

## **Anwendungen der Lichtsimulation in der Scheinwerfer- und Leuchtenentwicklung**

***Dipl.-Ing. Henning Kiel***

***Volkswagen AG***

***Brieffach 1582, D-38436 Wolfsburg***

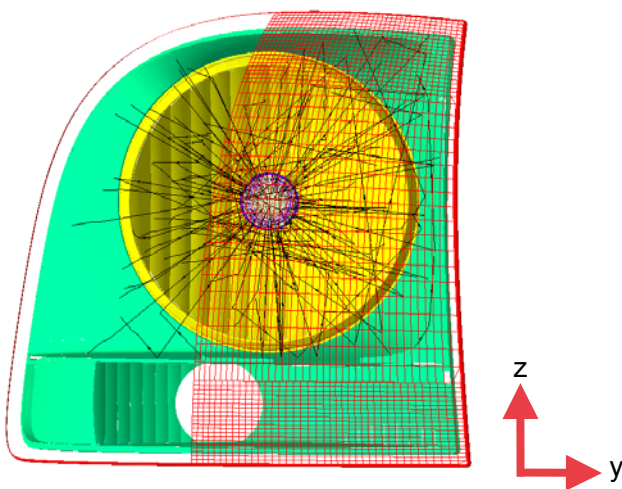
### **Einleitung**

In der Scheinwerfer- und Leuchtenentwicklung wird verstärkt das Prinzip des Frontloading verfolgt. Das bedeutet es werden immer mehr Entscheidungen im Entwicklungsprozess frühzeitig durch virtuelle Techniken abgesichert, anstatt Prototypen aufzubauen. Gerade in diesem Produktbereich ist dieser Weg besonders sinnvoll, da die Forderung nach höherer Flexibilität durch die verstärkte Designrelevanz der Leuchten am Automobil wächst. Zudem verbessern sich die Werkzeuge zur Umsetzung der Lichtsimulation, die eine maßgebliche virtuelle Technik darstellt, stetig. Das liegt beispielsweise an optimierter Raytracing Software, der Entwicklung von Messinstrumenten zur Digitalisierung von Lichtquellen und Materialien und nicht zuletzt an der sich bekanntermaßen rasant entwickelnden Rechenleistung der Computer. So wurden im Volkswagen Konzern entsprechende Mittel geschaffen, um abgesicherte Entscheidungen auf virtueller Basis zu treffen [1]. Die Zielstellungen sind dabei hauptsächlich das Absichern gesetzlicher Anforderungen und das Bereitstellen der Daten für eine Visualisierung der Nachtfunktion von Leuchten. Im Folgenden sollen spezielle Anforderungen sowie weitere Potentiale aufgezeigt und anhand von Beispielen veranschaulicht werden.

## Genauigkeiten der Simulation

Die Herausforderung einer zweckmäßigen Lichtsimulation im Automobilbau besteht vorrangig in der geeigneten Modellierung. Hier wird in verschiedene Stufen der Modellierungstiefe unterteilt, die dem jeweiligen Zweck und Entwicklungsstand dienlich sind [2]. Damit die aus der Lichtsimulation gewonnenen Aussagen nicht nur relative sondern auch weitestgehend absolute Gültigkeit besitzen, muss die Modellierung umfassend sein. Das heißt beispielsweise es müssen, soweit zum Stand der Produktentwicklung möglich, alle Geometrien einbezogen werden [3]. Die richtige Modellierung der Streuung and Reflektoren und Blenden darf dann ebenfalls nicht vernachlässigt werden [4]. Weiterhin ist die exakte Modellierung oder Messung von Lichtquellen für hinreichend genaue Ergebnisse nötig [5].

Die Nahfeldgoniometrie ist ein bedeutendes Glied in der Kette der Lichtsimulation [6]. Neben der Vermessung und Digitalisierung von Lichtquellen und Leuchten bietet sie auch die Möglichkeit zur Verifizierung der Simulation. Nach Fertigung einer Leuchte kann diese vermessen, durch einen Strahldatensatz repräsentiert, und in der Simulationssoftware unter den gleichen Parametern ausgewertet werden, mit der auch eine Simulation beurteilt wurde. Die Abweichung enthält dann den Fehler der Fertigung, der Messung und der Simulation.



**Abb. 1:** Datenmodell der Rückleuchte

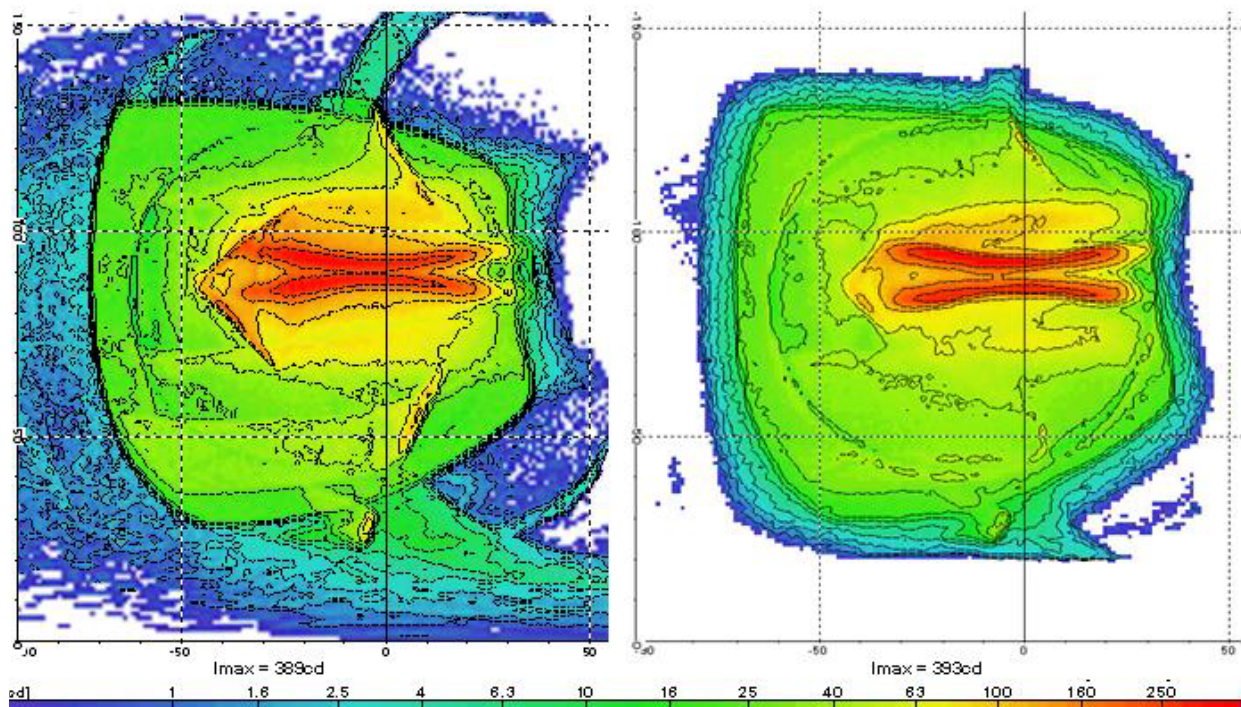


**Abb. 2:** Foto der Rückleuchte

Am Beispiel einer Rückleuchte in Stopplichtfunktion, wie in Abbildung 2 dargestellt, soll diese Verifizierung anhand von Lichtstärkeverteilungen und

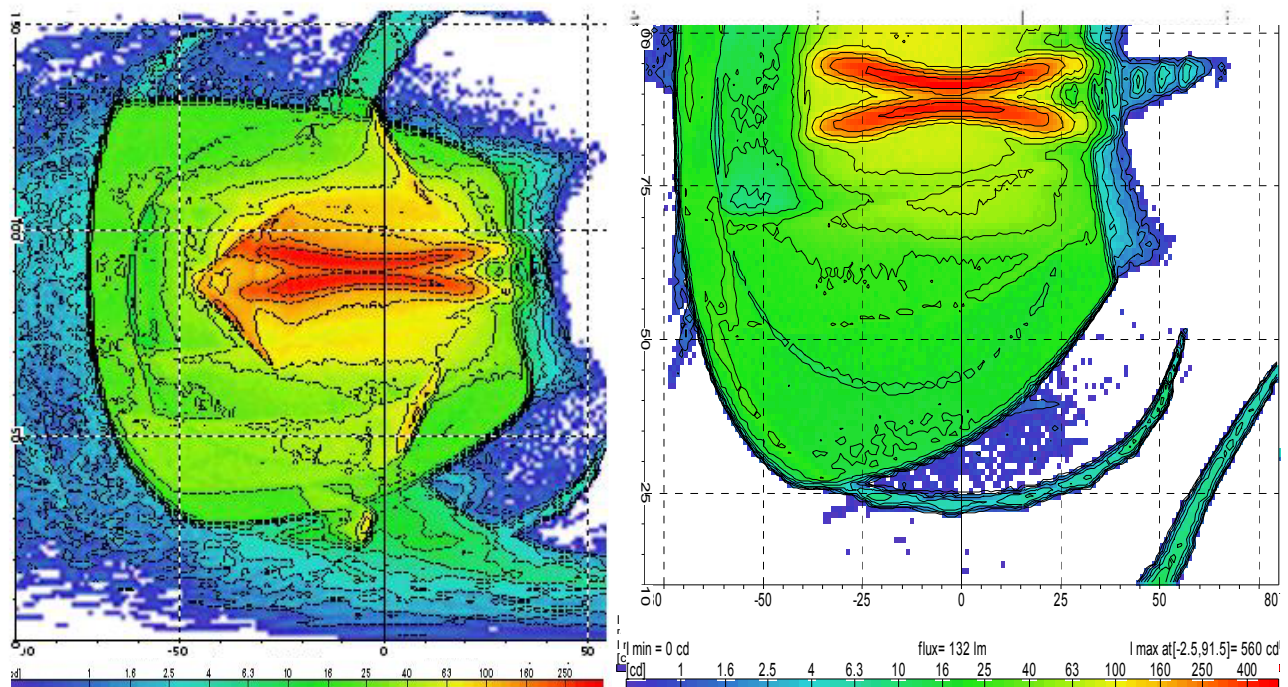
Leuchtdichtedarstellungen demonstriert werden. Das zugehörige CAD Modell und die symbolische Darstellung von einigen Strahlen ist in Abbildung 1 enthalten.

Die Abbildung 3 zeigt links eine Lichtstärkeverteilung, die aus der Simulation generiert wurde und rechts die Verteilung aus der Messung. Man erkennt zuerst typische Effekte wie flachere Gradienten in Kantenbereichen im rechten Bild, aber auch eine schlecht übereinstimmende, pfeilförmige Charakteristik im Bereich  $-40^\circ$  der Abszisse und  $90^\circ$  der Ordinate. Die Übereinstimmung der maximalen Lichtstärken und des Gesamtlichtstroms mit 143 Lumen der Messung rechts zu 158 Lumen der Simulation links sind dagegen befriedigend. Die Gesamtlichtströme sind nicht uneingeschränkt vergleichbar da die Bewertungsbereiche nicht identisch sind. Dies ist durch die in der Messung fehlenden Werte in den Randbereichen der rechten Grafik sichtbar.



**Abb. 3** Lichtstärkeverteilung aus Simulation li. und Messung re. ; logarithmische Darstellung

Wie zuvor angesprochen ist für verbesserte Qualität der Lichtsimulation das Einbringen und Modellieren sämtlicher Geometrien wichtig. Die Abbildung 4 zeigt rechts eine aus der Simulation gewonnene Lichtstärkeverteilung der Leuchte ohne Blende und ohne Modellierung der Streuung auf dem Reflektor, was einer üblichen Praxis für die schnelle Auslegung zu einem frühen Entwicklungsstand entspricht. Die Blende ist in Abbildung 1 grün dargestellt.



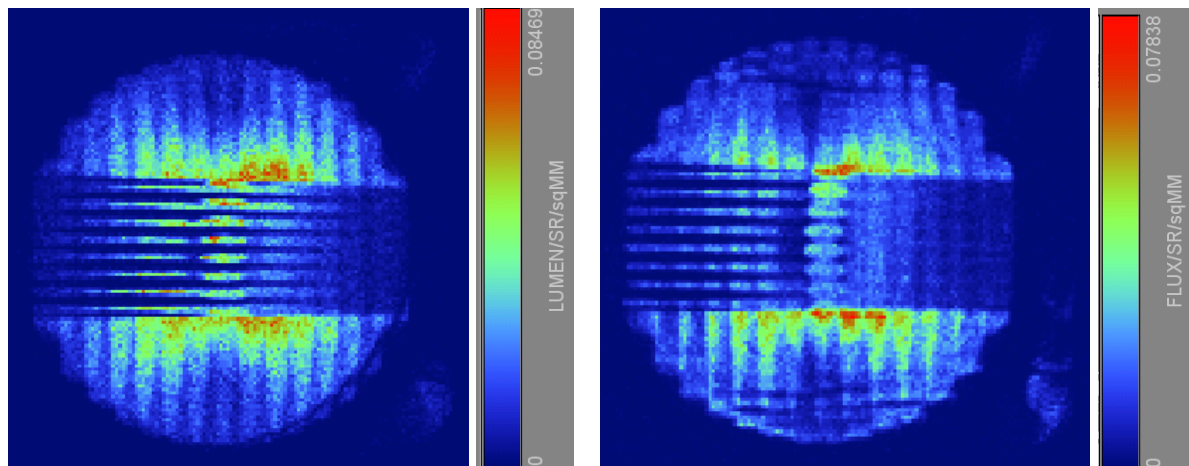
**Abb. 4** Lichtstärkeverteilung aus kompletter Simulation li. und Simulation der Leuchte ohne Blende und ohne Streumodell auf Reflektor re.

Anhand der Verteilung wird auch deutlich, dass diese Blende für die zur Messung abweichende Charakteristik verantwortlich ist. Das fehlende Streumodell auf dem Reflektor führt zudem zu stark erhöhten maximalen Lichtstärken. Weiterhin ist eine Abweichung der doppelbogenförmigen Charakteristik mit hohen Lichtstärken im Zentrum der Verteilung zu erkennen. Die „Bögen“ sind bei der Simulation enger zusammen positioniert als bei der Messung. Dieser Fehler konnte anschließend einer Abweichung der Wendelposition um  $x \approx -1\text{mm}$  von der Konstruktionsvorgabe zugeordnet werden. Allein die Norm ECE 37 lässt dabei eine Toleranz einer Wendel einer P21W von  $\pm 0.3\text{mm}$  in dieser Richtung zu. Da diese Abweichungen der Lichtverteilung im Bewertungsbereich der gesetzlichen Zulassungsvorschriften liegen, sollten für eine lichttechnische Absicherungen eines Leuchtenkonzeptes sämtliche Bauteile einbezogen und Abweichungen vom idealen Verhalten betrachtet werden. Unter Berücksichtigung des Leuchtenkonzeptes betrifft das auch Toleranzen der Fertigung.



Eine weitere Auswertung des Simulationsergebnisses erfolgt über eine Leuchtdichtedarstellung. Die Leuchtdichte kann bei richtiger Wahl von Raumwinkel und Skalierung einen annähernden Helligkeitseindruck der Leuchte vermitteln.

Der Vergleich von Strahldaten aus Messung und Simulation lässt hierbei die Verwendung von Raumwinkeln zu, die für das Forward Raytracing praktikabel sind, da genügend Strahlen zur rauschminimierten Darstellung nötig sind. [1] [7] [8]



**Abb. 5:** Leuchtdichtedarstellung aus Simulation li. und Messung re. ; Falschfarbendarstellung

Auch bei dieser Darstellungsform ist eine gute Übereinstimmung der Verteilung bzw. der Werte erkennbar. Sinnvoll ist die Leuchtdichtedarstellung somit beispielsweise als Basis für Homogenitätsuntersuchungen oder um erste Vorstellungen vom Erscheinungsbild einer Leuchte in Funktion zu erhalten.

Somit können diese Auswertungen nicht nur zur Beurteilung des Fehlers einer Simulation herangezogen werden, zudem können damit auch gezielt Einflussfaktoren und Fehlergrößen ermittelt und gegebenenfalls minimiert werden.

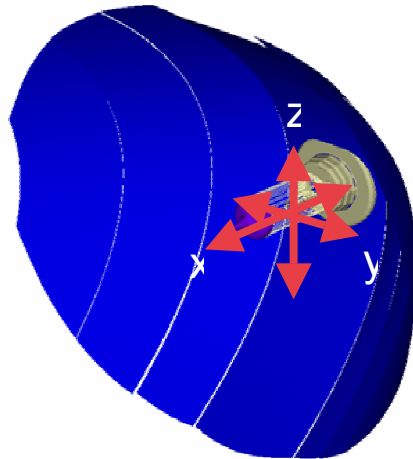
Raytracing bietet nun, abhängig vom verwendeten Simulationsprogramm, vielfältige prinzipielle Analyse und somit Kontroll- und Optimierungsmöglichkeiten. Die Software speichert umfassende Informationen über den Weg des Lichtstrahls durch ein System und der Pseudo-Zufall der Strahlgenerierung im Raytracing Prozess kann stark minimiert werden. Somit hat das Verändern eines Systemparameters einen direkten Einfluss auf das Simulationsergebnis. Dies ist bei Verwendung einer Reihe von Hardware Modellen ungleich unflexibler, teurer und indirekter. Seitdem die Lichtsimulation im Automobilbau hinreichend genau gestaltet werden kann und auch

komplexere Systeme in einer angemessenen Zeit simulierbar sind, können Variationen und Optimierungen effizient durchgeführt werden. Dies soll sich in nachfolgenden Beispielen erläutert werden.

### Positionierungstoleranzen der Lichtquelle

Es wurde gezeigt, dass eine scheinbar gering abweichende Position der Lichtquelle bedeutenden Einfluss auf die lichttechnische Charakteristik der Leuchte haben kann. Exemplarisch soll deswegen das Verschieben einer Lichtquelle in einem Abblendlichtscheinwerfer angeführt werden. Die Position der Wendel hängt von den Toleranzen der Lampe und von den Toleranzen der Lampenhalterung ab. Letztere sind in der Praxis oftmals deutlich größer, da die Mechanik preisgetrieben und die Toleranzkette vom Lampensockel bis zum Reflektor lang ist.

Die Lichtsimulation gibt nun die Möglichkeit solche Einflussfaktoren oder Toleranzen direkt zu ermitteln. So wurde eine Reihe von Simulationen erstellt, bei der die Verschiebung der Lichtquelle in Z-Richtung der veränderte Parameter war. Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch die CAD Geometrie einer Lampe im Reflektor, die relativ zueinander verschoben wurden.

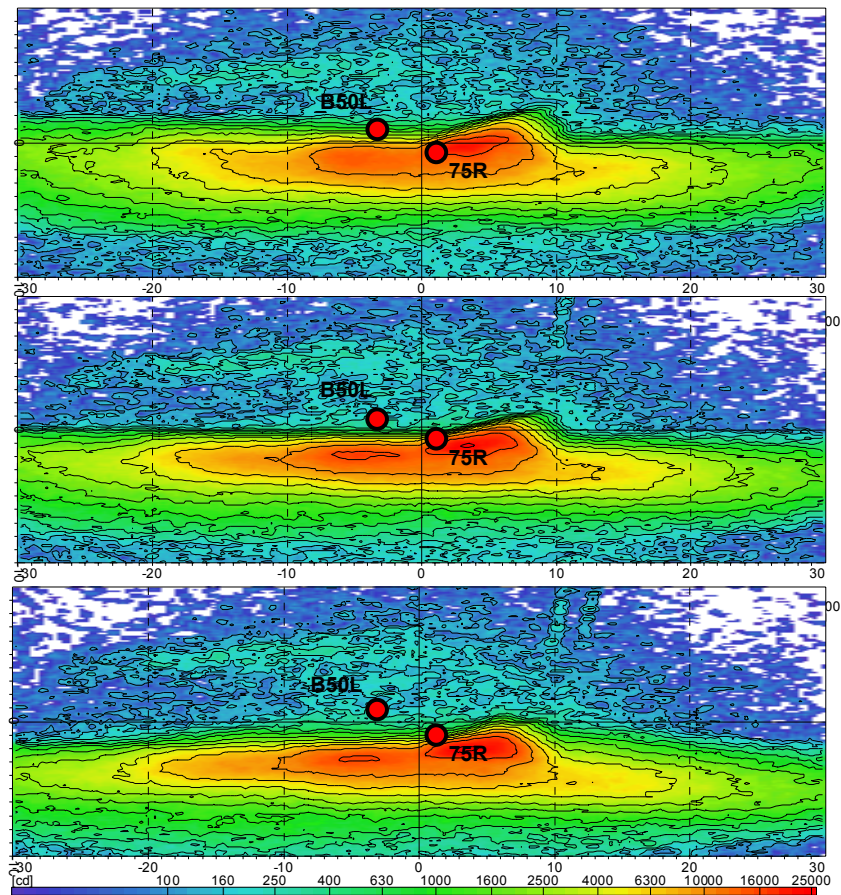


**Abb. 6:** CAD Modell des Reflektor und der Lampe  
und Koordinatensystem der Verschiebung

Die Berechnung ergab eine deutliche Abweichung der Hell-Dunkel-Grenze in der Höhe und im Gradienten und ein Abflachen des 15° Anstiegs als bedeutende

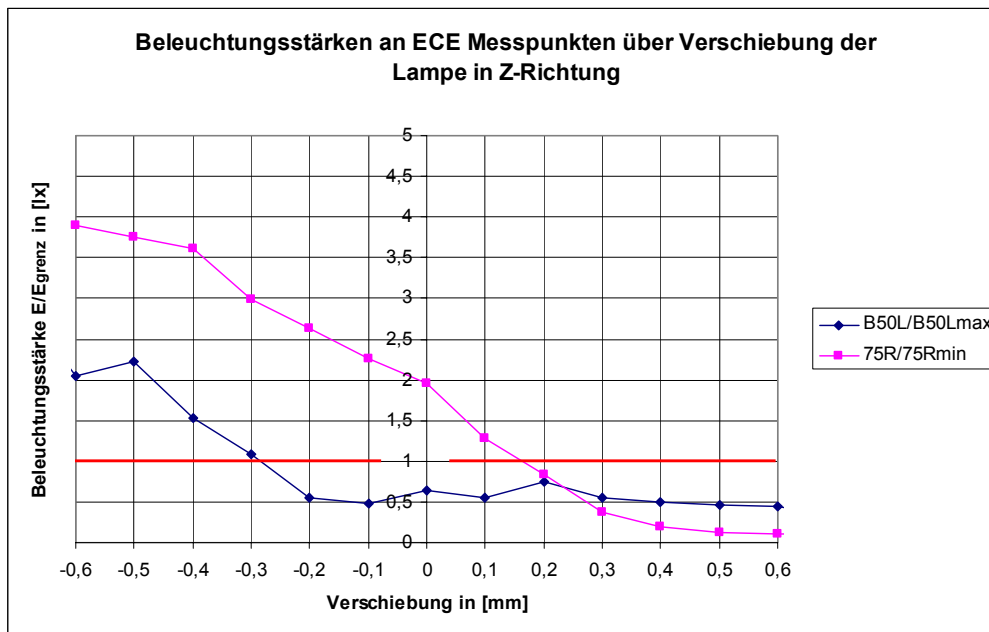
Auswirkungen einer Verschiebung. Das beeinflusst unter anderem die Blendung des Gegenverkehrs und vermindert die Reichweite auf der Strasse.

Dies ist in Abbildung 7 anhand der resultierenden Lichtverteilungen zweier Extremwerte und der Nulllage dargestellt.



**Abb. 7:** Lichtstärkeverteilung des Abblendlichts mit Versatz der Lampe um  $z = -1$  mm (oben),  $z = 0$  mm, (Mitte),  $z = 1$  mm (unten)

Als Maß dafür wurden die Testpunkte B50L für Blendung und 75R für die Reichweite verwendet, die in der Zulassungsnorm für Kraftfahrzeuge ECE R112/113 festgelegt sind. Trägt man nun von diesen Punkten die auf den zulässigen Grenzwert normierte Beleuchtungsstärke über der Verschiebung der Lichtquelle in  $z$ -Richtung auf, erhält man die in Tabelle 1 dargestellten Graphen.



**Tabelle 1:** Beleuchtungsstärke E an Testpunkten über der Verschiebung der Lampe

Dabei ist der normierte Grenzwert 1 für den Graphen von B50L ein zulässiger Maximalwert, aber für den Punkt 75R ein zulässiger Minimalwert. Somit kann man den zulässigen Toleranzbereich der Position der Wendel im Reflektor ableiten. Dieser liegt für dieses Beispiel bei rund  $-0,3mm \leq z \leq 0,15mm$ .

Diese Reihe soll exemplarisch das Vermögen der Lichtsimulation darstellen, Konstruktionsparameter direkt aus einer Simulationsreihe abzuleiten. Zudem soll an dieser Stelle auf die Gefahr einer fehlerhaften Montage einer Lampe in einem Scheinwerfer hingewiesen werden.

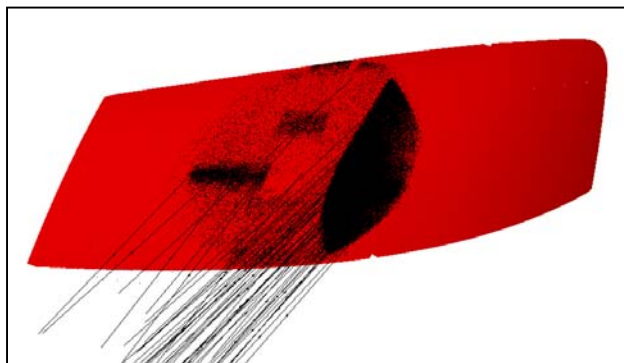
### Auslegung einer „Touristenlösung“

Ein weiteres Beispiel für die Unterstützung, die Raytracing bei der Auslegung von Scheinwerfern und Leuchten leisten kann, ist die simulationsgestützte Generierung von der so genannten Touristenlösung. Dieser Begriff umschreibt die Abdeckungen, die bei Abblendlichtscheinwerfern aufgebracht werden, wenn beispielsweise von Rechts- auf Linksverkehr umgestellt werden muss. Dabei soll die Abdeckung bewirken, dass der Gegenverkehr nicht mit dem in Abbildung 7 und 11 dargestellten  $15^\circ$  Anstieg geblendet wird. Dieser ist für die Ausleuchtung des Straßenrandes gedacht und würde bei einem Wechsel der Straßenseite direkt auf den Gegenverkehr wirken.

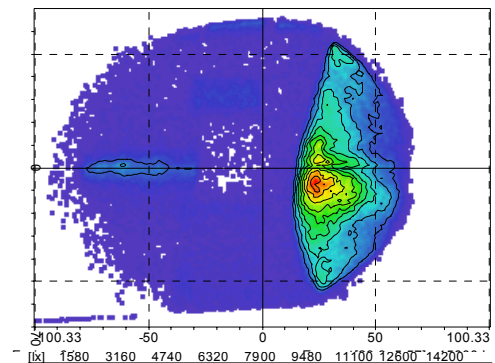


Frühere Scheinwerfer verwendeten Streuscheiben, die die Charakteristik der Lichtverteilung auf der Strasse formten. Bei diesen konnte man den für den 15° Anstieg ursächlichen Bereich leicht identifizieren und abdecken. Bei heutigen Freiformreflektoren oder auch bei Projektionssystem wird diese Charakteristik auf den Fassetten beziehungsweise in der Zwischenbildebene des Projektionssystems erzeugt. Den 15° Anstieg dort abzublenden ist bei Projektionssystemen nicht immer möglich und bei Freiformreflektoren unpraktikabel. Also wird mit Folien für die Abdeckscheibe gearbeitet, die in oftmals aufwendigen Versuchen am realen Scheinwerfer zugeschnitten und getestet werden.

Durch die Repräsentation des Lichtes in Strahldatenform, erzeugt in einer Simulation oder von einem Nahfeldgoniometer, ist es möglich die Strahlen zu selektieren, die den 15° Anstieg bewirken. Verfolgt man diese zum Ort der Abdeckscheibe, ergibt sich die Position einer nötigen Abdeckung. Die Abbildung 8 zeigt das Modell der Abdeckscheibe eines Scheinwerfers in rot, auf dem in schwarz die Verteilung der Durchstoßpunkte derjenigen Lichtstrahlen dargestellt sind, die ausschließlich die 15° Charakteristik bewirken.

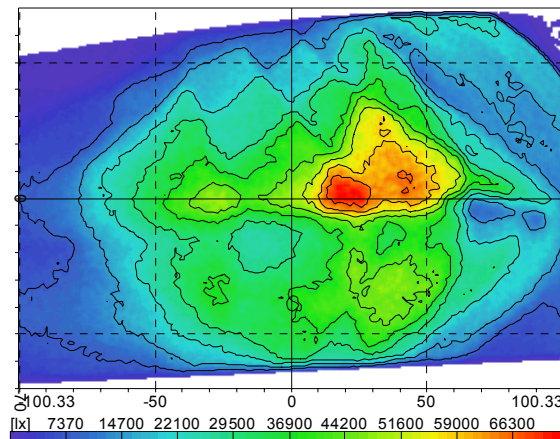


**Abb. 8:** CAD Modell der Abdeckscheibe und Durchstoßpunkte der Strahlen vom 15° Anstieg



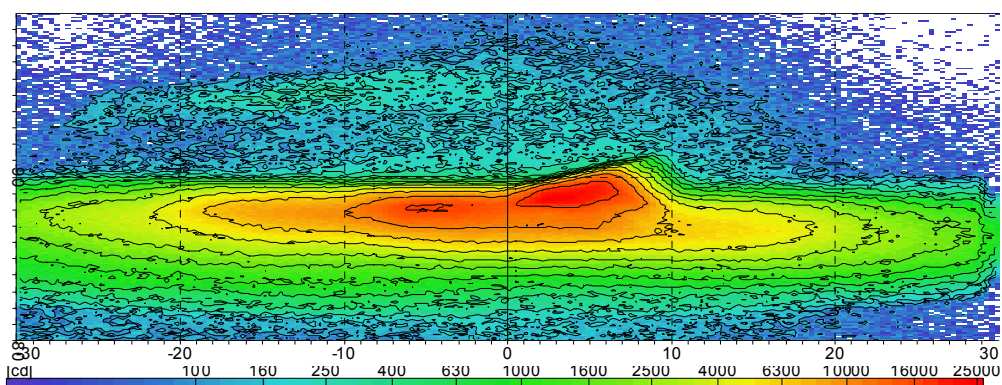
**Abb. 9:** Beleuchtungsstärkeverteilung der ausgewählten Strahlen auf der Abdeckscheibe

Unter Zuhilfenahme einer Beleuchtungsstärkedarstellung, wie in Abbildung 9 gezeigt, ermittelt man, wie die Energie dabei verteilt ist. Allerdings fallen durch denselben Ort auch Strahlen von anderen Bereichen der Lichtverteilung. Abbildung 10 zeigt eine Beleuchtungsstärkedarstellung der übrig gebliebenen Strahlen auf der Lichtscheibe.



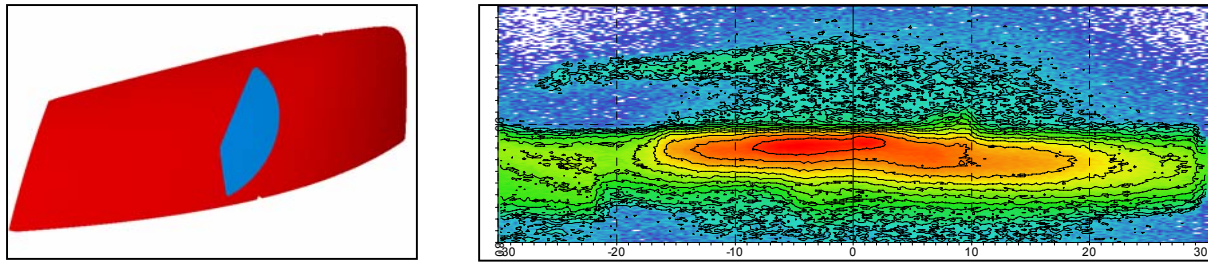
**Abb. 10:** Beleuchtungsstärkeverteilung der Strahlen  
der übrigen Lichtverteilung auf  
der Abdeckscheibe

Eine Abdeckung auf der Lichtscheibe ist also immer ein Kompromiss zwischen Abschattung des unerwünschten aber auch des gewünschten Bereiches der Lichtverteilung auf der Strasse. Es muss ein Optimum gefunden werden, wobei die Fläche einer Abdeckung und deren Transparenz variiert werden kann. Dies soll im Folgenden anhand einer Simulation verdeutlicht werden. Die Ausgangslichtverteilung ist in Abbildung 11 dargestellt, wobei kennzeichnende Werte ein Lichtstrom von 508 Lumen und eine maximale Lichtstärke von 24600 cd im Bereich des Anstieges sind. Das „Ausschneiden“ des Bereiches des 15° Astes bewirkt einen Abfall des Gesamtlichtstroms auf 488 Lumen, womit das Optimum gekennzeichnet wird.



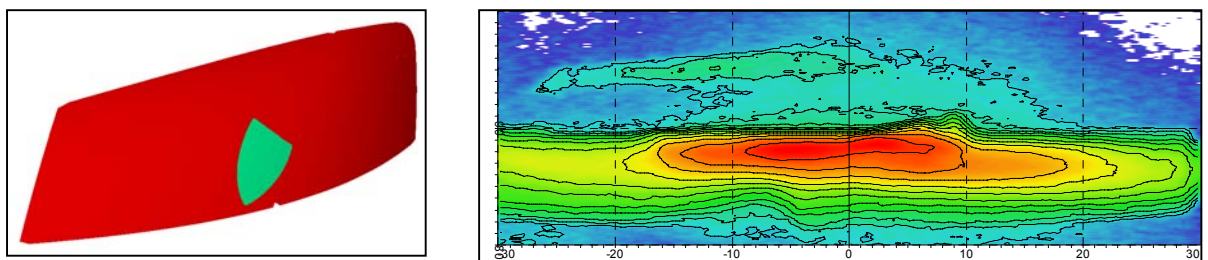
**Abb. 11:** LVK der Ausgangslichtverteilung ohne Abdeckung

Die Auswirkung eines zu großflächigen Abdeckens des ursächlichen Bereiches verdeutlicht Abbildung 12. Hier wird der Gesamtlichtstrom auf 347 Lumen gesenkt und die Lichtverteilung ist gerade im linken Bereich inhomogen.



**Abb. 12:** CAD Modell von Lichtscheibe und großflächiger Abdeckung li. und die resultierende LVK re.

Eine Veränderung des Transmissionsgrades hatte in diesem Beispiel ein schlechteres Ergebnis als die Optimierung der Geometrie. Somit wurde gemäß der Abbildungen 9 und 10 der abgedeckte Bereich derart eingeschränkt, dass viel Energie der übrigen Verteilung an Bereichen wenig intensiver Verteilung des 15° Anstieges transmittieren konnten, wie in Abbildung 13 dargestellt.



**Abb. 13:** CAD Modell von Lichtscheibe und optimierter Abdeckung li. und die resultierende LVK re.

Resultierend liegt der Gesamtlichtstrom bei 404 Lumen und die Lichtverteilung zeigt sowohl im Randbereich wie auch im Zentrum ein homogeneres Verhalten.

## Zusammenfassung

Um die Forderung nach quantitativ zuverlässigen Simulationsergebnissen zu erfüllen, muss umfassend und hinreichend genau modelliert werden. Es wird dazu eine Möglichkeit zur messtechnischen Überprüfung mittels Nahfeldgoniometrie vorgestellt und an einem Beispiel auf Modellierungsfehler hingewiesen. Das Beispiel der Positionierungstoleranz der Lampe wird nachfolgend verwendet, um die Möglichkeit der Lichtsimulation zu zeigen, Konstruktionsparameter direkt aus der Funktionssimulation abzuleiten. Abschließend wird das Prinzip des Raytracing genutzt, um die Auslegung der Touristenlösung zu optimieren.

## Literaturquellen:

- [1] Reich, A.; Wulf, J.: Virtuelle Prototypen als Entscheidungsbasis in der Fahrzeugbeleuchtungsentwicklung .  
in: VDI Tagung: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Würzburg, 2002
- [2] Wiersdorff, S.; Weissleder, P.: Simulation of Complex Illumination Systems in the Field of Automotive Lighting.  
SAE Technical Paper Series 2000-01-0433, 2000
- [3] Moeller, N.: Design Aspects and Headlamp Performance – The Left and Right Headlamp Are not the Same.  
in: Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 2003
- [4] Masuelli, S.: Importance of Optical Surface Roughness Characterisation to Increase Predictive Value for Headlamps Optical Simulations.  
in: Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 2003
- [5] Haack, U.: Advanced Lightsource Model for Simulation of Optical Devices.  
SAE Technical Paper Series 980004, 1998
- [6] Nolte, R.; Schmidt, F.; Bredemeier, K.; Porschmann, R.: 10 Jahre Nahfeldgoniophotometer – Grenzen und Möglichkeiten.  
in: Tagung LICHT 2004 Dortmund
- [7] Gebauer, M.; Heinbuch P.; Sardi L.: Analysis of Lightguides Regarding Uniform Appearance and Coupling Efficiency.  
SAE Technical Papers Series 2002-01-0909, 2002
- [8] Peterson, G. L.: How Many Rays Do I Need to trace? Applying the Rose Model to Computer Analysis of Illumination Systems.  
in: White Papers, Breault Research Organisation, 2005