

## **Verfahren zur Visualisierung des Tagdesigns und der Nachtfunktion von Leuchten**

**Dipl.-Ing. Sebastian Häring**

Volkswagen AG, E2KL4, Brieffach 1185, D-38436 Wolfsburg

E-Mail: Sebastian.Haering@volkswagen.de

### **Zusammenfassung**

Oft wird die Front von Fahrzeugen als Gesicht und die Scheinwerfer als Augen eines Autos bezeichnet. Dies zeigt die große Designrelevanz bei der Entwicklung von Exterieurbeleuchtung. Neben funktionaler Auslegung ist also die Bewertung von Leuchten nach gestalterischen Gesichtspunkten sehr wichtig. Auch wenn es noch keinen physischen Prototypen gibt, ist die Bewertung des Designs in frühen Entwicklungsphasen mit Hilfe von fotorealistischen, prädiktiven Visualisierungen möglich. Prädiktive Visualisierungen stellen eine Simulationsmethode dar, die durch standardisierte Eingangsparameter Entscheidungsträgern ein Werkzeug an die Hand gibt, vergleichend verschiedene Prototypen zu bewerten. Bewertet wird dabei neben der Erscheinung am Tage bei unterschiedlichen Umgebungen auch die Anmutung der Funktionen in der Nachtsituation.

Diese Veröffentlichung beschreibt, welche Verfahren eingesetzt werden, um prädiktive Visualisierungen zu berechnen. Sie zeigt Trends auf, lichttechnisch vermessene Materialeigenschaften für die Berechnung zu verwenden und schätzt die Aufwand-Nutzen-Relation ab. Abschließend wird eine Prognose für weitere Entwicklungen abgegeben.

Neben der Visualisierung der Anmutung am Tage wird in dieser Veröffentlichung ein Verfahren für die Visualisierung der Nachtfunktion vorgestellt.

## 1 Einleitung

Die Front eines Fahrzeuges wird oft als Gesicht bezeichnet. Es soll Emotionen wecken und Charakter ausdrücken. Wichtigstes Gestaltungsmittel sind dabei die Scheinwerfer als Augen des Gesichts. Aus diesem Grund gleicht die Entwicklung von Scheinwerfern und Leuchten einem Spagat zwischen Funktion und Design, bei dem die Balance auf dem Drahtseil der Termine, der Qualität und der Kosten im Fokus steht.

Der traditionelle Entwicklungsprozess ist dafür, speziell bei der harten Konkurrenz auf dem Automobilmarkt, nicht mehr ausreichend. Durch die Durchsetzung des Prinzips *frontloading* in der Leuchtenentwicklung kann die Konstruktion vorab ohne kosten- und zeitintensiven Aufbau von Prototypen getestet werden. Probleme können frühzeitig erkannt und deren Lösungen in die Konzepte integriert werden, siehe auch [RWS02]. *frontloading* bedeutet, dass immer mehr Entscheidungen im Entwicklungsprozess zeitlich vorgezogen werden. Dies gelingt durch den Einsatz moderner Simulationsverfahren wie Licht-, Temperatur- und Strömungssimulation. Ergänzt werden diese Methoden durch die prädiktive (vorhersagende) Visualisierung des Designs als weitere Technik zur virtuellen Absicherung, zur Absicherung der Erscheinung.

## 2 Prädiktive Visualisierung

Visualisierungen des Designs werden in unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses erstellt. Allen voran stellen die Designer ihre Ideen und Konzepte in Form von synthetisierten Abbildungen den Entscheidungsträgern vor. Die Designer wollen damit überzeugen und begeistern. Sie nutzen dafür alle ihnen zur Verfügung stehenden Mittel und Wege, um das konzipierte Erscheinungsbild zu fixieren und zu kommunizieren.

In der technischen Entwicklung werden die Designkonzepte mit Leben gefüllt, indem CAD-Geometrie erstellt, Materialien definiert und Fertigungskonzepte in enger Zusammenarbeit mit den Zulieferern erstellt werden. Ob nach dieser Art der „Übersetzung“ die erstellte Konstruktion, betreffend ihrer Erscheinung, noch dem Designkonzept entspricht, wurde bislang durch den Aufbau von Prototypen abgesichert. Im Zuge der Umsetzung des Prinzips *frontloading* übernimmt die prädiktive Visualisierung virtuell die Funktion *Absicherung der Erscheinung*.



**Abbildung 1:** Gegenüberstellung: Fotografie (links) und Visualisierung aus CAD-Geometrie (rechts) der *Touareg* Heckleuchte

Abbildung 1 zeigt eine Gegenüberstellung einer Fotografie und einer rein aus CAD-Geometrie berechneten Ansicht der Touareg Heckleuchte. Der Unterschied zwischen beiden Abbildungen gründet sich hauptsächlich auf die unterschiedliche sich in und auf der Leuchte reflektierende Umgebung. Das Reflexmuster ist jedoch sehr gut reproduzierbar.

Somit können auch Scheinwerfer aus allen Richtungen dargestellt und bewertet werden. Durch unterschiedliche sich im Scheinwerfer reflektierende Umgebungen können die Reflexmuster auf den zum Teil hoch glänzenden Blenden untersucht werden, siehe Abb. 2.



**Abbildung 2:** Synthetische Abbildung der CAD-Geometrie des *GolfPlus* AFS-Scheinwerfers

Die mittels Raytracing berechneten Abbildungen, siehe Abschnitt 3, sind foto-realistische Visualisierungen von Geometrie- und Materialdefinitionen der Konstruktion. Um aus diesen Visualisierungen Erkenntnisse zu gewinnen, um prädiktive Aussagen treffen zu können, muss eine andere Methodik, als die der Designer

verwendet werden:

- Statt Design- oder Ideenvisualisierung  $\implies$  objektive Visualisierung von technischen Parametern
- Erstellung der Visualisierung bestenfalls ohne Kenntnis von Zielercheinungsbild
- Hochgradige Standardisierung von Berechnungsverfahren, Parametern und Darstellungsweisen

Durch die Standardisierung können jedoch nur vergleichende Aussagen getroffen werden. Das heißt, Abbildungen virtueller Prototypen können durch die Gleichartigkeit der Erstellung, wie bei Abbildern von bereits in Hardware verfügbaren Bauteilen, bewertet werden. Die Summe der vielfältigen Fehlerquellen ist bei allen virtuellen Abbildungen gleich und kann durch Erfahrung im Umgang mit diesen bei der Betrachtung ausgeblendet werden.



**Abbildung 3:** QuickTime-VR Darstellung des *GolfPlus* Scheinwerfers; (links) mögliche hochreflektierende Blende, (rechts) Serienstand mit diffuser Blende

Noch größer ist der Nutzen von prädiktiven Visualisierungen beim direkten Vergleich zweier Varianten eines Bauteils. Dafür können pseudo-interaktive Filme vorausberechnet werden. Dies gibt dem Betrachter die Möglichkeit, durch Interaktion mit einer interaktiven Bilderdatei, z.B. QuickTime-VR, eine der vielen vorausberechneten Betrachterperspektiven auszuwählen. Abbildung 3 zeigt

einen Screen-Shot von einem QuickTime-VR Film, bei dem sich mit der Maus beide Varianten synchron um ihren Mittelpunkt horizontal und vertikal rotieren lassen. Somit kann der Betrachter die Unterschiedlichkeit unter allen für ihn wichtigen Betrachterperspektiven bewerten.

Über den so durchführbaren direkten Vergleich lassen sich Varianten bewerten, ohne beide als Hardware aufbauen zu müssen. Die prädiktive Visualisierung ist also in der Lage, vergleichend genaue Aussagen zu treffen. Absolute Aussagen können mit Hilfe dieser Abbildungen schwerlich getroffen werden. Ohne prototypischen Aufbau der dann sehr weit ausdefinierten, vielleicht noch letzten zwei zu entscheidenden Varianten einer Leuchte, geht es beim heutigen Stand der Technik nicht.

Weiterhin können prädiktive Visualisierung zur exploratorischen Fehlersuche verwendet werden. Komplexe Reflexionsmuster können auf visuell wahrnehmbare Störungen untersucht werden. Dazu gehören Verzerrungen in konkaven Blenden und irritierende Mehrfachreflexionen. Die Abbildung 4 zeigt computergenerierte Abbildungen der aktuellen *Passat* Heckleuchte. In diesem Aufbau der Geometrie sind solche visuellen Störungen potenziell vorhanden.



**Abbildung 4:** Virtuell erzeugte Abbildungen der aktuellen *Passat* Heckleuchte

Sind entsprechende Störungen identifiziert, können Modifikationen der Geometrie hinsichtlich der Beseitigung dieser Effekte untersucht werden.

Folgende Abschnitte beschreiben die Berechnungsmethoden zur Erstellung der prädiktiven Visualisierungen.



Bei reflektierenden Materialien werden ausgehend vom Schnittpunkt des Primaerstrahls in Reflexionsrichtung  $\overline{R_N}$  (bzw. bei Transmission entsprechend  $\overline{T_N}$ ) rekursiv weitere Strahlen generiert. Das rekursive Backward Raytracing entspricht somit der rekursiven Suche nach Pfaden zur Lichtquelle bzw. zu beleuchteten Flächen.

Mit Hilfe der Rendering Gleichung nach Kajiyama [Kaj86] können so die gesuchten Pixelleuchtdichten bestimmt werden, indem durch jedes Pixel der Bildebene Primaerstrahlen geschickt werden.

#### 4 Bidirektionale Reflexionsfunktion *BRDF*

Ein elementarer Bestandteil der Rendering Gleichung nach Kajiyama [Kaj86] ist die Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion *BRDF* (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Die *BRDF* stellt eine Funktion des Leuchtdichtekoeffizienten  $q_p(\gamma)$  in Abhängigkeit von Anleucht- bzw. Betrachtungsrichtung dar. Die Definition der *BRDF* in der Computergrafik weicht syntaktisch von der lichttechnischer Betrachtung ab. Daher ein kleiner Diskurs:

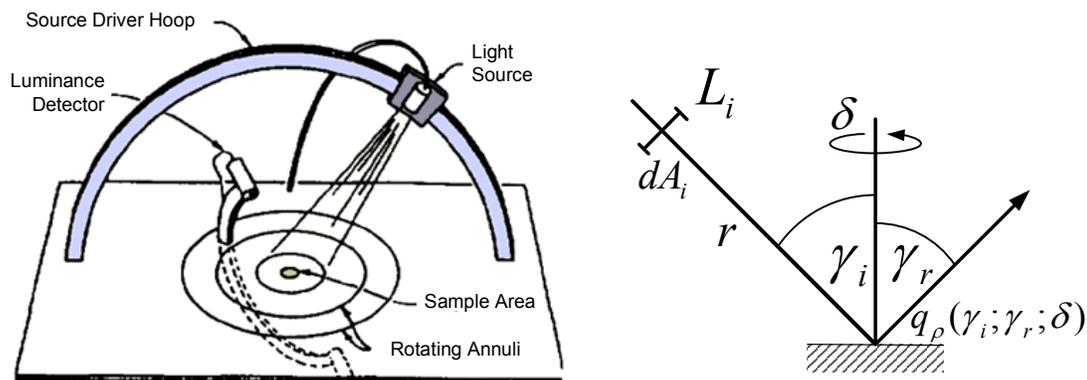


Abbildung 6: Klassischer *BRDF*-Messaufbau [War92]; Struktur des winkelabhängigen Leuchtdichtekoeffizienten

In Abbildung 6 ist der klassische Messaufbau zur *BRDF*-Messung zu sehen. Ausgehend vom Raumwinkelprojektionsgesetz [Gal04] mit

$$E_i = \int_{\Omega_{pi}} L_i \cdot d\Omega_{pi} \quad (1)$$

und

$$q_\rho(\gamma) = \frac{L_\rho(\gamma)}{E_i} \quad \text{in} \quad [cd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}] \quad (2)$$

für den Leuchtdichtekoeffizienten  $q_\rho(\gamma)$  lässt sich die richtungsabhängige Funktion der Leuchtdichtekoeffizienten (BRDF) für isotrope Materialien beschreiben durch:

$$q_\rho(\gamma_i; \gamma_r; \delta) = \frac{L_\rho(\gamma_r; \delta)}{\int_{\Omega_{pi}} L_i \cdot d\Omega_{pi}} = \frac{L_\rho(\gamma_r; \delta)}{\int_{\Omega_i} L_i \cdot \cos(\gamma_i) \cdot d\Omega_i} \quad (3)$$

bzw.

$$dq_\rho(\gamma_i; \gamma_r; \delta) = \frac{dL_\rho(\gamma_r; \delta)}{L_i \cdot \cos(\gamma_i) \cdot d\Omega_i} = \frac{dL_\rho(\gamma_r; \delta)}{L_i \cdot \frac{dA_i}{r^2} \cdot \cos(\gamma_i) \cdot \Omega_0} \quad (4)$$

mit  $i$  und  $r$  als Indizes für *incident* (einfallend) und *reflected* (reflektiert).

Der differenzielle projizierte Raumwinkel  $\Omega_{pi}$  ist angegeben mit:

$$d\Omega_{pi} = \frac{dA_i \cdot \cos(\gamma_i)}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (5)$$

Für einen LAMBERT-Strahler ist  $q_\rho(\gamma_i; \gamma_r; \delta) = \text{konstant}$ .

Im Vergleich dazu wird in der Computergrafik die BRDF wie folgt angegeben:

$$f_r(\vec{\omega}; \vec{\omega}') = \frac{dL_r(\vec{\omega})}{dE_i(\vec{\omega}')} = \frac{L_r(\vec{\omega})}{L(\vec{\omega}')_i \cdot \cos(\theta_i) \cdot d\omega'} \quad \text{in} \quad [sr^{-1}] \quad (6)$$

Dem entsprechend lautet die Rendering-Gleichung für die Leuchtdichte eines Punktes  $x$  in Richtung  $\vec{\omega}$  (nach Syntax der Computergrafik) nach Kajiya [Kaj86]:

$$L(x; \vec{\omega}) = L_{emit}(x; \vec{\omega}) + \int_{\Omega_+} f_r(\vec{\omega}; \vec{\omega}') \cdot L_i(x; \vec{\omega}') \cdot \cos(\theta_i) \cdot d\omega' \quad (7)$$

nach lichttechnischer Notation:

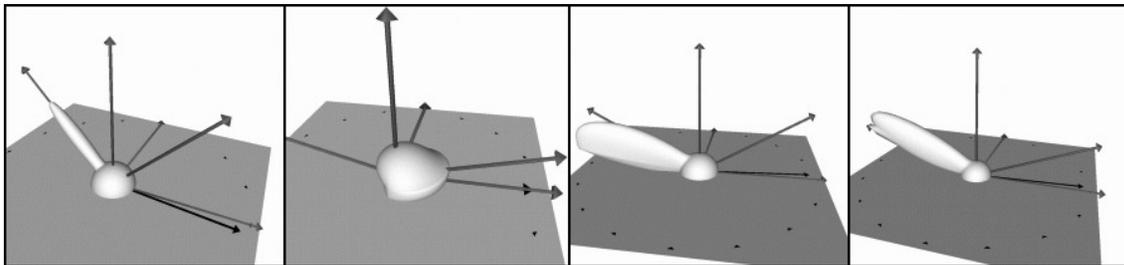
$$L_{gesamt} = L(\gamma_r; \delta) + L_\rho(\gamma_r; \delta) \quad (8a)$$

$$= L(\gamma_r; \delta) + q_\rho(\gamma_i; \gamma_r; \delta) \cdot E_i \quad (8b)$$

$$= L(\gamma_r; \delta) + \int_{\Omega_i} q_\rho(\gamma_i; \gamma_r; \delta) \cdot L_i \cdot \cos(\gamma_i) \cdot d\Omega_i \quad (8c)$$

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Vielzahl von BRDF-Modellen entwickelt. Neben anfänglich empirisch, nach visuellen Gesichtspunkten entwickelten Modellen, wie Phong und Blinn, existieren eine Vielzahl an analytischen physikalisch plausiblen Reflexionsmodellen. Einige Vertreter sind:

- Lambertian Diffuse Model
- Cook-Torrance Specular Microfacet BRDF
- Oren-Nayar Diffuse Microfacet BRDF
- He-Torrance Comprehensive Analytic Model
- Ward Anisotropic Model
- Lafortune Generalized Cosine Lobe Model



**Abbildung 7:** BRDF-Modelle (von links nach rechts): Phong Reflection Model; Oren-Nayar Diffuse Microfacet BRDF; Cook-Torrance Specular Microfacet BRDF; He-Torrance Comprehensive Analytic Model [Pro05]

Die physikalisch plausiblen Modelle basieren auf einer Betrachtung der Mikrostruktur der Oberfläche als sehr kleine V-förmige Kerben (Microfacetten). Die geometrische Verteilung dieser Kerben wird über diverse mathematische Modelle beschrieben, Gauß-, Trowbridge-Reits- und/oder Beckmann-Verteilung. Zusätzlich wurden später Fresnel-Reflektion, Maskierung und Abschattung der Microfacetten sowie die Wellenlängenabhängigkeit berücksichtigt.

Diese Modelle sind sehr rechenintensiv und jeweils zur Beschreibung spezieller Materialien mehr oder weniger gut geeignet. Ein universell einsetzbares Modell existiert nicht. In der Lichttechnik wurde z.B. das grundlegende Torrance-Sparrow-Modell zur Beschreibung der Reflexionseigenschaften von Straßenbelägen zurate gezogen [vH03].

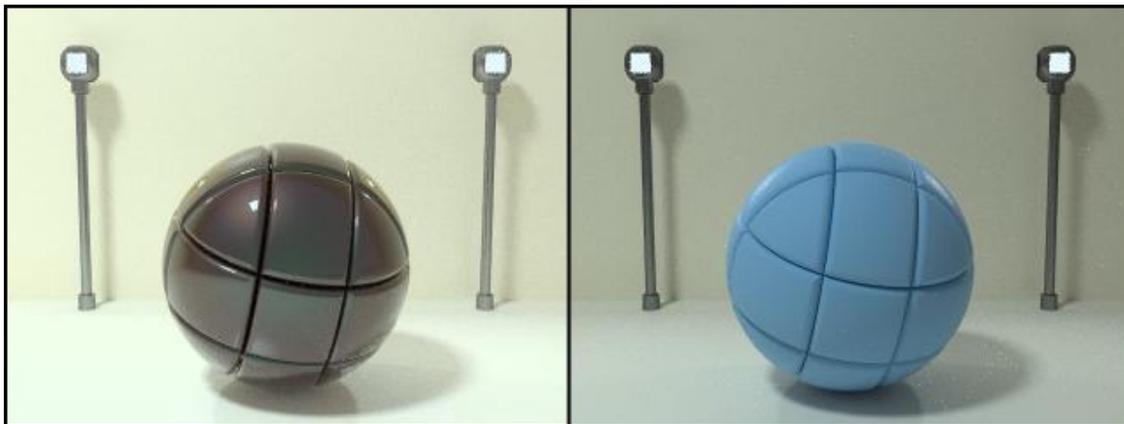
## 5 Verwendung vermessener BRDFs für Raytracing

In Abbildung 8 sind via Raytracing entstandene Darstellungen von einer vermessenen Lackprobe *Mysic-Lack* von Ford und einer blauen Latex-Farblackierung zu

sehen. Das *Light Measurement Laboratory* der Cornell Universität verwendete dafür im Jahr 2001 vermessene Reflexionsfunktionen für die Bildsynthese [Onl05].

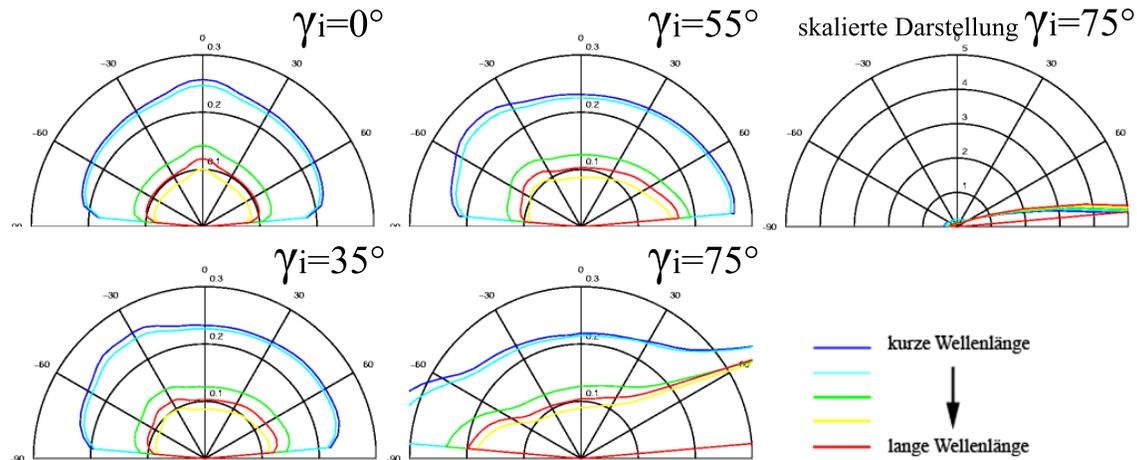
Vermessen wurden unterschiedliche Proben mit folgenden Parametern:

- 1439 Leuchtdichtekoeffizienten bei unterschiedlichen, über die Hemisphäre verteilten Richtungen
- 1439 Leuchtdichtekoeffizienten je 31 Wellenlängen [400 nm, 410 nm, ... , 700 nm]
- $\gamma_i = 10^\circ, 20^\circ, \dots, 80^\circ$



**Abbildung 8:** Bildsynthese mit vermessenen BRDFs; links: Mysic-Lack , rechts: Latex-Farblackierung [Onl05]

In Abb. 9 sind die gemessenen BRDF-Kurven für vier verschiedene Anleuchtwinkel  $\gamma_i = 0^\circ, 35^\circ, 55^\circ$  und  $75^\circ$  der Latex-Farblackierung von Abb. 8 aufgezeigt (Schnitt durch Anleuchtebene;  $\delta = 0$ ). Für die Anleuchtwinkel  $\gamma_i = 35^\circ$  und  $\gamma_i = 55^\circ$  ist die Rückwärtsstreuung in Richtung der Anleuchtung gut erkennbar. Bei dem Anleuchtwinkel von  $\gamma_i = 75^\circ$  ist eine sehr stark vorwärts gerichtete Streuung zu erkennen. Die BRDF-Kurven der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche unterscheiden sich kaum, was bei einer Bildsynthese von Bildpunkten unter flachen Anleucht winkeln zu einer hellen, fast unbunten Stelle auf der Oberfläche führt, siehe Markierung in Abb. 8.



**Abbildung 9:** BRDF-Kurven für unterschiedliche Wellenlängenbereiche bei  $\gamma_i = 0^\circ, 35^\circ, 55^\circ$  und  $75^\circ$  der Latex-Farblackierung von Bild 8 [Onl05]

## 5.1 BRDFs - Verwendung für prädiktive Visualisierung?

Der erhebliche Aufwand, das Reflexionsverhalten von realen Objekten messtechnisch zu Erfassen und für Simulationsverfahren zu nutzen, lässt jeher die Frage nach dem Nutzen aufkommen.

Eine Studie aus dem Jahr 2001 der *Universität Aizu (Japan)* in Zusammenarbeit mit dem *Max-Planck Institut Saarbrücken* versucht auf diese Frage eine Antwort zu geben [DM01]:

Ausgangspunkt für die Studie war das Atrium der Universität Aizu. Von diesem Innenhof wurde ein CAD-Modell angefertigt, von vielen Materialien die BRDF vermessen (ca. 80% der Gesamtoberfläche) und die Lichtquellen lichttechnisch beschrieben. Aufgabe von Probanden war es, das reale Atrium durch eine Blende zu betrachten, die einen annähernd gleichen Ausschnitt gewährleisten soll, wie die im Anschluss auf einem CRT-Monitor zu betrachtenden synthetisierten Abbildungen (inklusive Fotografie).

Die quantitative Auswertung der Beleuchtungsstärken hat ergeben, dass die Simulation mittels vermessener BRDFs die kleinere Abweichung zur Realität liefert. Der RMS-Fehler (root mean square) beträgt relativ 10.5% und absolut  $12.2lx$ . Der qualitative Vergleich zwischen Realität, Fotografie und synthetisierten Abbildungen wurde bei dieser Studie mit einer nicht hinreichend großen Probanden-

gruppe durchgeführt, um verlässliche Aussagen zu erhalten. Als Tendenz zeichnete sich aber ab, dass Simulationen auf der Basis von vermessenen BRDFs im Vergleich zu künstlich generierten Materialeigenschaften *nicht* zu einer größeren Akzeptanz führen. Detaillierte Ergebnisse sind unter [DM01] zu finden.

Fraglich bei dieser Studie ist der Vergleich von Realität und Abbildung. Die Unterschiedlichkeit der Wahrnehmung von Realität und einer Abbildung auf einem Monitor lässt den Vergleich nur schwerlich gelingen. Lediglich ein direkter Vergleich von einer auf dem Monitor präsentierten Fotografie und der Simulation, dargestellt mit dem selben Medium, wäre aussagekräftig - also ein Vergleich Foto mit fotorealistischer Simulation. Die quantitative Auswertung hingegen lässt erahnen, dass die reine Lichtsimulation zur lichttechnischen Bewertung von Innenräumen und Arbeitsplätzen von der Verwendung gemessener BRDFs profitieren kann. Dabei entscheidend ist neben der Charakteristik auch die Beschreibung der Beleuchtung und, nicht zu letzt, das konkrete Erkenntnisinteresse.

## 5.2 Fazit und Ausblick

Der Ansatz, vermessene Materialien für die Visualisierung zu verwenden, ist seit einigen Jahren aktueller Forschungsgegenstand. Dabei stehen effiziente Berechnungsmethoden, elegante Repräsentationsformen für die umfangreichen Messdaten sowie einfache und verlässliche BRDF-Messmethoden im Fokus.

Die *ASTM Standards Organisation* hat versucht, mit dem Standard E1392-96(2002) (withdrawn) prinzipiell für Einheitlichkeit zu sorgen. Tatsächlich existiert kein standardisiert angewandtes Messverfahren, was zu Insellösungen und mangelnder Integrationsfähigkeit führt. Die Verwendung von spektral vermessenen BRDFs ist problematisch, wenn damit die Körperfarbe repräsentiert werden soll. Dafür wäre die Kenntnis des Spektrums der Beleuchtung und ein spektrales Berechnungsverfahren notwendig, im Vergleich zu Standard-Tri-Stimulus Verfahren. Ohne standardisierte Betrachtung der Visualisierungen ist jedoch der Aufwand spektral zu vermessen höchst umstritten. Aktuelle Versuche von z.B. der *Spheron VR AG* in Kooperation mit *Alias* vermessene BRDFs in kommerziell verfügbare Softwarepakete zu integrieren, siehe Abb. 10(c), werden die Zukunft prägen. Die Verwendung von vermessenen BRDFs trägt das Potenzial, die Form der Standardisierung von Parametern im Sinne von prädiktiven Visualisierungen, siehe Kap.1, zu verbessern. Verlässliche Aussagen aus solchen Visualisierungen werden jedoch

weiterhin nur qualitativ beim Variantenvergleich möglich sein.



**Abbildung 10:** Synthetisierte Abbildung aus dem Jahr 05: (a) Berechnung mittels 10 vermessener BRDFs [CJAMJ05], (b) BRDF-Rendering zur Verfügung gestellt von der *Spheron VR AG* [Bon05] und *Alias* (berechnet mit *Maya*)

## 6 Visualisierung der Nachtfunktion

Neben der Anmutung des Tagdesigns ist die Erscheinung der Leuchten und Scheinwerfer in der Nacht ein direktes Designelement. Bei Volkswagen zum Beispiel zieht sich seit einigen Jahren das Designthema *Doppelrund* durch die Modellreihe. Es bestimmt das Design der Heckleuchten sowohl am Tage als auch in der Nacht.

Um die Nachterscheinung von Fahrzeugen im Sinne des *frontloadings* frühzeitig im Prozess anhand von virtuellen Prototypen beurteilen zu können, ist eine Verbindung unterschiedlicher Methoden notwendig. Neben Backward-Raytracing ist für die Simulation der Lichtfunktion auch der Forward-Raytracing-Prozess aus der Lichtsimulation notwendig.



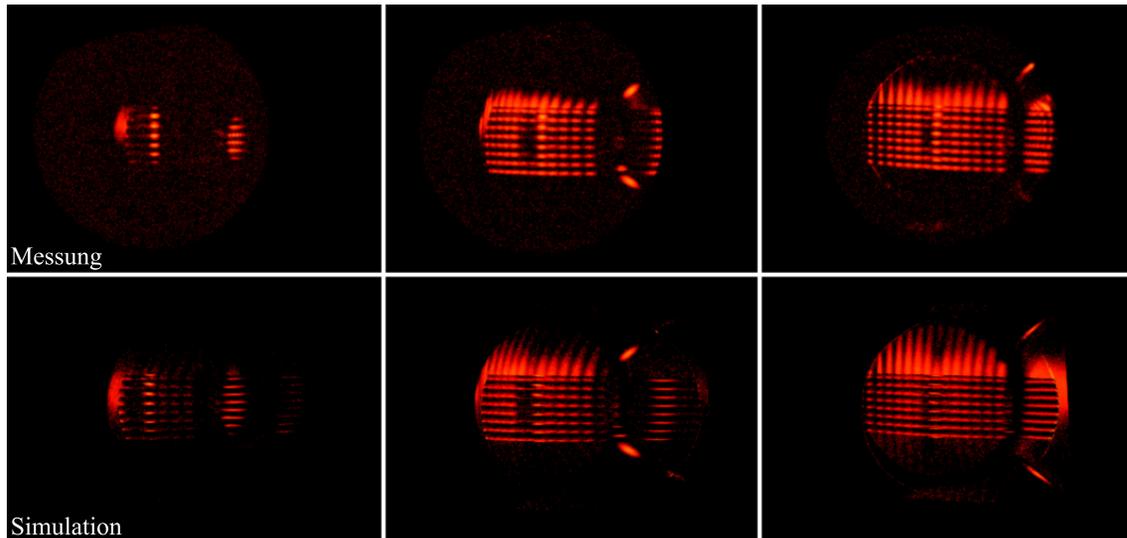
**Abbildung 11:** links: Gegenüberstellung Visualisierung Tagdesign und Nachtfunktion; rechts: Fotografie (digital) der *Touareg* Heckleuchte

Beide Arten der prädiktiven Visualisierungen, die rein aus CAD-Geometrie entstehen, sind in Abbildung 11 gegenübergestellt.

Ausgangspunkt für die Visualisierung der Nachtfunktion ist die Lichtsimulation. Das Resultat der Lichtsimulation sind Strahldatensätze, mit deren Hilfen sowohl die Einhaltung der gesetzlichen Normen abprüfbar als auch die Performance der einzelnen Funktionen optimierbar ist.

Um die in der Lichtsimulation berechneten Daten der einzelnen Funktionen darzustellen, muß für die gewünschte Ansicht der Leuchte das entsprechende Leuchtdichtebild mit Hilfe der Strahleninformation errechnet werden. Dafür werden aus der Perspektive einer virtuellen Kamera die Strahlen auf die virtuelle Bildebene

projiziert und über die Definition des Raumwinkels die Leuchtdichten bestimmt. Liegt das Simulationsergebnis spektral aufgelöst vor, können auch Leuchtdichtebilder mit ortsaufgelöster Farbortinformation synthetisiert werden.

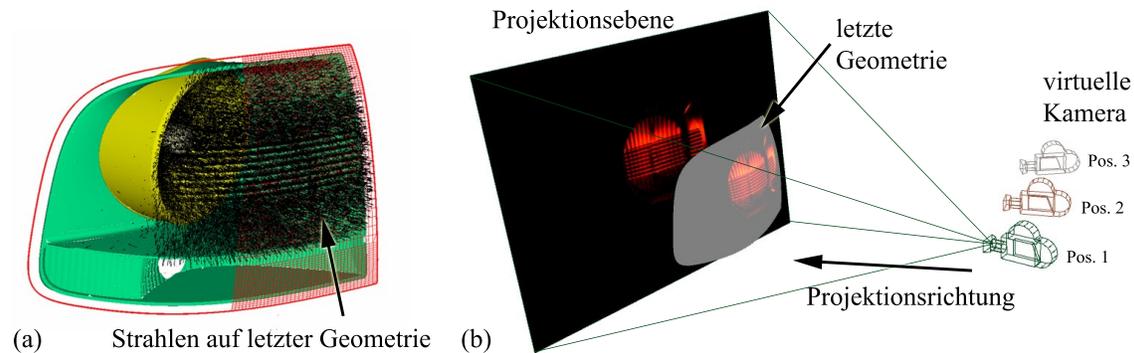


**Abbildung 12:** Gegenüberstellung von Bildsynthese der Nachtfunktion aus Messdaten (oben) und aus Simulationsdaten (unten); virt. Aufnahmepositionen aus Abb. 13(b) Pos.1 bis Pos.3 (von links nach rechts)

In Abb. 12 (unten) sind diese berechneten Leuchtdichteabbildungen dargestellt. Grundlage für die Berechnung der dafür notwendigen Strahlensätze war die Geometrie der *Touareg* Heckleuchte in Form von Freiformflächen aus dem CAD-System. Als Ergebnis liegen im Wellenlängenbereich von  $550\text{nm}$  bis  $680\text{nm}$  im Abstand von  $10\text{nm}$  Strahlensätze mit insgesamt 60 Mio. Strahlen vor. Die dafür notwendigen Spektren und das Spektrum der Simulation ist in Abbildung 14 gegenübergestellt.

Um den Einfluss der Simulation auf das Visualisierungsergebnis abschätzen zu können, müssen die Strahlendaten für die Visualisierung durch Messung erzeugt werden, siehe Abbildung 12 (oben). Dafür wurde die *Touareg* Heckleuchte mit einem Nahfeldgoniophotometer vermessen und aus der Summe der Leuchtdichtebilder ein Strahlendatensatz von ebenfalls 60 Mio. Strahlen erzeugt. Da die aus der Messung erzeugten Strahlen keine Information über die Wellenlänge enthalten, wurde das aus der Simulation erhaltene Spektrum über eine Verteilung des Gesamtlichtstroms auf die Wellenlängen übertragen. Diese Praxis ist nur bei Leuch-

ten möglich, deren Lichtspektrum unmerklich richtungsabhängig variiert.



**Abbildung 13:** (a) Strukturelle Grafik der *Touareg* Heckleuchte mit Strahlenset auf der Außenseite der Abdeckscheibe; (b) Prinzip von Rückprojektion der synthetisierten Leuchtdichteansichten auf Abdeckscheibe

Die so erzeugten Leuchtdichteabbildungen werden dann entsprechend der Perspektive unter der die Strahlendaten auf die Bildebene projiziert wurden wiederum auf die Geometrie projiziert. Abbildung 13(b) illustriert diesen Schritt. Somit können durch eine Addition der reflektierten Umgebungsleuchtdichte mit der, von der Leuchte emittierten Leuchtdichte, Abbildungen erzeugt werden, die die Nachanmutung darstellen, siehe dazu auch Abbildung 15.

## 6.1 Ausblick

Um verlässliche Aussagen mit Hilfe von Darstellungen der Nachtfunktion erhalten zu können, ist neben der Validierung der Simulationsprozesse eine Optimierung der Leuchtdichteberechnung und die Anpassung der Darstellungsverfahren notwendig. Um dem Vergleich mit einer Fotografie, siehe Abbildung 11(rechts) standhalten zu können, muss die Übertragungsfunktion einer Referenzkamera für die Aufnahme der Fotografie bei der Darstellung der Visualisierung berücksichtigt werden. Dies würde Effekte wie eine mögliche Farbortverschiebung bei gesättigten Pixeln auf dem Bildwandler der Kamera nachahmen und den Fotorealismus steigern. Weiterhin muss untersucht werden, in wie weit der Streuung in der Optik der Kamera bzw. der Streuung im Auge Rechnung getragen werden kann und muss.

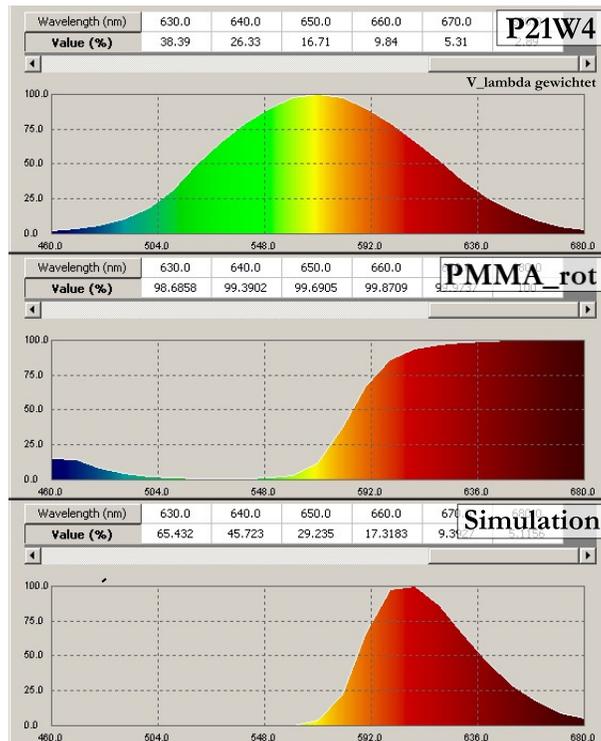


Abbildung 14: Touareg Heckleuchte: Spektren von Lampe ( $V(\lambda)$  bewertet), PMMA der Abdeckscheibe und Spektrum der Simulationsdaten



Abbildung 15: Touareg Heckleuchte: Synthese der Nachterscheinung

## Literatur

- [Bon05] G. Bonnet. *SpheronVR AG*. 2005.
- [CJAMJ05] P. Clarberg, W. Jarosz, T. Akenine-Möller, and H. W. Jensen. *Wavelet Importance Sampling: Efficiently Evaluating Products of Complex Functions*. To appear in Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, July 31 - August 4, 2005.
- [DM01] F. Drago and K. Myszkowski. Validation proposal for global illumination and rendering techniques. In *Computer & Graphics 25, 3*, pages 511–518, 2001.
- [Gal04] D. Gall. *Grundlagen der Lichttechnik - Kompendium*. Pflaum Verlag, 2004.
- [Kaj86] J. Kajiya. The rendering equation. In *Proceedings of SIGGRAPH '86*, pages 143–150, 1986.
- [Onl05] The Light Measurement Laboratory of Cornell University. <http://www.graphics.cornell.edu/online/measurement>, 2005. Projekt-Page; letzter Besuch: Juni 2005.
- [Pro05] NIST - National Institute of Standards and Technology. <http://math.nist.gov/~FHunt/appearance/index.html>, 2005. Projekt-Page; letzter Besuch: Juni 2005.
- [RWS02] A. Reich, J. Wulf, and S. Senin. Virtuelle Prototypen als Entscheidungsbasis in der Fahrzeugbeleuchtungsentwicklung; Tagung. In *VDI-Bericht 1701*, pages 439–492. VDI - Verband Deutscher Ingenieure, 2002.
- [vH03] A. von Hoffmann. *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*, PhD-Report TU-Ilmenau, Schriftenreihe Lichttechnik - Nr.4. Der-andere-Verlag, 2003.
- [War92] G. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. In *Proceedings of SIGGRAPH '92, Vol. 26, No. 3*, pages 265–272, 1992.