

Räumliche Messung der Lichtstreuung – die BRTF in der Praxis

Peter Apian-Bennewitz, pab advanced technologies Ltd, Freiburg im Breisgau

Messungen der Lichtstreuung liefern Daten zur Charakterisierung von Materialoberflächen und internen Streuprozessen. Diese sind Grundlage zur Design-Optimierung, zur Materialauswahl und zur Simulation optischer Systeme. Dieser Artikel führt in die Grundlagen der BRTF-Messtechnik ein und gibt einige Beispiele für Messungen auch außerhalb der Streuebene.

Der Energietransport elektromagnetischer Strahlung kann im Rahmen der geometrischen Optik mit *radiometrischen* Größen beschrieben werden. Zentral ist dabei die *Strahldichte* L entsprechend der Leistung P [Watt] pro Raumwinkel Ω [steradian] und abstrahlendem Flächenelement A [m²]. L ist eine Funktion der Richtung \vec{x} von einem Flächenelement in eine Raumrichtung. Generell können radiometrische Größen auch Parameter wie Wellenlänge und Polarisationszustand elektromagnetischer Strahlung enthalten, aber keine Information über die Phase. Wenn nicht anders angegeben, sind sie meist integral über einen Wellenlängenbereich zu verstehen. Wird eine spektrale Verteilung mit der Augenempfindlichkeit $V(\lambda)$ gewichtet, werden die daraus folgenden spektral integrierten Werte analog als *photometrisch* bezeichnet. Zur einfacheren Darstellung werden im Weiteren die radiometrischen Bezeichnungen verwendet.

1 Definition der BRTF

Ausgehend von $L(\vec{x})$ wird die Situation der Streuung von Licht an einem Flächenelement betrachtet: In **Bild 1** fällt auf ein Probenelement Strahlung aus \vec{x}_{in} ein, wobei die Quelle vom Flächenelement aus gesehen den Raumwinkel Ω_{in} einnimmt. Das Licht wird dann in Ω_{out} um die Raumrichtungen \vec{x}_{out} gestreut. Im Allgemeinen ist die Streuung somit eine Funktion der einfallenden und ausgehenden Raumrichtungen. Da sich diese zwei Richtungen mit vier Winkeln angeben las-

sen, hängt sie damit mindestens von vier skalaren Variablen ab. Die zentrale Funktion, die diese Streuung umfassend beschreibt, heißt „bidirectional-reflection-transmission-function“ (BRTF)¹ und ist implizit durch das Integral in

$$\mathcal{L}_{out}(\vec{x}_{out}) = \int_{\vec{x}_{in}}^{4\pi} BRTF(\vec{x}_{out}, \vec{x}_{in}) \mathcal{L}_{in}(\vec{x}_{in}) \cos(\theta_{in}) d\Omega_{in} \quad (Gl. 1)$$

definiert. Damit ist die BRTF der Kern einer Faltung der einfallenden Strahldichte zur ausgehenden Strahldichte. Dieses mathe-

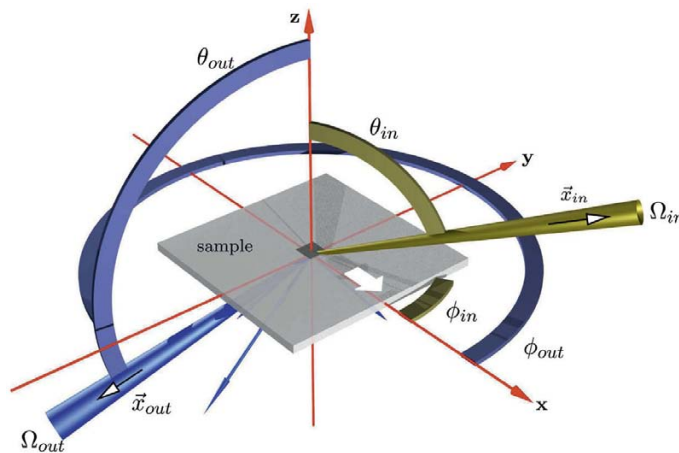


Bild 1: Geometrie und Winkel zur Beschreibung der Lichtstreuung

mathematische Konzept ist leistungsfähig und umfassend: Zum Beispiel wird eine ideal transmittierende, nicht streuende Probe durch die peakförmige Dirac-Delta-Funktion beschrieben, die aus dem Integral mathematisch korrekt ein einfaches $\mathcal{L}_{out} = \mathcal{L}_{in}$ erzeugt. Analog können ideale Spiegel mit Dirac-Delta-Funktion beschrieben werden, die entsprechend „Ausfallswinkel = Einfallswinkel“ beinhaltet. Damit ist bereits greifbar, dass Abweichungen vom idealen Spiegel, etwa durch Mikrorauigkeiten der Spiegeloberfläche, durch eine Verbreiterung des idealen

„Nadelpeaks“ der Dirac-Delta-Funktion beschrieben werden. Je breiter der Peak, desto mehr Einfallsrichtungen tragen in der Faltung zu einer Ausfallsrichtung bei. Im Falle des Spiegels heißt dies, dass er zunehmend mehr Streulicht reflektiert.

Ist die BRTF konstant, wird die streuende Fläche als „Lambert-Streuer“ bezeichnet, analog dem „Lambert-Strahler“. Eine solche Fläche ist unter anderem das ideale Material für die Innenbeschichtung von Ulbricht-Kugeln. In der Realität auftretende Abweichungen vom ideal diffusen Verhalten sind ebenfalls messbar [1].

Nur für den theoretischen Fall des einfallenden ideal parallelen Lichts, in dem \mathcal{L}_{in} selbst als Dirac-Delta-Funktion nur Strahlung aus genau einer Raumrichtung enthält, folgt aus der BRTF-Definition formal die explizite Formel

$$BRTF(\vec{x}_{in}, \vec{x}_{out}) \approx \frac{\mathcal{L}_{out}(\vec{x}_{out})}{E_{parallel}(\vec{x}_{in})} \quad (Gl. 2)$$

wobei E_{in} für die Bestrahlungsstärke des Flächenelements steht. Jedoch ist nur die implizite Definition (Gl. 1) der Faltung mathematisch „wasserdicht“ und robust in der Praxis.

Nützlich ist das Konzept der *Streuebene*, die aus der Einfallsrichtung und der Probenormalen aufgespannt wird. Der Peak der idealen Reflexion liegt in der Streuebene, weshalb es sich anbietet, Schnitte der BRTF zur Generierung von 2D-Plots in diese Ebene zu legen.

Allgemein wird zur Visualisierung der BRTF meist die Einfallsrichtung festgelegt und die so definierte Funktion von zwei Parametern als 3D-Gebirge, Konturen- oder Falschfarben-Grafik abgebildet. Zweidimensionale Diagramme sind dann Schnitte entlang einer Richtung der 3D-Darstellung.

¹ Ähnliche Namen für dieselbe Größe sind unter anderem BRDF (bidirectional-reflection-distribution-function) oder BSDF (bidirectional-scatter-distribution-function).

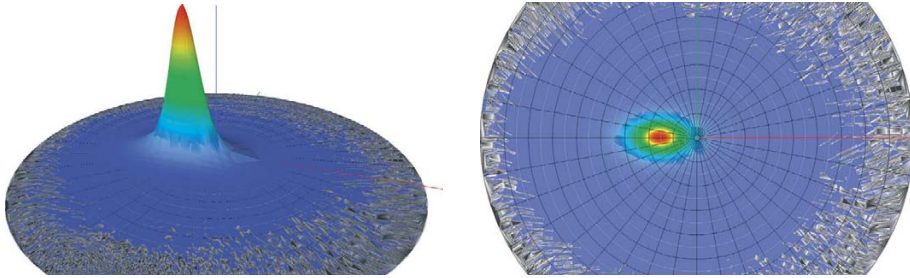


Bild 2: Asymmetrische Reflexions-BRTF eines Aluminiummaterials der Leuchtenindustrie für 30° Einfallswinkel (Plot mit linearer Z-Skala)

2 Anwendungsgebiete

Die BRTF kommt in den verschiedensten Bereichen der Optik zum Einsatz, von der Minimierung von Streulicht in optischen Systemen über Materialmodelle bis zu Optimierung von Reflektoren und Diffusoren in der Beleuchtungsoptik. Der Spektralbereich umfasst alles messtechnisch Zugängliche. Anwendungen der BRTF fallen meist in vier Kategorien:

2.1 Material-Charakterisierung

Die BRTF einer Probe erlaubt zusammen mit Modellen der internen Streuprozesse Rückschlüsse auf Materialparameter, z.B. auf die Oberflächenrauigkeit (RMS) von Metallproben oder auf die Verteilung der Komponenten eines Mischpolymers für LED-Diffusoren. Die Messung an hoch polierten Spiegeln für abbildende Systeme ist eine Standardanwendung [2] und war ursprünglich eine der Motivationen zur Entwicklung des BRTF-Konzepts um 1970 [3].

Bild 2 zeigt die Messdaten für eine leicht streuende Aluminiumoberfläche, wie sie in Leuchtenreflektoren verwendet wird. Auf Grund der Walzrichtung ist die Reflexion asymmetrisch. Breite und Form der BRTF sind über die Behandlung der Oberfläche steuerbar.

Bild 3 demonstriert ein Beispiel aus dem IR-Bereich: Die Transmission verschiedener

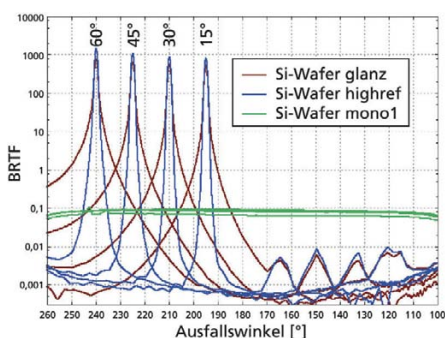


Bild 3: Schnitt durch eine IR-Transmissions-BRTF ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) von drei Si-Wafern mit unterschiedlicher Oberflächenstrukturierung

Si-Wafer bei 1 μm Wellenlänge für vier verschiedene Einfallswinkel. Zwei Wafer zeigen ähnliche, aber unterschiedlich breite Streuung um die Vorwärtsrichtung, ein dritter ist fast ideal diffus mit konstanter BRTF. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Streuprozesse an der Oberfläche und im Material selbst. Dazu ergänzende Messungen an Wafern im sichtbaren Bereich charakterisieren teiltransparente PV-Module für die kombinierte Tageslichtnutzung in Fassaden.

In **Bild 4** ist die besondere BRTF eines holografisch hergestellten Elements aus der aktuellen Forschung zur Lenkung von Tageslicht dargestellt.

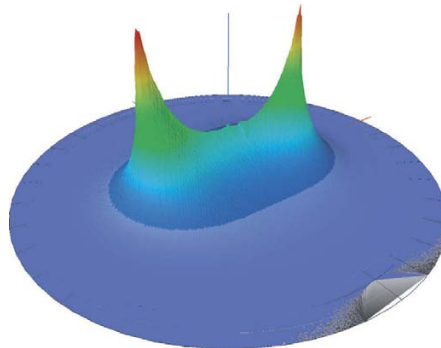


Bild 4: BRTF eines holografischen Lichtlenkelements: Der linke Peak ist die direkte Transmission, der rechte resultiert vom umgelenkten Licht (Xenon-Lichtquelle, Probe hergestellt vom Fraunhofer ISE)

2.2 Optische Simulationsprogramme

Meist wird für die numerische Simulation intern ein mathematisches Modell der BRTF verwendet. Durch Anpassen der Parameter der BRTF-Modelle an Messdaten folgen realistische Simulationsergebnisse für im Projekt vorliegende Materialien.

2.3 Berechnung anderer Kenngrößen

Die bekannteren direkt-hemisphärischen Größen der Transmission τ_{dh} und Reflexion ρ_{dh} folgen z.B. beide durch Integration über den Transmissions- oder Reflexions-Halbraum aus der BRTF. Gegenüber ande-

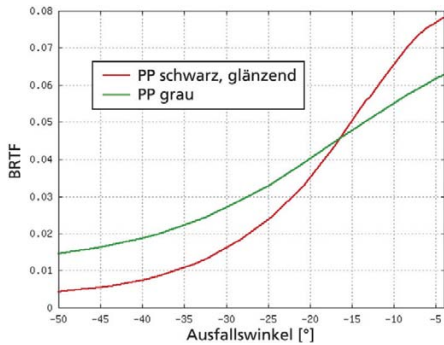


Bild 5: Reflexion zweier Materialien für eine Lenksäulenverkleidung aus Polypropylen (PP)

ren Messmethoden liegt der Vorteil in einer detaillierteren Aussage, z.B. zur Transmission in einen bestimmten Raumwinkelbereich. Daraus ergeben sich praktische Möglichkeiten zur Materialbeschreibung und Optimierung, die über Messungen durch Ulbricht-Kugeln mit integrierter Glanzfalle deutlich hinaus gehen. Beispiele zur Integration finden sich in [4].

2.4 Materialvergleich und Auswahl

Vorliegende Materialien für eine Anwendung lassen sich oft bereits durch den direkten Vergleich der BRTF-Messwerte auswählen. Als Beispiel zeigt **Bild 5** Messdaten zweier Kunststoffe zum Einsatz im Automobilbereich. In diesem Fall sind die vollständigen Messdaten entlang der Streuebene geschnitten und als 2D-Plot dargestellt: Ein matteres, graues PP-Material und schwarzes, glänzendes PP. Für den Winkelbereich der Einbausituation, im Plot der Bereich um -10° , war das graue Material auf Grund der geringeren Reflexion die geeignetere Wahl, entgegen der intuitiven Präferenz für schwarz.

3 Messmethoden

BRTF-Messgeräte bestehen aus einer Lichtquelle, einem Probenhalter und einem Detektor. Eine Messung umfasst meist einen Satz von Ausfallswinkeln bei schrittweise verfahrenem Einfallswinkel. Im einfachsten Fall sind alle Komponenten in einer Ebene aufgebaut, typischerweise auf einem optischen Tisch, und erlauben die Messung innerhalb der Streuebene ("in-plane" Verfahren). Eine vollständige Mes-

sung ist damit nicht möglich, da Werte außerhalb der Streuebene nicht allgemein extrapoliert werden können. Dies zeigt z.B. die asymmetrische Reflexion der Aluminiumprobe in Bild 2.

Bei "out-of-plane" Messanordnungen misst das Detektorsystem auch außerhalb der Streuebene. Dabei werden zwei Systeme unterschieden: scannende Goniophotometer bewegen den Detektor mechanisch in zwei Achsen um die Probe herum (**Bild 6**). Alternativ können Kamera-basierte Systeme verwendet werden, die mehrere Ausfallsrichtungen auf einen ortsauflösenden Kamerasensor abbilden, etwa durch teiltransparente Halbkugeln. Letztere messen zwar schneller, sind aber in ihrem dynamischen und spektralen Bereich stärker eingegrenzt. Sie werden daher vorwiegend in der Computergrafik [5] oder für die Überwachung einzelner Parameter in Produktionsprozessen verwendet, etwa in der Oberflächentechnik.

Die Baugrößen reichen von Tischgeräten bis zu raumfüllenden Anlagen mit 1 m Detektorabstand zur Probe. Ein großer Detektorabstand bietet dabei Vorteile in der Streulicht-Unterdrückung und erlaubt eine beleuchtete Probengröße von einigen cm. Die Detektorgeschwindigkeit kann, je nach Messparameter und verwendetem Antrieb, bis etwa 30 U/min je Achse liegen, was bei einem großen Goniophotometer eine Bahngeschwindigkeit von 3 m/s für

den Detektorkopf ergibt. Eine Abtastfrequenz von 1 kHz liefert dabei auch bei maximaler Geschwindigkeit während der Bewegung immer noch eine Winkelauflösung von $0,18^\circ$. Höhere Auflösungen werden mit niedrigeren Winkelgeschwindigkeiten erreicht.

Für absolute Werte ist eine Referenzmessung notwendig, die entweder einen diffusen Weißstandard verwendet ("relative calibration" nach ASTM E2387), oder den ungestreuten Strahl ("absolute calibration" nach ASTM E2387). Letztere Methode liefert ab-initio Werte ohne Referenz, stellt aber höhere Anforderungen an den Dynamikbereich des Detektorsystems. Da für die Messung peak-förmiger BRTFs ohnehin ein großer Dynamikbereich erforderlich ist, ist die absolute Referenzmessung quasi ein Nebenprodukt [4].

Bei modernen scannenden Goniophotometern wird die Messzeit optimiert [1]: Dazu gehören die Abtastung während der Bewegung ("on-the-fly"), eine optimierte Bahn für den Detektor, Messköpfe mit mehreren, parallel arbeitenden Sensoren und eine Mess-Strategie für eine adaptive Verteilung der BRTF-Messpunkte. Letzteres bedeutet, dass die Positionierung der noch folgenden Messpunkte jeweils abhängig von den bisherigen Messergebnissen erfolgt.

Mathematisch gesehen besteht eine BRTF-Messung aus dem Abtasten einer Funktion

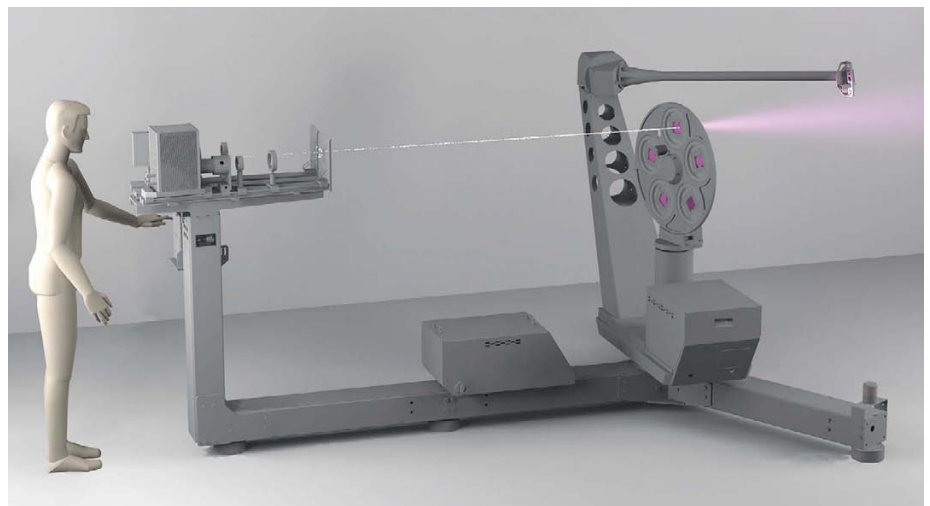


Bild 6: CAD-Modell eines kommerziellen Goniophotometers für BRTF-Messungen mit 1 m Abstand zwischen Probe und Detektor

zweier Variablen, die a-priori unbekannt ist, und für die während der Messung weitere Messpunkte hinzugefügt werden. Die Verteilung dieser Messpunkte entspricht dabei der adaptiven Stützstellen-Wahl einer numerischen Integration.

Für einen Dynamikbereich von mindestens sieben Dekaden und "on-the-fly" Messungen kommen als Detektortyp Photodioden im Photovoltaik-Modus zum Einsatz. Die Grundmaterialien Si, InGaAs und InAs decken den sichtbaren und den IR-Bereich bis 2,5 μm ab. Darüber hinaus können Quecksilber-Cadmium-Tellurid-Photodioden (HgCdTe, MCT) mit thermoelektrischer Kühlung verwendet werden. Dabei steigt allerdings mit zunehmender Wellenlänge der Aufwand für ein brauchbares Signal/Rausch-Verhältnis (SNR).

Je nach Bauart arbeiten in einem Messkopf simultan mehrere Detektoren und können damit Spektralbereiche vom UV bis ins IR gleichzeitig erfassen. Auch die parallele Messung verschiedener Polarisationszustände ist machbar. Selbst die Verwendung kompakter Spektrometer zur feiner aufgelösten spektralen Erfassung der BRDF ist möglich, dabei muss jedoch der geringere Dynamikbereich der verwendeten CCD- oder CMOS-Zeilensensoren kompensiert werden.

Als Lichtquellen kommen Halogenlampen, Kurzbogen-Hochdrucklampen und Laser zum Einsatz. Streulicht aus der Lichtquelle wird durch Blenden und qualitativ hochwertige Optiken minimiert, um BRDF-Messungen nahe dem idealen Delta-peak zu ermöglichen. Probenspezifisch angepasst Detektor-Öffnungswinkel erlauben einen Kompromiss zwischen SNR und Winkelauflösung.

4 Fazit

Scheut man nicht den Messaufwand, dann ergeben sich aus der Kenntnis der BRDF

einer Probe oft äußerst hilfreiche Informationen, die bei der Optimierung von Systemen oder Komponenten wertvolle Dienste leisten und sich schnell bezahlt machen. Auch der Prototypenbau wird durch verkürzte Versuchsreihen beschleunigt. In vielen Fällen genügt schon die einmalige Messung eines charakteristischen Prüflings, um grundlegende Eckdaten für viele Designaufgaben zu gewinnen. In Forschungsprojekten sind BRDF-Messungen eine der Datenquellen zur Entwicklung neuer Materialien.

Literaturhinweise:

- [1] P. Apian-Bennowitz, *New scanning gonio-photometer for extended BRDF measurements*, Proc. SPIE, Vol. 7792, 77920O, 2010, doi:10.1117/12.860889
- [2] J.C. Stover, *Overview of current scatterometer measurements and the impact on optical systems*, Metrology of Optoelectronic Systems, pp. 33–41, SPIE, Vol. 776, 1987
- [3] F.E. Nicodemus, J. Richmond, J. Hsia, *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*, tech. rep., U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, October 1977
- [4] P. Apian-Bennowitz, J. von der Hardt, *Enhancing and calibrating a goniophotometer*, Solar Energy Materials & Solar Cells (54), pp. 309–322, 1998
- [5] P. Matt, G. Humphreys, *Physically Based Rendering*, Morgan Kaufmann, p. 1019, 2004
- [6] Norm E2387-05, *Standard practice for goniometric optical scatter measurements*, ASTM, 2005

Ansprechpartner:

Dr. Peter Apian-Bennowitz
pab advanced technologies Ltd
Gilgenmatten 44
79114 Freiburg
Tel 0761-4766302
Fax 0761-4766303
eMail: info@pab.eu
Internet: www.pab.eu

www.photonik.de ▶ Webcode 3005