

TAGESLICHT-PARAMETERSTUDIE MIT HILFE EINER MATLAB-RADIANCE-KOPPELUNG

Matthias Werner¹, Rainer Pfluger¹, Wolfgang Feist¹, David Geisler-Moroder²

¹Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

²Bartenbach LichtLabor GmbH, Aldrans, Österreich

KURZFASSUNG

Mithilfe einer Matlab-Radiance-Koppelung wird eine Parameterstudie eines tagesbelichteten Raumes automatisiert durchgeführt. Umgesetzt wird dies mittels einer statistischen Versuchsplanung (engl.: „Design of Experiments“ DoE), die abhängig von der Anzahl der Variablen und Diskretisierung des Untersuchungsgebietes die Varianten selbst definiert, simuliert und auswertet. Verwendet wird hierfür die Mathematiksoftware Matlab, welche aufgrund der Definition der DoE-Varianten die Raumgeometrie, Tageslichtbedingungen und Position der Ausgabegröße erzeugt und diese an das Ray-Tracing-Programm Radiance übergibt. Radiance führt die lichttechnische Simulation der Varianten durch und übergibt die Ergebnisse anschließend an Matlab zurück. Über Sensitivitäts- bzw. Regressionsanalysen lassen sich die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf den Tageslichteintrag untersuchen. Somit entsteht eine geschlossene Simulationsroutine die tageslichttechnische Fragestellungen automatisiert untersucht.

ABSTRACT

This paper presents an automated parametric study for daylight rooms coupling the software tools Matlab and Radiance. Matlab creates a Design of Experiment study (DoE), which generates different variations depending on the number of parameters and their discretisations. Input files based on the DoE (geometry, sky conditions, simulation points) are then automatically created for lighting simulation. The Ray-Tracing tool Radiance simulates the variations and the results are returned to Matlab. Thus the influence of each parameter can be checked by sensitivity and regression analysis. The outcome of the work presented in this paper is an automated research routine for daylight problems.

EINLEITUNG

Im Zuge der Novellierung der EU-Gebäuderichtlinie werden die Vorgaben des maximal zulässigen Energiebedarfes immer strikter (Nearly Zero Energy Buildings (European Council For An Energy Efficient Economy, 2011)). Der weltweite Energieverbrauch für Beleuchtung beträgt knapp 20 % des Gesamtstromverbrauchs (Kunz von Krieglstein, 2010). Durch verstärkte Tageslichtnutzung lässt sich

der Stromverbrauch durch Kunstlicht reduzieren. Dies ist durch eine gezielte Berücksichtigung des Tageslichtes bereits in der Planungsphase zu erreichen. Verschiedene Einflussgrößen wirken sich unmittelbar auf die Tagesbelichtung aus. Um Aussagen treffen zu können, welcher Tageslichteintrag in einer konkreten Raumsituation vorliegt, werden üblicherweise Lichtsimulationsprogramme verwendet.

Mithilfe einer Matlab-Radiance-Koppelung (MathWorks, 2012) (Ward & Shakespeare, 1998) ist es möglich alle entscheidenden Einflussgrößen eines einseitig befensterten Raumes systematisch zu untersuchen, den Einfluss auf den Tageslichteintrag zu bestimmen und dann durch Regressionsverfahren oder Lookup Tabellen absolute Werte ohne weitere Simulation zur Verfügung zu stellen.

Die Grenzen der Einflussgrößen können so festgelegt werden, dass übliche Rahmenbedingungen eines tagesbelichteten Raumes abgedeckt werden. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen den Grundriss und einen Schnitt eines typischen tagesbelichteten Raumes.

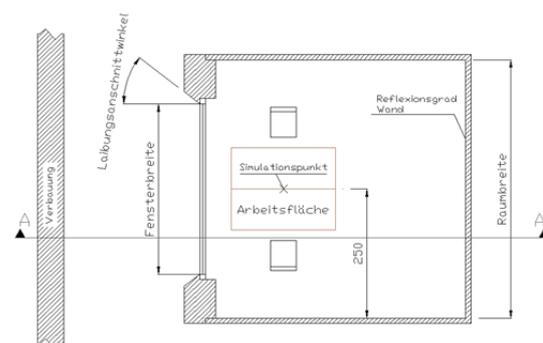


Abbildung 1: Grundriss

Die Parameter, die in dieser Studie variiert werden, sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Parameter beziehen sich dabei einerseits auf die Geometrie, andererseits auf die Oberflächeneigenschaften (Reflexionsgrade).

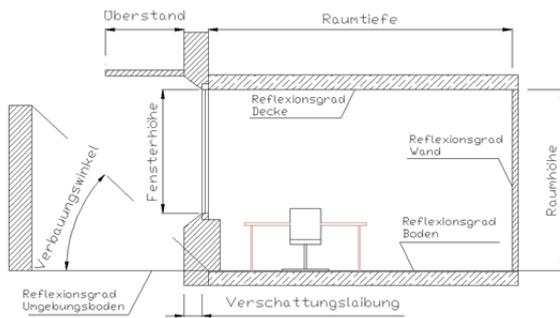


Abbildung 2: Schnitt

Tabelle 1
Variationsparameter

GEOMETRISCH	REFLEXIONSGRAD
Raubbreite	Wände
Raubtiefe	Decke
Raubhöhe	Boden
Fensterhöhe	Laibung
Fensterbreite	Verbaugung
Horizontale Verbaugung	Umgebungsboden
Verschattungslaibung	
Laibungswinkel	
Überstand	

DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)

Durch die Kombination der einzelnen Parameter entsteht eine Vielzahl an Varianten, die manuell nicht abgearbeitet werden können. Deshalb wird eine Design of Experiments Studie angewendet, in der die Variationen erstellt und mit einer Matlab-Radiance-Koppelung simuliert werden.

Abhängig von der Anzahl der Parameter und der Diskretisierung werden die Varianten bestimmt. Für diese Studie wird ein vollfaktorieller Versuchsplan verwendet.

Vollfaktorieller Versuchsplan

Bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan werden die Parameter so kombiniert, dass alle Kombinationsmöglichkeiten enthalten sind.

$$N = \prod_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

- N: Anzahl der Variationen
 n: Anzahl der Parameter
 a_i : Anzahl der diskreten Ausprägungen des Parameters i

Beispiel: Bei einem vollfaktorieller Versuchsplan mit 9 Variablen je 5-fach diskretisiert entstehen 1.953.125 Kombinationsmöglichkeiten.

Abhängig von der Anzahl der Variablen und Diskretisierung entsteht hier eine sehr große Anzahl von Varianten, im Gegenzug werden jedoch alle Haupteffekte und alle Wechselwirkungen berücksichtigt.

MATLAB-RADIANCE – KOPPELUNG

Der Ablauf der Matlab-Radiance-Koppelung wird in Abbildung 3 dargestellt. Mit dieser Koppelung wird eine Schnittstelle geschaffen, die es ermöglicht den großen Funktionsumfang von Matlab Radiance zur Verfügung zu stellen.

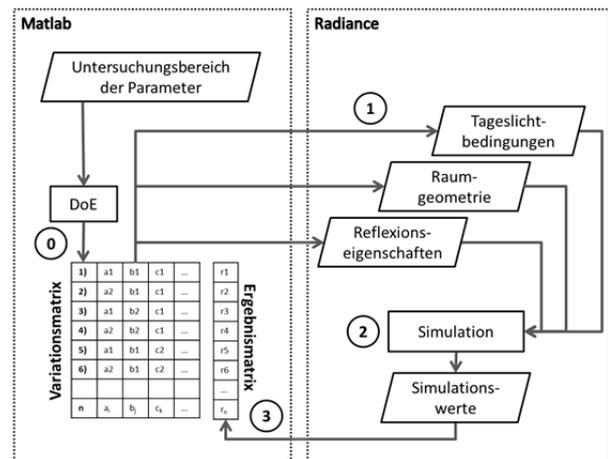


Abbildung 3: Schema der Kopplung

0 - Bestimmung der Variationsmatrix

Zunächst werden die Randbedingungen des Untersuchungsgebietes definiert. Die zu untersuchenden Parameter erhalten einen Minimal- bzw. Maximalwert. Aus der Anzahl der Parameter und deren Diskretisierung werden aufgrund des Versuchsplanes (vollfaktorielle Versuchsplanung) mit Hilfe der Software Matlab die Simulationsvariationen erzeugt. Es entsteht eine Matrix in der die Variationen mit deren einzelnen Parametern (Geometrie, Reflexionseigenschaften, Tageslichtbedingungen) definiert werden.

1 - Übergabe der Simulationsparameter

Nachdem die Variantenmatrix bestimmt ist, wird die Simulationsroutine gestartet und die Variationen werden systematisch abgearbeitet. Matlab erzeugt abhängig von den Variantenparametern die Radiance Eingabedaten. Das 3D-Modell wird aus den Geomtriedaten erzeugt, die Flächen mit den definierten Reflexionseigenschaften versehen und die Tageslichtbedingung erstellt. Als Tageslichtbedingungen können die CIE- bzw. die Perez-Himmelsmodelle verwendet werden. Somit sind sowohl klare bzw. gemischte als auch bedeckte Himmelszustände möglich.

2 - Simulation

Nach der Aufbereitung der Radiance-Daten wird die jeweilige Variante durch das Programm Radiance simuliert.

Es stehen folgende Ausgabewerte zur Verfügung:

- Beleuchtungsstärke [lx]
- Tageslichtquotient (TQ) [%] (nur bei bedecktem Himmel)
- Leuchtdichte (HDR-Bild) [cd/m²]

Weiterhin wäre auch eine Blendungsbewertung als Ausgabewert möglich, dies wurde bis jetzt noch nicht in der Simulationsroutine umgesetzt. Die Radiance-Simulationsparameter werden so gesetzt, dass selbst bei kritischen Varianten (starker Verbauung und hohem Reflexionsgrad) korrekte Werte erzeugt werden. Diese kritischen Varianten werden deshalb vorab einzeln abgeprüft um die richtigen Radiance-Einstellungen zu bestimmen.

3 - Übergabe des Simulationsergebnisse

Das Lichtsimulationsergebnis wird dann in einer Ergebnismatrix zu der zugehörigen Variante abgespeichert. Nach diesem Verfahren werden alle durch die DoE-Studie definierten Varianten abgearbeitet. Somit entsteht eine geschlossene Simulationsroutine, mit der ein definiertes Variationsgebiet automatisiert lichttechnisch untersucht wird.

AUSWERTUNG

Sensitivitätsanalyse und graphische Auswertung

Aus den Ergebnis-Daten lassen sich mittels Sensitivitätsanalyse die Einflüsse der Parameter auf die Tagesbelichtung auswerten.

Zusätzlich dienen Kontur-Plots der graphischen Darstellung der Ergebnisse (siehe auch Kapitel Ergebnisse der Parameterstudie).

Regressionsanalyse

Aufgrund der DoE – Studie ist der mehrdimensionale Untersuchungsraum wie oben beschrieben durch Stützstellen abgedeckt. Die Bereiche zwischen den Stützstellen lassen sich durch geeignete Verfahren ergänzen. Zur Verfügung steht hier die Regressionsanalyse. Es werden Regressionsmodelle verwendet, die auf einer Linearkombination von Basisfunktionen beruhen. Über eine Matlab-Funktion werden die Koeffizienten der Linearkombinationen bestimmt. Es entsteht eine Gleichung mit der Aussagen in der definierten Parameterstudie zu absoluten Werten ohne weitere Simulation möglich sind.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_2 + a_4x_2^2 + a_5x_3 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 \quad (2)$$

Quadratisches Modell mit drei Parametern und Wechselwirkungen

Lookup Tabelle

Alternativ können die Ergebnisse als Lookup-Tabelle zur Verfügung gestellt werden. Werte zwischen den Stützstellen werden durch Interpolation ermittelt.

PARAMETERSTUDIE

Im Folgenden wird die Umsetzung der Parameterstudie exemplarisch anhand folgender Einflussgrößen auf den Tageslichteintrag untersucht:

- Fensterbreite
- Fensterhöhe
- horizontale Verbauung
- Überstand
- Verschattungslaibung
- Anschnitt der Laibung
- Reflexionsgrad der Laibung
- Reflexionsgrad der Raumwände
- Reflexionsgrad der Decke
- Reflexionsgrad des Bodens im Raum

Als Ergebnisgröße wurde in dieser Arbeit der Tageslichtquotient TQ mit einem bedeckten Himmelsmodell (CIE, 1994) gewählt. Der Tageslichtquotient ist trotz der bekannten Limitationen (definiert nur für bedeckten Himmel, orientierungs- und klimaunabhängig (Mardaljevic, 2011)) ein sehr einfaches und beliebtes Tageslicht-Kriterium und wird deshalb seit Jahren in der Planung verwendet. Darüber hinaus basieren normative Richtlinien auch auf TQ-Berechnungen.

Der Messpunkt wurde in Raummitte mit einem Abstand von 1.5 m zur Fensterfläche und einer Höhe von 0.85 m angesetzt.

Diejenigen Parameter die nicht in den Diagrammen variiert werden, werden mit den Werten der folgenden Tabelle konstant gehalten.

*Tabelle 2
Simulationsparameter*

Parameter	Standard-Wert
Raubbreite	5 m
Raubtiefe	5 m
Raubhöhe	3 m
Fensterbreite (zentriert)	4.5 m
Fensterhöhe (sturzfrei)	2 m
Horizontale Verbauung	0°
Abstand hor. Verbauung	10 m
Verschattungslaibung	0.3 m
Laibungsanschnittwinkel	0°
Überstand	0 m
Reflexionsgrad Wände	50 %
Reflexionsgrad Decke	80 %
Reflexionsgrad Boden	30 %
Reflexionsgrad Verbauung	30 %
Reflexionsgrad Laibung	50 %
Reflexionsgrad Umgebungsboden	20 %

Die Transmissionsverluste bei diffuser Einstrahlung durch eine 3-Scheiben Isolierverglasung wurde über das Programm WINDOW6 (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008) berechnet ($T_{vis,diffus} = 0.64$). Der Fensterrahmen wird mit einem Faktor von 0.8 berücksichtigt. Die Simulationen werden ohne Mobiliar durchgeführt.

ERGEBNISSE DER PARAMETERSTUDIE

Einfluss der Raum- und Verbauungsgeometrie

Abbildung 4 zeigt die Sensitivitätsanalyse der Parameter Fensterhöhe, Fensterbreite, horizontale Verbauung und Überstand. Das Diagramm stellt die prozentuelle Änderung des Tageslichtquotienten TQ bei einer Veränderung der jeweiligen Parameter dar (Bezugspunkt des Parameters wird in der Legende angegeben). Wie zu erwarten, hat die Fenstergröße mit den Einflussgrößen Fensterbreite und Fensterhöhe (immer sturzfrei ausgeführt) den größten Einfluss auf das Simulationsergebnis. Es zeigt sich hier ebenfalls, dass eine Verglasung unterhalb der Nutzebene keine Verbesserung des TQs mit sich bringt. Die horizontale Verbauung wirkt sich im Bereich 0° bis 25° so gut wie nicht auf die Tagesbelichtung aus (siehe Definition Verbauungswinkel in Abbildung 2). Erst ab einem Winkel größer 25° erhält man eine Abnahme des Tageslichteintrages. Der TQ reduziert sich im Bereich von 25° - 50° um ca. 40 %. Die Verbauung wird immer mit einem Abstand von 10 m simuliert um den Einfluss der Reflexion des Umgebungsbodens konstant zu halten. Abbildung 4 zeigt ebenfalls die Sensitivität der Verschattung aufgrund eines Überstandes. Ein Überstand mit einer Tiefe von 1m reduziert den TQ um 60 %. Eine Vergrößerung des Überstandes von 1m auf 2m wirkt sich jedoch nicht so stark auf das Ergebnis aus (Reduktion des TQs von ca. 20 %).

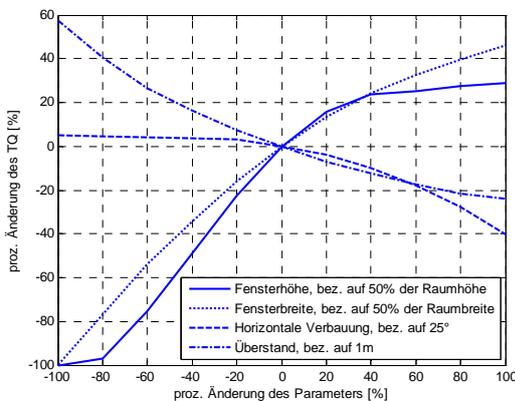


Abbildung 4: Einfluss der Raum- und Verbauungsgeometrie auf den TQ

Einfluss der Laibung

Im Folgenden werden die Stärke der Verschattungs-laibung, der Reflexionsgrad der Laibung und der Ansnchnitt der Verschattungs-laibung variiert. Abbildung 5 zeigt, dass sowohl die Dicke der Verschattungs-laibung, als auch der Reflexionsgrad und der Ansnchnittwinkel der Laibung sich zu der Tageslichtquotientenänderung nahezu linear verhält. Bei einer Änderung der Stärke der Verschattungs-laibung von 60 % ist unter den angesetzten Randbedingungen (siehe Tabelle 2) eine Änderung des TQs von knapp 15 % zu erwarten. Bei Sanierungsmaßnahmen mit zusätzlicher Außenwärmmedämmung lässt sich somit die TQ-Abnahme abschätzen.

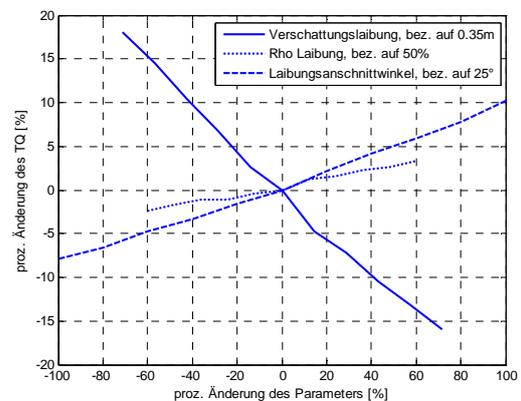


Abbildung 5: Einfluss der Laibung auf den TQ

Aus der Parameterstudie lassen sich auch Kontourplots (siehe Abbildung 6; durchgezogene Linien) erstellen, in denen die absoluten Werte direkt ablesbar sind. Bei einer Verschattungs-laibungstiefe von 25 cm erhält man beispielsweise einen TQ von ca. 6.8 %. Durch einen Laibungsanschnittwinkel von 45° kann dieser TQ wieder um ein 1 % auf 7.8 % erhöht werden. Durch einen Ansnchnittwinkel von 60° kann die Laibungverschattung fast vollständig kompensiert werden.

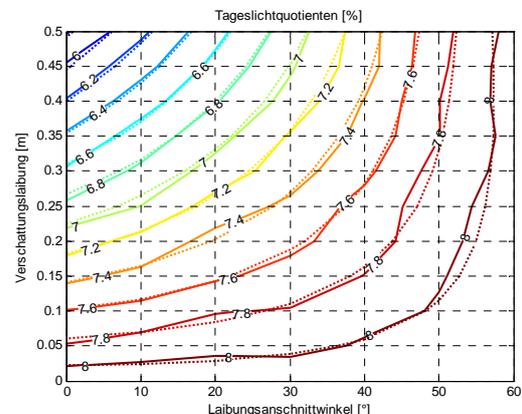


Abbildung 6: Zusammenhang von Laibung und Ansnchnittwinkel dargestellt als TQ-Isolinien (durchgezogen: Simulation; gepunktet: Regression)

Mittels Regressionsanalyse lässt sich dieser Zusammenhang (im Bereich Verschattungslaibung 0-0.5 m und Laibungsanschnittwinkel 0-60° und unter den Randbedingungen der Tabelle 2 auch als Funktion (3) ausdrücken.

$$TQ = 8.11308 - 5.20100x_1 - 0.00129x_2 + 0.07621x_1x_2 + 1.02487x_1^2 + 0.00004x_2^2 \quad (3)$$

$x_1 =$ Verschattungslaibung [m]
 $x_2 =$ Laibungsanschnittwinkel [°]

Dargestellt wird diese Funktion (3) in Abbildung 6 als punktierte Linie.

Auch durch die Erhöhung des Reflexionsgrades der Laibung lässt sich der Tageslichteintrag geringfügig verbessern. Abbildung 7 stellt diesen Zusammenhang in einem Kontur-Plot dar. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Reflexionsgradänderung mit der Stärke der Verschattungslaibung zunimmt. Dies ist auf die größere Reflexionsfläche der Laibung zurückzuführen.

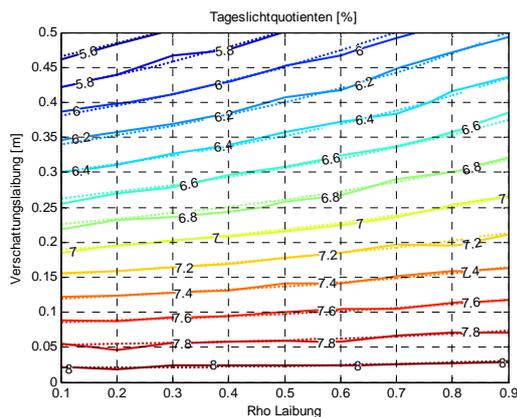


Abbildung 7: Zusammenhang von Laibungsstärke und Reflexionsgrad der Laibung dargestellt als TQ-Isolinien (durchgezogen: Simulation; punktiert: Regression)

Formel (4) beschreibt diesen Zusammenhang (im Bereich Verschattungslaibung 0-0.5 m und Reflexionsgrad Laibung 0.1-0.9 und unter den Randbedingungen der Tabelle 2) als Funktion und wird in Abbildung 7 als punktierte Linie dargestellt.

$$TQ = 8.1317 - 6.4996x_1 - 0.0408x_2 + 1.8476x_1x_2 + 1.8956x_1^2 + 0.0614x_2^2 \quad (4)$$

$x_1 =$ Verschattungslaibung [m]
 $x_2 =$ Reflexionsgrad Verschattungslaibung

Einfluss der Reflexionsgrade der Raumboberflächen

Die Reflexionsgrade der Raumboberflächen wirken sich ebenfalls auf die Tagesbelichtung aus. Hierbei spielt der Einfluss des Reflexionsgrades der Decke und der Wände eine größere Rolle als jene des Bodens. Insgesamt fällt der Einfluss der Reflexionsgrade jedoch gering aus (siehe Abbildung 8).

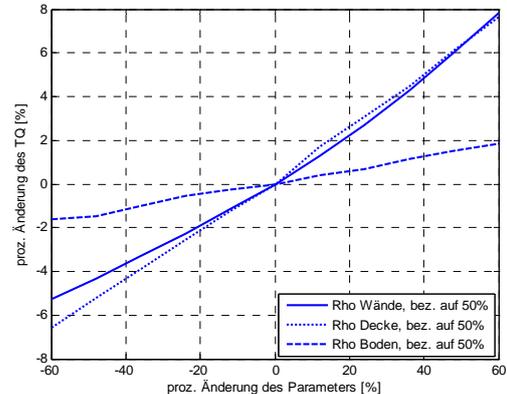


Abbildung 8: Einfluss der Reflexionsgrade der Raumboberflächen auf den TQ.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde gezeigt wie mit Hilfe einer Matlab-Radiance Koppelung eine Parameterstudie automatisiert durchgeführt werden kann. Die Kombinationsmöglichkeiten werden abhängig von der Anzahl der Parameter und der Diskretisierung erzeugt, die 3D-Geometrie erstellt und durch das Ray-Tracing Programm Radiance simuliert. Dies ermöglicht eine systematische Untersuchung der Abhängigkeit von Einflussgrößen auf den Tageslichteintrag. Die Umsetzung dieser Routine wurde anhand des Tageslichtquotienten gezeigt.

Durch die vorliegende Parameterstudie werden Aussagen zu allgemeinen Planungshinweisen möglich. So kann zum Beispiel durch Anchnitt der Verschattungslaibung die Abnahme des Tageslichteintrages durch große Laibungstiefen teilweise kompensiert werden.

Ebenfalls können die Ergebnisse des definierten Untersuchungsraums durch Regressionsverfahren bzw. Lookup Tabellen zur Verfügung gestellt werden. Für die verschiedenen Raumsituationen und Umgebungsparameter kann der Tageslichteintrag ohne weitere Simulation ausgewiesen werden.

AUSBLICK

Ziel ist es, diese Matlab-Radiance – Koppelung auf Verschattungs- bzw. Tageslichtsysteme anzuwenden um den Tageslichteintrag aufgrund von komplexen Fassaden systematisch untersuchen zu können. Erweiterbar ist diese Parameterstudie auf eine Blendungsbewertung. Somit wären auch neben der lichttechnischen Betrachtung Aussagen zum

visuellen Komfort möglich. Des Weiteren sind mit dieser Matlab-Radiance Koppelung auch die Voraussetzungen für Optimierungsprozesse geschaffen worden. Aussagen zu tageslichtoptimierten Geometrien werden damit möglich.

DANKSAGUNG

Das K-Projekt "K-Licht" wird im Rahmen von COMET - Competence Centers for Excellent Technologies durch BMVIT, BMWFJ und die Länder Vorarlberg, Tirol und Burgenland gefördert. Das Programm COMET wird durch die FFG abgewickelt.

LITERATUR

- CIE. (1994). Spatial distribution of daylight – Luminance distributions of various reference skies.
- European Council For An Energy Efficient Economy. (2011). *Nearly zero energy buildings : achieving the EU 2020 target.*
- Kunz von Kriegelstein. (2010). OSRAM - Beleuchtung die Zukunftstrends.
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2008). *WINDOW 6.2 / THERM 6.2 Research Version User Manual. Contract.*
- Mardaljevic, J. (2011). Opinion: Daylighting prescriptions: Keep taking the pills? *Lighting Research and Technology*, 43(2), 142-142.
- MathWorks. (2012). Matlab. Retrieved from <http://www.mathworks.com>
- Ward, G., & Shakespeare, R. A. (1998). Rendering with RADIANCE. *The Art and Science of Lighting Visualization.*