440	0,000	71,994,953	-9,181,978	
108	Holz - BSH	Brettschichtholz - Sonderformen (Durchschnitt DE)	1 m ³	1,0 m ³	7837,49 m ³	-6,681,773,725	-0,271	6,843,304	2,015,222	-11,032,677,923	7,978,564,820	151,578,824,659	52,929,955,766		
108	Holz - BSH(1)	Brettschichtholz - Sonderformen (Durchschnitt DE)	1 m ³	1,0 m ³	344,98 m ³	-294,105,839	-0,012	81,082	88,702	-485,615,816	351,185,568	6,671,913,663	2,329,771,958		
359	Holz - Parkett	Massivholparkett (Durchschnitt DE)	1 m ²	1,0 m ²	22188,46 m ²	-267,788,584	0,002	47,138	91,276	2,159,959,879	14,866	33,832,827,396	184,625,415		
279	Holzfaserdämmplatte	Holzfaserdämmplatten	1 m ³	1,0 m ³	300,98 m ³	-35,696,228	0,000	6,534	4,123	-263,658,480	52,069,540	1,480,821,600	75,847		
386	MDF mitdichtete Faserrplatte	Mitteldichte Faserrplatte (Durchschnitt DE)	1 m ³	1,0 m ³	25,28 m ³	-16,050,216	0,000	0,001	0,009	0,000	114,207,688	37,405,373	992,484,482	290,573,972	
386	MDF mitdichtete Faserrplatte(1)	Mitteldichte Faserrplatte (Durchschnitt DE)	1 m ³	1,0 m ³	6,27 m ³	-3,980,489	0,000	0,000	0,000	0,000	28,323,655	9,276,615	246,138,350	72,069,989	
133	Metall - Chrom	Edeleisblech	1 kg	0,00013 m ²	0,01 m ²	61,960	0,000	0,027	0,027	911,973	0,000	1,031,122	0,749		
133	Metall - Edelsahl, poliert	Edeleisblech	1 kg	0,00013 m ²	0,01 m ²	49,568	0,000	0,022	0,022	729,979	0,000	824,897	0,599		
133	Metall - Lackiert - Grau	Stahl Feinblech (20um bandverzinkt)	1 kg	0,00013 m ²	12,04 m ²	74,617,973	0,000	33,000	309,135	71,120	1,098,289,359	0,000	1,241,795,902	902,019	
620	Metall - Lochblech 8mm	Stahl Feinblech (20um bandverzinkt)	1 kg	0,00013 m ²	8,14 m ²	56,745,609	0,000	199,299,301	2,442,665,768	196,695,973	981,456,363	0,000	1,108,905,935	701,742	
623	Metall - Stahl	Stahlprofil	1 kg	0,00013 m ²	204,73 m ²	1,320,755,477	0,000	12,287,651	17,847,614	1,098,851	17,889,334,504	0,000	20,619,335,040	3,877,988	
607	Photovoltaik	Solaranlage Vakuumröhrenkollektor	1 m ²	1,0 m ²	3195,63 m ²	257,217,615	0,000	10,178	105,935	2,314	3,408,513,279	0,000	4,108,499,715	1,383,231	
606	Photovoltaik 40% Transparenz	Solaranlage Flachkollektor	1 m ²	1,0 m ²	1039,23 m ²	55,374,068	0,000	0,063	0,063	745,839,708	0,000	917,421,697	315,128		
505	Polyethylen, niedrige Dichte	PE-Noppenfolie zur Abdichtung	1 m ²	1,0 m ²	44506,23 m ²	175,977,641	0,000	198,324	648,678	77,770	5,287,340,362	0,000	5,426,798,386	751,710	
544	PVC, hart	PVC Plasteol	1 kg	0,00064 m ²	0,17 m ²	38,839,509	0,000	595,416	93,360,918	969,590	913,842,268	0,000	959,502,135	164,937	
544	PVC, hart(1)	PVC Plasteol	1 kg	0,00064 m ²	0,17 m ²	652,517	0,000	10,003	157,265	16,295	15,352,683	0,000	16,119,786	2,771	
623	Schindler-Metall	Stahlprofil	1 kg	0,00013 m ²	14,53 m ²	93,760,001	0,000	872,296	1,266,996	78,007	1,269,958,082	0,000	1,463,759,881	275,297	
6	Sperholz, Verkleidung(L)	3- und 5-Schicht Massivholzplatte (Durchschnitt DE)	1 m ³	1,0 m ³	111,42 m ³	-94,610,525	-0,004	24,602	86,690	27,591	-182,125,571	114,091,008	2,055,641,384	760,088,222	
734	Stahlbeton - Fertigbeton	Transportbeton C20/25 mit Bewehrung (100kg/m ³)	1 m ³	1,0 m ³	48,20 m ³	15,385,807	0,000	15,777	374,850	14,294	122,979,363	0,000	138,919,462	38,417	
734	Stahlbeton - Ortbeton	Transportbeton C20/25 mit Bewehrung (100kg/m ³)	1 m ³	1,0 m ³	16869,93 m ³	5,384,494,363	0,000	5,521,589	131,185,974	5,002,584	43,038,999,290	0,000	48,617,584,048	13,444,816	
Standard - Luftschicht															
Tür - Holztürlatt															
Umgebung - Erde															
Umgebung - Erde(1)															
184	Verglasung - Fensterverglasung	Fenster: Fensterglas einfach	1 m ²	1,0 m ²	314,13 m ²	3,207,257	0,000	0,346	8,136	0,162	40,491,228	0,000	42,070,669	9,650	
155	Wärmedämmung - hart	EPS-Hartschaum (Styropor ®) für Decken/Böden und als	1 m ³	1,0 m ³	4258,08 m ³	498,135,996	0,002	2,283,130	493,639	42,760	6,655,800,159	0,000	6,499,520,217	1,684,887	
68	Wärmedämmung - weich	Perimeterdämmung BIP-035	1 kg	0,0075 m ²	1449,88 m ²	-244,160,129	0,000	75,626	1,849,663	1,682,636	1,880,783,901	0,000	5,839,736,061	208,783,008	
68	Wärmedämmung - weich(1)	Baumwolle ökologisch	1 kg	0,0075 m ²	110,51 m ²	-18,610,389	0,000	5,764	140,985	128,254	90,001,287	0,000	445,116,894	15,913,872	
728	Lüftung	Feuerschutztür T30	1 Stück	1,0 Stück	60,51 m ²	5,988,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
289	Drehflügel 1-flg - Stahlzarge	Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen	1 Stück	1,0 Stück	46,51 m ²	2,252,583	0,000	0,381	0,220	40,929,420	80,500	182,313,065	0,000		
289	Drehflügel 1-flg - Stahlzarge	Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen	1 Stück	1,0 Stück	29,51 m ²	1,420,107	0,000	0,240	0,139	25,803,330	50,750	114,936,498	0,000		
289	Drehflügel 1-flg - Stahlzarge	Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen	1 Stück	1,0 Stück	59,51 m ²	2,889,183	0,000	0,488	0,283	52,496,430	103,250	233,836,323	0,000		
Tür-Öffnung															
Tür-Öffnung															
728	Drehflügel 1-flg - Variabel	Feuerschutztür T30	1 Stück	1,0 Stück	99,800	99,800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Summe						1,666,838,1 kg	-0,2 kg	2,476,969,3 kg	2,476,969,3 kg	219,316,0 kg	93,191,710,1 kg	8,890,219,54 kg	322,684,282,6 kg	69,154,884,2 m ³	