1. **Einleitung**

Der Begriff Physically Based Rendering/Shading (kurz PBR) beschreibt einen Überbegriff, welcher verschiedene Rendering Methoden und Techniken umfasst. Diese basieren auf physikalischen Theorien und Prinzipen, welche darauf ausgerichtet sind, die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie so korrekt wie möglich zu modellieren. Zu diesen physikalischen Gegebenheiten zählt beispielweise die Energieerhaltung innerhalb eines Systems. (vgl. S.133 David Wolf und DeFries)

Dennoch stellt PBR keine physikalisch korrekte Simulation des Lichtes dar, da es Approximations-funktion verwendet, um den Arbeitsaufwand und somit die gesamt Berechnungsdauer zu verringern. Aus diesem Grund wird es Physically Based (zu dt. physikalisch basierendes) Rendering genannt und nicht Physically Rendering. (DeFries)

(Notizen: Welche bedingungen gibt es.

Entwicklerstudious haben es schon adaptiert weil: Vorteile nennen )

1. **Physikalische Grundlagen der Radiometrie**

Die Radiometrie ist ein Teilgebiet der Strahlungsphysik, welches sich mit Messung von elektromagnetischer Strahlung unabhängig von dem Menschlichen Auge befasst (vgl. Spinger). Da im weiteren Verlauf des Papers Fachbegriffe bzw. Physikalische Größen der Radiometrie referenziert werden, sollen im Folgenden diese näher erläutert.

Der **Strahlungsfluss** (Physikalisches Symbol φ) repräsentiert die Leistung einer Leuchtquelle. Definiert ist die Leistung als die Strahlungsenergie, welche von der Quelle abgestrahlt wird pro gemessene Zeiteinheit (vgl. Springer).

(- Formel -)

Der **Raumwinkel** ω funktioniert analog zum Bogenmaß im 3-dimensionalen Raum. Er ist definiert als das Verhältnis der Kugelfläche zum Quadratischen Radius der Kugel. Die Fläche, welche im Bild (bilfref) zu sehen ist wird gebildet in dem man die Form auf die Hemisphäre (Einheitskugel) projiziert. Durch den Raumwinkel wird dabei nicht nur die einnehmende Fläche auf der Hemisphäre, sondern auch die Richtung des Objektes bestimmt.

(- Bild-)

Die **Strahldichte** (Physikalisches Symbol L) ist ein Maß für die Lichtabstrahlung einer Fläche. Sie definiert die Leistung einer Lichtquelle pro Raumwinkel ω und pro Flächeninhalt der emittierende Fläche A \*cos e. Der zusätzliche Gewichtungsfaktor cos e im Nenner beschreibt dabei das Phänomen, dass eine Fläche unter einem Betrachtungswinkel kleiner wirkt als bei einer senkrechten Betrachtung der Fläche. (vgl. DeFries|grundL|GrundbG|vbg).

Zudem gehört die Strahldichte zu den sogenannten raumwinkelabhängigen Größen. Diese besitzen keine Abhängigkeiten bezüglich der Entfernung zu der Lichtquelle. Unter der Annahme eines Vakuums verändert sich somit die Werte der Strahldichte bis zum Auftreffen auf der Oberfläche nicht. Wodurch es möglich wäre mit der Formel der Strahldichte die Gesamte Verteilung des Lichtflusses zu beschreiben. (vgl. gmüller)

(- Bild für Strahldichte + Formel -)

Die **Bestrahlungsstärke** ist ein Maß für die Stärke der Lichteinstrahlung auf einer Oberfläche. Sie ist definiert als die Relation zwischen der Strahlungsleistung delta φ, die auf eine gegebene Fläche mit dem Flächeninhalt delta A einfällt (vgl. grundL):

(- Formel -)

Die oben gezeigt Formel in ihrer einfachsten Form besitzt eine Vielzahl von Abhängigkeiten (vgl. grundL):

* Position der Fläche
* Orientierung der Fläche
* Distanz von Lichtquelle zur Fläche

Um diese Abhängigkeiten mit einzubeziehen verwendet man im beim Physically Based Rendering Folgende Formel der Bestrahlungsstärke:

(-Formel einfügen -)

Sie beschreibt die Bestrahlungsstärke über die Strahlungsdichte multipliziert mit einem Kosinus Faktor, welcher sich aus dem Winkel zwischen der Flächennormalen (n) und der Richtung des einfallenden Lichtstrahls (𝜔i) ergibt. Dieser Faktor repräsentiert, das Lambertsche Kosinus gesetzt, welches die jeweilige Geometrie der Situation (die Positionierung von Lichtquelle zur Oberfläche) mit einbezieht. Je direkter das Licht auf die Oberfläche auftrifft umso größer ist schlussendlich die Intensität des Lichtstrahls, welchen wahrgenommen werden kann (ref GRAY| online defs.).

Um letzten Endes die Gesamtmenge an Licht zu errechnen, welche auf eine Fläche einfällt müssen wir die Summe der Strahldichten aller Leuchtquellen messen. Physikalisch korrekt wird hierzu die Summe als Integral über die Hemisphäre Ω gebildet.

**reflectance equation**

Wie bereits in der Einleitung erwähnt wird beim Physically Based Rendering die Interaktion zwischen dem Licht und den Materialen eines Objektes modelliert. Um dies zu berechnen verwendet das PBR eines der derzeit besten Modelle zur Simulation der visuellen Erscheinungen des Lichtes, die sogenannte Reflectance Equation (zu dt. Reflexions-Gleichung) (vgl. DeFries).

(-Funktion einfügen-)

Diese Formel ist eine Vereinfachung bzw. eine Spezialisierung der Render Equation (zu dt. Render Gleichung), welche 1986 von David Immel et al. and James Kajiyain, in ihrem Artikel „The Rendering Equation“ (vgl. Dal), vorgestellt wurde. Mit ihr lässt sich die Strahldichte (Lo) berechnen, welche im Kapitel (Kapitelref) bereits detailliert beschrieben wurde. Die Strahldichte im speziellen fall der Reflectance Equation liefert eine Aussage über, die Gesamtmenge an Licht, welche von einem Punkt (p) ausgehend entlang einer bestimmten Blickrichtung (𝜔𝑜) reflektiert wird. Dabei ist die Intensität der reflektierenden Strahlung abhängig von, der Menge an Licht, welche in dem jeweiligen Punkt auftritt und der Wechselwirkung des Lichts mit der Oberfläche.

Ersteres wird durch die sogenannte Bestrahlungsstärke aus dem Kapitel (kapitelref) erfasst. Letzteres durch die bidirectional reflective distribution function (kurz BRDF) ausgedrückt. Auf die BRDF und deren einzelnen Funktionen, welche sie beinhaltet, wird in einem späteren Kapitel im Detail eingegangen. Das Ergebnis aus BRDF und Bestrahlungsstärke wird anschließend mit einem Kosinus Faktor, welcher das Lambertsche Kosinus Gesetz aus Kapitel (kapitelref) repräsentiert, gewichtet. (Wolf, DeFries)

**Bidirectional reflective distribution function**

Das Reflexionsverhalten eines Objektes ist im Allgemeinen bestimmt durch die Ein-/Ausfalls Winkel des Lichtes und das Material aus, welchem es besteht. So lässt sich beispielsweise in der Natur unter gleichbleibenden Beleuchtungsverhältnissen bei verschiedenartigen Materialien ein unterschiedlicher starker Glanz beobachten. Dieses Verhalten wird durch die Bidirectional reflective distribution function (kurz BRDF) ausgedrückt, welche 1977 amtlich vom National Bureau of Standards (USA) definiert wurde, um Reflektionsdarstellungen und -berechnungen zu vereinheitlichen (vgl. uniUlm|orgLicht). In ihrer Grundform beschreibt die BRDF den Zusammenhang zwischen der differentiellen Leuchtdichte in Betrachtungsrichtung und der differentiellen Bestrahlungsstärke, welche aus der Beleuchtungsrichtung auf die Oberfläche einwirkt (vgl. orgLicht). Vereinfacht ausgerückt beschreibt die BRDF den Anteil eines Lichtstrahles, welcher beim Betrachter ankommt.

(- Funktion der BRDF (einfache Funktion ) -)

Damit eine BRDF auch ein physikalisches Modell darstellt müssen folgende zusätzliche Physikalische Gesetze gelten (vgl. rtrBook|orgLicht|DeFries|UlrichUlm):

1. Die Helmholz-Reziprozität, welche besagt, dass beim Vertauschen des Einfalls- und Ausfallswinkels des Lichtes der Funktionswert der BRDF sich nicht verändert. In der Praxis verletzen BRDFs, die beim Rendering verwendet werden, häufig die Helmholtz-Reziprozität ohne das erkennbare Artefakte entstehen. Eine Ausnahme bilden hierbei Offline-Rendering-Algorithmen, die speziell Reziprozität erfordern.
2. Der Energieerhaltungssatz gibt an, dass die Energie, die ein System verlässt, niemals größer sein kann als die Energie, welche einem System hinzugefügt wurde. Dies bedeutet bezogen auf die BRDF, dass die Summe des Lichtes, welches in alle Richtungen reflektierten, wird nicht mehr sein kann als die Menge des auftretenden Lichtes. Verstößt eine BRDF signifikanter Weise gegen die Energieerhaltung, so werden Oberflächen deutlich zu hell dargestellt. Wodurch schlussendlich der Realismus beeinträchtigt wird.
3. Die Superposition ist eine weitere häufig genannte Eigenschaft von BRDFs. Sie besagt, dass Lichtstrahlen, welche auf den gleichen Punkt einer Oberfläche auftreffen keinen Einfluss aufeinander auswirken.

**Metalle und Nicht Metalle**

Um die Theorien bzw. Funktionsweisen der BRDFs in den folgenden Kapiteln besser verstehen zu können, muss zunächst das unterschiedliche verhalten von metallischen (Leiter) und nichtmetallischen (Dielektrikum) Oberflächen bei Lichteinwirkung verdeutlicht werden.

* In Wirklichkeit dringt ein Teil des einfallenden Lichts in die Oberfläche ein, wird im Inneren gestreut und tritt als diffuse Reflexion wieder aus der Oberfläche aus.
* Hier liegt der Unterschied zwischen Leitern und Dielektrika. Bei rein metallischen Materialien gibt es keine Streuung unter der Oberfläche, d.h. es gibt keine diffuse Reflexion. Streuung findet bei Dielektrika statt, d.h. sie haben sowohl spiegelnde als auch diffuse Komponenten.
* Um die BRDF richtig zu modellieren, müssen wir daher zwischen Dielektrika und Leitern unterscheiden

Lambert Diffuse BRDF:

Eine Fläche, bei der die Strahldichte über die ganze Fläche und in alle Richtungengleich groß ist, wird als Lambert-Strahler bezeichnet.