

Day- and Artificial Light with Energy Calculation

DALEC

Bert Junghans
Zumtobel Lighting

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

23/2018

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>

DALEC

Day- and Artificial Light with Energy Calculation

DI MA Oliver Ebert
DI Bert Junghans
Zumtobel Lighting GmbH

DI Dr. David Geisler-Moroder
Mag. Wilfried Pohl
Bartenbach GmbH

Dr. techn. Matthias Werner
Dr.-Ing. Rainer Pfluger
Universität Innsbruck, Arbeitsbereiche Energieeffizientes Bauen,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Innsbruck, 23.02.2018

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 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

Kurzfassung.....	9
Abstract.....	11
1 Einleitung	13
1.1 Aufgabenstellung.....	13
1.2 Stand der Technik	14
1.3 Verwendete Methoden	18
2 Ergebnisse.....	20
2.1 Gesamtgebäude:.....	20
2.2 Hallenumsetzung.....	28
2.2.1 Tageslicht	28
2.2.2 Kunstlicht	28
2.2.3 Thermische Umsetzung	29
2.3 Behaglichkeitskriterien	29
2.3.1 Thermische Behaglichkeit:	30
2.4 Verbesserte Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten.....	30
2.4.1 Verbauungslinie	30
2.4.2 Primärenergiebedarf.....	31
2.4.3 Variantenvergleich:.....	31
2.4.4 Wirtschaftlichkeit:.....	32
2.4.5 Optimizer	32
2.5 Umsetzung als Forschungswerkzeug und Online-Tool.....	33
2.5.1 Forschungswerkzeug.....	33
2.5.2 Online-Tool	34
3 Schlussfolgerungen	37
4 Ausblick und Empfehlungen.....	38
5 Verzeichnisse	39
5.1 Abbildungsverzeichnis	39
5.2 Tabellenverzeichnis	40
5.3 Literaturverzeichnis	40
6 Anhang	41

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Das Gebäudedesign beeinflusst sehr stark den Energiebedarf eines Gebäudes. Vor allem das Fassadensystem bestimmt den Tageslichteintrag aber auch den solaren Eintrag in ein Gebäude, welcher im Winter den Heizbedarf reduzieren, im Sommer aber auch zu Überhitzung führen kann.

Abhängig vom Tageslicht im Innenraum muss Kunstlicht zugeschaltet werden. Der notwendige Kunstlichtbedarf erzeugt zum einen Strombedarf und zum anderen eine interne Last, die bei Überhitzungsphasen zusätzlich herausgekühlt werden muss. Somit kann eine realitätsnahe Beurteilung von Fassaden- und Kunstlichtsystemen nur mit einer gekoppelten Licht- und thermischen Simulation erfolgen.

Zudem muss der Komfort der Gebäudenutzer bereits in der frühen Planungsphase berücksichtigt und mit in das Gebäudedesign eingebunden werden. So wirken sich Blendschutzmaßnahmen direkt auf das thermische Verhalten und somit auf den Energiebedarf eines Gebäudes aus. Eine solche gesamtheitliche Betrachtung und Gebäudeanalyse war mit am Markt befindlichen Tools vor dem DALEC-Projekt nicht möglich.

Inhalte und Zielsetzungen

Im Vorgängerprojekt K-Licht konnte von den Antragstellern erstmals ein Software-Prototyp entwickelt werden, der die genannten Wechselwirkungen zeigt und bewertet. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und diesem Prototyp wurde ein Online-Tool geschaffen, das praxistauglich, sehr leicht zu bedienen ist und mit schnellen Berechnungszeiten eine energieeffiziente Entwurfsplanung ermöglicht.

Methodische Vorgehensweise

Folgende Projektschritte wurden umgesetzt:

- **Verbesserung der Methodik und Praxistauglichkeit**
Die bestehende raumweise Methodik des Tools wurde auf gesamte Gebäude erweitert, auch die Abbildung von Hallen (Industrie-, Sporthallen, etc.) und Räumen mit Oberlichtern wurde dadurch möglich.
Durch die Erweiterung der Importschnittstellen wird den Tool-NutzerInnen ermöglicht eigene Fassaden-, und Kunstlichtsysteme in das Tool zu laden und zu bewerten.
- **Definition von Komfortkriterien**
Mittels eines neuentwickelten Bewertungssystems werden lichttechnische und thermische Komfortkriterien untersucht und analysiert. Damit können komfortkritische Gebäudedesignvarianten bereits in der Konzeptphase ausgeschlossen werden.
- **Verbesserung der Auswertemöglichkeit**
Mittels eines Variantenvergleiches kann schnell und einfach das bestmögliche Gebäudedesign für den vorliegen Standort bestimmt werden.
- **Tool-Evaluierung und User-Interface Optimierung**

Das entwickelte Tool wurde mit wissenschaftlichen Simulationsmethoden verglichen (Evaluierung), Rückmeldungen von Tool-NutzerInnen flossen in die weitere Entwicklung ein.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Durch die Umsetzung der genannten Projektschritte entstand ein Gebäudeanalyse-Tool mit Alleinstellungsmerkmalen, welches die Entwurfsplanung für Neubau und Sanierung von Gebäuden in Zukunft bereits in der frühen Konzeptphase mit hoher Genauigkeit ermöglicht.

Weil kein spezifisches Simulations-Know-how für die Nutzung von DALEC erforderlich ist, sind sowohl ArchitektInnen, BauphysikerInnen, LichtplanerInnen und Bauherren Zielgruppe des Tools.

In DALEC werden die komplexen und miteinander verschränkten lichttechnischen und thermischen Vorgänge in einem Gebäude berücksichtigt und die Ergebnisse anschaulich und schnell präsentiert. Dadurch können die Antragsteller ihre Vorreiterrolle im Markt und im wissenschaftlichen Umfeld jetzt und auch in Zukunft stärken und ausbauen.

Ausblick

Durch das Commitment der Projektpartner zur weiteren Zusammenarbeit wird der Fortbestand und die Pflege des Tools auch über den Förderzeitraum hinaus gesichert. Dazu zählt auch die Bearbeitung von Nutzerfeedback und ggf. geringfügige Adaptionen am Onlinetool. Die Projektergebnisse motivierten das Konsortium zur Beantragung eines Nachfolgeprojektes. Basierend auf den Erkenntnissen, die bei der Erarbeitung und der Durchführung der gekoppelten lichttechnischen und thermischen Simulation in DALEC entstanden sind, soll im beantragten Projekt BIM2Light die Definition relevanter BIM Merkmale für Tages- und Kunstlichtsysteme erfolgen. Dies ist ein wichtiger Beitrag sowohl für die Tages- als auch für die Kunstlichtbranche, da solche Merkmale bisher noch nicht standardisiert wurden, was die sinnvolle Abbildung spezieller Lichtlösungen in BIM-Prozessen bislang verunmöglicht. Im Zuge von BIM2Light soll auch der DALEC-Prototyp und das Onlinetool weiter entwickelt werden um den Import von Nutzerprojekten welche als BIM-Modell vorliegen via IFC-Schnittstelle zu ermöglichen. Das Langzeitziel ist es alle für DALEC relevanten Parameter, wie Raumgeometrie, Wand- und Fensteraufbauten, Oberflächenreflektionsgrade sowie Kunst- und Tageslichtsystemspezifikationen direkt aus der IFC-Datei einlesen zu können, sodass die Berechnung ohne manuelle Eingabe erfolgen kann. Dadurch soll die integrale Tages- und Kunstlichtsimulation ohne nennenswerten Aufwand bereits in der frühen Planungsphase einsetzbar werden, womit eine Optimierung des Gesamtenergiebedarfes des geplanten Objektes durch den direkten Vergleich verschiedener Varianten sehr einfach ermöglicht wird.

Abstract

Starting point/Motivation

The building design has a large influence on the energy requirement of a building. Above all, the façade system determines the daylight entry but also the solar input into a building, which can reduce the heating demand in winter, but can also cause overheating issues in summer.

The artificial lighting demand is determined from the amount of useful daylight in the interior. The need for artificial lighting generates not only an electrical energy demand but also an internal thermal load, which increases the cooling energy demand during overheating periods. Thus, a realistic assessment of facade and artificial lighting systems is only feasible with a coupled light and thermal simulation.

In addition, comfort aspects for the building users must also be taken into account already in the early planning phase, to influence the building design process. Anti-glare measures have a direct effect on the thermal behavior and thus on the energy requirements of a building. Such a holistic view and building analysis was not possible with tools available on the market prior to the DALEC project.

Contents and Objectives

In the predecessor K-Licht project, the consortium for the first time developed a software prototype, which shows and evaluates the mentioned interactions. Based on this knowledge and this prototype, an online tool has been created that is practical, very easy to use, and that enables energy-efficient design planning with fast calculation times.

Methods

The following project steps were implemented:

- **Improvement of methodology and practicality**

The existing room-by-room methodology of the tool has been extended to the entire building, thus also the depiction of halls (industrial halls, sports halls, etc.) and rooms with skylights has become possible.

By expanding the import interfaces, tool users will be able to load and rate their own facade and artificial light systems in the tool.

- **Definition of comfort criteria**

Using a newly developed rating system, photometric and thermal comfort criteria are examined and analyzed. In that way, planners get the ability to exclude comfort-critical building design variants already in the concept phase.

- **Improvement of the evaluation possibility**

By means of a comparison of variants, the best possible building design for the present location can be determined quickly and easily.

- **Tool evaluation and user interface optimization**

The developed tool was compared with scientific simulation methods (evaluation) and feedback from tool users affected the further development.

Results

The implementation of the above-mentioned project steps resulted in a building analysis tool with unique selling points, which enables the design planning for new construction and renovation of buildings in the future with high accuracy in the early concept phase.

Because no specific simulation knowledge is required for the use of DALEC, architects, building physicists, lighting planners and builders are the target group of the tool.

DALEC takes the complex, and interconnected photometric and thermal processes in buildings into account and presents the results clearly and quickly. This will enable applicants to strengthen and expand their pioneering role in the marketplace and in the scientific environment, now and in the future.

Prospects/ Suggestions for future research

The commitment of the project partners to further cooperation ensures the continued existence and maintenance of the online tool even beyond the funding period. This also includes the processing of user feedback and possibly minor adaptations to the tool. The project results motivated the consortium to apply for a follow-up project. Based on the knowledge gained during the development and implementation of the coupled photometric and thermal simulation in DALEC, the proposed BIM2Light project aims to define relevant BIM characteristics for daylight and artificial light systems. This is an important contribution to both the daylight and the artificial lighting industry as such features have not yet been standardized, which has hitherto made it impossible to adequately map specific lighting solutions in BIM processes. In the course of BIM2Light, the DALEC prototype and the online tool will be further developed to enable the import of user projects which are available as a BIM model via the IFC interface. The long term goal is the realization of reading in all relevant parameters for DALEC, such as room geometry, wall and window structures, surface reflectance as well as artificial and daylight system specifications directly from the IFC file to enable the calculation without any manual input. As a result, the integral daylight and artificial light simulation should be usable without considerable effort already in the early planning phase, whereby an optimization of the total energy demand of the planned object will be realizable easily by the direct comparison of different variants.

1 Einleitung

Bereits im Entwurf wird das thermische Verhalten des Gebäudes festgelegt. Vor allem die Fassadengestaltung beeinflusst sehr stark den Energiebedarf des Gebäudes. Der Anteil der transparenten Fassadenfläche zum Beispiel entscheidet maßgeblich über den solaren Eintrag und kann so bei zu großen Flächen zur Überhitzung im Sommer bzw. zu erhöhten Transmissionswärmeverlusten im Winter führen. Ebenso beeinflusst die Fensterfläche den Tageslichteintrag und somit den Kunstlichtbedarf, der wiederum eine interne Last darstellt und bei Überhitzungsphasen zusätzlich herausgekühlt werden muss.

Die hier beschriebene Wechselwirkung aus solaren Einträgen, Tageslichteintrag Kunstlichtbedarf, thermischen Transmissionsverlusten usw. in Zusammenhang mit dem vorliegenden klimatischen Standort ist nur sehr schwer zu überblicken und zu beurteilen.

Eine energieeffiziente Gebäudeplanung beginnt aber, wie schon oben bereits erwähnt, in der frühen Planungsphase. Schnell veränderte und gewechselte Fassadeneigenschaften und Randbedingungen bestimmen den Entwurfsprozess. Aussagen auf den Energiebedarf unter den neuen Randbedingungen sind aufgrund der beschriebenen Komplexität aus dem Stegreif nicht möglich und können, wenn nur mit simulationsgestützten Hilfsmittel getroffen werden.

Aufgrund von Blendung, Komfort und Überhitzungsgründen muss zusätzlich ein Blendschutz- bzw. Sonnenschutzsystem berücksichtigt werden.

Trotz Schwierigkeiten den breiten Markt zu erschließen, befinden sich komplexe Fassadensysteme auf dem Markt, welche die zum Teil widersprüchlichen Anforderungen einer Fassade bestmöglich zu lösen versuchen. Zur gezielten Tageslichtversorgung großer Raumtiefen werden z.B. hochverspiegelte Lichtlenklamellen zur Lichtumlenkung an die Decke eingesetzt.

Sowohl komplexe Fassadensysteme als auch einfache Verschattungssysteme greifen zum einen in das thermische Verhalten und zum anderen in die Tageslichtversorgung des Gebäudes ein.

1.1 Aufgabenstellung

In der Simulation während des Gebäudeentwurfs wird das Verhalten der GebäudenutzerInnen zumeist nicht, oder wenn nur sehr vereinfacht berücksichtigt. Auch bei automatischen Systemen greifen – speziell beim Blendschutz – die NutzerInnen des Gebäudes häufig manuell ein. Aufgrund von Blendung wird die Fassade geschlossen und der solare Eintrag dadurch stark verändert. Dies führt im Winter zu reduzierten solaren Einträgen und somit zu einem erhöhten Heizwärmebedarf. Ebenso kann aufgrund der verschatteten Fassade der Tageslichteintrag so stark reduziert sein, dass Kunstlicht eingeschaltet werden muss. Dies erzeugt zum einen zusätzlichen Strombedarf zum

Betreiben dieser Leuchte und zum anderen eine weitere interne Last, welche den Kühlbedarf im Sommer zusätzlich erhöht. Um ein realistisches Bild des Gebäudes zu erhalten, muss deshalb bereits in der Planungsphase der Nutzereinfluss berücksichtigt werden. Dies bezieht sich zum einen auf die Verwendung des Abschattungssystems (Verhalten bei Blendung, etc.) und zum anderen auf das Einschaltverhalten des Kunstlichtes. Neben einer manuellen Bedienung des Kunstlichtes sollte auch das Potential einer tageslichtabhängigen, dimmbaren Kunstlichtlösung überprüft werden. Die jeweiligen Zustände von Tageslichteintrag und Blendung im Simulationszeitschritt können aber nur durch eine komplexe Lichtsimulation (z.B. mit Radiance) detektiert werden. Um zeitgleich auftretende Auswirkungen auf das thermische Verhalten entsprechend abbilden zu können, ist eine gekoppelte Bewertung der thermischen und lichttechnischen Situation unerlässlich, um die Wechselwirkung aus solarem Eintrag, Tageslicht, Kunstlicht und Blendung realitätsnah abbilden zu können. Damit diese komplexen Zusammenhänge bereits in der frühen Planungsphase berücksichtigt werden, muss ein Konzeptanalysetool dennoch eine einfache Handhabung und eine Oberfläche mit geringem Eingabeaufwand besitzen.

1.2 Stand der Technik

Auf Basis einer Literatur- und Softwarerecherche konnte gezeigt werden (Werner 2017), dass bislang kein mit DALEC vergleichbares Tool verfügbar ist, das mit geringem und einfachem Eingabeaufwand in Sekundenschnelle Aussagen über ein Gebäudedesign ermöglicht und dabei komplexe Tageslichtsysteme, verschiedene Kunstlichtlösungen, komplexe Steuerungen und last but not least den thermischen und visuellen Benutzerkomfort berücksichtigt. Zusätzlich ist kein einfaches Bewertungstool bekannt, in dem das Kunstlicht mit seiner realen Verteilung berücksichtigt wird. Hier werden – wenn überhaupt – immer nur vereinfachend Anschlussleistungen angenommen. Tabelle 1 stellt verfügbare Software im direkten Vergleich gegenüber, die eine gekoppelte lichttechnische und thermische Simulation im Prinzip zulassen.

	Berechnung des Energiebedarfs (Heizung, Kühlung)	komplexe Tageslichtsysteme (z.B. verspiegelte Lamellen)	Im Zeitschritt gekoppelte Simulation	Blendungsbewertung	Nutzerfreundlichkeit	Betrachtung eines Gesamtgebäudes	Thermische und visuelle Komfortauswertung	Eingabeaufwand
EnergyPlus + Openstudio	x	x	-	x	-	x	-	groß
Comfen	x	-	-	-	x	x	-	mittel
iDbuild	x	-	-	-	x	-	-	mittel

	Berechnung des Energiebedarfs (Heizung, Kühlung)	komplexe Tageslichtsysteme (z.B. verspiegelte Lamellen)	Im Zeitschritt gekoppelte Simulation	Blendungsbewertung	Nutzerfreundlichkeit	Betrachtung eines Gesamtgebäudes	Thermische und visuelle Komfortauswertung	Eingabeaufwand
Sefaira	x	-	-	-	x	x	-	groß
Light & Energy Tool	x	-	-	-	x	-	-	mittel
MIT Design Advisor	x	-	-	-	x	x	-	gering
Archiwizard	x	-	-	-	x	x	-	groß
ecotect	x	-	-	-	x	x	-	groß
DALEC Prototyp	x	x	x	x (Energieerzeugung geplant)	x (Verbesserung geplant)	- (geplant)	- (geplant)	gering

Tabelle 1: Features existierender Simulationstools, Ausgangssituation vor Projektbeginn

Das im Rahmen des K-Licht Forschungsprojektes von den Antragstellern entwickelte Konzeptanalysetool DALEC V0 bietet die vollständige Abbildung der Schnittstelle der thermischen und lichttechnischen Simulation bei Berücksichtigung verschiedenster Fassadensysteme an. Aufgrund aufwändig vorsimulierter Tageslichtfaktoren können sowohl einfache Verschattungssysteme wie Screens und außenliegende Raffstores als auch die Vorteile von komplexen Lichtlenksystemen wie verspiegelte Lamellen dargestellt werden. Ebenso können durch die Lichtsimulation auch Blendungszustände detektiert werden, die auf die Fassadensteuerung (z.B. Lamellen werden geschlossen) Auswirkung haben. So lassen sich für typische Raumgeometrien der Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarf mit allen beschriebenen Wechselwirkungen bestimmen. Bezüglich der Klimadaten werden über 3000 weltweit verteilte Standorte angeboten.

Trotz komplexer Berechnungsalgorithmen im Hintergrund konnte die komplette Durchführung der Anwendung als Website (Online-Tool) umgesetzt werden. Dies hat folgende Vorteile:

- Sehr kurze Berechnungszeiten
- Kein Simulations-Know-how notwendig
- Keine Installation notwendig
- Einfaches „Handling“
- Schnelle & weite Verbreitung der jeweils aktuellsten Version

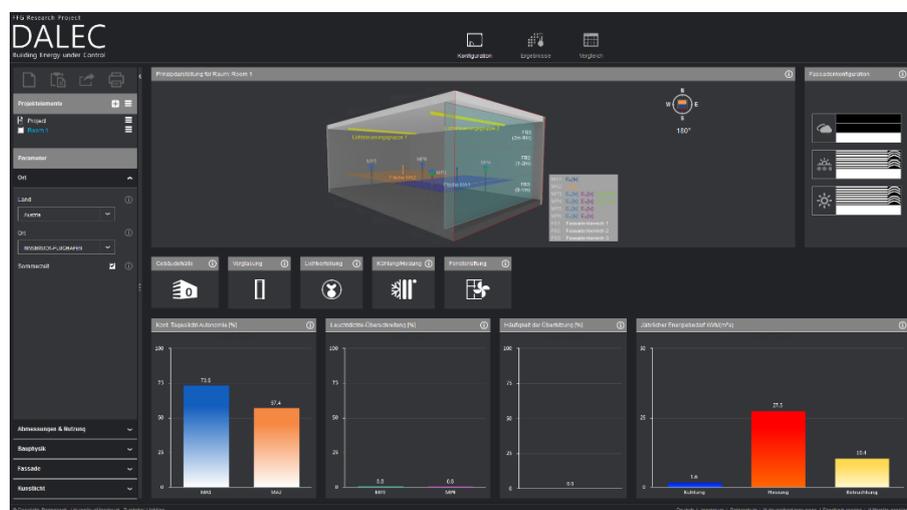
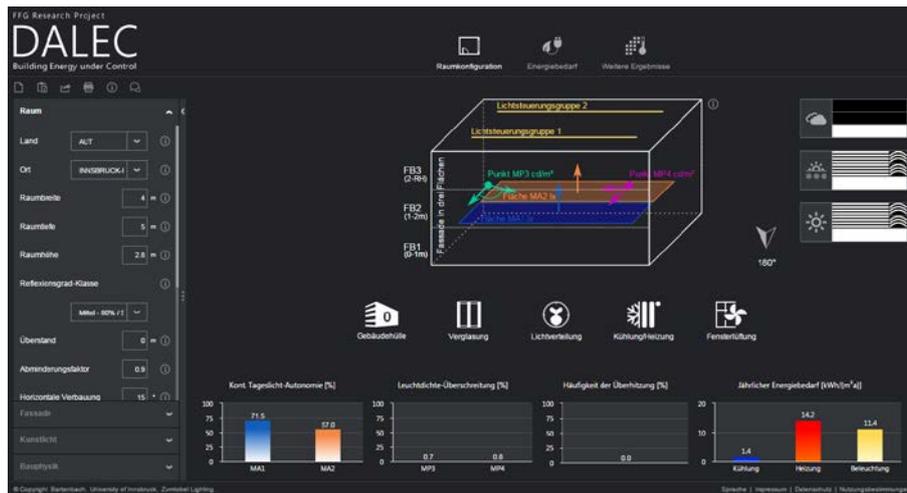


Abbildung 1: User Interface des Erstentwurfs von DALEC V1 oben und DALEC V1.5 unten (www.dalec.net)

Eine solche gekoppelte lichttechnische und thermische Simulation war bis jetzt nur schwer oder sehr aufwändig realisierbar und wurde bislang aufgrund des Aufwandes in der frühen Planungsphase nicht oder nur selten durchgeführt.

Um die Wechselwirkung aus solarem Eintrag, Tageslicht und Kunstlichtbedarf bei Berücksichtigung eines Nutzerverhaltens richtig abbilden zu können, wurde das Tool in mehrere Module unterteilt. Der prinzipielle Programmablauf ist in Abbildung 2 dargestellt.

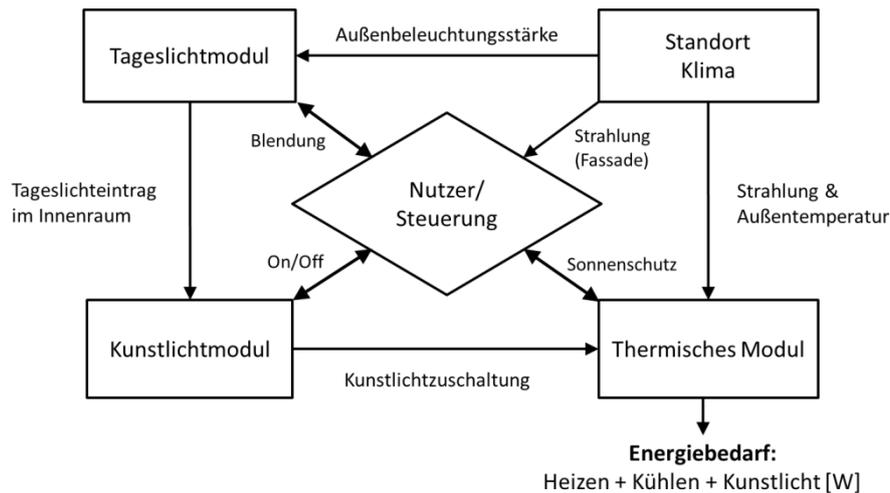


Abbildung 2: Programmablauf und Module

Auf Basis von stündlichen Wetterdaten kann das Klima für Standorte in der Datenbank festgelegt werden. Mittels eines Tageslichtmoduls wird abhängig von verschiedenen Einflussgrößen (z.B. Raumgeometrie, Fensterflächenanteil, Fassadensystem, Überstand, etc.) der Tageslichteintrag im Innenraum aus vorberechneten Tageslichtfaktoren bestimmt. Die zur Auswahl stehenden Fassadensysteme wurden dabei über sogenannte BSDFs (bidirectional scattering distribution functions [Nicodemus, 1977]), eine Art "Licht-Übertragungsfunktion", berücksichtigt. DALEC V0 ließ aber keine Eingabe userspezifischer Systeme zu.

Im Bereich des Kunstlichtes stehen dem Toolnutzer direkt und indirekt strahlende Leuchtentypen zur Verfügung. Ebenfalls kann durch Anschlussleistung und Lichtstrom der Systeme die Effizienz festgelegt werden. Die Eingabe benutzerspezifischer Leuchten, insbesondere der Lichtverteilungen (LVKs) ist jedoch mit DALEC V0 nicht möglich. Basierend auf vorberechneten Kunstlichtfaktoren wird abhängig vom Tageslichteintrag und der gewählten Kunstlichtlösung der Bedarf der Kunstlichtzuschaltung berechnet, der wiederum Input für die thermische Simulation ist. Darüber hinaus erhält das thermische Modul die notwendigen Klimadaten aus dem Wetter-File. Mittels eines dynamischen Gebäudemodells (basierend auf der EN13790) wird dann der Heiz- und Kühlbedarf ermittelt.

Ein Steuerungsmodul bildet das Verhalten des Raumnutzers bzw. einer Fassadensteuerung ab. Es wird in jedem Zeitschritt überprüft ob eine Leuchtdichteüberschreitung an der Innenseite der Fassade vorliegt und fallweise eine verschattete Fassadenkonfiguration gewählt. In ähnlicher Weise kann für die Sommermonate ein Grenzwert für Strahlung an der Außenfassade definiert werden. In beiden Fällen resultieren verminderte solare Einträge und ein geringerer Tageslichteintrag was sich in weiterer Folge auf den Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarf auswirkt.

Die Antragsteller entwickelten, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, von Grund auf einen neuen Berechnungsalgorithmus, bestehend aus mehreren Modulen. Im Rahmen des Vorgängerprojektes konnte ein funktionstüchtiger Software-Prototyp in Form eines Excel-Programmes vorgestellt werden. Da man dabei schnell an die Grenzen der

Leistungsfähigkeit eines Tabellenkalkulationstools kam, wurde der Prototyp als Web-Anwendung umgesetzt und kann seit 01.12.2014 von der Allgemeinheit frei genutzt werden (www.dalec.net).

Diese Methodik konnte im Rahmen des vorherigen Projektes nur für eine raumweise Betrachtung umgesetzt werden. Ein Gebäude besitzt mehrere Fassaden mit unterschiedlich orientierten Außenflächen und somit im gleichen Zeitpunkt auch unterschiedliche solare Einträge und Tageslichtversorgung. Nur eine Gesamtbetrachtung des kompletten Gebäudes ermöglicht die vollständige Berechnung der Energiebilanz und damit des Gebäudeenergiebedarfs. Diese Weiterentwicklung stellte somit die primäre Entwicklungstätigkeit in diesem Forschungsprojekt dar.

Ebenso war es mit DALEC V0 nicht möglich Oberlichter darzustellen, um auch Industriehallen, Sporthallen, Supermärkte, etc. abbilden zu können. Die Entwicklung um auch Hallen ganzheitlich thermisch und lichttechnisch bewerten zu können, war folglich ebenfalls Gegenstand dieses Forschungsprojektes.

In der Prototypen-Version kann der Benutzer Leuchteigenschaften lediglich über die Auswahl von drei bzw. zwei Lichtverteilungen für den Direkt- bzw. Indirektanteil definieren. Ziel war es dem Benutzer eine Schnittstelle zu bieten um beliebige Lichtverteilungscharakteristiken zu laden und in der Berechnung zu verwenden.

Des Weiteren besteht die Gefahr, dass Räume, welche hinsichtlich der Fassaden- und auch Kunstlichtsysteme ausschließlich energetisch optimiert werden, bezüglich der Komfortparameter nicht optimal abschneiden. Eine Umsetzung, die eine Beurteilung hinsichtlich Komfortkriterien (vertikale Beleuchtungsstärken durch Kunst- und Tageslicht, thermische Behaglichkeit, ...) erlaubt, war ebenfalls Forschungsziel dieses Forschungsprojektes.

Mittels der entwickelten Methode aus dem vorherigen Projekt konnte mit geringem Eingabeaufwand schnell eine Untersuchungsvariante generiert und analysiert werden. Jedoch fehlte die Möglichkeit mehrere Varianten im direkten Vergleich gegenüberzustellen.

1.3 Verwendete Methoden

Die lichttechnischen und thermischen Ergebnisse von DALEC sind das Resultat einer gekoppelten Jahressimulation. Dabei werden in jedem Zeitschritt die Blendsituation, der Tageslichteintrag, der Kunstlicht-, Heizwärme- und Kühlbedarf, die Notwendigkeit der Aktivierung des Blendschutzes bzw. des Sonnen-/Blendschutzes, sowie thermische und lichttechnische Behaglichkeitskriterien ermittelt. Die Erarbeitung der dazu notwendigen Methoden sowie deren Umsetzung im Prototypen und im Onlinetool sind zentrale Ergebnisse des Projektes DALEC. Deshalb ist die Beschreibung der verwendeten Methoden untrennbar von der Beschreibung der Ergebnisse in Kapitel 2. Es wird an dieser Stelle auf die Beschreibung der umgesetzten Methoden zur Tageslichtberechnung auf die Kapitel 2.1.1 und 2.2.1 (Dreiphasenmethode), zur Kunstlichtberechnung auf die Kapitel 2.1.2 und 2.2.2

(forward ray tracing, LVK), zur thermischen Berechnung auf die Kapitel 2.1.3 und 2.2.3 (nach der Norm EN13790) sowie zur Ermittlung der Behaglichkeitskriterien auf das Kapitel 2.3 (nach Fanger) verwiesen.

2 Ergebnisse

Basierend auf den beschriebenen Stand wurde im Rahmen des Projektes „DALEC“ folgende primären Weiterentwicklungen umgesetzt:

- Berechnung von Gesamtgebäuden mit unterschiedlichen Raumtypen
- Lichttechnische und thermische Bewertung von Hallen
- Einführung von Behaglichkeitskriterien
- Verbesserte Auswertemöglichkeiten
- Entwicklung eines Forschungs- bzw. Dokumentationswerkzeug
- Online Tool für weltweite Planungsgemeinde

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Weiterentwicklungen im Detail erläutert und die Projektergebnisse dargestellt.

2.1 Gesamtgebäude

Um ein Gesamtgebäude lichttechnisch und thermisch abbilden zu können müssen unterschiedliche Raumgeometrietypen berücksichtigt werden. Neben dem einseitig befensterten Raum werden hierzu auch, wie bereits erwähnt, Eckräume benötigt, die unterschiedliche orientierte Fenster- und Transmissionsflächen besitzen. Des Weiteren liegen bei einem Gebäude auch Räume vor, die an eine Dachfläche bzw. an ein Erdreich grenzen. Die Umsetzung dieser unterschiedlichen Raumtypen und das Abbilden des Gesamtgebäudes werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

2.1.1 Tageslicht

Die (tages-)lichttechnische Simulation erfolgt auf Raumebene, dennoch mussten die entsprechenden Randbedingungen geschaffen werden um die Ergebnisse für Gesamtgebäude zu bestimmen. Dazu wurden der Simulationsumfang und die zugrundeliegende Datenbank für Räume mit bis zu dreiteiligen Fassaden im Zuge des Projekts deutlich erweitert. Im Speziellen wurden weitere Raumgeometrien ergänzt um einen größeren Umfang abbildbarer Räume zu gewährleisten und um eine Überlagerung für die Berechnung von Eckräumen zu ermöglichen.

In der Prototypen-Version 1.0 konnte der Benutzer aus vordefinierten, weit verbreiteten Standardsystemen für den Fassadenbehang wählen. Neben diesen hinterlegten Daten wurde nun Fassadendesign volle Flexibilität ermöglicht, indem zusätzlich auch der Import von user-spezifischen Tageslichtsystemen ermöglicht wurden. Dazu wurde der Berechnungsalgorithmus für den Tageslichteintrag von einem reinen Tageslicht-Faktorenansatz (Verhältnis Beleuchtungsstärke innen zu Beleuchtungsstärke außen) auf die erweiterte, sogenannte 3-Phasen-Methode angepasst. Dabei wird der Lichttransport in drei Schritte unterteilt: (1) vom Himmel auf die Fassade, (2) durch das Fassadensystem hindurch und (3) von der Fassade auf die Messfläche im Innenraum. Dadurch verlagert sich die

Berechnung der Tageslichtfaktoren von der Vorberechnung hin zur Berechnung während der Ausführung im Tool, wobei gewährleistet wurde, dass die erweiterten Algorithmen dennoch eine schnelle, für den User tragbare Berechnungszeit ermöglichen. Im Hintergrund mussten die Datenbankstruktur für die hinterlegten Tageslichtfaktoren angepasst werden. Anstatt einzelner Faktoren mussten nun die Daten für Schritt 1 (Himmel - Fassade) und 3 (Fassade - Raum) simulationstechnisch erstellt und in einer entsprechenden Datenbankstruktur abgespeichert werden. In der Berechnung selbst werden diese Daten dann mit den Systemdaten für das vom User bereitgestellte oder hinterlegte Verschattungs- bzw. Tageslichtlenksystem in Form von BSDFs (Schritt 2) kombiniert. Diese erweiterte Berechnungsmethodik wurde zunächst in der Spezifikationsumgebung in Matlab realisiert wo bereits die volle Funktionalität gegeben ist. Im Online-Tool wird diese Erweiterung im nächsten Schritt implementiert.

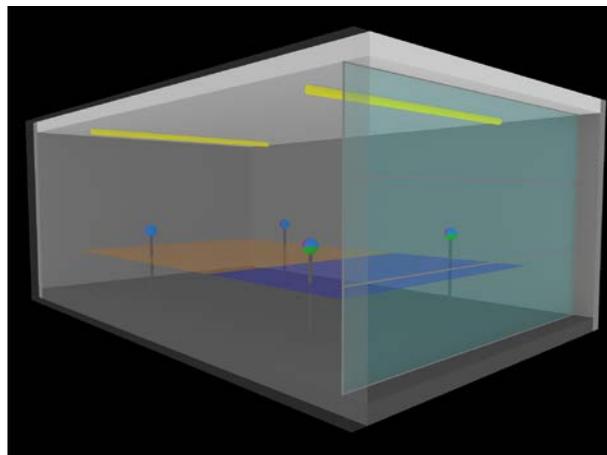


Abbildung 3: Die Tageslichtberechnungsmethodik wurde grundlegend überarbeitet. Der Simulationsumfang für Fassaden wurde erweitert und der Import User-spezifischer Fassadensysteme ermöglicht.

2.1.2 Kunstlicht

Eine Lichtplanung erfolgt in der Regel sukzessiv auf Raumbasis. Hierbei werden üblicherweise unterschiedliche Raumtypen eines Gebäudes geplant und die Planungsergebnisse auf gleiche Raumtypen übertragen. Für die Abbildung eines kompletten Gebäudes ist es notwendig alle gängigen Raumdimensionen von befensterten Räumen oder auch Räumen mit Oberlichtern abbilden zu können. Hierfür wurde die Definition des Raumsetups für befensterte Räume erweitert. Die Datenbankstruktur wurde entsprechend den zusätzlichen Simulationswerten und Bewertungskriterien angepasst. Im Einzelnen wurden hier Erweiterungen für zusätzliche Fensterräume bis zu einer maximalen Dimension von 10m x 10m x 4m (L x B x H), sowie zusätzliche Reflektionsgrade für die Raumboflächen vorgenommen. Für die Bewertungskriterien wurde die Struktur für die Simulationswerte um 6 neue Messflächen erweitert.

spezifischen Messflächen hinterlegt. Eine importierte spezifische LVK wird im Onlinetool gerastert auf diese Datenbankwerte gemapt. Anschließend werden die Werte auf den spezifischen Lichtstrom bezogen. Mit diesem Verfahren ist es möglich Beleuchtungsstärken und erforderliche Leuchten Stückzahlen aus einer spezifischen Lichtverteilungskurve nahezu in Echtzeit zu ermitteln.

2.1.3 Thermisches Modell

Zur Berücksichtigung von weiteren Raumtypologien wurde eine korrekte Abbildung der solaren Einstrahlung auch von Eckräumen ausgearbeitet. Hierzu wurde die gleiche Methodik wie bei dem einseitig befensterten Raum verwendet und hinsichtlich der zweiten Fassadefläche ergänzt. Abhängig von der Ausrichtung der Fensterfläche und des Sonnenstandes wird im Zeitschritt, der winkelabhängige g-Wert ausgewählt und mit der solaren Einstrahlung multipliziert. Man erhält die solaren Einträge summiert aus Transmission und sekundärer Wärmeabgabe in den Innenraum. Ebenfalls fließt die interne Last, welche aus dem Kunstlichtbedarf verursacht wird, in das thermische Bilanzierungsmodell ein. Die thermische Simulation erfolgt basierend auf der EN ISO 13790 (ON Österreichisches Normungsinstitut 2008) wobei eine getrennte Betrachtung des Luft-, Strahlungs- und Masseknoten durchgeführt wird. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens kann in (Werner 2017) entnommen werden. Anteilsmäßig werden die solaren und internen Einträge auf diese Knoten verteilt. Über eine dynamische Bilanzierung im Zeitschritt kann die Innenraumtemperatur bzw. der Heiz- und Kühlbedarf im Zeitschritt bestimmt werden.

Ebenfalls können nun Räume thermisch betrachtet werden, die sowohl an eine Dachfläche bzw. an ein Erdreich grenzen. Dies wurde dadurch umgesetzt, dass nun optional ein U-Wert für die Dachfläche und des Bodens angegeben werden kann. Über die Angabe der Flächenanteile der Dach- bzw. Bodenfläche können die zusätzlichen Transmissionsverluste bestimmt werden. Diese Flexibilität an Raumgestaltung ermöglicht nun das modulare Zusammensetzen verschiedenster Räume zu einem Gesamtgebäude (siehe Abbildung 3), allerdings mit der Einschränkung, das nur Außenecken abgebildet werden können.

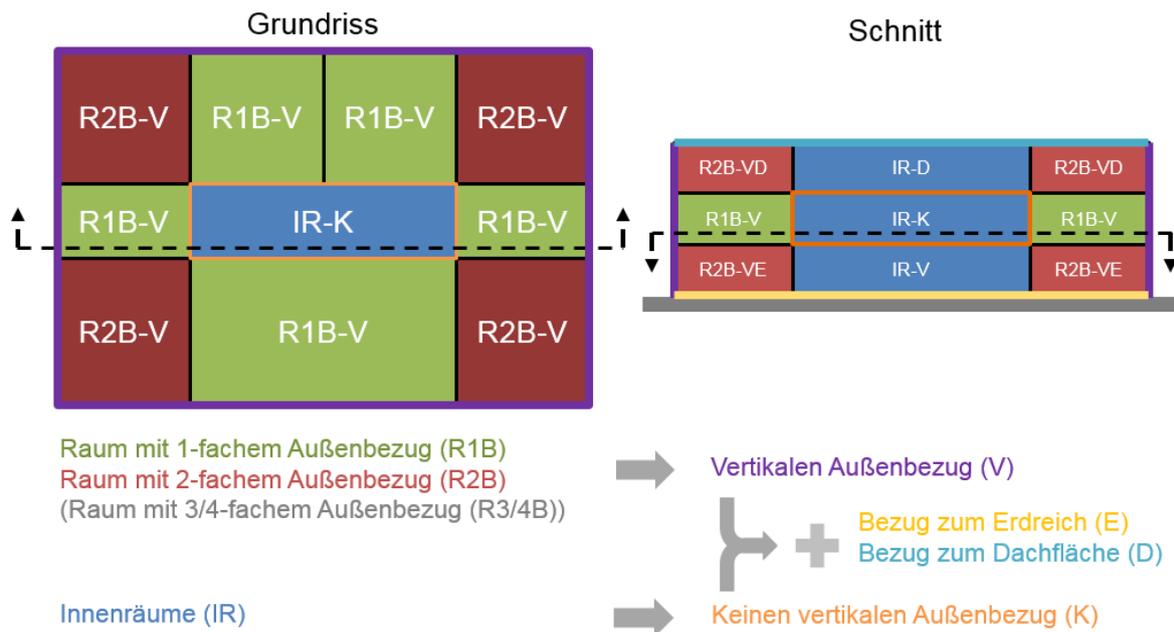


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der modularen raumweise Methodikzuweisung eines Gesamtgebäudes

Damit die Berechnung eines Gesamtgebäudes auch in vertretbarer Zeit möglich ist, wurden vereinfachte Methoden untersucht, die es erlauben den Heiz- bzw. Kühlbedarf des Gesamtgebäudes in kurzer Simulationszeit zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde das 3-stöckige Referenzgebäude aus der ÖNORM B 8110-6 (Österreichisches Normungsinstitut 2013) bestehend aus insgesamt 15 Zonen in TRNSYS aufgebaut. Pro Etage befinden sich 5 Zonen (je 1 Zone pro Himmelsrichtung und eine innenliegende Zone). Die geometrischen und bauphysikalischen Randbedingungen dieses Referenzgebäude sind im Anhang in der Tabelle 2 zusammengefasst.

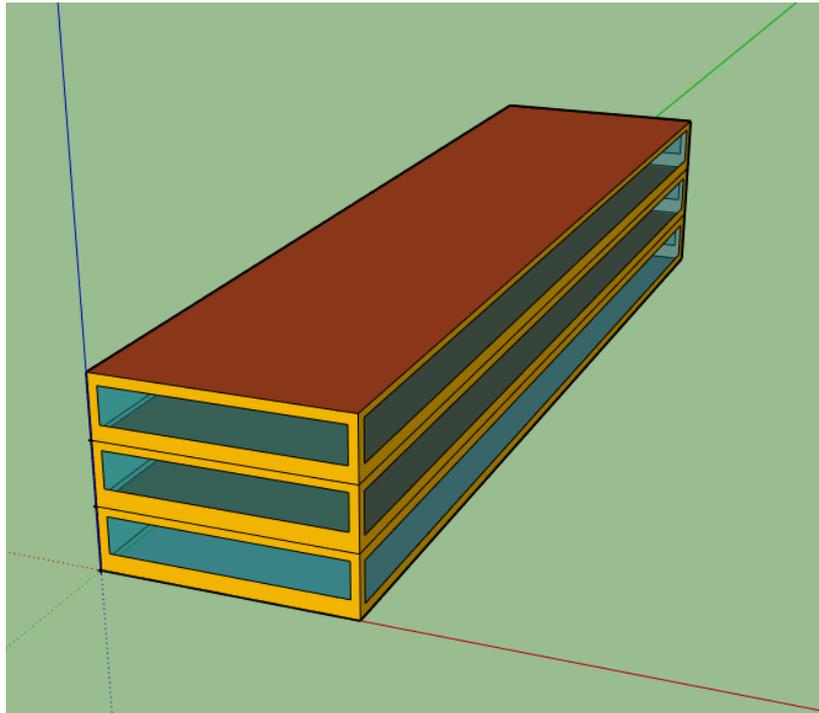


Abbildung 6: Evaluierungsgebäude der ÖNORM B 8110-6

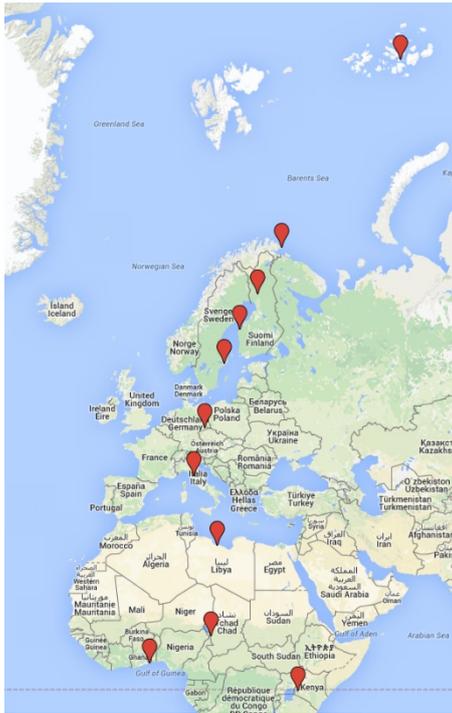
Folgende vereinfachte Methoden zur Gesamtgebäudeauswertung wurden untersucht:

„**Einzelraum Adiabatisch**“: Für jeden Einzelraum bzw. Zone werden die Innenwände als adiabatisch angenommen (d.h. es erfolgt kein Wärmeaustausch zwischen den Räumen). Für die einzelnen Räume/Zone wird der Heiz- und Kühlbedarf separat simuliert. Anschließend werden die Bedarfe der Einzelräume aufsummiert und somit auf den Gesamtbedarf des Gebäudes geschlossen.

„**1 Zone**“: Das Gebäude wird als eine gesamte einzelne Zone betrachtet. Es herrscht also ein idealer thermischer Ausgleich der Einzelräume untereinander.

Der Vorteil dieser beiden Methoden besteht in der Verwendbarkeit des sehr schnellen und bereits implementierten Heizwärme- und Kühlbedarfsberechnungsverfahrens. Mittels der Methode „Einzelraum Adiabatisch“ kann das bestehende in DALEC eingesetzte Berechnungsverfahren unverändert verwendet werden. Erst im Post-Processing werden die Bedarfe dieser Einzelräume kumuliert. Bei der „1-Zone“ Methode werden im ersten Schritt die Transmission- und Lüftungsleitwerte, solaren Einträge, internen Lasten und Kapazitäten der Einzelräume aufsummiert und anschließend dem in DALEC implementierten Widerstandskapazitätsmodell übergeben.

Diese beiden Methoden wurden mit einem dynamischen Mehrzonenmodell verglichen, welches die thermischen Wechselwirkungen der einzelnen Zonen korrekt abbildet und somit in dieser Evaluierung als Referenz dient. Die Untersuchung wird an 11 unterschiedlichen Standorten und Klimadaten durchgeführt (siehe Abbildung 6).



RUS	Polargmo
NOR	VARDO
FIN	Rovaniemi
FIN	Vaasa
SWE	Stockholm
DEU	Dresden
ITA	Firenze-Peretola
LBY	Sirte
TCD	Ndjamena
TGO	Lome
KEN	Kisumu

Abbildung 7: Evaluierungsstandorte

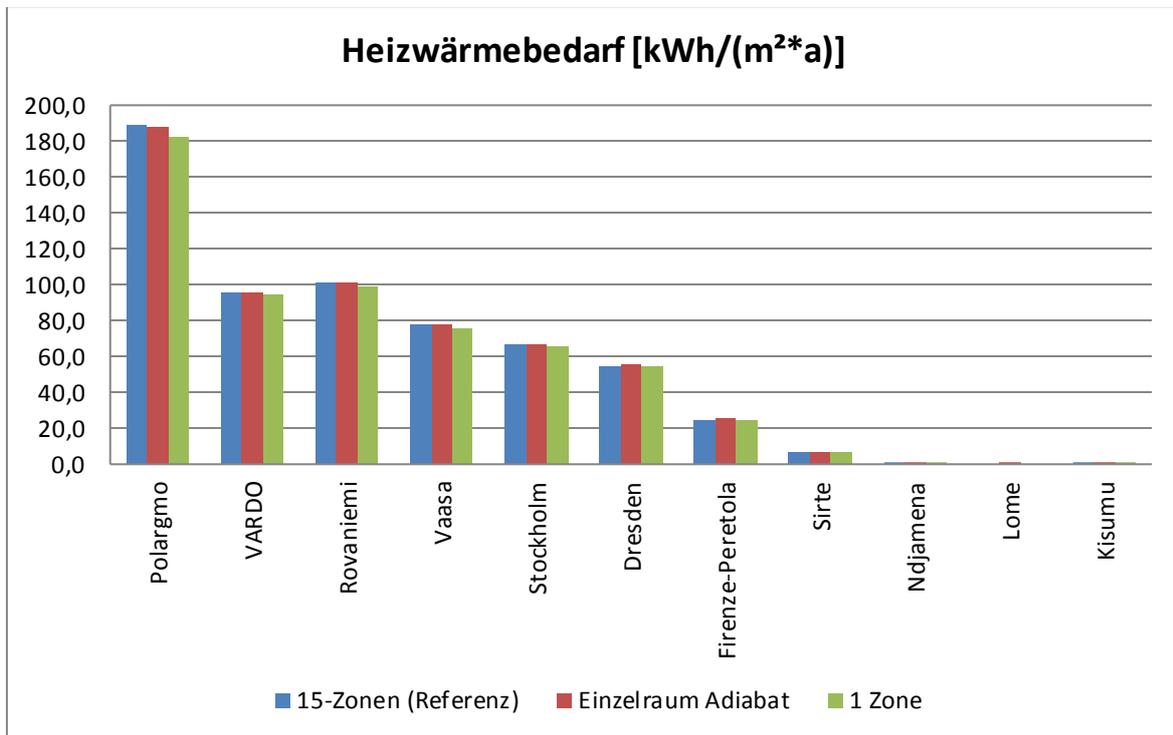


Abbildung 8: Vergleich des Heizwärmebedarfs einer Mehrzonensimulation mit den vereinfachten Ansätzen

Sowohl für die Methode „1-Zone“ als auch „Einzelraum Adiabatisch“ stimmen die Ergebnisse für alle untersuchten Standorte sehr gut mit der Referenzsimulation überein. Die relative Abweichung bei nennenswertem Heizwärmebedarf ist bei beiden Methoden kleiner 3%.

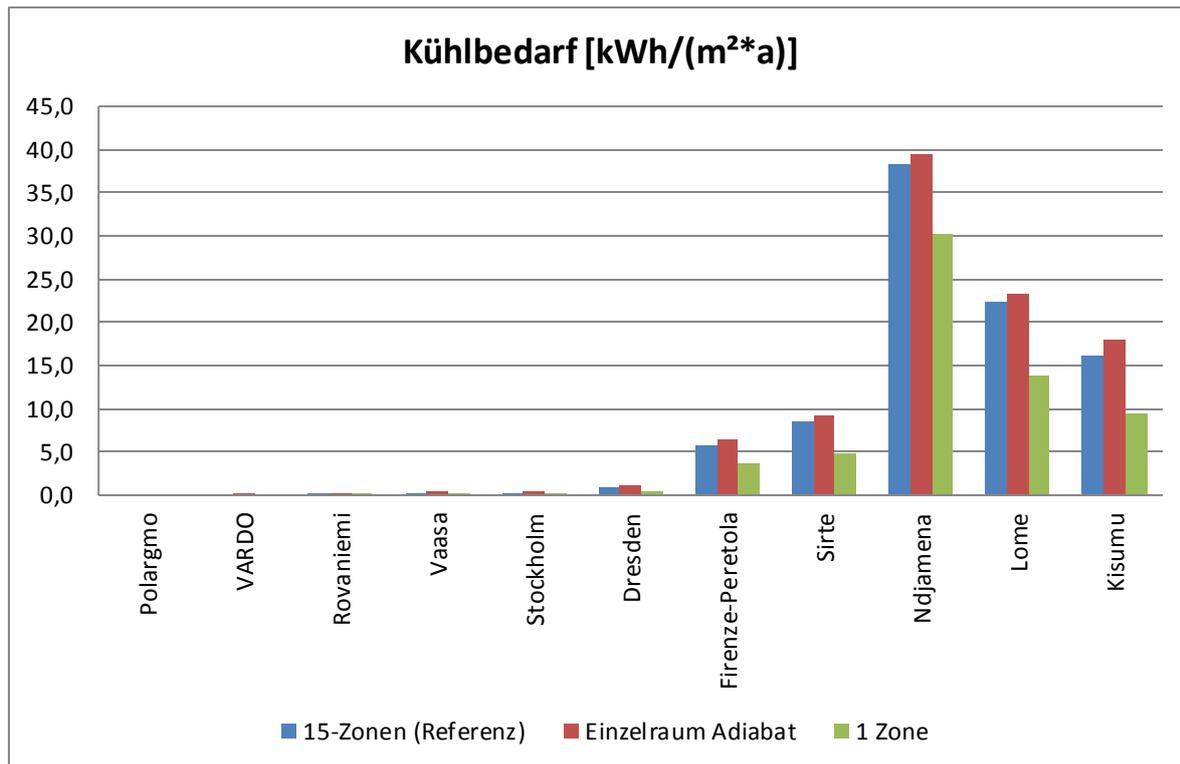


Abbildung 9: Vergleich des Kühlbedarfs einer Mehrzonensimulation mit den vereinfachten Ansätzen

Bei der Ermittlung des Kühlbedarfs zeigt sich, dass die Methode „1-Zone“ den Bedarf, aufgrund der idealisierten perfekten Durchmischung zwischen den Zonen, unterschätzt. Methode „Einzelraum Adiabät“ zeigt eine bessere Übereinstimmung zu der Referenzsimulation (Relative Abweichung < 10%). Da bei dieser Methode der Kühlbedarf leicht überschätzt wird, bekommt man Ergebnissen auf der „sicheren Seite“ liegend.

Die gute Übereinstimmung lässt sich auf die gleiche Nutzung (interne Lasten) und Klimatisierung (Temperaturen) der Zonen zurückführen. Da in DALEC keine unterschiedliche Nutzung bzw. Klimatisierung der Einzelräume angestrebt wird, ist diese Betrachtung zulässig. Auf Grundlage dieser Erkenntnis wurde das Verfahren „Einzelraum Adiabät“ zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs aus Heizung und Kühlung herangezogen und in die DALEC Methodik implementiert.

2.1.4 Eingabestruktur

Die Eingabe der mehreren Räume zu einem Gesamtgebäude erfolgt nun übersichtlich über eine Exceltabelle, in dieser werden sowohl die geometrischen als auch bauphysikalischen sowie lichttechnischen Eigenschaften zugewiesen. Die definierten Räume werden dann sequentiell über die entwickelte Methodik simuliert, die Ergebnisse entsprechend des vorgestellten Verfahrens im Anschluss kumuliert und anschließend als Gesamtergebnis des Gebäudes ausgegeben. Somit liegen sowohl die Detailergebnisse jedes einzelnen Raumes (z.B. Überhitzungshäufigkeit) als auch die Energieeffizienz des Gesamtgebäudes zur Auswertung vor.

2.2 Hallen

2.2.1 Tageslicht

Als Ergänzung zu den befensterten Räumen mit einem Fassadensetup wurde die Berechnungsmethodik zur Ermittlung des Tageslichteintrags um Hallen mit Oberlichtern erweitert. Auch hier werden wieder vorberechnete Faktoren in einer Datenbank abgelegt und ermöglichen so eine effiziente und schnelle Berechnungen des stündlichen Tageslichteintrags im Jahresverlauf. Dem User stehen sowohl horizontale Oberlichtöffnungen (Skylights) als auch verschiedene Sheddach Geometrien zur Auswahl. Dabei kann jeweils zwischen transparenter und transluzenter Ausführung gewählt werden. Bei Aktivierung der Sonnenschutzstrategie wird bei Überschreitung einer vom User definierten Grenze für die externe Globalstrahlung das wählbare Sonnenschutzsystem lichttechnisch berücksichtigt und vermindert somit den Tageslichteintrag.

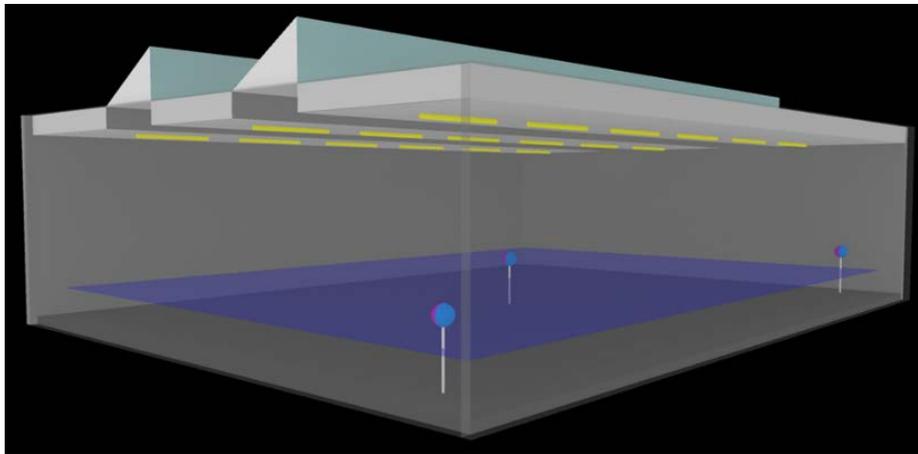


Abbildung 10: Die Tageslichtberechnungsmethodik wurde für Hallen und Räume mit Oberlichtern erweitert. Dabei können sowohl Sheddächer als auch ebene Oberlichter berücksichtigt werden.

2.2.2 Kunstlicht

Die Berechnungsmethodik des Kunstlichtmoduls für Räume mit Oberlichtern basiert auf der Methodik für befensterte Räume und wurde entsprechend erweitert. Das Modul errechnet die stündliche Kunstlicht Nutzleistung, die benötigt wird um in einer spezifischen Hallensituation eine definierte Sollbeleuchtungsstärke zu erreichen. Hierbei wird von einem gleichmäßigen Leuchtenraster und einer Messflächenzone für horizontale Beleuchtungsstärke ausgegangen. Die Lichtpunkthöhe wird entsprechend der Hallenhöhe automatisch angepasst, wobei der Nutzer zwischen einer Anbau- oder Pendelleuchte wählen kann.

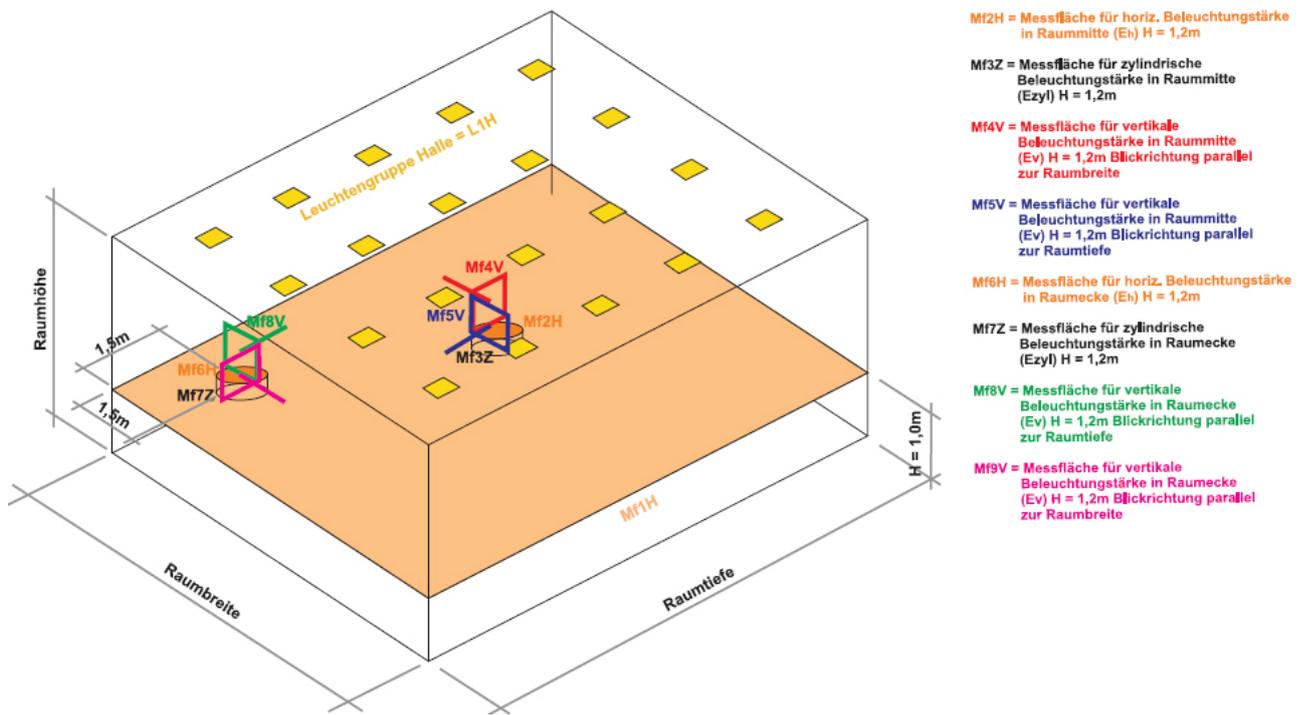


Abbildung 11: Simulationssetup für Räume mit Oberlichtern

2.2.3 Thermisches Gebäudemodell für Hallen

Die thermische Methodik wurde für Hallen angepasst und erweitert. Im Speziellen wurde der Algorithmus zur Bestimmung der solaren Einstrahlung abhängig von der Größe, Neigung und Ausrichtung der Sheddächer neu aufgesetzt. Mittels winkelabhängigen g-Werten, die im Zeitschritt entsprechend des Sonnenstandes ausgewählt werden, wird der solare Eintrag ermittelt und als Input in das Widerstandskapazitätsmodell der ISO 13790 übergeben. Ebenfalls fließt der resultierende Kunstlichtbedarf (Kapitel 2.3.2) als interne Lasten in die dynamische Gebäudebilanzierung mit ein.

Abhängig von der ausgewählten Sheddachgeometrie werden die sich einstellenden Transmissionsflächen neu ermittelt, die weiteren Umgebungsflächen (Hallendach, Hallenboden und Wände) hinsichtlich den Transmissionsverlusten bestimmt und im dynamischen Gebäudemodell berücksichtigt. Basierend auf diesen Randbedingungen ermittelt die ISO 13790 eine mittlere Hallentemperatur. Bei hohen Hallendecken kann es zu Temperaturschichtungen kommen, die jedoch von der bauphysikalischen Qualität der Hallenhülle sowie von der Art der Beheizung abhängig ist (Kah et al. 2010). Der Gradient dieser Schichtung wurde im Rahmen einer Vorstudie im Projekt mittels mehreren TRNSYS-Studien (TRNFlow) untersucht. In weiterer Folge wird angestrebt, die höhenabhängige Hallentemperatur hinsichtlich dieser Gradienten anzupassen.

2.3 Behaglichkeitskriterien

2.3.1 Thermische Behaglichkeit:

Der Algorithmus zur thermischen Behaglichkeit nach der EN ISO 7730 wurde erfolgreich in die DALEC Umgebung implementiert und ermöglicht im jeden Zeitschritt nun sowohl die Ausgabe des PMVs (predicted mean vote) als auch des PPDs (percentage persons dissatisfied). Zeitpunkte, die als thermisch kritisch eingestuft werden, können nun detektiert, ausgegeben und in der gesamtheitlichen Komfortauswertung berücksichtigt bzw. bewertet werden. Des Weiteren wurden die jährlichen Auswertegrößen der Norm mit in der Methode umgesetzt. Zu beachten ist, dass nicht alle notwendigen Einflussgrößen (z.B. Turbulenzgrad, ...) aus dem verwendeten thermischen Modell der EN ISO 13790 für die Berechnung der Behaglichkeit abgeleitet werden können. Diese fehlenden Größen können jahreszeitlich als Konstanten festgelegt werden. Ebenfalls wurde ein von der Außentemperatur abhängiger Bekleidungsgrad eingeführt, welcher berücksichtigt, dass im Sommer die Gebäudenutzer tendenziell leichter bekleidet sind als im Winter.

2.3.2 Lichttechnische Komfortkriterien

Für die Bewertung einer Kunstlichtlösung sind nicht alleine Beleuchtungsstärken ausschlaggebend. Für die erweiterte Komfortbewertung im aktuellen Forschungsprojekt wurden Berechnungsmethodiken für vertikale Beleuchtungsstärke und Modelling implementiert. In der Vorberechnung (forward ray tracing) wurden hierfür an relevanten Raumpositionen zusätzliche Messflächen für vertikale, zylindrische und horizontale Beleuchtungsstärke in 1,2m Höhe platziert und Werte in der Simulation ermittelt.

Gleichermaßen wurden für das Tageslicht Vorberechnungen für dieselben, zusätzlichen Messflächen (vertikale Beleuchtungsstärken am Auge des Nutzers, zylindrische und horizontale Beleuchtungsstärken) durchgeführt und die entsprechenden Faktoren in der Datenbank hinterlegt. Damit werden zusätzliche Auswertungen von lichttechnischen Komfortparametern der Gesamtsituation (Tages- und Kunstlicht) ermöglicht.

2.4 Verbesserte Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten

2.4.1 Verbauungslinie

Durch die Implementierung von Verschattungslinien können auch komplexe Verbauungen aus Nah- und Fernverschattung abgebildet und die Auswirkungen auf den Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarf dargestellt werden. Die Eingabe erfolgt durch den Verbauungswinkel pro Azimuth-Winkelintervall. Mittels Sonnenstandsabfragen kann im Zeitschritt ermittelt werden, ob eine direkte Besonnung des transparenten Fassadenteils vorliegt. Basierend auf dieser Entscheidung wird der Direktanteil in der Tageslichtsimulation und in der thermischen Simulation berücksichtigt. Ebenfalls wird der diffuse Einstrahlungsanteil des Himmels über den verdeckten Raumwinkel reduziert. Die Methodik erlaubt dabei eine beliebige Eingabe von markanten Verbauungswinkeln. Zwischenwerte werden mittels Interpolation ermittelt.

Des Weiteren können auch Verschattungslinien direkt aus Web-Kartendiensten (z.B. TirolSolar) verwendet werden.

Astronomische Sonnenbahnen mit Verschattungen am gewählten Standort

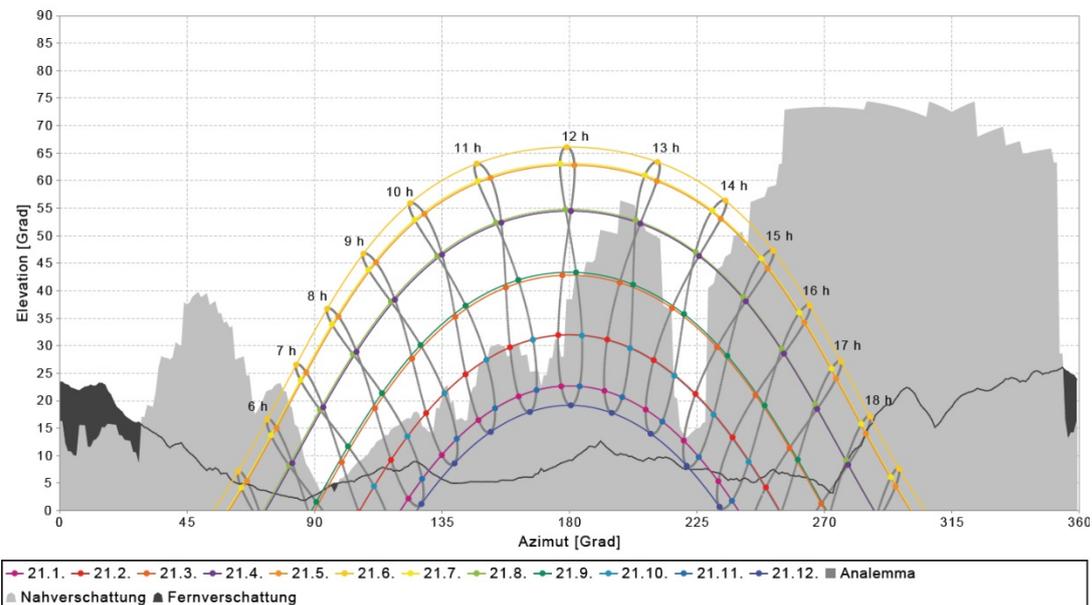


Abbildung 12: Exemplarische Verschattungslinien (Quelle: <http://www.tirolsolar.at>) für Nah- und Fernverschattung sowie resultierende Verschattungslinie mit Analemma-Darstellung

2.4.2 Primärenergiebedarf

Durch die Möglichkeit der Eingabe von Jahresnutzungsgraden für das Heiz- und Kühlsystem und die Angabe von Primärenergie-, CO₂-Faktoren der Energiequelle kann nun auf die Auswertungsgrößen Endenergie, Primärenergie und CO₂- Ausstoß geschlossen werden. Ebenfalls ist die Ermittlung der Energiekosten zum Betreiben des Gebäudes, welche aufgrund des Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarfs entstehen, möglich. Diese neuen Auswertungsgrößen verbessern die Beurteilung der zu untersuchenden Variante und ermöglichen nun auch eine direkte Vergleichbarkeit zwischen weiteren unterschiedlichen Ausführungsvarianten.

2.4.3 Variantenvergleich:

Eine graphische und tabellarische Gegenüberstellung der wichtigsten Eingangs- und Ergebnisgrößen kann mittels eines Variantenvergleichs nun auch direkt im Online-Tool (siehe Kapitel 2.5.2) erfolgen. Energieeffiziente Lösungen können somit sehr schnell detektiert und anschaulich mittels Balkendiagrammen dargestellt werden.

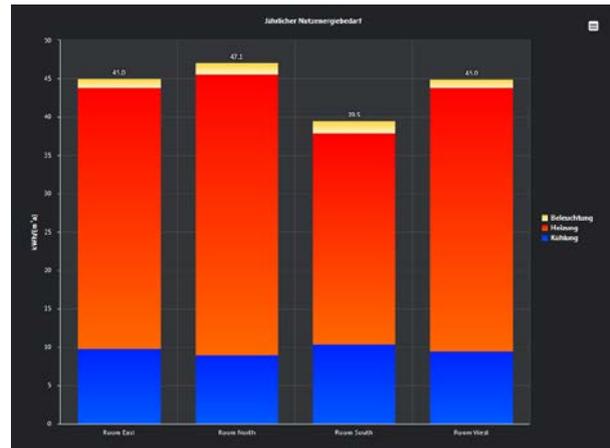


Abbildung 13: Darstellung der Ergebnisse im Variantenvergleich

2.4.4 Wirtschaftlichkeit:

Basierend auf der VDI 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ (VDI 2000) wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung im Forschungswerkzeug implementiert. Mittels separate Eingabe der Investitionskosten des Fassaden- und Kunstlichtsystems (sowie weitere Systeme), Wartungskosten und den Energiekosten können die Einsparungen zu einer Referenzvariante bestimmt werden.

2.4.5 Optimizer

Um systematische optimierte Varianten bestimmen zu können, wurde ein „Optimizer“ - Verfahren für das Forschungswerkzeug umgesetzt. Hierfür können zwei unterschiedliche Verfahren ausgewählt werden:

- Vollfaktorielle Untersuchung:** Mittels diesem Verfahren werden die Grenzen und die Diskretisierungsstufe der zu untersuchenden Parameter n (z.B.: Fensterfläche und g -Wert) festgelegt. Die Methode erstellt systematisch die Stützstellen im n -dimensionalen Untersuchungsraum und ermittelt jeweils die Ergebnisgröße. Anschließend kann das Parametersetting mit dem besten Simulationsergebnis bestimmt werden (z.B. Minimumsuche). Vorteil: der gesamte Untersuchungsraum wird untersucht und alle Haupteffekte und Wechselwirkungen werden berücksichtigt. Des Weiteren können sowohl globale als auch lokale Minima detektiert werden. Nachteil: Nachteil: Mit jedem Untersuchungsparameter steigt die Zahl der Stützstellen und damit die gesamte Rechenzeit sowie der Datentransfer stark an.
- Down-Hill-Simplex-Methode:** Ist eine vollfaktorielle Untersuchung aufgrund einer zu hohen Anzahl an notwendigen Stützstellen nicht mehr durchführbar, kann auf die Down-Hill-Simplex Methode zurückgegriffen werden. In dem Untersuchungsraum mit n -Parameter wird ein Volumen aus $n+1$ Stützstellen aufgespannt. Zu jeder Stützstelle kann ein Funktionswert bestimmt werden. Der schlechteste Wert dieser Stützstellen wird durch eine neue Stützstelle ersetzt. Dieses Verfahren konvergiert langsam, ist aber sehr robust. Vorteil: ein sehr großer mehrdimensionaler Untersuchungsraum kann betrachtet werden. Nachteil: Die Gefahr nur ein lokales Minimum anstelle des

gesuchten absoluten Minimums identifiziert zu haben ist je nach Parameterraum relativ hoch.

2.4.6 Weltweite Parameterstudien

Mittels der sehr kurzen Berechnungszeiten konnten erstmals gekoppelte lichttechnische und thermische Zusammenhänge im weltweiten Vergleich für Gebäude mit hohem bauphysikalischen Standard und guter Gebäudetechnik analysiert werden. Im Rahmen der Dissertation (Werner 2017) wurde unter anderem die optimale Verschattungsdauer und die optimale Fensterfläche bestimmt, die sich aus einem rein thermischen Ansatz (Stand der Technik) und einem integralen gekoppelten thermischen und lichttechnischen Ansatz (DALEC) ergeben. Dieser integrale Planungsansatz, welcher mit DALEC ermöglicht wird, führt zu signifikant größeren Fensterflächen und somit zu anderen Fassadenausführungen (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13). Es konnte gezeigt werden, dass mittels dieser gesamtheitlichen Planung von DALEC Einsparungen von bis zu 40% des Gesamtprimärenergiebedarfs im Vergleich zu konventionellen Planungsmethoden ermöglicht werden. Die Randbedingungen dieser Parameterstudien können aus (Werner 2017) entnommen werden. Weitere Ergebnisse aus dieser weltweiten Parameterstudie wurden in (Werner et al. 2017; Werner, Ebert, and Geisler-Moroder 2017) veröffentlicht.

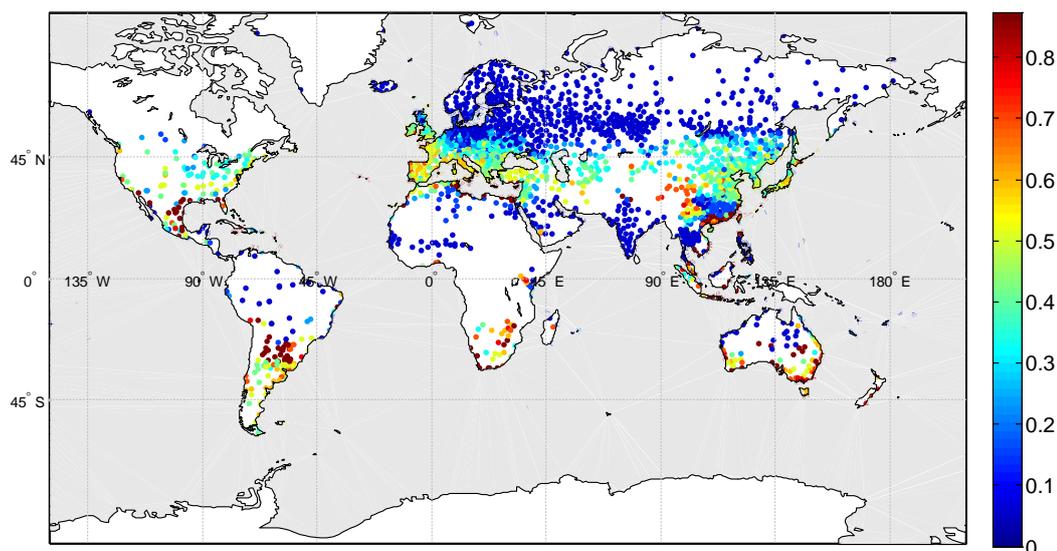


Abbildung 14: Optimale relative Fensterfläche für Fassadenbereich 2 und 3 bei minimalen Heiz- und Kühlbedarf

2.5 Umsetzung als Forschungswerkzeug und Online-Tool

2.5.1 Forschungswerkzeug

Zunächst wurde die Methodenentwicklung in Excel umgesetzt. Dieser Excel-Prototyp ermöglichte aufgrund von Performanceschwierigkeiten nur eine eingeschränkte Entwicklungs- und Testumgebung. Zudem wurde eine stringente und nachvollziehbare Dokumentation des Codes für die Umsetzung hin zur Online-Anwendung benötigt. Basierend auf dieser Ausgangslage, wurde als neue Entwicklungsumgebung „Matlab“ gewählt. Dadurch

entstand eine sehr performante und mit allen Möglichkeiten ausgestattete Testumgebung. Weitere Entwicklungen können sehr schnell und einfach implementiert sowie getestet werden. Ein weiterer großer Vorteil bestand darin, dass dieser Matlab Code auch sofort als Dokumentation für die Umsetzung zur Online-Anwendung verwendet werden konnte. Dies reduzierte für die Projektpartner in weiterer Folge sehr viel Dokumentationsaufwand. Die Matlab-Version stellt somit Entwicklungs- und Testumgebung sowie Dokumentationsgrundlage in einem dar.

2.5.2 Online-Tool

Neugestaltung und Optimierung des User Interfaces

Das User Interface des Online Tools wurde übersichtlicher gestaltet um eine bessere Orientierung des Nutzers sicherzustellen. Hierbei wurde der Hauptscreen mit einer klaren Struktur versehen, die auch bei Skalierung des Browserfensters erhalten bleibt. Die Symbolik wurde vereinfacht und damit leichter ablesbar gemacht. Die Nutzer Eingabefelder der einzelnen Module und die Menüführung wurden klarer strukturiert und um neue Eingabefelder erweitert.

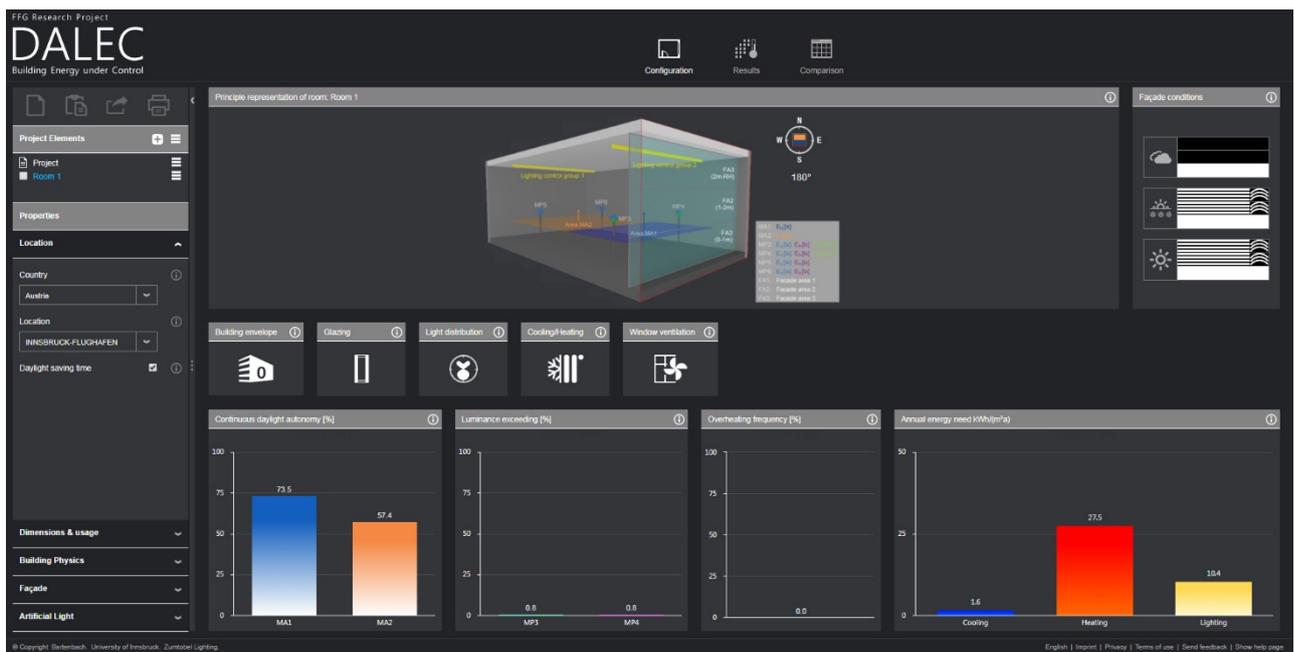


Abbildung 15: Optimiertes User Interface der Online Anwendung

Variantenvergleich mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Erweiterung um einen Variantenvergleich ermöglicht das Gegenüberstellen von verschiedenen Ausführungsvarianten. Hierzu kann mittels der Angabe von Jahresnutzungsgraden (abhängig vom Heiz- und Kühlsystem, z.B. Wärmepumpe) und Primärenergiefaktoren (abhängig vom eingesetzten Energieträger) auf den monatlichen und jährlichen Endenergie- und Primärenergiebedarf geschlossen werden. Dies lässt die Bestimmung eines primärenergetischen Gesamtenergiebedarfs aus Heizung, Kühlung und Kunstlicht pro Variante zu, welche dann unmittelbar mit den anderen Ausführungsvarianten

verglichen werden kann. Die energieeffizienteste Lösung kann somit anschaulich evaluiert werden. Ebenfalls können der CO₂-Ausstoß und die entstehenden Energiekosten pro Variante im Vergleich dargestellt werden. Für die Darstellung des Variantenvergleichs wurde im Online Tool eine eigene Ausgabeseite erstellt.

FFG Research Project
DALEC
Building Energy under Control

Konfiguration Ergebnisse Vergleich

Vergleich

		Halle HIT	Halle LED	Halle LED TL abhängig
Primärenergiebedarf	kWh/(m²a)	165.2	128.2	98.6
Nutzenergiebedarf	kWh/(m²a)	107.5	97.6	89.4
Endenergiebedarf	kWh/(m²a)	63.5	49.3	37.9
CO ₂ -Emissionen	kg/(m²a)	43.2	33.5	25.8
Energiekosten	€/m²a	10.17	7.89	6.06
Kont. Tageslicht-Autonomie	%	60.5	60.5	60.5
Leuchtdichte-Überschreitung	%	-	-	-
Häufigkeit der Überhitzung	%	0.0	0.0	0.0
Leuchtenanzahl	stk	48	56	56
Gebäudehülle				
Verglasung				
Lichtverteilung				
Kühlung/Heizung				
Fenster-/Nachtlüftung				

© Copyright: Barfenbach, University of Innsbruck, Zumtobel Lighting. Deutsch | Impressum | Datenschutz | Nutzungsbestimmungen | Feedback senden | Hilfeseite anzeigen

Abbildung 16: Variantenvergleich mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Online Tool

Implementierung der lichttechnischen Komfortbewertung

Berechnungsmethodiken für die Komfortbewertung der Kunstlicht- und Tageslichtlösung wurden im Online Tool implementiert. Für jeden Zeitschritt können Werte für vertikale Beleuchtungsstärke und Modelling in verschiedenen Raumzonen und Blickrichtungen evaluiert werden. Die Bewertung geschieht gemeinschaftlich für Tages- und Kunstlicht in Abhängigkeit der gewählten Parameter. Die Lichtlösung kann daraufhin im Bedarfsfall gezielt optimiert werden.

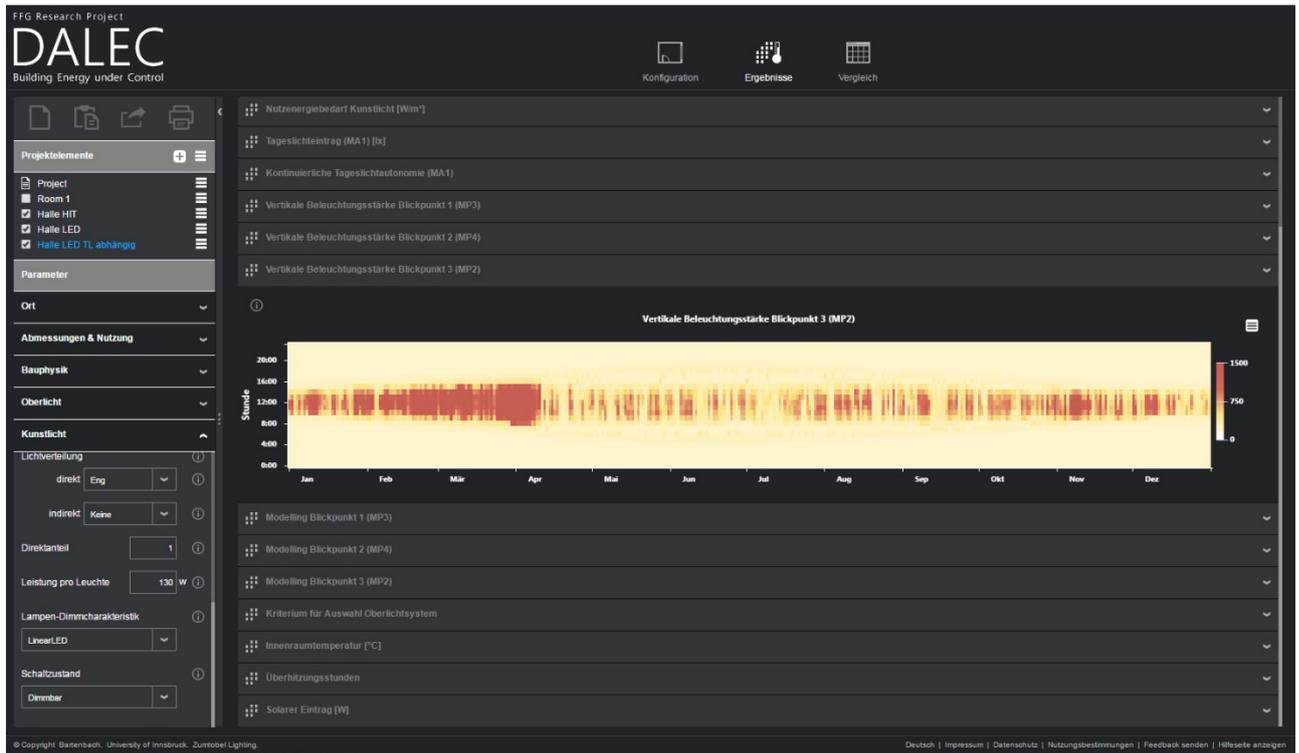


Abbildung 17: Implementierung der erweiterten Berechnungsmethoden für Tageslicht, Kunstlicht und Klima

Sämtliche neuen Berechnungsmethodiken, die im Forschungstool implementiert wurden, wurden im Online Tool implementiert. Mit Ausnahme der thermischen Behaglichkeitsberechnung und der Optimizer Funktion.

3 Schlussfolgerungen

Mit dem Forschungsprojekt DALEC konnten signifikante Weiterentwicklungen im Bereich der gekoppelten lichttechnischen und thermischen Simulation für die Planungspraxis erzielt werden. Die Abbildbarkeit eines Gesamtgebäudes mit unterschiedlichen Raumtypen und umgebender Verbauung, die Auswertung hinsichtlich Komfortparameter und die verbesserte Ausgabe- und Auswertedarstellung ermöglicht nun den Projektpartnern unterschiedliche Gebäudestrukturen, Fassadenaufbauten und Kunstlichtlösungen in verschiedensten Klimazonen gesamtheitlich und nachhaltig zu analysieren, zu bewerten und zu planen. Des Weiteren wurde stets auf sehr schnelle Berechnungszeiten und geringen Eingabeaufwand Wert gelegt, so dass diese Auswertung mit DALEC bereits in der frühen Planungsphase, in dem der Entwurf festgelegt wird, durchgeführt werden kann.

Den Projektpartnern steht mit der Matlab Version von DALEC ein leistungsfähiges Forschungswerkzeug zur Verfügung, das individuell weiterentwickelt und auf zukünftige Problemstellungen angepasst werden kann. Neue Forschungsprojekte, die zur Entwicklung von neuen Gebäudestrukturen, Fassadensystemen, Kunstlichtlösungen sowie Steuerungslogiken abzielen, können mit dieser neuen ganzheitlichen Simulationsmethodik bearbeitet werden. Des Weiteren unterstützt DALEC die Projektpartner bei der täglichen Planungsarbeit. Eine ganzheitliche lichttechnische und thermische Auswertung wird meistens in der Planungspraxis nicht angeboten, so dass für die Projektpartner mit der Flexibilität des Forschungswerkzeugs ein Wettbewerbsvorteil erzielt wurde.

Die DALEC-Technologie wird mit typischen Fassadensystemen und Kunstlichtlösungen der breiten Planungsgemeinde als Online-Anwendung zur Verfügung gestellt (www.dalec.net). Dies erlaubt Architekten, Gebäudeplanern, Bauphysikern und Lichtplanern bereits den Planungsentwurf bauphysikalisch, energetisch und hinsichtlich Behaglichkeitskriterien zu bewerten und zu optimieren. Aufgrund der über 3000 weltweit verteilten Standorten ist das Online-Tool auf internationale Projekte anwendbar und besitzt deshalb eine enorme Breitenwirkung auch hinsichtlich des Bekanntheitsgrades der Projektpartner.

Das Tool DALEC wird bereits erfolgreich in der Lehre der Universität Innsbruck eingesetzt. Studenten in der Vorlesung „Energieeffiziente Beleuchtung“ können aufgrund der schnellen Berechnungszeiten und dem geringem Einarbeitungs- sowie Eingabeaufwand bauphysikalische und lichttechnische Zusammenhänge schnell erfassen und erlernen.

4 Ausblick und Empfehlungen

Um verstärkt die Vorteile der gesamtheitlichen gekoppelten lichttechnischen und thermischen Planung bereits im Entwurf quantifizieren zu können, ist eine direkte Einbindung in CAD-Software wünschenswert. Idealerweise erhält man direkt beim Zeichnen des Entwurfs Rückmeldung über das spätere energetische Verhalten des Gebäudes und ein Feedback hinsichtlich Behaglichkeitskriterien. Eine detaillierte Ausarbeitung einer Schnittstelle, um in Zukunft BIM-Modelle auswerten zu können bzw. damit DALEC direkt in CAD-Anwendungen eingebunden werden kann, steht noch aus. Die Vorarbeiten durch die Weiterentwicklung des Tools von der Einzelraumberechnung zum Gesamtgebäude konnten im Projekt aber bereits geleistet werden. Im Folgeprojekt BIM2Light sollen relevante BIM Merkmale für Tages- und Kunstlichtsysteme festgelegt werden. Dies ist ein wichtiger Beitrag sowohl für die Tages- als auch für die Kunstlichtbranche, da solche Merkmale bisher noch nicht standardisiert wurden, was die sinnvolle Abbildung spezieller Lichtlösungen in BIM-Prozessen bislang verunmöglicht. Im Zuge von BIM2Light soll auch der DALEC-Prototyp und das Onlinetool weiter entwickelt werden um den Import von Nutzerprojekten welche als BIM-Modell vorliegen via IFC-Schnittstelle zu ermöglichen. Das Langzeitziel ist es alle für DALEC relevanten Parameter, wie Raumgeometrie, Wand- und Fensteraufbauten, Oberflächenreflektionsgrade sowie Kunst- und Tageslichtsystemspezifikationen direkt aus der IFC-Datei einlesen zu können, sodass die Berechnung ohne manuelle Eingabe erfolgen kann. Dadurch soll die integrale Tages- und Kunstlichtsimulation ohne nennenswerten Aufwand bereits in der frühen Planungsphase einsetzbar werden, womit eine Optimierung des Gesamtenergiebedarfes des geplanten Objektes durch den direkten Vergleich verschiedener Varianten sehr einfach ermöglicht wird.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: User Interface des Erstentwurfs von DALEC V1 oben und DALEC V1.5 unten (www.dalec.net).....	16
Abbildung 2: Programmablauf und Module	17
Abbildung 3: Die Tageslichtberechnungsmethodik wurde grundlegend überarbeitet. Der Simulationsumfang für Fassaden wurde erweitert und der Import User-spezifischer Fassadensysteme ermöglicht.	21
Abbildung 4: Erweitertes Setup für befensterte Räume	22
Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der modularen raumweise Methodikzuweisung eines Gesamtgebäudes	24
Abbildung 6: Evaluierungsgebäude der ÖNORM B 8110-6.....	25
Abbildung 7: Evaluierungsstandorte	26
Abbildung 8: Vergleich des Heizwärmebedarfs einer Mehrzonensimulation mit den vereinfachten Ansätzen.....	26
Abbildung 9: Vergleich des Kühlbedarfs einer Mehrzonensimulation mit den vereinfachten Ansätzen.....	27
Abbildung 10: Die Tageslichtberechnungsmethodik wurde für Hallen und Räume mit Oberlichtern erweitert. Dabei können sowohl Sheddächer als auch ebene Oberlichter berücksichtigt werden.....	28
Abbildung 11: Simulationssetup für Räume mit Oberlichtern.....	29
Abbildung 12: Exemplarische Verschattungslinien (Quelle: http://www.tirolsolar.at) für Nah- und Fernverschattung sowie resultierende Verschattungslinie mit Analemma-Darstellung...	31
Abbildung 13: Darstellung der Ergebnisse im Variantenvergleich.....	32
Abbildung 14: Optimale relative Fensterfläche für Fassadebereich 2 und 3 bei minimalen Heiz- und Kühlbedarf.....	33
Abbildung 15: Optimiertes User Interface der Online Anwendung.....	34
Abbildung 16: Variantenvergleich mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Online Tool.....	35
Abbildung 17: Ergebnisausgabe der stündlichen vertikalen Beleuchtungsstärke am Blickpunkt 3.....	36

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Features existierender Simulationstools.....	155
Tabelle 2: Randbedingungen Referenzgebäude ÖNORM B 8110-6.....	41

5.3 Literaturverzeichnis

- Kah, Oliver, Tanja Schulz, Susanne Winkel, Jürgen Schnieders, and Berthold Kaufmann. 2010. *Leitfaden Für Energieeffiziente Bildungsgebäude*. Darmstadt.
- Miller, Josef. 2016. *CAD-Schnittstelle Für Die Gekoppelte Thermische Und Lichttechnische Simulation*.
- ON Österreichisches Normungsinstitut. 2008. *EN ISO 13790 - Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung Des Energiebedarfs Für Heizung Und Kühlung*.
- Österreichisches Normungsinstitut. 2013. *ÖNORM B 8110-6 Beiblatt 3 Wärmeschutz Im Hochbau, Teil 6: Grundlagen Und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf Und Kühlbedarf*.
- VDI. 2000. *Richtlinienreihe VDI 2067 "Wirtschaftlichkeit Gebäudetechnischer Anlagen."*
- Werner, Matthias. 2017. "Dissertation: Gekoppelte Lichttechnische Und Thermische Methoden Zur Ganzjahresbewertung von Fassadensystemen Für Die Planungspraxis." Universität Innsbruck.
- Werner, Matthias, Oliver Ebert, and David Geisler-Moroder. 2017. "DALEC – Bewertungstool Für einen Integrativen Planungsansatz." In *Lux Europa 2017*, 1–5. Ljubljana.
- Werner, Matthias, Rainer Pfluger, David Geisler-Moroder, and Wolfgang Feist. 2017. "Analysis of Worldwide Performance of Façade Systems." In *Building Simulation 2017 San Francisco*. San Francisco: International Building Performance Simulation Assoziation.

6 Anhang

Tabelle 2: Randbedingungen Referenzgebäude ÖNORM B 8110-6

Nicht-Wohngebäude (NWG): Bürogebäude Abmessungen:

Randbedingungen nach ÖNORM B 8110-6

66,84 m x 15,13 m x ((3 x 3,60 m) + 0,6 m) (L x B x H)

ANMERKUNG: Die Abmessungen für die Höhe resultieren aus der Multiplikation der Bruttogeschosshöhe mit der Geschosanzahl zuzüglich der Raum umschließenden Abmessungen.

Fensterfläche:

Nord-orientiert	92,13	m ²
Süd-orientiert	92,13	m ²
Ost-orientiert	480,86	m ²
West-orientiert	616,44	m ²

U-Werte für die Grundvariante:

oberste Geschosdecke:	U _{OD}	0,63	W/(m ² K)
Außenwand:	U _{AW}	0,82	W/(m ² K)
Fenster:	U _{FE}	3,00	W/(m ² K)
	g-Wert	0,67	(für alle Fenster ident)
Kellerdecke gegen unbeheizter und ungedämmten Keller	U _{KD}	1,39	W/(m ² K)