

DIALux 4 mit neuem und verbessertem Rechenkern

Ein neuer Rechenkern

Im DIALux 4 ist erstmals ein neuer Rechenkern an die Kunden ausgeliefert worden. Dieses Modul berechnet den Strahlungsaustausch zwischen Leuchten und beliebigen anderen Flächen (Direktanteil), sowie den Strahlungsaustausch beleuchteter Flächen untereinander (Indirektanteil). Der Direktanteil muss nicht zwingend von Leuchten herrühren, auch die Beleuchtung durch den Himmel und direktes Sonnenlicht kann mit dem neuen Rechenkern ermittelt werden. Die verwendete Methode zur Berechnung ist die so genannte Radiosity Methode. Hieraus leitet sich auch der Name dieses Moduls ab. Aus Radiosity Calculator wurde RadiCal. Dieser Name war auch Programm bei der Entwicklung, es galt alle bisherigen Ansätze zu hinterfragen und modernste Forschungsergebnisse und Methoden in die Entwicklung einfließen zu lassen. Wer jetzt denkt, in der Mathematik wird sich doch wohl nicht viel geändert haben liegt falsch. Gerade auf dem Gebiet der Lichtberechnung wird viel geforscht und entwickelt. Nicht zuletzt die Spiele- und Filmindustrie bietet große Summen auf, um Fortschritte in der Qualität und insbesondere in der Geschwindigkeit der Berechnung zu erhalten.

Natürlich kann man auch einen Rechenkern von der Stange kaufen. Eine Recherche im Internet wird auf Anhieb mehrere Dutzend Treffer liefern. Doch für ein Lichtplanungswerkzeug wie DIALux ist der Zukauf keine Alternative. Zum einen gilt es ja nicht nur „schöne Bildchen“ zu machen, sondern auch die Berechnung lichttechnischer Kenngrößen ist für den Lichtplaner ein wesentlicher Bestandteil. Auch der Umgang mit „echten“ Lichtquellen ist etwas, was die wenigsten fertigen Rechenkerne auf dem Markt wirklich können. Neben der Geschwindigkeit der Berechnung und der Qualität der Visualisierung ist die Genauigkeit der Berechnung das wichtigste Gütekriterium für diese Software. Viele der üblichen Produkte versagen hier völlig bzw. liefern erst gar keine Zahlenwerte, sondern ausschließlich Bilder.

Die Funktionsweise des Radical

Radiosity

Wie der Name schon sagt, verwendet RadiCal zur Berechnung die „Radiosity Methode“. Es stellt sich automatisch die Frage, was ist Radiosity überhaupt? Radiosity^{1 2} ist eines von mehreren Berechnungsmodellen. Aufbauend auf dem Energieerhaltungssatz wird definiert, dass alles Licht, welches eine Fläche empfängt und nicht absorbiert wird, von dieser wieder emittiert werden muss. Weiterhin kann eine Fläche auch selbstleuchtend sein. Letzteres sind natürlich Leuchten oder Abschnitte des Himmels. Im Radiosity Verfahren wird nun für jede Fläche eine Gleichung aufgestellt, die das emittierte Licht aus dem von den anderen Flächen empfangenen Licht und, falls vorhanden, ihrer eigenen

Leuchtdichte bestimmt. Insgesamt ergibt sich damit ein Gleichungssystem, dessen Lösung die Helligkeit jeder einzelnen Fläche angibt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Berechnung standortunabhängig erfolgt. Ist der Fortschrittsbalken also einmal durchgelaufen, kann der Anwender die 3D Szene beliebig drehen oder durchwandern, um die Lichtwirkungen an allen Orten zu kontrollieren. Anwender von DIALux kennen diesen Vorteil bereits seit der Version 2.0. Als Nachteil muss sicherlich gesagt werden, dass (zur Zeit noch) ausschließlich ideal diffuse Reflexion angenommen wird. Ein eingehender Lichtstrahl wird also nicht gespiegelt, sondern in alle Richtungen gleichmäßig reflektiert. Allerdings gibt es Ansätze auch diesen Mangel der Radiositymethode in naher Zukunft beheben zu können. Bei der Entwicklung von RadiCal hat das DIAL modernste Techniken geprüft und diese bei Erfolg in die Software übernommen. Es zeigte sich, dass für die Berechnung realer Lichtszenen nicht jeder Modellansatz übernommen werden kann.

Adaptives Meshing

Wie geht nun solch eine Berechnung vor sich und warum sollte der Anwender dies wissen? Nun zum einen fördert es natürlich das Vertrauen des Lichtplaners in seine Software, wenn er weiß wie diese arbeitet und zum anderen kann er erkennen, wo die Schwierigkeiten bei der Berechnung liegen und weshalb manche Berechnungen eben aufwendiger und langwieriger sind als andere. Nachdem der Anwender in DIALux eine Geometrie zur Berechnung erzeugt hat, dies kann ein Raum oder eine Außenszene sein, wird diese an RadiCal übergeben und dort in Flächen und Patches unterteilt. Warum werden Flächen unterteilt? Nun, weil auf einer Fläche überall ein anderer Beleuchtungsstärkewert zu erwarten ist und auch nachgemessen werden kann. In der Norm finden sich Vorgaben für ein Raster z.B. in der DIN EN 12193 oder auch in der prEN 12464-2, sowie in vielen weiteren Richtlinien. Diese Vorgaben stellen jeweils eine maximale Patch Größe dar, die nicht überschritten werden soll. Berechnet werden soll dies mit der Formel:

$$p = 0,2 \cdot 5^{\log_{10} d}$$

Wobei „d“ die längere Abmessung der Fläche ist und „p“ die maximale Patch oder auch Raster-Zellen-Größe ist. Diese Formel hat nur gewisse Nachteile. Grundsätzlich ist an der Aussage, dass „p“ die maximale Patchgröße ist, nichts einzuwenden. Leider verwenden nur allzu viele Rechenprogramme diesen Wert als absolute Größe. Sie erhalten also auf einer 10m x 10m großen Fläche ein Berechnungsraster von 10 x 10 Punkten oder auch maximal 1m Patchgröße. Dies ist zum Nachmessen sicherlich ein vernünftiger Wert, zur Berechnung des Strahlungsaustausch in einem Raum kann dies jedoch nicht annähernd als ausreichend bezeichnet werden. In der Realität geschieht beim Nachmessen folgendes: nachdem die Strahlung von der Leuchte emittiert wurde und beliebig oft an den vorhandenen Flächen reflektiert wurde, nimmt der Empfänger die Beleuchtungsstärke an diesem Ort auf. Die Energieverteilung wurde dabei aber nicht eingeschränkt. Wird nun für die Berechnung ein Raster vorgegeben, kann die Verteilung der Energie nicht korrekt ablaufen, weil ja nur an diskreten Stützstellen (z.B. an 10 x 10 Punkten) der Strahlungsaustausch bestimmt wird. Je engstrahlender Leuchten sind, umso größer werden die Fehler die bei dieser Methode gemacht werden.



In dieser Abbildung erkennen Sie, dass überall dort wo die Beleuchtungsstärke auf einer Fläche sich deutlich ändert, eine Unterteilung der Fläche in kleinere Patches erfolgt. Moderne Lichtberechnungsprogramme kommen eigentlich ohne dieses so genannte „adaptive meshing“ nicht mehr aus. Die Lichtwirkung einer eng strahlenden Leuchte oder auch nur der Effekt der Anstrahlung, wenn eine Leuchte nahe an der beleuchteten Fläche montiert ist, lässt sich ohne solch feine Rasterung nicht darstellen. Auf der anderen Seite würde aber ein sehr feines Raster auf allen Flächen die Berechnungszeit und die Speichermöglichkeit jedes Rechners sprengen. Hier muss eine gute Software selbständig entscheiden können, wann eine weitere Unterteilung eines Patches notwendig ist und wann nicht. Natürlich ist die Berechnungszeit bei größeren Rastern deutlich kürzer. Der Zusammenhang Berechnungszeit – Rastergröße ist nicht linear sondern exponentiell, da ja jede Fläche (Patch) mit jeder anderen Fläche (Patch) einen Strahlungsaustausch vornehmen kann. Eine Verfeinerung des Rasters erfolgt natürlich nicht nur bei der Berechnung des direkten Lichtes, auch bei der Indirektberechnung ist dies notwendig.

Zusammenfassung von Rastern

Für eine schnelle und gute Lichtberechnung ist dies natürlich noch lange nicht alles. Stellen Sie sich vor, Sie möchten eine große Halle beleuchten. Die Anforderung hierzu lautet zum Beispiel 500lx auf der Nutzebene bei einer hohen Gleichmäßigkeit. Diese Beleuchtung realisieren Sie mit einem Feld von Langfeldleuchten, deren Reflektor so ausgelegt ist, dass auf der Nutzebene in einem definierten Bereich unter der Leuchte eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke entsteht (Batwing). Im Bereich des CutOffs der LVK, also dort, wo die Lichtstärke beginnt abzunehmen, wird auf der Nutzebene natürlich plötzlich eine deutlich geringere Beleuchtungsstärke erzeugt. Hier muss also eine Lichtberechnungssoftware fein unterteilen, um diese Effekte zu berechnen. Da in dieser Planung aber sehr viele Leuchten nebeneinander montiert werden, erzeugen die benachbarten Leuchten im Übergangsbereich ebenfalls eine Beleuchtungsstärke. Nachdem also alle Leuchten durchgerechnet wurden, wird eine „intelligente“ Berechnungssoftware feststellen, dass das Beibehalten des

feinen Rastern nicht notwendig ist. Durch die Vielzahl der Leuchten ergab sich auf der beleuchteten Fläche eine gleichmäßige Beleuchtung, deren Raster nun wiederum für die Indirektberechnung zusammengefasst werden kann. Durch diese Algorithmen lassen sich erhebliche Einsparungen in der Berechnungszeit erzielen bei Beibehaltung der hohen Berechnungsgenauigkeit.

Post Processing Grids

Oftmals ist der Anwender gezwungen Beleuchtungsstärkewerte in einem vorgegebenen Raster zu liefern. Sei es, weil der Kunde dies zu Überprüfungs-zwecken fordert, oder weil eine Vorschrift Vorgaben für ein solches Raster liefert. Der Berechnungskern des DIALux ist in der Lage, wie eine Messung in der Realität auch, diese Beleuchtungsstärken zu liefern. Wie oben bereits beschrieben, findet durch Messung kein oder akademisch betrachtet, nur ein sehr geringer Einfluss auf den Strahlungsaustausch im Raum statt. Das Messraster in der Realität hat auch keinen Einfluss auf die Photonerverteilung auf einer Fläche. Ebenso ist die Vorgehensweise im Radical. Nachdem der Strahlungsaustausch korrekt berechnet wurde, kann der Anwender die Ausgaben in einem beliebigen Raster anfordern. Da während der Berechnung bereits berücksichtigt wurde wo ein feines abtasten notwendig ist kann an beliebigen Stellen ein richtiges Ergebnis abgefragt werden.

Hierarchisches Radiosity

Das hierarchische Verfahren berechnet zunächst eine Link-Struktur oder auch Verknüpfungsinformation, die angibt welche Patches Licht austauschen³. Erst nachdem diese Link-Struktur erstellt wurde, findet der eigentliche Lichtaustausch statt. Die Link-Struktur wird anschließend verfeinert und der Lichtaustausch wiederholt. Dieser Prozess wird mehrfach iteriert. So gelangt man zu immer besseren Annäherungen an die tatsächlichen Beleuchtungsverhältnisse. Die Link-Struktur kann man als eine kompakte Darstellung der Form-Faktor-Matrix auffassen. Als Formfaktor bezeichnet man denjenigen Anteil der Sender-Energie, der den Empfänger erreicht. Der Formfaktor ist 1, wenn die gesamte Energie eines Patches auf ein anderes übertragen wird. Aufgrund der Größen- und Winkelverhältnisse ist der Formfaktor immer kleiner 1. Neben dem Sender- und dem Empfänger-Element werden Informationen über die Form-Faktoren und die Sichtbarkeitsverhältnisse gespeichert. Dieses Vorgehen hat einen enormen Vorteil. Dadurch ist DIALux in der Lage, verschiedene Energien gleichzeitig zu berechnen. Wenn der Anwender in DIALux eine Berechnung mit UGR Berechnungspunkten oder -rastern vornimmt, so muss die UGR Berechnung mit den „Neuwerten“ der geplanten Anlage erfolgen. Eine Berücksichtigung des Wartungsfaktors ist nicht erlaubt. Bei Planungen nach EN12464 muss der Anwender jeder Leuchte einen Wartungsfaktor zuweisen. Dieser ist von Leuchtentyp und Lampentyp abhängig. Es kann also kein globaler Faktor (z.B. früher 0,8) beaufschlagt werden. Bei einer Berechnung im Planungsprogramm muss also für die Ermittlung von Beleuchtungsstärken oder Leuchtdichten mit dem Wartungswert gerechnet werden, für UGR Berechnungen aber mit dem Neuwert. Dank des hierarchischen Radiosity kann dies im DIALux aber annähernd gleichzeitig geschehen, während Sie mit anderen Algorithmen entweder zwei Berechnungsdurchläufe machen müssen oder aber UGR Werte fälschlicherweise auf den Wartungswert beziehen.

Unterteilungsentscheidung

In kleinere Teilflächen aufgeteilt werden sowohl Sender- als auch Empfängerflächen. Hierbei spielt es keine Rolle, ob eine Senderfläche die Lichtaustrittsöffnung einer Leuchte ist oder eine beleuchtete Stelle an einer Wand. Um zu entscheiden ob ein Flächenelement unterteilt werden muss oder nicht, wird zuerst die Orientierung der beiden Flächenelemente zueinander bestimmt. Falls die Flächenelemente einander zugewandt sind, wird der Fehler abgeschätzt, der sich ergibt, wenn der Lichttransfer auf der aktuellen Unterteilungsebene stattfindet. Sind die Flächen nicht einander zugewandt, findet kein Strahlungsaustausch statt. Anhand der Berechnungswerte kann nun ermittelt werden, ob der Empfänger vor oder hinter dem Sender liegt, oder ob ein Teil der Empfängerfläche vor und ein anderer Teil hinter dem Empfänger liegt. Dies ist ein entscheidender Teil für eine genaue Berechnung. Kleine Abweichungen hier können zu großen Rechenabweichung führen. Bei der Berechnung der direkten Beleuchtung müssen 2 verschiedene Fehler abgeschätzt werden.

- Der Winkel unter dem die Empfängerfläche vom Sender gesehen wird ist nicht konstant. Deshalb ist auch die Lichtstärke, welche die Leuchte in Richtung Empfänger verlässt nicht konstant.
- Falls sich der Empfänger nahe beim Sender befindet, wird das photometrische Entfernungsgesetz verletzt. Wie der sich daraus ergebende Fehler abgeschätzt werden kann, kann man bei Hentschel ⁴ auf Seite 26 nachlesen.

Zuerst wird der Fehler, der sich aufgrund der nicht konstanten Lichtstärke ergibt, bestimmt. Dann wird der Fehler aufgrund des photometrischen Entfernungsgesetzes abgeschätzt. Der Gesamtfehler ergibt sich als Summe dieser beiden Einzelfehler. Die Entscheidung ob unterteilt werden muss oder nicht wird von einer speziellen Funktion getroffen. Nachdem die Orientierung bestimmt und der Fehler abgeschätzt wurde, wird der maximal erlaubte Fehler berechnet. Dieser wird immer auf den gesamten in der Szene vorhandenen Lichtstrom bezogen. Anschließend wird geprüft ob der abgeschätzte Fehler kleiner ist als der maximal erlaubte. Falls dies der Fall ist, muss nicht weiter unterteilt werden, ansonsten erfolgt eine Viererunterteilung und die Prüfung findet erneut statt.

Unterteilung bei der Indirektberechnung

Für die Entscheidung, ob eine Senderfläche unterteilt werden muss, ist es wichtig zu wissen, wie gleichmäßig diese beleuchtet ist. Ein Maß dafür erhält man wenn man die Beleuchtungsstärke eines Flächenelementes mit der ihrer Patches vergleicht. Flächenelemente deren Patches eine von der eigenen sehr stark abweichende Beleuchtungsstärke haben, weisen in diesem Sinn einen großen Fehler auf. Der Beleuchtungsstärkefehler ist kein Berechnungsfehler sonder nur ein Maß dafür, wie uneinheitlich ein Flächenteil beleuchtet ist. Der Beleuchtungsstärkefehler ist ein wichtiges Kriterium bei der Entscheidung ob ein Sender-Flächenelement unterteilt werden muss oder nicht. Auch eine Empfängerfläche muss gegebenenfalls bei der Indirektberechnung unterteilt werden. Dies geschieht vorab nach einer Prüfung falls der Formfaktor uneinheitlich ist. Danach erfolgt die Prüfung wie bei der Direktberechnung bereits beschrieben.

Tageslicht

Neu seit DIALux 4 ist die Möglichkeit, auch das Tageslicht zu berechnen. Die Bedeutung des Tageslichts als Mittel zur Energieeinsparung in der Beleuchtung nimmt stetig zu. Einen sehr großen und von vielen noch nicht wahrgenommenen Effekt wird die ab 2006 gültige EU Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden haben.^{5 6} Allein die beiden Zitate: „Gebäude haben Auswirkungen auf den langfristigen Energieverbrauch; daher sollten neue Gebäude bestimmten Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz genügen, die auf die klimatischen Verhältnisse vor Ort zugeschnitten sind.“ und „Auch größere Renovierungen bestehender Gebäude ab einer bestimmten Größe sollten als Gelegenheit für kosteneffektive Maßnahmen zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz betrachtet werden.“ weisen darauf hin, welche eine Planungsleistung dort auf die Fachplaner und insbesondere auch auf Lichtplaner zukommen wird. Ohne entsprechende Nachweise ist eine Baumaßnahme nicht zulässig. Unsere Gebäude werden Energiepässe erhalten, wie Sie sie bereits von Kühlschränken, Waschmaschinen und auch Lampen kennen. Dabei müssen Grenzwerte unterschritten werden, um überhaupt eine Genehmigung zu erhalten. Um für den Bereich Beleuchtung mit den richtigen Planungsdaten arbeiten zu können ist neben der Berechnung des künstlichen Lichtes auch die Berechnung des Tageslichtes notwendig.

Himmelstypen

Das größte Problem bei der Berechnung des Tageslichtes ist, dass man es eigentlich nicht berechnen kann. Schauen Sie doch einfach mal aus dem Fenster und betrachten Sie, wie sich in kurzer Zeit der Himmel verändert, Wolken vorbeiziehen und sich die Lichtsituation in Ihrem Büro ändert. Um dennoch Berechnungen durchführen zu können, muss man auf definierte/normierte Himmelsmodelle zurückgreifen. Im DIALux werden drei verschiedene Himmelstypen aus der CIE 110-1994 verwendet.⁷ Die drei Himmelstypen sind der bedeckte Himmel, der klare Himmel und der mittlere Himmel. Für die letztgenannten ist es möglich, das direkte Sonnenlicht mit einzubeziehen. Der jeweilige Himmelstyp wird durch seine Leuchtdichteverteilung beschrieben. Die Zenitleuchtdichten sind unterschiedlich und es können sogar für ein Modell verschiedene ausgewählt werden. Für den bedeckten Himmel verwendet DIALux die Zenitleuchtdichte nach Krochmann. Diese entspricht derjenigen nach DIN 5034.⁸ Dieses Modell wird für die Berechnung des Tageslichtquotienten herangezogen, direkte Sonne gibt es hierbei natürlich nicht.

Tageslichtberechnung

Die Himmelshalbkugel wird in dreieckige Patches unterteilt. Dabei wird die Himmelskuppel analog einem Globus entsprechend einer vorgegebenen Zahl an Azimut- und Höhenwinkeln eingeteilt. Auch der Radius dieser Himmelskuppel ist voreingestellt. Beim klaren Himmel wird bei Bedarf ein einzelnes Patch als Sonne hervorgehoben. Die Tageslichtberechnung ist der Direktberechnung vorgeschaltet und hat den gleichen Aufbau wie diese. Jedem Himmelspatch ist entsprechend dem Himmelstyp eine Leuchtdichte L zugeordnet. Die Berechnung des direkten Himmelslichtes erfolgt dann entsprechend dem photometrischen Entfernungsgesetz. Dabei wird jeweils das Licht eines einzelnen Himmelspatches oder Sonnenpatches auf die gesamte Szene übertragen. Auch hierbei muss eine Unterteilung der beleuchteten Flächen erfolgen. Ein Himmelspatch dagegen

muss nicht unterteilt werden. Die Entscheidung ob unterteilt werden muss oder nicht wird anders getroffen als bei Leuchten. Im Gegensatz zur Direktberechnung kann keine Entscheidung über Lichtstrom-Fehlerabschätzungen getroffen werden. Da das Himmelspatch unendlich weit entfernt ist, hat man auf einer bestrahlten Fläche keinen Gradienten, sondern nur die zwei Werte 0 und E_{sky} . Falls das Sonnen- oder Himmellicht in steilem Winkel einfällt und das Element dann auch noch vollkommen sichtbar ist, muss nicht weiter unterteilt werden. Sobald Flächen aber teilweise verdeckt sind, muss eine teilweise sehr feine Unterteilung erfolgen, damit Schattenverläufe berücksichtigt werden.

Genauigkeit der Berechnung

Vergleichsmöglichkeiten Benchmarking

Nachdem wir in einer kurzen Übersicht dargestellt haben wie eine Berechnung abläuft, gilt es natürlich auch zu Prüfen, wie genau eine Berechnung ist. Ein Problem für die Prüfung ist, festzustellen wie genau auch das Vergleichsobjekt bestimmt ist. Mittlerweile sind seit mehreren Jahrzehnten Lichtberechnungsprogramme auf dem Markt. In dieser Zeit wurden auch immer wieder Vergleiche durchgeführt, um festzustellen wie genau die eine oder andere Software ist. Nicht zuletzt Universitäten haben viel Forschungsarbeit geleistet, um solche Vergleiche vorzubereiten und durchzuführen. Dabei zeigte sich immer wieder, dass ein einfacher Vergleich „Planung mit Katalogwerten vs. Messung in der realen Situation“ zu sehr großen Abweichungen führte. Diese lagen aber vor allem darin begründet, dass die Ausgangsdaten für die Berechnung nicht mit den realen Daten in der Anlage übereinstimmten. Hier sind unter anderem zu nennen:

- Abweichung der realen Lichtverteilung zu den Messungen am Prototyp
- Abweichung des Lampenlichtstroms im Vergleich zum Nennwert
- Betrieb am Netz und Datenerfassung unter Laborbedingungen (z.B. 230V)
- Abweichungen in der Temperatur
- Abweichungen bei der Bestimmung von Reflexionsgraden einzelner Flächen
- Messgerätefehler, selbst bei Güteklasse B Geräten von 10%
- ...

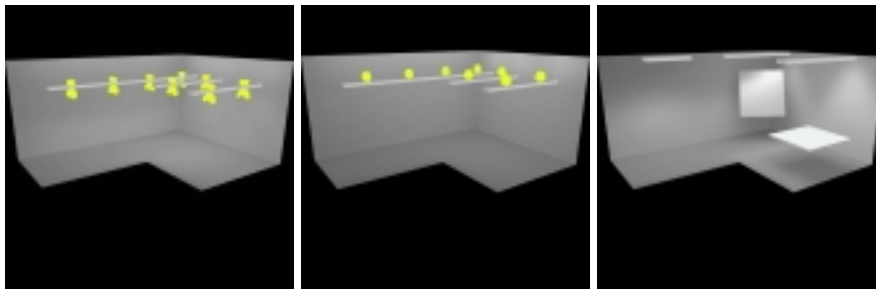
Will man also die Qualität einer Berechnungssoftware prüfen und nicht feststellen, wie groß der Fehler in der gesamten Messkette ist, muss man versuchen alle Einflussparameter zu minimieren. Alle Daten die für die Berechnung verwendet werden sollten also möglichst genau mit den Vergleichswerten übereinstimmen. Hierzu bieten sich folgende Mess-Rechenvergleiche an.

Mess- Rechenvergleich durch Prüfung im akkreditierten lichttechnischen Labor des DIAL

Das DIAL ist als Hersteller einer Lichtberechnungssoftware in einer besonderen Situation. Es verfügt nämlich als einziger Hersteller gleichzeitig auch über ein akkreditiertes lichttechnisches Labor.⁹ In diesem Labor wurden Leuchten und Lampen unterschiedler Arten (Lampentypen, Lichtverteilungsarten, Montagearten,..) gemessen. Diese Leuchten/Lampenkombinationen wurden in

genau der Kombination wie sie im Goniophotometer gemessen wurden auch in einem Versuchsraum montiert. In dem Versuchsraum wurden die Leuchten erneut unter Laborbedingungen betrieben. Der Raum hat einen L-förmigen Grundriss und maximale Kantenlängen von 6m x 4,5 m. Die Deckenhöhe beträgt 2,75m. Der Messraum wurde aus Holzelementen hoher Planheit gefertigt. Mögliche Einflussfaktoren, die zu systematischen Unterschieden zwischen Berechnung und Messung führen können, wurden so gering möglich gehalten. Der Anstrich erfolgte unbunt und möglichst nahe den Reflexionsgraden 70%, 50% und 20% für Decke, Wände und Boden, die Abweichungen betragen weniger als 1%. Zur qualifizierten messtechnischen Überprüfung einer Beleuchtungsstärkeverteilung muss ein hinreichend feines Messraster gewählt werden, das reproduzierbar und mit vertretbarem Aufwand positionierbar ist. Natürlich muss die Überprüfung der Beleuchtungsstärkeverteilung auf allen Raumbegrenzungsflächen, einschließlich der Decke, erfolgen. Für die untersuchten Beleuchtungsstärkeverteilungen wurde ein quadratisches Messraster mit 25 cm Seitenlänge gewählt. Dies stellt einen sinnvollen Kompromiss aus Messzeit und Genauigkeit der Abtastung dar. Im Raum befinden sich lichttechnisch praktisch nicht wirksame Platzierungshilfen, die eine Photoelement-Zeile reproduzierbar aufnehmen. Im Falle hoher Gradienten im Beleuchtungsstärkeverlauf, lässt sich das Messraster stufenlos adaptieren. Für den Mess- Rechenvergleich wurde die absolute Lichtstärkeverteilung für die Berechnung verwendet. Unter anderem wurden folgende Beleuchtungssituationen verglichen:

- Direkt - Indirekt strahlende Langfeld – Pendelleuchten
- Indirekt strahlende Langfeld – Pendelleuchten
- Direkt strahlende Langfeld – Pendelleuchten im möblierten Raum



Mittlere Beleuchtungsstärken auf der Nutzebene	Direkt - Indirekt strahlende Langfeld – Pendelleuchten	Indirekt strahlende Langfeld – Pendelleuchten	Direkt strahlende Langfeld – Pendelleuchten im möblierten Raum
Oberer Wert der globalen Fehlertoleranz	763	352	688
Oberer Wert der Messtoleranz	745	344	672
Messwert	718	331	647
Berechneter Wert	691	318	633
Unterer Wert der Messtoleranz	691	318	622
Unterer Wert der globalen Fehlertoleranz	673	298	603

Wobei die Abschätzung des Wertes für die Messtoleranz der mittleren Beleuchtungsstärke $\pm 3,8\%$ beträgt und für die globale Fehlertoleranz der mittleren Beleuchtungsstärke $\pm 6,3\%$.¹⁰ Für die Fehlerabschätzung wurden die Abschätzungen des CIE TC 3.33 übernommen. Die Abweichungen der mittleren Beleuchtungsstärken, die für den Planer sicherlich relevanteste Größe, liegen innerhalb der Messgerätetoleranz und somit ist eine Aussage ob der Messwert oder der Rechenwert „richtiger“ ist, nicht möglich. Einzelne Beleuchtungsstärken zeigten auch größere Abweichungen auf, für diese gelten auch größere Fehlertoleranzen.

Ein Messpunkt steht immer stellvertretend für ein Raster von 0,25m x 0,25m. Auf solch einer Fläche ist durchaus mit einem Beleuchtungsstärkeverlauf zu rechnen. Daher ist es wahrscheinlich, dass die Ergebnisse der Rechnung, aufgrund der feineren Unterteilung genauer waren, als jene der Messung. Minima und Maxima konnten bei der Berechnung genau lokalisiert werden, bei der Messung hat man Glück, wenn Rechenraster und Extremwerte zufällig in Deckung liegen.

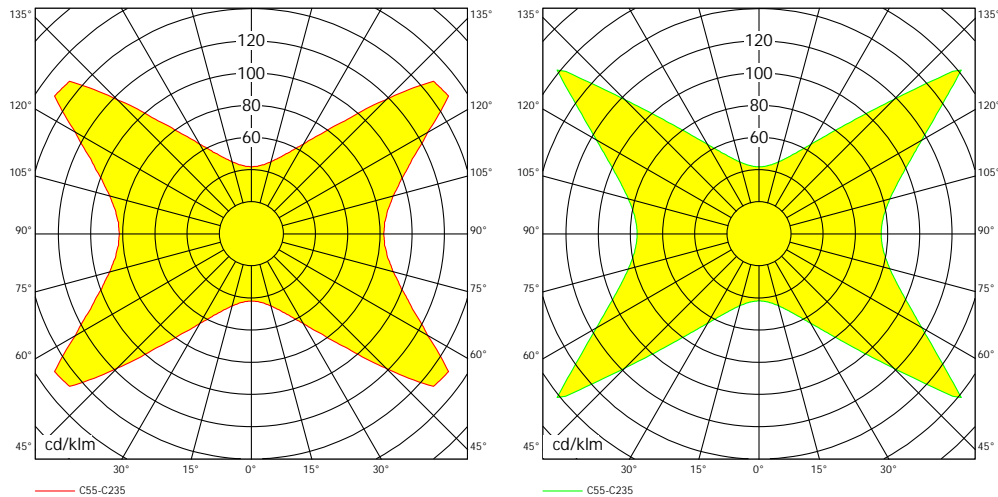
Vergleich einer Berechnung mit einer analytisch lösbaren Situation

An der Universität Karlsruhe fanden vor einigen Jahren zahlreiche Vergleichstest von Lichtberechnungsprogrammen statt¹¹. Unter anderem wurde in einem Kubischen Raum eine Beleuchtungssituation vorgegeben. Simuliert wurde ein Testraum mit einer Kantenlänge von 5m x 5m x 5m mit ideal matt reflektierenden Raumflächen. Die im Zentrum angeordnete Lichtquelle mit einem Lichtstrom von 15.000 Lumen hat eine Lichtstärkeverteilung, die in jedem Punkt auf allen Raumflächen die gleiche direkte Beleuchtungsstärke von 100 lux erzeugt. Auch die indirekte Beleuchtungsstärke auf den Raumflächen ist für jeden Punkt der Raumflächen theoretisch gleich groß und beträgt bei einem Reflexionsgrad von 50% ebenfalls 100 lux. Dies lässt sich einfach mit der Formel

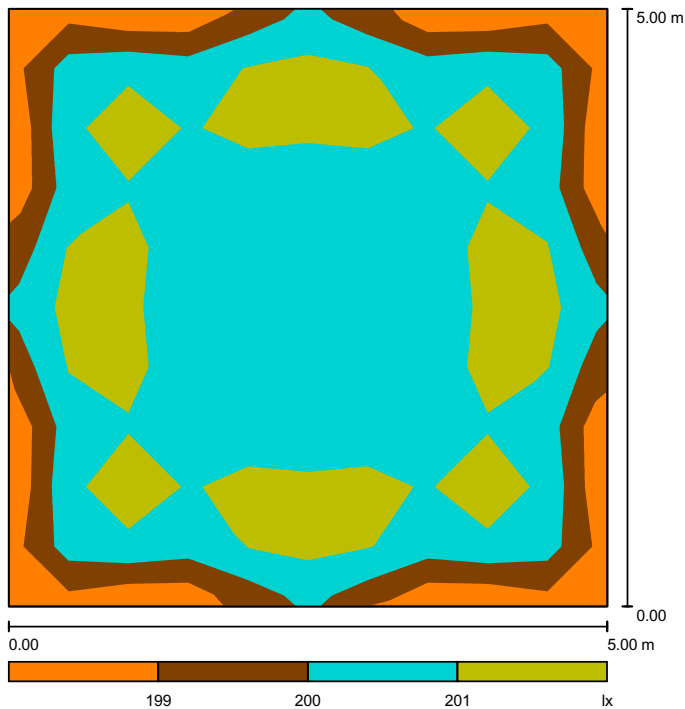
$$E_{ges} = E_{dir} + E_{ind} = E_{dir} + E_{dir} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} = 100lx + 100lx \cdot \frac{0,5}{1 - 0,5} = 100lx + 100lx = 200lx$$

nachrechnen. Abweichungen von diesen Referenzwerten sind einfach zu erkennen und helfen beim Testen des Programms. Die im originalen Test verwendete Lichtstärkeverteilung wies allerdings einen Schwachpunkt auf. So war die LVK im Schrittwinkel C 15 und Gamma 5 Grad definiert. Da diese LVK

aber unter bestimmten Winkeln plötzlich stark abknickt, nämlich vor allem da, wo sie in der Geometrie des Raumes auf eine Kante trifft, reicht eine Auflösung von 15° bzw. 5° nicht aus. Um genaue Aussagen auch in den Bereichen der Ränder der betrachteten Raumflächen machen zu können, ist es notwendig die LVK mindestens im 1° Schrittwinkel für C und Gamma zu erzeugen.



Diese beiden Diagramme zeigen die Test LVKen in 15° und 5° Auflösung und in 1° und 1° Auflösung in der C55-C235 Ebene. Wie man an den Spitzen deutlich erkennen kann, ist eine Auflösung alle 15 und 5 Grad nicht ausreichend. Während rechts die LVK bis in die Ecken voll dargestellt wird, kann die linke LVK nur die fehlenden Werte interpolieren und somit nicht richtig berechnen. Fehlende Werte, insbesondere in Bereichen von Cutt Offs, können niemals richtig interpoliert werden. Um eine Berechnung richtig durchführen zu können, muss eine Leuchte richtig gemessen werden. Dies bedeutet, dass eng strahlende Leuchten und normale Leuchten im Bereich eines Cut Offs eben enger als 15 bzw. 5 Grad gemessen werden müssen. Dies stellt die heutige Messtechnik oder den Speicherplatz der Daten lange nicht mehr vor besondere Herausforderungen.



Diese Falschfarbendarstellung zeigt die berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung auf einer der Raumflächen dieses kubischen Raumes.

Die Berechnungsergebnisse lauten:

E_{av} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	u_0	E_{min} / E_{max}
201	198	202	0.99	0.98

Bei einer ausschließlichen Berechnung des Direktanteils erhält man erwartungsgemäß 100lx für Min- Mittel- und Maximalwert. Die Abweichung des Mittelwertes beträgt 1lx oder 0,5%. Selbst die Abweichung der Minimal- und Maximalwerte betragen nur 1%. Diese Ergebnisse zeigen die hohe Qualität der Berechnung.

Vergleich mit den Testszenarien des CIE TC 3.33

Das Technical Comity 3.33 der CIE hat sich zum Ziel gesetzt, dem Entwickler und Anwender von Lichtberechnungsprogrammen Möglichkeiten an die Hand zu geben die Genauigkeit von Berechnungsprogrammen abzuschätzen. In einem technischen Bericht (Entwurf von 2004) wurden verschiedene Testszenarien definiert, die einer Berechnungssoftware als Messlatte dienen sollen. Ebenso wie in den Tests des DIAL wurden hier sowohl reale Beleuchtungssituation als auch analytische Testfälle definiert. Die verschiedenen Testfälle prüfen jeweils unterschiedliche Qualitäten einer Berechnungssoftware ab. Im folgenden werden einige der Ergebnisse des Vergleichs von DIALux mit den TC 3.33 Werten aufgelistet.

Test 1 Gemessenes Ergebnis für freihängende Kompaktleuchtstoffröhren

In diesem Test wurde in einem rechteckigen Raum ein Feld von 2 x 2 freistrahrenden Kompaktleuchtstofflampen montiert. Die Lampen wurden zuvor fotometrisch gemessen. Für die Überprüfung der Software, liegen dem Dokument die Fotometrischen Daten der Lichtquellen und die Messergebnisse bei.¹⁰

Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	91	107	115	118	116	107	93
MB UL	85	100	108	110	108	100	87
1	69	77	84	87	84	77	70
MB LL	65	77	83	85	83	77	67
TE LL	59	70	75	77	76	70	61
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	103	124	130	129	129	124	105
MB UL	96	116	122	120	121	116	98
2	75	82	91	94	91	81	76
MB LL	74	89	94	93	93	89	75
TE LL	67	81	85	84	84	81	68
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	112	132	141	141	141	131	113
MB UL	105	123	132	132	132	122	106
3	83	92	101	106	101	92	84
MB LL	81	95	101	102	101	94	81
TE LL	73	86	92	92	92	86	74
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	115	133	143	146	143	133	116
MB UL	108	124	133	137	133	124	108
4	86	96	107	110	106	96	87
MB LL	83	96	103	105	103	96	83
TE LL	75	87	93	96	93	87	76
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	113	132	141	140	141	132	112
MB UL	105	124	131	131	131	123	105
5	84	92	101	105	101	91	81
MB LL	81	95	101	101	101	95	81
TE LL	74	86	92	92	92	86	73
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	103	124	130	127	130	123	104
MB UL	97	116	121	119	121	115	97
6	76	82	91	94	91	81	75
MB LL	74	89	93	92	93	89	75
TE LL	68	81	85	83	85	81	68
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	92	108	116	117	115	108	92
MB UL	86	100	108	109	107	100	86
7	70	77	85	88	85	77	70
MB LL	66	77	83	84	83	77	66
TE LL	60	70	76	76	75	70	60

Table 1: Upper and lower limits for measurement points illuminance with Gray wall-CFL lamp
 TE UL is the total error band upper limit; TE LL is the lower limit
 MB UL is the measurement band upper limit; MB LL is the lower limit

In den Zeilen 1, 2, 3, 4, 5 und 6 sind die Berechnungsergebnisse von DIALux eingetragen. Der besseren Erkennbarkeit halber sind alle Werte innerhalb der Messgerätetoleranz grün dargestellt, alle Werte innerhalb der globalen Fehlertoleranz aber außerhalb der Messgerätetoleranz blau dargestellt. Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle Werte innerhalb der globalen Toleranz liegen, 75,51 % sogar innerhalb der Messgerätetoleranz.

Ein ähnlich gutes Ergebnis zeigt der zweite Testfall des TC 3.33. Hier wurden anstelle der frei brennenden Lampen Opale Leuchten eingesetzt. Alle berechneten Werte liegen innerhalb der globalen Toleranz, 67,4% sogar innerhalb der Messgerätetoleranz.

Nahezu perfekt ist das Ergebnis der Berechnung des Testfall 3 „Artificial lighting scenario – Semi Specular Reflector Luminaire, gray wall“. 100% der Berechnungswerte liegen innerhalb der Messgerätetoleranz

In den folgenden Testszenarien wurden die Reflexionseigenschaften der Wände, Decke und Boden auf unter 6% +/-1% reduziert. Dadurch lässt sich eine Aussage über die Qualität der Berechnung des Direktanteils machen. Die Ergebnisse lagen zu 74%, 98% bzw. 100% innerhalb der Messtoleranz und zu 100% innerhalb der globalen Toleranz.

Die nächste Testreihe (Testreihe 5.2 bis 5.7, fehlende Nummern wurden nicht ausgelassen sondern beziehen sich auf Kapitel ohne Testszenarien) befasst sich mit der Überprüfung der Software im Vergleich zu analytischen Modellen. Hierbei war immer eine vollständige Übereinstimmung der berechneten Werte mit den analytisch ermittelten Werten gegeben.

Beispiel Testszene 5.6

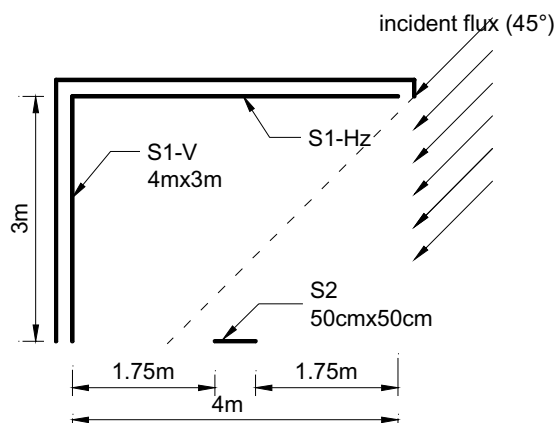


Figure 1: Test case description for S₂ of 50cm×50cm

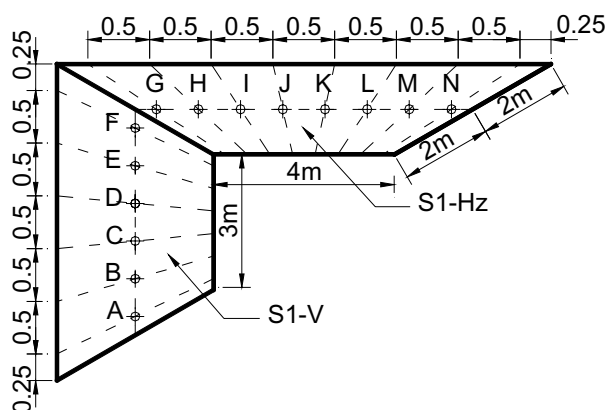


Figure 2: measurement points position

(S₂: 50x50cm)

Points de mesure sur S1-v						
	A	B	C	D	E	F
E/(E _h x _p) (%)	0,246	0,580	0,644	0,556	0,433	0,325
DIALux	0,245	0,577	0,646	0,558	0,431	0,323
Error(%)	0,4	0,52	0,31	0,36	0,46	0,62

Points de mesure sur S1-hz								
	G	H	I	J	K	L	M	N
E/(E _h x _p) (%)	0,491	0,639	0,778	0,864	0,864	0,778	0,639	0,491
DIALux	0,489	0,636	0,783	0,861	0,861	0,783	0,636	0,489
Error(%)	0,4	0,47	0,64	0,34	0,34	0,64	0,47	0,4

Table 1: variation of E/(E_hx_p) for S₂ of 50cmx50cm

Die nächsten Testfälle waren für das DIAL besonders von Interesse. Handeln diese doch das im DIALux neue Thema Tageslichtberechnung ab. In der Kunstlichtberechnung haben wir mittlerweile sehr viel Erfahrung sammeln können. Die Berechnung des Tageslichts war Neuland, umso erfreuter waren wir, auf Anhieb im Vergleich mit der CIE so gute Ergebnisse erzielen zu können.

Die folgende Testszene beschreibt einen rechteckigen Raum mit Oberlicht. Es geht darum, den Tageslichtquotienten im Innenraum richtig zu bestimmen.

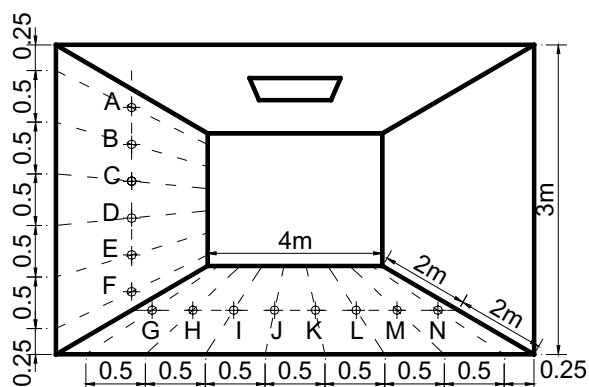


Figure 3: geometry and measurement points description

	Tageslichtquotienten an der Wand					
	A	B	C	D	E	F
CIE couvert	0.56	1.78	2.32	2.20	1.82	1.43
DIALux	0.56	1.91	2.35	2.09	1.81	1.37
Error(%)	0	6.8	1.28	5	0.55	4.2

	Tageslichtquotienten auf dem Boden							
	G	H	I	J	K	L	M	N
CIE couvert	2.29	3.07	3.82	4.29	4.29	3.82	3.07	2.29
DIALux	2.39	3.19	3.76	4.22	4.35	3.91	2.92	2.31
Error(%)	4.18	3.91	1.57	1.63	1.38	2.3	4.89	0.87

Zusammenfassung

Anhand dieser Beispiele sollte dem Anwender aufgezeigt werden, dass er mit DIALux über ein genaues Hilfsmittel zur Berechnung von Beleuchtungssituation verfügt. Natürlich lässt es sich nicht ausschließen, dass unter besonderen Umständen die Abweichungen zwischen Rechenwerten und Messwerten größer werden. Besondere Probleme können dann auftreten, wenn in den Berechnungssituationen die Grenzfälle der Annahmen der Photometrie erreicht werden. Im Nahfeld der Leuchte gilt nun mal die LVK nicht mehr, jegliche Annahme die eine Software machen muss, ist dann eine Abschätzung und nicht mehr physikalisch mit Zahlenwerten belegt. Gleiches gilt natürlich, wenn in einem Vergleichsszenario vorwiegen hochglänzende oder spiegelnde Materialien zum Einsatz kommen. Die Methode der klassischen Radiosity Berechnung trifft hier vereinfachende Annahmen. Für die normalen Fälle der Lichtplanung im Innen- und Außenbereich ist aber die Qualität der Berechnungen des DIALux höchst zufrieden stellend. Der intelligente Berechnungskern sorgt dafür, dass immer entsprechend der Erfordernisse eine optimale Lösung im Hinblick auf Berechnungsgenauigkeit und Berechnungsgeschwindigkeit erzielt wird.

¹ M.F. Cohen, J.R. Wallace: Radiosity and Realistic Image Synthesis, Academic Press Professional (1993)

² F.X. Sillion, C. Puech: Radiosity \& Global Illumination, Morgan Kaufmann Publishers (1994)

³ P.Hanrahan, D.Salzman, L.Aupperle: A Rapid Hierarchical Radiosity Algorithm

⁴ H.J. Hentschel: Licht und Beleuchtung, 5. Auflage

⁵ RICHTLINIE 2002/91/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

⁶ DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung

⁷ CIE 110-1994 Technical Report, Spatial Distribution of Daylight - Luminance Distributions of Various Reference Skies

⁸ DIN 5034-1983 Tageslicht in Innenräumen

⁹ DAR Registriernummer: DAT-P-085/98-01 vom 05.06.2003 gültig bis 04.06.2008

¹⁰ CIE TC.3.33 Technical Report, Draft, March 16th 2004

¹¹ Zuverlässigkeit lichttechnischer Planungsprogramme, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe, Dr. S. Kokoschka