

Weiterentwicklung von Tageslichtsimulationstools

Jan Wienold, Christian Reetz, Roland Schregle, Augustinus Topor

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstr.2

Tel.: 0761 / 4588 - 5133, Fax.: 0761 / 4588 - 9133

79110 Freiburg

email: jan.wienold@ise.fraunhofer.de

Einleitung

In den vergangenen Jahren sind eine Vielzahl neuer Tageslichtsysteme entwickelt und auf den Markt gebracht worden. Dabei konnten viele Lichtplanungstools mit diesen Entwicklungen nicht in allen Bereichen Schritt halten. Diese können die Raumwirkung der meisten der neuen Systeme, aber auch der herkömmlichen Jalousiesysteme nur teilweise richtig wiedergeben. Auch wenn viele Anwender glauben, die Systeme modelliert zu haben, können die Programme aufgrund prinzipbedingter Schwächen diese Fälle nicht ausreichend genau berechnen.

Einer der Hauptgründe dafür ist, dass Rückwärtsstrahlverfolger (Backward-Raytracing) den Lichtweg vom Raum über ein kleines System (z.B. Jalousie von wenigen cm Größe) zur Sonne (Raumöffnungswinkel $0,5^\circ$) finden müssen. Da dies statistisch gesehen sehr unwahrscheinlich ist, werden diese Situationen insbesondere für spiegelnde Oberflächen deutlich falsch berechnet (Abweichungen im Einzelfall von mehreren 100% möglich). In diesem Beitrag wird eine Erweiterung des Tageslicht-Simulationsprogramms RADIANCE auf Basis eines Forward-Raytracers vorgestellt, die das vorgenannte Problem lösen kann.

Forward-Raytracing mit dem photon-mapping Verfahren

Das Prinzip des Photon-mapping basiert auf einem zweistufigen Verfahren:

Im 1. Schritt werden Photonen von der Lichtquelle in eine modellierte Szene geschickt und am Auftreffpunkt einer Oberfläche gespeichert.

Im 2. Schritt wird die Leuchtdichte einer Oberfläche durch „Einsammeln“ der Photonen im Umkreis der aktuellen Position bestimmt.

1. Schritt: Forward Raytracing – Aussenden von Photonen

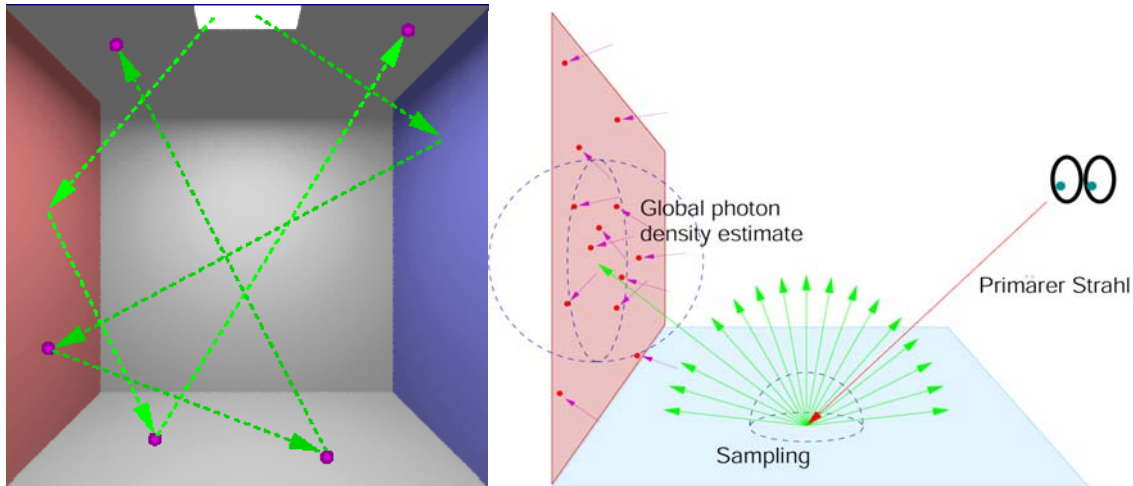
Treffen beim Aussenden der Photonen diese auf eine Oberfläche, so kommen die Materialeigenschaften der Oberfläche ins Spiel. Die Photonen werden dann „anteilig“ zu den vorliegenden Materialeigenschaften weitergeleitet. D.h. treffen z.B. 1000 Photonen auf eine diffuse Wand mit 70% Reflexionsgrad, so werden 700 reflektiert und mit einer Wahrscheinlichkeitsfunktion räumlich verteilt. Jeder Auftreffpunkt eines Photos wird in einer gesonderten Datei gespeichert. Die Photonen werden so lange im Raum verteilt, bis alle durch die Materialien absorbiert worden sind.

2. Schritt: Einsammeln der Photonen – Verwendung eines Backward-Schrittes

Im 2. Schritt erfolgt zunächst ein „Backward-Schritt“ des klassischen Algorithmus. Dieser wird benötigt, um ein Farbrauschen an Stellen mit geringer Photonendichte zu verhindern. Vom Betrachter aus werden primäre (Seh-)Strahlen in die Szene geschickt. Beim Auftreffen auf eine Oberfläche wird dieser Strahl mit dem im bestehenden RADIANCE implementierten Monte-Carlo-Verfahren gesampelt und in die Szene geschickt. Trifft ein

gesamelter Strahl nun auf eine Oberfläche, so wird an der Auftreffstelle die Photonen-dichte berechnet. Dazu wird die Datei mit den gespeicherten Photonen eingelesen. Dieses Einsammeln (sog. „Density-Estimate“) zählt Photonen im Umkreis der aktuellen Position auf der Oberfläche und schätzt anschließend die Photonendichte. Aus dieser wird dann die Leuchtdichte der Oberfläche bestimmt.

Dieses Verfahren wurde am Fraunhofer ISE in das Tageslichtsimulationstool RADIANCE eingebettet [Schregle]. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass ausgehend von der Lichtquelle (z.B. Sonne) die Photonen über beliebig spiegelnde und brechende Systeme in den zu untersuchenden Raum gelangen, ohne dass wichtige Lichtpfade „vergessen“ werden können.



Links: Photonenverteilung von der Lichtquelle ausgehend

Rechts: Schätzung der Photonendichte durch Dichteschätzung („Density estimate“)

Der prinzipielle Vorteil von Photon-Mapping gegenüber dem bestehenden Algorithmus wird bei einer Simulation von Spiegellamellen in einer realistischen Büroumgebung deutlich:



Links: herkömmlicher Algorithmus kann lichtlenkende Wirkung der Spiegellamellen nicht richtig wiedergeben

Rechts: Lichtlenkwirkung wird von Photon-Mapping richtig berechnet

Validierung des photon-mapping Algorithmus

Wichtig für die Anwendung neuer Simulationsverfahren ist die Zuverlässigkeit, mit der die Realität in der Simulation wiedergegeben werden kann. Aus diesem Grund wurden

umfangreiche Validierungsarbeiten durchgeführt. In einer ersten Stufe wurden einfache Szenen analytisch validiert. Für komplexere Fälle wurden Messungen an einer Testbox durchgeführt, die einem skalierten Modell eines Büroraumes ähnelt. Diese Testboxmessungen wurden mit unterschiedlicher Komplexität durchgeführt. Angefangen vom einfachsten Fall, einer Schwarzen Box (-> Validierung des Direktanteils) über eine einfache Reflexion eines weißen Stoffstückes bis hin zum komplexen Fall der spiegelnden Reflexion eines Alubleches in einer weißen Box wurden die Beleuchtungsstärkeverteilungen zwischen Messungen und Simulationen verglichen. Alle Fälle zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen Messung und Realität, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der photon-mapping Algorithmus und seine RADIANCE Implementierung physikalisch einwandfrei rechnen.

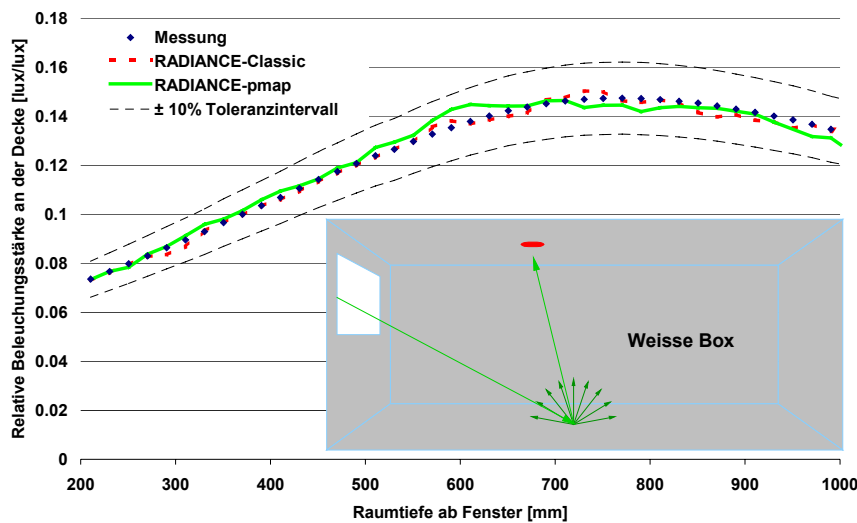


Bild links: Vergleich Messung - Simulation für eine weiß ausgekleidete Testbox. Dargestellt sind Messwerte, bisheriger RADIANCE Algorithmus („RADIANCE-Classic“) und photon-mapping („pmap“)

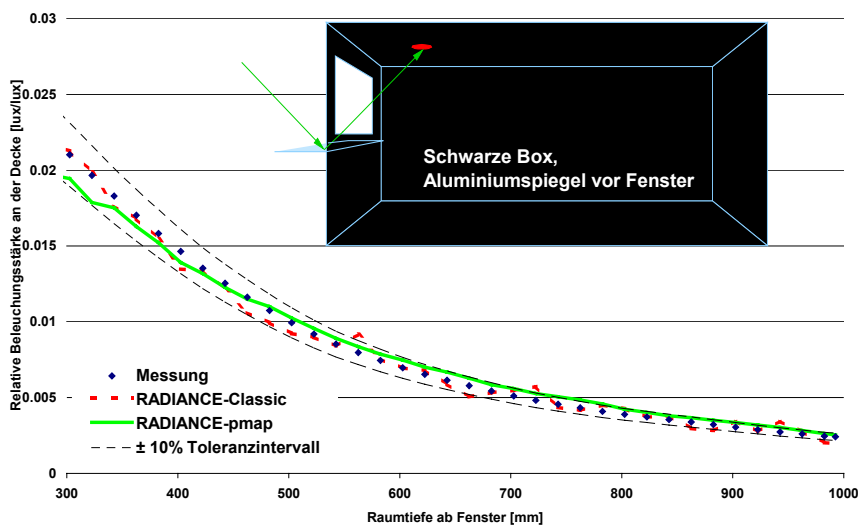


Bild links: Vergleich Messung - Simulation für eine schwarz ausgekleidete Testbox mit Aluminium-Lichtlenkblech. Dargestellt sind Messwerte, bisheriger RADIANCE Algorithmus („RADIANCE-Classic“) und photon-mapping („pmap“)

Bei den verspiegelnden Varianten ist der bisherige Backward-Raytracer trotz der einfachen Geometrie an seine Grenzen gestoßen, was sich in sehr langen Rechenzeiten niederschlägt. Das Photon-Mapping erzielt hier einen Performance Vorteil von 1:16 bis 1:39. Bei einer weiteren Erhöhung der Komplexität (z.B. übereinanderliegende Spiegel) könnte der bestehende Algorithmus die Messung nicht mehr wiedergeben.

Bei der Validierung des Algorithmus wurde ein anderes, generelles Problem von Lichtsimulationen offensichtlich: Die korrekte Materialbeschreibung („Materialmodellierung“). Eingesetzt wurde bei unseren Messungen ein weißer Moltonstoff, der mit dem Auge betrachtet perfekt diffus wirkt und dementsprechend modelliert wurde. Nach den ersten Vergleichen zwischen Messung und Simulationen wurde sehr schnell klar, dass das reale Materialverhalten anders sein muss, da die Form der Beleuchtungskurve in Raumtiefe verschoben war und somit Abweichungen von mehr als 20% aufgetreten sind. Messungen mit einem Goniophotometer bestätigen die Vermutung, dass unter flachem Einfallswinkel (z.B. 25°) eine erhöhte Reflexion in „Vorwärtsrichtung“ vorliegt. Erst mit dem Einsatz eines Materialmodells, das dieses Verhalten wiedergibt, konnte die Messung an der Testbox korrekt nachvollzogen werden.

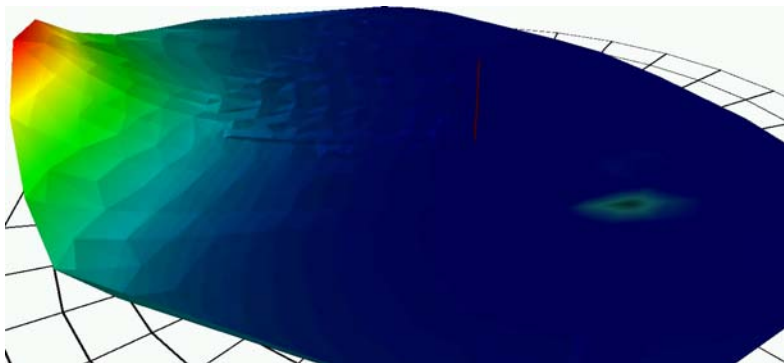
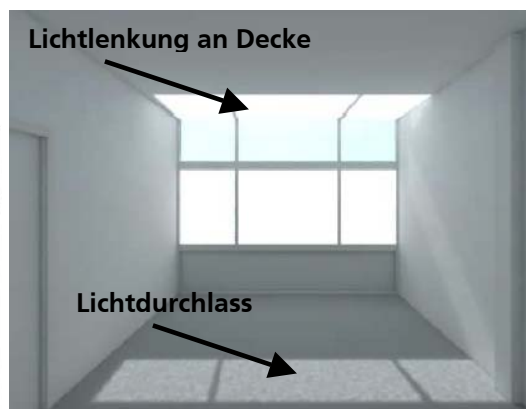
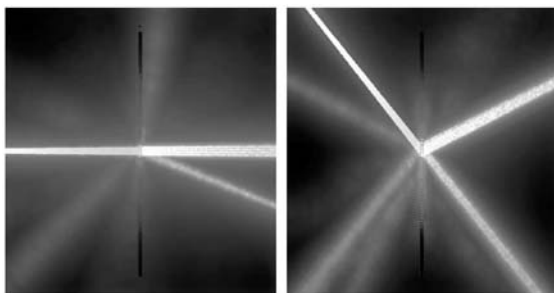


Bild links: gemessene Reflexionseigenschaften des eingesetzten Wandmaterials der Testbox (Weißer Moltonstoff) für 25° Einfallswinkel (BRDF-Messung) mit Peak in Ausfallsrichtung. Für dieses Materialverhalten wurde ein spezielles Materialmodell erstellt.

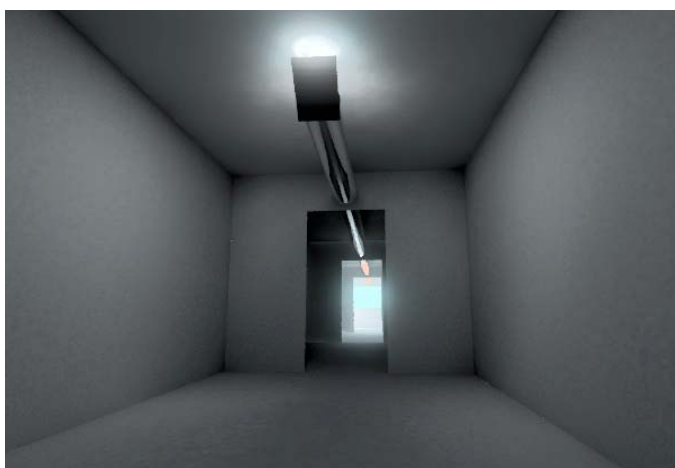
Weitere Berechnungsbeispiele

Y-Glas

Unten: Simulation des Strahlverlaufes bei senkrechtem (links) und 45° geneigtem (rechts) Einfall. *Rechts:* Visualisierung



Light-Pipe



Simulation einer von einem Heliostaten versorgten Light-Pipe. Deutlich erkennbar ist der Lichttransport durch die Röhre mit anschließendem Lichtaustritt an der Decke, die zur Beleuchtung des Raumes beiträgt.

Einschränkungen

Wie jedes Simulationsverfahren, weist auch das photon-mapping einige Schwächen auf, die an dieser Stelle erwähnt werden sollen:

- Da das Verfahren an Oberflächen die umliegenden Photonen einsammelt, ist eine Berechnung von Punkten auf einer virtuellen Ebene (d.h. auf Schreibtischhöhe an Punkten, wo sich in der Geometrie kein Objekt befindet) prinzipbedingt nicht möglich. Abhilfe schafft hier die Definition einer Fläche unterhalb der Berechnungspunkte, auf der genügend Photonen eingesammelt werden können.
- Berechnung von weit entfernten Lichtquellen, speziell Himmel: Für diesen Fall hat das Photon-Mapping ähnliche Probleme wie der Backward-Raytracer mit der Sonne. Die Wahrscheinlichkeit, dass vom diffus abstrahlenden (d.h. in alle Richtungen) Himmel Photonen in ein Gebäude fällt, ist relativ gering und somit der Rechenaufwand immens groß. Abhilfe schaffen hier die Definitionen von „Photon-Ports“ – dies sind festgelegte Oberflächen (Materialien), durch die Photonen in das Gebäude gelangen (z.B. Fensterglas). Ebenso besteht die Möglichkeit beide Verfahren zu kombinieren: Der Himmel ohne Sonne wird mit dem herkömmlichen Backward-Raytracer, die Sonne mit dem Photon-Mapping durchgeführt. Bei der Implementierung vom Photon-Mapping ins dynamische Simulationstool DAYSIM wurde dieses Vorgehen umgesetzt.

Weitere Arbeiten

Diese Arbeiten werden vom BMWA mit dem Förderkennzeichen 0329037G gefördert und in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP und Systemherstellern durchgeführt. Eines der Hauptziele dieses Forschungsprojektes ist die Bereitstellung einer integrierten Datenbank, die sämtliche Systemdaten, Materialmodelle, Kennwerte, Bilder und Anwendungsbeispiele zusammenfassen soll.

Aufgesetzt auf die Datenbank wird ein unabhängiges, benutzerfreundliches Programmmodul zur Berechnung und Analyse diverser Tageslichtsysteme. Eine erste Betaversion der Datenbank ist voraussichtlich Ende 2004 verfügbar.

Fazit

- Mit den beschriebenen Erweiterungen ist eine gezielte Auslegung und Bewertung von Tageslichtsystemen bereits in der Entwicklungs- und Planungsphase möglich.
- Das Photon-Mapping ist validiert und steht als download kostenlos unter <http://www.ise.fraunhofer.de/radiance> zur Verfügung
- Herkömmliche, scheinbar ideal diffuse Materialien müssen im Einzelfall sehr genau modelliert werden, um größere Abweichungen in den Simulationen zu vermeiden. Hierzu sind Materialmessungen unerlässlich

Referenzen

[Schregle] Roland Schregle: Daylight Simulation with photon-maps, Dissertation, Fraunhofer ISE, Verlag/Bezug stand bei Drucklegung noch nicht fest

[RADIANCE] Das Simulationsprogramm wurde am Lawrence-Berkley-Lab entwickelt und kann ohne Lizenzgebühren benutzt werden. Download :<http://www.lbl.gov>

Extension of daylight simulation tools

Jan Wienold, Christian Reetz, Roland Schregle, Augustinus Topor,
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr.2

Tel.: 0761 / 4588 - 5133, Fax.: 0761 / 4588 - 9133

79110 Freiburg

email: jan.wienold@ise.fraunhofer.de

In the past, many new daylight systems have been developed. Unfortunately the daylight simulation tools couldn't keep step with the time. They can't reproduce or reproduce only partly the behaviour of most of the new systems or of commonly used shading systems. Many of the users of those programs think, that they have successfully modelled the systems, but the programs have principal restrictions which lead to wrong simulation results.

One of the major reason for this is, that backward raytracing uses the ray path coming from the room over a small system (e.g. blinds with only some cm) to the sun (solid angle 0.5°). The chance for the raytracer is very small to find the sun, which leads to wrong results especially for high specular surfaces. The discrepancy can be more than 100%.

The Fraunhofer ISE implemented a forward raytracer into the RADIANCE simulation package, which makes it possible to simulate also high reflective materials accurately. This raytracer is based on the so called photon-mapping. This is a two step simulation method. In the first step, photons will be sent out by the source and distributed on all surfaces. In a second step, the density of the photons is estimated and from this estimation the luminance of the surfaces can be determined.

One major item in the development phase was the physical validation of the new code. For this reason, many measurements on a test box with office like shape have been performed. The graphs show, that the new raytracer can reproduce reality very good, the code is therefore validated.

The new tool is free and can be downloaded under:

<http://www.ise.fraunhofer.de/radiance>