

# smart facade energetische Potentiale von adaptiven Fassadensystemen

B. Cody, S. Sautter

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**38/2017**

**Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter  
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

# smart facade energetische Potentiale von adaptiven Fassadensystemen

Univ. Prof. Brian Cody BSc(Hons). CEng MCIBSE,  
Dipl.-Ing. Sebastian Sautter,  
Dipl.-Ing. Aleksandar Tepavcevic,  
Dipl. Arch. Christiane Wermke  
Institut für Gebäude und Energie, Technische Universität Graz

Graz, Mai 2016

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



# Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des bmvit publiziert und elektronisch über die Plattform [www.HAUSderZukunft.at](http://www.HAUSderZukunft.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

---



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	13
1.1	Aufgabenstellung.....	14
1.2	Stand der Technik .....	15
1.2.1	Forschungsrelevante Referenzbeispiele.....	15
1.2.2	Simulationsprogramme und Einschränkungen auf die Simulationsfähigkeit adaptiver Fassaden .....	16
1.3	Verwendete Methoden .....	17
1.3.1	Das statische Simulationsmodell (Referenzmodell).....	17
1.3.2	Das Simulationsmodell .....	27
2	Ergebnisse.....	35
2.1	Vergleich unterschiedlicher Fassadensysteme .....	35
2.2	Einfluss auf den Energiebedarf mit variablen Parametern .....	38
2.3	Einfluss auf die Fassadenorientierung .....	40
2.4	Einfluss auf die Nutzungen.....	41
2.5	Einfluss der Klimazonen .....	43
3	Schlussfolgerungen.....	45
4	Ausblick und Empfehlungen .....	45
5	Verzeichnisse .....	47
5.1	Abbildungsverzeichnis.....	47
5.2	Tabellenverzeichnis.....	47
5.3	Literaturverzeichnis .....	48
6	Anhang .....	50



# Kurzfassung

## Ausgangssituation/Motivation

Physikalischen Eigenschaften von Fassaden und Wänden von Gebäuden, welche in der Lage sind, auf klimatische Veränderungen oder individuelles Nutzerverhalten zu reagieren, stehen im Zentrum der Forschungsarbeit „smart façade“.

Die speziellen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, solare Wärmegewinne, Energiedurchlassgrad, Lichtdurchlassgrad oder Porosität von Fassaden, verhalten sich bei konventionellen Fassaden im Wesentlichen statisch und bleiben konstant, obwohl sich die Anforderungen an eine energieeffiziente Wand bei unterschiedlichen, klimatischen Randbedingungen deutlich unterscheiden. Die Entwicklung adaptiver Fassadensysteme, deren physikalische Eigenschaften in Abhängigkeit äußerer Einflussfaktoren stehen, versprechen einen hohen Grad an Reduktion des Energiebedarfs durch gleichzeitige Erhöhung der Behaglichkeit von Büro- und Wohnräumen.

Bisherige Entwicklungen adaptiver Fassaden beschränken sich auf einen variablen Parameter wie beispielsweise automatisierte Verschattungssysteme und Sonnenenergiespeicher durch spezielle Wandsysteme oder Spezialverglasungen. Die vorliegende wissenschaftliche Studie eröffnet neue Zugänge zur Entwicklung smarterer Fassaden und smarterer Fassadenkomponenten.

## Inhalte und Zielsetzungen

Ein innovatives dynamisches Simulationsmodell, welches speziell für dieses Projekt entwickelt wurde, liefert aussagekräftige Erkenntnisse bezüglich der energetischen Potentiale und Möglichkeiten von adaptiven Fassadensystemen. Das Simulationsmodell dient gleichzeitig als virtuelles Modell zur Regelung von adaptiven Fassaden und liefert dabei die nötige Intelligenz zur Steuerung für zukünftig umgesetzte, adaptive Fassadensysteme.

## Methodische Vorgehensweise

Die Manipulation und Unterbrechung von üblicherweise linear verlaufenden Simulationsprozessen marktüblicher Softwarewerkzeuge für die thermische Gebäudesimulation steht im Zentrum des vorliegenden Forschungsprojektes. Dem Simulationsprozess konnten intelligente Selektions- und Optimierungsprozesse (Loops) vorgeschaltet werden. Diese wurde durch die Verwendung von Komponenten der graphisch-algorithmischen Software Grasshopper erreicht. Auf die Simulationssoftware EnergyPlus konnte über Komponenten des Grasshopper-Add-On Honeybee zugegriffen werden.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die aus dem Forschungsprojekt hervorgegangene Grasshopper-Simulationsdefinition ist ein voll funktionsfähiges Simulationswerkzeug zur Untersuchung adaptiver Fassadensysteme.

Die Flexibilität des Werkzeugs lässt die Reduktion des Komplexitätsgrades, eine Weiterentwicklung bzw. einen Ausbau der zu berücksichtigten Parameter zu.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfüllt die Erwartung über das Einsparungspotential durch adaptive Fassadensysteme. Die Effekte auf den Energieverbrauch sind bei Bürogebäuden als auch Wohngebäuden beachtlich.

## **Ausblick**

Das Ergebnis des Forschungsprojekts, insbesondere die oben erwähnte Simulationsdefinition bildet ein starkes Fundament für aufbauende Forschungsprojekte, welche zum Ziel haben, smarte Fassadensysteme der Zukunft zu entwickeln.

# **Abstract**

## **Starting point/Motivation**

„smart façade” investigates the energetic potential and possible configuration of future-orientated smart adaptive façades. The study examines and develops the qualitative and quantitative potential of smart façades, building skins, which maximize energy performance by modifying their physical properties to adapt to changing external (weather) and internal (user behavior) conditions.

The research results provide a precise statement on the energetic potential of smart façades, which constantly adapt to changing external and internal conditions by manipulating variable parameters for thermal insulation (U-value), solar energy transmittance (g-value), light transmission (τ-value), thermal energy storage (c-value) and air tightness (n-value). A novel and innovative dynamic simulation model, which got specially developed for this project, provides meaningful insight into the potential and possibilities to evaluate the energy performance of intelligent façade-systems.

## **Contents and Objectives**

Existing responsive façades are limited to one-dimensional approaches (e.g. automated shading systems or solar energy storage and use by special wall systems).

The work proposed here forms the scientific basis for the development of smart façade-designs by precisely determining the energy potential. It offers various assumptions as well as useful insight into successful strategies for the development of suitable components to develop smart façades and smart façade components.

## **Methods**

Market-based simulation softwares follow a linear workflow. The software tool developed for this research project manipulates and bypasses this process and frameworks the specialty of it: intelligent selections of simulation parameters and optimization processes (loops) are prefixed to the simulation engine. This was enabled through the use of components of the graphic-algorithmic software Grasshopper which was interlinked to the simulation engine EnergyPlus by using the Honeybee-Plugin for Grasshopper.

## **Results**

The Grasshopper simulation-definition, a result of this research project, is defined as a simulation tool which takes into account the complexity of the simulation process for adaptive façades. The flexibility of this tool does not merely offer the possibility for the user to reduce the degree of complexity but it can also be developed further for future projects. It is possible to add more functions to the simulation tool by integrating additional components for alternative investigations.

The evaluation of the simulation results correspond to the initial expectations regarding the potential of energy reduction of adaptive façade systems. The effects on reducing energy consumption for office spaces are remarkable and energy demands for living or bed rooms could potentially be reduced even more.

### **Prospects / Suggestions for future research**

The results of this research project, especially the above mentioned simulation-definition can be defined as a powerful tool for subsequent proof of concepts. This approach towards adaptive façade systems offers enormous potential for reducing energy consumption while maintaining optimal comfort in building spaces concurrently. This highly innovative approach certainly lays an important foundation for the development of the façade systems of the future.

# 1 Einleitung

Ziel des Sondierungsprojekts besteht darin, eine klare Aussage zum energetischen Potential von Fassaden mit variablen Parametern zu treffen. Von besonderer Bedeutung hierfür sind Parameter für Wärmeschutz, Energiedurchlässigkeit, Transmission, Wärmespeicherung, Luftdichtheit und Feuchtedurchlassgrad. Die Evaluierung der ersten Ergebnisse einerseits und die Validierung der Simulationsergebnisse durch den Einsatz alternativer Simulationsprogramme andererseits, ließen größtes Potential für die Reduktion des Energiebedarfs bei den Werten für den Wärmeschutz (U-Wert), dem Energiedurchlassgrad (g-Wert) sowie für die Transmission ( $\tau$ -Wert) und der Luftdichtheit (n-Wert) erkennen.

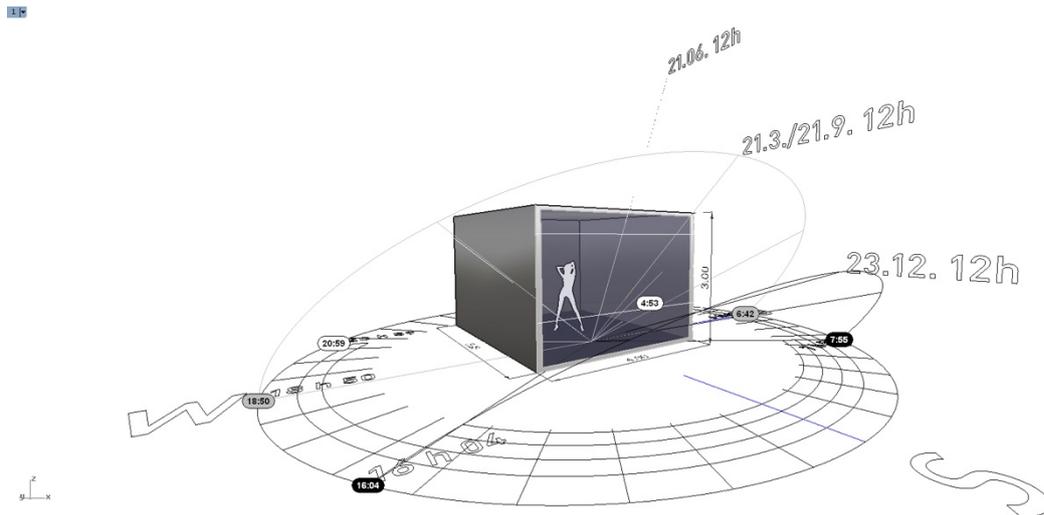


Abbildung 1: Referenzgeometrie der adaptiven Fassade

Dieses Potential konnte durch die Kombination der physikalischen Einflussgrößen untereinander weiter ausgebaut werden. Die für dieses Forschungsprojekt eigens entwickelte Definition parametrischer Simulationsprozesse, welche Variationsanalysen im Gegensatz zu herkömmlichen statischen Simulationsprogrammen wesentlich erweitert, ist das Schlüsselwerkzeug für die Ermittlung von Potentialen dynamischer Fassaden.

Die Software ermöglicht die Darstellung synergetischer Beziehungen unter den verschiedenen, physikalischen Parametern. Zudem können Simulationsergebnisse spezifischer physikalischer Eigenschaften eines Fassadentyps für unterschiedliche Klimazonen verglichen werden. Die Orientierung (Nord, Süd, Ost, West) bzw. mögliche unterschiedliche Nutzungen (Büronutzung oder Nutzungen für Wohn- und Schlafzimmer) sind in derselben Simulationsdefinition parametrisch oder statisch abrufbar bzw. variierbar.

Das Ablesen zukünftiger klimatischer Bedingungen und die daraus resultierende intelligente Adaption geeigneter physikalischer Eigenschaften der Fassade zum Erreichen eines optimalen Verhältnisses zwischen Behaglichkeit und Energiebedarf sind berücksichtigt und können weiter ausgebaut werden.

Der erreichte Komplexitätsgrad der Simulationsdefinition bzw. die validierten Simulationsergebnisse entsprechen den anvisierten Zielen dieses Sondierungsprojekts. Die Flexibilität der verwendeten Simulationskomponenten ermöglicht sowohl eine Reduktion der zu untersuchenden Einflussfaktoren und gleichzeitig eine Erweiterung durch zusätzliche Parameter.

## 1.1 Aufgabenstellung

„smart façade“ will klare Aussagen zum energetische Potential von Fassaden mit variablen physikalischen Eigenschaften und deren Kombination treffen. Insbesondere fallen die Parameter für Wärmeschutz (U-Wert), Energiedurchlässigkeit (g-Wert), Transmission (T-Wert), Wärmespeicherung (c-Wert) und der Luftdichtheit (n-Wert) ins Zentrum der Untersuchungen. In weiterer Folge sollen die oben genannten Parameter, nach anfänglich isolierter Betrachtung, in deren Kombination untersucht werden, um Rückschlüsse bzw. Aussagen zu den Potentialen neuartiger Fassaden treffen zu können.

Dafür müssen zunächst die Simulationsgrundlagen bzw. -definitionen festgelegt werden, um Referenzbedingungen zu erhalten bzw. die Ziele für den Aufbau der Simulationsdefinition in Grasshopper fest machen zu können. Randbedingungen des Referenzmodells wie Orientierung, Klimadaten und Nutzerverhalten im Gebäude werden fixiert. Die bauphysikalischen Vorgänge und deren Parameter werden im Detail analysiert und mit Sollwerten hinterlegt. Diese Sollwerte, integriert in ein konventionelles statisches Simulationsmodell, sorgen für eine Vergleichbarkeit des darauf aufbauenden, dynamischen parametrischen Simulationsmodells.

Untersuchungen zur Aushebelung bzw. Umgehung linearer Simulationsprozesse stehen anfänglich im Mittelpunkt. Hierzu werden Komponenten verwendet, welche im Grasshopper-Add-On Honeybee zur Verfügung gestellt werden. Um die Linearität des Simulationsprozesses zu unterbrechen, was notwendig ist, um intelligente Selektionsprozesse dem eigentlichen Simulationsprozess vorzuschalten, wurde auf Komponenten zurückgegriffen, welche für andere Forschungsprojekte entwickelt wurden. Die algorithmischen Definitionen dieser Komponenten konnten für die automatisierte, intelligente Präselektion bestimmter physikalischer Parameter der Fassade konstruktiv eingesetzt werden.

Sogenannte „Loops“ (OctopusE und Anemone), Grasshopper-Komponentencluster, welche rekursive, nicht lineare algorithmische Prozesse erst ermöglichen, erlaubten diese Erweiterung der Simulationsdefinition.

Zur Evaluierung der (Zwischen-)Ergebnisse werden die Resultate des dynamischen Simulationswerkzeugs in Grasshopper parallel mit statischen Simulationsmodellen verglichen, welche in IES VE genauso erstellt werden wie in Grasshopper. Letzteres ist mit der Simulationssoftware EnergyPlus verbunden. Die parametrisch erstellte Fassade mit Vollverglasung und adaptiven physikalischen Eigenschaften wird parallel mit einer konventionellen Lochfassade bzw. einer Bandfassade verglichen.

Die Potentiale adaptiver Fassaden zur Reduktion des Energiebedarfs werden zusätzlich bei unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen, Nutzerprofilen und Fassadenausrichtungen beleuchtet.

## **1.2 Stand der Technik**

Gebäudehüllen haben erhebliches Potenzial zur Reduktion des Gesamtprimärenergiebedarfs von Gebäuden beizutragen und können somit als wesentlicher Baustein angesehen werden, um die EU-Energieeinsparzielsetzungen bis 2020 zu erreichen (Reduktion des Gesamtprimärenergiebedarfs um 20%).

Die heutzutage meist statischen Fassaden müssen zukünftig in ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten in Abhängigkeit der äußeren und inneren Rahmenbedingungen veränderlich sein, mit dem Ziel, die Behaglichkeit zu steigern und den Energieverbrauch gleichzeitig zu verringern. Sogenannte adaptive Fassaden zeigen sich in Form von kontrollierbarer Wärmedämmung und thermischer Masse, Strahlungsaustausch, Lüftung, solare Energiegewinnung, Tageslicht, Sonnenschutz und Regulierung der Feuchtigkeit.

Die Integration der Umwelteinflüsse wie Sonnenstrahlung und der Generierung von Energie über die Fassade wird zunehmend eine größere Rolle spielen. Derzeit mangelt es an standardisierten Verfahren, Entwurfswerkzeugen und Methoden, um die Performance von adaptiven Gebäudehüllen sowie die Interaktion der Nutzer mit der Fassade hinreichend beurteilen zu können.

### **1.2.1 Forschungsrelevante Referenzbeispiele**

Konstruktive und technisch umgesetzte Annäherungen an eine dynamisch adaptive Fassade zeigen sich beispielsweise in Form von adaptivem Glas, PCM (Phase-Change-Materials), solare Fassaden und Tageslichtsysteme. Die Vorzüge von adaptiven Gläsern wurden hinreichend untersucht und eine Reduktion des Energiebedarfs durch Modellieren der optischen und thermischen Eigenschaften des Glases anhand von thermischen Simulationen und Prototypentests nachgewiesen, z.B. anhand von thermo-optischem Glas, welches seine Eigenschaften in Abhängigkeit der Glastemperatur reversibel verändert.

Die Einsparung von Energie durch die Anpassung von Glas und seiner Eigenschaften alleine, bringt vielversprechende Resultate, insbesondere im Bereich des Kühlenergiebedarfs. Ausschlaggebend für die Höhe der Einsparung im Energiebedarf sind vor allem die Länge der Zeitschritte der Anpassung des Glases, die Fähigkeit der Fassade sich an die äußeren Umweltbedingungen anzupassen und die Differenz zwischen dem Außenklima und dem Komfortbereich.

Untersuchungen von opaken Wandkonstruktionen wurden anhand adaptiver Wärmedämmung durchgeführt. So konnten mehrere Parameter optimiert und beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit durch die Änderung des Gasdrucks in der Dämmung variiert werden. Einsparungen von 40- 80% für den Kühlbedarf (abhängig von der Saison) und 30- 40% für

den Heizbedarf konnten so festgestellt werden. Die Behaglichkeit konnte um 30- 60% verbessert werden.

Simulationen eines idealen und dynamischen Fenster-/Wandflächenanteil (WWR = Window-to-Wall-ratio) mit einer jährlichen, monatlichen, wöchentlichen und stündlichen Optimierung brachte eine Energieeinsparung von lediglich 6%.

### **1.2.2 Simulationsprogramme und Einschränkungen auf die Simulationsfähigkeit adaptiver Fassaden**

Theoretische Ansätze in Form von thermischen Simulationen von Gebäudehüllen, die die Anpassungsfähigkeit von Fassaden simulieren sollen, bestehen seit ca. Mitte der 1990er Jahre. Konventionelle thermische Gebäudesimulationsprogramme verfügen zum einen über eine große Materialdatenbank und die Ergebnisse für Energiebedarfe werden immer präziser, jedoch verfügt keines der marktüblichen Programme (z.B. EnergyPlus, VE IES, IDA ICE, etc.) über die Möglichkeit adaptive Gebäudehüllen korrekt abzubilden. Dies liegt zum einen daran, dass nur ausgewählte physikalische Eigenschaften der Fassade im Laufe der Simulation geändert werden können, zum anderen fehlen Optimierungs- sowie Kontrollmöglichkeiten.

Außerdem ist es bislang nicht möglich die aktuellen Randbedingungen am Anfang der Folge-Optimierung anzupassen, die optimierten, physikalischen Parameter in den nächsten Optimierungsloop zu übernehmen oder gezielt in die Regelung der Gebäudetechnik mit einer dynamischen Gebäudehüllenkontrolle einzugreifen.

Es gibt unterschiedliche Ansätze die oben beschriebene Problematik zu umgehen, die teilweise erfolgreich sind aber dennoch an ihre Grenzen stoßen. Simulationen von Projekten vergleichbarer Art, arbeiten mit einer Kombination aus drei Programmen. So wird Energy Plus und dessen EMS (Energy Management System) als Evaluierungsmodul, GenOpt als Optimierungsmodul und Matlab als Kontrollmodul genutzt. Die Forscher arbeiten mit maßgeschneiderten und selbst programmierten Simulationswerkzeugen.

Thermische Simulationsprogramme für Gebäude, die adaptive Fassaden repräsentieren sollen, müssen in der Lage sein, zeitabhängige Fassadeneigenschaften zu modellieren, d.h. transiente Wärmeübertragung und Energiespeichereffekte der thermischen Masse abbilden zu können. Die meisten Programme können diese Funktionen nur eingeschränkt wiedergeben. Zusätzlich müssen die Programme die Modellierung der dynamischen Funktionalität der Fassadenanpassung gewähren, d. h. die Anpassung der Fassaden(-eigenschaften) muss in Abhängigkeit der Kontrollstrategien durchführbar sein. Üblicherweise lassen sich die Gebäudeform und Materialeigenschaften während einer laufenden Simulation nicht verändern oder variieren, was notwendig wäre für eine korrekte thermische Simulation von veränderlichen Fassaden.

Die eingeschränkten Möglichkeiten Fassadenadaptionen zu simulieren, macht ein Eingreifen in den Quellcode der Forscher unabdingbar, dies ist jedoch nur bei wenigen Programmen

möglich (z.B. Energy Plus über ERL). Forscher auf diesem Fachgebiet bedienen sich zweier Möglichkeiten diese Restriktion zu umgehen.

So wird einerseits auf eine vereinfachte Simulationsstrategie zurückgegriffen, die auf der Annäherung an das Endergebnis beziehungsweise auf Vereinfachungen basieren (wobei die Präzision der Resultate in Frage gestellt wird). Die einfachste Methode, adaptive Fassaden darzustellen ist den Simulationszeitraum in kleinere Einheiten wie Saison, Monate, Wochen etc. einzuteilen.

Alternativ dazu können separate Modelle mit statischen Eigenschaften, die jeweils unterschiedliche Randbedingungen der Fassade darstellen verwendet werden. Die Ergebnisse der einzelnen Simulationen werden am Ende zu einem Simulationsabschnitt zusammengefügt. Diese Methode weist jedoch erhebliche Mängel in der korrekten Wiedergabe der Ergebnisse auf.

Derzeit ist die Industrie hinsichtlich adaptiver Materialien und Konstruktion gegenüber der Simulationsmöglichkeiten einen Schritt voraus, das heißt es gibt Dämmmaterialien oder Gläser, welche ihre physikalischen Eigenschaften ändern können und so zur Verringerung des Energiebedarfs für Heizen, Kühlen und Beleuchtung beitragen können. Diese innovativen Konstruktionen können aufgrund mangelnder Simulationsmöglichkeiten nur sehr eingeschränkt thermisch simuliert werden.

## **1.3 Verwendete Methoden**

Im Folgenden werden die Grundlagenparameter beschrieben, welche für das statische Simulationsmodell verwendet wurden. Statisch, in diesem Zusammenhang, zielt lediglich darauf ab zu beschreiben, dass die physikalischen Werte der Fassade nicht variabel sind. Ziel dieses Modells war es, über Simulationsvarianten und deren Ergebnisse, plausible physikalische Parameter (Geometrie, Materialität und Fassadenöffnungen) für das darauffolgende dynamische Simulationsmodell zu erzeugen. Die Simulationsergebnisse des statischen Modells dienen zur Validierung der Ergebnisse des dynamischen Modells der adaptiven Fassade. Ausgewählte Ergebnisse des statischen Modells wurden mit einer weiteren Simulationssoftware, IES VE, validiert.

### **1.3.1 Das statische Simulationsmodell (Referenzmodell)**

#### **1.3.1.1 Grundlagenparameter und Rahmenbedingungen**

Die Auswahl bzgl. Dimensionierung und Material erfolgte anhand von Ergebnissen von statischen, thermischen Simulationen und Variantenstudien. Die systematischen Untersuchungen der Parameter, wie Dimension, Material und Energieübergabe im Gebäude in dieser Phase, führten so zu einem neutralen Referenzraum als Basis für die Fassadensimulationen von adaptiven Fassadensystemen und unterschiedlichen Nutzungen (Büronutzung oder Nutzungen für Wohn- und Schlafzimmer) im Gebäude.

Thermische Simulationen und Variantenstudien, welche zur Festlegung der Randbedingungen des Referenzmodells führten, wurden nicht nur mit der Simulationssoftware IES VE durchgeführt, sondern parallel mit EnergyPlus vollzogen. Dies führte dazu, dass bereits im Vorfeld Ergebnisse validiert werden konnten: Einflüsse der Parameter für den Wärmeschutz (U-Wert), dem Energiedurchlassgrad (g-Wert) sowie für die Transmission ( $\tau$ -Wert) und der Luftdichtheit konnten dargestellt und verglichen werden.

Die fixierte Definition des Referenzmodells und Darstellung der Parameterverknüpfungen ist der erste wesentliche Meilenstein des Projekts und dient als Grundlage für das parametrische dynamische Simulationsmodell. Auf den folgenden Seiten werden diese aufgelistet.

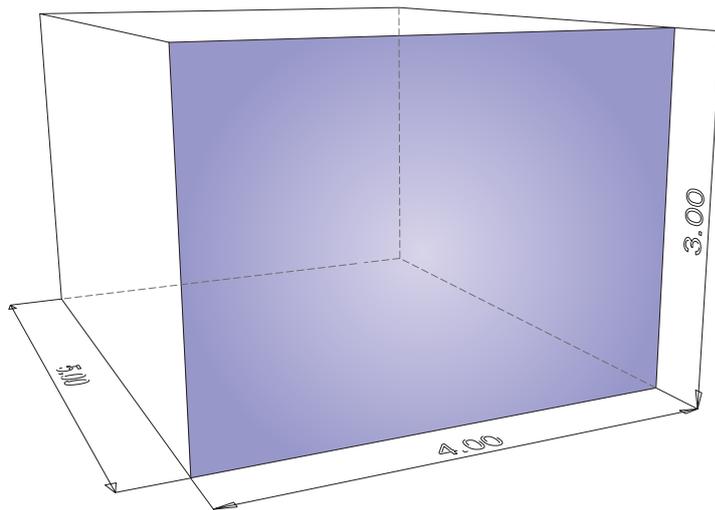


Abbildung 2: Referenzmodell

Als Grundlage für das zu entwickelnde Softwarewerkzeug dient eine parametrisch generierte Referenzgeometrie mit einer Größe von 4,00 m x 5,00 m x 3,00 m.

Für die Fallstudie wurde diese mit Büronutzung definiert, dessen Südfassade (4,00 m x 3,00 m) vollverglast ist. Als Referenzkonditionen für äußere Einflüsse dienen die Klimadaten einer gemäßigten Klimazone, mit Standort Graz. Die den Quader definierenden Flächen wurden in drei adiabaten Zwischenwänden, zwei adiabaten Geschossdecke bzw. einer nach Süden gerichteten Fassade aufgeteilt.

Untersucht wurden anfänglich drei verschiedene Fassadentypen: einer Vollverglasung (V1), einer Lochfassade (V2) und einer Bandfassade (V3). Der Vergleich der Simulationsergebnisse für den Heizwärmebedarf, den Kühlbedarf und den Strombedarf für Beleuchtung führte so zur schrittweisen Festlegung von Materialität der raumdefinierenden Elemente.

Die Südfassade erhält für die Ermittlung der Energiebedarfswerte folgende physikalische Eigenschaften für das Simulationsmodell. Diese dienen als Referenzwerte, um die Potenziale der dynamischen Fassade darstellen zu können.

Tabelle 1: Physikalische Größen der Fassade mit Vollverglasung

<b>PHYSIKALISCHE GRÖSSEN VOLLVERGLASUNG</b>	
Ausrichtung:	Süd
Fläche:	12 m <sup>2</sup>
Verglasung:	Sonnenschutzglas
U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	1.1
g-Wert:	0.27
τ-Wert:	0.48
Fensterrahmenanteil:	5%
Rahmen U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	2.41

Die Konstruktionselemente und deren Aufbauten für die Innenwände, der Außenwand sowie der Decke und des Fußbodens werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Konstruktionsaufbauten der raumumschließenden Elemente des statischen Referenzmodells

<b>KONSTRUKTIONSAUFBAUTEN DES REFERENZMODELLS:</b>		
Innenwände:	Gipskarton	1.25 cm
	Mineralwolle	7.50 cm
	Gipskarton	1.25 cm
Außenwand:	Silikatputz	0.20 cm
	Mineralwolle	11.50 cm
	Stahlbeton	20.00 cm
	Kalkputz	2.00 cm
Decke:	Teppich	0.50 cm
	Estrich	6.00 cm
	Perlit	20.00 cm
	Stahlbeton	20.00 cm
Fußboden:	Stahlbeton	20.00 cm
	Perlit	20.00 cm
	Estrich	6.00 cm
	Teppich	0.50 cm

Diese Aufbauten setzen sich aus den physikalischen Eigenschaften der im Folgenden aufgelisteten Materialien zusammen.

Tabelle 3: Materialbibliothek für die Erstellung der Konstruktionselemente:

<b>VERWENDETE MATERIALIEN (IN ALFABETISCHER REIHENFOLGE):</b>	
<b>ESTRICH</b>	
Rauigkeit:	rau (rough)
Stärke (m):	0.06
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	1.4
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	2,000
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,000
<b>FENSTERRAHMEN</b>	
Rauigkeit:	glatt (smooth)
Stärke (m):	0.2
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	0.5
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	1,800
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,400
<b>GIPSKARTONPLATTE</b>	
Rauigkeit:	glatt (smooth)
Stärke (m):	0.0125
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	0.21
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	900
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	950
<b>KALKPUTZ</b>	
Rauigkeit:	rau (rough)
Stärke (m):	0.2
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	0.87
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	1,800
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,100
<b>MINERALWOLLE</b>	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)
Stärke (m):	0.0751 und 0.122
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	0.035
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	75
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	900
<b>PERLIT</b>	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)
Stärke (m):	0.2

Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	0.06
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	50
Spezifische Wärmekapazität ( $\text{J/kg-K}$ ):	1,000
<b>SILIKATPUTZ</b>	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)
Stärke (m):	0.002
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	0.7
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	1,800
Spezifische Wärmekapazität ( $\text{J/kg-K}$ ):	1,100
<b>STAHLBETON</b>	
Rauigkeit:	glatt (smooth)
Stärke (m):	0.2
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	2.3
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	2,500
Spezifische Wärmekapazität ( $\text{J/kg-K}$ ):	1,000
<b>TEPPICH</b>	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)
Stärke (m):	0.05
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ):	0.15
Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ):	90
Spezifische Wärmekapazität ( $\text{J/kg-K}$ ):	2,000
<i>Anm.: (1) für GK-Zwischenwände (2) für VWS-Fassade.</i>	

Die daraus resultierenden bauphysikalischen Werte können aus der nachfolgenden Tabelle genommen werden:

Tabelle 4: Dimensionierung und U-Werte der raumumschließenden Elemente

<b>PHYSIKALISCHE GRÖSSEN DER ELEMENTE DES REFERENZMODELLS (EXKL. FASSADE):</b>			
Innenwände	Gipskartonwand	Wandstärke (m):	0.075
		U-Wert ( $\text{W/m}^2/\text{K}$ ):	0.29
Außenwand	VWS-Fassade	Wandstärke (m):	0.34
		U-Wert ( $\text{W/m}^2/\text{K}$ ):	0.29
Decke:	Hohlboden	Deckenstärke (m):	0.465
		U-Wert ( $\text{W/m}^2/\text{K}$ ):	0.29
Boden:	Hohlboden	Deckenstärke (m):	0.465
		U-Wert ( $\text{W/m}^2/\text{K}$ ):	0.29

Für die Nutzung bzw. das Nutzerverhalten wurde das Jahr 2015 und dessen Feiertage als Referenz genommen. Das Büro ist Arbeitsplatz für zwei Mitarbeiter, deren Arbeitszeit um eine Stunde versetzt festgelegt ist. Die Belegung des Büros wurde auf zehn Stunden festgelegt (inkl. eine Stunde Mittagspause), Urlaubs- und Brückentage sowie Feiertage wurden berücksichtigt. Für die Erzeugung der Zeitpläne für Wohn- und Schlafzimmer wurden auf den Nutzer des Büros aufbauend Annahmen über ein differenziertes Nutzerverhalten getroffen.

Für die Validierung im Vorfeld und zur Ermittlung der Randbedingungen für das aufbauende Simulationsmodell wurde mit den Klimadaten der Stadt Graz (gemäßigte Klimazone) gearbeitet. Zudem wurden folgende Klimadaten für Simulationen in anderen Klimazonen ausgewählt: Abu Dhabi (Wüstenklima), Moskau (kontinentales Klima), Rom (subtropisches Klima) und Singapur (tropisches Klima).

Die Grundlagenparameter konnten im AP2 festgelegt werden. Nach anfänglicher Validierung zwischen IES VE und EnergyPlus gewann das Simulationsmodell in EnergyPlus an Relevanz. Dieses wurde über Komponenten definiert, welches Ladybug und Honeybee zur Verfügung stellen. Dabei handelt es sich um Plug-Ins für Grasshopper, einer graphisch-algorithmischer Editorsoftware für das 3D-Programm Rhinoceros.

### 1.3.1.2 Simulationsvarianten

Aufbauend auf den oben genannten Simulationsvarianten zur Festlegung der Simulationsparameter wurden im Zuge der Entwicklung des Simulationsmodells, welches in AP3 beschrieben wird, drei Referenzmodelle weiterentwickelt:

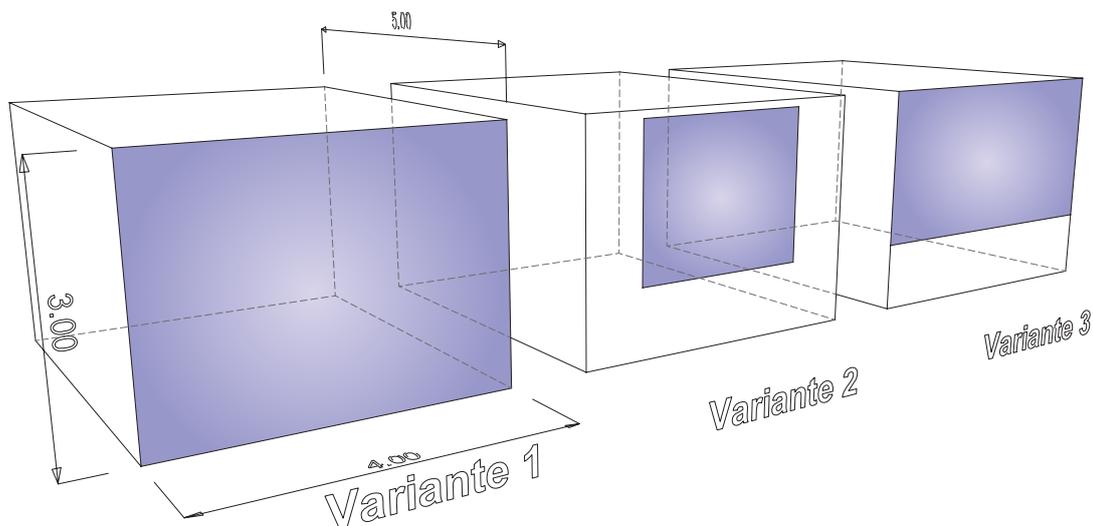


Abbildung 3: Fassadenvarianten der Grundlagendefinition

V1: Variante einer Vollverglasung mit statischen physikalischen Fassadeneigenschaften

V2: Variante einer Lochfassade mit statischen physikalischen Fassadeneigenschaften

V3: Variante einer Bandfassade mit statische physikalischen Fassadeneigenschaften

Diese wurden im Zuge der Entwicklung von AP3 zur Validierung der Simulationsergebnisse herangezogen. Der Glasanteil an der Fassade (12 m<sup>2</sup>) beträgt bei

V1: 95%

V2: 35%

V3: 62%

Die folgende Tabelle definiert die Materialeigenschaften der Fassaden von V1 bis V3. Die physikalischen Eigenschaften der restlichen raumdefinierenden Geometrien bleiben unverändert.

Tabelle 5: Parameter der voruntersuchten Fassadenvarianten V1, V2 und V3

<b>Variante 1 - Vollverglasung</b>	
Verglasung:	Sonnenschutzglas
U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	1.1
g-Wert:	0.27
τ-Wert:	0.48
Fensterrahmenanteil:	5%
Rahmen U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	2.41
<b>Variante 2 - Lochfassade</b>	
Verglasung:	Wärmeschutzglas
U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	1.1
g-Wert:	0.65
τ-Wert:	0.80
Fensterrahmenanteil:	5%
Rahmen U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	2.41
<b>Variante 3 - Bandfassade</b>	
Verglasung:	Wärmeschutzglas
U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	1.1
g-Wert:	0.65
τ-Wert:	0.80
Fensterrahmenanteil:	5%
Rahmen U-Wert (W/m <sup>2</sup> K):	2.41

Das Basismodell der Grundlagen- und Simulationskomponentendefinition machten aus diesem Softwaretool einen kontinuierlichen Begleiter zur Validierung variabler Parameter des folgenden Simulationsmodells.

### 1.3.1.3 Simulationsparameter

Für das statische Referenzmodell wurde, wie bereits erwähnt, die Klimazone Graz gewählt. Als interne Lasten wurden folgende Parameter definiert

Tabelle 6: Interne Lasten

<b>INTERNE LASTEN:</b>	
Infiltration - Luftwechselrate (1/h):	0.2
Mechanische Lüftung (m <sup>3</sup> /Pers./h):	60
interne Lasten Geräte (W/m <sup>2</sup> ):	15
Anzahl der Personen (Pers./m <sup>2</sup> ):	0.1
interne Lasten Personen (W/Pers.):	70

### 1.3.1.4 Ideal air loads parameters

Die mechanische Frischluftzufuhr arbeitet mit einer Wärmerückgewinnung mit einem definierten Wirkungsgrad von 80%. Der Sollwert für die Heizung ist 21°C und die Kühlung auf 26°C eingestellt. Beschreibung der Inhalte:

Nutzerverhalten: Das Büro wird von zwei Personen belegt, die um eine Stunde versetzt den Arbeitsraum betreten und gemeinsam in die Mittagspause gehen. Ein typischer Arbeitstag sieht in der Belegung daher folgendermaßen aus:

Tabelle 7: Schedule für Bürobelegung während eines Arbeitstages

<b>BÜROBELEGUNG TYPISCHER ARBEITSTAG:</b>																							
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	1	1	1	0	1	1	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0

In der Urlaubsphase ist das Büro zu 50% belegt, d.h. es arbeitet nur einer der beiden Personen, die Belegung ist wie folgt definiert:

Tabelle 8: Schedule für Bürobelegung während der Urlaubszeit

<b>BÜROBELEGUNG URLAUBSTAG:</b>																							
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Ein Urlaubstag der Person 2 sieht respektive Person 1 eine Verschiebung um eine Stunde nach hinten vor, wohingegen eine Nicht-Belegung zu Stunde 12 bestehen bleibt.

Für die Wohnnutzung (Wohn- und Schlafzimmer) wurden aufbauend auf die Büronutzung Annahmen getroffen und an die Arbeits- und Urlaubsstunden plausibel angepasst.

Der frühe Start der Entwicklung der Simulationsdefinition in Grasshopper mit EnergyPlus führte zu einem stabilen Referenzmodell, durch welches solide Simulationsparameter

definiert werden konnten. Weiters konnte aufbauend auf die Grasshopper-Definition das Simulationsmodell mit den im nächsten Kapitel folgenden Komponentengruppen erweitert werden. Sämtliche Parameterdefinitionen wurden mit dem statischen Modell simuliert und als Datenbank angelegt, von welcher die Simulationsergebnisse zur Validierung der Werte des dynamischen Simulationsmodells entnommen werden konnten.

Tabelle 9: Parameterdefinitionen des statischen Simulationsmodells

Parameter	Fassadentyp			Ausrichtung				Nutzung			Sim.-periode		Klimazone					
	V1	V2	V3	N	S	O	W	B	W	S	kalt	heiß	GRA	ABU	MOS	SIN	ROM	
statisch	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

### 1.3.1.5 DAS SIMULATIONSWERKZEUG

Das Simulationsmodell wird mit der CAD Software Rhinoceros und dem Plugin Grasshopper entwickelt. Für das graphisch-algorithmische Entwurfswerkzeug wurden Plugins zum Einlesen von Klimadaten (Ladybug) und zur Integration von Simulationsprozessen über EnergyPlus (Honeybee) benutzt. Für die Unterbrechung bzw. Umgehung üblicherweise linear verlaufender Simulationsprozesse konnten Komponentencluster integriert werden, um PreSelections von Simulationsparametern zu integrieren. Im Wesentlichen wurden hierbei „anemone“ und „octopusE“ verwendet.

Simulationsergebnisse wurden kontinuierlich überprüft bzw. validiert mit den oben beschriebenen Programmen bzw. Definitionen (IES, IDA ICE, statisches Grasshopper-Modell mit EnergyPlus). Die Simulationsdefinition zur Untersuchung energetischer Potentiale für adaptive Fassadensysteme, welches als Ergebnis des Sondierungsprozesses definiert wird, ist das Simulationswerkzeug, welches in seiner Grundsatzkonzeption Reduktionen und Erweiterungen von Untersuchungen bauphysikalischer, klimatischer oder nutzungsspezifischer Parameter erlaubt.

### 1.3.1.6 REFERENZGEOMETRIE

Die Referenzgeometrie ist parametrisch erzeugt. Länge (x), Tiefe (y) und Höhe (z) können verändert werden, die Zuweisung der physikalischen Eigenschaften bleiben davon unberührt. Die Orientierung der einzelnen Flächen wird durch ihre Normalen erkannt und können sukzessive benannt und weiter definiert werden. So werden den Flächen neben deren Benennung (e.g. Boden, Decke, Wand) im nächsten Schritt die physikalischen Eigenschaften (Materialaufbau und Konstruktionsaufbau) sowie die Definition der angrenzenden Flächen zugewiesen. Innenflächen (Wände, Decke, Boden) wurden dabei als adiabatisch definiert. Der Fassade wird eine weitere Komponente zugefügt. Sie generiert aus der Fläche eine Familie aus zwei Flächen, welche in weiterer Folge als Rahmen bzw. als Glasfläche definiert werden, indem, auch parametrisch anpassbar, der Glasanteil der gesamten Fläche in Prozent zugewiesen wird.

Die aus der ursprünglichen Geometrie zerteilten Flächen (Fassade, Innenwände, Fußboden und Decke), welche nun mit den physikalischen Eigenschaften belegt wurden, werden anschließend erneut zusammengefügt und als Zone „OFFICE“ definiert.

Für die Zone werden nun die internen Lasten, das Heiz- und Kühlsystem sowie die Zeitverzeichnisse (in weiterer Folge „schedules“ genannt) zugewiesen.

Für das Büro wurden folgende interne Lasten aus dem Referenzmodell übernommen:

- 15 W/m<sup>2</sup> für Geräte
- 10 W/m<sup>2</sup> für Beleuchtung
- 70 W/Pers. (Belegung Büro = 2 Personen)
- 0.2 1/h für Infiltration und
- 60 m<sup>3</sup>/Pers./h für Lüftung.

Für das ideale Lüftungssystem wurden folgende Parameter zugewiesen, welche die Simulation definieren:

Eintretende Kühlungslufttemperatur: 13°C

Eintretende Heizlufttemperatur: 50°C

Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung: 80%

Schwellenwerte für das Heiz- und Kühlsystem:

- Sollwert Heizen: 21°C
- Sollwert Kühlen: 26°C

Zeit- bzw. nutzungsabhängige Werte sind: Belegung des Büros

Beleuchtungsschedule: in Abhängigkeit der Belegung

Geräteschedule: in Abhängigkeit der Belegung

Tageslichtsimulation: Kontroll- und Sensorpunkt: x = 2; y = 2.5, z = 0.85

Die Validierung des EnergyPlus Simulationsmodells auf Basis von Grasshopper durch die Simulationsprogramme IES VE und IDA ICE haben gezeigt, dass vor allem bei den zeitlich begrenzten Wochensimulationen starke Schwanken bei den Ergebnissen des Energiebedarfs zu beobachten sind. Aus diesem Grund weisen wir darauf hin, dass die absoluten Zahlen des Energiebedarfs, insbesondere der heißen Woche, unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis zu betrachten sind. Innerhalb des Vergleichs der Ergebnisse der Simulationsvarianten spielt diese Tatsache eine untergeordnete Rolle, da sämtlich Berechnungen dem gleichen Energy Plus Modell zugrunde liegen.

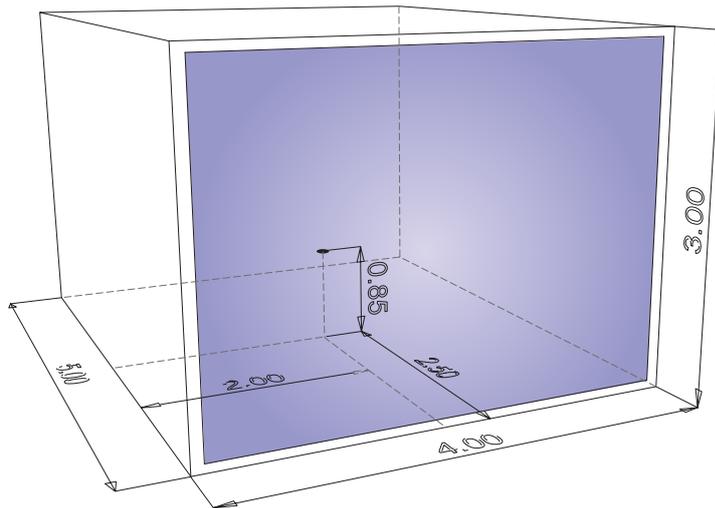


Abbildung 4: Referenzmodell und Lichtsensor

### 1.3.2 Das Simulationsmodell

Die Manipulation und die Umgehung des linear verlaufenden Simulationsprozesses von EnergyPlus der Gebäudesimulation einerseits, als auch die Integration der Simulationsergebnisse in einen evolutionären Algorithmus bzw. der Optimierungsloops wurde durch die Komponentencluster Anemone und OctopusE erreicht. Anders ausgedrückt lassen die Komponentencluster einen rekursiven Simulationsprozess zu, der es ermöglicht, spezifische physikalische Eigenschaften zirkulär beliebig oft zu generieren und mittels EMS (EnergyPlus Management System) in die Simulation wieder einzulesen. Stark reduziert kann die Grasshopper-Simulationsdefinition folgendermaßen zusammengefasst werden:

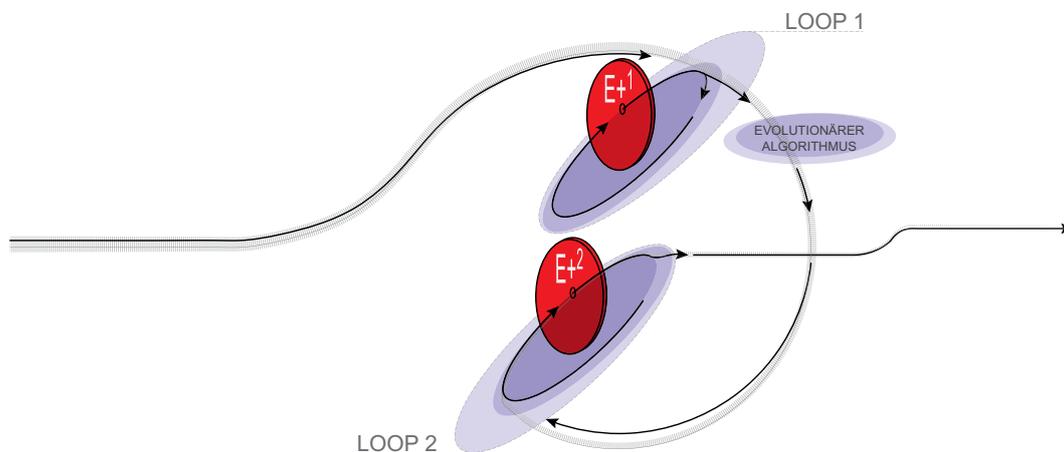


Abbildung 5: Simulationsalgorithmus

Die Konstruktionen aus der Materialbibliothek (1) wird der parametrischen Referenzgeometrie (2) zugewiesen und als Zone (3) zusammengefasst, mit Ausnahme der Fassade. Die physikalischen Werte der adaptiven Fassade werden der Geometrie zugewiesen, sobald die gewählte Simulationsperiode definiert wird. Dadurch werden der

Vorauswahl, der Preselection (4), die zu simulierenden Stunden des Jahres (von 0 - 8759) zugewiesen. Die Klassifizierung der Preselection erhält somit eine Vorauswahl statischer oder dynamischer physikalischer Eigenschaften der Glasfassade, die dem Loop 1 (5) zugewiesen wird, damit die Simulation über EnergyPlus (6) starten kann. Nach Simulationseende werden die Ergebnisse für die physikalischen Eigenschaften (U-, g- und T-Wert) der Fassade nun aufsteigend sortiert (7), wobei der geringste Wert durch den evolutionären Algorithmus (5) läuft und automatisch weiter optimiert wird. Anschließend werden die physikalischen Eigenschaften im Loop 2 (5) erneut über einen weiteren Simulationsschritt optimiert, Daten der Thermal History, die auf die Stunde optimierten physikalischen Werte sowie die Simulationsergebnisse des Energieverbrauchs werden nun in eine Liste (8, 9) geschrieben und als Gesamtsimulationsresultat inklusive physikalischer Eigenschaften der adaptiven Fassade ausgelesen (10). Die eingesetzten Komponentengruppen bzw. -cluster werden nun im Folgenden beschrieben:

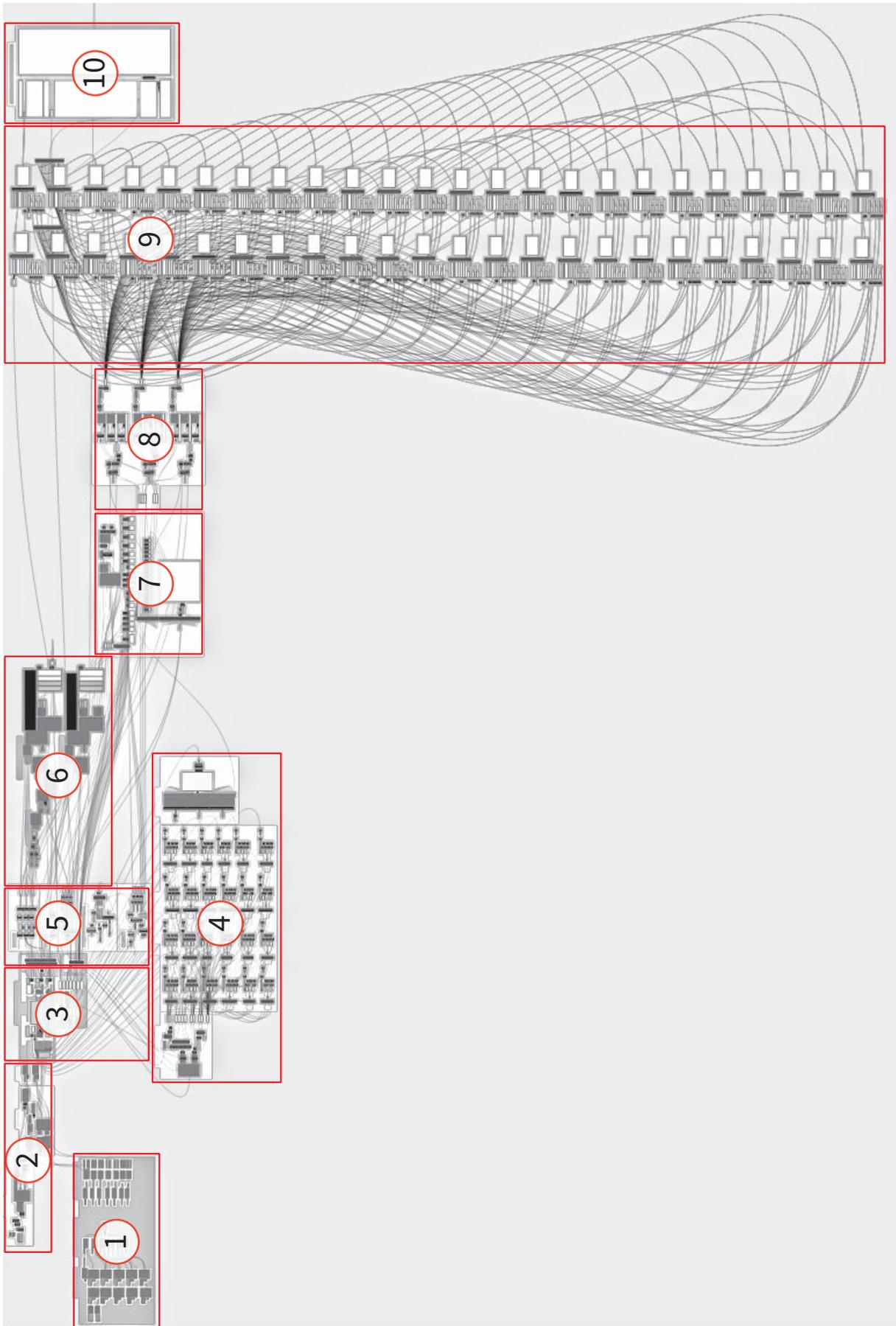


Abbildung 6: Grasshopper Definition



Tabelle 10: Klassifizierung der Vorauswahl (Preselection)

1	Belegt	Winter	Nacht	Keine Sonne
2	Belegt	Übergang	Nacht	Keine Sonne
3	Belegt	Sommer	Nacht	Keine Sonne
4	Belegt	Sommer Heiß	Nacht	Keine Sonne
5	Belegt	Winter	Tag	Keine Sonne
6	Belegt	Übergang	Tag	Keine Sonne
7	Belegt	Sommer	Tag	Keine Sonne
8	Belegt	Sommer Heiß	Tag	Keine Sonne
9	Belegt	Winter	Tag	Sonne
10	Belegt	Übergang	Tag	Sonne
11	Belegt	Sommer	Tag	Sonne
12	Belegt	Sommer Heiß	Tag	Sonne
13	Unbelegt	Winter	Nacht	Keine Sonne
14	Unbelegt	Übergang	Nacht	Keine Sonne
15	Unbelegt	Sommer	Nacht	Keine Sonne
16	Unbelegt	Sommer Heiß	Nacht	Keine Sonne
17	Unbelegt	Winter	Tag	Keine Sonne
18	Unbelegt	Übergang	Tag	Keine Sonne
19	Unbelegt	Sommer	Tag	Keine Sonne
20	Unbelegt	Sommer Heiß	Tag	Keine Sonne
21	Unbelegt	Winter	Tag	Sonne
22	Unbelegt	Übergang	Tag	Sonne
23	Unbelegt	Sommer	Tag	Sonne
24	Unbelegt	Sommer Heiß	Tag	Sonne

In Abhängigkeit bestimmter Konditionen werden physikalische Parameter der Fassade statisch oder dynamisch gehalten und anschließend dem Optimierungsloop zugewiesen.

### **1.3.2.2 OPTIMIERUNGSLOOPS - LOOP 1 und LOOP 2**

#### **Simulationsprozess mit OctopusE und Anemone**

Für den Simulationsprozess werden zwei Komponentencluster für die Integration des evolutionären Algorithmus in Grasshopper / Honeybee verwendet: Anemone und OctopusE. Die Funktionen der beiden Loops werden im Folgenden beschrieben:

Anemone dient im dynamischen Simulationsmodell als Loop-Komponente und ermöglicht so die komplette Zeitsteuerung und die Steuerung der Optimierungsloops. Die Komponenten von Anemone sind ineinander verschachtelt. Der äußere Loop steuert die Monate, der zweite Loop steuert die Tage und der dritte Loops die Stunden der zu simulierenden Tage. Die Optimierungsloops gliedern sich in zwei Stufen und werden ebenfalls mit denselben Komponenten gesteuert.

OctopusE arbeitet mit eigenen Datenbündeln, den sogenannten Octopus Solutions (OS). Eine Octopus Solution trägt Informationen über die verwendeten Parameter und den dazugehörigen Objectives (den Ergebnissen des Rechenprozesses). Die Parameter werden als Liste eingelesen und in eigenen Komponenten zu OS transformiert. Im Zuge der Berechnung werden die dazugehörigen Objectives zu den Parametern hinzugefügt. Zudem wird OctopusE im Loop 2 der Optimierungsloops verwendet um das beste Ergebnis aus Loop 1 zu mutieren und so neuen Generationen von Parametern zu erzeugen. Dieser evolutionäre Algorithmus sorgt für eine gezielte Auswahl von Parameterkombinationen im Zuge der Optimierungsloops.

#### **Thermal History - Simulationszeitschritt und Simulationsperiode**

Ein wesentlicher Bestandteil des dynamischen Simulationsmodells sind die Optimierungsloops (Loop 1 und Loop 2), welche durch Kontrolle der Simulationsperioden den linearen EnergyPlus-Simulationsprozess unterlaufen und über EMS (EnergyPlus Management System) die Inputparameter stündlich manipulieren kann, und so rekursive Simulationsprozesse ermöglichen. Dieser Prozess ermöglicht die Simulation einer sich stündlich adaptierenden Fassade, welche einerseits die physikalischen Eigenschaften der Fassade stündlich variieren kann und dabei die Thermal History des Raumes berücksichtigt.

Jede Stunde der Simulationsperiode wird mit einer Zweitagesimulation berechnet. Der erste Tag (Preconditioning) der Simulation dient rein zur Berücksichtigung des thermischen Verhaltens des untersuchten Raums bei einer voll funktionsfähigen adaptiven Fassade. Der Zweite Tag ist der zu untersuchende Tag, der Stunde für Stunde berechnet wird. Wurden die optimalen Parameter für die erste Stunde gefunden, werden diese in einer Liste dokumentiert und als Schedule für die folgenden Simulationen zur Verfügung gestellt. Auf diese Art erhält man bei jeder zu untersuchenden Stunde als Start den thermischen Zustand des Raumes, der sich aufgrund der voll funktionsfähigen adaptiven Fassade automatisch einstellt.

Eine Simulationsperiode (in unserem Fall wurde jeweils eine kalte und eine heiße Woche des Jahres untersucht) beginnt in der Ermittlung der jeweils optimalen stündlichen

Kombination der variablen physikalischen Eigenschaften der Fassade. Die Preselection differenziert zwischen sinnvollen Varianten unter Berücksichtigung von äußeren Umwelteinflüssen (solare Strahlung, Temperatur, Tag/ Nacht) und der Nutzung (belegt oder nicht belegt). Die Differenzierung bestimmt im weiteren Simulationsprozess prinzipiell die Anzahl der zu variierenden Parameter bzw. die Anzahl der Optimierungsloops selbst zur Ermittlung der Parameterkombinationen mit dem geringsten Energiebedarf.

### **Optimierungsloop 1 (Loop 1)**

Nachdem die Simulationsperiode definiert ist und sämtliche Simulationsparameter der Referenzgeometrie zugewiesen wurden, beginnt der Optimierungsloop 1 mit dem zirkulären Simulationsprozess, in welchem jede Stunde die Parameter U, g und T variiert und in eine Liste geschrieben werden, gemeinsam mit dem Gesamtenergieverbrauch der jeweiligen Stunde für Heizen, Kühlen und Beleuchtung. Dieser Wert ist als Objective definiert. Jede Liste mit drei Parametern wird also einem Objective zugewiesen.

### **Evolutionärer Algorithmus**

Die Systemintelligenz des evolutionären Algorithmus besteht aus dem Komponentencluster OctopusE. Sie basiert auf SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm). Diesen Algorithmus durchlaufen sämtliche Octopus Solutions (variable Fassadenparameter), welche nach dem ersten Simulationsprozess den Loop 1 verlassen. Die Liste mit den Octopus Solutions wird nun aufsteigend nach dem Energiebedarf (Objectives) sortiert. Die 3 Parameter mit dem niedrigsten Objective fließen nun automatisch in den evolutionären Algorithmus.

Die ausgewählten Parameter werden in dieser Komponentengruppe nochmals über die Crossover Function vermischt und mutiert (Mutate an Octopus Solution). Dabei werden neue Kombinationen der physikalischen Parameter der Fassade für weitere Optimierungssimulationen im Loop 2 generiert. Die Crossover Rate (0.9) beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Parametersaustausches, die Mutation Probability wurde mit 10% definiert und beschreibt die Mutationswahrscheinlichkeit jedes einzelnen Parameters. Die Mutation Rate wurde mit 3% definiert.

Basierend auf den Simulationsergebnissen konnte festgestellt werden, dass die Werte des Energieverbrauchs nach Durchlaufen der Systemintelligenz des evolutionären Algorithmus die Rechenergebnisse des Energiebedarfs weiter gesenkt werden konnte. Die OS (physikalische Werte der Fassade) mit dem verknüpften Objective (Gesamtenergieverbrauch) werden nun weiter gegeben in die nächste Komponentengruppe, dem Loop 2.

### **Optimierungsloop 2 (Loop 2)**

Die Anzahl der rekursiven Simulationsprozesse im Loop 2 resultieren aus der Loopanzahl in Loop 1. Die Anzahl variiert zwischen 3 und 5 Loops. Prinzipiell funktioniert der Loop 2 gleich wie der Loop 1 mit dem Unterschied, dass in diesem Rechenprozess die Thermal History bei der Berechnung berücksichtigt wird. Die durch die Loops ermittelten optimalen

Parameterkombinationen für jede Stunde der Simulationsperiode werden in einem *Schedule* der Stunde des Jahres (HOY) zugewiesen und somit dokumentiert. Jede Simulation bezieht die variablen Parameter direkt aus diesem *Schedule*. Somit werden bereits berechnete Stunden mit den richtigen Parametern für U,g und T ins Modell eingelesen. *EnergyPlus* ist standardmäßig nicht in der Lage, beliebige Parameter stündlich zu variieren. Jedoch kann über die Programmiersprache Erl mit EMS regeltechnisch in das Simulationsmodell eingegriffen werden.

### **Manipulation EMS (EnergyPlus Management System)**

Das Inputfile (\*.idf) einer EnergyPlus Simulation, das in Grasshopper mit den Komponenten von Honeybee erzeugt wird, wird durch einen algorithmisch generierten zusätzlichen Text ergänzt und dem zweiten Simulationskernel über den Input „additional strings“ zugewiesen bzw. eingelesen. Der Text enthält EMS codes und manipulierte Textbeschreibungen der Fassadenkomponenten. Dabei werden jeder Stunde der Zweitages Simulationsperiode eigene physikalische Parameter der Fassade zugewiesen, die während der Simulation über EMS stündlich eingelesen werden können.

Grund für den notwendigen Eingriff in EMS ist die Einheit der kleinsten Simulationsperiode bei EnergyPlus, welche einen Tag (bzw. 24 Stunden) beträgt. Das hat zur Folge, dass physikalische Eigenschaften einer Fassade, einmal zugewiesen, über diese Periode konstant bleiben.

Dies wird umgangen durch die Generierung optimierter stündlicher U-, g- und T-Werte der Fassade über den Loop 1. Diese Stundenparameter werden als Quellcode dem EMS eingelesen und dem Loop 2 für einen detaillierteren Optimierungsschritt zugewiesen. Dieser rekursive Prozess erlaubt nun den finalen Simulationsschritt. Die Simulationsergebnisse für Heizen, Kühlen und Beleuchtung sowie die stündlichen physikalischen Eigenschaften der Fassade können nun ausgelesen werden und in eine Excel-Datei übertragen werden.

### **Herauslesen der Ergebnisse**

Die am Ende ermittelten Parameter für den U-, g- und T-Wert mit dem dazugehörigen Energieverbrauch, der sich aus dem in Heizenergiebedarf, dem Kühlenergiebedarf und dem Energiebedarf für die Beleuchtung zusammensetzt, werden mit charakteristischen Daten der untersuchten Stunde wie Datum, Uhrzeit, HOY, Temperatur der Zone, Klimadaten in ein Textfeld geschrieben, das nach der Simulation als ASCII-file abgespeichert werden und in Excel zur Auswertung eingelesen werden kann.

Der Modellablauf wiederholt sich somit für jede Stunde der untersuchten Tage (Loop 1, evolutionären Algorithmus und Loop 2).

### **Untersuchte Varianten**

Das parametrische Simulationsmodell ermöglicht die automatisierte Ermittlung des Energiebedarfs für sämtliche Parameter. Für die Darstellung der Potentiale der adaptiven

Fassade bezüglich des Energiebedarfs wurden für eine aussagekräftige Gegenüberstellung der Resultate folgende Parameterkombinationen ausgewählt:

Tabelle 11: Simulationsvarianten

Parameter	Ausrichtung				Nutzung			Simulationsperiode		Klimazone				
	N	S	O	W	B	W	S	kalt	heiß	GRA	ABU	MOS	SIN	ROM
statisch	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
n var.		x			x			x	x	x				
U var.		x			x			x	x	x				
g var.		x			x			x	x	x				
T var.		x			x			x	x	x				
u,g,T var.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
u,g,T,n var.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Die Ausrichtung bezieht sich auf die Glasfassade und bezeichnet die Himmelsrichtungen (Norden, Süden, Osten, Westen), die Nutzung bezieht sich auf Büro (B), Wohnzimmer (W) und Schlafzimmer (S). Die Simulationsperiode bezeichnet eine Wochensimulation der kältesten bzw. der heißesten Woche im Jahr. Die ausgewählten Klimazonen sind die gemäßigte Klimazone mit Standort Graz (GRA), Wüstenklima mit Standort Abu Dhabi (ABU), kontinentales Klima mit Standort Moskau (MOS), tropisches Klima mit Standort Singapur (SIN) und letztlich subtropisches Klima mit Standort Rom (ROM).

## 2 Ergebnisse

Die folgenden Seiten fassen diagrammatisch die Ergebnisse der Simulationen zusammen. Die Potentialanalyse stellt den Primärenergiebedarf in kWh dar und bezieht sich auf einwöchige Simulationsperioden, wobei jeweils die kälteste und die heißeste Woche des Jahres (und des Weiteren der jeweiligen Klimazone) gegenübergestellt werden. Die genauen Zeiträume werden aus der stündlichen Wetterdatenstatistik ermittelt. Folgende Auswahl der Darstellung spezifischer Potentiale zur Reduktion des Energiebedarfs wurden getroffen. Als statische Vergleichsfassade wurde die Glasfassade (V1) verwendet.

- Vergleich unterschiedlicher Fassadensysteme - Referenzfassaden (V1, V2, V3), V3 mit außenliegendem Sonnenschutz exemplarisch als (Bandfassade) „Stand der Technik Fassade“ und den beiden adaptiven Fassade mit variablen U,g,T sowie U,g,T,n.
- Ermittlung der Energetische Potentiale einzelner, variabler Parameter
- Gegenüberstellung der Fassadenorientierung nach vier Himmelsrichtungen
- Vergleich von Büronutzung, Nutzung als Wohn- oder Schlafzimmers
- Energieeinsparpotential adaptiver Fassaden für fünf unterschiedlichen Klimazonen.

### 2.1 Vergleich unterschiedlicher Fassadensysteme

Um ein Gefühl für den Einfluss der Fassadenarten sowie den Vergleich des Energiebedarfs von adaptiven Fassadensystemen zu derzeit üblichen Fassadensystemen

zu erhalten, wurden die Ergebnisse folgender Simulationen gegenübergestellt. Alle aufgelistete Varianten wurden mit dem Energiebedarf der Nurglasfassade verglichen und demgegenüber das energetische Potential berechnet.

- Nurglasfassade, Sonnenschutzglas, statisch (V1)
- Lochfassade, Wärmeschutzglas, statisch (V2)
- Bandfassade, Wärmeschutzglas, statisch (V3)
- Bandfassade, Wärmeschutzglas mit außen liegendem Sonnenschutz
- Adaptive Fassade mit den variablen Parametern U,g,T
- Adaptive Fassade mit den variablen Parametern U,g,T,n

Alle Simulationen basieren auf den gleichen Grundbedingen:

Büronutzung mit Standort Graz und südlicher Fassadenorientierung. Die Simulationsperioden umfassen den Zeitraum 03.08. - 09.08. (heiße Woche) sowie vom 20.01. - 26.01. (kalte Woche). Erwartungsgemäß unterscheiden sich die drei statischen Fassaden hinsichtlich der Transmissionswärmeverluste über die Flächen, also höherer Wärmeverlust bei größerer Glasfläche. Der Kühlbedarf reduziert sich bedingt durch geringere, externe Kühllasten bei kleineren Glasflächen. Gegenläufig reagiert der Strombedarf für die Beleuchtung.

Der Energiebedarf einer „Bandfassade mit außenliegendem Sonnenschutz“ gegenüber der adaptiven Fassade ist im Sommer nur geringfügig höher, im Winter hingegen kann der Energiebedarf durch den zusätzlich variablen U-Wert halbiert werden. Bedingt durch den außenliegenden Sonnenschutz bedarf es auch im Sommer einer künstlichen Beleuchtung. Der Heizwärmebedarf im Winter erhöht sich durch Reduktion der solaren Gewinne durch den Sonnenschutz geringfügig gegenüber der statischen Bandfassade (V3). Das Energieeinsparpotential der adaptiven Fassade (U,g,T,n) liegt gegenüber der statischen Glasfassade (V1) in der kalten Woche bei 73% und in der heißen Woche bei 87%. Die Ergebnisse zeigen das enorm hohe energetische Potential von adaptiven Fassadensystemen.

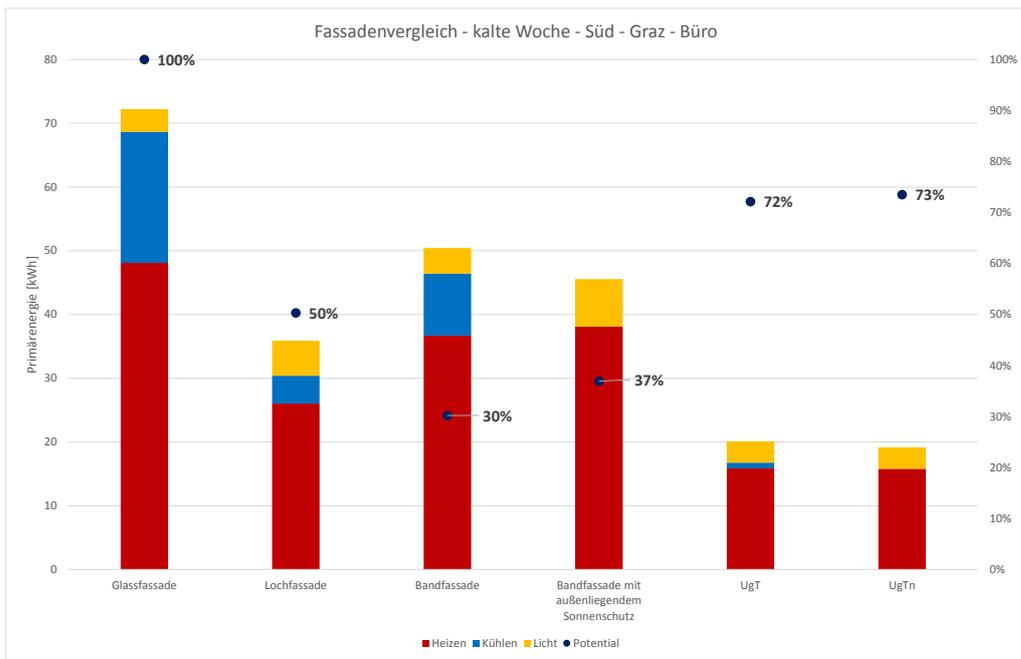


Abbildung 8: Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - kalte Woche

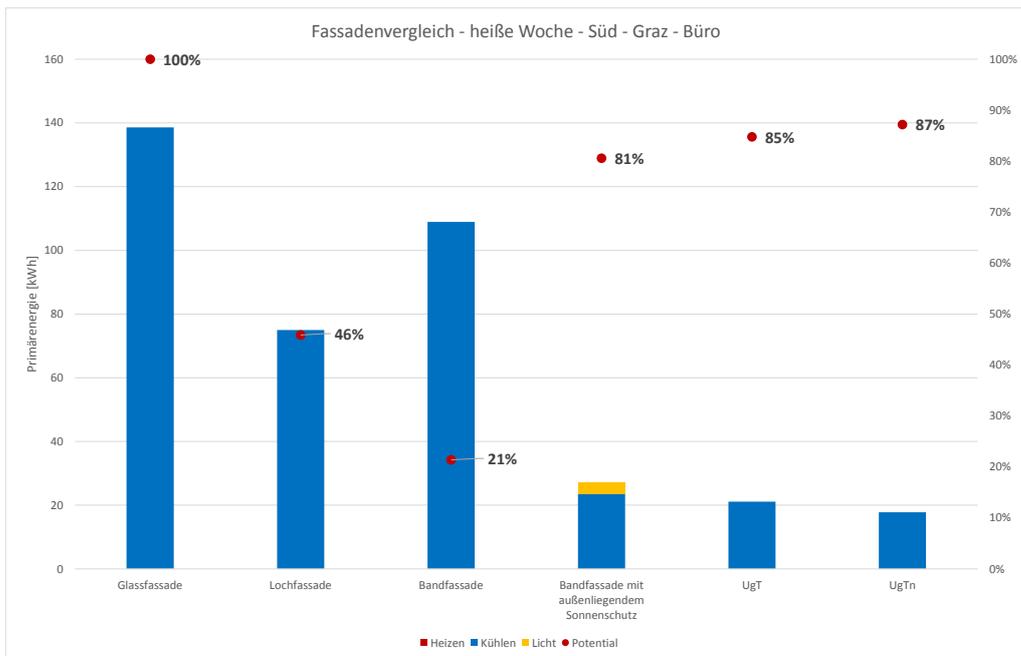


Abbildung 9: Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - heiße Woche

## 2.2 Einfluss auf den Energiebedarf mit variablen Parametern

Um die Energiepotentiale einzelner variabler Parameter einer adaptiven Fassade ermitteln zu können, wurden eigene Simulationen mit jeweils nur einem variablen Parameter durchgeführt. Ergänzt wurde diese Simulationsserie mit den Ergebnissen des Energiebedarfs mit 3 (U,g,T) und 4 (U,g,T,n) variablen Parameter.

Folgende Simulationsvarianten wurden jeweils für die kalte und heiße Woche durchgeführt. Standort ist jeweils Graz, Orientierung der Fassade nach Süden, Nutzung Büro.

- U variable
- g variabel
- T variabel
- n variabel
- u, g, T variabel
- u, g, T, n variabel

Die energetischen Potentiale der einzeln variierten Parameter sind für Sommer und Winter sehr unterschiedlich.

Der U-Wert hat ein energetisches Potential von 46% im Winter und 8% im Sommer. Das energetische Potential des g-Werts liegt im Winter bei 38%, was hauptsächlich durch die komplette Reduktion des Kühlbedarfs erreicht wird. Zusätzlich bewirkt der variable g-Wert auch eine Erhöhung der solaren Gewinne und somit eine Senkung des Wärmebedarfs. Im Sommer liegt das energetische Potential bei 77%.

Das energetische Potential des T-Werts liegt im Winter bei lediglich 2%. Bedingt durch die fehlende Notwendigkeit zur künstlichen Belichtung des Büros in der heißen Sommerwoche erhalten wir 0% energetisches Potential bei einem variierten T-Wert. Eine Steigerung des energetischen Potentials wird bei Betrachtung über das ganze Jahr erwartet.

Die Ergebnisse der Simulation mit variiertem n-Wert (natürliche Lüftung), geregelt unter Berücksichtigung der Innensolltemperatur und der Außentemperatur birgt energetische Potentiale von 25% im Winter und 18% im Sommer. Die Eliminierung des Kühlbedarfs im Winter zieht, aufgrund Regelungenaugigkeiten, einen etwas höheren Wärmebedarfs nach sich.

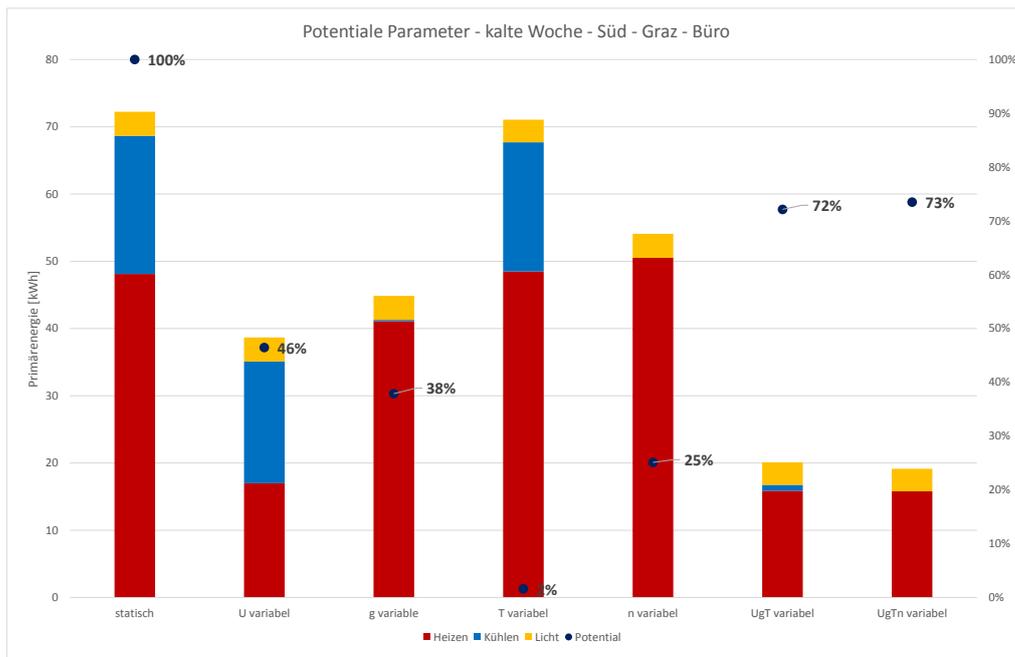


Abbildung 10: Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - kalte Woche

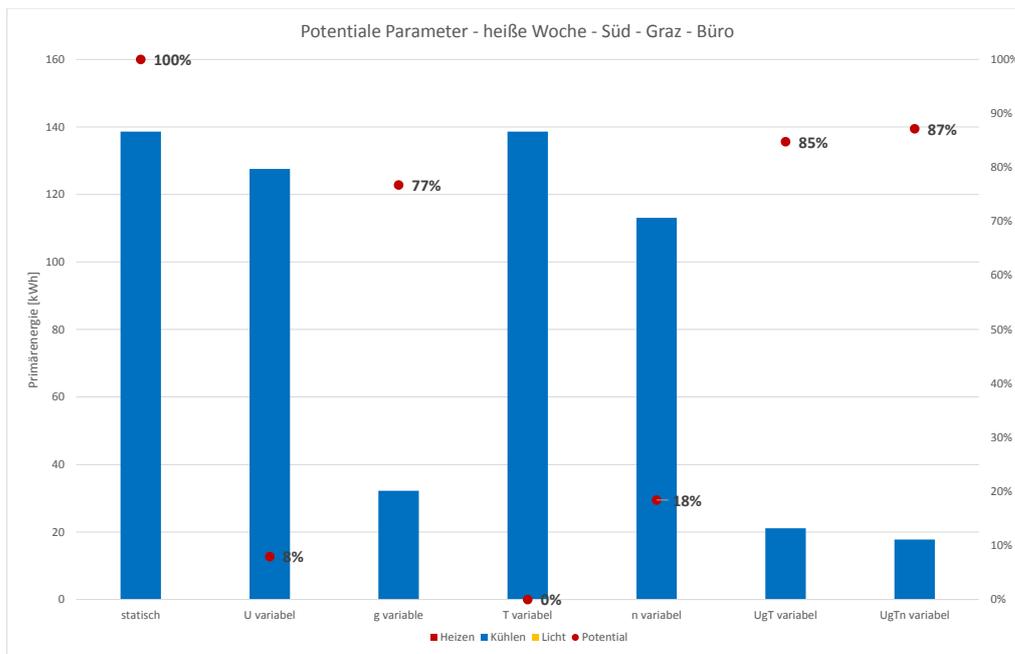


Abbildung 11: Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - heiße Woche

## 2.3 Einfluss auf die Fassadenorientierung

Um den Einfluss der Fassadenorientierung bei adaptiven Fassadensystemen zu untersuchen wurde das Referenzmodell in alle vier Himmelsrichtungen gedreht und die Ergebnisse für die heiße Sommerwoche und die kalte Winterwoche gegenübergestellt.

In der kalten Winterwoche sind die Einsparpotentiale Richtung Norden mit 76% am höchsten, dicht gefolgt vom Westen und Osten mit jeweils 74% und dem Süden mit 72%.

Die energetischen Potentiale sind im Sommer erwartungsgemäß Richtung Süden am größten und liegen hier bei 85%. Im Westen und Osten liegen die Potentiale bei 83% bzw. 81%. Richtung Norden liegen die Einsparpotentiale immer noch bei 75%.

Das dynamische, sich selbst regelnde Simulationsmodell reagiert auf unterschiedliche äußere Anforderungen. Die energetischen Potentiale adaptiver Fassade liegen somit für unterschiedliche Orientierungen nicht sehr weit auseinander. Das vorliegende Ergebnis war Grundlage für die Orientierung der Fassade nach Süden für alle anderen Variantenserien.

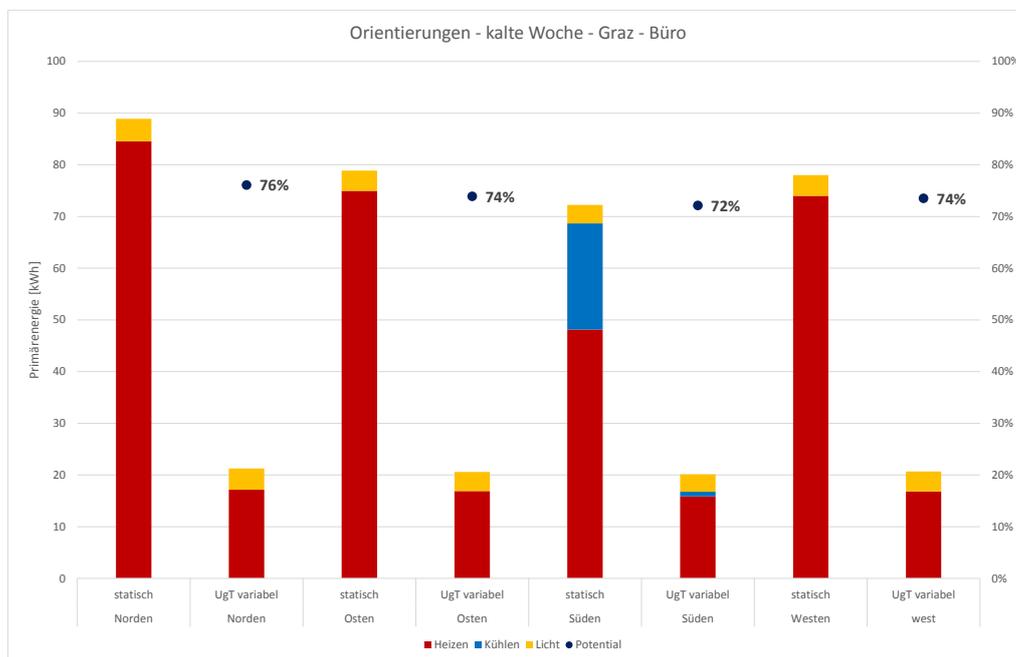


Abbildung 12: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - kalte Woche

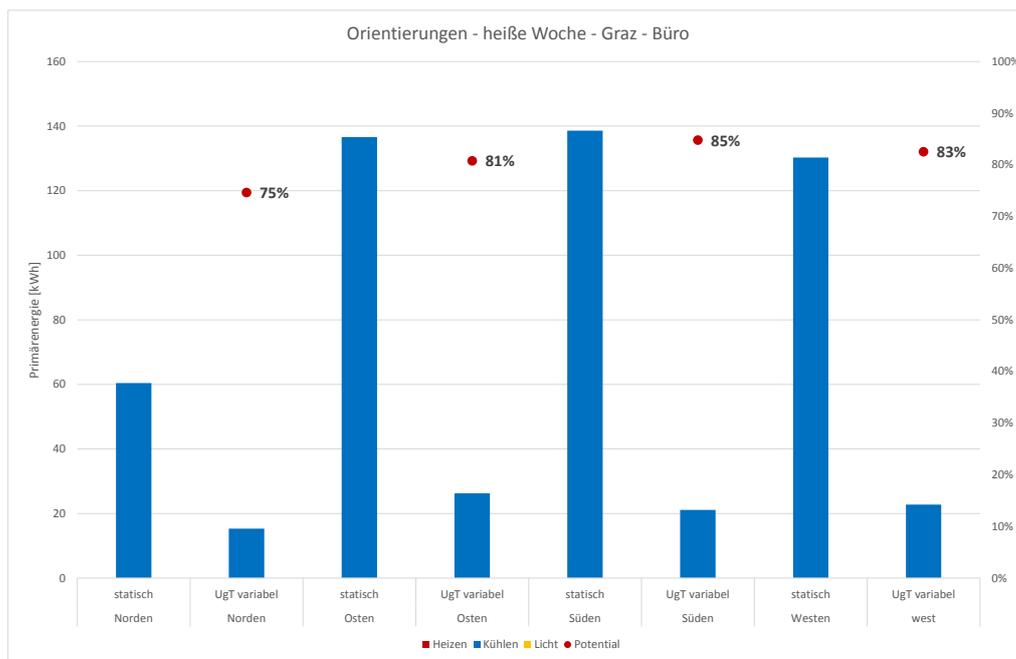


Abbildung 13: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - heiße Woche

## 2.4 Einfluss auf die Nutzungen

Um das energetische Potential von adaptiven Fassaden von unterschiedlichen Nutzungen beurteilen zu können wurde neben der Büronutzung ein Wohnzimmer nach Süden ausgerichtet und ein Schlafzimmer nach Norden ausgerichtet, untersucht.

Im Winter spart die adaptive Fassade bei Wohnräumen 65% (Büro 72%) des Energieeinsatzes. Dieser Energiemehraufwand gegenüber dem Büro resultiert aus dem höheren Strombedarf für die Belichtung am Abend und in der Nacht. Der nach Norden ausgerichtete Schlafraum hingegen profitiert mit bis zu 75% Energieersparnis gegenüber der statischen Glasfassade.

Im Sommer liegt das energetische Potential im Wohnbereichen bei 85% gegenüber der statischen Glasfassade und entspricht nahezu dem energetischen Potential bei Büronutzung. Im nach Norden ausgerichteten Schlafzimmer liegt das Potential bei 81%.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von adaptiven Fassaden bei Bürogebäuden, aber auch im Wohnbau ein sehr hohes energetisches Potential birgt. Gerade im Wohnbau können adaptive Fassadensysteme einen maßgeblichen Beitrag gegen sommerliche Überwärmung leisten.

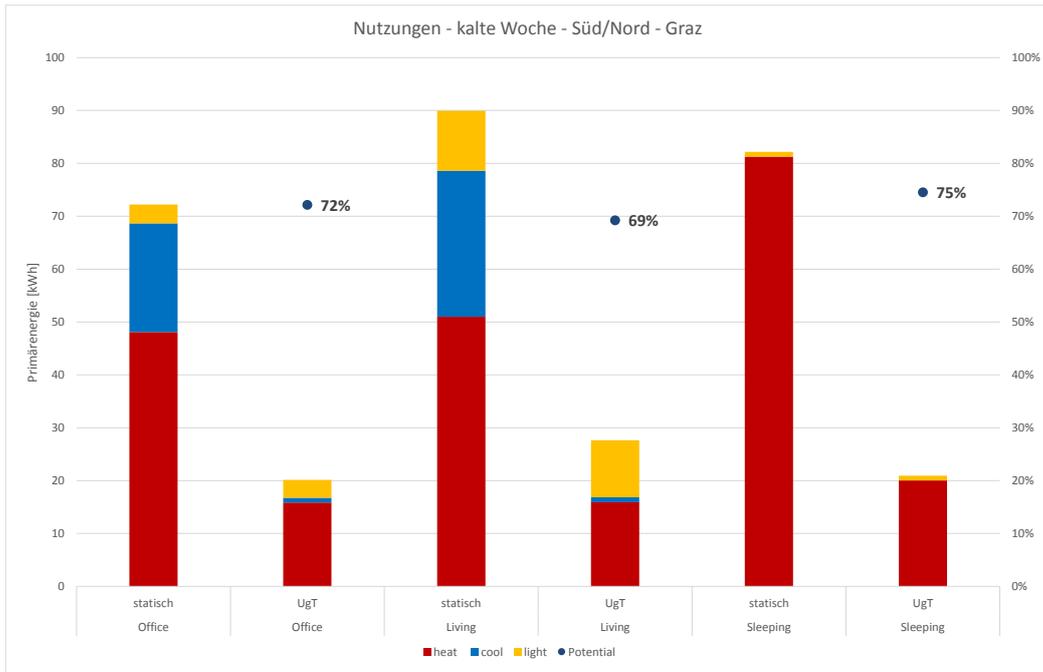


Abbildung 14: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - kalte Woche

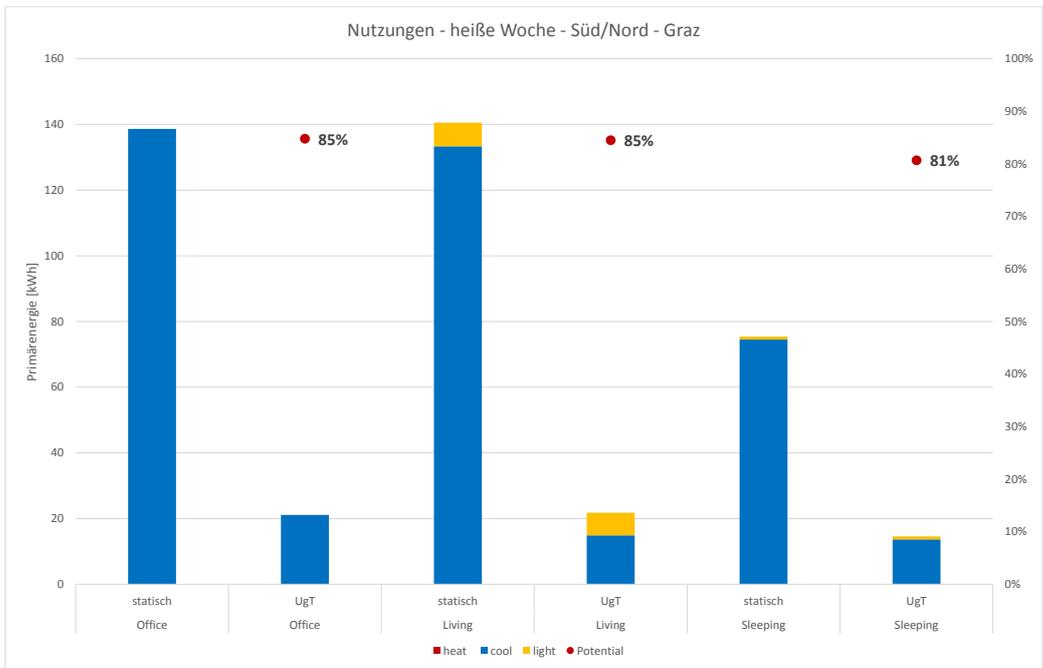


Abbildung 15: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - heiße Woche

## 2.5 Einfluss der Klimazonen

Der Einsatz adaptiver Fassaden ist selbstverständlich weltweit interessant. Aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen an Standorten in verschiedenen Klimazonen, verhält sich die adaptive Fassade individuell verschieden und birgt unterschiedliche energetische Potentiale.

Das Simulationsmodell „smart façade“ ist durch die selbstregelnde und klimaabhängige Steuerung in der Lage adaptive Fassaden an allen Standorten der Welt zu rechnen. Es müssen lediglich die Wetterdaten ausgetauscht werden.

Die Simulationen wurden alle mit der Nutzung Büro, Orientierung nach Süden und mit den variablen Parametern U,g,T,n gerechnet.

Es wurden neben Graz Simulationen an den Standorten Abu Dhabi, Singapur, Moskau und Rom durchgeführt und verglichen. Dabei wurde jeweils die kälteste und heißeste Woche simuliert – in Abu Dhabi und Singapur wurde auf die kälteste Woche verzichtet.

Die Einsparpotentiale liegen in der kalten Woche in Graz bei 74% in Moskau bei 71% und in Rom sogar bei 98%.

In der heißen Woche liegen die Potentiale in Graz bei 88%, in Abu Dhabi bei 76%, in Singapur bei 55%, in Moskau bei 88% und in Rom bei 81%.

Der Einsatz von adaptiven Fassaden birgt somit ein weltweites, sehr hohes Energieeinsparpotential.

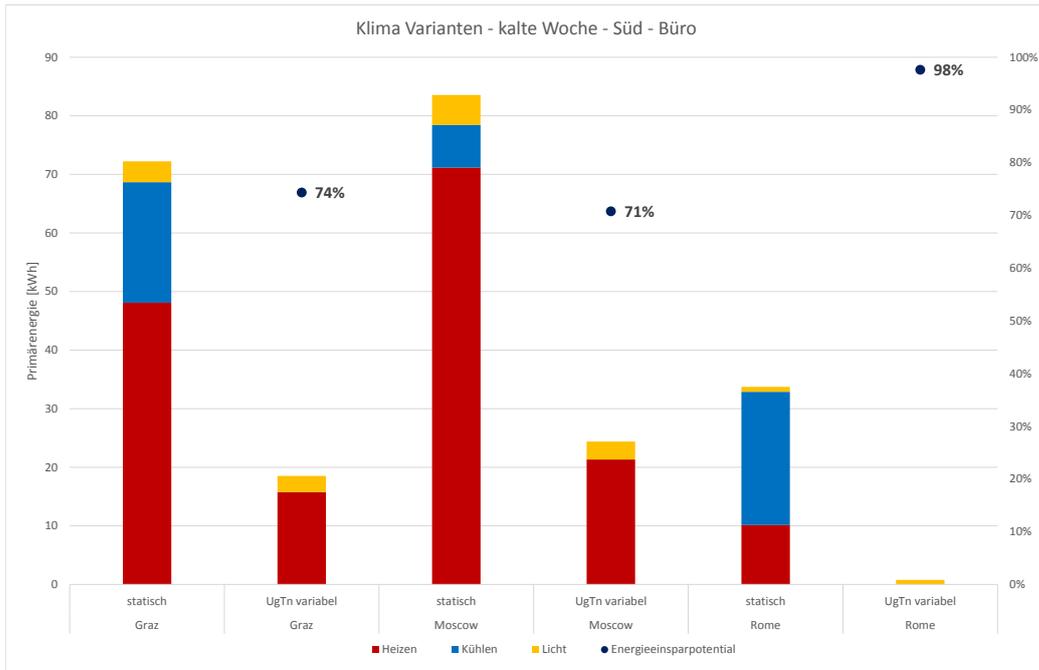


Abbildung 16: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - kalte Woche

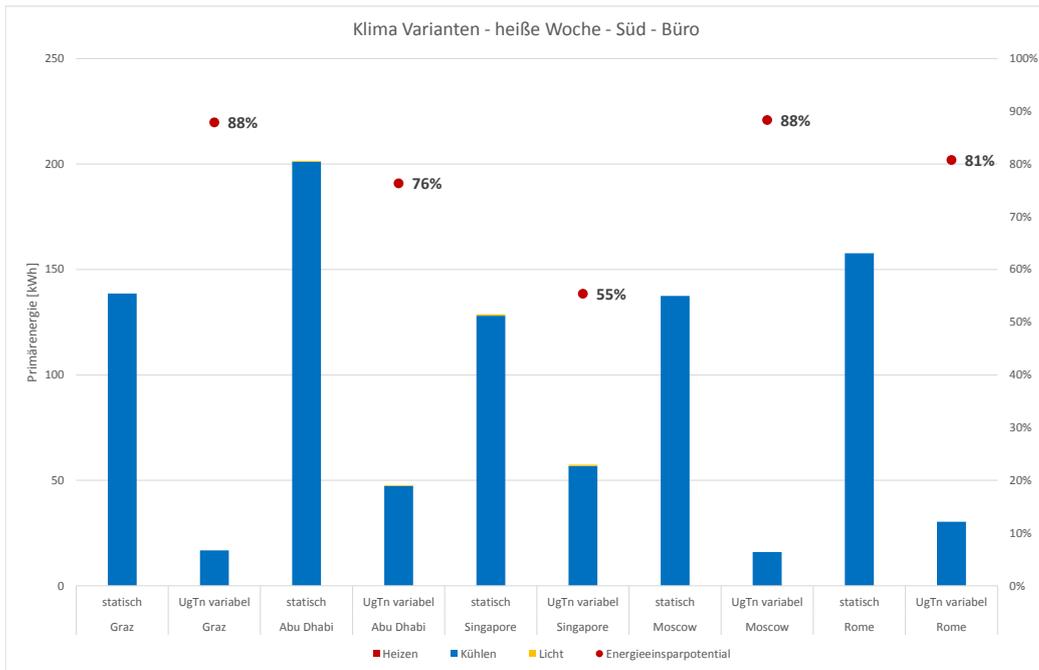


Abbildung 17: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - heiße Woche

### 3 Schlussfolgerungen

Durch dieses Sondierungsprojekt konnten die Potentiale adaptiver Fassadensysteme offengelegt werden. Sie bilden eine vielversprechende Grundlage für weitere Forschungsvorhaben in diesem Bereich. Erweiterungen im Bereich Materialforschung hinsichtlich reaktiver Parameter im Bereich Fassadenentwicklung werden durch die ermittelten Simulationsergebnisse eine unterstützende Bedeutung zugewiesen. Chancen adaptiver Fassadensysteme beschränken sich nicht nur auf Bürogebäude. Ergebnisse mit anderen Nutzerverhalten belegen eindeutig ein ebenso hohes Potential hinsichtlich Energieersparnis im Nutzungsbereich Wohnen.

Die aus dem Forschungsprojekt hervorgegangene *Grasshopper*-Simulationsdefinition ist ein voll funktionsfähiges Simulationswerkzeug zur Untersuchung adaptiver Fassadensysteme. Die Flexibilität des Werkzeugs lässt ebenso die Reduktion des Komplexitätsgrades zu, wie eine Weiterentwicklung bzw. einen Ausbau der zu berücksichtigten Parameter.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfüllt die Erwartung über das Einsparungspotential durch adaptive Fassadensysteme. Die Effekte auf den Energieverbrauch sind bei Bürogebäuden als auch Wohngebäuden beachtlich. Weitere Untersuchungen im Bereich Wohnen, insbesondere die Simulation längere Zeitperioden sind zu empfehlen. Differenzierungen zwischen Schlaf- und Wohnzimmern, Bäder und Erschließungsflächen können ein schärferes Bild zeichnen, bei welchem zusätzliche Möglichkeiten zur Energieeinsparung vermutet werden.

Die Potentialanalyse zeigt ähnliche Ergebnisse bei den verschiedenen Fassadenorientierungen. Adaptive Fassadensysteme sind somit in ihrem Einsatz in jeder Orientierung als sinnvoll zu erachten. Die Analyse der Simulationsergebnisse legt auch eine Abhängigkeit der Energieeinsparpotentiale zu den jeweiligen Klimazonen offen und zeigt das weltweit große energetische Potential von adaptiven Fassadensystemen.

Das Ergebnis des Forschungsprojekts, insbesondere die oben erwähnte Simulationsdefinition bildet ein starkes Fundament für darauf aufbauende Forschungsprojekte, welche zum Ziel haben, smarte Fassadensysteme der Zukunft zu entwickeln.

### 4 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts erhöhen, wie vermutet, das Verständnis über das energetische Potential von adaptiven Fassaden. Die Höhe der Potentiale, insbesondere des  $\tau$ ,  $g$  und  $U$ -Wertes versprechen eine erfolgreiche, weiterführende Entwicklung adaptiver Fassaden in Kooperation mit Fassadenherstellern, Architekten und Forschungseinrichtungen. Neue Marktfelder können, aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen, erschlossen werden.

Die Behaglichkeit für Büro- und Wohngebäude bleiben trotz starker Reduktion des Energiebedarfs auf hohem Niveau, adaptive Fassaden tragen wesentlich zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz in der Architektur bei. Die Einsicht in die Potentiale von adaptiven Fassaden ebnet den Weg für die Konzeptionierung, Entwicklung und Umsetzung von smarten Fassadenprototypen in einem interdisziplinären Team.

Das Forschungsprojekt „smart façade“ führte institutsintern zu einer erweiterten Betrachtungsweise der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in Forschung und Lehre. Besonders hervorzuheben ist der entwickelte Schwerpunkt der Dissertation von Univ.Ass.Dipl.arch. Christiane Wermke, deren Forschungsfrage adaptive Fassaden beinhaltet. Methodik und Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Sondierungsarbeit werden somit vertieft und weiterentwickelt. Die Lehre konnte sich speziell im Wintersemester 2015/16 auf unterschiedlichen Ebenen mit Chancen und Potentialen adaptiver Fassaden auseinandersetzen.

Die Arbeit mit StudentInnen umfasste case studies in Seminaren über konzentrierte Detailbetrachtungen im Bereich Simulation bis hin zur Entwicklung relevanter Entwurfsmethoden adaptiver Fassadensysteme und deren Integration in den architektonischen Entwurf.

Das Institut für Gebäude und Energie beabsichtigt, im Schritt 2, über ein kooperatives F&E-Projekt mit Partnern aus anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie Prototypen von adaptiven Fassadenteilen als „proof of concept“ zu entwickeln.

## 5 Verzeichnisse

### 5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Referenzgeometrie der adaptiven Fassade .....	13
Abbildung 2: Referenzmodell .....	18
Abbildung 3: Fassadenvarianten der Grundlagendefinition .....	22
Abbildung 4: Referenzmodell und Lichtsensor .....	27
Abbildung 5: Simulationsalgorithmus .....	27
Abbildung 6: Grasshopper Definition.....	29
Abbildung 7: Die Preselection weist der Fassade die physikalischen Eigenschaften zu .....	30
Abbildung 8: Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - kalte Woche.....	37
Abbildung 9: Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - heiße Woche .....	37
Abbildung 10: Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - kalte Woche.....	39
Abbildung 11: Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - heiße Woche .....	39
Abbildung 12: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - kalte Woche .....	40
Abbildung 13: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - heiße Woche .....	41
Abbildung 14: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - kalte Woche .....	42
Abbildung 15: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - heiße Woche .....	42
Abbildung 16: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - kalte Woche .....	44
Abbildung 17: Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - heiße Woche .....	44
Abbildung 18: Parameterdefinition der Vorauswahl (Preselection) .....	50

### 5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Größen der Fassade mit Vollverglasung .....	19
Tabelle 2: Konstruktionsaufbauten der raumumschließenden Elemente des statischen Referenzmodells .....	19
Tabelle 3: Materialbibliothek für die Erstellung der Konstruktionselemente: .....	20
Tabelle 4: Dimensionierung und U-Werte der raumumschließenden Elemente .....	21
Tabelle 5: Parameter der voruntersuchten Fassadenvarianten V1, V2 und V3 .....	23

Tabelle 6: Interne Lasten.....	24
Tabelle 7: Schedule für Bürobelegung während eines Arbeitstages.....	24
Tabelle 8: Schedule für Bürobelegung während der Urlaubszeit.....	24
Tabelle 9: Parameterdefinitionen des statischen Simulationsmodells .....	25
Tabelle 10: Klassifizierung der Vorauswahl (Preselection) .....	31
Tabelle 11: Simulationsvarianten .....	35

### 5.3 Literaturverzeichnis

CODY, B. 2012. „Form follows Energy - Beziehungen zwischen Form und Energie in der Architektur und Urban Design, DBZ Deutsche BauZeitschrift, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.

CODY, B. 2012. „Form follows Energy - Beziehungen zwischen Form und Energie in der Architektur und Urban Design, DBZ Deutsche BauZeitschrift, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.

Favoino, F., Y. Cascone, L. Bianco, F. Goia, M. Zinzi, M. Overend, V. Serra, and M. Perino. 2015. Simulating switchable glazing with energy plus: An empirical validation and calibration of a thermotropic glazing model.

Favoino, Fabio. Towards the future generation of adaptive glazed building envelope. Cambridge, UK, 2014 [cited 07/2015 2015]. Available from <http://www.gft.eng.cam.ac.uk/media/ff/towards-the-future-generation-of-adaptive-glazed.pdf/view> (accessed 28.07.2015).

Favoino, Fabio, Qian Jin, and Mauro Overend. 2014. Towards an ideal adaptive glazed façade for office buildings. *Energy Procedia* 62 : 289-98.

Favoino, Fabio, and Mauro Overend. 2015. A simulation framework for the evaluation of next generation responsive building envelope technologies. (06/15): 1-8.

Favoino, Fabio, Mauro Overend, and Qian Jin. 2015. The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies. *Applied Energy* 156 (10/15): 1-15.

Goia, Francesco, and Ylenia Cascone. 2014. The impact of an ideal dynamic building envelope on the energy performance of low energy office buildings. *Energy Procedia* 58 : 185-92.

Loonen, R. C. G. M., F. Favoino, and L. Aelenei. 2015. Design for facade adaptability- towards a unified and systematic characterization. Conference Proceedings of the 10th ENERGY FORUM, Bern, Switzerland.

Loonen, R. C. G. M., F. Favoino, J. L. M. Hensen, and M. Overend. 2016. Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, March 2016 (March 2016).

Nakhi, A. E. 1995. Adaptive construction modelling within whole building dynamic simulation. PhD., Starthclyde University, UK.

Qian, J., F. Favoino, and M. Overend. 2015. Study in the potential of opaque adaptive facade for office building in a temperate climate. At Hyderabad, India.

# 6 Anhang

	Occupied	Not Occupied	Tamb	Tamb	Tamb	Tamb	Tamb	Illuminance	Illuminance	Solar Rad	Solar Rad	U	U	g	g	T	T	No	No	Nr	comment			
			$\leq 16^\circ\text{C}$	$16^\circ\text{C} < T <= 21^\circ\text{C}$	$21^\circ\text{C} < T <= 26^\circ\text{C}$	$T > 26^\circ\text{C}$	$I = 0 \text{ lux}$	$I > 0 \text{ lux}$	$< 200\text{W}/\text{qm}$	$\geq 200\text{W}/\text{qm}$														
1	x						x		x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	1	Belegt	Winter	Nacht	KeineSonne
2	x		x				x		x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	2	Belegt	Übergang	Nacht	KeineSonne
3	x			x			x		x			1.1	1.1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	3	Belegt	Sommer	Nacht	KeineSonne
4	x				x		x		x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	4	Belegt	SommerHeiß	Nacht	KeineSonne
5	x		x					x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.9	0.9	1	1	5	Belegt	Winter	Tag	KeineSonne
6	x			x				x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.9	0.9	9	5	6	Belegt	Übergang	Tag	KeineSonne
7	x				x			x	x			1.1	1.1	0.1	0.1	0.9	0.9	1	1	7	Belegt	Sommer	Tag	KeineSonne
8	x					x		x	x			0.2	0.2	0.1	0.1	0.9	0.9	1	1	8	Belegt	SommerHeiß	Tag	KeineSonne
9	x		x					x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.9	0.9	5	5	9	Belegt	Winter	Tag	Sonne
10	x			x				x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.9	0.9	9	5	10	Belegt	Übergang	Tag	Sonne
11	x				x			x	x			1.1	1.1	0.1	0.1	0.9	0.9	1	1	11	Belegt	Sommer	Tag	Sonne
12	x					x		x	x			0.2	0.2	0.1	0.1	0.9	0.9	1	1	12	Belegt	SommerHeiß	Tag	Sonne
13		x	x				x		x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	13	Unbelegt	Winter	Nacht	KeineSonne
14		x		x			x		x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	14	Unbelegt	Übergang	Nacht	KeineSonne
15		x			x		x		x			1.1	1.1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	15	Unbelegt	Sommer	Nacht	KeineSonne
16		x				x		x	x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	16	Unbelegt	SommerHeiß	Nacht	KeineSonne
17		x	x					x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.0001	0.0001	1	1	17	Unbelegt	Winter	Tag	KeineSonne
18		x		x				x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.0001	0.0001	9	5	18	Unbelegt	Übergang	Tag	KeineSonne
19		x			x			x	x			1.1	1.1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	19	Unbelegt	Sommer	Tag	KeineSonne
20		x				x		x	x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	20	Unbelegt	SommerHeiß	Tag	KeineSonne
21		x	x					x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.0001	0.0001	1	1	21	Unbelegt	Winter	Tag	Sonne
22		x		x				x	x			0.2	0.2	0.1	0.9	0.0001	0.0001	9	5	22	Unbelegt	Übergang	Tag	Sonne
23		x				x		x	x			1.1	1.1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	23	Unbelegt	Sommer	Tag	Sonne
24		x				x		x	x			0.2	0.2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	1	1	24	Unbelegt	SommerHeiß	Tag	Sonne

Abbildung 18: Parameterdefinition der Vorauswahl (Preselection)