

Homogene Leuchtdichte mit Volumenstreuer

DIFFUS STREUENDE KUNSTSTOFFE ERMÖGLICHEN HOMOGEN HINTERLEUCHTETE ARMATUREN

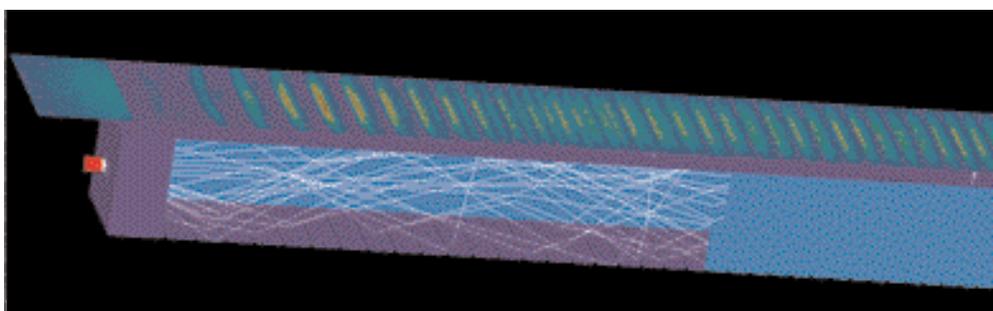
Um mittels LEDs eine optimale Hinterleuchtung der Armaturen von Fahrzeugen zu erreichen, werden Lichtleiter eingesetzt. In Kombination mit Volumenstreuern lässt sich allerdings eine besonders homogene Leuchtdichte erzielen. Hembach Photonik bietet den vollständigen Service von der Charakterisierung der Materialparameter der Volumenstreuer bis zur Simulation und Optimierung des gesamten lichttechnischen Systems.

**BERNHARD MICHEL
BARBARA STUMPP
ROBERT FISCHER**

LEDs haben die Fahrzeugbeleuchtung revolutioniert. Sie funktionieren bis zu mehreren 10 000 Stunden und verbrauchen dabei bis zu 80 Prozent weniger Energie als konventionelle Leuchtmittel. Zusammen mit Lichtleitern lassen sich hier sehr elegante Lösungen etwa für die Hinterleuchtung von Armaturen entwickeln. Bedingung ist hier eine möglichst homogene Leuchtdichte bei senkrechter Betrachtung. Damit das eingekoppelte LED-Licht seitlich aus dem Lichtleiter austreten kann, benötigt man optische Strukturen, die in den Lichtleiter eingearbeitet sind. Diese Strukturen sind für den Betrachter meist noch zu erkennen, was allerdings unerwünscht ist.

Mit Diffusorfolien oder aufgerauten Lichtleiteroberflächen lässt sich dieser Effekt oft nicht vollständig beheben. Hier schaffen Volumenstreuer aus speziellen Kunststoffen Abhilfe. Die Herausforderung: in Experimenten müssen zuerst die Materialparameter gewonnen werden, um dann mittels Simulation die optimale Systemgeometrie zu ermitteln. Hembach Photonik bietet hierzu die vollständige Kette von der Messung der Parameter bis zur Modellierung der gesamten Beleuchtungseinheit per Simulation an.

Zur Hinterleuchtung von Armaturen oder Displays werden Lichtleiter aus Kunststoff genutzt. Das Licht einer LED koppelt in den Lichtleiter ein und breitet sich mittels Totalreflexion nahezu verlustfrei



1 Modell eines Lichtleiters mit Strahlengang: An der Unterseite befinden sich Auskoppelstrukturen, die das Licht der LED (rot) nach oben lenken. An der Oberseite ist die sich ergebende Beleuchtungsstärkeverteilung aufgetragen

aus. Um dieses Licht auskoppeln zu können, müssen optische Strukturen die Totalreflexion unterbrechen. Im hier gezeigten Beispiel werden dafür Prismenstrukturen mit einer Basisbreite von 250 μm verwendet. Diese Strukturen sind ausreichend groß, um gut mit Spritzguss hergestellt werden zu können, aber andererseits zu grob, um an der Auskoppelfläche eine ausreichend homogene Verteilung der Beleuchtungsstärke zu erreichen. Die Beleuchtung zeigt eine feinskalige Rippelstruktur, die auch mit bloßem Auge leicht erkennbar ist (**Bild 1**).

Volumenstreuer homogenisiert räumlich

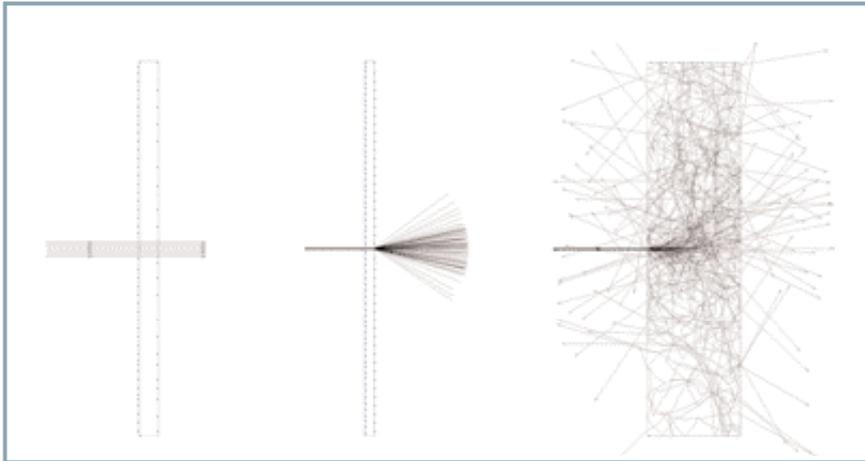
Eine normale Diffusorfolie kann lediglich die Winkelverteilung des Lichts glätten, aber nicht die räumliche Inhomogenität ausgleichen. Ein Volumenstreuer dagegen homogenisiert das Licht aufgrund von Vielfachstreuung auch räumlich sehr gut (**Bilder 2, 4**). Dadurch sinkt der Wirkungs-

grad des Lichtleiters, was sich aber durch andere Maßnahmen wie zum Beispiel dem Verwenden einer Reflektorfolie am unteren Teil des Lichtleiters oder durch LEDs mit höherer Leistung kompensieren lässt.

Volumenstreuer sind diffus streuende, transparente Kunststoffe. Beliebte Basis Kunststoffe sind hier PMMA (Polymethylmethacrylat) und Polykarbonat. Diesen werden transparente Nanopartikel zugemischt, die je nach Anwendung aus anderen Kunststoffen oder hochbrechenden Materialien wie TiO_2 (Titandioxid) bestehen. Im Gegensatz zur Lichtstreuung an Grenzflächen findet hier eine sogenannte

KONTAKT

Hembach Photonik GmbH
91126 Rednitzhembach
Tel. +49 9122 889949-0
E-Mail info@hembach-photonik.de
www.hembach-photonik.de
Optatec: Stand 3.H41



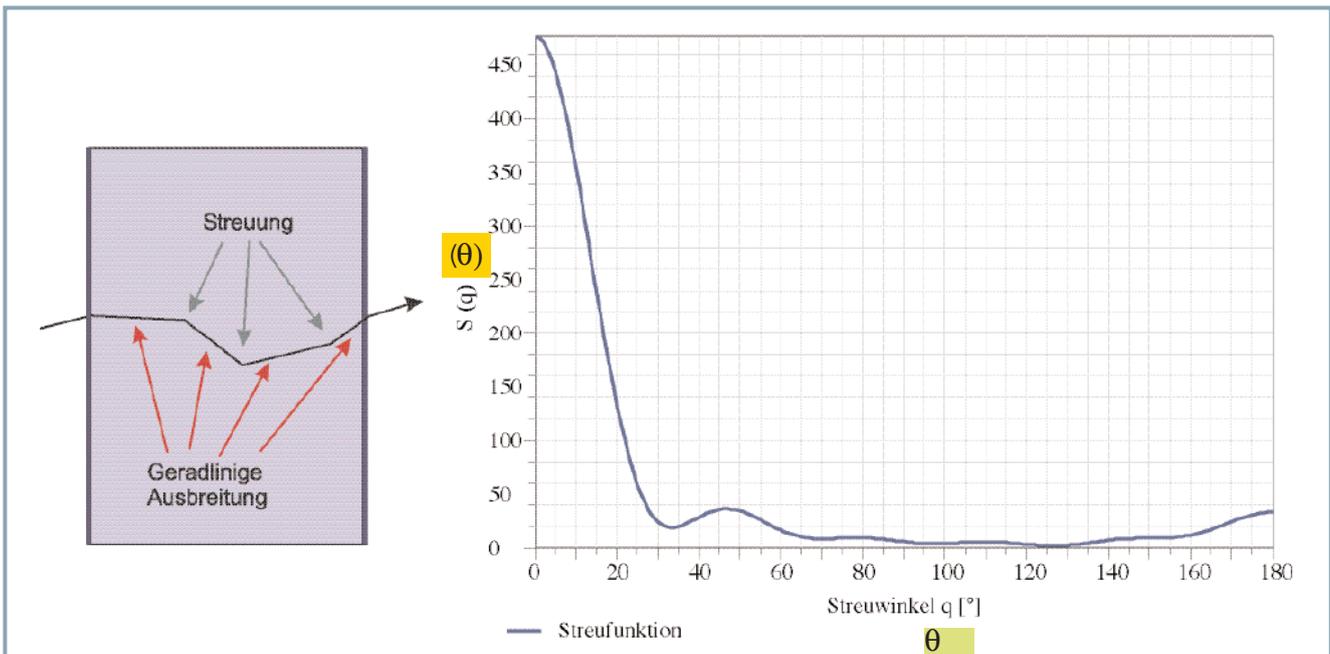
2 Streuverhalten, links, ohne diffus streuendem Kunststoff; Mitte, mit Diffusorfolie; rechts, mit Volumenstreuer

Volumenstreuung statt. Trifft dabei Licht auf Partikel oder andere Inhomogenitäten, dann wird es aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Die Intensität, Winkelverteilung und Polarisation des

kugelförmigen Teilchen beschreibt und die oft auch außerhalb ihres eigentlichen Gültigkeitsbereichs erstaunlich gute Ergebnisse liefert. Alternativ werden aber gerne auch phänomenologische Streumodelle

Richtungsänderung. Die wichtigsten Parameter sind hier die mittlere freie Weglänge τ , also der durchschnittliche Abstand zwischen zwei Streupartikeln, der Einzelstreu-Albedo A , wobei 0 für vollständige Absorption und 1 für nur Streuung steht, und die Streu- oder Phasenfunktion $S(\theta)$, die die Winkelabhängigkeit des Streulichts beschreibt (**Bild 3**).

In der Beleuchtungsoptik spielen zwei weitere eng mit einander zusammenhängende Größen eine zentrale Rolle: die Etendue G , ein Maß für die Ausdehnung eines Lichtbündels im Orts- und Winkelbereich, und die Leuchtdichte L , ein Maß für die Helligkeit. Bei normalen optischen Systemen wie Spiegeln, Lichtleiter oder Linsen bleiben – abgesehen vom Einfluss der Absorption und Reflexionsverlusten – die Etendue und die Leuchtdichte erhalten. Mit anderen Worten: Licht einer LED bleibt immer genauso hell, egal ob man sie direkt oder durch ein Linsen- oder



3 Lichtstreuung im Medium besteht aus einer Aufeinanderfolge von geradliniger Ausbreitung über die mittlere freie Weglänge τ und Streuung (links). Die Richtungsänderung bei der Streuung wird zufällig bestimmt, mit der Streufunktion als Wahrscheinlichkeitsverteilung (rechts)

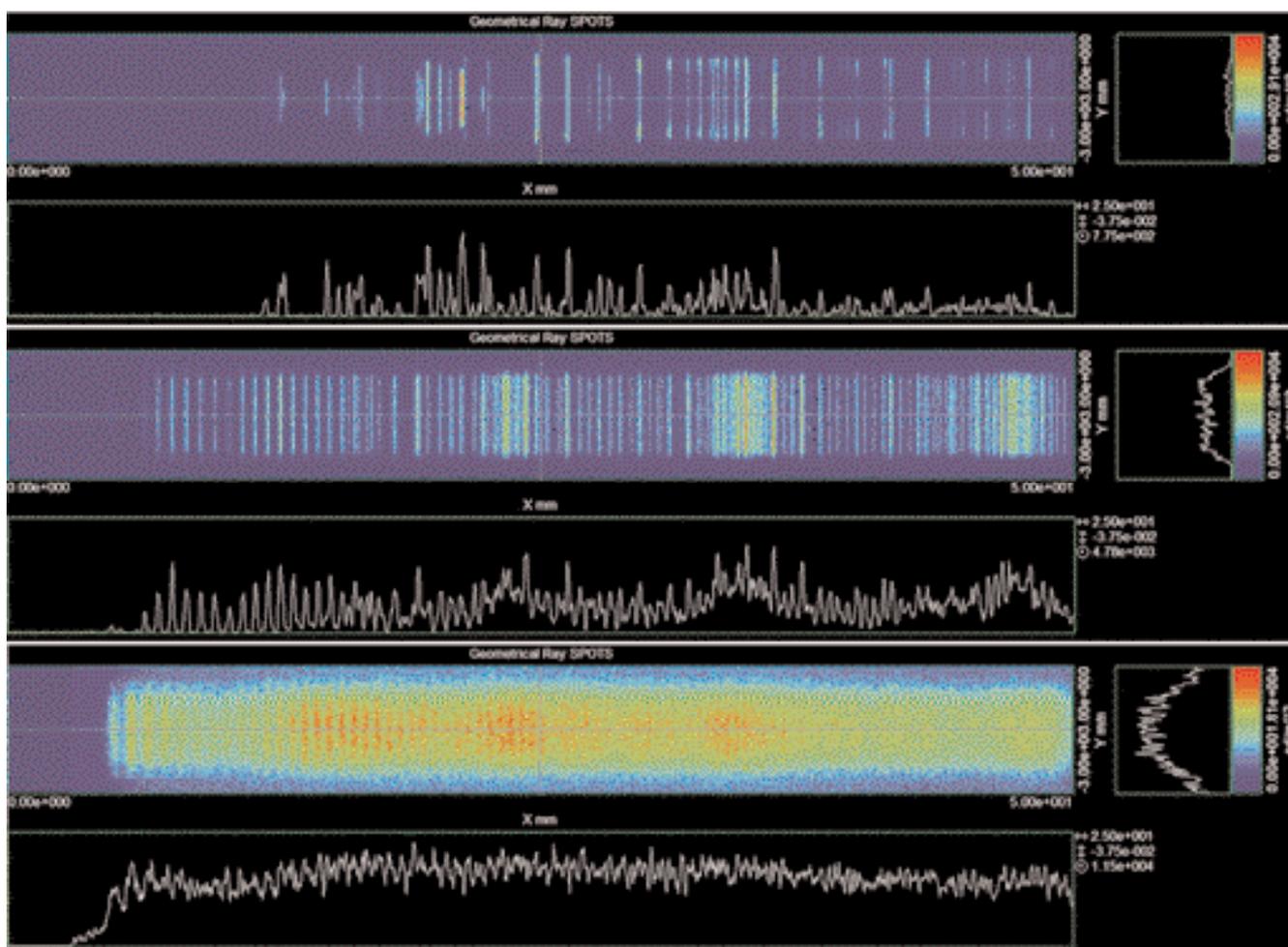
Streulichts hängen von der Beschaffenheit der Partikel ab. Generell erzeugen große Partikel eine stark vorwärts gerichtete Streuung, während kleinere Teilchen und höhere Konzentrationen die Streulichtverteilung verbreitern.

Die Theorie der Volumenlichtstreuung ist hoch komplex. Eine Basis für Simulationsrechnungen bietet die Mie-Theorie, die die elastische Streuung elektromagnetischer Wellen an einzelnen, homogenen,

wie das Henyey-Greenstein-Modell eingesetzt. Die Vielfachstreuung zwischen den einzelnen Partikeln wird mit dem Monte-Carlo-Strahlungstransport simuliert.

Letztere Methode repräsentiert die Ausbreitung von Lichtstrahlen in einem Streukörper durch Sequenzen von geradliniger Propagation und Streuung an den Partikeln, bis der Strahl das Medium verlässt oder absorbiert wird. Die Streuung modelliert man dabei durch eine zufällige

Spiegelsystem betrachtet. Auch ein konventioneller Lichtleiter ist nichts anderes als ein optisches System, die Auskoppelstrukturen (Linsen, Prismen) wirken wie ein Kaleidoskop, erhalten aber streng genommen die Etendue und Leuchtdichte. Streuende Materialien erhöhen jedoch die Etendue beziehungsweise verringern die Leuchtdichte und verhindern so Blendung. Ein Vorteil von Volumendiffusoren ist deshalb die größere »hiding power«, also ▶



4 Leuchtdichteverteilung: Oben: Lichtleiter ohne Diffusor. Die Leuchtdichteverteilung beim Auskoppeln des LED-Lichts zeigt feine Rippelmarken entsprechend der Größe, der zum Auskoppeln nötigen, in den Lichtleiter eingearbeiteten Strukturen. Das Licht wird zum Teil noch in die falsche Richtung gelenkt, so dass sich für den Betrachter insgesamt ein inhomogenes Bild ergibt. Mitte: Lichtleiter mit Diffusorfolie. Der Diffusor hat kaum Wirkung auf die räumliche Struktur der Lichtmarken, das Licht wird aber nun gleichmäßiger in alle Richtungen abgestrahlt, was zu einer etwas homogeneren Leuchtdichte führt. Unten: Erst der Einsatz eines Volumenstreuers bringt eine deutliche Homogenisierung des ausgekoppelten LED-Lichts. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass das gezeigte Beispiel lediglich grob optimiert wurde. Für einen rechten, serientauglichen Lichtleiter wäre eine Feinoptimierung nötig

das Verstecken der Lichtquelle, in Verbindung mit Homogenisierung der Lichtverteilung und einer zusätzlichen Lichtlenkung beziehungsweise Auskopplung. Als Spritzgussteil kann zudem die optische Wirkung (Linsenstrukturen, Lichtleiter) mit der homogenisierenden Wirkung kombiniert werden.

Zuverlässige Modelle werden benötigt

Eine der Herausforderungen bei dem Einsatz diffus streuender Materialien ist die Simulation. Zum einen ist hierfür eine gute Charakterisierung der Materialproben nötig, zum anderen müssen die Softwaretools, die in der Optik eingesetzt werden, Volumenstreuung quantitativ korrekt, ausreichend flexibel und schnell modellieren können.

Gerade bei der Materialcharakterisierung ist noch viel zu tun: insbesondere wäre zu wünschen, dass die Hersteller diffus streuender Materialien selbst standardisierte, von den Softwaretools unabhängige, optische Modelle dieser Materialien anbieten, um eine zuverlässige Simulation zu ermöglichen. Da die Hersteller im Normalfall nicht alle nötigen Parameter mitliefern, stehen am Anfang einer Modellierung des Streukörpers erst einmal ausführliche Messungen.

Dazu wird das Streuverhalten einer Materialprobe des späteren Streukörpers vermessen. Die Winkelabhängigkeit des Streulichts wird mit einer Photodiode gemessen, die sich in einer Ebene um die Probe bewegt. Mit diesen Messdaten wird die Streufunktion für Simulationen angepasst.

Für die computergestützte Entwicklung optischer Systeme wie die eines Volu-

menstreuers hat sich Raytracing (Strahlverfolgung) als die Standardmethode durchgesetzt. Leistungsfähige kommerzielle Software-Pakete unterstützen den Optikentwickler bei seiner Arbeit, zum Beispiel ASAP, FRED, LightTools, LucidShape, SPEOS und ZEMAX.

Beispiel Lichtleiter mit Volumenstreuer

Eine gleichmäßige Leuchtdichte an der Auskoppelfläche eines Lichtleiters lässt sich oft nur erreichen, indem man zusätzlich zu Licht lenkenden Elementen wie Reflektoren, Linsen und Fresnel-Strukturen noch Diffusoren einsetzt, die das Licht auch bezüglich der Richtungsverteilung mischen. Prinzipiell lässt sich beides mit einem einzigen Lichtleiter erreichen, der aus einem volumenstreuenden Kunststoff

besteht. Hembach Photonik geht hier den konzeptionell einfacheren Weg und verwendet einen transparenten Lichtleiter mit einem separaten Volumenstreuer. Beim Design des Gesamtsystems wird modular vorgegangen: zuerst wird der Lichtleiter so entwickelt, dass er auf der Auskoppelfläche eine – auf grober Skala betrachtet – homogene Beleuchtungsstärke produziert. Feinskalige ›Rippel‹ sowie die Winkelverteilung werden noch nicht beachtet.

Im zweiten Schritt wird der Diffusor aus einem volumenstreuenden Material modelliert. Hierzu sind, wie oben beschrieben, Labormessungen nötig. Aus diesen werden dann mit geeigneten Algorithmen die Streufunktion und die mittlere freie Weglänge als Materialparameter extrahiert. Dieser Prozess bewegt sich noch weitgehend auf ›Neuland‹ in der Lichttechnik und wurde deswegen besonders sorgfältig getestet.

Hierzu wurde ein Modell des Diffusors auf verschiedene Weise realisiert:

- Komplette Modellierung mit einem eigenen Spezialprogramm.
- Ein selbst entwickeltes Programm berechnet die Streufunktion im Rahmen

der Mie-Theorie. Ein ASAP-Modell liest diese Phasenfunktion über eine speziell erstellte DLL ein und führt dann die Simulation durch.

- Komplette Modellierung mit einem eigenen Spezialprogramm.

Es wurde verifiziert, dass alle Ansätze die gleichen Ergebnisse liefern; die Modellparameter wurden dann so lange angepasst, bis eine gute Übereinstimmung mit Messdaten erzielt wurde. Die Parameter sind materialspezifisch, hängen also nicht von der Form des Streukörpers ab und können daher zur Berechnung des optischen Verhaltens von Volumenstreukörpern beliebiger Form verwendet werden.

Im letzten Schritt wurde schließlich das Gesamtsystem aus Lichtleiter und Volumenstreuer simuliert. In der Tat ergibt sich nun an der Auskoppelfläche des Diffusors eine auf allen Längenskalen homogene Leuchtdichte (**Bild 4**, unten).

Fazit

Lichtleiter mit Volumenstreuern für eine optimierte Hinterleuchtung der Armaturen zu nutzen ist dabei nur eine

Möglichkeit. Der LED-Einsatz bei Rücklichtern und Tagfahrlichtern von Fahrzeugen ist ebenfalls ein attraktives Anwendungsfeld. Die homogene Ausleuchtung bewirkt eine Entblendung, da die LEDs nicht mehr einzeln sichtbar sind, und gibt der Leuchte eine ästhetische Wirkung. Der Trend zu ›ambient lighting‹ mit wechselnden Lichtszenarien auf Basis von LEDs wird dann vollends zur Herausforderung im Modellieren optimaler Volumenstreukörper. Hembach Photonik bietet hierfür umfassende Unterstützung – von der Konzept- und Machbarkeitsstudie bis hin zur Serienfertigung.

AUTOREN

Dr. BERNHARD MICHEL ist Gründer und Geschäftsführer von Hembach Photonics.

Dr. BARBARA STUMPP ist freie Fachjournalistin in Freiburg.

ROBERT FISCHER ist Entwicklungsingenieur im Bereich Optik und Lichttechnik bei Hembach Photonik.

- www.laser-photonik.de/LP110252

IDEX