

Monte-Carlo-Simulation von Licht im getrübbten Medium

Yang Wu*, Damien P. Kelly*

* Institut für Mikro- und Nanotechnologien, Macro-Nano, Fachgebiet Optik Design, TU Ilmenau

<mailto:Yang.wu@tu-ilmenau.de>

Die Wechselwirkung zwischen Laser und einem stark getrübbten Medium ist ein komplexes optisches Problem. Oft wird der statistische Monte-Carlo Algorithmus verwendet um die Wechselwirkung, bei bekannten Absorptionskoeffizient μ_a , dem Streukoeffizient μ_s und dem Anisotropen g , zu beschreiben. Es wurden ein theoretisches Modell erstellt und praktische Versuche durchgeführt, wobei sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messergebnissen und den simulierten Werten zeigte.

1 Einführung

Die Monte-Carlo Methode ist ein statistisches Verfahren wodurch ein physikalisches Phänomen simuliert werden kann. Sie wird noch immer in vielen Gebieten verwendet. Anwendung findet die Methode bei der Untersuchung von Solarzellen [1] oder der Ausbreitung von Licht im menschlichen Gewebe [2]. Die Monte-Carlo Simulation (MCS) soll programmiert und die Wechselwirkung zwischen einem Laser und einem Medium untersucht werden.

In Abschnitt 2 sind die drei wichtigen Parameter μ_a , μ_s und g beschrieben, die zur Durchführung der MCS erforderlich sind. In Abschnitt 3 wird die Funktionsweise der MCS verdeutlicht. Ein Vergleich des theoretischen Modells mit den Messergebnissen der Versuche ist in Abschnitt 4 dargestellt. Den Abschluss und einen kurzen Ausblick bildet Abschnitt 5.

2 Grundlagen

Wenn sich Photonen in einem getrübbten Medium ausbreiten, sind drei Parameter für die Absorption und Streuung nötig. Dabei handelt es sich um den Absorptionskoeffizienten μ_a , den Streukoeffizienten μ_s und den Anisotropen g . In Abb.1 ist der Weg von Photonen dargestellt. Photon 1 wird auf dem Weg von A nach B dreimal gestreut bevor es absorbiert wird. Für Photon 2 ergibt sich eine fünfmalige Streuung auf dem Weg von C nach D. Die optischen Weglängen von Absorption und Streuung unterscheiden sich da sie bestimmten Verteilungsfunktionen unterliegen, die von μ_a bzw. μ_s abhängig sind. Die Streuungsrichtung des Photons und die winkelabhängige Streuungsintensität werden durch die Phasenfunktion beschrieben, welche vom Parameter g abhängig ist. Da es

oft schwer ist solche Parameter direkt zu messen [3], untersuchen wir einen einfachen Fall. Dabei wird Licht durch kleine Kugeln gestreut und die drei Parameter werden mit Hilfe der Mie-Theorie berechnet.

Die Mie-Theorie beschreibt die Streuung elektromagnetischer Wellen an sphärischen Objekten, deren Durchmesser in etwa der Wellenlänge der Strahlung entsprechen [4]. Bei bekanntem Brechungsindex und Durchmesser des Partikels lassen sich μ_a , μ_s und g für die MCS bestimmen. Die Parameter μ_a und μ_s werden direkt im Programm verwendet. Da die Mie Phasenfunktion nur eine theoretische Lösung für die Streuung darstellt, welche nicht numerisch effizient in der MCS verwendbar ist, benutzen wir die einfach programmierbare Henyey-Greenstein (HG) Phasenfunktion [2].

3 Monte-Carlo

Wenn Licht in ein getrübbtes Medium übergeht, gibt es drei Möglichkeiten (Reflexion, Absorption und Transmission) die mit Pfeilen in Abb.1 dargestellt wird. Die roten Pfeile stehen für Licht das im Medium absorbiert wird während blaue Pfeile einen Durchgang und lila Pfeile eine Reflexion am Medium darstellen. Aus einer großen Anzahl von emittierten Photonen (ca. 10^5) ergibt sich eine statistische Verteilung der Lichtleistung.

Normalerweise wird ein Photon um die Wegänderung Δs bewegt, welche viel kleiner als $1/(\mu_s + \mu_a)$ ist. Durch einen zufälligen Prozess entscheidet sich, ob das Photon absorbiert, gestreut oder weiter geschickt wird. Da diese Methode jedoch eine relativ lange Rechenzeit braucht, benutzen wir eine Methode mit variabler Schrittgröße [2], die deutlich schneller ist.

Die im Programm benötigten drei Parameter μ_a , μ_s und g werden per Mie-Caculator [5], mit bekanntem realen und imaginären Brechungsindex und Durchmesser der Kugel für einer Wellenlänge, berechnet.

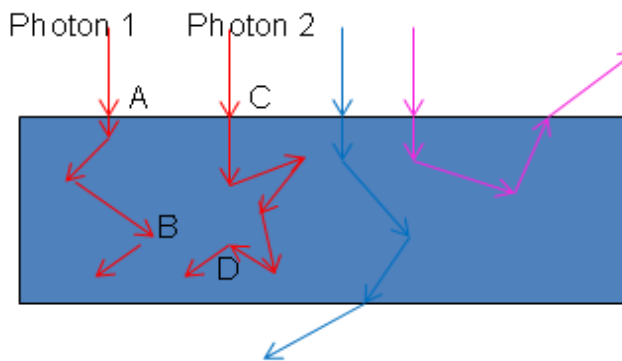


Abb.1 Drei Möglichkeiten der Wechselwirkungen zwischen Laser und Medium

4 Reale Experimente

Es wurden zwei Experimente durchgeführt und die Messergebnisse mit der MCS verglichen. Im Experiment werden Polystyrol Kugeln (PPs-1.0 2.5% Kisker, GmbH, Thüringen) mit einem Durchmesser von $1,002\mu\text{m}$ als Streuungsmedium eingesetzt. Der reale und imaginäre Brechungsindex ist von anderem Paper gegeben. (1.598 bzw. -0.0004 für 532nm [6]). Die Messung der Streuungsverteilung des Lichts, welches auf das Medium in der Küvette trifft, erfolgt mit einer Photodiode (Abb.2). Dabei wird mit einem Lock-In-Verstärker ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis erzeugt. Die Photodiode dreht sich um die Küvette und misst die Verteilung der Lichtleistung. Die Messergebnisse werden mit der MCS verglichen (Abb.3).

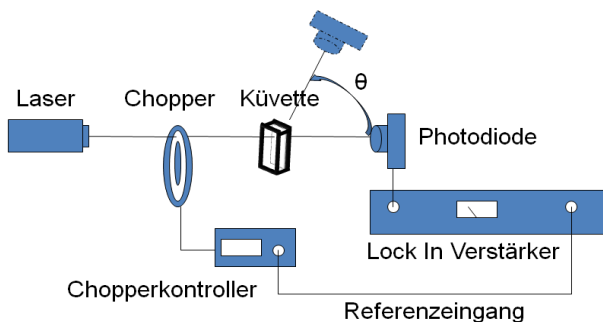


Abb.2 Anlage der Messung des Streulichts

5 Ausblick

Die Simulation stimmt mit der Messung gut überein wobei sich die größten Abweichungen zwischen 10 bis 30 Grad befinden. Weitere Versuche sollten mit unterschiedlich getrübbten Medien oder mit anderen Wellenlängen beziehungsweise mit anderen Lichtquellen durchgeführt werden.

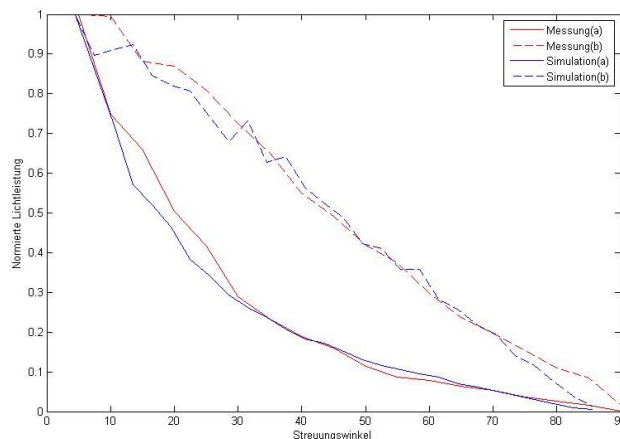


Abb.3 Messungsergebnis und Simulationsergebnis bei (a): Konzentration des PPs $2,375-03$ Kugeln/ μm^3 , $\mu_s=6,0268$ $\mu_a=0,016$, $g=0,92797$ und (b): Konzentration des PPs $4,75-03$ Kugeln/ μm^3 , $\mu_s=12,05$ $\mu_a=0,032$, $g=0,92797$

Literatur

- [1]. C. Manfredotti and M. Meliga, „Monte Carlo simulation of solar cells“ in: Solar Cells **10**(3), 211-222 (1983),
- [2]. S. A. Prahl, „Light transport in tissue“: The University of Texas at Austin, 1988
- [3]. H. Karlsson, „Inverse Monte Carlo for estimation of scattering and absorption in liquid optical phantoms“ in: Optics Express **20**(11), 12233-12246 (2012)
- [4]. M. Kerker, The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation (Academic, 1969).
- [5]. Mie-Caculator, http://omlc.ogi.edu/calc/mie_calc.html
- [6]. M. A. Velazco-Roa and S. N. Thennadil, „Estimation of complex refractive index of polydisperse particulate systems from multiple-scattered ultraviolet-visible- -near-infrared measurements“ in: Applied Optics **46**(18), 3730-3735 (2007).