

smart façade

energetische Potentiale von adaptiven Fassadensystemen

Univ. Prof. Brian Cody BSc(Eng) Hons CEng MCIBSE
Instiut für Gebäude und Energie, Technische Universität Graz

Graz, am 31.03.2016

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



STADT
der Zukunft

im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Impressum:

Univ. Prof. Brian Cody BSc(Eng) Hons CEng MCIBSE
Instiut für Gebäude und Energie, Technische Universität Graz
Rechbauerstraße 12/II
A - 8010 Graz

ige@tugraz.at
www.ige.tugraz.at

Tel: +43 (0) 316 / 873 -4 751
Fax: +43 (0) 316 / 104751

FFG-Projektnummer: 6644749
e-call-Antragsnummer: 5371898
Kurztitel: smart façade
Projektlaufzeit: 01.06.2015 - 31.03.2016

Inhaltsverzeichnis:

Kurzfassung.....	6
Abstract.....	7
1. Einleitung.....	8
1.1. Aufgabenstellung	9
1.2. Stand der Technik	10
1.3. Verwendete Methoden	13
2. Ergebnisse.....	28
2.1. Vergleich unterschiedlicher Fassadensysteme	28
2.2. Einfluss auf den Energiebedarf mit variablen Parametern	30
2.3. Einfluss auf die Fassadenorientierung	32
2.4. Einfluss auf die Nutzungen	34
2.5. Einfluss der Klimazonen	36
3. Schlussfolgerungen.....	38
4. Ausblick und Empfehlungen.....	39
5. Verzeichnisse.....	40
5.1. Abbildungsverzeichnis	40
5.2. Tabellenverzeichnis	41
5.3. Literaturverzeichnis	42
6. Anhang.....	44

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des Sondierungsprojekts „smart façade - energetische Potentiale von adaptiven Fassadensystemen“ aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit).

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 und Luftdichtheit hervorzuheben.

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 Parametrisierung des Simulationsmodells ermöglichte weiters Potentiale hinsichtlich unterschiedlicher Ausrichtungen der Fassade ebenso zu untersuchen wie über unterschiedliche Nutzerverhalten sowie Klimadaten.

Die Ergebnisse, welche in diesem Bericht beschrieben werden, belegen die zu Beginn des Forschungsprojekts vermuteten Potentiale adaptiver Fassadensysteme hinsichtlich des Erreichens von maximaler Behaglichkeit bei gleichzeitiger Reduktion des Energiebedarfs für Büroräume, Wohn- und Schlafzimmer.

Univ. Prof. Brian Cody BSc(Eng) Hons CEng MCIBSE
Leiter des Instituts für Gebäude und Energie
Technische Universität Graz

Kurzfassung

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 Warmegewinne, 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 smarter Fassaden und smarter Fassadenkomponenten.

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.

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

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.

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.

Abstract

„*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 façade, building skins, which maximize energy performance by varying their physical properties to adapt to changing external (weather) and internal (user behaviour) conditions.

The research results provide a precise statement on the energetic potential of smart façade, 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.

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 façade and smart façade components.

Market-based simulation software follow a linear workflow. The software tool developed for this research project manipulates and bypasses this process and frameworks the speciality 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 *Honeybee-Plugin* for *Grasshopper*.

The *Grasshopper* simulation-definition, 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 not only offers the possibility for the user to reduce the degree of complexity but it also can be further developed. The expansion of the tool by integrating additional components for alternative investigations is possible.

The evaluation of the simulation results answers 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 can additionally be higher for uses which correspond for living- or sleeping rooms.

The results of this research project, especially the upmentioned simulation-definition can be defined as a powerful tool for subsequent proof of concepts. This approach to adaptive façade systems offer enormous potential for reducing the energy consumption while at the same time ensuring optimal comfort in building spaces. 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 hervorzuheben. 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 (τ -Wert) und der Luftdichtheit (n-Wert) erkennen.

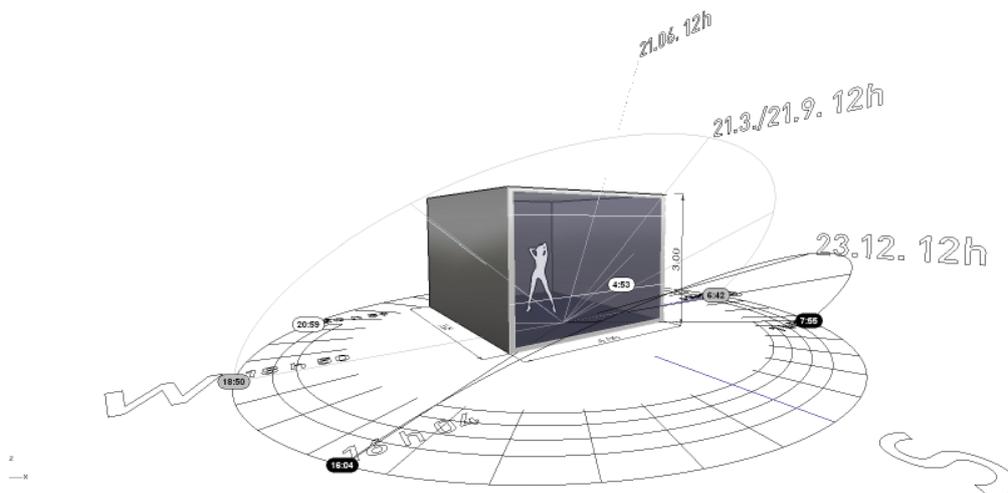


Abb.1. Referenzgeometrie der adaptiven Fassade

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 Parametern. Weiters 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 Verhältnis 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 zum darauf aufbauenden dynamischen parametrischen Simulationsmodell.

Untersuchungen zur Aushebelung bzw. Umgehung linearer Simulationsprozesse stehen anfänglich im Mittelpunkt. Hierzu werden Komponenten verwendet, welche das *Grasshopper*-Add-on *Honeybee* zu Verfügung gestellt werden. Um die Linearität des Simulationsprozesses zu unterbrechen, was notwendig ist, um intelligente Selektionsprozesse dem eigentlichen Simulationsprozess vorzuschalten, wurde auf Komponenten zurück gegriffen, welche für andere Forschungsprojekte entwickelt wurden. Die algorithmische 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 mit adaptiven physikalischen Eigenschaften wird weiters parallel verglichen mit einer konventionellen Lochfassade bzw. einer Bandfassade.

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 äußern sich in Form von kontrollierbarer Wärmedämmung und thermischer Masse, Strahlungsaustausch, Lüftung, solare Energiegewinnung, Tageslicht, Sonnenschutz und Regulierung der Feuchtigkeit.

Weiters wird die Integration der Umwelteinflüsse wie Sonnenstrahlung und der Generierung von Energie über die Fassade 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

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 Tageslichtsysteme².

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,^{3 4} 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 Kühlenergiebedarfs⁵. 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 (Favoino, Overend, and Jin 2015, 1-15).⁶

Untersuchungen von opaken Wandkonstruktionen wurden anhand adaptiver Wärmedämmung durchgeführt. So konnten mehrere Parameter variiert und 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 werden⁷.

1 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.

2 ibid.

3 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): S. 1-15.

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

5 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): S. 1-15.

6 ibid.

7 ibid.



Simulationen eines idealen und dynamischen Fenster-/Wandflächenanteil (WWR=Window-to-Wall-ratio)⁸ mit einer jährlichen, monatlichen, wöchentlichen und stündlichen Optimierung brachte eine Energieeinsparung von lediglich 6%⁹.

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.¹⁰

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.^{11 12}

Außerdem ist es bislang nicht möglich die aktuellen Randbedingungen am Anfang der Folge-Optimierung anzupassen, die physikalischen Parameter in den nächsten Optimierungsloop zu übernehmen oder gezielt in die Regelung der Gebäudetechnik mit einer dynamischen Gebäudehüllenkontrolle einzugreifen.¹³

Es gibt unterschiedliche Ansätze die oben beschriebene Problematik zu umgehen, die teilweise erfolgreich sind, 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.^{14 15 16} 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 thermische Masse abbilden können. Die meisten Programme können diese Funktionen nur eingeschränkt wiedergeben. Zusätzlich müssen die Programme die Modellierung der dynamischen Funktionalität der Fassadenanpassung gewähren,

8 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 : S.185-92.

9 ibid.

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

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

12 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. S.1284-1294)

13 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)

14 ibid.

15 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.

16 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)

d. h. die Anpassung der Fassaden (-eigenschaften) muss in Abhängigkeit der Kontrollstrategie durchführbar sein.¹⁷

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).¹⁸

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).¹⁹ 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 Simulationen 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.²⁰

17 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).

18 *ibid.*

19 *ibid.*

20 *ibid.*

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. Weiters bilden die Simulationsergebnisse des ersteren zur Validierung der Ergebnisse des letzteren. Ausgewählte Ergebnisse des statischen Modells wurden mit einer weiteren Simulationssoftware, *IES VE*, validiert.

DAS STATISCHE SIMULATIONSMODELL - REFERENZMODELL

Grundlagenparameter und Rahmenbedingungen

Die Auswahl bzgl. Dimensionierung und Material erfolgte anhand von Ergebnissen von statischen thermischen Simulationen und Variantenstudien. Die systematische 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 Simulationsoftware *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 (τ -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.

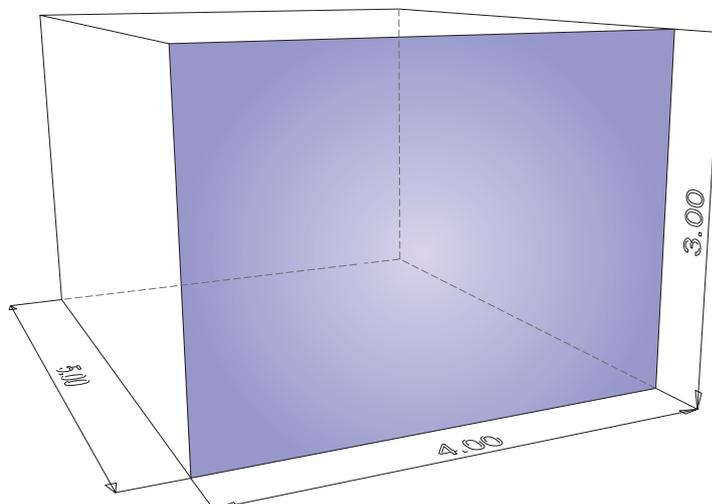


Abb.2. Referenzmodell

Stadt der Zukunft

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 aufgeteilt in drei adiabaten Zwischenwänden, zwei adiabaten Geschossdecke bzw. einer nach Süden gerichteten Fassade.

Untersucht wurden anfänglich drei verschiedene Fassadentypen: einer Vollverglasung (V1, Variante 1), einer Lochfassade (V2) und einer Bandfassade (V3). Der Vergleich der Simulationsergebnisse für den Heizwärmebedarf, dem Kühlbedarf und dem 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 zugewiesen. Diese dienen als Referenzwerte, um die Potenziale der dynamischen Fassade darstellen zu können.

Tab.1: Physikalische Größen der Fassade mit Vollverglasung

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

Tab.2: Konstruktionsaufbauten der raumumschließenden Elemente des statischen Referenzmodells

KONSTRUKTIONSAUFBAUTEN DES REFERENZMODELLS:		
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.

Tab.3: Materialbibliothek für die Erstellung der Konstruktionselemente:

VERWENDETE MATERIALIEN (IN ALFABETISCHER REIHENFOLGE):	
ESTRICH	
Rauigkeit:	rau (rough)
Stärke (m):	0.06
Wärmeleitfähigkeit (λ):	1.4
Dichte (kg/m ³):	2,000
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,000
FENSTERRAHMEN	
Rauigkeit:	glatt (smooth)
Stärke (m):	0.2
Wärmeleitfähigkeit (λ):	0.5
Dichte (kg/m ³):	1,800
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,400
GIPSKARTONPLATTE	
Rauigkeit:	glatt (smooth)
Stärke (m):	0.0125
Wärmeleitfähigkeit (λ):	0.21
Dichte (kg/m ³):	900
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	950
KALKPUTZ	
Rauigkeit:	rau (rough)
Stärke (m):	0.2
Wärmeleitfähigkeit (λ):	0.87
Dichte (kg/m ³):	1,800
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,100
MINERALWOLLE	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)
Stärke (m):	0.075 ¹ und 0.12 ²
Wärmeleitfähigkeit (λ):	0.035
Dichte (kg/m ³):	75
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	900
PERLIT	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)
Stärke (m):	0.2
Wärmeleitfähigkeit (λ):	0.06
Dichte (kg/m ³):	50
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,000
SILIKATPUTZ	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)



Stärke (m):	0.002
Wärmeleitfähigkeit (λ):	0.7
Dichte (kg/m ³):	1,800
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,100
STAHLBETON	
Rauigkeit:	glatt (smooth)
Stärke (m):	0.2
Wärmeleitfähigkeit (λ):	2.3
Dichte (kg/m ³):	2,500
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	1,000
TEPPICH	
Rauigkeit:	sehr rau (very rough)
Stärke (m):	0.05
Wärmeleitfähigkeit (λ):	0.15
Dichte (kg/m ³):	90
Spezifische Wärmekapazität (J/kg-K):	2,000
Anm.: (1) für GK-Zwischenwände (2) für VWS-Fassade.	

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

Tab.4: Dimensionierung und U-Werte der raumumschließenden Elemente

PHYSIKALISCHE GRÖSSEN DER ELEMENTE DES REFERENZMODELLS (EXKL. FASSADE):			
Innenwände	Gipskartonwand	Wandstärke (m):	0.075
		U-Wert (W/m ² /K):	0.29
Außenwand	VWS-Fassade	Wandstärke (m):	0.34
		U-Wert (W/m ² /K):	0.29
Decke:	Hohlboden	Deckenstärke (m):	0.465
		U-Wert (W/m ² /K):	0.29
Boden:	Hohlboden	Deckenstärke (m):	0.465
		U-Wert (W/m ² /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 zur Ermittlung der Randbedingungen für das aufbauende Simulationsmodell wurde mit den Klimadaten der Stadt Graz (gemäßigte Klimazone) gearbeitet. Weiters wurden folgende Klimadaten ausgewählt: Abu Dhabi (Wüstenklima), Moskau (kontinentales Klima), Rom (subtropisches Klima) und Singapur (tropisches Klima).

Die Grundlagenparameter konnten im AP 2 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 zu Verfügung stellen. Dabei

handelt es sich um plug-ins für *Grasshopper*, einer graphisch-algorithmischer Editorsoftware für das 3D-Programm Rhinoceros.

SIMULATIONSvarianten

Aufbauend auf die oben genannten Simulationsvarianten zur Festlegung der Simulationsparameter wurden im Zuge der Entwicklung des Simulationsmodells, welches in AP 3 beschrieben wird, drei Referenzmodelle weiterentwickelt:

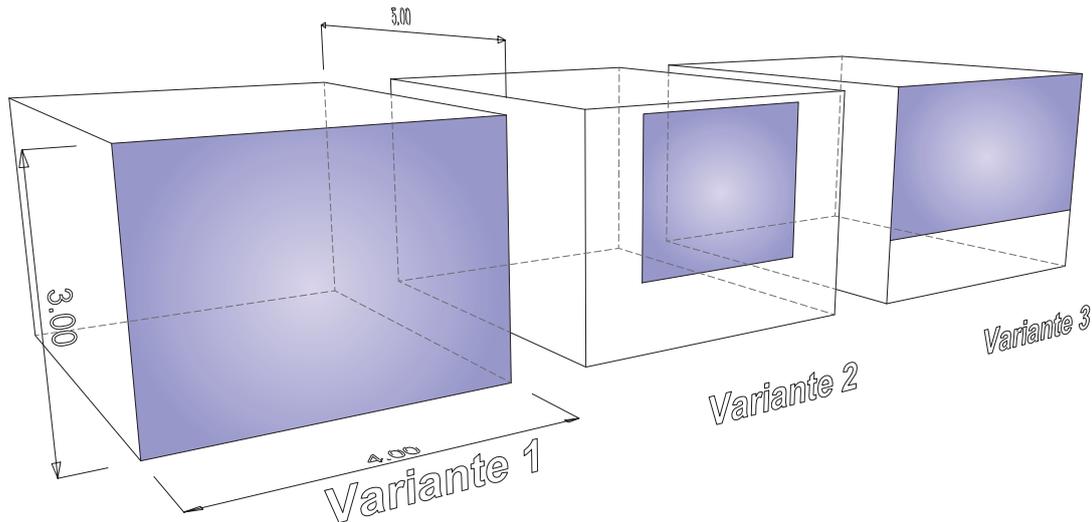


Abb.3. Fassadenvarianten der Grundlagendefinition

- 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 AP 3 zur Validierung der Simulationsergebnisse herangezogen. Der Glasanteil an der Fassade (12 m2) 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.

Tab.5: Parameter der voruntersuchten Fassadenvarianten V1, V2 und V3

Variante 1 - Vollverglasung	
Verglasung:	Sonnenschutzglas
U-Wert (W/m2 K):	1.1
g-Wert:	0.27
T-Wert:	0.48
Fensterrahmenanteil:	5%
Rahmen U-Wert (W/m2 K):	2.41
Variante 2 - Lochfassade	



Stadt der Zukunft

Verglasung:	Wärmeschutzglas
U-Wert (W/m ² K):	1.1
g-Wert:	0.65
τ-Wert:	0.80
Fensterrahmenanteil:	5%
Rahmen U-Wert (W/m ² K):	2.41
Variante 3 - Bandfassade	
Verglasung:	Wärmeschutzglas
U-Wert (W/m ² K):	1.1
g-Wert:	0.65
τ-Wert:	0.80
Fensterrahmenanteil:	5%
Rahmen U-Wert (W/m ² K):	2.41

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

Simulationsparameter:

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

Tab.6: Interne Lasten

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

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:

Tab.7: Schedule für Bürobelegung während eines Arbeitstages

BÜROBELEGUNG TYPISCHER ARBEITSTAG:																							
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:



Tab.8: Schedule für Bürobelegung während der Urlaubszeit

BÜROBELEGUNG URLAUBSTAG:																							
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	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, 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.

Tab.9: Parameterdefinitionen des statischen Simulationsmodells

Parameter	Fassaden-typ			Ausrichtung				Nutzung			Sim.-pe-riode		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

DAS SIMULATIONSEWERKZEUG

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 Komponentencuster 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.

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.

Stadt der Zukunft

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:

- 15.00 W/m² für Geräte
- 10.00 W/m² für Beleuchtung
- 70W/Pers. (Belegung Büro = 2 Personen)
- 0.20 1/h für Infiltration und
- 60 m³/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: S. Seite 18

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 Energy Plus 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.

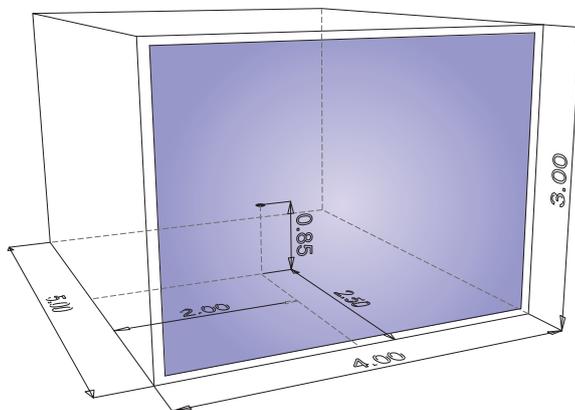


Abb.4. Referenzmodell und Lichtsensor

1.3.1. AP 3 - 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 Komponentencuster Anemone und OctopusE erreicht. Anders ausgedrückt lassen die Komponentencuster 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:

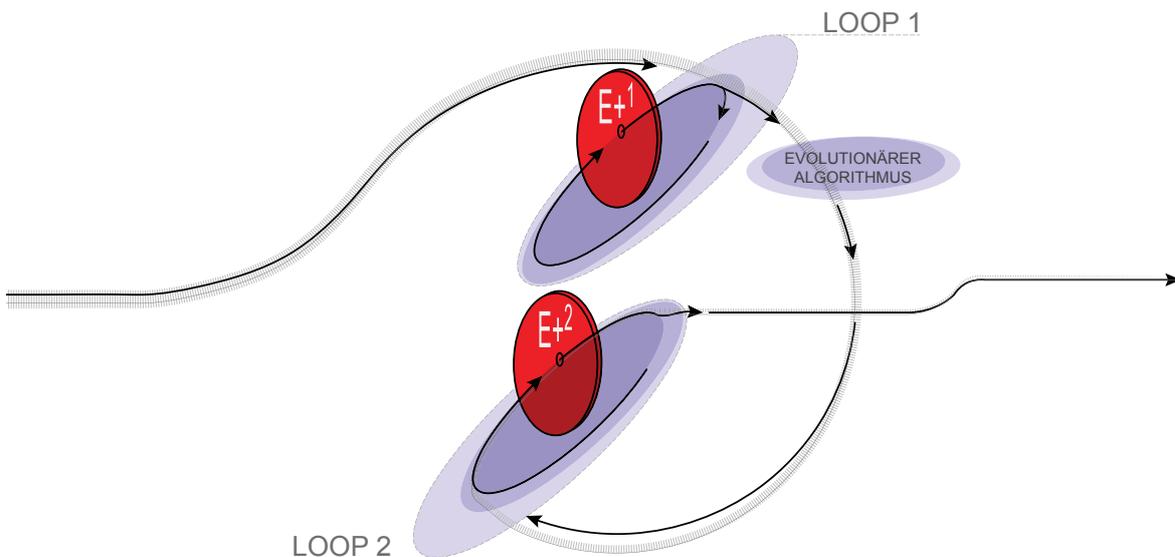


Abb.5. Simulationsalgorithmus

Die Konstruktionen aus der Materialbibliothek (1) wird der parametrische Referenzgeometrie (2) zugewiesen und als Zone (3) zusammengefasst, mit Ausnahme der Fassade. Die physikalischen Werte der adaptiven Fassade wird 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 Simulationenende 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:

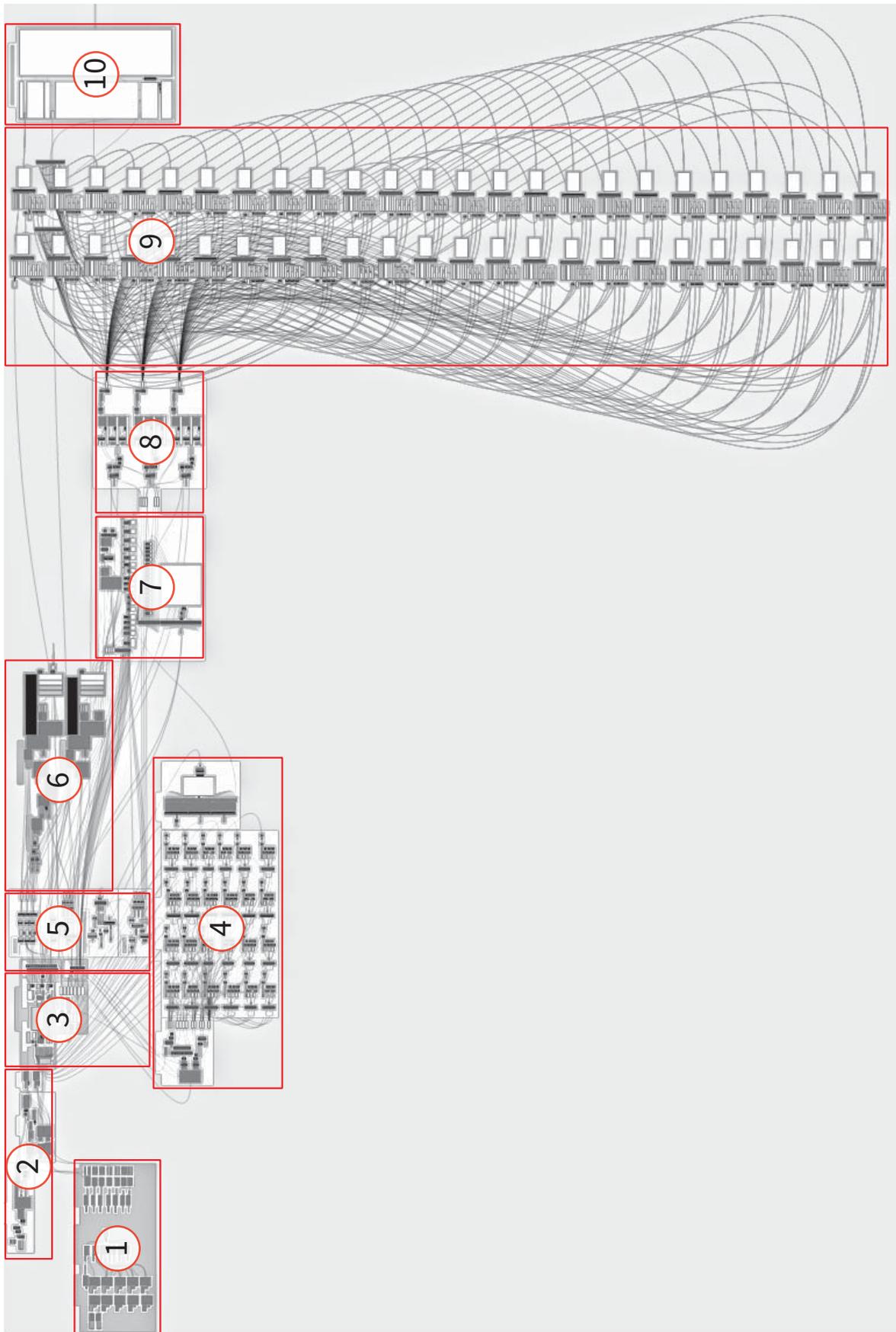


Abb.6. Grasshopper-Definition

VORAUSSWAHL - PRESELECTION

Um den automatisierten Optimierungsloop effektiver einsetzen zu können, wurde in den Simulationsprozess eine Komponentengruppe integriert, welche eine intelligente Vorauswahl (im Folgenden *Preselection* genannt) spezifischer physikalischer Eigenschaften Rechnung trägt. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um vordefinierte physikalische Eigenschaften, welche in Abhängigkeit spezifischer witterungsbedingter Konditionen entweder statisch oder dynamisch ausgebildet werden. Die Anzahl der Loops wird in Abhängigkeit der Relevanz für jede Stunde neu entschieden und dem Optimierungsloop zugefügt. Durch die Entwicklung dieser algorithmischen Komponentengruppe konnte der rechenintensive Optimierungsloop auf jene Fassadenparameter fokussiert werden, deren Einfluss auf die Gesamtenergieeffizienz von Bedeutung ist.

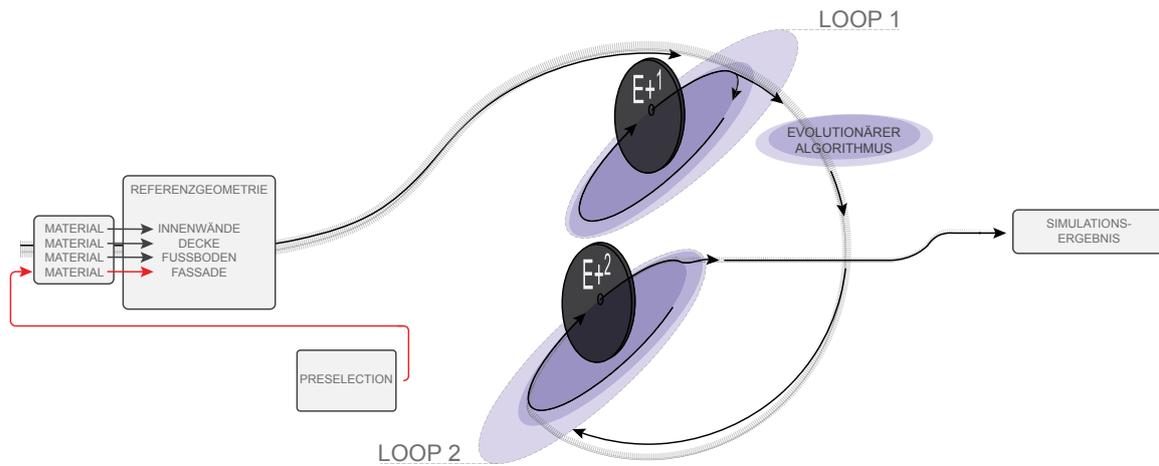


Abb.7. Die Preselection weist der Fassade die physikalischen Eigenschaften zu.

Die Preselection unterscheidet zwischen einem belegten, bzw. unbelegten Büro, zwischen einem milden ($T_{amb} = 21-26^{\circ}C$), einem heißen Sommertag ($T_{amb} >26^{\circ}C$), Temperaturen in der Übergangszeit ($T_{amb} = 16-21^{\circ}C$) und Wintertagen ($T_{amb} <16^{\circ}C$), zwischen Tag und Nacht (Tageslicht vorhanden oder nicht) und über die Intensität der Summe aus direkter und diffuser Sonneneinstrahlung auf die Fassadenfläche (kleiner oder größergleich $200 W/m^2$).

Dieses Steuerungselement ist gekoppelt mit den Wetterdaten, aus welchen die Werte über Außentemperatur, Tag / Nacht und Beleuchtungsstärke eingelesen werden. Die Daten über die effektive Energie der Gesamtstrahlung auf die Fassade an die untersuchten Standorten wurde unabhängig vom Simulationsmodell ermittelt und als Tabelle mit 8760 Werten in die Komponentengruppe integriert.

In Abhängigkeit der verschiedenen Preselection-Definitionen konnten somit 24 Konditionen definiert werden, welche im Folgenden dargestellt werden. Die detaillierte Darstellung mit den vordefinierten physikalischen Eigenschaften der Preselection für die der adaptiven Fassade können dem Anhang entnommen werden.

Tab.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.

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*²¹ und *OctopusE*²². Die Funktionen der beiden Loops werden im Folgenden beschrieben:

*Anemone*²³ 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 äußerste 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*²⁴ 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

21 <http://www.food4rhino.com/project/anemone?etx>, aufgerufen am 21.03.2016

22 <http://www.food4rhino.com/project/octopusE?etx>, aufgerufen am 21.03.2016

23 Anemone wurde von Mateus Zwierzycki entwickelt und liegt derzeit im vierte release vor (Anemone 0.4 vom 14.12.2015)

24 OctopusE wurde von Robert Vierlinger mit Unterstützung der Universität für Angewandte Kunst, Wien, und Bollinger + Grohmann Ingenieure entwickelt. Es wurde die Version octopusE 0.2.1 vom 25.04.2015 verwendet.

verwendet um das beste Ergebnis aus Loop 1 zu mutieren und so neuen Generationen von Parametern zu erzeugen. Dieser evolutionären 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.²⁵ 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 wird.

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 zu 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.

25 Die Herausforderung besteht darin, dass EnergyPlus zwar in stündlichen Zeitschritten simuliert, die kleinste Simulationsspanne jedoch 1 Tag (respektive 24 Stunden) ist. Für jeden Tag beginnt EnergyPlus mit fünf warmup-Tage, welche zwar über Honeybee über Komponenten steuerbar ist, jedoch von der Simulation selbst dennoch nicht berücksichtigt wird.

Evolutionärer Algorithmus

Die Systemintelligenz des evolutionären Algorithmus besteht aus dem Komponentencluster OctopusE. Sie basiert auf SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*).²⁶ 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 Parametertausches, 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 Rechenresultate 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)²⁷ 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 Erl²⁸ 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.

26 Der „Strength Pareto Evolutionary Algorithm ist eine relativ neue Technik, welche Annäherungen an ein Pareto-Optimum für Optimierungsprozesse mit mehreren Objectives ermöglicht. Für eine detaillierte Beschreibung des Prozesses wird folgende Arbeit der ETH Zürich empfohlen:

<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:24689/eth-24689-01.pdf>, aufgerufen am 29.03.2016

27 HOY - Hour of the year 1 - 8760

28 Erl - *EnergyPlus runtime language*, eine einfache Programmiersprache, welche den Kontrollalgorithmus von *EnergyPlus* beschreibt.



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 aufgesplittet in Heizenergiebedarf, Kühlenergiebedarf und Energiebedarf für die Beleuchtung werden mit charakteristischen Daten der untersuchten Stunde wie Datum, Uhrzeit, HOY, Temperatur der Zone, Klimadaten in ein Textfeld geschrieben, dass 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 Energiebedarfs wurden für eine aussagekräftige Gegenüberstellung der Resultate folgende Parameterkombinationen ausgewählt:

Tab.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) gegenüber gestellt werden. Die genauen Zeiträume werden aus der stündlichen Wetterdatenstatistik ermittelt.²⁹ 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 eine 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 gegenüber gestellt. 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 Grundbedingungen:

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 unterschieden sich die drei statischen Fassaden hinsichtlich den Transmissionswärmeverlusten 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 künstliche 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.

29 Die *.stat-files werden von folgender Internetadresse bezogen:
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm, aufgerufen am 31.03.2016

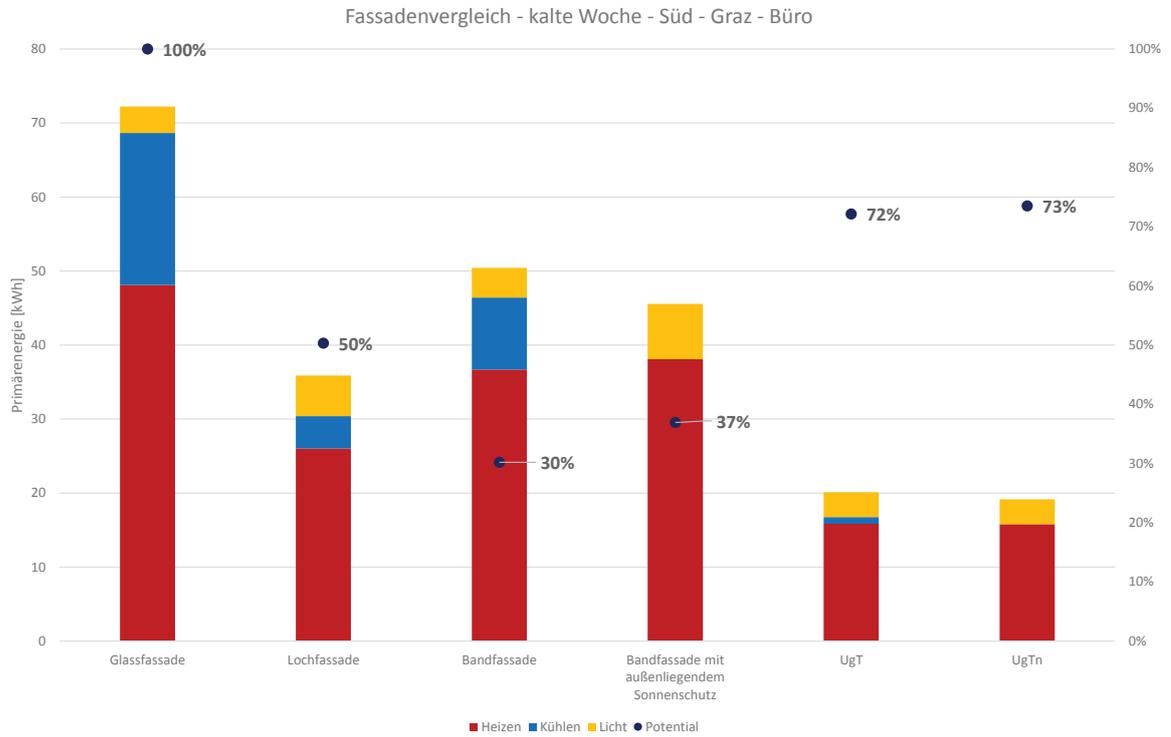


Abb.8. Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - kalte Woche

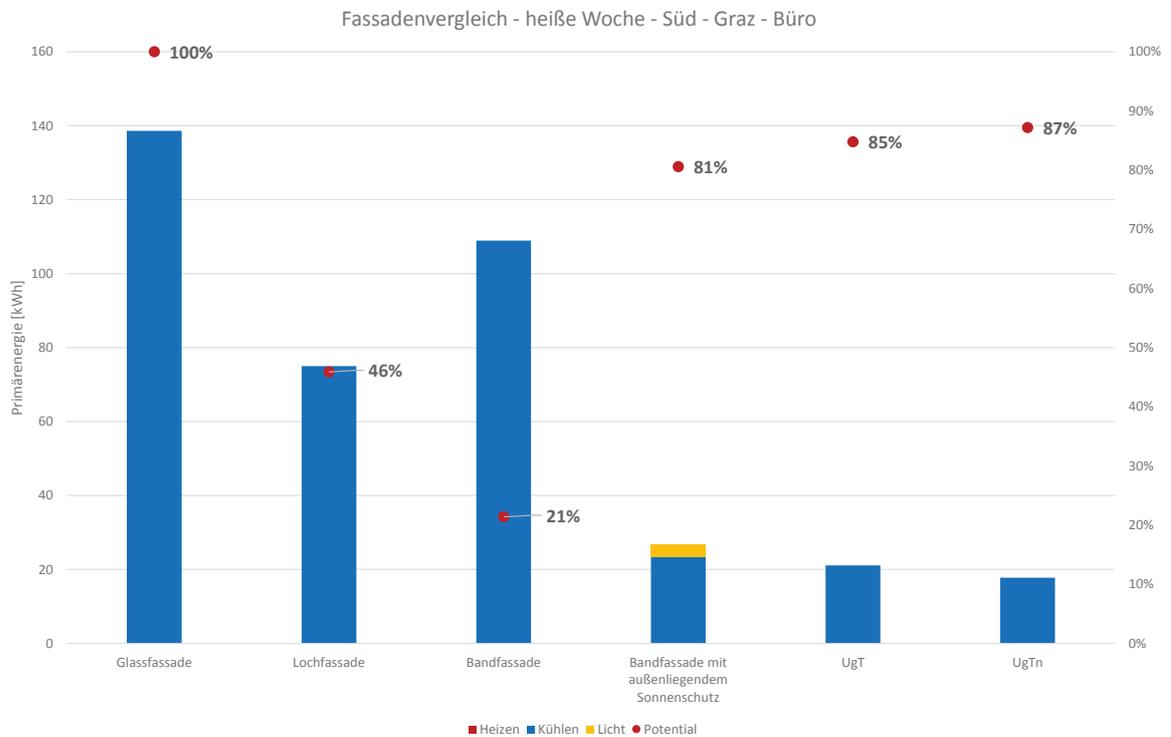


Abb.9. Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - heiße Woche

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) variabler 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 eine 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 Regelungenaugkeiten, einen etwas höheren Wärmebedarfs nach sich.

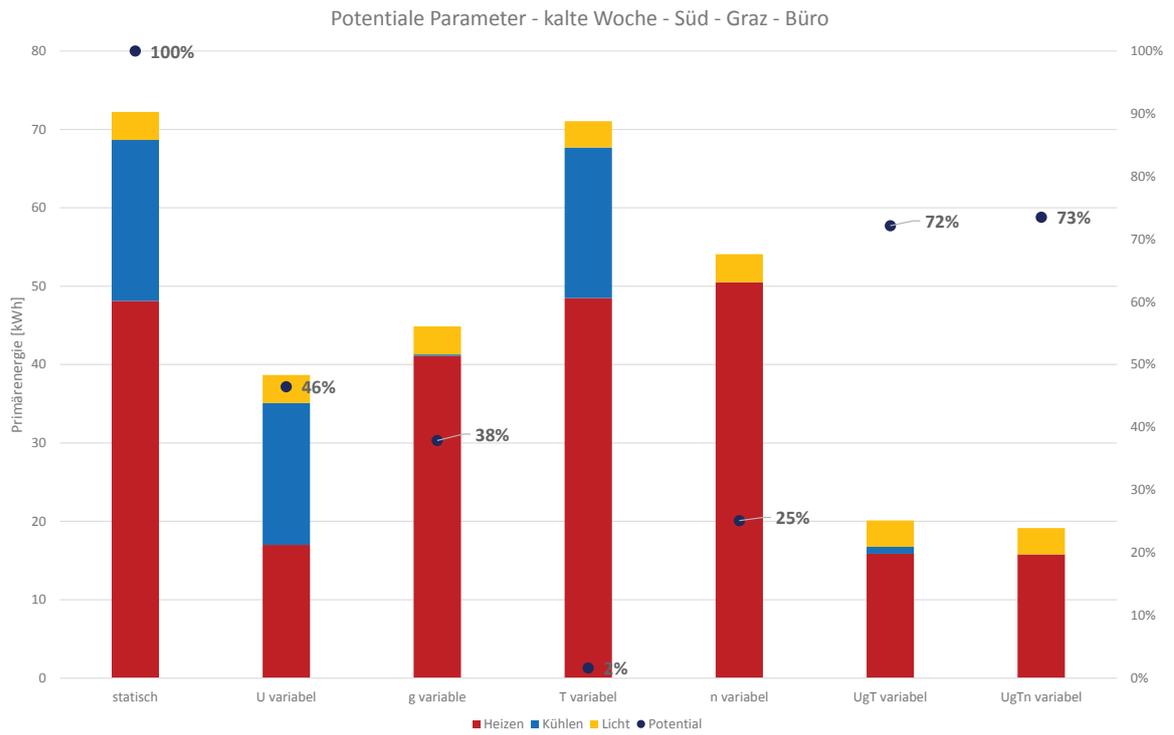


Abb.10. Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - kalte Woche

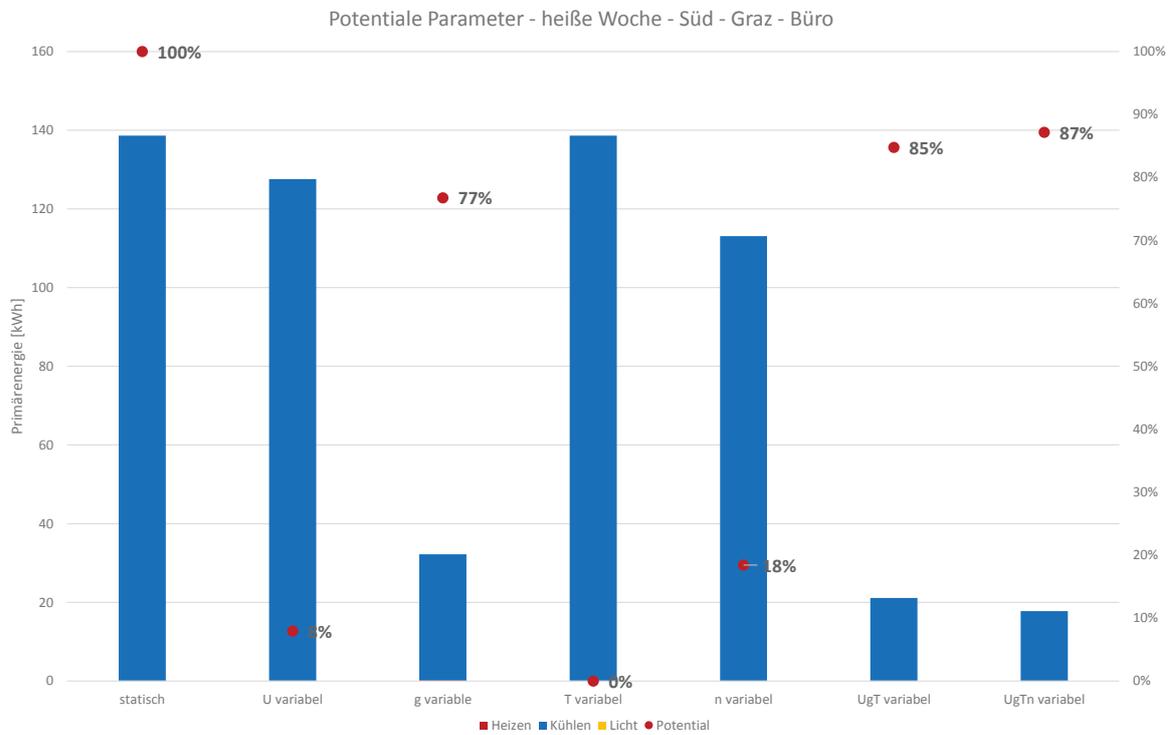


Abb.11. Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - heiße Woche

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.

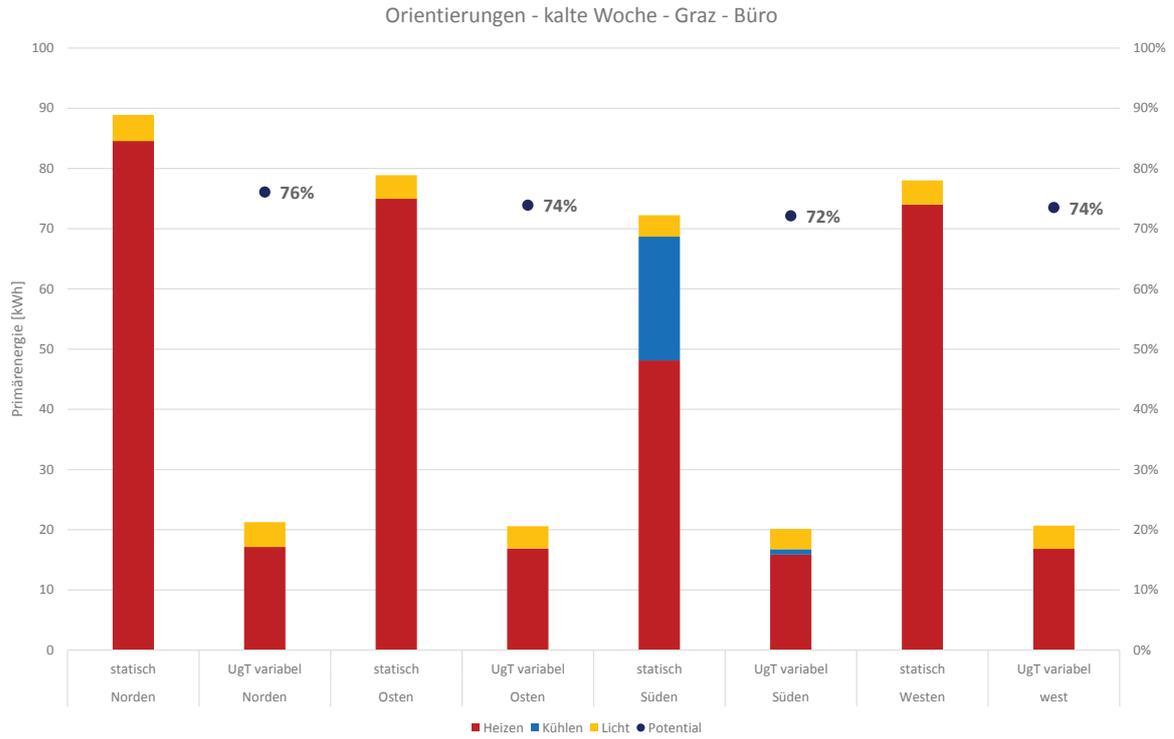


Abb.12. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - kalte Woche

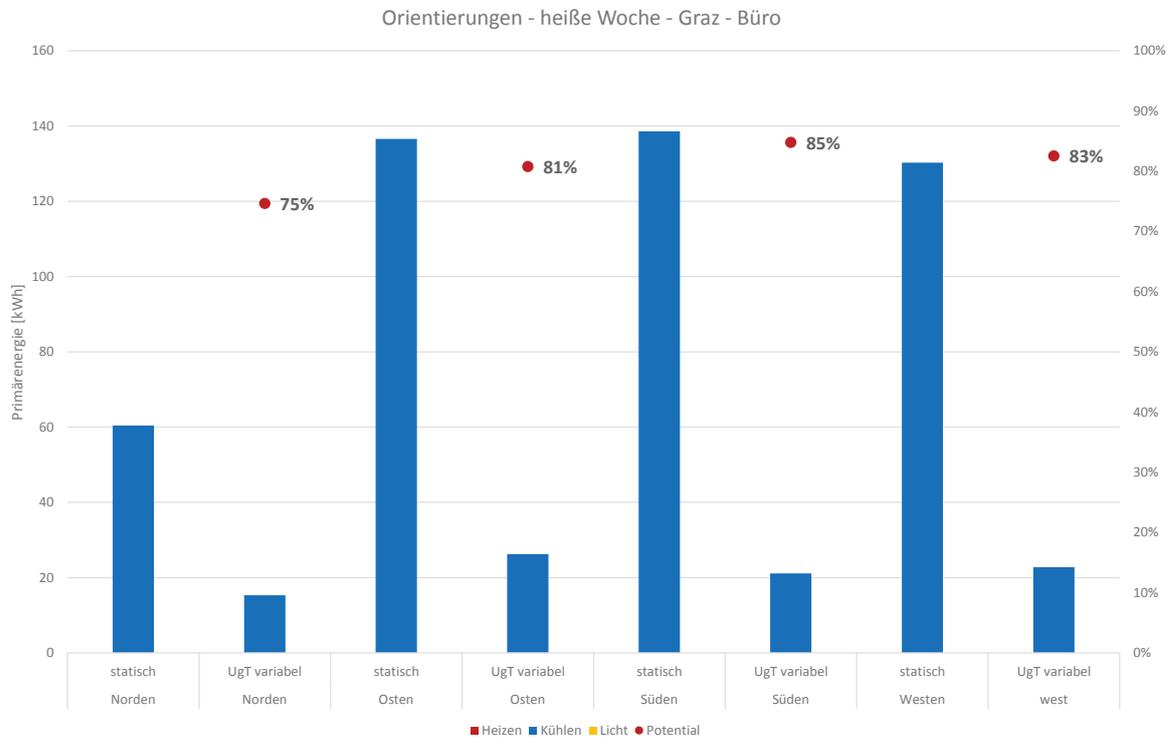


Abb.13. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - heiße Woche

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 Beleuchtung am Abend und in der Nacht. Der nach Norden ausgerichtet Schlafräum hingegen profitieren 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.

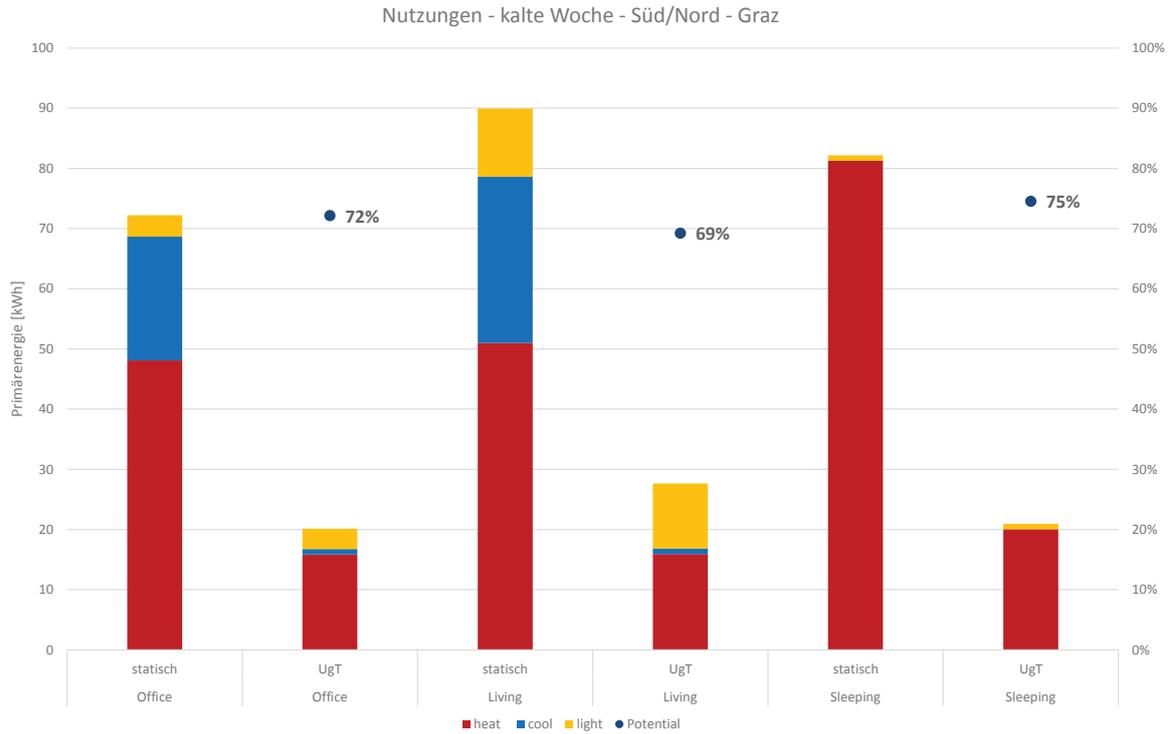


Abb.14. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - kalte Woche

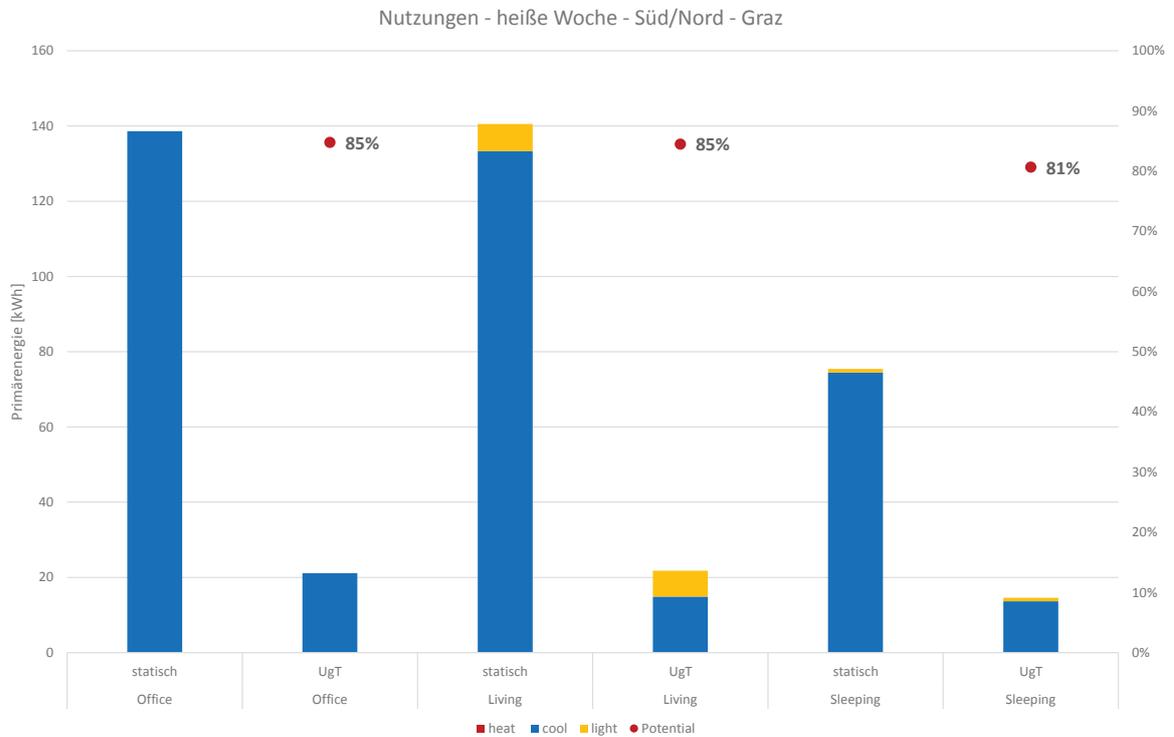


Abb.15. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - heiße Woche

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 Wochen liegen die Potentiale in Graz bei 88%, in Abu Dhabi bei 76%, in Singapor bei 55%, in Moskau bei 88% und in Rom bei 81%.

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

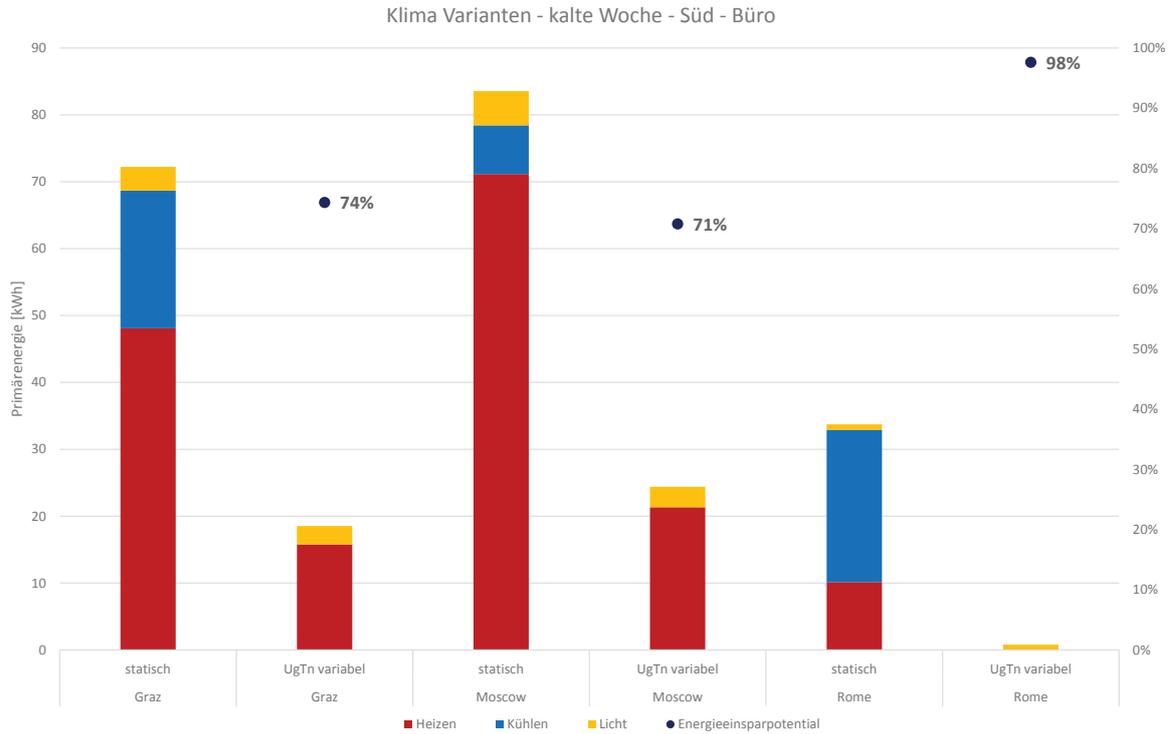


Abb.16. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - kalte Woche

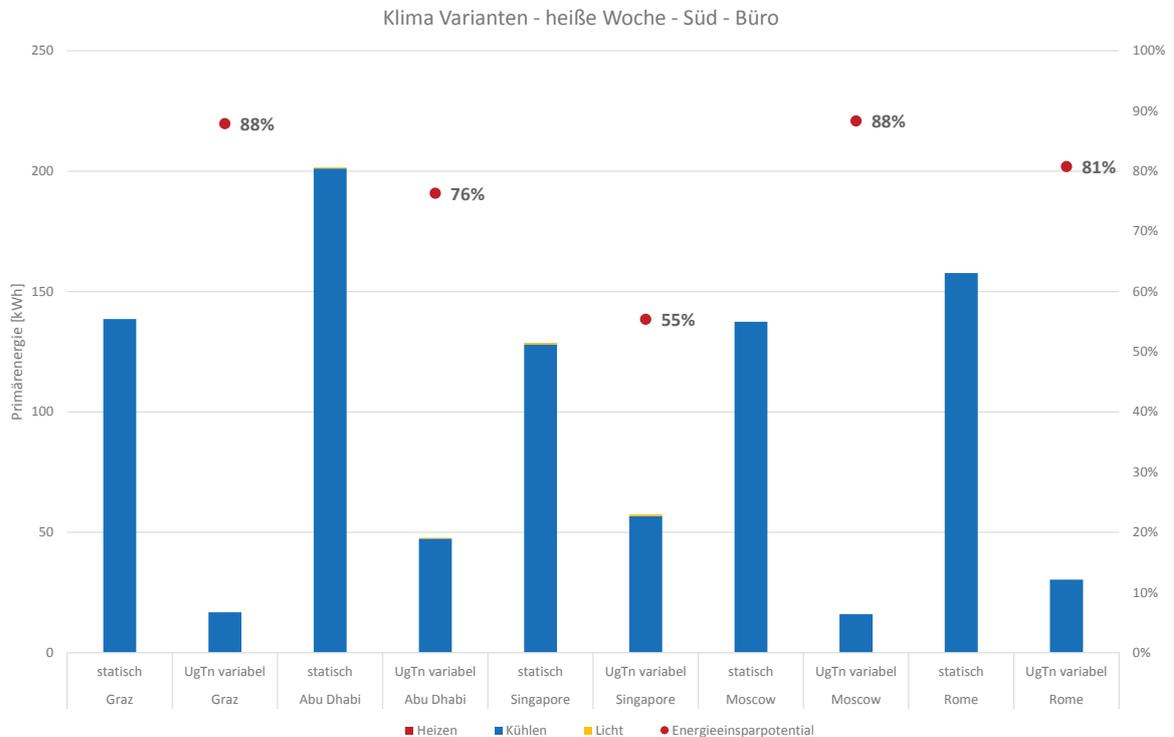


Abb.17. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - heiße Woche

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. Weiter 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 weiters 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 τ , g und U -Wertes versprechen eine erfolgreiche, weiterführende Weiterentwicklung 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.Mag.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 umfassten 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 Fassaden- teilen als „proof of concept“ zu entwickeln.

5. Verzeichnisse

5.1. Abbildungsverzeichnis

Abb.1. Referenzgeometrie der adaptiven Fassade	8
Abb.2. Referenzmodell	13
Abb.3. Fassadenvarianten der Grundlagendefinition	17
Abb.4. Referenzmodell und Lichtsensor	20
Abb.5. Simulationsalgorithmus	21
Abb.6. Grasshopper-Definition	22
Abb.7. Die Preselection weist der Fassade die physikalischen Eigenschaften zu.	23
Abb.8. Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - kalte Woche	29
Abb.9. Energieverbrauch von Fassadensysteme sowie Einsparungspotential der smart façade - heiße Woche	29
Abb.10. Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - kalte Woche	31
Abb.11. Anteil am Energieverbrauch statischer bzw. variabler physikalischer Werte - heiße Woche	31
Abb.12. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - kalte Woche	33
Abb.13. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Orientierungen - heiße Woche	33
Abb.14. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - kalte Woche	35
Abb.15. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Nutzungen - heiße Woche	35
Abb.16. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - kalte Woche	37
Abb.17. Verhältnis des Energieverbrauchs bzw. der Einsparungspotentiale unterschiedlicher Klimazonen - heiße Woche	37
Abb.18. Preselection - Detaillierte Darstellung	44

5.2. Tabellenverzeichnis

Tab.1: Physikalische Größen der Fassade mit Vollverglasung	14
Tab.2: Konstruktionsaufbauten der raumumschließenden Elemente des statischen Referenzmodells	14
Tab.3: Materialbibliothek für die Erstellung der Konstruktionselemente:	15
Tab.4: Dimensionierung und U-Werte der raumumschließenden Elemente	16
Tab.5: Parameter der voruntersuchten Fassadenvarianten V1, V2 und V3	17
Tab.6: Interne Lasten	18
Tab.7: Schedule für Bürobelegung während eines Arbeitstages	18
Tab.8: Schedule für Bürobelegung während der Urlaubszeit	19
Tab.9: Parameterdefinitionen des statischen Simulationsmodells	19
Tab.10: Klassifizierung der Vorauswahl (Preselection)	23
Tab.11: Simulationsvarianten	27



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.

