

Approximation der Parameterwerte des Ashikhmin-Shirley BRDF-Modells, zur Nachbildung gemessener BRDFs, mittels Levenberg-Marquardt Verfahren

Studiengang Medieninformatik

Masterarbeit

vorgelegt von

Sebastian Sopp

geb. in Frankfurt am Main

durchgeführt an der
Technischen Hochschule Mittelhessen (THM), Friedberg

Referent der Arbeit: Prof. Dr. Cornelius Malerczyk
Korreferent der Arbeit: M.Sc. Hans Christian Arlt
Betreuer: Dr. Thomas Kollig

Friedberg, 2017

Danksagung

Zunächst gebührt mein Dank Dr. Thomas Kollig, der meine Masterarbeit betreut hat. Für die vielen hilfreichen Gespräche, Anregungen und konstruktive Kritiken möchte ich mich herzlich bedanken. Meiner Mutter danke ich besonders für den starken emotionalen Rückhalt.

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die eingereichte Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Friedberg, Februar 2017

Sebastian Sopp

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Selbstständigkeitserklärung	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung	5
1.4 Aufbau der Arbeit	5
1.5 Abstract	6
2 Grundlagen	9
2.1 Physikalische und mathematische Größen	9
2.1.1 Natur des Lichts	9
2.1.2 Reflexion und Brechung	10
2.1.3 Fresnel-Effekt	12
2.1.4 Reflexionsarten	13
2.1.5 Farbige Reflexion	15
2.1.6 Kugelkoordinatensystem	16
2.1.7 Raumwinkel	17
2.1.8 Radiometrische Größen	18
2.1.9 Isotropie und Anisotropie	20
2.2 BRDF	21
2.2.1 Definition der BRDF	21
2.2.2 BRDF-Modelle	27
2.2.3 Halfway-Vektor und Mikrofacetten-Modell	29
2.3 Nichtlineare Optimierung und Levenberg-Marquardt Verfahren	30
3 Stand der Technik	35
3.1 BRDF Messung	35

3.2	Zwei bedeutende BRDF-Modelle	39
3.3	Parametrisierung von gemessenen BRDFs	42
4	Methodik	47
4.1	Problemanalyse und Vorbereitung	47
4.1.1	Messdatenquelle	48
4.1.2	Vorteile der Parametrisierung	49
4.1.3	Approximation von Parameterwerten	49
4.1.4	Wahl des BRDF-Modell	52
4.1.5	Vorgehensweise der Ergebnisanalyse	56
4.2	Umsetzung	57
4.2.1	Messdaten interpretieren und darstellen	57
4.2.2	Ashikhmin-Modell implementieren	60
4.2.3	Residuumsfunktion und Gewichtung	62
4.2.4	Levenberg-Marquardt Verfahren implementieren	64
4.2.5	Ergebnisanalyse	66
4.3	Implementierung	68
4.3.1	Umsetzung mit Qt	68
4.3.2	Programmablauf	69
5	Ergebnisse	71
5.0.1	Verfahrensanalyse	71
5.0.2	Optische Analyse	74
5.0.3	Schlussfolgerung	84
6	Zusammenfassung und Ausblick	87
A	Renderings und approximierte Parameterwerte	89
	Literaturverzeichnis	99

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Aufbau eines Gonioreflektometers [MCS90].	2
1.2	Künstlich generierte Reflexionen für einen Autolack [zS17].	3
1.3	Drei analytische BRDF-Modelle	5
2.1	Reflexions- und Brechungsgesetz beim Übergang in ein dichteres Medium [NMP07].	11
2.2	Links: Durch den Fresnel-Effekt reflektiert das Seitenfenster mehr Licht als die Frontscheibe ([Bir14], S. 319). Rechts: Das Verhältnis von reflektierendem (R , durchgezogen) und transmittierendem (T , gestrichelt) Licht, in Abhängigkeit vom Einfallswinkel α , beim Übergang von Luft zu Glas [NMP07].	12
2.3	Diffuse Reflexion, spekulare Reflexion und die Kombination von beiden [Bir14].	14
2.4	Links: Unterscheidung von Makro- und Mikrostruktur einer Oberfläche [Geo16]. Rechts: Eine relativ spekulare und diffuse Oberfläche [AMHH08].	15
2.5	Aufbau des Kugelkoordinatensystem [Ag216].	16
2.6	Links: Der Raumwinkel, hier in Ω statt ω angegeben, mit Ausschnittsfläche A [HH16]. Rechts: Fläche dA und dessen Abmessung im Kugelkoordinatensystem [Pro16].	18
2.7	Projektion von Flächen mittels Kosinusgesetz ([AMHH08], S. 207).	19
2.8	Verknüpfung von Strahldichte (Radiance) und Bestrahlungsstärke (Irradiance) [Mar16].	20
2.9	Links: Bei isotropen Oberflächen verteilen sich die Glanzlichter gleichmäßig. Rechts: Bei anisotropen werden die Glanzlichter gestreckt ([Bir14], S. 322).	21
2.10	Aufbau der Fläche zur Untersuchung der Reflexionseigenschaften [NRH+77].	22
2.11	BRDFs beachten keine internen Reflexionen, im Gegensatz zu BSSRDFs ([Bir14], S. 326).	23
2.12	BRDF-Geometrie [TC16]	24
2.13	Links: Reflexionsgleichung für einzelnes Punktlicht. Rechts: Gleichung für mehrere Lichtquellen [Ree16].	25
2.14	Verschieden komplexe Reflexions-Funktionen ([HF13], S. 11).	26
2.15	Eine grafische Klassifikation verschiedener BRDF-Modelle [MU].	28

2.16	Links: Ein analytisches BRDF-Modell, wobei die gelbe Linie die Lichteinfallrichtung kennzeichnet. Die Ebene der roten und grünen Linie entspricht dem Oberflächenstück mit der blauen Linie als Richtung der Flächennormalen. Mitte: Messdaten eines blauen Metallic-Lacks aus der <i>MERL BRDF Database</i> . Rechts: Ein anisotropes BRDF-Modell mit einer Punktlichtquelle gerendert [Sch10].	29
2.17	Eine bestrahlte Oberfläche und ihre Verwerfungen. Nur die roten Mikrofacetten sind aktiv an der Reflexion beteiligt ([AMHH08], S.247).	30
2.18	Iterative Annäherung an die Nullstelle einer Funktion mittels Newton-Verfahren [alp17].	31
2.19	Die Abweichungen der Messwerte von der Modellfunktion bestimmen die Residuen [Wik17c].	32
2.20	Diese Funktion hat mehrere lokale Minima, aber nur ein globales Minimum [Che17].	33
3.1	Aufbau der Gonioreflektometers von Ward [War92].	36
3.2	Links: Zusammenhang zwischen Pixel-Position der Aufnahme und Punkt-Position des 3D-Modells wodurch die Normale jedes Dreiecks berechnet werden kann. Rechts: Das Reflexionsverhalten des Modells aufgeteilt in Clustern [LKG ⁺ 01].	37
3.3	Links: Messsystem von Matsui et al. mit kugelförmigem Probematerial [MPBM03]. Rechts: Erweiterung des Systems zur Messung anisotroper Materialien [NDM05].	38
3.4	Die Form von $(\vec{r} \cdot \vec{v})^{n_s}$ für verschiedene n_s Werte [Scr17].	40
3.5	Ein Vergleich der BRDFs von Lambert, Phong und Blinn [Inc17].	41
3.6	Links: Nachbildung einer Funktion mittels Fourier-Reihe. Rechts: Nachbildung mittels der Summe (gestrichelte Linie) zweier Gauß-Verteilungen (gepunktete Linie) [LFTG97].	42
3.7	Links: Gemessene BRDF von <i>polyethylene</i> mit Rauschen und Artefakten. Rechts: Durch die Parametrisierung mit dem Ashikhmin-Modell, sind diese Fehler nicht mehr enthalten ([NDM05] Zusatzdokument, S. 139).	44
3.8	Das Ergebnis der Parametrisierung verschiedener BRDF-Modelle an Messdaten von <i>paint-black</i> . Die Zahlen stellen die Abweichung durch die Fehlerfunktion dar ([NDM05] Zusatzdokument, S. 121).	45
3.9	Die Verbesserungen der Glanzlichter mittels zwei verknüpfter Glanzlichtkeulen. Von links nach rechts: Messdaten, Cook-Torrance mit einer Keule, Cook-Torrance mit zwei Keulen, Lafortune mit einer Keule, Lafortune mit zwei Keulen [NDM05].	46
4.1	Aufbau des Messsystems für die zur Verfügung gestellten BRDF-Messdaten [TK08].	48
4.2	Das Ashikhmin-Modell berücksichtigt den Fresnel-Effekt. Daher erhöht sich die spiegelnde Eigenschaft der Fläche, bei größeren Betrachtungswinkeln. Die diffuse rote Farbe nimmt dabei ab [AS00].	54
4.3	Der Einfluss der Exponenten n_u und n_v auf die Reflexionseigenschaften einer Kugel [AS00].	55
4.4	Verlauf und Ausrichtung der für die Messung relevanten Winkel. Im Zentrum wäre das Probematerial zu platzieren. Der rote Pfeil gibt die positive Richtung der x -Achse an, der grüne die der z -Achse und kommt zudem der Ausrichtung der Flächennormalen des Probematerials gleich.	57

4.5	Grafische Darstellung der Messdaten.	58
4.6	Links: Die kompletten, aber etwas dunklen, Messdaten einer BRDF. Der Lichteinfallswinkel verläuft dabei von oben nach unten von 0° bis 90° . Mitte: Die Aufhellung mittels Multiplikation um Faktor 3. Rechts: Die Aufhellung mittels Gammakorrektur mit $\gamma = 2, 2$	59
4.7	Die unterschiedlichen Raumwinkel, die zu berücksichtigen sind. An Messwert 1 ist in blau der normale Raumwinkel zu sehen. Bei 2 ist in grün der halbe und bei 3 der viertel Raumwinkel zu erkennen. An Messwert 4, der näher am Zenit liegt, ist der orange normale Raumwinkel kleiner als der bei Messwert 1, was die erhöhte Messdichte erkennen lässt.	63
4.8	Links: Die Messdaten als Textur. Rechts: Die Modelldaten mit approximierten Parameterwerten. Mitte: Die Differenz zwischen beiden.	67
4.9	Ablaufplan für das LMV.	70
5.1	Links: Verteilung der Helligkeitswerte einer Messdaten Datei bei Lichteinfallswinkel von 10° , 15° und 20° . Rechts: Funktionsverteilung des Ashikhmin-Modells ohne Fresnel Berücksichtigung mit approximierten Parameterwerten.	72
5.2	Links: Verlauf der Fehlerzahl bei einer Approximation, wobei die Abweichungen bei jeder Iteration verbessert werden konnte. Rechts: Sprunghafte Veränderung der Fehlerzahl ist ein Hinweis für eine problematische Approximation.	73
5.3	Mögliche Kriterien zur Beurteilung der Ergebnisse. Links: Messdaten. Rechts: Approximierte Modelldaten.	76
5.4	Vorschau der Farbwerte in OpenGL. Links: Messdaten. Rechts: Approximierte Modelldaten.	77
5.5	Vorschau der Glanzverteilung in OpenGL, sowie korrespondierende Renderings. Von links nach rechts: Messdaten Audi_SepangBlau, approximierten Modelldaten, Messdaten ThyssenKrupp_Champagne, approximierten Modelldaten.	78
5.6	Mess- und verschiedene Modelldaten von ThyssenKrupp_Lime.	79
5.7	Mess- und verschiedene Modelldaten von Daimler_Kieselgrau.	80
5.8	Mess- und verschiedene Modelldaten von ThyssenKrupp_Iron.	81
5.9	Mess- und verschiedene Modelldaten von Daimler_NordlichtViolett.	82
5.10	Mess- und verschiedene Modelldaten von Daimler_BornitRot.	83
A.1	Audi_SepangBlau	90
A.2	Daimler_DiamantSilber	91
A.3	Daimler_PfefferGrün	92
A.4	ThyssenKrupp_Champagne	93
A.5	ThyssenKrupp_Gold	94
A.6	ThyssenKrupp_GreenApple	95
A.7	ThyssenKrupp_RedMing	96
A.8	Approximierte Parameterwerte	97
A.9	Approximierte Parameterwerte	98

Kapitel 1

Einleitung

Eine große Herausforderung der modernen Computergrafik ist es, das Aussehen künstlich generierter Grafiken so realitätsnah wie möglich zu gestalten. Dabei spielt die Interaktion von Licht mit Oberflächen von Objekten naturgemäß die entscheidendste Rolle, da dadurch deren optische Eigenschaften definiert werden. Das Reflexionsverhalten eines Oberflächenmaterials lässt sich mit Hilfe einer bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (engl. *Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF) beschreiben [NRH⁺77]. Dabei kann zwischen gemessenen und analytischen BRDFs unterschieden werden. Erstere besitzen sehr präzise Informationen über das Reflexionsverhalten des Materials, bieten dafür aber keine großen Veränderungsmöglichkeiten. Letztere können, durch ihre Parameter, Reflexionen flexibler gestalten. Dies ist ein Vorteil den es zu erlangen gilt. Analytische BRDFs sind jedoch nur begrenzt in der Lage, reale Materialien exakt nachzubilden.

Die Motivation hinter der Thematik dieser Arbeit besteht somit in der Umwandlung von gemessenen BRDFs in ein analytisches Modell. Eine Methode, die schon mehrmals mit rohen Messdaten umgesetzt wurde. Im Gegensatz dazu, sind die in dieser Arbeit verwendeten Daten, bereits aufbereitet.

Es gilt, die Parametrisierung der gemessenen und aufbereiteten BRDFs, mit Hilfe eines nichtlinearen Optimierungsverfahrens durchzuführen. Dazu wird das Levenberg-Marquardt Verfahren (LMV), welches eine Modifikation des Gauß-Newton Verfahren (GNV) darstellt, eingesetzt [Lev44] [Wik17b].

Dabei auftretende Probleme, sowie mögliche Lösungswege werden erläutert und Erkenntnisse darüber dargelegt, in welcher Qualität das gewählte analytische BRDF-Modell mit approximierten Parameterwerten eine gemessene BRDF nachbilden kann.

In diesem Kapitel wird nun die genauere Motivation und Richtung beschrieben, in die diese Arbeit gehen soll und welche konkreten Ziele dabei verfolgt werden. Danach erfolgt die Beschreibung des Aufbaus, sowie eine kompakte Zusammenfassung der Arbeit.

1.1 Motivation

Im Allgemeinen können vier Effekte auftreten, wenn ein Lichtstrahl auf ein Objekt trifft. Der Strahl kann entweder absorbiert, gebrochen, gestreut oder reflektiert werden. Bei einer

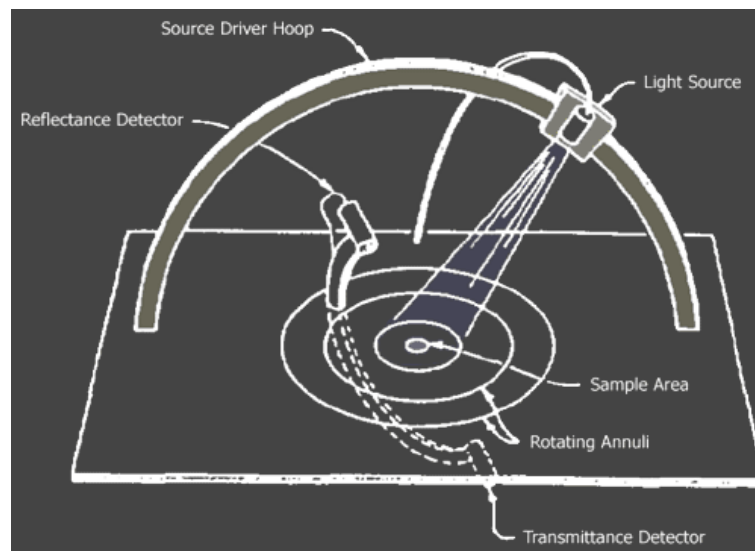


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau eines Gonioreflektometers [MCS90].

großen Anzahl von Lichtstrahlen treten meist mehrere dieser Effekte gleichzeitig auf und bestimmen, wie wir die Oberfläche bzw. Materialeigenschaft eines Objekts wahrnehmen. Somit erscheint diese etwa als rau, glänzend, durchsichtig, metallisch oder ähnlich.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Reflexion, die in zwei Anteile getrennt werden kann: Die diffuse und spekulare Reflexion. Bei diffusen Reflexionen werden die Lichtstrahlen in alle Richtungen von der Oberfläche reflektiert, wie es z. B. bei einem Blatt Papier auftritt. Bei spekularen Reflexionen werden die Lichtstrahlen gerichtet reflektiert, so dass ein Glanzpunkt entsteht, dessen Form abhängig vom Betrachtungswinkel ist. Glattes Plastik kann dafür als ein Beispiel gelten.

Diese Reflexionen können durch eine BRDF beschrieben werden. Diese kann, wenn physikalisch korrekt, äußerst komplex ausfallen, weshalb einige Variablen für die schnellere Berechnung im Bereich der Computergrafik ignoriert werden. Die Funktion liefert für jeden beliebigen Lichteinfallswinkel und Betrachtungswinkel das Verhältnis der Beleuchtungsstärke (Irradiance) des einfallenden Lichts zu der Strahlungsdichte (Radiance) des ausfallenden Lichts.

Dabei ist es möglich, zwischen gemessenen und analytischen BRDFs zu unterscheiden. Gemessene BRDFs lassen sich bspw. mit Hilfe von Gonioreflektometern ermitteln. Der typische Aufbau eines solches Messsystems ist in Abb. 1.1 dargestellt. Dabei werden Probematerialien aus allen technisch möglichen und notwendigen Ein- und Ausfallswinkeln bestrahlt sowie vermessen, wodurch präzise Informationen über das Reflexionsverhalten erlangt werden. Die gemessenen BRDFs haben jedoch Nachteile. So ist, je nach Detailgrad, mit einem hohen Bedarf an Speicherplatz zu rechnen. Außerdem können Probleme bei der Messung entstehen, wie Artefakte oder Messfehler, da es z. B. problematisch sein kann, Lichtquelle und Sensorposition konsistent zu halten. Der größte Nachteil liegt jedoch bei der Inflexibilität für Veränderungen.



Abbildung 1.2: Künstlich generierte Reflexionen für einen Autolack [zS17].

Daher wird in der Praxis ein für die Aufgabe geeignetes analytisches BRDF-Modell verwendet, um mit den passenden Parameterwerten die gemessenen Reflexionseigenschaften des Materials nachzubilden. Analytische BRDFs benutzen meist mehrere Parameter, wodurch bei gegebenen Ein- und Ausfallswinkeln, sowie der Beleuchtungsstärke, eine bestimmte Strahlungsdichte ermittelt wird. Der große Vorteil eines analytischen Modells, wie z. B. Blinn, Phong, Ward oder Ashikhmin-Shirley, besteht in ihrer schnellen Berechnungsmöglichkeit, sowie in der Flexibilität durch ihre Parameter. Außerdem ist ihr Bedarf an Speicherplatz äußerst gering, weshalb solche BRDFs in 3D-Anwendungen öfters gegenüber gemessenen BRDFs vorgezogen werden. Mit dem passenden analytischen BRDF-Modell, sowie gut gewählten Parameterwerten, lassen sich, je nach Anspruch, gemessene BRDFs detailliert genug nachbilden, wobei gewünschte Veränderungen am Reflexionsverhalten schnell umsetzbar sind. Auf die genaue Funktionsweise von gemessenen und analytischen BRDFs, sowie eines Gonioreflektometers, wird im Grundlagenkapitel eingegangen.

Diese Arbeit konzentriert sich neben anderen Materialien besonders auf die Nachbildung von Autolacken, wie bspw. in Abb. 1.2 zu sehen ist. Dabei sind Messdaten, über das Reflexionsverhalten einer Anzahl an Materialproben, bereits vorhanden. Es sollen nun aber die Nachteile von den gemessenen BRDFs beseitigt und die Vorteile analytischer BRDF-Modelle verfügbar gemacht werden. Je nach Auflösung und Winkelabständen, mit denen die Materialien vermessen wurden, bringen die Messdaten einen hohen Speicherbedarf mit sich. Eine nachträgliche Veränderung am Erscheinungsbild des Materials, im Besonderen die Charakteristik des Glanzes, ist auch nicht gegeben. Dies wäre jedoch erwünscht, da es in der Praxis oft nicht entscheidend ist, das Material so realistisch wie möglich zu simulieren, sondern an die Wünsche und Vorstellungen des Kunden anzupassen. Auch können, wie bereits beschrieben, Messfehler und Artefakte nicht ausgeschlossen werden.

Die Hauptaufgabe besteht somit in der Umwandlung von gemessenen BRDFs in analytische, da sich in der Praxis Vorteile ergeben die, den Arbeitsaufwand, die Ressourcen und die Kosten der Generierung eines künstlich erstellten Bildes, reduzieren können. Dabei gilt es zunächst zu überprüfen, ob und wie eine Umwandlung mit dem LMV möglich ist. Außerdem ist zu untersuchen, ob das Erscheinungsbild eines Materials wirklich von dem gewählten analytischen BRDF-Modell in akzeptabler Qualität, verglichen mit der gemessenen BRDF, simuliert werden kann.

1.2 Problemstellung

Die Umwandlung von einer gemessenen BRDF in eine analytische BRDF hat somit die o. g. gewünschten Vorteile, die es zu erlangen gilt. Zurzeit existieren viele verschiedene und unterschiedlich komplexe analytische BRDFs. Empirische Modelle nehmen weniger Rücksicht auf die physikalische Herleitung, lassen sich jedoch schnell berechnen. Theoretische Modelle versuchen physikalisch korrekt zu sein, sind jedoch rechenaufwändiger. Je nach Anwendungsbedarf muss somit ein Kompromiss zwischen Berechnungsgeschwindigkeit und physikalisch korrekter Simulationsfähigkeit gefunden werden, wobei einige Modelle auch als physikalisch motiviert gelten, somit einen Mittelweg suchen. In Abb. 1.3 ist der Unterschied zwischen drei unterschiedlichen analytischen BRDFs zu erkennen.

Als nächstes lassen sich BRDFs noch in zwei Klassen einteilen. Die einen berücksichtigen nur ein isotropes, die anderen zusätzlich ein anisotropes Reflexionsverhalten. Wenn sich die Lichtintensität an einem Punkt auf einer rotierenden Oberfläche für den Beobachter nicht verändert, so handelt es sich um isotrope Reflexionen, wie z. B. bei Plastikoberflächen. Entstehen Veränderungen, so handelt es sich um anisotrope, wie z. B. bei gebürstetem Metall oder Satin. Zu beachten ist jedoch, dass analytische BRDFs, die eine Anisotropie berücksichtigen, bei gewissen Parametereinschränkungen nur isotrope Reflexionen darstellen und daher nicht kategorisch ausgeschlossen werden sollten.

Aus bereits vorhandenen Arbeiten lässt sich abschätzen, welche BRDF-Modelle geeignet sein könnten, um das Reflexionsverhalten von Materialien wie Autolacken realistisch genügend und schnell zu berechnen. Das Ashikhmin-Modell sticht dabei als eine gute Option hervor [AS00]. Da die Firma [0x1] *Software und Consulting GmbH*¹, in deren Kooperation dieses Thema bearbeitet wird, sowohl die Messdaten zur Verfügung stellt, als auch mit einem Ashikhmin-Shader im Rendering arbeitet, wird dieses Modell zum Zielmodell.

Bei der Approximation von mehreren Parameterwerten handelt es sich um ein nichtlineares Minimierungsproblem. Daher muss ein Optimierungsverfahren gewählt werden, das effizient und zielführend passenden Werte berechnet. Für Optimierungsprobleme wird oft das LMV verwendet. Es kam auch bei einigen Arbeiten zur Approximation von BRDF Parameterwerten zum Einsatz. Ein Ziel der Arbeit ist die Überprüfung, ob es sich für die Parametrisierung der aufbereiteten Messdaten, in Verbindung mit dem Ashikhmin-Modell, eignet.

¹<http://www.0x1-software.com>

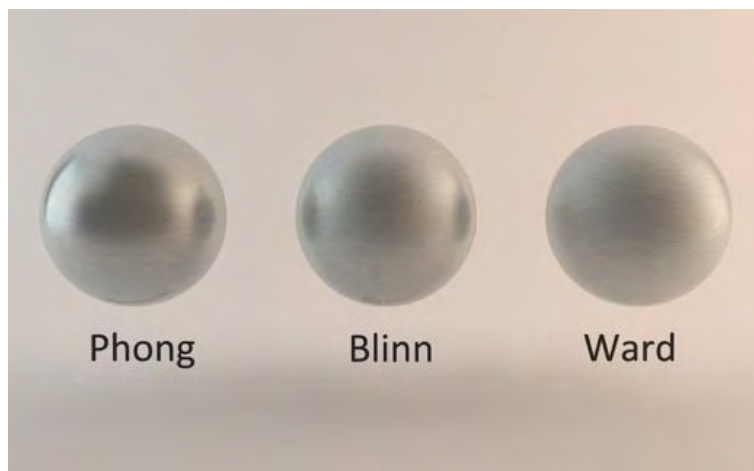


Abbildung 1.3: Drei analytische BRDF-Modelle
[Aut17]

1.3 Zielsetzung

Das LMV ist eine Erweiterung des GNVs, wodurch eine höhere Robustheit erlangt wird. Dabei kann es jedoch zu einer etwas zeitaufwändigeren Berechnung kommen. Es ist eine etablierte Methode zur Lösung von Optimierungsproblemen. Im Zuge der Parametrisierung lässt sich überprüfen, inwiefern sich Messdaten und das Ashikhmin-Modell für eine Optimierung mit dem LMV eignen, oder ob evtl. Anpassungen nötig sind.

Zum Ende hin soll eine Prototyp-Applikation entstehen, die eine gemessene BRDF Datei zunächst einliest und analysiert. Zur optischen Unterstützung werden dann die Helligkeitswerte mithilfe der *Open Graphics Library* (OpenGL)² dargestellt. Im nächsten Schritt sollen die Parameterwerte für die analytische BRDF, auf Grundlage der gemessenen BRDF, approximiert und das mathematische Ergebnis angezeigt werden. Zudem soll das Ergebnis der Approximation per OpenGL grafisch dargestellt werden, womit ein optischer Vergleich zur gemessenen BRDF möglich wird. Wenn die passenden Werte gefunden wurden, soll der Benutzer noch die Möglichkeit haben, diese den eigenen Erfordernissen anzupassen. Danach gilt es die Parameterwerte für das Rendering zu exportieren.

Als Ergebnis wird sich zeigen, ob und wie gut sich das LMV für die Parametrisierung von Messdaten mit Hilfe des Ashikhmin-Modells eignet. Zudem wird dabei die Fähigkeit des Modells zur Simulation realer Oberflächen ersichtlich, wobei im Endeffekt vor allem die Auswertung von Renderings maßgebend sein wird.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in fünf Teile. Im *Grundlagen* Kapitel werden zunächst physikalische und mathematische Größen sowie Effekte beschrieben, die für das Verständnis dieser Ar-

²<https://www.opengl.org>

beit benötigt werden. Außerdem steht das Grundprinzip der BRDF im Fokus und mögliche Einteilungskriterien werden vorgestellt. Zuletzt werden nichtlineare Optimierungsverfahren, darunter speziell das GNV und dessen Erweiterung zum LMV, näher betrachtet.

Als nächstes wird im dritten Kapitel der *Stand der Technik* betrachtet. Hier werden Messsysteme für BRDFs und zwei bedeutende analytische BRDF-Modelle präsentiert. Danach werden wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit dem Thema der Parametrisierung von BRDFs beschäftigen, vorgestellt. Zur Abgrenzung der eigenen Arbeit, wird dabei berücksichtigt, mit welchen Methoden diese durchgeführt wurden.

Im *Methodik* Kapitel wird die Herangehensweise zur Durchführung dieser Arbeit erläutert. Zunächst wird projektbezogener die Problematik von gemessenen BRDFs und deren Parametrisierung untersucht. Eine Methode zur Ergebnisanalyse wird entworfen und umgesetzt. Die Verbindung des Ashikhmin-Modells mit dem LMV, sowie die dabei entstehenden Probleme, werden erörtert und Lösungswege vorgeschlagen. Zudem wird die Implementierung des Verfahrens und die Erstellung der Prototyp-Applikation beschrieben.

Im Fokus des *Ergebnisse* Kapitels stehen die Resultate, die durch die angewandte Methodik entstehen. Dafür werden vor allem Renderings mit gemessenen und approximierten BRDFs verglichen. Das Ashikhmin-Modell und seine Simulationsfähigkeiten der Messdaten werden dabei in einer subjektiven Betrachtung bewertet.

Das *Zusammenfassung und Ausblick* Kapitel fasst die gesamte Arbeit kompakt zusammen, zeigt Probleme, die nicht gelöst werden konnten und gibt dafür mögliche Lösungswege. Dadurch wird ein Ausblick auf eventuell weiterführende Projekte, die diese Arbeit erweitern könnten, geworfen.

1.5 Abstract

Die Reflexionseigenschaften eines realen Materials können durch gemessene, oder analytische bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktionen (engl. *Bidirectional Reflectance Distribution Functions*, BRDFs) nachgebildet werden. Die Flexibilität einer gemessenen BRDF stellt sich, im Gegensatz zur analytischen, äußerst begrenzt dar, ist allerdings für einige Anwendungsgebiete erstrebenswert. Die vorliegende Masterarbeit überprüft, ob - und wenn ja, in welcher Qualität - die Umwandlung von gemessenen und aufbereiteten BRDFs in das analytische BRDF-Modell von Ashikhmin-Shirley, durchgeführt werden kann. Das nichtlineare Optimierungsverfahren nach Levenberg-Marquardt wurde dabei für die Approximation der Parameterwerte eingesetzt. Eine nötige Erweiterung des Modells, führte jedoch zu Instabilitäten im Verfahren. Eine Vereinfachung des Modells, in der der Fresnel-Effekt verworfen wurde, führte wiederum zu einer stabileren Approximation. Durch ein Brute-Force-Verfahren ließ sich dennoch die Variante mit dem Fresnel-Effekt implementieren, wodurch beide Modellformen verglichen werden konnten. Das Ergebnis der Parametrisierung zeigte sich abhängig vom Aufbau der Residuumsfunktion, der Startwerte und besonders der Messdatenform. War diese zu komplex für die Nachbildung mit dem Ashikhmin-Modell, so konnten nur bedingt verwertbare Parameterwerte approximiert werden. Eine Vorschau der Daten in Texturform half, Startwerte günstiger zu wählen und das Ergebnis der ermittelten Werte rudimentär zu bewerten. Final konnten nur gerenderte Bilder der Mess- und approximierten Modell-

daten zur Beurteilung führen, ob eine Parametrisierung gelungen ist. Es zeigt sich dabei, dass das Ashikhmin-Modell dem Detailreichtum der Messdaten nicht genügen kann. Der Fresnel-Effekt hilft jedoch, je nach Anwendungsfall, für realistischere Helligkeitsverläufe zu sorgen und sollte daher integriert bleiben. Abschließend lässt sich schlussfolgern, dass die gewählte Methodik mit beiden Modell-Varianten, wenn die Messdaten simpel genug für das Ashikhmin-Modell aufgebaut sind, zwar zu brauchbaren Parameterwerten führen kann, die möglichen Instabilitäten und Qualitätsdefizite jedoch keinen Einsatz in einer Produktion zulassen.

Kapitel 2

Grundlagen

Im Grundlagenkapitel werden zunächst einige mathematische und physikalische Größen bzw. Phänomene, die zum Verständnis dieser Arbeit dienen, vorgestellt. Danach wird das Thema BRDF detaillierter betrachtet, wobei die Unterschiede zwischen gemessenen und analytischen deutlich werden. Abschließend folgt ein kurzer Überblick zur Funktionsweise von Optimierungsverfahren, wobei das GNV, sowie dessen Modifikation zum LMV, im Vordergrund stehen.

2.1 Physikalische und mathematische Größen

Dieser Abschnitt umreißt die Eigenschaften des Lichts, sowie die möglichen Effekte durch deren Interaktion mit Materie.

2.1.1 Natur des Lichts

Im diesem Teil werden hauptsächlich einige Abschnitte des Standardwerks der Optik, von E. Hecht mit dem Titel *Optics*, aufgearbeitet und zusammengefasst [Hec02].

Das für unser Auge sichtbare Licht liegt in einem bestimmten Bereich der elektromagnetischen Strahlung. Bei tiefer frequentierter Strahlung handelt es sich um Gamma-, Röntgen- oder UV-Strahlung, bei höheren Frequenzen um IR-, Mikro- oder Radiowellen. Dabei hat das Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Isaac Newton (1642-1727) versuchte zunächst die Effekte des Lichts in der Korpuskeltheorie zu beschreiben, wobei er von einem Strom von Lichtteilchen (*Korpuskeln*) ausging. Damit konnten Effekte wie die Reflexion beschrieben werden, jedoch war das Phänomen der Lichtbeugung mit dieser Theorie nicht erklärbar. Ungefähr zur selben Zeit als Newton seine Teilchentheorie verbreitete, veröffentlichte Christiaan Huygens (1629-1695) die Wellentheorie des Lichts. Diese Theorie konnte sich jedoch erst nach dem Doppelspaltexperiment von Thomas Young (1773-1892) im Jahre 1802 durchsetzen. 1845 bewies Michael Faraday (1791-1867) den Zusammenhang zwischen Elektromagnetismus und Licht, indem er durch ein starkes magnetisches Feld die Polarisationsrichtung eines Lichtstrahls veränderte. James Clerk Maxwell (1831-1879) formulierte 1864 die Grundgleichungen der Elektrodynamik, die die Existenz von elektromagnetischen

Wellen vorhersagt. Da die berechnete Geschwindigkeit dieser Wellen mit der bis dato bekannten Lichtgeschwindigkeit übereinstimmte, schloss er, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Somit war die daraus resultierende elektromagnetische Lichttheorie das anerkannte Modell im 19. Jahrhundert. Anfang des 20. Jahrhunderts zeigte Arthur Compton (1892-1962) in Experimenten, dass das Licht jedoch immer noch Teilcheneigenschaften besitzt. Die von Albert Einstein begründete Quantenphysik erklärte letztendlich den Wellen-Teilchen-Dualismus von Licht, das dabei sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften besitzt. Der Wellen-Teilchen-Dualismus fasst dabei die Wellenoptik, Quantenoptik und Strahlenoptik zusammen. Die Wellenoptik sieht Licht, wie oben beschrieben, als elektromagnetische Wellen, die die Phänomene der Beugung, Farbe, Polarisation sowie Interferenz erklären. Bei der modernen Quantenoptik wird Licht als Lichtteilchen, das sogenannte Photon, betrachtet, das ein lokalisiertes Wellenpaket ist.

Die Strahlenoptik, auch geometrische Optik genannt, ist ein vereinfachtes Lichtmodell, das keiner physikalischen Realität entspricht ([Hec02], S. 98). Dabei wird auf einfache geometrische Weise der Weg des Lichts, von Quellen oder reflektierenden Objekten, als Strahl (engl. *ray*) betrachtet. In der heutigen Computergrafik gilt diese Lichtbeschreibung als Standardmodell ([NMP07], S. 160). Die Verknüpfung zwischen der Wellenoptik und Strahlenoptik erfolgt durch den Wellenvektor, der senkrecht zur Wellenfront liegt und somit die Ausbreitungsrichtung der Welle angibt. Dieser Vektor gibt somit die Richtung des Lichtstrahls an, so geben Punktlichtquellen, wie zum Beispiel Glühlampen, radial Lichtstrahlen ab, bei einer leuchtenden Fläche sind diese jedoch parallel. Die Strahlen müssen dabei vier Axiome befolgen ([Haf03], S. 37):

1. In einem homogenen Material breiten sich die Strahlen gradlinig aus.
2. Wechselt ein Strahl von einem homogenen, isotropen (eine Materialeigenschaft die später näher dargestellt wird) Material in ein anderes, so wird der Strahl im Allgemeinen nach dem Reflexionsgesetz reflektiert und nach dem Brechungsgesetz gebrochen.
3. Der Weg, den ein Strahl geht, ist umkehrbar.
4. Kreuzende Lichtstrahlen beeinflussen sich nicht.

Ein Lichtstrahl kann bei einem Wechsel von einem Medium in ein anderes absorbiert, reflektiert oder gebrochen werden. Die Reflexion, auf der in dieser Arbeit der Fokus liegt, lässt sich dabei am besten mit der Strahlenoptik untersuchen, daher wird dieses Lichtmodell vorrangig genutzt.

2.1.2 Reflexion und Brechung

Das erwähnte Reflexionsgesetz besagt dabei, wie in Abb. 2.1 zu sehen ist, dass bei einer glatten, ebenen Fläche ein einfallender Strahl l , die Normale der reflektierenden Fläche n sowie der reflektierte Strahl r in einer Ebene liegen. Wobei der Winkel zwischen Lichtstrahl bzw. Reflexionsstrahl und Flächennormalen beachtet wird und dieser bei beiden gleich groß ist:

$$\alpha = \beta \tag{2.1}$$

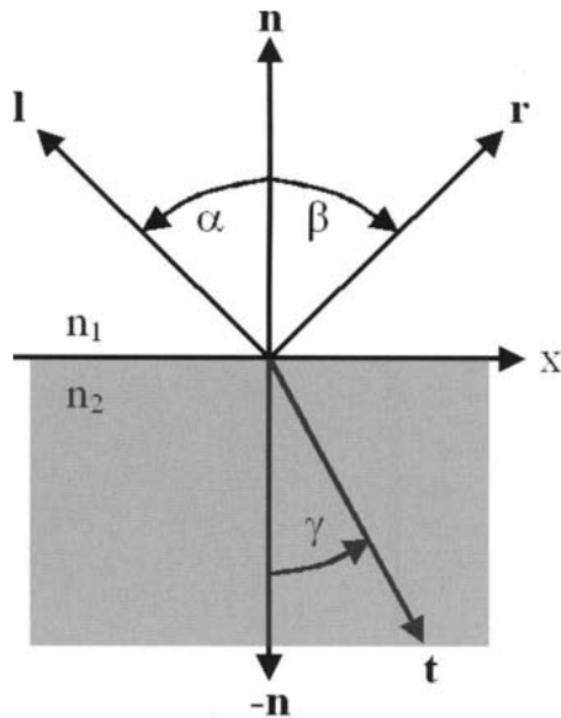


Abbildung 2.1: Reflexions- und Brechungsgesetz beim Übergang in ein dichteres Medium [NMP07].

Das Snelliussche Brechungsgesetz beschreibt die Richtungsänderung eines Lichtstrahls beim Übergang in ein anderes Medium. Die Ursache für die Richtungsänderung ist auf den Wechsel der materialabhängigen Phasengeschwindigkeiten, die als Brechungsindizes n_1 und n_2 in das Brechungsgesetz eingehen, zurückzuführen. Die Gleichung 2.2 besagt dabei, dass das Verhältnis der Brechungsindizes n_2 (Zielmaterial) zu n_1 (Startmaterial) gleich dem Verhältnis vom Sinus des Einfallswinkels α zum Sinus des Brechungswinkels γ ist ([Hec02], S. 101).

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \quad (2.2)$$

Wie in Abb. 2.1 zu erkennen ist, wird beim Übergang von einem Medium 1 in ein optisch dichteres Medium 2 ($n_1 < n_2$, $c_1 > c_2$), der Strahl zur Flächennormalen hin gebrochen ($\alpha > \gamma$). Die umgekehrte Betrachtung ist ebenfalls möglich. Die Werte c_1 und c_2 sind dabei die Phasengeschwindigkeiten des Lichts in den Medien. Der Brechungsindex ist somit genauer gesagt das Verhältnis der Phasengeschwindigkeit im Vakuum zur Geschwindigkeit im Medium. Da n von Luft nahe bei eins liegt, kann das Brechungsgesetz bei Übergängen von Luft in andere Medien genähert werden:

$$n_2 = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \quad (2.3)$$

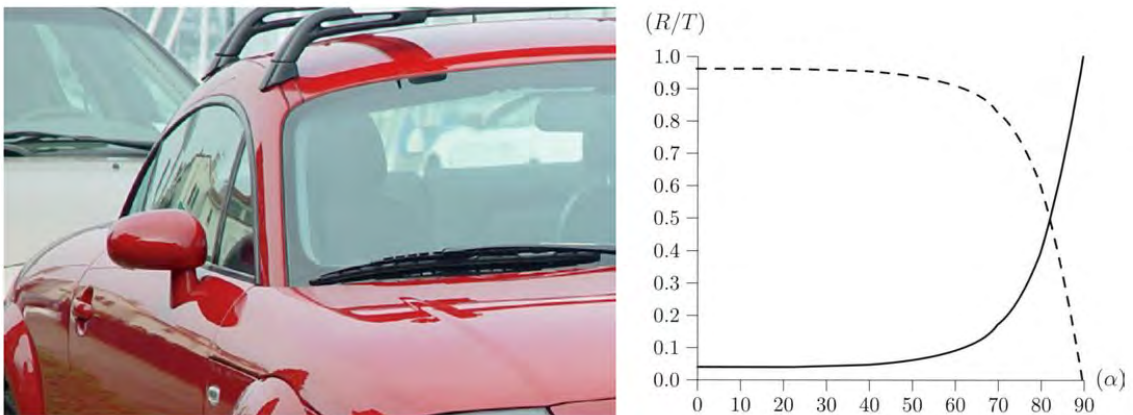


Abbildung 2.2: Links: Durch den Fresnel-Effekt reflektiert das Seitenfenster mehr Licht als die Frontscheibe ([Bir14], S. 319). Rechts: Das Verhältnis von reflektierendem (R , durchgezogen) und transmittierendem (T , gestrichelt) Licht, in Abhängigkeit vom Einfallswinkel α , beim Übergang von Luft zu Glas [NMP07].

2.1.3 Fresnel-Effekt

Das Brechungsgesetz spielt bei der Betrachtung des Fresnel-Effekts, beschrieben in den fresnelschen Formeln des französischen Ingenieurs und Physikers Augustin-Jean Fresnel, eine Rolle. Bei der Brechung von Licht wird nämlich tatsächlich immer auch ein gewisser Anteil reflektiert. Je größer dabei der Einfallswinkel α ist, desto größer wird der Anteil des reflektierten Lichts und umso geringer wird der des gebrochenen. Die Stärke des Effekts ist materialabhängig, bspw. lässt er sich gut an einer Glasoberfläche erkennen, wie links in Abb. 2.2 zu sehen ist. Bei senkrechtem Blick auf das Glas ist der Reflexionsanteil eher gering. Bei einem schrägeren Blickfeld, fast parallel zur Glasoberfläche, wird die Reflexion dominanter. Rechts in Abb. 2.2 wird der Fresnel-Effekt schematisch dargestellt. Zu erkennen ist, wie sich das Verhältnis von reflektierendem und transmittierendem Licht in Abhängigkeit vom Einfallswinkel α ändert. Da Autolacke in der Regel eine durchsichtige Klarlackschicht besitzen, ist bei dieser Arbeit der Fresnel-Effekt zu berücksichtigen.

Zur exakten Betrachtung des Fresnel-Effekts wird das Wellenmodell des Lichts benötigt, denn das Verhältnis zwischen gebrochenem und reflektiertem Licht ist nicht nur abhängig vom Einfallswinkel α , sondern zudem noch von der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts. In der geometrischen Optik wird näherungsweise von einem Lichtstrahl mit gleichmäßig verteilten Polarisationsrichtungen ausgegangen. S-polarisierte Strahlen treffen dabei senkrecht und p-polarisierte parallel auf die Einfallsebene. Durch die Gleichverteilung, wird der Reflexionsanteil des Fresnel-Effekts über den Mittelwert der jeweiligen polarisierten Reflexionen berechnet ([Hec02], S. 113). Folgendermaßen ist die Fresnel-Gleichung definiert, dabei entspricht θ_i dem Lichteinfallswinkel bezogen zur Flächennormalen (vorher α benannt)

und θ_t dem Brechungswinkel (vorher γ benannt) [Wik16]:

$$R = \frac{1}{2} \cdot (R_s + R_p)$$

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2 \quad (2.4)$$

$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right|^2$$

In der Computergrafik wird für die effizientere Berechnung des Fresnel-Effekts die Annäherung von Schlick benutzt [Sch94]:

$$R(\theta) = R_0 + (1 - R_0) \cdot (1 - \cos \theta)^5 \quad (2.5)$$

R_0 ist dabei der Reflexionskoeffizient für parallel zur Flächennormalen einfallendes Licht und setzt sich, wie in Gleichung 2.6 zu sehen ist, aus den Brechungsindizes der jeweiligen Medien zusammen. Er ist der einzige Parameter, der den Fresnel-Effekt kontrolliert und liegt dabei zwischen null und eins. Wie bereits erwähnt, kann der Brechungsindex für Luft auf eins gerundet werden, somit lässt sich der Reflexionskoeffizient in Luftumgebungs-Szenarien wie in Gleichung 2.7 vereinfachen:

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.6)$$

$$R_0 = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (2.7)$$

Bei der Umsetzung der Schlick-Annäherung innerhalb von BRDF-Modellen wird für θ der Winkel zwischen dem Halfway-Vektor \vec{h} (vgl. 2.2.3) und wahlweise dem Lichteinfallsvektor \vec{l} oder Betrachtungsvektor \vec{v} benutzt. Das Skalarprodukt beider Vektoren ergibt den Kosinus des Winkels zwischen beiden:

$$\cos(\theta) = (\vec{h} \cdot \vec{v}) \quad (2.8)$$

Verschiedene Medien bzw. Materialien haben unterschiedliche Reflexionskoeffizienten, wobei es drei Hauptgruppen gibt, in die ein jeweiliges Material eingeteilt werden kann. Isolatoren sind die am häufigsten vorkommenden Materialien wie z. B. Wasser, Glas, Holz, Plastik oder auch Klarlack. Ihr Reflexionskoeffizient liegt meist bei 0,05 oder niedriger. Sie sind somit bei senkrechter Betrachtung kaum reflektierend, daher ist bei dieser Materialgruppe der Fresnel-Effekt am ehesten zu beobachten. Zur zweiten Gruppe, den Leitern, gehören die Metalle. Deren Reflexionskoeffizient liegt meist bei 0,5 oder höher. Sie reflektieren schon bei senkrechter Betrachtung stark, wodurch der Fresnel-Effekt hier kaum zu erkennen ist. Zur dritten Gruppe gehören die Halbleiter, da diese aber eher selten sind, werden sie hier nicht weiter betrachtet.

2.1.4 Reflexionsarten

Bei der Reflexion eines Lichtstrahls kann zwischen zwei möglichen Variationen, wie das Licht von einer Oberfläche vorwiegend reflektiert wird, unterschieden werden. Es kann dabei eher



Abbildung 2.3: Diffuse Reflexion, spekulare Reflexion und die Kombination von beiden [Bir14].

zu einer diffusen (matten) oder spekularen (glänzenden) Reflexion kommen. Bei der diffusen Reflexion werden die Lichtstrahlen in alle Richtungen reflektiert, wie es z. B. bei einem Blatt Papier vorkommt. Bei spekularen Reflexionen werden die Lichtstrahlen gerichtet und parallel in eine Richtung reflektiert, so dass ein Glanzpunkt entsteht. Spiegel sind bspw. ideale spekulare Reflektoren.

Die Mehrzahl der Materialien in unserer Umwelt kombinieren beide Reflexionsmöglichkeiten zu einem Erscheinungsbild, da sie aus verschiedenen Schichten bestehen, die unterschiedlich starke diffuse oder spekulare Reflexionseigenschaften besitzen. Aus diesem Grund lassen sich beide Reflexionsarten linear kombinieren. Detaillierter ausgedrückt, wird bei den meisten Materialien ein Anteil des ankommenden Lichts direkt an der Oberfläche reflektiert, dieser wirkt sich auf die Spekularität aus. Während der andere Anteil in die Oberfläche eindringt, dort von Pigmentpartikeln diffus intern reflektiert wird und daraufhin die Oberfläche in alle Richtungen wieder verlässt. Es kann aber ebenfalls zur diffusen Reflexion direkt an der Oberfläche kommen wenn Lichtstrahlen dort von vielen kleinen Unebenheiten in alle Richtungen verstreut werden. Abb. 2.3 zeigt beide Reflexionsarten und deren Vermischung.

In der Computergrafik und in schematischen Darstellungen werden Flächen einfachheitshalber komplett glatt betrachtet. Um aber zu verstehen, warum ein Material eher spekulare oder diffus reflektiert, muss die Fläche auf mikroskopischer Ebene betrachtet werden (vgl. Abb. 2.4 Links). Dabei wird erkennbar, dass bei einem diffusen Material die Fläche rauer ist als im Vergleich zu einem glänzenden Material. Je nach Stärke und Ausrichtung der Unebenheiten werden, wie rechts in Abb. 2.4 zu sehen ist, vormals parallel einfallende Lichtstrahlen in verschiedenen großen Winkeln reflektiert, womit die Erscheinung des Materials beeinflusst wird.

Sollte sogar auf mikroskopischer Ebene die Fläche sehr glatt erscheinen, kann von einer spekularen Reflexion ausgegangen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Unebenheiten sich im Verhältnis zur Lichtwellenlänge befinden. Somit haben nur diejenigen Unebenheiten auf Reflexionen einen Einfluss, deren Größe die der Lichtwellenlänge übertreffen, was ungefähr im Bereich von 400 und 800 Nanometern liegt. Dieser Grad der Rauheit ist eine Materialeigenschaft, die erheblichen Einfluss auf das Erscheinungsbild eines Objektes hat. Dabei können für uns glatt aussehende und fühlende Materialien trotzdem diffus reflektieren, da sie erst im mikroskopischen Bereich ihre Rauheit offenbaren.

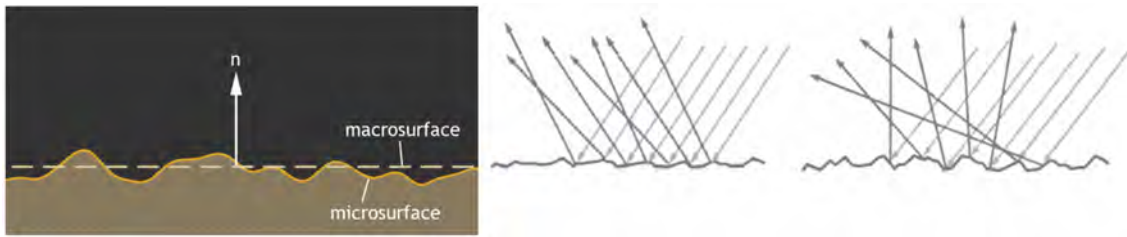


Abbildung 2.4: Links: Unterscheidung von Makro- und Mikrostruktur einer Oberfläche [Geo16]. Rechts: Eine relativ spekulare und diffuse Oberfläche [AMHH08].

2.1.5 Farbige Reflexion

Bisher wurde noch nicht betrachtet, aus welchem Grund verschiedene Materialien in unterschiedlichen Farben erscheinen. Um der Ursache dafür auf den Grund zu gehen, muss wieder auf das Wellenmodell des Lichts zurückgegriffen werden. Licht ist dabei eine Kombination von verschiedenen Lichtwellen mit unterschiedlicher Wellenlänge. Die unterschiedlichen Wellenlängen bestimmen dabei den für das menschliche Auge visuellen Eindruck einer Farbe. So liegt der rote Wellenbereich bei ca. 700-630, der grüne bei ca. 560-490 und der blaue bei ca. 490-450 Nanometern. Weißes Licht wäre dabei ein aus gleichmäßigen Anteilen aller Wellenlängen des sichtbaren Spektralbereichs gemischtes Licht, was jedoch kaum realisierbar ist, bei Sonnenlicht wird aber praktisch trotzdem von weißem Licht ausgegangen.

Die Elektronen eines Atoms können unter festgesetzten Voraussetzungen Lichtwellen einer bestimmten Länge absorbieren und dadurch auf ein energetisch höheres Niveau springen. Anschließend kann diese aufgenommene Energie bspw. als Wärme wieder abgegeben werden. Es können dabei nur die Wellenlängen absorbiert werden, zu denen es passende Energieniveaus für die Elektronen gibt. Reflektiert z. B. ein Material die Wellenlänge Grün und alle anderen werden absorbiert, so erscheint es uns grün. Wird nur Rot absorbiert, so erscheint uns das Material ebenfalls wieder grün, da dies die Komplementärfarbe von Rot ist. Schwarze Materialien absorbieren alle sichtbaren Wellenlängen gleichzeitig, während weiße alle gleichförmig reflektieren, daher heizen sich schwarze Materialien eher auf. Ein großer Bereich an Farben kann durch drei Lichtwellen kombiniert dargestellt werden, wenn deren Wellenlängen sich groß genug unterscheiden. Kombinieren sich diese drei Lichtwellen zusammen zur Farbe Weiß, so handelt es sich um Primärfarben. Mit Rot, Grün, und Blau lässt sich ein großer Farbraum abdecken, weshalb das RGB-Modell in der Computergrafik meistens genutzt wird und somit auch in dieser Arbeit Verwendung findet.

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, kann zwischen spekularer und diffuser Reflexion unterschieden werden, da im ersten Fall ein Lichtanteil direkt an der Oberfläche reflektiert wird, während der andere Anteil zunächst in die Oberfläche eindringt. Daher kann die Farbe der spekularen Reflexion sich von der diffusen unterscheiden. Poliertes Plastik besteht z. B. aus einem weißen Substrat, das farbige Pigmentpartikel enthält. Die spekulare Reflexion behält hierbei die Farbe des Lichts bei, da die Reflexion direkt an der Oberfläche stattfindet. Die diffuse Reflexionsfarbe ist im Gegensatz dazu abhängig von der Lichtwellen-Absorption der Pigmente. Bei Metallen ist der diffuse Reflexionsanteil relativ gering, da sie zu den Leitern

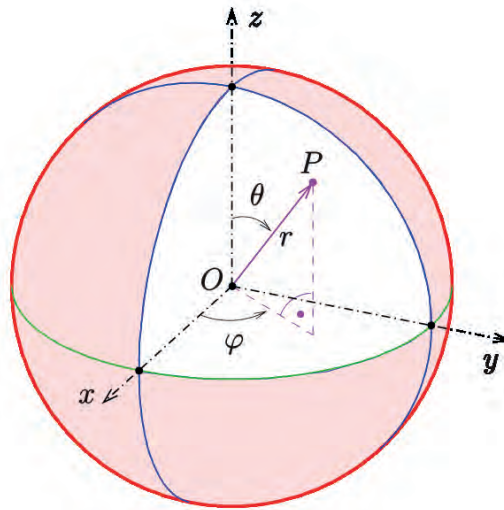


Abbildung 2.5: Aufbau des Kugelkoordinatensystem [Ag216].

gehören und daher elektromagnetische Wellen kaum in deren Oberfläche eindringen können. Da aber, je nach Energiebänderstruktur, bestimmte Wellenlängenbereiche stärker absorbiert werden als andere, erscheint hierbei der spekulare Lichtanteil in der Metallfarbe eingefärbt, wie z. B. bei Kupfer ausgeprägt zu sehen ist ([NMP07], S. 177).

2.1.6 Kugelkoordinatensystem

Für die Betrachtung einer Reflexion im Sinne einer BRDF ist es notwendig ein Koordinatensystem für diese Arbeit festzulegen. Ein dreidimensionaler Vektor \vec{v} wird im kartesischen Koordinatensystem mittels drei Werten für die jeweilige x -, y - und z -Achse beschrieben:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Da dies bei der parametrischen Betrachtung von BRDFs etwas schwerfällig ist, wird in der Regel die Darstellung eines Vektors mit Kugelkoordinaten vorgezogen (vgl. Abb. 2.5). Dabei wird ein Ursprungspunkt O benötigt, sowie eine gerichtete Gerade durch O , die der Polachse, die die Zenitrichtung angibt, entspricht. Dadurch wird eine Äquatorebene festgelegt, die orthogonal zur Zenitrichtung durch den Ursprungspunkt verläuft. Deren Bezugsrichtung muss jedoch noch festgelegt werden. Für die Darstellung eines Kugelkoordinatensystem wird daher meist gleichzeitig ein kartesisches Koordinatensystem verwendet, wobei dessen Ursprungspunkt dem des Kugelkoordinatensystems entspricht. Die z -Achse kommt dann der Polachse gleich und die x -Achse steht letztlich für die Bezugsrichtung der Äquatorebene. In Kugelkoordinaten wird dann ein Punkt P mittels seines Abstands r zum Ursprungspunkt, sowie zweier Winkeln, θ und ϕ dargestellt: $P = (\theta, \phi, r)$

Wobei θ (Polarwinkel) den Winkel zwischen Polachse z und Strecke \overline{OP} beschreibt und dessen Wertebereich innerhalb von 0 und π bzw. 0° und 180° liegt. ϕ (Azimutwinkel) beschreibt hingegen den Winkel zwischen der Äquatorebenen-Bezugsrichtung (x -Achse) und der Orthogonalprojektion von Strecke \overline{OP} , wobei hier der Wertebereich zwischen 0 und 2π bzw. 0° und 360° liegt. Der Azimutwinkel läuft dabei gegen den Uhrzeigersinn. Bei Untersuchungen von Reflexionen einer Oberfläche ist eine Bestrahlung auf die Flächenunterseite irrelevant. Daher wird anstatt der ganzen Kugel nur die obere Hälfte, also die Hemisphäre über der Fläche, betrachtet. Der Wertebereich des Polarwinkels verkürzt sich somit auf $\pi/2$. Zudem wird in dieser Arbeit von normalisierten Vektoren und einer Einheitskugel ausgegangen, womit bei Umrechnungen, von einem Koordinatensystem in ein anderes, r wegfällt [Wyn16]:

Kugelkoord. \rightarrow Kartesische Koord. :

$$\begin{aligned}v_x &= \cos \phi \cdot \sin \theta \\v_y &= \sin \phi \cdot \sin \theta \\v_z &= \cos \theta\end{aligned}$$

Kartesische Koord. \rightarrow Kugelkoord. : (2.10)

$$\begin{aligned}\phi &= \arctan\left(\frac{v_x}{v_y}\right) \\ \theta &= \arccos\left(\frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}\right)\end{aligned}$$

2.1.7 Raumwinkel

Um die Definition einer BRDF verstehen zu können, ist es wichtig einige Grundlagen der Radiometrie zu kennen. Wird dabei ein Punkt auf einer Oberfläche betrachtet, so werden viele Messungen bezüglich dieses Punktes unter der Berücksichtigung einer Kugel, die diesen Punkt umfasst, durchgeführt. Der Raumwinkel ist das dreidimensionale Gegenstück zu einem ebenen Winkel und bezieht sich dabei auf einen Flächenausschnitt dieser Kugel, der durch eine Projektion entsteht (vgl. Abb. 2.7).

Da, wie im nächsten Abschnitt zu sehen ist, Licht als eine Art Fluss durch Raum gemessen wird, wird der differentielle Raumwinkel genutzt, um Licht nur aus einem kleinen Bereich zu betrachten. Allgemein definiert wird der Raumwinkel als das Verhältnis des Flächeninhalts A des Ausschnitts zum Quadrat des Kugelradius r (vgl. 2.6 links):

$$\omega = \frac{A}{r^2} [sr] \quad (2.11)$$

Wird von einer Einheitskugel ausgegangen, fällt der Radius in der Gleichung weg, womit der Raumwinkel ω der Teilfläche A entspricht. Der volle Raumwinkel der Einheitskugel kommt somit der kompletten Oberfläche von 4π gleich. Generell kann die Teilfläche A eine beliebige Umrissform haben, dadurch aber, dass in dieser Arbeit ein Kugelkoordinatensystem genutzt

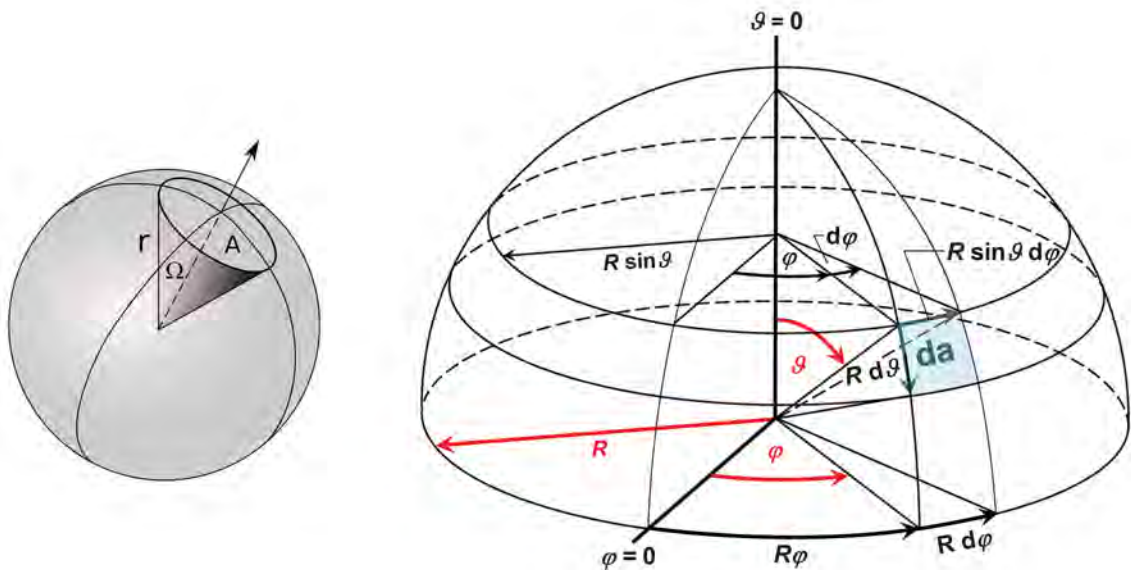


Abbildung 2.6: Links: Der Raumwinkel, hier in Ω statt ω angegeben, mit Ausschnittsfläche A [HH16]. Rechts: Fläche dA und dessen Abmessung im Kugelkoordinatensystem [Pro16].

wird, werden viereckige Flächenformen betrachtet, deren Größen infinitesimal klein sind, womit auch eine vorhandene Krümmung zu vernachlässigen wäre.

Wird nun eine differentielle Fläche dA auf der Einheitskugel betrachtet, wie rechts in Abb. 2.6 zu sehen ist, ergibt sich folgende Beziehung dieser Fläche zum differentiellen Raumwinkel [Wyn16]:

$$\begin{aligned} d\omega &= dA \\ &= \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \end{aligned} \quad (2.12)$$

Als Oberflächenintegral definiert sich der Raumwinkel in folgender Form:

$$\omega = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.13)$$

Der Raumwinkel ist eigentlich eine dimensionslose Größe, wird meist aber in der Einheit Steradian [sr] angegeben, was dem Bogenmaß, mit der Einheit Radiant [rad], beim ebenen Winkel entspricht. Eine Einheitskugel hat demnach einen Raumwinkel von 4π oder ca. $12,57sr$.

2.1.8 Radiometrische Größen

Zum Verständnis, wie die Energie von Licht und dessen Reflexion gemessen wird, werden einige radiometrische Größen vorgestellt. Jedes Photon hat in sich eine kleine Menge

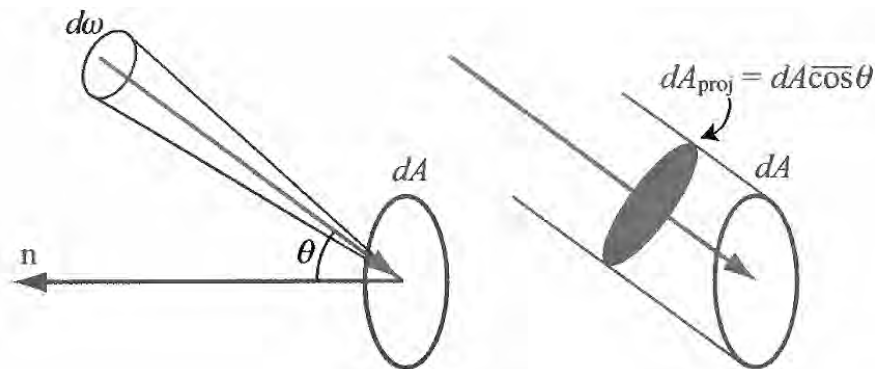


Abbildung 2.7: Projektion von Flächen mittels Kosinusgesetz ([AMHH08], S. 207).

an Strahlungsenergie, die proportional zur eigenen Frequenz ist. Elektromagnetische Strahlung besteht aus einem Strom von Photonen. Die in diesem Strom transportierte Energie entspricht der Strahlungsenergie Q , die in der Basiseinheit Joule $[J]$ angegeben wird. Ein optischer Strahler (z. B. Glühlampen) emittiert eine gewisse Anzahl an Strahlungsenergie pro Zeitspanne, dies ist der Strahlungsfluss Φ :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.14)$$

Der Strahlungsfluss kann ebenfalls in Watt angegeben werden, was ein anderer Ausdruck für Joule pro Sekunde ist: $[W] = \frac{J}{s}$

Wenn über Licht gesprochen wird, das auf einer Fläche ankommt oder sie verlässt, ist es passender von einem Strahlungsfluss zu sprechen, der einen gewissen Raumbereich erreicht oder durchfließt. Es macht also keinen Sinn von einer gewissen Menge Licht aus einer einzigen Einfallsrichtung zu sprechen, sondern eher Licht so zu betrachten, als ob es aus einer kleinen Region der Einfallsrichtung kommt. Die Strahlungsstärke I gibt daher den Strahlungsfluss pro differentiellen Raumwinkel $[\frac{W}{sr}]$ an, sie bestimmt wie hell eine Lichtquelle in eine bestimmte Richtung strahlt:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (2.15)$$

Die Strahldichte L (engl.: *radiance*) beschreibt, wie viel Strahlungsenergie von einem gegebenen Punkt pro Zeiteinheit pro projiziertem Flächenelement dA in ein Raumwinkelelement $d\omega$ ausgesendet wird. Die Strahldichte ist sozusagen die Strahlungsstärke I bezogen auf die Fläche, die sie erzeugt und wird in $[W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}]$ angegeben:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_{proj} \cdot d\omega} \quad (2.16)$$

Wenn bei Strahlungsgrößen von einer Fläche geredet wird, ist damit immer die in Ausstrahlungs- bzw. Betrachtungsrichtung projizierte gemeint. Diese Projektion findet mittels des Lambert'schen Kosinusgesetzes statt (vgl. Abb. 2.7). Die Projektion hängt dabei vom Kosinus von θ ,

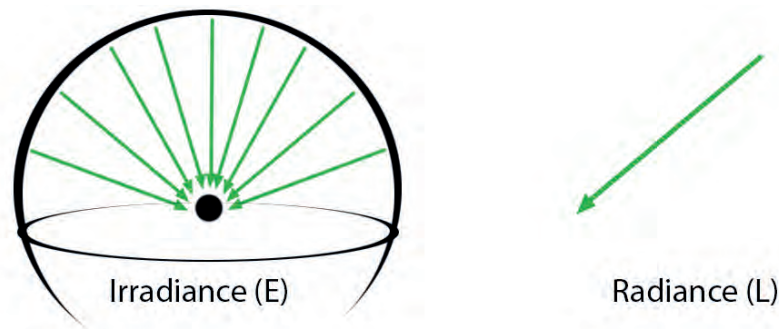


Abbildung 2.8: Verknüpfung von Strahldichte (Radiance) und Bestrahlungsstärke (Irradiance) [Mar16].

dem Winkel zwischen Flächennormalen und der zu berücksichtigenden Ausstrahlungs- bzw. Betrachtungsrichtung, ab:

$$dA_{proj} = dA \cdot \overline{\cos\theta} \quad (2.17)$$

$\overline{\cos}$ weist darauf hin, dass der Kosinus auf ein Minimum von null beschränkt ist, somit wird ein möglicher negativer Wert als Ergebnis des Kosinus auf null gesetzt. Ein negativer Wert würde darauf hinweisen, dass sich die Projektion nicht mehr auf der Oberfläche befindet. Da bei einer Hemisphäre der Polarwinkel keine 90° übersteigt, wird diese Schreibweise in solchen Fällen weggelassen.

Wird der Strahlungsfluss $d\Phi$ in Bezug zu einer bestrahlten Fläche dA gesetzt, resultiert dies in der Bestrahlungsstärke E (engl.: *irradiance*) mit der Einheit $[\frac{W}{m^2}]$. Anders ausgedrückt, entspricht die Bestrahlungsstärke der Summe der eintreffenden Energie bzw. Strahldichte L_i (i steht für einfallender Strahl; engl.: *incident*), die von allen Einfallrichtungen auf der Fläche ankommt. Wobei die über die Hemisphäre verteilten Raumwinkelemente sowie deren Projektion auf die Fläche zu beachten ist. Somit lässt sich E_i als Integral über die Hemisphäre folgendermaßen ausdrücken ([Mob94], S. 25):

$$E_i = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot \cos\theta_i \cdot \sin\theta_i \cdot d\theta_i \cdot d\phi_i \quad (2.18)$$

Strahldichte und Bestrahlungsstärke sind beides Maßeinheiten für einen Strahlungsfluss, wobei zunächst nicht zwischen Strahler und Empfänger unterschieden wird. Im Allgemeinen wird aber die Strahldichte genutzt, um die Intensität der ausgestrahlten Energie einer Lichtquelle oder reflektierenden Fläche zu messen. Die Bestrahlungsstärke gibt im Umkehrschluss an, wie viel dieser Energie eine bestimmte Fläche erreicht (vgl. Abb. 2.8).

2.1.9 Isotropie und Anisotropie

Die Oberflächenstruktur eines Materials kann bei der Reflexion von Licht dazu führen, dass uns das Material entweder isotrop oder anisotrop erscheint. Verändert sich die Lichtinten-

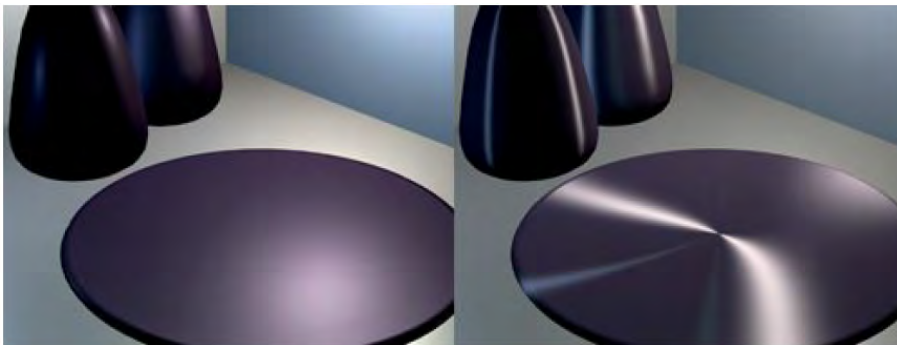


Abbildung 2.9: Links: Bei isotropen Oberflächen verteilen sich die Glanzlichter gleichmäßig. Rechts: Bei anisotropen werden die Glanzlichter gestreckt ([Bir14], S. 322).

sität der Reflexion nicht, wenn das Material unter dem Betrachter gedreht wird, so handelt es sich um eine isotrope Oberflächenstruktur. Glattes Plastik besitzt z. B. diese Eigenschaft. Bei anisotropen Materialien ändert sich hingegen die Lichtintensität bei Rotationen um die Flächennormale. Fast alle realen Materialien haben eine Oberfläche, die eine kaum erkennbare Anisotropie hat. Bei gebürstetem Metall, Satin oder auch bei Haaren sticht dieser Effekt jedoch besonders hervor, da hier die Vertiefungen systematisch in eine bestimmte Richtung verlaufen. In Abb. 2.9 sind beide Reflexionseigenschaften erkennbar.

2.2 BRDF

Zunächst folgt die Definition der BRDF. Danach werden BRDF-Arten unterschieden und eine mögliche Klassifizierung vorgestellt. Schließlich wird das Mikrofacetten-Modell und der damit verbundene Halfway-Vektor erläutert.

2.2.1 Definition der BRDF

Die BRDF wurde erstmals offiziell um 1977 von Fred Nicodemus vorgestellt. Eine Reflexion definierte Nicodemus folgendermaßen:

„Reflection is the process by which electromagnetic flux (power), incident on a stationary surface or medium, leaves that surface or medium from the incident side without change in frequency; reflectance is the fraction of the incident flux that is reflected“ [NRH⁺77].

Hier sei noch einmal vermerkt, dass für den einfallenden bzw. reflektierenden Strahl meist die Indizes i für *incident* und r für *reflected* benutzt werden. Somit ergibt sich, nach der Definition von Nicodemus, für eine Reflexion ρ folgende Gleichung:

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad (2.19)$$

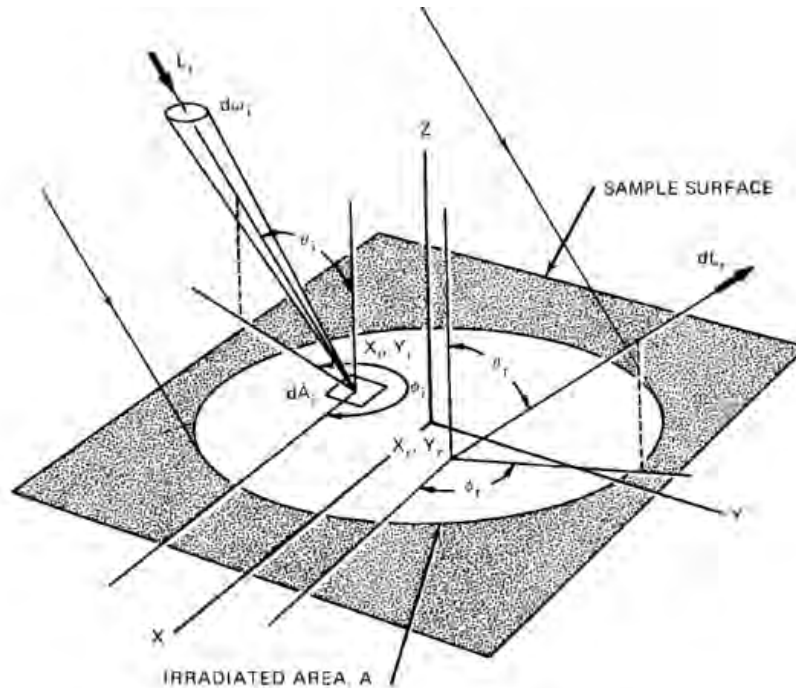


Abbildung 2.10: Aufbau der Fläche zur Untersuchung der Reflexionseigenschaften [NRH⁺77].

In Abb. 2.10 ist zu sehen, dass von einer bestrahlten Fläche A nur das Teilstück dA_i , mit Mittelpunkt $x_i; y_i$, betrachtet werden kann. Dieses Flächenteil wird von dem Strahlungsfluss $d\Phi_i$ aus Richtung $\theta_i; \phi_i$ innerhalb des differentiellen Raumwinkels $d\omega_i$ bestrahlt. Somit kann die reflektierte Strahlungsleistung dL_r von Punkt $x_r; y_r$ in Richtung $\theta_r; \phi_r$, folgendermaßen definiert:

$$dL_r = S \cdot d\Phi_i \quad [W \cdot m^{-2} \cdot r^{-1}] \quad (2.20)$$

Wobei dL_r proportional um den Faktor S zu $d\Phi_i$ ist. Dieser Faktor ist dabei abhängig vom Ort der Fläche, an dem die Strahlungsleistung eintrifft, vom Ort, an dem die reflektierte Strahlungsleistung wieder austritt, sowie der jeweiligen Ausrichtung beider Strahlen:

$$S = S(\theta_i, \phi_i, x_i, y_i; \theta_r, \phi_r, x_r, y_r) \quad [m^{-2} \cdot r^{-1}] \quad (2.21)$$

Die proportionale Funktion S , wird *bidirectional scattering-surface reflectance-distribution function*, oder BSSRDF, genannt. Bei dieser Funktion wird von einem Eindringen des Strahls in das Material und somit einer internen Reflexion ausgegangen, wodurch der reflektierte Strahl an einem anderen Ort austritt. Die BSSRDF ist daher eine äußerst komplexe Variante zur Beschreibung einer Reflexion. Zur Vereinfachung kann von einer lichtundurchlässigen Oberfläche ausgegangen werden, wodurch (x_i, y_i) gleich (x_r, y_r) ist (vgl. Abb. 2.11). Wird im nächsten Schritt davon ausgegangen, dass das bestrahlte Material uniform ist, also an jeder Stelle die gleiche Reflexion verursacht, wird die Funktion zudem positionsunabhängig.

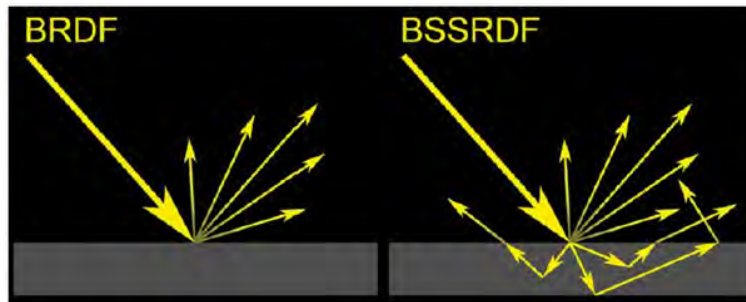


Abbildung 2.11: BRDFs beachten keine internen Reflexionen, im Gegensatz zu BSSRDFs ([Bir14], S. 326).

Die acht-dimensionale Funktion vereinfacht sich damit auf vier Dimensionen und hängt nur noch von der Lichteinfall- und Reflexionsrichtung ab (vgl. Abb. 2.12). Außerdem ist es hilfreicher, die eintreffende Strahlungsleistung in Form der Bestrahlungsstärke E_i zu beschreiben ([Gla95], S. 664). Zur Erinnerung: Die Bestrahlungsstärke, die auf einer Oberfläche ankommt, ist gleich der Strahldichte einer Lichtquelle multipliziert mit dem Raumwinkel den sie durchläuft, wobei die Raumwinkelfläche noch mit dem Kosinus-Satz auf die eigentliche Oberfläche projiziert werden muss:

$$\begin{aligned} d\Phi_i &= dE_i \\ &= L_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i \end{aligned} \quad (2.22)$$

Mit den genannten Vereinfachungen entsteht die in Gleichung 2.23 zu sehende *bidirectional reflectance-distribution function* (BRDF). Sie beschreibt das Verhältnis der reflektierten differentiellen Strahldichte dL_r in Betrachtungsrichtung zur differentiellen Bestrahlungsstärke dE_i , die aus der Beleuchtungsrichtung auf die Materialfläche einwirkt und wird in $[sr^{-1}]$ angegeben [NRH⁺77].

$$\begin{aligned} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) &= \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \\ &= \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i} \quad [sr^{-1}] \end{aligned} \quad (2.23)$$

Die BRDF lässt sich ebenfalls vereinfacht mit den Richtungen der Raumwinkel beschreiben, die zum Licht (i) und Betrachter (r) zeigen:

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{dL_r(\omega_r; E_i)}{L_i(\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i} \quad [sr^{-1}] \quad (2.24)$$

Die Gleichung 2.23 zeigt den Zusammenhang zwischen Strahldichte und Bestrahlungsstärke. $d\omega_i$ bezeichnet dabei den differentiellen Raumwinkel, innerhalb dessen die Lichtstrahlung auf den Oberflächenpunkt trifft. Der Kosinus-Term projiziert, wie in 2.1.8 beschrieben, den vom Raumwinkel ausgeschnittenen Abschnitt der Einheitskugel auf die Oberfläche. Je größer der zur Flächennormalen liegende Lichteinfallswinkel ist, desto kleiner ist die projizierte Fläche

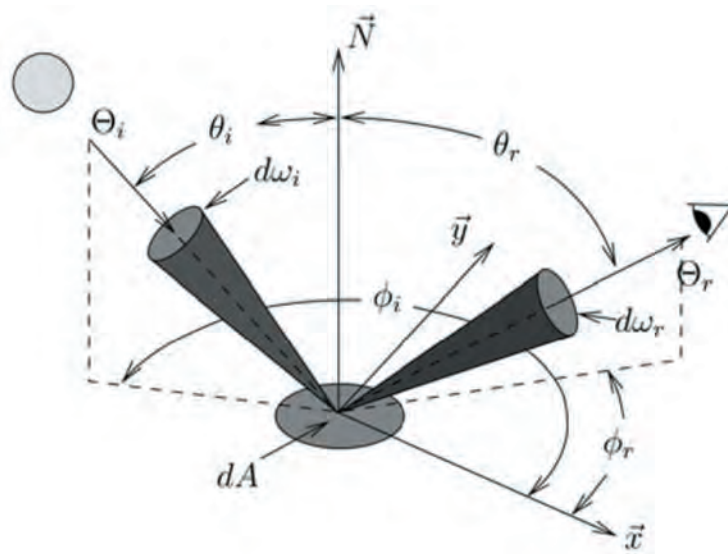


Abbildung 2.12: BRDF-Geometrie [TC16]

und somit die auf der beleuchteten Fläche einfallende Strahlungsenergie. Der Kosinus-Term deutet aber auch an, dass obwohl das Verhältnis von reflektiertem zu einfallendem Licht im Bereich von $[0, 1]$ liegen muss, die BRDF nicht auf diesen Bereich festgelegt ist, sondern von $[0, \infty]$ gehen kann.

Durch die Definition der BRDF als Quotient der differentiellen Größen (vgl. 2.23), lässt sich die BRDF ebenfalls als die Ableitung der Strahldichte nach der Bestrahlungsstärke definieren. Wie rechts in Abb. 2.13 zu sehen ist, folgt daraus, dass die Strahldichte sich durch Integration über der gesamten einfallenden Strahlung innerhalb der Hemisphäre (mit Ω_i beschrieben) ergibt [RB16]:

$$L_r(\omega_r) = \int_{\Omega_i} f_r(\omega_i, \omega_r) \cdot dE_i(\omega_i) \quad (2.25)$$

In der Praxis werden oft nur Fälle behandelt, bei denen die Beleuchtung aus einer punktförmigen Lichtquelle besteht, wie links in Abb. 2.13 zu sehen ist, womit obige Integration entfällt. Das Licht kommt dabei nur aus einer bestimmten Richtung auf die Oberfläche, was dem Anwendungsfall in dieser Arbeit entspricht. Man sieht daher, dass die BRDF als eine Gewichtungsfunktion der einfallenden Energie wirkt:

$$L_r(\omega_r) = f_r(\omega_i, \omega_r) \cdot E_i(\omega_i) \quad (2.26)$$

Wynn beschreibt die BRDF Beleuchtungsfunktion für eine Punktlichtquelle wie in folgender Gleichung. Wobei aus $E_i = L_i \cdot \cos \theta_i$ wird, die Raumwinkelgewichtung somit wegfällt, da alle Einfallsrichtungen gleich gewichtet werden [Wyn16]:

$$L_r(\omega_r) = f_r(\omega_i, \omega_r) \cdot L_i \cdot \cos \theta_i \quad (2.27)$$

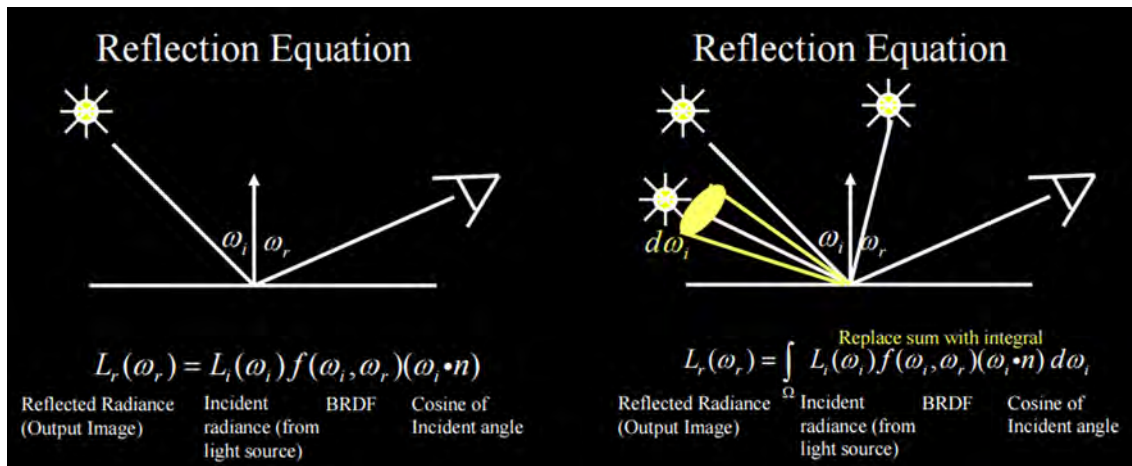


Abbildung 2.13: Links: Reflexionsgleichung für einzelnes Punktlicht. Rechts: Gleichung für mehrere Lichtquellen [Ree16].

Werden nur isotrope Materialien betrachtet, so ist die BRDF nicht mehr von beiden Azimutwinkeln ϕ_i und ϕ_r abhängig, sondern nur von der Differenz dazwischen. Dadurch schrumpft die Funktion um eine weitere Dimension:

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = f_r(\theta_i, \theta_r, \phi_i - \phi_r) \quad (2.28)$$

Generell besteht bei BRDFs aber darüber hinaus immer eine Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichts, wodurch farbige Reflexionen erst charakterisiert werden können. Daher wird in der Literatur oft das Lambda als Symbol für die Lichtwellenabhängigkeit hinzugefügt, wie z. B. : $BRDF(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$

Die BSSRDF und deren Vereinfachungen sind somit um eine Dimension erhöht anzusehen. Zur Vereinfachung der Notation kann Lambda weggelassen werden. Es sollte bei Reflexionsfunktionen immer klar sein, dass der berechnete Helligkeitswert für den jeweiligen Farbkanal extra berechnet werden muss. So ist z. B. im Falle der Betrachtung eines RGB-Farbraums für Rot, Grün oder Blau jeweils ein Wert zu ermitteln.

Gehen wir also von einer lichtwellenabhängigen, positionsunabhängigen und isotropen Reflexion aus, kann diese mittels einer BRDF mit insgesamt vier Dimensionen bzw. Eingangsvariablen beschrieben werden. Diese Form wird im Verlauf der weiteren Arbeit und innerhalb des Prototyps benutzt. BRDFs, die Reflexionen von realen Objekten beschreiben, beruhen auf physikalischen Gesetzen und sollten, damit sie als physikalisch plausibel gelten, drei wichtige Eigenschaften erfüllen:

1. BRDFs sollten zunächst immer positiv sein, da es zu keiner Reflexion von negativer Energie kommen kann:

$$f_r(\omega_i, \omega_r) \geq 0 \quad (2.29)$$

2. Außerdem sollte nicht mehr Strahlungsenergie von einer Oberfläche reflektiert werden, als die Energie, die auf diese eintrifft. Daher muss der Energieerhaltungssatz gelten,

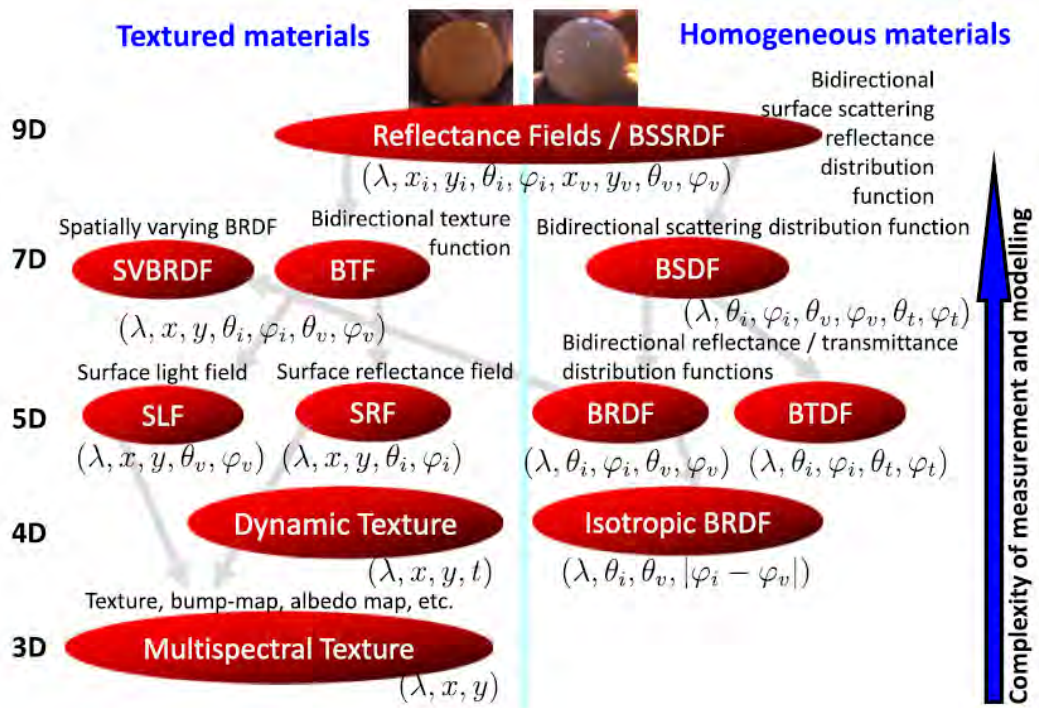


Abbildung 2.14: Verschieden komplexe Reflexions-Funktionen ([HF13], S. 11).

damit das Material nicht ungewollt Licht emittiert. Genauer ausgedrückt, gilt für die gesamte Lichtenergie, die durch alle möglichen Raumwinkel einer Hemisphäre auf ein Material trifft, dass deren Reflexion, wieder betrachtet über die gesamte ausstrahlende Hemisphäre (mit Ω_r beschrieben), kleiner oder gleich eins sein muss [Duv13]:

$$\forall \omega_i : \int_{\Omega_r} f_r(\omega_i, \omega_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\omega_r \leq 1 \quad (2.30)$$

3. Zuletzt wird für das Rendering gefordert, dass die Helmholtz-Reziprozität gelten sollte. Dadurch ist die BRDF symmetrisch anzusehen, womit sich deren Wert nicht ändert, wenn Einfall- und Ausfallstrahl vertauscht werden. Mathematisch lässt sich diese Eigenschaft folgendermaßen ausdrücken:

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = f_r(\omega_r, \omega_i) \quad (2.31)$$

Zusätzlich sollten noch die Annahmen gelten, dass der Licht-Transport keine Zeit in Anspruch nimmt, sich die Reflexionseigenschaften des Materials nicht innerhalb eines Zeitraums ändern und die Wellenlänge nicht durch die Interaktion mit der Fläche geändert wird ([HF13], S. 12). Im Gegensatz dazu gibt es zudem nicht-physikalisch plausible BRDFs. Diese können genutzt werden, um unrealistische Reflexionen zu beschreiben, falls die realistische Nachbildung nicht notwendig oder erwünscht ist.

Wie erkannt, ist die BSSRDF mit insgesamt neun Dimensionen die ausführlichste Funktion zur Reflexionsbeschreibung. Die BRDF vereinfacht diese Funktion, da sie kein Eindringen des Lichtstrahls in das Material berücksichtigt. Für homogene Materialien gibt es noch die BTDF (*bidirectional transmittance distribution function*) und die BSDF (*bidirectional scattering distribution function*). Erstere behandelt durchsichtige Materialien und Letztere kombiniert das Reflexionsverhalten der BRDF und BTDF. Für texturierte Materialien gibt es außerdem noch verschiedene Funktionen. Abb. 2.14 zeigt die unterschiedlichen BRDFs und ihre Zusammenhänge, sowie deren Anzahl an Dimensionen. Detailliertere Informationen lassen sich aus dem Buch *Visual Texture* von M. Haindl und J. Filip entnehmen. Darin wird die BRDF beschrieben als „... an optimal compromised untextured representation with many developed models.“ ([HF13], S. 22). Da bei dieser Arbeit von homogenen, isotropen und lichtundurchlässigen Autolacken ausgegangen wird, ist die isotrope BRDF mit vier Dimensionen (inklusive der Lichtwellenabhängigkeit im RGB-Bereich) die eindeutig effizienteste Wahl.

2.2.2 BRDF-Modelle

Zunächst wird bei BRDFs zwischen gemessenen und analytischen unterschieden. Zur Messung von BRDFs werden bspw. Gonioreflektometer eingesetzt, um die Reflexionen eines Materials, über eine bestimmte Anzahl an Ein- und Ausfallswinkeln über der Hemisphäre, zu messen. Im Kapitel *Stand der Technik* wird näher auf dieses Verfahren eingegangen. Durch die Messung können, abhängig von der gewählten Auflösung, große Datenmengen anfallen. Messfehler und Rauschen können dabei oft nicht vermieden werden. Daher sind die Rohdaten für ein direktes Rendering meist nicht sofort effizient nutzbar, sondern müssen zunächst in eine andere Form gebracht werden. Wie auch Möller im Buch *Real-Time Rendering* beschreibt: „...ist eine verbreitete Methode zunächst ein geeignetes analytisches BRDF-Modell zu wählen, um dann dessen Parameter auf die Messdaten anzufitten.“ ([AMHH08], S. 265)

Eine erste Einteilung der analytischen BRDFs lässt sich, anhand ihrer Fähigkeit anisotrope Materialien zu beschreiben, vornehmen. Im Anschluss daran kann noch zwischen empirischen und theoretischen Modellen unterschieden werden. Das Hauptziel empirischer Modelle ist eine einfache Formulierung zur Nachahmung von Reflexionen. Dabei werden Parameter benutzt, die auf keiner physikalischen Grundlage beruhen. Ihre Berechnungen sind schnell durchzuführen, weshalb sie vorzugsweise beim Echtzeit-Rendering eingesetzt werden. Die theoretischen Modelle versuchen, mittels Beachtung von physikalischen Gesetzen, eine äußerst genaue Simulation der Lichtreflexion zu erreichen. Je nach Grad der Komplexität, können theoretische Modelle nicht ausreichend schnell zur Echtzeit-Darstellung berechnet werden.

R. Montes und C. Ureña haben in einem Technikreport *An Overview of BRDF Models* eine grafische Klassifikation von BRDF-Modellen veröffentlicht, wie sie in Abb. 2.15 zu sehen ist. Man sieht, dass es eine Vielzahl an Modellen gibt, die teilweise zudem auf anderen aufbauen. Die Auswahl eines geeigneten BRDF-Modells für ein Projekt kann anhand der Anforderungen getroffen werden. Darunter zählen Kriterien ob, isotrope oder anisotrope

2. GRUNDLAGEN

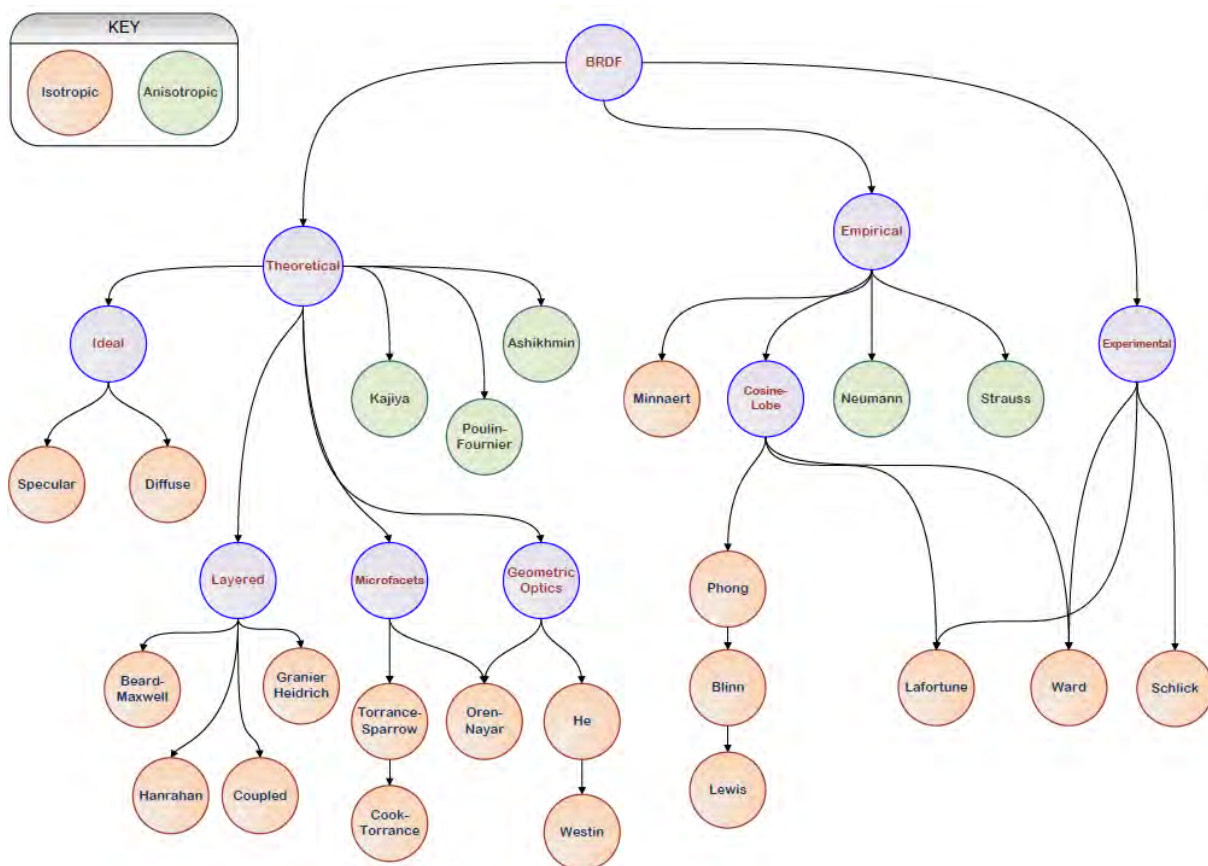


Abbildung 2.15: Eine grafische Klassifikation verschiedener BRDF-Modelle [MU].

Materialien dargestellt werden sollen, physikalische Korrektheit notwendig ist, die Berechnungsgeschwindigkeit in Echtzeit ablaufen soll oder gewisse Effekte, wie Fresnel, integriert sein müssen.

Sollen unterschiedliche BRDF-Modelle miteinander verglichen, kombiniert oder durch neue Modelle approximiert werden, so ist eine geeignete Darstellungsform notwendig. Programme wie *BRDFLab*¹ von A. Fors et al. [FPBP09] oder der *BRDF-Explorer*² von Walt Disney Animation Studios können analytische BRDF-Modelle, erstellte Messdaten sowie gerenderte Materialien, abhängig von den jeweiligen Parametern anzeigen, wie in Abb. 2.16 zu sehen ist. Die *MERL (Mitsubishi Electric Research Laboratories) BRDF Database*³ ist dabei eine bekannte Quelle, um Rohdaten von über 100 verschiedenen gemessenen BRDFs unterschiedlichster Materialien zu erhalten, die für Forschungen und wissenschaftliche Arbeiten frei nutzbar sind. A. Ngan et al. [NDM05] bietet in Folge seiner Nachforschung zur *Expe-*

¹<http://brdflab.sourceforge.net>

²<https://www.disneyanimation.com/technology/brdf.html>

³<http://www.merl.com/brdf>

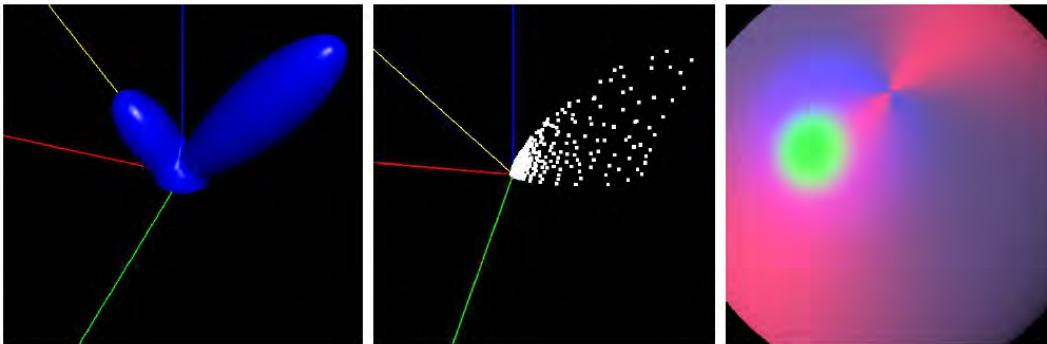


Abbildung 2.16: Links: Ein analytisches BRDF-Modell, wobei die gelbe Linie die Licht-einfallrichtung kennzeichnet. Die Ebene der roten und grünen Linie entspricht dem Oberflächenstück mit der blauen Linie als Richtung der Flächennormalen. Mitte: Messdaten eines blauen Metallic-Lacks aus der *MERL BRDF Database*. Rechts: Ein anisotropes BRDF-Modell mit einer Punktlichtquelle gerendert [Sch10].

*rimental Analysis of BRDF Models*⁴ anisotropische Messdaten an, die vom *BRDF-Explorer* dargestellt werden können.

Wie im Abschnitt 2.1.4 kurz erläutert, lassen sich spekulare und diffuse Reflexionsanteile linear kombinieren. Analytische BRDFs übernehmen diesen Vorteil, daher kann eine typische grafische Darstellung eines leicht glänzenden Materials wie links in Abb. 2.16 aussehen. Die Halbkugel entspricht dabei einer gleichmäßigen diffusen Reflexionsverteilung über die Hemisphäre und wird kombiniert mit einer keulenförmigen Ausstülpung, daher ebenfalls Glanzlichtkeule genannt, die dem spekularen Anteil bzw. einem Glanzpunkt gleich kommt.

Die für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Messdaten sind nachbearbeitet und in einem speziellen Format abgespeichert. Daher muss eine eigene optische Darstellungsform erstellt werden, mit der sich zusätzlich die Daten des Ashikhmin-Modells abbilden lassen.

2.2.3 Halfway-Vektor und Mikrofacetten-Modell

In der Regel hat eine Oberfläche Verwerfungen, die eine perfekte Spiegelung von eintreffenden Lichtstrahlen nicht möglich macht. Diese Verwerfungen an sich sind kleine glatte Flächen mit einer anderen Ausrichtung ihrer Flächennormalen als die der Gesamtfläche, wodurch sie die Lichtstrahlen jeweils in einem anderen Winkel reflektieren. Um dieses Verhalten einer Oberfläche innerhalb von BRDFs zu simulieren, wurde das Mikrofacetten-Modell entworfen. Wenn eine BRDF ausgewertet wird, sind die Richtungen aus der das Licht kommt und aus der die Reflexion betrachtet wird, also die Vektoren \vec{l} und \vec{v} , bekannt. Wie in Abb. 2.17 zu sehen ist, tragen nur die roten Flächen zur direkten Reflexion bei, da deren Flächennormalen genau richtig ausgerichtet sind. Die Flächennormale einer solchen aktiven Mikrofacette liegt dabei genau zwischen Vektor \vec{l} und \vec{v} und wird daher auch als Halfway-Vektor bezeich-

⁴<http://people.csail.mit.edu/addy/research/brdf/>

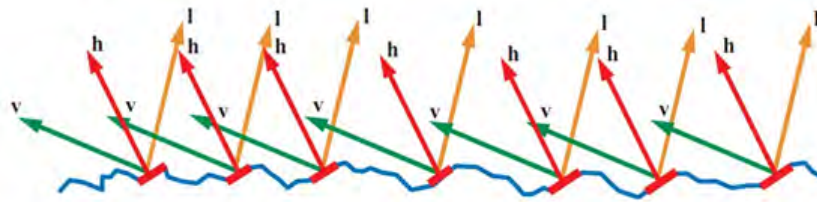


Abbildung 2.17: Eine bestrahlte Oberfläche und ihre Verwerfungen. Nur die roten Mikrofacetten sind aktiv an der Reflexion beteiligt ([AMHH08], S.247).

net. Dieser Vektor wird in vielen analytischen BRDF-Modellen genutzt, wodurch das damit integrierte Mikrofacetten-Modell realistischere Glanzpunkte erzeugt.

Dadurch fällt in diesen BRDFs die relativ aufwendige Berechnung des Reflexionsvektors mittels Licht- und Flächennormalenvektor weg. Der Halfway-Vektor \vec{h} wird durch Addition von Vektor \vec{l} und \vec{v} sowie darauffolgender Normalisierung berechnet:

$$\vec{h} = \frac{\vec{l} + \vec{v}}{|\vec{l} + \vec{v}|} \quad (2.32)$$

Das komplette Mikrofacetten-Modell berücksichtigt dabei noch zwei Möglichkeiten, auf welche Art Licht entweder eine mögliche aktive Mikrofacette nicht erreicht oder eine entstandene Reflexion nicht beim Betrachter ankommt. Im ersten Fall blockieren Mikrofacetten das einfallende Licht, so dass eine Beschattung vorliegt, auch *shadowing* genannt. Im anderen Fall blockieren Mikrofacetten den Reflexionsstrahl in Richtung Betrachter, wofür der Begriff *masking* benutzt wird.

Beide Effekte können gleichzeitig auftreten, wodurch analytische BRDF-Modelle, die das komplette Mikrofacetten-Modell berücksichtigen, recht komplex werden können. Da in dieser Arbeit von eher glatten Autolacken als Material ausgegangen wird, spielt *shadowing* und *masking* keine Rolle. Jedoch ist in dieser Arbeit der Halfway-Vektor zu berücksichtigen, da er Bestandteil des Ashikhmin-Modells ist. Details über das Mikrofacetten-Modell können in *A Microfacet-based BRDF Generator* von Ashikhmin et. al. [APS00] nachgelesen werden.

2.3 Nichtlineare Optimierung und Levenberg-Marquardt Verfahren

Optimierungsverfahren spielen in vielen Anwendungsbereichen der Mathematik eine wichtige Rolle. Sie beschäftigen sich damit, Parameterwerte eines meist komplexen Systems, die als optimal gelten, zu finden. Die optimalen Werte minimieren oder maximieren eine Zielfunktion. Soll bspw. das Minimum oder Maximum einer analytischen eindimensionalen Funktion $f(x)$ gefunden werden, geschieht das in der Regel durch die Bestimmung der Nullstellen der ersten Ableitung [Wik17d].

Bei nichtlinearen Gleichungen sind direkte Verfahren zur Bestimmung der Nullstellen nicht oder nur mit großem Aufwand nutzbar, daher werden hier meist Näherungsverfahren

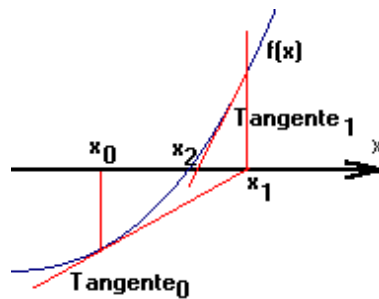


Abbildung 2.18: Iterative Annäherung an die Nullstelle einer Funktion mittels Newton-Verfahren [alp17].

eingesetzt. Das Newton-Verfahren bietet bspw. eine Möglichkeit, sich bei gewissen Funktionen den Nullstellen durch einen iterativen Prozess zu nähern. Bei allen iterativen Verfahren ist zunächst eine Schätzung der richtigen Parameterwerte notwendig. Das Newton-Verfahren nutzt nun diesen ersten Schätzwert x_0 , um bei der Funktion an dieser Stelle die Tangente der Steigung zu setzen. Dazu wird die erste Ableitung der Funktion benötigt, die Teil der Iterationsformel ist:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2.33)$$

x_1 ist der Schnittpunkt der Tangente mit der x-Achse und zugleich der neue Startwert, der x_0 in der nächsten Iteration ersetzt. Mit jeder weiteren Iteration nähert sich das Verfahren so der Nullstelle der Funktion, sie konvergiert sozusagen dahin. Gefunden wird die exakte Nullstelle aber nie, weshalb iterativen Prozesse durch eine Schranke begrenzt werden, die es zu erreichen gilt. In Abb. 2.18 sind die iterative Annäherungen dargestellt. Iterative Prozesse haben Eigenschaften, die zu beachten sind:

- Pro Iteration verändern sich die Schätzwerte, dabei kann es vorkommen, dass sich manche Parameterwerte verschlechtern, während sich andere verbessern.
- Die Anzahl der Iterationen, bis eine passende Lösung gefunden ist, variiert. Manchmal sind wenige nötig, es kann aber auch Hunderte benötigen, in denen sich das Verfahren langsam der Lösung nähert.
- Es kann ebenfalls vorkommen, dass die Iterationen nicht konvergieren, sich also nicht hin zu einer Lösung bewegen. Das kann verschiedene Ursachen haben.
- Manchmal sind die Startwerte schlecht gewählt, so dass die Iterationen divergieren und sich so von einer Lösung entfernen. Dann sollten andere Startwerte gewählt werden.
- Einige nichtlineare Gleichungssysteme können mehr als eine Lösung haben. Dabei kann es sich um richtige, aber auch um physikalisch nicht mögliche Lösungen handeln.

Das GNV ist eine Erweiterung des Newton-Verfahrens und hat einen etwas anderen Ablauf [Wik17b]. Es versucht das Residuum mittels der Methode der kleinsten Quadrate (*engl. least*

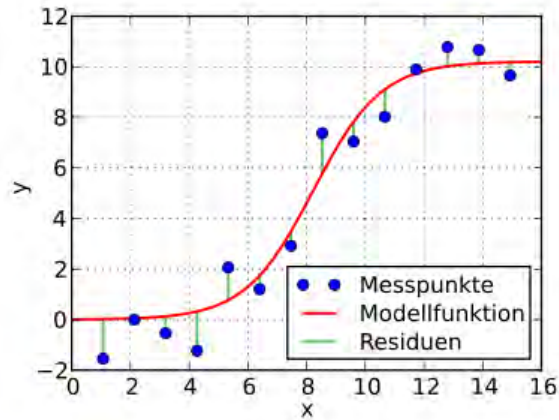


Abbildung 2.19: Die Abweichungen der Messwerte von der Modellfunktion bestimmen die Residuen [Wik17c].

squares method) zu minimieren. Das Residuum gibt die Abweichung der Näherungslösung einer Modellfunktion von einem gewünschten Ergebnis an. Wird von einer Funktion f ausgegangen und ein passendes x gesucht, damit $f(x) = b$ ergibt, so ist das Residuum r , mit einer gewählten Näherung von x_0 an x , folgendermaßen beschrieben:

$$r = b - f(x_0) \quad (2.34)$$

Der eigentliche Fehler ist $x_0 - x$, der lässt sich jedoch nicht berechnen, da der Wert x unbekannt ist. Die Methode der kleinsten Quadrate ist ein Verfahren zur Parameterschätzung. Sind bspw. Messwerte vorhanden, die eine Datenpunktwolke bilden, so werden mit dem Verfahren Parameterwerte für eine nichtlineare Modellfunktion gesucht, so dass die Kurven der Funktion möglichst nahe an den Datenpunkten verlaufen. Der Begriff *curve fitting* wird daher ebenfalls oft verwendet. Wie in Abb. 2.19 zu sehen ist, bilden die Abstände der Messwerte von der Modellfunktion die Residuen. Das GNV dient zur Annäherung einer Modellfunktion an vorhandene Messwerte und benötigt dabei einige Daten:

- Zunächst gibt es eine Anzahl k an Messungen, die durchgeführt wurden.
- Bei jeder Messung sind n Stellgrößen x_1, \dots, x_n gesetzt und das Ergebnis y gemessen worden.
- Eine Modellfunktion $f(x_1, \dots, x_n)$ beschreibt den Zusammenhang zwischen Stellgrößen und y .
- Diese Funktion besitzt eine Anzahl p an Parametern a_1, \dots, a_p von denen der Funktionswert i. A. nichtlinear abhängt.

Das Ziel ist es, die Parameterwerte so anzupassen, dass die Funktionswerte so gering wie möglich von den gemessenen Werten abweichen. Die Abweichungen werden mit der Summe

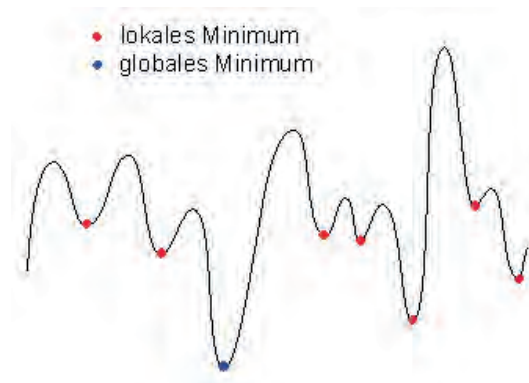


Abbildung 2.20: Diese Funktion hat mehrere lokale Minima, aber nur ein globales Minimum [Che17].

der Fehlerquadrate ermittelt. Diese Summe zu minimieren führt zum Optimierungsproblem, wie folgt dargestellt:

$$\sum_{i=1}^k (f(x_{i,1}, \dots, x_{i,n}) - y_i)^2 \rightarrow \min! \quad (2.35)$$

Je mehr Parameter angepasst werden sollen, desto größer ist die Gefahr, eine schlechte Konvergenz zu erhalten. Die Genauigkeit einer Anpassung erhöht sich mit der Anzahl an Messungen, so dass für ein zuverlässiges Ergebnis idealerweise wenige Parameter, aber viele Messungen vorhanden sein sollten. Im Gegensatz zum Newton-Verfahren versucht das GNV somit, die Summe der Fehlerquadrate zu minimieren und nicht das Minimum einer nicht-linearen Funktion zu bestimmen. Das erreicht das Verfahren durch eine Überführung eines nichtlinearen Gleichungssystems in eine Folge linearer Ausgleichsprobleme.

Es gilt dabei zu beachten, dass je nach Funktion, gleichzeitig ein globales Minimum, zu dem aber ebenso mehrere lokale Minima existieren können, wie in Abb. 2.20 zu sehen ist. Je nach Wahl der Startwerte ist es dann möglich, dass ein nichtlineares Optimierungsverfahren zu einem lokalen Minimum konvergiert, anstatt zum gewünschten globalen.

Das LMV erweitert das GNV um eine Regularisierungstechnik. Dadurch wechselt das Verfahren abhängig vom Dämpfungsfaktor zwischen GNV und Gradientenverfahren. Das LMV ist robuster als das GNV, wodurch auch bei relativ schlecht gewählten Startbedingungen zu einem Minimum konvergiert wird. Dieses muss aber nicht unbedingt dem globalen entsprechen. Eine generelle Konvergenz ist jedoch ebenfalls nicht garantiert. Bei Startwerten, die nahe an einem Minimum liegen, tendiert das LMV etwas langsamer zu sein als das GNV.

Die Betrachtung des genauen Ablaufs des GNVs, sowie dessen Erweiterung mittels Dämpfungsfaktor zum LMV, folgt im *Methodik* Kapitel. Dabei wird zugleich näher auf die Verbindung des Verfahrens zum Themas dieser Arbeit eingegangen.

In diesem Kapitel wurden alle Grundlagen aufgeführt, die für die Parametrisierung von gemessenen BRDFs eine Rolle spielen. Außerdem wurden physikalische Effekte, wie die Lichtbrechung und der damit verbundenen Fresnel-Effekt, vorgestellt. Relevante radiometrische Größen, sowie das damit verbundene Kugelkoordinatensystem und der Raumwinkel, wurden vorgestellt.

Es wurde gezeigt, wie und aus welchem Grund sich diffuse und spekulare, sowie isotrope und anisotrope Reflexionen unterscheiden. Die Definition der BRDF wurde vorgestellt, wobei andere Reflexionsfunktionen im Bezug zu ihrer Komplexität damit verglichen wurden. Eine Möglichkeit zur Klassifizierung, sowie der grafischen Darstellung von BRDFs wurde präsentiert. Der Halfway-Vektor und das damit verbundene Mikrofacetten-Modell wurden daraufhin näher vorgestellt. Zuletzt gab es eine knappe Einführung zum Thema nichtlineare Optimierungsverfahren.

Das nächste Kapitel *Stand der Technik* enthält zunächst einen Überblick über Messverfahren von BRDFs. Danach werden die zwei wichtigsten BRDF-Modelle und bisherige Arbeiten, die sich mit dem Thema der Parametrisierung gemessener BRDFs beschäftigten, vorgestellt.

Kapitel 3

Stand der Technik

Im vorherigen Kapitel *Grundlagen* wurde die Definition und der Aufbau einer BRDF näher betrachtet. Dazu wurden physikalische und mathematische Größen vorgestellt, die das Verhalten von Lichtstrahlen bestimmen. Außerdem wurde das Kugelkoordinatensystem und der Raumwinkel erklärt, da beides eine bedeutende Rolle bei der Betrachtung von BRDFs spielt. Zuletzt wurde das Prinzip von nichtlinearen Optimierungen und Iterationsverfahren näher gebracht.

In diesem Kapitel wird zunächst betrachtet, welche Möglichkeiten es gibt um BRDFs von verschiedenen Materialien zu messen. Danach werden die zwei einfachsten und einflussreichsten analytischen BRDF-Modelle näher beschrieben. Der letzte Abschnitt stellt Arbeiten vor, die sich mit dem Thema der Parametrisierung von gemessenen BRDFs beschäftigen.

3.1 BRDF Messung

Wie bereits erwähnt, ist der Einsatz eines Gonioreflektometers eine Möglichkeit zur Messung des Reflexionsverhaltens von Materialien. Dabei bestehen viele verschiedene Konstruktionsvarianten. Grundlegend ist bei allen, dass ein zu untersuchendes Probematerial von einer einzigen Lichtquelle bestrahlt wird, was demzufolge der Bestrahlungsstärke entspricht. Die Art der Lichtquelle kann dabei von System zu System variieren. Meistens werden, wegen ihrer relativ gleichmäßigen spektralen Verteilung, Halogenlampen verwendet. Selten wird polarisiertes Licht oder ein Laser benutzt [DGNK99]. Ein Messinstrument misst daraufhin die reflektierte Strahldichte.

Murray-Coleman und Smith haben 1990 einen typischen Aufbau für ein Gonioreflektometer entworfen, wie er in Abb. 1.1 zu sehen ist [MCS90]. Die Lichtquelle ist dabei über die Hemisphäre beweglich, um verschiedene Lichteinfallswinkel zu simulieren. Weil eine BRDF, die anisotrope Materialien berücksichtigt, eine Funktion mit vier variablen Winkeln ist, jeweils zwei für das einfallende und das reflektierende Licht, muss ein Gonioreflektometer auch vier mechanische Freiheitsgrade besitzen. Bei anisotropen Materialien ist es zusätzlich notwendig, dass sich das Material drehen lässt, während bei isotropen Materialien diese Rotation weggelassen werden kann. Die beweglichen Teile werden meist durch computergesteuerte Motoren positioniert.

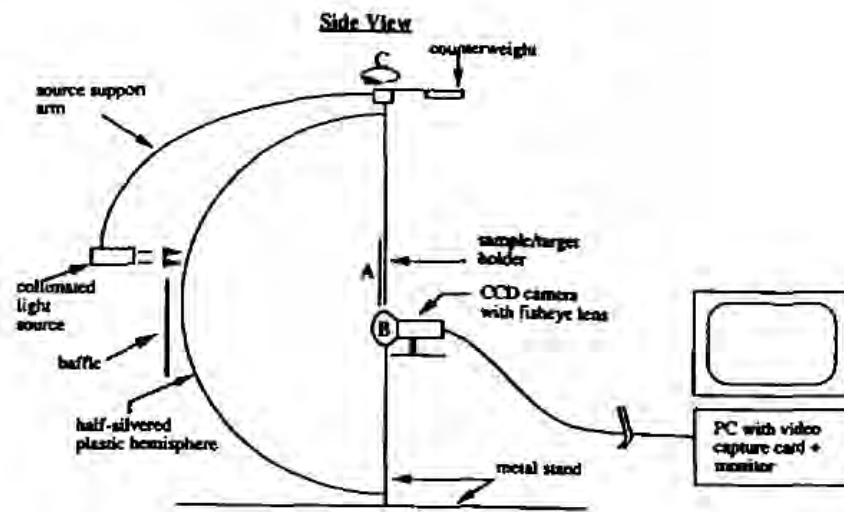


Abbildung 3.1: Aufbau der Gonioreflektometers von Ward [War92].

Soll in unterschiedlichen Bereichen des Lichtwellenspektrums gemessen werden, wobei auch farbige Reflexionen erfasst werden, ist es notwendig, dass entweder die Lichtquelle oder der Sensor auf eine Wellenlänge einstellbar ist. Durch die Entwicklung von Kameras mit *charge-coupled device* (engl. für ladungsgekoppeltes Bauteil; CCD) Sensor und deren Einsatz bei BRDF-Messungen, lassen sich mit einer Aufnahme bspw. die Wellenbereiche von Rot, Grün und Blau gleichzeitig messen.

Ein anderes Beispiel für den Aufbau eines Gonioreflektometers stammt von Gregory J. Ward aus dem Jahr 1992, das speziell zur Vermessung von anisotropen Materialien entwickelt wurde [War92]. Dabei wird eine halb-versilberte Hemisphäre aus Plastik und eine CCD Kamera mit Fischaugenobjektiv benutzt, wodurch in einer Aufnahme die ganze Hemisphäre des reflektieren Lichts gemessen wird. Eine komplette BRDF-Messung kann somit in ein paar Minuten durchgeführt werden. Wie in Abb. 3.1 zu sehen ist, bestrahlt eine Lichtquelle, hier eine 3-Watt Quartz-Halogen Lampe, das Probematerial durch die halbdurchlässige Hemisphäre. Im nächsten Schritt sammelt der hemisphärische Plastikspiegel das von dem Probematerial reflektierte Licht und reflektiert es wiederum zurück in das Fischaugenobjektiv und somit auf die CCD Kamera. Problematisch kann bei diesem Aufbau die Qualität der halb-versilberten Hemisphäre werden. Ist sie schlecht, können Messungen am Randbereich ungenauer sein und sehr scharfe Glanzlichter nicht richtig erfasst werden.

Dana et al. bauten 1996 ein System, bei dem ein Roboterarm Probematerialien in Front einer Halogenlampe mit Fresnel Linse positioniert [DGNK99]. Die spezielle Linse produziert dabei einen parallelen und gleichmäßigen Bestrahlungsverlauf des Probematerials durch die Halogenlampe. Eine 3-Kanal CCD Farbkamera dient neben einem Spektrometer als Messgerät, dessen Daten an einen Computer mit einem 24-Bit Framegrabber gesendet werden.



Abbildung 3.2: Links: Zusammenhang zwischen Pixel-Position der Aufnahme und Punkt-Position des 3D-Modells wodurch die Normale jedes Dreiecks berechnet werden kann. Rechts: Das Reflexionsverhalten des Modells aufgeteilt in Clustern [LKG⁺01].

Dadurch stehen pro Aufnahme 640x480 Pixel mit 24 Bit pro Pixel, jeweils 8 Bit für Rot, Grün und Blau, zur Verfügung.

Mit diesem System lassen sich die bidirektionale Texturierungsfunktion (BTF, vgl. 2.14) und die BRDF eines Materials simultan ermitteln, wobei die Lichtquelle unbeweglich bleibt und nur das Probematerial durch den Roboterarm und die Kamera positioniert werden müssen. Die Kamera befindet sich im Abstand von zwei Metern zum Probematerial entfernt und wird bei einer Messung an sieben verschiedenen Stellen, die jeweils $22,5^\circ$ auseinander liegen, um das Probematerial positioniert. Insgesamt werden für jedes Material 205 Aufnahmen erstellt. Bei anisotropen Materialien verdoppelt sich die Zahl, da das Material pro Messung nochmals, je nach Beschaffung, um 45° oder 90° gedreht werden muss. Wenn die Ausrichtung des Probematerials dazu führt, dass bei den korrespondierenden Betrachtungs- oder Beleuchtungswinkeln 85° überstiegen werden, verwirft man in diesen Fällen die Messung. Dadurch wird eine Beeinflussung der Messdaten durch eine mögliche Selbstbedeckung oder Selbstbeschattung vermieden. Dies ist ein generelles Problem bei BRDF-Messungen deren Messsystemaufbau dem von Murray-Coleman oder Dana et al. ähneln. Meist können dabei nicht alle Winkel gemessen werden, weshalb auf eine Extrapolation der Messwerte bei diesen verworfenen Winkeln zurückgegriffen wird. Die Messungen von 61 verschiedenen 10×12 cm spekularen, diffusen, isotropen und anisotropen Probematerialien durch Dana et al. wurden unter der *Columbia-Utrecht Reflectance and Texture Database (CURET)*¹ veröffentlicht.

Die bisher aufgeführten Messsysteme sind nicht auf eine vollkommene Automatisierung eingestellt. Ab einem gewissen Punkt, ist eine menschliche Interaktion immer noch notwendig. Ke baute 1999 ein System, das die Messung nach der Initialisierung komplett automatisch durchführt [Ke99]. Ein weiteres generelles Problem bei BRDF-Messungen ist auch die ungenaue bzw. fehlerhafte Positionierung von Messinstrumenten, Lichtquellen oder Probematerialien. Messfehler lassen sich daher durch eine mögliche Automatisierung, wie bei dem *ACME (Active Measurement) Roboter System* von Ke, minimieren.

Einen anderen Ansatz um räumlich variierende bzw. nicht homogene BRDFs zu messen, wurde von Lensch et al. 2001 vorgestellt [LKG⁺01]. Dabei werden, neben einigen HDR-

¹<http://www.cs.columbia.edu/CAVE/software/curet/html/about.php>

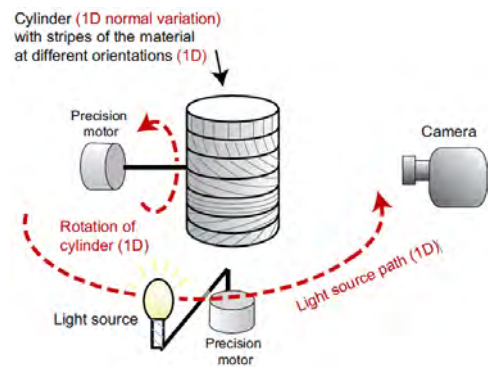
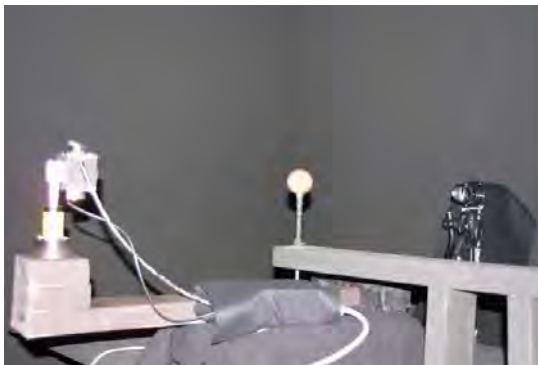


Abbildung 3.3: Links: Messsystem von Matsui et al. mit kugelförmigem Probematerial [MPBM03]. Rechts: Erweiterung des Systems zur Messung anisotroper Materialien [NDM05].

Aufnahmen für das Reflexionsverhalten, zusätzlich 3D-Scans eines Objekts erstellt, womit es als 3D-Modell verfügbar ist. Da das Objekt aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt ist, versucht dieses Verfahren eine Einteilung der Oberfläche in verschiedene Cluster, die wiederum unterschiedliche BRDFs repräsentieren. In Abb. 3.2 ist der Aufbau des Modells und dessen Aufteilung in verschiedenen Clustern zu sehen.

Matsui et al. bauten 2003 ein Messsystem, das nach einer Vorlage von Marschner et al. inspiriert war [MWLT00] [MPBM03]. Es vermisst die Reflexion homogener Probematerialien in Kugelform statt in Flächenform, was ein wesentlicher Unterschied zu anderen Messsystemen darstellt, wie in der linken Abb. 3.3 zu sehen ist. Als Sensor wird eine 10-Bit Firewire Kamera mit einer Auflösung von 1300x1030 Pixeln genutzt. Der Bereich für die jeweiligen Farben Rot, Grün und Blau ist somit nicht beschränkt auf 0 bis 255, sondern befindet sich nun zwischen 0 und 1023. Zudem wird eine computergesteuerte Drehscheibe und eine Xenon-Lampe verwendet, die eine stabile Lichtemission und einen noch gleichmäßiger verteilten Wellenlängenbereich aussenden soll, als Halogen-Lampen. Die Lichtquelle ist das einzige bewegliche Teil dieses Systems. Sie dreht sich während der Messung in $0,5^\circ$ Schritten von entgegengesetzt bis vor die Kamera um die Probematerialkugel herum, die sich als Mittelpunkt zwischen Kamera und Lichtquelle befindet. Die Lichtquelle dreht sich also um einen Halbkreis und bei jeder Messung werden 18 Einzelbilder zu einem High Dynamic Range (HDR)-Bild kombiniert. Das Besondere an diesem Messsystem ist die Tatsache, dass, aufgrund der Kugelform des Probematerials, pro Aufnahme jeder Pixel der Kugel als eine BRDF-Messung behandelt werden kann. In einem Rechenprozess wird für jedes Pixel ein Punkt auf der Kugel definiert und dessen Normale, sowie die Abstände des Punktes zur Lichtquelle und Kamera, berechnet. Daraufhin wird die Bestrahlungsstärke durch die Lichtquelle an diesem Punkt ermittelt. Zuletzt wird durch des Verhältnis der HDR-Strahldichte zur Bestrahlungsstärke der BRDF Wert an jenem Punkt bestimmt.

Ngan, Durand und Matusik erweiterten 2005 das Messsystem, um auch anisotrope Ma-

terialien vermessen zu können [NDM05]. Die Datenbank von Matusik wurde dabei um vier anisotrope Materialien erweitert: Samt, zwei Satin Arten und gebürstetes Aluminium. Für die Messung wird statt einer Kugel ein Zylinder verwendet, auf dem Streifen des anisotropen Materials aufgetragen werden. Insgesamt 20 Streifen werden mit einem *Laser-Cutter* aus dem Material geschnitten, wobei jeweils eine Drehung des Materials von 9° durchgeführt wird, wodurch sich ein Rotationsbereich von 0° bis 180° abdecken lässt. Der Aufbau ist rechts in Abb. 3.3 zu sehen.

Noch zahlreiche andere Ansätze zur Messung des Reflexionsverhaltens von homogenen oder räumlich variierenden Materialien sind bekannt. Dabei wird meistens mit Probematerialien gearbeitet, es ist aber auch die Komplettmessung eines Objektes möglich. Der Einsatz eines Photometers als Messinstrument kann dabei einige Vorteile bringen, wenn der Sensor z. B. eine feinere Einstufung und einen größeren Ausgabenbereich als eine Kamera besitzt, wobei aber auf eine gleichmäßige Verteilung des reflektierten Lichts auf den Sensor zu achten ist.

Die Entwicklung von CCD-Kameras, und deren Einsatz als Messinstrument, ermöglicht verschiedene Wellenlängen in einer Messung aufzunehmen. Die gleichmäßige Verteilung des reflektierten Lichts ist dabei vernachlässigbarer und durch die Weiterentwicklung von Kameras mit höheren Auflösungen und Farbbandbreiten lassen sich noch präzisere Messungen vornehmen. Jedoch benötigen CCD-Kameras eine Kalibrierung, um das Verhältnis von Beleuchtungsstärke zu Leuchtdichte präzise messen zu können.

Wie bereits festgestellt, werden bei Gonioreflektometern meistens nicht alle Winkel vermessen, da es zu Verdeckungen oder Beschattungen kommen kann. Die BRDF-Werte, die nicht mehr gemessen werden können, müssen somit extrapoliert werden. Alle gemessenen Werte können dann bspw. in einer Matrix gespeichert werden, auf die ein Rendering-Tool zurückgreifen kann. Damit ist es für das Tool möglich, die Helligkeitswerte eines mit dem gemessenen Material versehenen Objekts, durch Angabe von Kamera- und Lichtposition, zu ermitteln. Je nach Schrittweite der Winkel von Lichtquelle bzw. Messinstrument bei der Messung, sowie dessen Auflösung, ist die Anzahl an Daten und somit die Matrix recht groß. Durch Interpolationen müssen dabei im Rendering Helligkeitswerte von nicht gemessenen Winkeln berechnet werden. Dies kann zu Fehlern wie Rauschen oder Bildung von Artefakten führen. Die Dichte der Messungen und die Auflösung der Aufnahmen bestimmen also die Datenmengengröße, daher muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Effizienz gefunden werden. Zusätzlich kann eine fehlerhafte Positionierung durch Mechaniken auch dazu führen, dass Messfehler entstehen. All das sind Gründe, warum die gemessenen Daten selten direkt zum Einsatz kommen und stattdessen in Parameterwerte für ein analytisches BRDF-Modell umgewandelt werden.

3.2 Zwei bedeutende BRDF-Modelle

Es wurde bereits gezeigt, dass viele verschiedene BRDF-Modelle entwickelt wurden. Einige davon bauen auf den beiden einfachsten, aber auch effektivsten, Modellen auf: Das Lambert- und das Phong-Modell. Das Lambert-Modell wurde 1760 von Johann Heinrich Lambert in

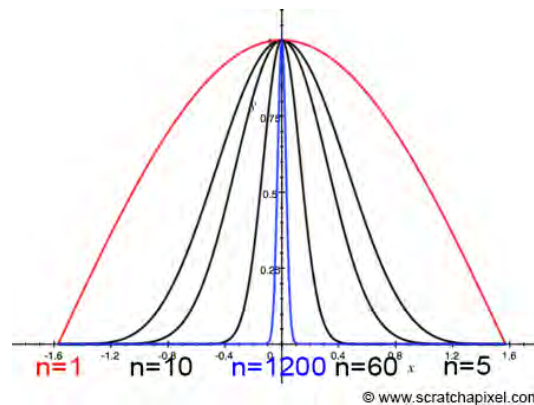


Abbildung 3.4: Die Form von $(\vec{r} \cdot \vec{v})^{n_s}$ für verschiedene n_s Werte [Scr17].

seinem Buch *Photometria* veröffentlicht [Lam60]. Da es ein äußerst einfach zu berechnendes Modell ist, wird es heute noch in vielen Computergrafik-Anwendungen benutzt. Dabei werden nur Oberflächen beschrieben, die das auf sie eintreffende Licht in alle Richtungen gleich stark diffus reflektieren. Die ausgesendete Strahldichte dieser Oberflächen ist unabhängig vom Betrachtungswinkel. Ein Blatt Papier ist z. B. gleich hell, egal aus welcher Richtung es betrachtet wird. Abhängig ist die Strahldichte nur vom Winkel zwischen Flächennormale und einfallendem Lichtstrahl. Eine perfekt diffus reflektierende Oberfläche wird auch Lambert'scher Reflektor genannt. Hierbei wird ein Anteil der Bestrahlungsstärke in gleicher Menge an Licht in alle Richtungen gleichmäßig verstreut. Das Verhältnis von eingehender zu ausgehender Beleuchtung ist somit konstant. Die Konstante c_d beschreibt diesen reflektierenden Anteil und liegt zwischen 0 und 1. Der restliche Anteil wird von der Oberfläche absorbiert und ist daher mit $1 - c_d$ gleichzusetzen. Mit dieser Konstante, auch *diffuse Albedo* oder *diffuser Reflexionskoeffizient* genannt, lässt sich das Lambert-Modell folgendermaßen beschreiben, wobei Lichtquellenvektor \vec{l} und Betrachtungsvektor \vec{v} benötigt werden:

$$f_r(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{c_d}{\pi} \quad (3.1)$$

Da die BRDF über die Hemisphäre verläuft, ist eine Division durch π notwendig, um den Energieerhaltungssatz einzuhalten. Bei einem c_d Wert von 0 hat man eine perfekte schwarze Fläche. Bei einfallendem weißem Licht und einem Wert von 1, hingegen eine perfekt weiß reflektierende Fläche. Viele BRDF-Modelle gebrauchen das Lambert-Modell zur Beschreibung der diffusen Lichtkomponente, da es schnell berechnet werden kann und ausreichend realistisch den diffusen Anteil simuliert.

Das Phong-Modell, das 1975 von Phong Bui Tong vorgestellt wurde, ermöglicht die Darstellung von spekularen Reflexionen bzw. Glanzlichtern [Pho75]. Es ist neben dem Lambert-Modell eines der bekanntesten und auch heute noch oft genutztes BRDF-Modell, da es mathematisch recht einfach und somit nicht besonders rechenintensiv ist. Dabei ist das Modell nicht physikalisch basiert, da der Energieerhaltungssatz nicht eingehalten wird, somit kann z. B. ein Objekt mehr Licht aussenden als es empfangen hat.

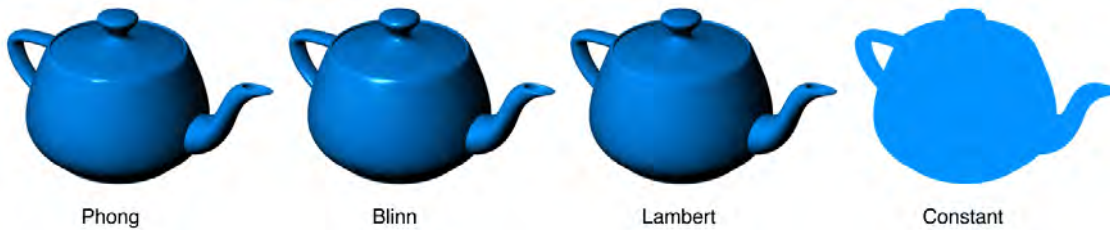


Abbildung 3.5: Ein Vergleich der BRDFs von Lambert, Phong und Blinn [Inc17].

Zwei materialabhängige Konstanten bestimmen das Aussehen der spekularen Reflexionen. c_s ist der Reflexionskoeffizient und kontrolliert den Anteil der spekularen Reflexion, sein Wert liegt zwischen 0 und 1. Zudem gibt es einen Kosinus-Term mit Exponenten n_s , der als eine Normalverteilungsfunktion interpretiert werden kann ([AMHH08], S. 257). Der Term berücksichtigt dabei den Winkel zwischen Reflexionsvektor \vec{r} und Betrachtungsvektor.

Der Exponent n_s formt den Glanzlichtpunkt, wie es sich aus Abb. 3.4 ableiten lässt, und ist auch öfters Bestandteil von komplexeren BRDFs, wie das Ashikhmin-Modell. Für sehr glänzende Oberflächen hat n_s größere Werte, wie z. B. 100. Matte Oberflächen haben niedrigere Werte, die sich um 1 bewegen. Perfekte Reflektoren haben einen unendlichen n_s Wert. Das komplette Modell besteht aus einer linearen Kombination des spekularen Anteils mit dem Lambert-Modell für den diffusen Teil, c_d ist somit der dritte Parameter. Optional kann der Normalisierungsfaktor $\frac{n_s+2}{2\pi}$ an den spekularen Anteil angehängt werden, wodurch das Modell, laut Lewis und später Lafortune, physikalisch plausibler wird [Lew94][LW94]. Der Glanzpunkt nimmt dann auch bei höheren n_s Werten nicht an Energie ab. Um zusätzlich den Energieerhaltungssatz einzuhalten, sollte $c_d + c_s \leq 1$ gelten. Mit der Normalisierung setzt sich das Phong-Modell wie in 3.2 zusammen, wobei man statt des Kosinus-Terms das Skalarprodukt von Reflexions- und Betrachtungsvektor verwenden kann. Beim Ergebnis des Skalarprodukts dürfen aber keine negativen Werte übernommen werden, da das einem Winkel von über 90° zwischen Vektor \vec{r} und \vec{v} und somit einer nicht sichtbaren Reflexion entspricht. In solchen Fällen wird der Wert auf null gesetzt.

$$f_r(\vec{r}, \vec{v}) = \frac{c_d}{\pi} + \frac{n_s + 2}{2\pi} c_s (\vec{r} \cdot \vec{v})^{n_s} \quad (3.2)$$

Blinn modifizierte 1977 das Phong-Modell, wodurch es noch schneller zu berechnen ist und dabei visuell ein wenig ansprechender wird [Bli77]. Es unterscheidet sich von Phong dadurch, dass der Winkel zwischen Flächennormalenvektor \vec{n} und Halfway-Vektor \vec{h} berücksichtigt wird. Der Normalisierungsfaktor muss dabei angepasst werden, außerdem sollte der Exponent n_s im Vergleich zum Phong-Modell viermal so hoch gewählt werden, um ähnliche Ergebnisse zu erhalten. Das Blinn-Modell ist wie in 3.3 aufgebaut und die Unterschiede der drei Modelle ist in Abb. 3.5 zu sehen.

$$f_r(\vec{n}, \vec{h}) = \frac{c_d}{\pi} + \frac{n_s + 8}{8\pi} c_s (\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_s} \quad (3.3)$$

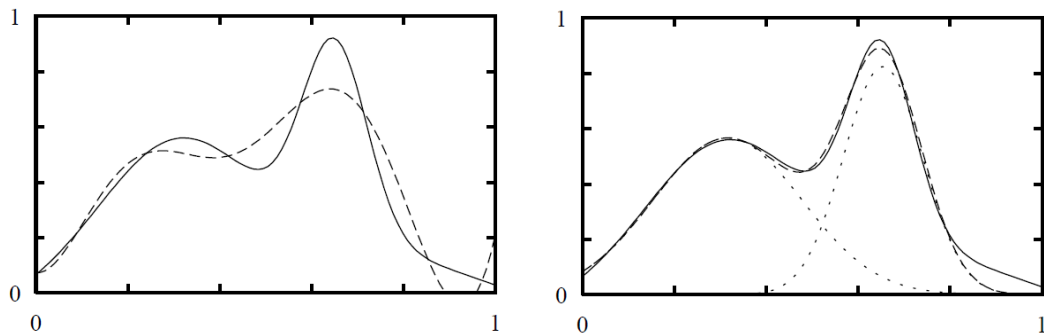


Abbildung 3.6: Links: Nachbildung einer Funktion mittels Fourier-Reihe. Rechts: Nachbildung mittels der Summe (gestrichelte Linie) zweier Gauß-Verteilungen (gepunktete Linie) [LFTG97].

3.3 Parametrisierung von gemessenen BRDFs

Da die unbearbeiteten Ergebnisse einer BRDF-Messung, auf Grund der beschriebenen negativen Eigenschaften, meist nicht direkt nutzbar sind, wurde und wird weiterhin nach Lösungen, die Messdaten in Parameterwerte für analytische Modelle umzuwandeln, gesucht. Einige oder Einzelne die sich mit dem Thema der BRDF-Messung beschäftigten, suchten meist ebenfalls gleichzeitig nach einem Verfahren zum praktischen Einsatz der Daten. Ward stellte z. B. 1992 nicht nur sein eigenes BRDF-Messsystem für anisotrope Materialien vor, sondern gleichzeitig auch ein, für seine Messdaten passendes, analytisches BRDF-Modell [War92]. Dieses Modell sollte mit so wenigen Parametern wie möglich auskommen. Noch mehr erhoffte er sich, dass diese Parameter auch noch einem physikalischen Hintergrund besitzen, ohne dass das Modell dadurch unnötig verkompliziert würde. Das Modell berücksichtigt die Gauß-Verteilung, um die Orientierung der Facetten der Fläche zu beschreiben, wodurch die Form des Glanzpunktes beeinflusst wird. Bei isotropen Flächen werden drei und bei anisotropen vier Parameter benutzt. Die Anpassung der Parameterwerte an die Messdaten wird mittels der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt, das genaue Verfahren wurde jedoch nicht beschrieben.

Lafortune et al. stellten im Bericht *Non-Linear Approximation of Reflectance Functions* von 1997 ein eigenes BRDF-Modell vor, das auch oft generalisiertes *cosine-lobe*-Modell genannt wird, sowie die Vorteile der nichtlinearen Approximation von dessen Parameterwerten [LFTG97]. Im Bericht wird die Approximation einer eindimensionalen Funktion mittels der Summe zweier Gauß-Verteilungen im Vergleich zu den ersten vier Funktionen einer Fourier-Reihe gesetzt, dabei stellt sich heraus, dass erstere die Funktion besser nachbildet (vgl. Abb. 3.6). Um die mittlere quadratische Abweichung der Reflexionsfunktion zu minimieren, wird das LMV genutzt.

Nachdem Dana et al. 1996 ihr Messsystem für BRDFs vorstellten, wurde 1997 eine Arbeit veröffentlicht, die sich mit der Parametrisierung dieser Messdaten beschäftigt. Dabei

kommt das Oren-Nayar-Modell sowie die Koenderink Repräsentation, die auf Zernike Polynome basiert, zum Einsatz [ON94] [KDS96]. Für die Approximation der drei Parameterwerte des Oren-Nayar-Modells wird auch hier das LMV benutzt. Bei diffusen Oberflächen erreicht man mit dem Oren-Naya-Modell gute Annäherungen, da es für diese Aufgabe eher spezialisiert ist. Bei Materialien, die spitze Glanzlichter verursachen, ergeben sich daher mehr Anpassungsfehler.

Yu et al. präsentierten 1999 eine Methode, um die Reflexionseigenschaften aller Oberflächen einer realen Szene anhand von wenigen Fotografien wiederherzustellen [YDMH99]. Dabei kommt das Ward-Modell und eine Gewichtung der Residuumsfunktion zum Einsatz. Dies führt zu einer besseren Minimierung der quadratischen Abweichungen von Mess- und Modelldaten. Detaillierter wird auf den Ablauf der Approximation der Parameterwerte im Appendix 1 eingegangen. Außerdem wird der Umgang mit farbigen Materialien berücksichtigt, wobei hervorgehoben wird, dass der Parameter für die Glanzlichtform unabhängig von den Farbkanälen ist.

Lensch et al. nutzten 2001 für die Repräsentation der Messdaten ihres Verfahrens das Lafortune-Modell [LKG⁺01]. Zur Parametrisierung setzen auch sie das LMV ein. Der Bericht *BRDF approximation and estimation for Augmented Reality* von Kühltreiber et al. listet fünf Arbeiten auf, die sich mit der Approximation von BRDFs mittels unterschiedlicher Methoden beschäftigen [KKT11].

Die für diese Arbeit bedeutendste Publikation stammt aus dem Jahr 2005 von Ngan, Durand und Matusik [NDM05]. Nachdem auch hier zuvor ein Messsystem für BRDFs vorgestellt wurde (vgl. Abb. 3.3 rechts), bildete man im nächsten Schritt mit verschiedenen BRDF-Modellen die Messdaten nach. Das Ziel war es, einen Vergleich zu ziehen, welche Modelle sich für die Approximation der Parameterwerte am besten eignen würden. In der Arbeit werden dabei um die 100 isotrope und vier anisotrope Materialien aus der eigenen Datenbank verwendet und die bestmögliche Annäherung für jedes der gewählten BRDF-Modelle berechnet. Basierend auf den mathematischen Fehlern, Funktion Plots und gerenderten Bildern, erhält man einen Überblick über die Leistungsfähigkeit der Modelle gemessene BRDFs nachzubilden. Außerdem werden die Unterschiede zwischen Modellen, die den Halfway-Vektor und denen die den Reflexionsvektor zur Berechnung des Glanzlichts nutzen, dargestellt. In Abb. 3.7 ist zudem erkennbar, dass durch die Parametrisierung Messfehler, die Rauschen und Artefakte verursachen, nicht mehr vorhanden sind.

Insgesamt werden sieben BRDF-Modelle verglichen: Ward [War92], Blinn-Phong [Bli77], Cook-Torrance [CT82], Lafortune [LFTG97], Ashikhmin-Shirley [AS00], He [HTSG91] und eine von Dür [Dü04] vorgestellte Ward Variation. Die Modelle haben unterschiedliche Fähigkeiten zur realistischen und physikalisch korrekten Darstellung. Daher richtet sich der Fokus auf die numerische Fähigkeit der Modelle, sich den Messdaten anzupassen. Generell können mehrere Glanzlichtkeulen miteinander verknüpft werden, wodurch sich die Keule der Messdaten exakter nachbilden lässt. Dabei steigt jedoch auch die Anzahl der Parameter. Ngan et al. beschränkten die Modelle daher auf eine Keule, außerdem wurde festgelegt, dass der diffuse Anteil durch das Lambert-Modell dargestellt wird und die Glanzlichtform

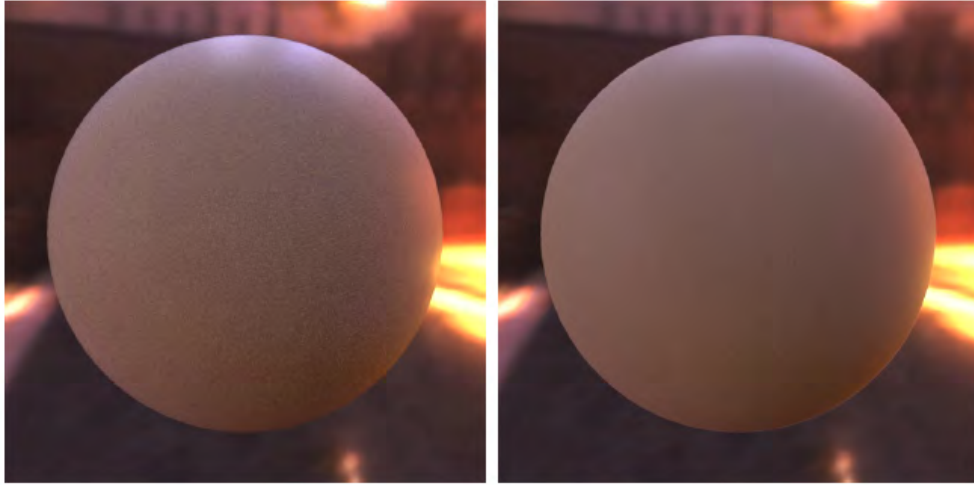


Abbildung 3.7: Links: Gemessene BRDF von *polyethylene* mit Rauschen und Artefakten. Rechts: Durch die Parametrisierung mit dem Ashikhmin-Modell, sind diese Fehler nicht mehr enthalten ([NDM05] Zusatzdokument, S. 139).

sich über die Farbkanäle Rot, Grün und Blau (RGB) hinweg nicht unterscheiden soll. Die BRDF-Modelle haben, neben den Parametern zur Formung des Glanzlichts, zusätzlich sechs Parameter, die die diffuse c_d und spekulare c_s Reflexion für Rot, Grün und Blau beschreiben. Somit gilt für die Modellfunktion M folgendes, wobei *diffus* für den diffusen Anteil des BRDF-Modells steht, *spekular* für den spekularen, und dessen Glanzform abhängig von einem Parametervektor, mit der Anzahl n an Parametern p , ist:

$$M = \begin{pmatrix} c_{dr} \\ c_{dg} \\ c_{db} \end{pmatrix} \textit{diffus} + \begin{pmatrix} c_{sr} \\ c_{sg} \\ c_{sb} \end{pmatrix} \textit{spekular} \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Die Parameterwerte zur Formung des Glanzlichts werden mittels einer nichtlinearen Optimierung angepasst, die auf *Sequential Quadratic Programming* basiert. Die Farben werden analytisch mit einer Unterprozedur ermittelt, die auf einer linearen Methode der kleinsten Quadrate basiert. Es wird visuell überprüft, ob das Verfahren das globale Minimum gefunden hat, ist dies nicht der Fall, werden die Startwerte angepasst. Die Parameter Approximation von Ngan et al. berücksichtigt dabei nicht, ob es sich bei den zu findenden Parametern um physikalisch basierte handelt. Somit kann es passieren, dass Parameterwerte gefunden werden, die zwar die beste Annäherung bilden, jedoch nicht mehr physikalisch konsistent sind.

Die Fehlerfunktion E , die die quadratischen Abweichungen der Messdaten R vom Zielmodell M mit dem Parametervektor p darstellt, ist folgendermaßen aufgebaut:

$$E(p) = \sqrt{\frac{\sum w \cdot [R(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta_i - M(\omega_i, \omega_o; p) \cdot \cos \theta_i]^2}{\sum w}} \quad (3.5)$$

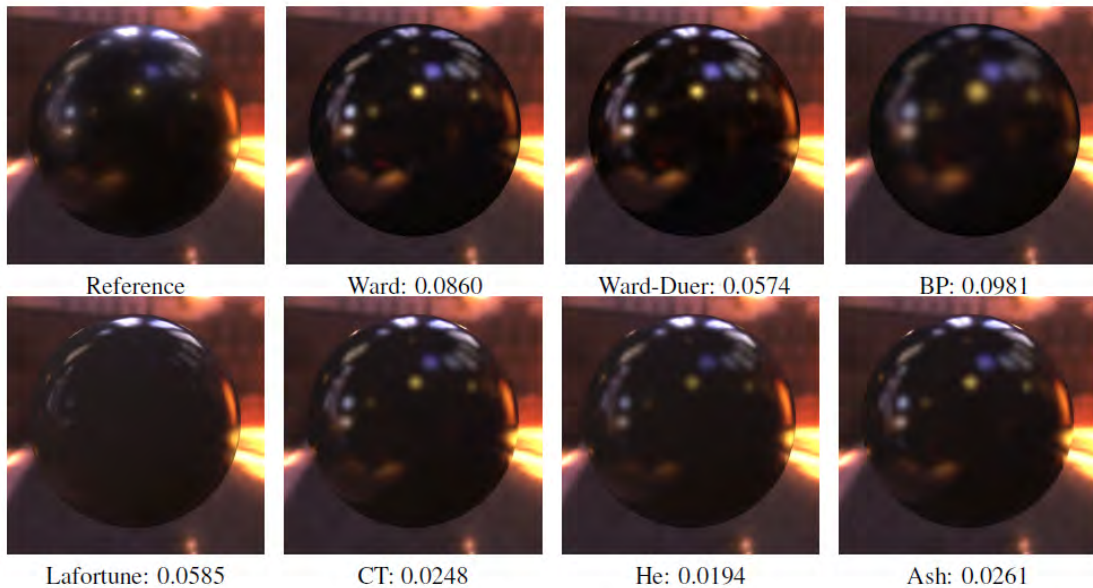


Abbildung 3.8: Das Ergebnis der Parametrisierung verschiedener BRDF-Modelle an Messdaten von *paint-black*. Die Zahlen stellen die Abweichung durch die Fehlerfunktion dar ([NDM05] Zusatzdokument, S. 121).

ω_i und ω_o beschreiben die Raumwinkel der Lichteinfall- und Betrachtungsrichtung, θ_i den Lichteinfallswinkel. Werte über 80° werden nicht berücksichtigt, da diese nicht verlässlich sind, wie in Abschnitt *BRDF Messung* beschrieben. Gewichtet wird die Fehlerfunktion zum einen mit den Raumwinkeln, in denen die Messungen erfolgten und zum anderen mit einem Kosinus-Term, der auf die Rendering-Gleichung zurückzuführen ist. Da diese Funktion auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, wird im Kapitel *Methodik* näher auf die Details der Funktion und Gewichtungen eingegangen.

Als Ergebnis wurde zunächst gezeigt, dass der Einsatz des Halfway-Vektors ein genauere Weg ist, um die spekulare Reflexion nachzugestalten. Die Modelle von He, Cook-Torrance und Ashikhmin-Shirley zeigen die besten Ergebnisse bei einfachen Glanzlichtkeulen, wie in Abb. 3.8 zu sehen ist. Dabei sind dennoch Abweichungen deutlich erkennbar, was darauf schließen lässt, dass die analytischen BRDF-Modelle nicht in der Lage sind, die Messdaten perfekt nachzubilden.

Zusätzlich wird in der Arbeit von Ngan et al. noch das Cook-Torrance und Lafortune Modell mit zwei verknüpften Keulen berechnet. In diesen Fällen konnte der Fehler nochmals um ca. 25% reduziert werden. Wie in Abb. 3.9 zu sehen ist, kommen die Reflexionen dabei auch näher an die Messdaten heran.

In diesem Kapitel wurden bisherige Arbeiten vorgestellt, die sich zunächst mit dem Thema der BRDF-Messung und Datenaufbereitung beschäftigten. Danach wurden die zwei einfachsten und effektivsten analytischen BRDF-Modelle näher betrachtet, um den Aufbau einer BRDF zu erläutern und da einige komplexere BRDF-Modelle sich an diesen orientie-

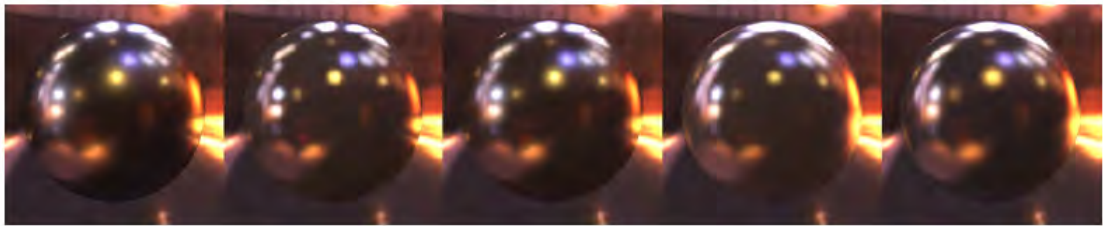


Abbildung 3.9: Die Verbesserungen der Glanzlichter mittels zwei verknüpfter Glanzlichtkeulen. Von links nach rechts: Messdaten, Cook-Torrance mit einer Keule, Cook-Torrance mit zwei Keulen, Lafortune mit einer Keule, Lafortune mit zwei Keulen [NDM05].

ren. Zuletzt wurden Arbeiten aufgeführt, die die Parametrisierung gemessener BRDFs zum Thema hatten. Dabei stellte sich die Publikation von Ngan et al. als aufschlussreichste heraus und hat somit den meisten Einfluss auf diese Arbeit.

Das LMV ist bei einigen der aufgeführten Arbeiten eingesetzt worden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob es speziell für die zur Verfügung stehenden, aufbereiteten Messdaten, in Verbindung mit dem Ashikhmin-Modell, zufriedenstellende Parameterwerte approximiert.

Das nächste Kapitel *Methodik* betrachtet Probleme, die bei der Messung und Parametrisierung von BRDFs auftreten können. Die Umwandlung der gemessenen BRDFs in ein analytisches Modell mittels LMV wird behandelt und gezeigt welche Ergebnisse dabei erlangt werden können. Zuletzt wird die Umsetzung des Prototyps näher erläutert.

Kapitel 4

Methodik

Die im *Stand der Technik* Kapitel vorgestellten Arbeiten zeigten unterschiedliche Messsysteme zur Ermittlung der BRDF von Materialien. Außerdem wurde das Lambert- und Phong-Modell näher erläutert. Beide hatten auf die Entwicklung vieler anderer analytische BRDFs einen Einfluss. Arbeiten, die sich mit der Parametrisierung gemessener BRDFs beschäftigten, wurden vorgestellt, wobei die Forschungen von Ngan et al. herausragten.

Das *Methodik* Kapitel ist in drei Teile gegliedert. Im Abschnitt *Problemanalyse und Vorbereitung* wird die Problematik der Parametrisierung untersucht und es werden Vorbereitungen für die Umsetzung getroffen. Es wird zuerst das Messsystem, mit dem die zur Verfügung stehenden BRDF Dateien entstanden sind, näher betrachtet. Danach werden die aus der Messung resultierenden Probleme aufgeführt, wobei die möglichen Vorteile einer Parametrisierung nochmals erläutert und klar werden. Der Ablauf des GNVs und LMVs wird dann im Bezug zur Parametrisierung von gemessenen BRDFs genauer erklärt, sowie die damit eventuell verbundenen Schwierigkeiten. Als nächstes wird das analytische BRDF-Modell von Ashikhmin vorgestellt, mit dem die Messdaten nachgebildet werden sollen. Das Ende des Abschnitts enthält eine Übersicht der Möglichkeiten zur Ergebnisanalyse.

Der Abschnitt *Umsetzung* behandelt, wie und womit die Parametrisierung umgesetzt wird. Dazu gilt es zunächst die Messdaten zu interpretieren und das Ashikhmin-Modell sowohl an diese Daten, als auch an den im Rendering benutzten Shader, anzupassen und zu implementieren. Die Residuumsfunktion, die entscheidend für ein Optimierungsverfahren ist, wird aufgestellt. Dabei werden mögliche Gewichtungen erörtert. Mit der gewichteten Residuumsfunktion wird daraufhin der detaillierte, finale Ablauf des LMVs durchgegangen. Als nächstes stehen die Möglichkeiten der optischen Darstellung von Modell- und Messdaten, sowie der Vergleich beider, im Fokus.

Zuletzt wird die Umsetzung des Prototyps und dessen Programmablauf präsentiert.

4.1 Problemanalyse und Vorbereitung

In diesem Abschnitt wird auf die Problemstellung der Arbeit näher eingegangen. Dabei wird das Messsystem vorgestellt, sowie die Probleme bei Messungen betrachtet. Die Vorteile, die eine Parametrisierung mit sich bringen kann, werden dabei klarer formuliert. Das GNV und

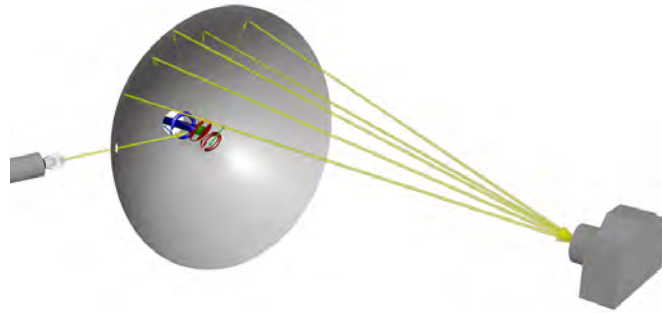


Abbildung 4.1: Aufbau des Messsystems für die zur Verfügung gestellten BRDF-Messdaten [TK08].

dessen Erweiterung zum LMV werden detaillierter im Bezug auf BRDFs betrachtet. Danach stehen das verwendete analytische BRDF-Modell Ashikhmin im Fokus. Zuletzt stellt sich die Frage nach der Ergebnisanalyse, also wie eine erfolgreiche Parametrisierung ermittelt werden kann.

4.1.1 Messdatenquelle

Die Messdaten für die Parametrisierung wurden von der kooperierenden Firma zur Verfügung gestellt. Dabei wurden mit einem selbst entwickelten Messgerät unterschiedliche Materialien, darunter auch Autolacke, vermessen. Das Messsystem ist in Abb. 4.1 zu sehen. Der Aufbau zeigt, dass ein elipsoidförmiger Spiegel das Probematerial umfasst, wobei eine stationäre Lampe das Material durch eine Öffnung beleuchtet. Die Kamera ist ebenfalls stationär und nimmt die Reflexionen des Materials von dem Spiegel auf. Die Vorrichtung, die das Material festhält, ist somit die einzige bewegliche Komponente. Durch diesen Aufbau können trotzdem alle benötigten Freiheitsgrade einer BRDF erfüllt werden. So werden die verschiedenen Lichteinfallswinkel durch Rotationen des Materials erwirkt. Die unterschiedlichen Betrachtungswinkel lassen sich dann aus der Aufnahme der Spiegel-Reflexionen berechnen. Ähnlich wie beim Aufbau von Ward, hängt die Messung eines Materials zum Teil von der Qualität des Spiegels ab. Bei großen Lichteinfalls- oder Betrachtungswinkeln, die über ca. 75° liegen, werden die Messdaten ebenfalls hier unzuverlässiger und daher verworfen. Durch eine Analyse der Messdaten bei kleineren Winkeln, können die verworfenen Daten jedoch extrapoliert werden. Eine Interpolation ist zudem nötig, z. B. für Messdaten, bei denen es zu Verdeckungen durch das Probematerial kam oder wegen fehlenden Reflexionen an den Öffnungen für Lichtquelle und Materialhalterung. Die in dieser Arbeit verwendeten gemessenen BRDFs wurden bereits aufbereitet, wozu auch die genannte Extrapolation und Interpolation gehört. Bei Autolacken gilt es aber zusätzlich zu beachten, dass eine Klarlackschicht über dem Material liegt, deren Fresnel-Effekt einen Einfluss auf die gesamte Reflexionseigenschaft hat. Dieser Effekt wurde von den Messdaten abgezogen, so dass sich am Ende eine gemessene BRDF Datei aus den aufbereiteten Messdaten, mit abgezogener Fresnel-Reflexion der Klarlackschicht, sowie dem berechneten Reflexionskoeffizienten dieser Schicht zusammen-

setzt. Diese Vorgehensweise bietet beim Rendering Vorteile und zusätzlich ist die Stärke der Klarlackschicht somit flexibel einstellbar. Bei Materialien ohne diese Schicht gibt es keinen Abzug und somit keinen zu beachtenden Reflexionskoeffizienten.

4.1.2 Vorteile der Parametrisierung

Die Dateigröße einer gemessenen BRDF variiert je nach Auflösung der Messdaten. Bei den zur Verfügung gestellten Dateien liegt diese zwischen 1 und 5 Megabyte. Bei nicht aufbereiteten Daten und höheren Auflösungen kann eine Datei aber schon um die 100 Megabyte, wie bei den BRDFs der *MERL BRDF Database*, oder weitaus darüber, groß sein. Die Größe der hier verwendeten gemessenen BRDFs scheint somit erst einmal recht akzeptabel, kann aber bei Erhöhungen der Auflösung oder einer größeren Erweiterung der Materialbibliothek schnell anwachsen. Die Dateigrößen analytischer BRDFs sind hingegen extrem gering, da im Grunde genommen nur einige Zahlenwerte für die Parameter abgespeichert werden müssen. Ein Vorteil besteht dabei ebenfalls beim Rendering, da die Speicherbelastung gesenkt werden kann.

Auch kommt es bei den Messungen meistens zu kleineren Fehlern, die durch eine Parametrisierung verbessert werden können. Entstehen bspw. bei einer Messung Artefakte bei einzelnen Aufnahmen oder unterlag die Lichtquelle während der Messung einigen Schwankungen, dann würden diese Fehler bei analytischen BRDFs nicht mehr vorhanden sein. Ebenso sind die notwendigen Interpolationen und Extrapolationen für die aufbereiteten Messdaten, die eine zusätzliche Fehlerquelle darstellen können, bei analytischen BRDFs fehlerfrei.

Der bedeutendste Punkt für die Umwandlung der gemessenen BRDFs in analytische liegt aber sicherlich in der Möglichkeit, das Erscheinungsbild der BRDF im Nachhinein verändern zu können. Anwender und evtl. auch Kunden würden durch einfache Parameterveränderungen die Reflexionseigenschaften eines Materials an eigene Wünsche anpassen können. Das ist mit gemessenen BRDFs in dieser Form nicht möglich. Jedoch sollte das für die jeweilige Aufgabe passende analytische BRDF-Modell gewählt werden, damit die Nachbildung den Messdaten gerecht werden kann. Komplexere analytische BRDF-Modelle mit mehreren Glanzlichtkeulen können sicherlich alle möglichen Materialien und deren Messdaten nahezu perfekt nachbilden, allerdings zum Preis einer großen Anzahl an verstellbaren Parametern. Wünscht man nun an so einem Modell eine spezielle Veränderung durchzuführen, so ist es kaum noch möglich den dafür passenden Parameter zu finden.

Für den in dieser Arbeit angestrebten Anwendungsbereich gilt es somit, das Ashikhmin-Modell mit nur einer Glanzlichtkeule und so wenigen Parametern wie möglich zu integrieren, um die gemessenen BRDFs nachzubilden.

4.1.3 Approximation von Parameterwerten

Im *Stand der Technik* Kapitel ist zu sehen, dass das LMV schon öfters mit Erfolg zur Parametrisierung von gemessenen BRDFs eingesetzt wurde. Doch es ist unklar, wie es sich unter Verwendung der vorhandenen Messdaten und des Ashikhmin-Modells verhält.

Die Hauptaufgabe ist somit zu überprüfen, ob das LMV erfolgreich und zuverlässig Parameterwerte für das Ashikhmin-Modell approximiert und ob damit die gemessenen BRDFs

zufriedenstellend nachgebildet werden können. Wobei zu beachten ist, dass das LMV auch nur soweit fähig ist passende Werte zu finden, wie das analytische BRDF-Modell in der Lage ist die vorhandenen Messdaten damit nachzubilden.

Im *Grundlagen* Kapitel wurden das GNV und LMV bereits allgemeiner vorgestellt, hier wird nun zunächst der detailliertere Ablauf des GNV mit Bezug zu analytischen BRDFs betrachtet, wobei auf mögliche Probleme und Fehlerquellen eingegangen wird. Danach steht die Erweiterung zum LMV im Fokus. Zu einem großen Teil dient dabei das Buch *Effektive Messauswertung mit der Gauß'schen Fehlerquadratmethode* von R. Pfeifer als Referenz [Pfe01].

Die bisherige Vorgabe war, dass eine Anzahl k an Messungen durchgeführt wurden, was den einzelnen Aufnahmen einer BRDF-Messung gleichkommt. Dabei ist an jedem k ein Helligkeitswert aus einem festgelegtem Lichtwellenbereich gemessen worden, was dem Ergebnis y entspricht. Dieses Ergebnis wird durch n Stellgrößen x_1, \dots, x_n bestimmt, die dabei den Freiheitsgraden einer isotropen BRDF gleichkommen, also den drei Winkeln für die Lichteinfall- und Betrachtungsrichtung, sowie dem zu berücksichtigenden Lichtwellenbereich. Womit das analytische BRDF-Modell der Modellfunktion $f(x_1, \dots, x_n)$ entspricht. Deren Anzahl p an Parametern a_1, \dots, a_p ist so zu berechnen, dass die Funktionswerte so nah wie möglich an den Messwerten liegen.

Die Abweichungen werden mit der Summe der Fehlerquadrate (vgl. 2.35) ermittelt. Dabei gibt uns die Fehlerzahl e die Standardabweichung von der Summe an und diese zu minimieren ergibt das Optimierungsproblem. Generell gilt für e folgendes:

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^k (f(x_{i,1}, \dots, x_{i,n}) - y_i)^2} \quad (4.1)$$

Essentiell für die Ermittlung der Fehlerzahl, sowie generell für das GNV, ist die Residuumsfunktion r . Diese kann an das Optimierungsproblem angepasst werden, so ist bspw. zu überlegen, ob alle Abweichungen gleich zu bewerten sind oder manche eher schwerwiegender zu gewichten sind. Die Residuumsfunktion an das Problem richtig anzupassen ist ein kritischer Schritt, der zu Problemen mit dem Verfahren führen kann. Vereinfacht lässt sie sich zunächst folgendermaßen darstellen:

$$r = f(x_1, \dots, x_n) - y \quad (4.2)$$

Mit den jeweiligen Ergebnissen der Funktion pro Messwert wird der Residuenvektor \mathbf{r} gefüllt:

$$\mathbf{r} = f(x_{i,1}, \dots, x_{i,n}) - y_i \quad i = 1 \dots k \quad (4.3)$$

Der Residuenvektor enthält somit die jeweilige Abweichung von Modellfunktion und Messwert pro Messung, wobei in beiden Fällen die Stellwerte, also Winkelposition und Lichtwellenbereich, gleich sind. Danach wird die Residuumsfunktion r nach den Parametern a_1, \dots, a_p abgeleitet. Dies erfordert die Berechnung der ersten partiellen Ableitungen:

$$r'_1 = \frac{\partial r}{\partial a_1}, r'_2 = \frac{\partial r}{\partial a_2}, \dots, r'_p = \frac{\partial r}{\partial a_p} \quad (4.4)$$

Alle vorgegebenen Stellwerte müssen dabei berücksichtigt werden, wodurch für die partiellen Ableitungen gilt:

$$r'_{i,j} = \frac{\partial r}{\partial a_j} x_{i,1}, \dots, x_{i,n} \quad (4.5)$$

Für die Iterationen werden neben dem Residuenvektor \mathbf{r} noch der Parametervektor \mathbf{a} , in dem alle Parameter enthalten sind, und eine Jacobi-Matrix \mathbf{D} benötigt. \mathbf{D} beinhaltet dabei alle ersten partiellen Ableitungen der Residuumsfunktion nach den Parametern, bei Berücksichtigung aller vorgegebenen Stellwerte.

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} r'_{1,1} & r'_{1,2} & \dots & r'_{1,p} \\ r'_{2,1} & r'_{2,2} & \dots & r'_{2,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{k,1} & r'_{k,2} & \dots & r'_{k,p} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_k \end{pmatrix}; \quad \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Für den Aufbau der Matrix und beider Vektoren gilt zu beachten:

- \mathbf{D} und \mathbf{r} haben k Zeilen.
- \mathbf{a} hat p Zeilen, je eine für jeden Parameter.
- Die Anzahl der Spalten von \mathbf{D} entspricht der Anzahl an Parametern von \mathbf{a} . Wobei die Reihenfolge der Spalten mit der der Parameter in \mathbf{a} zusammenhängt.
- Die Anzahl der Stellwerte n hat keinen Einfluss auf den Aufbau von \mathbf{D} , \mathbf{r} oder \mathbf{a} .
- Für jeden Parameter muss zu Beginn der Iteration ein möglichst passender Startwert festgelegt werden.
- Es kann eine Fehlerschranke c bestimmt werden, bei deren Überschreitung das Verfahren stoppt. Ansonsten muss die Anzahl an Iterationen, die das Verfahren durchgehen soll, vorgegeben werden.

Die Matrixgleichung, mit der die Iteration durchgeführt werden, lautet:

$$\mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{a}_i - (\mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D})^{-1} \cdot \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{r} \quad (4.7)$$

In jedem Iterationsschritt versucht das Verfahren den Parametervektor \mathbf{a}_i so zu verbessern, dass die Abweichungen geringer werden. Dazu werden mit dem analytischen BRDF-Modell, das die neuen Parameterwerte verwendet, aktualisierte Modellwerte ermittelt. Danach werden wieder die Abweichungen berechnet. Ist es tatsächlich zu einer Verbesserung gekommen, so wird der Parametervektor mit den verbesserten Parameterwerten gefüllt und Residuenvektor sowie Jacobi-Matrix aktualisiert. Darauf startet der nächste Iterationsschritt. Das ganze wiederholt sich, bis alle vorgegebenen Iterationen durchgeführt sind oder die Fehlerschranke erreicht ist. Da $\mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D}$ symmetrisch und positiv definit ist, kann die Cholesky-Zerlegung zur Auflösung des Gleichungssystems genutzt werden [Wik17a].

Das GNV kann um eine Regularisierungstechnik erweitert werden, wodurch es in das LMV umgewandelt wird. Ein hinzugefügter Dämpfungsfaktor λ steuert dabei die Konvergenz. Bei ermittelten Parameterwerten, die zu einer Verschlechterung führen, würde das LMV zum Gradientenverfahren übergehen, indem λ erhöht wird. Dabei konvergiert das Verfahren linear. Bei einer Verbesserung wird λ verringert und das Verfahren geht in das GNV über, das quadratisch konvergiert. Dabei müssen Maximal- und Minimalwerte, sowie ein Startwert für λ bestimmt werden. Mit der Einführung des Dämpfungsfaktors ändert sich die Matrixgleichung für die Iterationen. Dabei werden die diagonalen Elemente von $\mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D}$ zunächst mit λ multipliziert und das Ergebnis auf die selben Element aufaddiert, wie es in 4.8 zu sehen ist. Wird als Startwert $\lambda = 0$ gesetzt, so erhält man wieder das echte GNV.

$$\mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{a}_i - (\mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D} + \lambda \cdot \text{diag}(\mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D}))^{-1} \cdot \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{r} \quad (4.8)$$

Bei der Approximation von Parameterwerten mittels GNV bzw. LMV können einige Probleme auftreten. Ob das Verfahren z. B. konvergiert, kann abhängig von der Wahl der Startwerte sein. Es ist zudem möglich, dass das Verfahren gar nicht konvergieren kann, die Gründe dafür sollten dann überprüft werden. Das LMV ist in dieser Hinsicht robuster als das echte GNV. Auch ob das Verfahren zu einem lokalem oder globalem Minimum konvergiert, sollte überprüft werden. Mit der Fehlerzahl e alleine lässt sich dies meist nicht eindeutig bestimmen, weswegen bei BRDFs eine optische Überprüfung, wie sie auch Ngan et al. durchführen [NDM05], hilfreich sein kann. Ein weiteres Problem könnte entstehen, wenn die Modellfunktion Parameter enthält, die sich gegenseitig negativ beeinflussen. Dabei kann es dazu kommen, dass zwei Parameter mit jeweils unterschiedlichen Werten zu gleichen Ergebnissen führen, das Verfahren kann dann evtl. keine richtige Lösung finden. Manche Funktionen enthalten Parameter, die durch Veränderungen ein Ergebnis extrem sprunghaft verändern. Ungünstige Exponentialfunktionen könnten solche enthalten und ein Beispiel dafür sein, wie das LMV Probleme bei der Approximation passender Parameterwerte bekommen könnte. Zu beachten ist ebenfalls der Wertebereich von verwendeten Variablen, da mitunter durch genannte Exponentialfunktionen oder Divisionen äußerst kleine Zahlen entstehen können.

4.1.4 Wahl des BRDF-Modell

Zunächst wird das Phong BRDF-Modell integriert, um eine Machbarkeitsstudie der Approximation durchzuführen. Da es eines der mathematisch einfacheren Modelle ist, gibt es lediglich drei Parameter, die Einfluss auf das Erscheinungsbild haben (vgl. 3.2). Durch die geringe Anzahl an Parametern und dem einfachen Aufbau der Funktion, lassen sich relativ schnell die für das LMV notwendigen partiellen Ableitungen ermitteln. Außerdem ist die Berechnung der BRDF-Werte schneller als im Vergleich zu aufwendigeren BRDF-Modellen. Bei dem, für die Approximation der Parameterwerte von Phong, erstellten Grundgerüst lässt sich dann relativ problemlos das BRDF-Modell austauschen.

Jedes analytische BRDF-Modell kann, für die Integration eines Fresnel-Effekts, erweitert werden. Benötigt wird dafür der Lichteinfallswinkel θ_i und der Brechungsindex n des Materials. Für die Berechnung ohne Schlick-Annäherung, wird zunächst der gebrochene Winkel

θ_t des einfallenden Lichtstrahls, der in das Material eindringt, berechnet:

$$\theta_t = \arcsin \left(\sin \frac{\theta_i}{n} \right) \quad (4.9)$$

Der Fresnel-Wert R lässt sich dann mittels der Gleichungen 2.4 ermitteln. Die Reflexion des einfallenden Lichts durch den Fresnel-Effekt führt bei großen Lichteinfallswinkeln dazu, dass die eigentliche Materialreflexion schwächer wird. Der Anteil des Lichts, der eindringt und vom eigentlichen Material reflektiert wird, lässt sich durch den angesetzten Faktor $(1 - R)$ ermitteln. Das Phong-Modell, mit implementierter Berücksichtigung des Fresnel-Effekts, lässt sich bspw. folgendermaßen definieren:

$$f_r(\vec{r}, \vec{v}) = \frac{c_d}{\pi} + \frac{n_s + 2}{2\pi} c_s (\vec{r} \cdot \vec{v})^{n_s} (1 - R) \quad (4.10)$$

Da bei einem Lichteinfallswinkel von 90° der Fresnel-Wert bei 1 liegt, ist eine Reflexion durch das Material nicht gegeben, was zu Problemen bei der Approximation führen kann und beachtet werden sollte. Umgekehrt lässt sich der Fresnel-Anteil auch wieder eliminieren, indem die Daten durch $(1 - R)$ geteilt werden. Diese Elimination ist ebenfalls bei vorhandenen Messwerten durchführbar, was evtl. für die Approximation von Parameterwerten nützlich sein kann, da dadurch der Fresnel-Term nicht beachtet werden muss.

In Abb. 3.8 ist zu sehen, dass das Phong- und Blinn-Modell auch bei Ngan et al. zur Approximation von gemessene BRDFs benutzt wird. Beide Modelle schneiden dabei, im Vergleich zu komplexeren Modellen, nicht besonders gut ab. Das Ashikhmin-Shirely-Modell, was einfachheitshalber auch nur Ashikhmin-Modell genannt wird, liefert hingegen Ergebnisse, die relativ nahe bei den Messdaten liegen. Da dies ebenfalls das Modell ist, mit dessen Shader in der kooperierenden Firma Renderings durchgeführt werden können, wird dieses komplexere Modell integriert, nachdem das Verfahren sich mit dem Phong-Modell funktionsfähig zeigt. Das Ashikhmin-Modell ist tatsächlich eine Variation vom Phong-Modell, das sich zusätzlich für anisotrope Materialien eignet. Es wurde 2000 von M. Ashikhmin und P. Shirley vorgestellt [AS00]. Das Ziel war ein anwendungsfreundliches Modell mit intuitiven Parametern, dabei es inspiriert durch die Modelle von Ward [War92], Schlick [Sch94] und Neumann [NNSK99]. Das Modell strebt einige gewünschte Eigenschaften an, die die genannten Modelle bisher nicht in allen Punkten vereinten:

- Die Einhaltung des Energieerhaltungssatzes sowie der Helmholtz-Reziprozität.
- Anisotropische Reflexionen werden berücksichtigt.
- Das Modell wird durch intuitive Parameter kontrolliert.
- Der Fresnel-Effekt wird berücksichtigt, wodurch die spekular Reflexion bei großen Lichteinfallswinkel zunimmt.
- Der diffuse Anteil ist inkonstant, wodurch dessen Reflexion bei großen Lichteinfallswinkel abnimmt (vgl. Abb. 4.2).

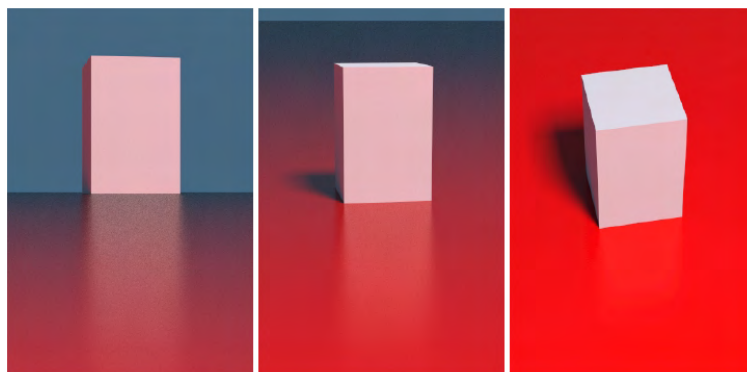


Abbildung 4.2: Das Ashikhmin-Modell berücksichtigt den Fresnel-Effekt. Daher erhöht sich die spiegelnde Eigenschaft der Fläche, bei größeren Betrachtungswinkeln. Die diffuse rote Farbe nimmt dabei ab [AS00].

- Es ist gut geeignet für Renderings nach der Monte-Carlo Methode.

Auch dieses Modell setzt sich aus einem diffusen und spekularen Anteil zusammen. Bei Metallen ist der diffuse Anteil auf null zu setzen. Polierte Oberflächen, wie z. B. Plastik, kombinieren einen diffusen und spekularen Anteil, also ist keiner der beiden null. Bei rein diffusen Materialien kann für den diffusen Anteil das Lambert-Modell eingesetzt werden. Das Modell wird durch vier Parameter kontrolliert. R_s ist eine Farbe aus dem RGB-Farbraum und bestimmt die Stärke der spekularen Reflexion bei senkrechtem Lichteinfall. R_d ist ebenfalls eine Farbe und bestimmt die Stärke der diffusen Reflexion des Substrates unter der Glanzschicht. n_u und n_v sind Exponenten, die die Form des Glanzpunktes beeinflussen, somit ähneln sie dem Exponenten vom Phong-Modell. Unterschiedliche Werte für n_u und n_v sorgen dabei für den anisotropischen Reflexions-Effekt, bei gleichen Werten scheint das Material wiederum isotrop, wie in Abb. 4.3 zu erkennen ist. Wie bereits erwähnt, kann der diffuse Anteil mit dem Lambert-Modell berechnet werden, dabei gibt es aber Einschränkungen. So verschwindet in Realität die diffuse Farbe, je größer der Winkel zwischen Betrachtungs- und Flächennormalenvektor wird, was mit dem Lambert-Modell nicht nachgebildet werden kann. Somit müsste der diffuse Anteil auch zu null hin verlaufen, je größer genannter Winkel wird, wenn ein Fresnel-Effekt berücksichtigt wird und die Energieerhaltung bestehen soll. Der diffuse Anteil vom Ashikhmin-Modell, der einen Fresnel-Effekt berücksichtigt, lautet folgendermaßen, wobei die eingeführten Konstanten $\frac{28}{23}$ für die Energieerhaltung bestimmt wurden und \vec{n} den Flächennormalenvektor darstellt, zusätzlich wird der Vektor zur Lichtquelle \vec{l} und zum Betrachter \vec{v} benötigt:

$$f_{rd}(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{28R_d}{23\pi} (1 - R_s) \left(1 - \left(1 - \frac{(\vec{n} \cdot \vec{l})^2}{2} \right)^5 \right) \left(1 - \left(1 - \frac{(\vec{n} \cdot \vec{v})^2}{2} \right)^5 \right) \quad (4.11)$$

Beim spekularen Anteil wird zur Berechnung des Fresnel-Effekts die Annäherung von Schlick verwendet, die wie in 2.5 aufgebaut ist. R_s entspricht dabei R_0 und für den Kosinus von θ

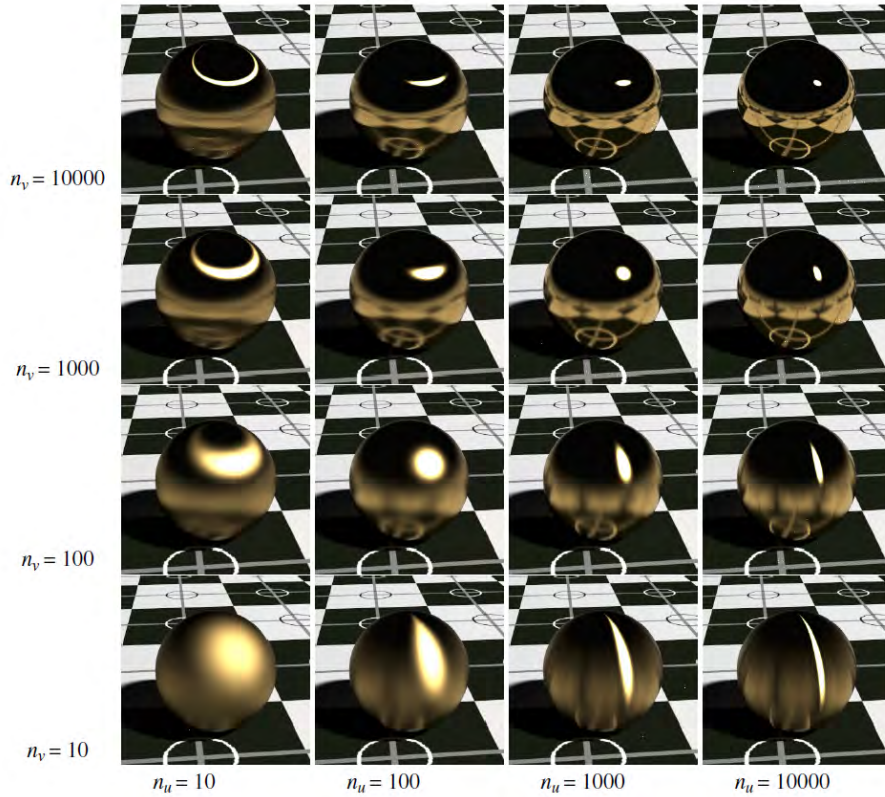


Abbildung 4.3: Der Einfluss der Exponenten n_u und n_v auf die Reflexionseigenschaften einer Kugel [AS00].

kann das Skalarprodukt vom Halfway-Vektor \vec{h} und Lichteinfall- oder Betrachtungsvektor benutzt werden. In allen Fällen, bei denen zwischen diesen beiden Vektoren gewählt werden kann, wird im weiteren Verlauf vom Betrachtungsvektor ausgegangen. Der Fresnel-Anteil im Ashikhmin-Modell lautet somit folgendermaßen:

$$F((\vec{h} \cdot \vec{v})) = R_s + (1 - R_s) \cdot (1 - (\vec{h} \cdot \vec{v}))^5 \quad (4.12)$$

Der komplette spekulare Anteil vom Ashikhmin-Modell, zusammen mit dem Fresnel-Term, wird wie folgt definiert, wobei ϕ den Azimutwinkel von \vec{v} darstellt:

$$f_{rs}(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{\sqrt{(n_u + 1)(n_v + 1)}}{8\pi} \frac{(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_u \cos^2 \phi + n_v \sin^2 \phi}}{(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))} F((\vec{h} \cdot \vec{v})) \quad (4.13)$$

Der Parameter R_s ist im Fresnel-Term enthalten und gewichtet die spekulare Reflexionsstärke. Der diffuse Anteil wird daher neben R_d zusätzlich mit $(1 - R_s)$ gewichtet, um den Energieerhaltungssatz einhalten zu können. Die Faktoren Rechts von $(1 - R_s)$ in 4.11 sind für den diffusen Fresnel-Effekt verantwortlich.

In dieser Arbeit werden anisotrope Materialien nicht beachtet. Das auf isotrope Materialien beschränkte Ashikhmin-Modell lässt sich vereinfachen, indem n_u und n_v gleichgesetzt

werden, somit gibt es nur ein n_s . Die Glanzlichtformung ähnelt somit der im Blinn-Modell:

$$f_{rs}(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{(n_s + 1)}{8\pi} \frac{(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_s}}{(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))} F((\vec{h} \cdot \vec{v})) \quad (4.14)$$

Es ist ersichtlich, dass, bei einem Weglassen des Fresnel-Terms im Ashikhmin-Modell, ebenfalls R_s wegfallen würde, was zusätzlich Auswirkungen auf den diffusen Anteil hätte. Es muss aber, unter Berücksichtigung des im Rendering verwendeten Shaders, ein Koeffizient vorhanden sein, der den Grad der spekularen Reflexion bestimmt, weswegen die BRDF in solchen Fällen angepasst werden muss. Auch gibt es hier wieder den Anfangs erwähnten Exponenten als Parameter, der bei hohen Werten eventuell zu Problemen führen kann. Bei Ngan et al. lieferte das Ashikhmin-Modell relativ gute Ergebnisse, im Vergleich zum Phong-Modell, es ist aber zu überprüfen, ob es sich ausreichend für die vorhandenen Messdaten eignet.

4.1.5 Vorgehensweise der Ergebnisanalyse

Es stellt sich nun die Frage, wie sich bei erfolgreicher Approximation der Parameterwerte herausstellen lässt, inwieweit die gemessene BRDF damit nachgebildet wird. Die Fehlerzahl e , die die Standardabweichung von der Summe der Fehlerquadrate darstellt, ist ein Wert, der die Güte der Approximation widerspiegeln kann. Sie ist jedoch abhängig von einer gut gewählten Residuumsfunktion, bei der auch immer der Anwendungsfall eine erhebliche Rolle spielt.

Generell besteht bei BRDFs ein subjektiver Eindruck der Qualität. So können approximierte Parameterwerte mit niedriger Fehlerzahl, im Rendering optisch schlechter bei jemandem abschneiden, als die Werte mit etwas höherer Fehlerzahl. Bewegt sich diese Zahl jedoch Richtung null, so kann von einer exakten Übereinstimmung ausgegangen werden. Da die Fehlerzahlen meist nicht so niedrig ausfallen, ist eine optische Überprüfung der Werte von Vorteil, wobei bevorzugt auf ein zu langwieriges Rendering verzichtet werden sollte. Für die optische Vorschau ist zu beachten, wie die Messdaten abgespeichert wurden. Die für diese Arbeit vorhandenen Daten sind Helligkeitswerte für jeden einzelnen RGB-Kanal, sowie für die jeweiligen Bestrahlungs- und Betrachtungswinkel. Sie lassen sich somit wie eine Textur darstellen. Werden nun mit dem analytischen BRDF-Modell und denselben Winkeln die Helligkeitswerte nachgestellt, so können diese Werte ebenfalls als eine Textur verwendet werden, um die ermittelten Daten mit den gemessenen optisch zu vergleichen. Zur Abschätzung der Qualität der Startwertwahl, ist eine optische Überprüfung zusätzlich sinnvoll, wie es ebenfalls bei Ngan et al. zum Einsatz kommt.

Zur Überprüfung des LMV werden in dieser Arbeit synthetische BRDFs mit dem jeweilig benutzten analytischen BRDF-Modell erstellt. Das Verfahren sollte damit immer die Parameterwerte finden, die zu einer Gesamtabweichung von null führen. Ist dies der Fall, kann davon ausgegangen werden, dass das Verfahren mit dem gewählten BRDF-Modell funktioniert. Zum Ende hin steht aber der Vergleich der Messdaten mit dem Ashikhmin-Modell mittels gerenderter Bilder im Vordergrund. Dabei wird sich zeigen, ob das analytische Modell mit den approximierten Parameterwerten der Qualität der Messdaten genügt.

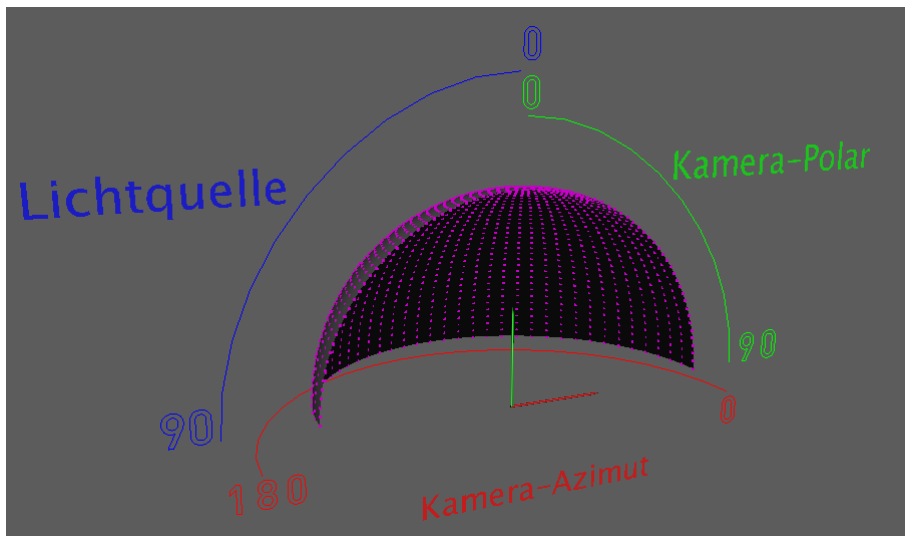


Abbildung 4.4: Verlauf und Ausrichtung der für die Messung relevanten Winkel. Im Zentrum wäre das Probematerial zu platzieren. Der rote Pfeil gibt die positive Richtung der x -Achse an, der grüne die der z -Achse und kommt zudem der Ausrichtung der Flächennormalen des Probematerials gleich.

4.2 Umsetzung

Zuvor wurden die Vorteile einer Parametrisierung und die dabei auftretenden möglichen Probleme dargestellt. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die Parametrisierung für umgesetzt wird. Dabei gilt es einige Probleme zu lösen und zu klären, wie ein Ergebnis vor einem Rendering zu bewerten ist.

4.2.1 Messdaten interpretieren und darstellen

Der Aufbau der nachbearbeiteten Messdaten muss für die Parametrisierung bekannt sein. Wie das Messverfahren funktioniert wurde geschildert. Dabei zeigt sich, dass es keinen Unterschied macht, ob sich das Probematerial oder Lichtquelle und Kamera bewegen. Praktischerweise wird aber im weiteren Verlauf von einem stationären Probematerial und Positionierungen der Kamera sowie der Lichtquelle ausgegangen. Beide bewegen sich dabei auf einer gedachten Hemisphäre, die mit einem Abstand von 1 über dem Probematerial liegt, was somit der oberen Hälfte einer Einheitskugel entspricht.

Die Ausrichtungen von Kamera und Lichtquelle können ebenso mit Einheitsvektoren beschrieben werden, die vom Probematerial aus zur jeweiligen Position auf der Hemisphäre zeigen. Da das Kugelkoordinatensystem verwendet wird, lassen sich nun die Ausrichtungen der Vektoren mit den Winkeln θ (Polarwinkel) und ϕ (Azimutwinkel) beschreiben (vgl. 2.1.6). Die verschiedenen Messwerte sind durch die Winkelveränderungen beschrieben, wobei sich bei der Lichtquelle nur der Polarwinkel ändern muss, da ausschließlich isotrope Materialien beachtet werden. Die Größe der Winkelabstände bestimmt die Auflösung der Messung. Da

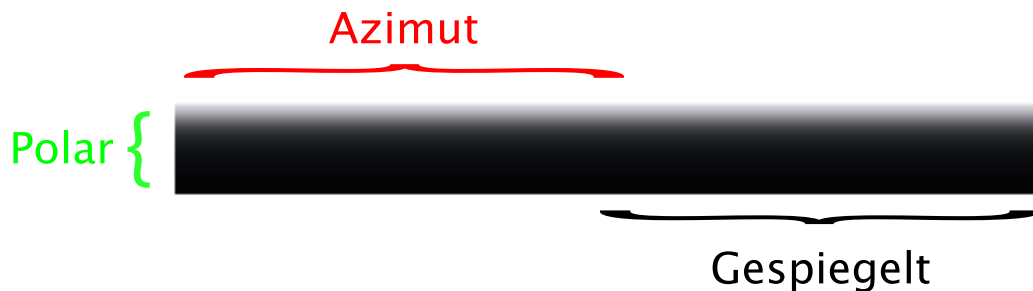


Abbildung 4.5: Grafische Darstellung der Messdaten.

diese variieren kann, muss bei der Umsetzung mit dynamischen Größen gearbeitet werden. Die meisten Messdaten sind aber wie folgt aufgebaut:

- Die Lichtquelle bewegt sich von 0° bis 90° in 5° Schritten und hat somit gesamt 19 verschiedene Positionierungen.
- Für jede Lichtquellenposition bewegt sich die Kamera polar von 0° bis 90° in $2,5^\circ$ Schritten und hat somit 37 verschiedene polare Positionierungen.
- Für jede polare Kameraposition gibt es 36 verschiedene azimutale Positionierungen. Die Kamera bewegt sich dabei azimutal von 0° bis 180° in $\frac{180}{35} \approx 5,143^\circ$ Schritten.

Das sich die Kamera azimutal nicht bis 360° bewegt, hängt damit zusammen, dass die Reflexionen von isotropen Materialien auf beiden Hälften der Halbkugel identisch sind. Die Messdaten bestehen somit eigentlich aus einer Viertelkugel, die sich zu einer kompletten Hemisphäre spiegeln lässt. Die Polarkoordinaten haben die x -Achse als Bezugsrichtung der Äquatorebene, wobei die Kamera an der positiven Seite der x -Achse startet und sich azimutal zur negativen Seite hinbewegt. Die Lichtquelle befindet sich fest auf der negativen Seite der x -Achse und bewegt sich wie bereits erwähnt nur polar. In Abb. 4.4 sind die Aufteilungen und Ausrichtungen schematisch dargestellt, wobei die Vertex-Punkte als Messpunkte gesehen werden können.

Zusätzlich zu den Winkeln ist zu beachten, dass bei jeder Messung ein Wert für Rot, Grün und Blau ermittelt wird und daher der RGB-Farbraum gilt. Somit resultiert, dass die gemessene BRDF positionsunabhängig und isotrop ist, da sie mit zwei variablen Winkeln für die Kamera, einem für die Lichtquelle sowie einer Variable für den Lichtwellenbereich insgesamt aus vier Dimensionen besteht. Die gesamte Anzahl an Helligkeitswerten ergibt sich für eine gemessene BRDF aus der Anzahl an Winkelpositionen und Farben:

$$19 \cdot 36 \cdot 37 \cdot 3 = 75.924 \quad (4.15)$$

Für eine optische Überprüfung lassen sich alle Helligkeitswerte als eine Textur betrachten, die sich sozusagen durch das Aufklappen der Halbkugel ergibt. Die Textur lässt sich grafisch z. B. mit OpenGL darstellen, wie es in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Die grafische

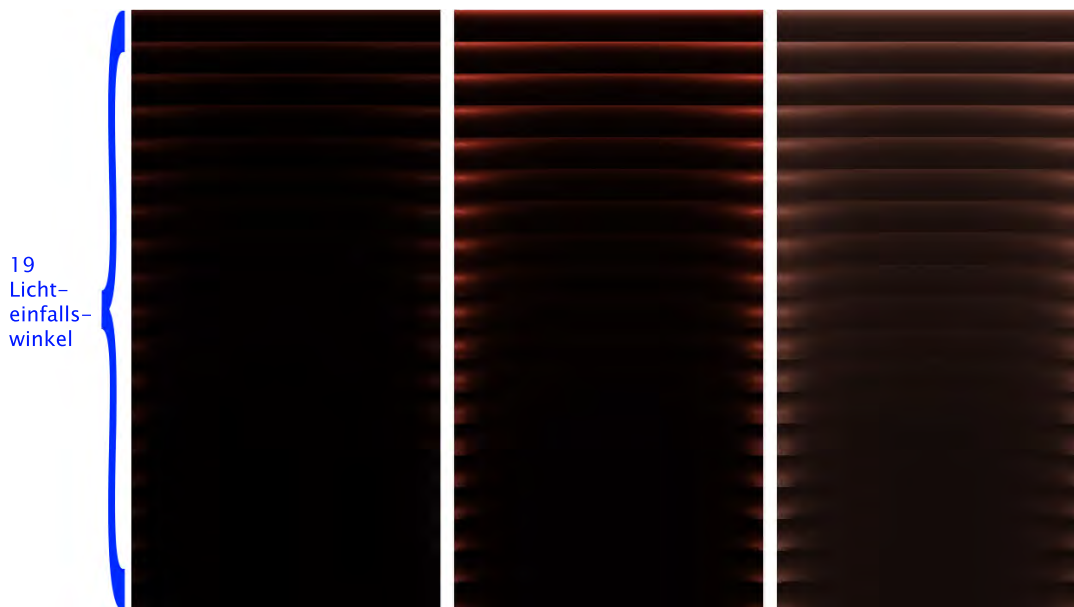


Abbildung 4.6: **Links:** Die kompletten, aber etwas dunklen, Messdaten einer BRDF. Der Lichteinfallswinkel verläuft dabei von oben nach unten von 0° bis 90° . **Mitte:** Die Aufhellung mittels Multiplikation um Faktor 3. **Rechts:** Die Aufhellung mittels Gammakorrektur mit $\gamma = 2,2$.

Darstellung ist für eine optische Überprüfung der Approximation hilfreich, kann aber, was ihre Form betrifft, variabel umgesetzt werden. In Abb. 4.5 sind bspw. die Messungen eines Probematerials für einen einzigen Lichteinfallswinkel zu sehen. Eine Stauchung bei den Polar-Werten ist dabei aus Platzgründen notwendig, da am Ende mit einer Textur alle 19 Lichteinfallswinkel dargestellt werden sollen, wie in Abb. 4.6 zu sehen ist. Die Textur ist dabei wie die beschriebenen Messdaten aufgebaut, also entspricht die oberste Pixelreihe einem Polarwinkel der Kamera von 0° und verläuft von links nach rechts azimuthal von 0° bis 180° . In der Pixelreihe darunter ist der Polarwinkel $2,5^\circ$, wobei der azimuthale Verlauf wieder der selbe ist, und so verhält es sich ebenfalls mit den weiteren Pixelreihen. Die Textur wird zusätzlich gespiegelt, womit die Darstellung wiederum der kompletten Hemisphäre entspricht.

Da einige der gemessenen BRDFs um etwas zu erkennen zu dunkel sind, muss eine Möglichkeit zur Aufhellung integriert werden. Dabei kann neben der normalen Aufhellung, bei der die Helligkeitswerte mit einem festgelegten Faktor multipliziert werden, auch eine Gammakorrektur von Vorteil sein. Dabei werden die jeweiligen Helligkeitswerte mit dem Gammaexponenten $\frac{1}{\gamma}$ potenziert. In Abb. 4.6 sind die etwas dunklen original Messdaten sowie die zwei Arten der Aufhellung zu sehen.

4.2.2 Ashikhmin-Modell implementieren

Da der Aufbau der Messdaten nun genau bekannt ist, gilt es die Modelldaten zu erstellen. Zunächst wird das Phong-Modell, da es relativ schnell umzusetzen ist, zur Machbarkeitsstudie implementiert. Die Modelldaten müssen dabei exakt wie die Messdaten aufgebaut sein, damit sie im LMV benutzt werden können. Es gilt somit, bei der Berechnung der Helligkeitswerte, die gleichen Winkelpositionen und den selben Farbraum zu berücksichtigen (vgl. 4.15). Für die Berechnung der Helligkeitswerte mit dem einfachen Phong-Modell, werden neben den Parametern für c_d , c_s und n_s , sowie den vorgegebenen Winkelpositionen, noch die jeweiligen Reflexions- und Betrachtungsvektoren benötigt. Diese lassen sich aus den Kugelkoordinaten der Winkelpositionen, wie schon in 2.10 beschrieben, berechnen.

Sobald das Phong-Modell erfolgreich implementiert wurde und das LMV sich damit funktionsfähig zeigt, sollte das eigentliche Zielmodell von Ashikhmin eingebaut werden. Da dabei der im Rendering eingesetzte Ashikhmin-Shader vom Originalmodell abweichend ist, müssen Anpassungen durchgeführt werden. Neben R_s als Koeffizient für die Spekularintensität, gibt es zusätzlich noch einen Koeffizienten c_s für die Intensität der jeweiligen Farbwerte Rot, Grün und Blau. Dabei ist c_s als ein Vektor der drei Farben anzusehen:

$$\begin{pmatrix} c_{sr} \\ c_{sg} \\ c_{sb} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Die Gesamtintensität des diffusen Anteils wird durch den Faktor $(1 - R_s)$ bestimmt. Daher lassen sich die unterschiedlichen Intensitäten der drei Farben auch mit dem Vektor c_d statt R_d ausdrücken. Die Werte des Vektors c_d geben den Absorptionsgrad der Fläche in dem jeweiligen Wellenbereich an. c_s und c_d sind somit Faktoren, die zu den jeweiligen Anteilen gehören. Der diffuse sowie spekulare Anteil, jeweils mit dem Vektor für die Farbintensität, ist folgendermaßen definiert:

$$f_{rd}(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{28}{23\pi} (1 - R_s) \left(1 - \left(1 - \frac{(\vec{n} \cdot \vec{l})}{2} \right)^5 \right) \left(1 - \left(1 - \frac{(\vec{n} \cdot \vec{v})}{2} \right)^5 \right) \begin{pmatrix} c_{dr} \\ c_{dg} \\ c_{db} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

$$f_{rs}(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{(n_s + 1)}{8\pi} \frac{(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_s}}{(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))} F((\vec{h} \cdot \vec{v})) \begin{pmatrix} c_{sr} \\ c_{sg} \\ c_{sb} \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

In 4.1.1 wurde schon darauf hingewiesen, dass von den Messdaten der Fresnel-Anteil der Klarlackschicht abgezogen wurde, der Reflexionskoeffizient dabei aber berechnet und mit ausgegeben wird. Eine BRDF-Datei setzt sich daher aus Reflexionskoeffizienten und aufbereiteten Messdaten (Basisdaten) zusammen, wenn eine Fresnelreflexion vorhanden ist. Der Shader, der die gemessenen BRDFs rendert, berechnet die Fresnelreflexion der Klarlackschicht und addiert diese zur Basis auf:

$$BRDF = \text{Fresnelreflexion} + \text{Basisdaten} \quad (4.19)$$

Für die Approximation der Basisdaten müsste jetzt eigentlich jedes mal die Fresnelreflexion der Klarlackschicht von den ermittelten Modelldaten abgezogen werden. Es wäre aber vor-

teilhafter den Einfluss der Fresnelreflexion von den Basisdaten mittels folgender Gleichung zu entfernen:

$$Basisdaten_{neu} = \frac{Basisdaten}{1 - Fresnelreflexion} \quad (4.20)$$

Wenn die Fresnelreflexion aktiviert ist, würde der Messdaten-Shader theoretisch folgende Daten rendern:

$$BRDF = Fresnelreflexion + (1 - Fresnelreflexion) \cdot Basisdaten_{neu} \quad (4.21)$$

Der verwendete Ashikhmin-Shader berücksichtigt, genauso wie der Messdaten-Shader, einen Reflexionskoeffizienten für die Klarlackschicht. Die ermittelte Fresnelreflexion wird dabei ebenfalls auf die Basisdaten addiert. Somit gilt es die Parameterwerte so zu approximieren, dass die Ashikhmin-Basisdaten möglichst den $Basisdaten_{neu}$ gleichen. Der Ashikhmin-Shader berechnet dann die Werte tatsächlich so wie in 4.21, jedoch mit den Basisdaten, die durch die approximierten Parameterwerte entstehen:

$$BRDF = Fresnelreflexion + (1 - Fresnelreflexion) \cdot Basisdaten_{Ashikhmin} \quad (4.22)$$

Somit sollte das Erscheinungsbild des Ashikhmin-Shaders mit den ermittelten Parameterwerten, dem Messdaten-Shader mit den Messdaten gleichen, wobei beide die selbe Klarlackschicht simulieren.

Da der Fresnel-Effekt der Klarlackschicht den Lichtanteil, der die Basis darunter erreicht, bei extremen Winkeln verringert, ist der Fresnel-Anteil der Basis zwar nicht ganz zu vernachlässigen, wird aber vorerst zur einfacheren Berechnung nicht weiter berücksichtigt. So wird beim Ashikhmin-Modell dieser Anteil verworfen. Nun, da kein Fresnel-Anteil ausgeglichen werden muss, ist es von Vorteil, das Lambert-Modell für den diffusen Anteil zu verwenden. Bei nicht Beachtung eines Fresnel-Anteils, fällt beim Ashikhmin-Modell auch der Parameter R_s weg. Die Intensität der Reflexionen für jeden Farbkanal würde somit nur mit den Farbvektoren bestimmt. Beim Ashikhmin-Shader müsste der Anwender aber dadurch alleine für die diffusen und spekularen Farbkanäle sechs Parameterwerte eingeben, wobei ein Intensitätsfaktor zu berücksichtigen wäre. Es ist daher einfacher den R_s Parameter zu erhalten, der die reine Glanzintensität von 0 bis 1 angibt und mit zwei Farbwählern die diffuse und spekulare Farbe zu wählen. Der vereinfachte Ashikhmin-Shader ohne Fresnelreflexion verwendet für den diffusen sowie spekularen Anteil folgende Modelle:

$$f_{rd}(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{\begin{pmatrix} c_{dr} \\ c_{dg} \\ c_{db} \end{pmatrix}}{\pi} \cdot (1 - R_s) \quad (4.23)$$

$$f_{rs}(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{(n_s + 1)}{8\pi} \frac{(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_s}}{(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))} \begin{pmatrix} c_{sr} \\ c_{sg} \\ c_{sb} \end{pmatrix} \cdot R_s \quad (4.24)$$

An dieses Modell gilt es das LMV anzupassen. Bei gleichzeitiger Benutzung von R_s und c_s ist jedoch erkennbar, dass es sich hierbei um zwei Parameter handelt, die sich gegenseitig negativ beeinflussen können. Es ist also denkbar, dass bei unterschiedlichen Werten für beide Parameter, die gleichen Ergebnisse erlangt werden. Dies könnte für das LMV problematisch sein, da es dazu tendieren würde, R_s auf 1 zu setzen, um somit nur mit c_s die besten Modellwerte für den spekularen Anteil zu approximieren. Bei der Umsetzung des LMV wird daher der R_s Parameter verworfen. Zur Übergabe der approximierten Parameterwerte für das Rendering jedoch, durch eine Umrechnung, wieder zurückgeführt. Dazu wird R_s mit dem höchsten der drei c_s Werte gleichgesetzt. Daraufhin werden alle c_s Werte wiederum durch diesen geteilt. Zuletzt werden die drei c_d Werte durch $(1 - R_s)$ geteilt.

4.2.3 Residuumsfunktion und Gewichtung

Der Aufbau der Residuumsfunktion r ist entscheidend für das LMV. In erster Linie wird dabei von einem Messwert R der Modellwert M abgezogen, der mit denselben Eingangsvariablen, also Lichteinfall- und Betrachtungsrichtung sowie Lichtwellenbereich, generiert wurde. Da manche Messwerte aber als bedeutsamer anzusehen sind als andere, ist die Einführung von Gewichtungen vorteilhaft. Die für diese Arbeit verwendete Residuumsfunktion wurde von Ngan et al. übernommen und lautet folgendermaßen, wobei p den Parametervektor vom Modell beschreibt (vgl. 3.5):

$$r = \frac{w \cdot \cos \theta_i \cdot [R(\omega_i, \omega_o) - M(\omega_i, \omega_o; p)]}{\sum w} \quad (4.25)$$

Darin sind zwei unterschiedliche Gewichtungen enthalten, die gemeinsam auf eine Abweichung einwirken. Eine davon bezieht sich auf den Kosinus des Polarwinkels der Lichtquelle: $\cos \theta_i$. Zurückzuführen ist diese Gewichtung darauf, dass im Rendering die berücksichtigte Bestrahlungsstärke, die auf ein Material auftrifft, abhängig vom Winkel zwischen Lichtquelle und Flächennormalen ist. Bei großen Winkeln geht der Kosinus-Term auf 0 zu, bei kleinen auf 1, wie es vom Lambertschen Kosinusetz bekannt ist. Die Beleuchtung eines Materials, sowie damit verbunden seine sichtbaren Reflexionsinformationen, nehmen somit abhängig vom Lichteinfallswinkel θ_i ab oder zu. Die Gewichtung in der Residuumsfunktion führt dazu, dass Abweichungen in Bereichen, die im Rendering durch eine intensivere Beleuchtung deutlicher zu sehen wären, stärker gewichtet werden. Somit versucht das LMV die Parameterwerte so anzupassen, dass die Modellwerte von den Messwerten bei diesen Lichteinfallswinkeln weniger abweichen. Und das auch zum Preis von höheren Abweichungen bei den anderen Winkeln. Man kann also festhalten, dass die Gewichtung der Abweichungen und somit deren Bedeutsamkeit, abhängig vom Lichteinfallswinkel von 0° für wichtig zu 90° für eher vernachlässigbar verlaufen.

Die andere Gewichtung w bezieht sich auf den Raumwinkel, der bei der Messung eine Rolle spielt. Jeder Messwert repräsentiert einen Ausschnitt der Hemisphäre, an dem der jeweilige Helligkeitswert gemessen wird. Der Ausschnitt entspricht somit dem Raumwinkel. Dabei stehen manche Messwerte für einen größeren und manche für einen kleineren Raumwinkel. Bei größeren Raumwinkeln ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass es Abweichungen

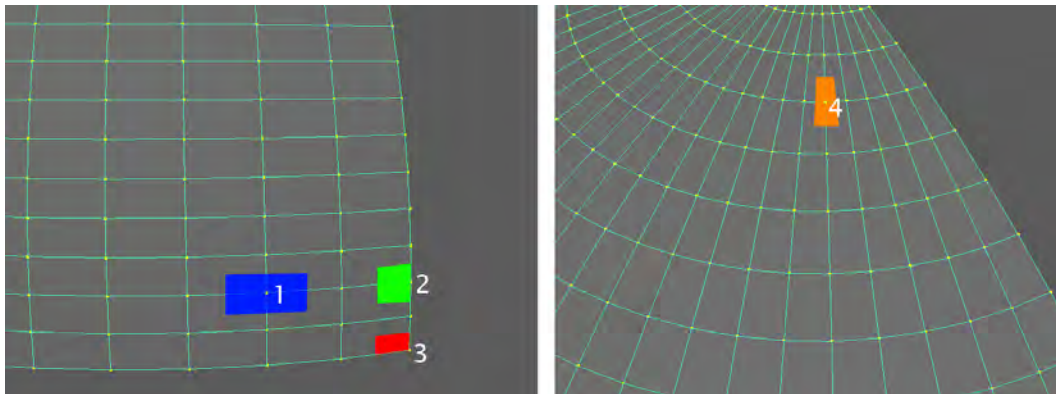


Abbildung 4.7: Die unterschiedlichen Raumwinkel, die zu berücksichtigen sind. An Messwert 1 ist in blau der normale Raumwinkel zu sehen. Bei 2 ist in grün der halbe und bei 3 der viertel Raumwinkel zu erkennen. An Messwert 4, der näher am Zenit liegt, ist der orange normale Raumwinkel kleiner als der bei Messwert 1, was die erhöhte Messdichte erkennen lässt.

von dem Messwert innerhalb dieses Raumwinkels geben könnte. Bei kleineren Raumwinkeln ist die Dichte der Messwerte höher, weshalb hier mit weniger Fehlern oder Abweichungen gerechnet werden kann. Das LMV tendiert durch die höheren Messdichte dazu, die Parameterwerte eher für diesen Bereich anzupassen. Durch die stärkere Gewichtung bei größeren Raumwinkeln wird dies ausgeglichen. In Abb. 4.7 sind die möglichen Raumwinkel, die zu berücksichtigen sind, dargestellt. Dabei sind diejenigen, die in der Nähe des Zenits liegen, kleiner, als die in der Nähe des Äquators. Am Rand muss die Hälfte des Raumwinkels genommen werden und an den Ecken nur ein Viertel. Die Raumwinkelgewichtung wird normiert, indem jede einzelne Gewichtung durch die Summe aller vergebenen Raumwinkel, die bei einer viertel Kugel gleich π ist, geteilt wird. Die Berechnung der einzelnen Raumwinkel erfolgt durch die schon im Grundlagenabschnitt *Raumwinkel* vorgestellte Formel 2.13. Es gilt jedoch zu überprüfen, inwieweit die Gewichtungen die Approximation der Parameterwerte beeinflussen.

Aus der Residuumsfunktion geht außerdem hervor, dass jeweils nur ein Helligkeitswert des Modells mit der Messung verglichen wird. Da sich die farbige Reflexion aber aus drei zusammenhängenden Helligkeitswerten ergibt, schließt sich daraus, dass das LMV mit dieser Funktion nicht gleichzeitig die Parameterwerte für alle sechs Farben ermitteln kann. Stattdessen muss, für jeden Farbkanal gesondert, der jeweilige Helligkeitswert für den diffusen und spekularen Anteil ermittelt werden. Die Form des Glanzlichts ist jedoch bei allen Farbkanälen gleich. Dadurch ist es möglich und von Vorteil, das Verfahren in zwei Stufen zu teilen. Das Ziel der ersten Stufe ist die Ermittlung der Glanzlichtform, indem Mess- und Modellwerte auf monochromer Ebene betrachtet werden. Dazu werden bei den Messdaten jeweils für eine Messposition der Mittelwert der drei Farbkanäle ermittelt. Bei den Modelldaten wird ein c_d und c_s Wert für alle drei Farbkanäle verwendet. Für die Berechnung der Abweichungen reicht es dann aus, wenn nur ein Farbkanal der Modelldaten beachtet wird. Ist dies z. B. der rote

Kanal, so ändert sich die Residuumsfunktion von 4.25 für die erste Stufe folgendermaßen, wobei c die drei Farbkanäle beschreibt:

$$r = \frac{w \cdot \cos \theta_i \cdot \left[\sum_{c=1}^3 \frac{R(\omega_i, \omega_o, c)}{3} - M_{red}(\omega_i, \omega_o; p) \right]}{\sum w} \quad (4.26)$$

Somit finden lediglich die Abstände von 25.308 Werten Beachtung. Damit wird der passenden Exponenten-Parameterwert n_s approximiert, wobei das LMV gleichzeitig einen Mittelwerte für c_d und c_s berechnet. In der zweiten Stufe ist der gefundene n_s Wert als Konstante anzusehen und die Mittelwerte dienen als Startwerte für das LMV, um für die jeweiligen Farbkanäle von c_d und c_s die passenden Parameterwerte zu approximieren. Die zweite Stufe muss somit für jeden Kanal separat durchgeführt werden. Die abgeänderte Residuumsfunktion für diese Stufe lautet somit folgendermaßen, wobei c jeweils für die zu berücksichtigende Farbe steht:

$$r = \frac{w \cdot \cos \theta_i \cdot [R(\omega_i, \omega_o, c) - M(\omega_i, \omega_o, c; p)]}{\sum w} \quad (4.27)$$

4.2.4 Levenberg-Marquardt Verfahren implementieren

Für die Machbarkeitsstudie wird zunächst das einfachere Phong-Modell in das LMV implementiert. Durch die Erstellung synthetischer BRDFs, die auf dem zu approximierenden Phong-Modell basieren, ist daraufhin überprüfbar, ob sich das LMV mit perfekt simulierten Messwerten funktionsfähig zeigt. Nachdem das der Fall ist, kann das Ashikhmin-Modell in das LMV implementiert werden. Der Ablauf ist dabei der gleiche wie bei Phong, nur wird eine andere Modellfunktion verwendet und damit ebenfalls andere partielle Ableitungen. Die Gewichtungen und Berechnungen bleiben aber gleich. Somit können zukünftig evtl. auch andere BRDF-Modelle relativ einfach implementiert werden.

Der erste Schritt zur Implementierung des LMV besteht darin, von dem gewählten analytischen BRDF-Modell die partiellen Ableitungen nach den Parametern zu berechnen. Das vereinfachte Ashikhmin-Modell ohne Fresnel-Term verwirft den Parameter R_s und wird folgendermaßen aufgestellt:

$$f_r(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{\begin{pmatrix} c_{dr} \\ c_{dg} \\ c_{db} \end{pmatrix}}{\pi} + \frac{(n_s + 1)}{8\pi} \frac{(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_s}}{(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))} \begin{pmatrix} c_{sr} \\ c_{sg} \\ c_{sb} \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

Dadurch gilt es nur noch die Werte für die drei Parameter n_s , c_d und c_s zu berechnen. Durch den Aufbau der Residuumsfunktion, muss ein zweistufiges Verfahren angewandt werden. In der ersten Stufe werden die Messwerte in eine monochrome Form überführt, dazu wird der Mittelwert der drei farbigen Helligkeitswerte berechnet. Mit diesen gemittelten Messwerten, werden der Parameterwert n_s und die Mittelwerte für c_d und c_s approximiert. Der Parametervektor \mathbf{a} besteht somit in der ersten Stufe aus diesen drei Elementen.

Der Residuenvektor \mathbf{r} wird durch die Residuumsfunktion, wie sie für diese Stufe bereits in 4.26 aufgestellt wurde, gefüllt. Dabei wird gleichzeitig eine Fehlerzahl e ermittelt, wobei die Raumwinkelgewichtung und die Gewichtung durch den Kosinus-Term des Lichteinfallswinkels berechnet und angewandt werden müssen. Bei einer vorhandenen Fehlerschranke lässt sich jetzt bereits theoretisch ermitteln, ob die Modellwerte schon nah genug an den Messwerten liegen. In dieser Arbeit wird aber auf eine solche verzichtet, da das bestmögliche Ergebnis gesucht werden soll. Das gilt in der Regel dann als gefunden, wenn das LMV keine Parameterveränderungen mehr durchführt. Bei der Prototyp-Applikation lässt sich die Anzahl der Iterationen festlegen und diese gilt, neben einer manuellen Beendigung, als alleiniges Abbruchkriterium.

Als nächstes wird für das LMV die Jacobi-Matrix \mathbf{D} aufgebaut. Dabei werden in dieser Stufe, die in 4.29 beschriebenen Ableitungen verwendet, wobei auch hier die Gewichtungen als zusätzlicher Faktor hinzukommen. Zu beachten ist, da es einen natürlichen Logarithmus in der partiellen Ableitung nach n_s gibt, dass das Skalarprodukt von \vec{r} und \vec{v} nicht null sein darf. In solchen Fällen wird der Wert des Skalarprodukts auf $1e^{-4}$ gesetzt.

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_r}{\partial c_d} &= \frac{1}{\pi} \\ \frac{\partial f_r}{\partial c_s} &= \frac{(n_s + 1)}{8\pi} \frac{(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_s}}{(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))} \\ \frac{\partial f_r}{\partial n_s} &= \frac{((\ln(\vec{h} \cdot \vec{n})n_s) + \ln(\vec{h} \cdot \vec{n}) + 1)(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_s} c_s}{8\pi(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))}\end{aligned}\tag{4.29}$$

Da jetzt Matrix \mathbf{D} sowie Vektoren \mathbf{r} und \mathbf{a} vorhanden sind, lässt sich die Matrixgleichung für die Iterationsschritte aufstellen. Diese wird dabei um einen Dämpfungsfaktor λ , wie es das LMV vorgibt, erweitert (vgl. 4.8). Durch die Cholesky-Zerlegung lässt sich die Matrixgleichung lösen [Wik17a]. Der für die Zerlegung verwendete Algorithmus, sowie die Klassen für Matrizen und Vektoren, stammen aus einer Mathematik Bibliotheksdatei der kooperierenden Firma.

Je nachdem, ob die Modellwerte mit den approximierten Parameterwerten dazu führen, dass die Fehlerzahl geringer oder größer wird, verändert sich der Wert für λ . Bei einer Verschlechterung wird der Wert erhöht und somit die Sprungweite der Parameterveränderung verkleinert, wodurch der Algorithmus in das Gradientenverfahren übergeht. Bei einer Verbesserung wird der Wert verringert und die Sprungweite erhöht, der Algorithmus geht an diesem Punkt wieder ins GNV über. Die Konvergenz lässt sich somit steuern, wobei die Erhöhung und Verringerung des Dämpfungsfaktors λ an die jeweilige Problematik angepasst werden sollte. Außerdem gilt es eine Begrenzung zu finden, die von λ nicht unter- oder überschritten werden darf. In dieser Arbeit wird mit i. d. R. einem Startwert von 0.001 für λ gearbeitet, er ist in der Prototyp-Applikation jedoch variabel einstellbar. Bei Verschlechterungen verdoppelt sich der Wert, bis 1 überstiegen wird. Bei Verbesserungen halbiert er sich bis zur Überschreitung von $1e^{-4}$.

Die erste Stufe approximiert somit den Wert für n_s , sowie die Mittelwerte für c_d und c_s . In der zweiten Stufe gilt es, die für das Ashikhmin-Modell tatsächlich relevanten Parameterwerte, c_d und c_s für den jeweiligen RGB-Farbkanal zu ermitteln. Dabei stellen die zuvor berechneten Mittelwerte die Startwerte dar. Der gefundene n_s Wert wird zur Konstanten n_{cons} . Behandelt wird ein Kanal nach dem anderen, wodurch das LMV insgesamt, mit der ersten Stufe, vier Mal durchgeführt wird. Die zweite Stufe wäre sicherlich ebenfalls auf einem anderen Weg berechenbar, da es sich dabei nur um ein lineares Optimierungsproblem handelt. Weil das LMV aber schon als Grundgerüst vorhanden ist, kommt es hierfür zusätzlich zum Einsatz. Die partiellen Ableitungen für die zweite Stufe sind folgendermaßen beschrieben:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_r}{\partial c_d} &= \frac{1}{\pi} \\ \frac{\partial f_r}{\partial c_s} &= \frac{(n_{cons} + 1)(\vec{n} \cdot \vec{h})^{n_{cons}}}{8\pi(\vec{h} \cdot \vec{v}) \max((\vec{n} \cdot \vec{l}), (\vec{n} \cdot \vec{v}))} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Der Aufbau von Matrix **D** ändert sich somit, wobei wieder auf die Gewichtungen als zusätzlicher Faktor und auf den natürlichen Logarithmus geachtet werden muss. Vektor **a** enthält nur noch zwei Elemente. Vektor **r** umfasst die Abweichungen für den jeweils beachteten Farbkanal. Auch in dieser Stufe werden, durch Aufstellung der Matrixgleichung und deren Lösung mittels Cholesky-Zerlegung, die möglichst verbesserten Parameterwerte ermittelt. Pro Iteration entstehen durch dieses Verfahren neue Parameterwerte, mit denen neue Modellwerte berechnet werden. Daraufhin ergibt die Summe der Fehlerquadrate eine neue Fehlerzahl. Diese wird dann mit der alten verglichen. Eine Verschlechterung oder Verbesserung hat Auswirkungen auf den Dämpfungsfaktor λ und auf die Übernahme der Parameterwerte. So werden schlechtere verworfen, bessere aber für die nächste Iteration übernommen.

Bei Extrempositionen von Winkeln können Probleme entstehen. So steigen bei BRDF Messungen die Messfehler, weshalb bei diesen Winkeln eine Extrapolation stattfindet. Beim LMV kann es bei extremen Winkeln zur Nulldivision und somit zu abstürzen kommen. So liegt z. B. der Halfway-Vektor, bei einem Lichteinfallswinkel sowie Betrachtungswinkel von 90° , auf der Flächennormalen, womit das Skalarprodukt von \vec{h} und \vec{v} in den Ableitungen bei 4.29 zu einer Nulldivision führen würde. Um solche Fälle zu vermeiden, sollte der Bereich, der vom LMV beachtet wird, beschränkbar sein. In der Prototyp-Applikation dieser Arbeit lässt sich dieser individuell einstellen, wobei meist 75° ein sinnvoller Wert ist, da ab diesem Wert die Messwerte extrapoliert wurden. Dadurch berücksichtigt das LMV polar für Kamera- und Lichteinfallswinkel maximal 75° . Die Viertelkugel wird somit vom Äquator aus verkürzt, was bei der Berechnung der Gewichtungen mit einfließen muss.

4.2.5 Ergebnisanalyse

Meist ist es nicht sicher, ab wann oder ob überhaupt das Verfahren zu einer Konvergenz in Richtung eines Minimums, ob global oder lokal ist dabei erstmal ungewiss, kommt. Daher muss das Ergebnis auf einige Details analysiert werden. Zunächst stellt sich die Frage, ob die gewählte Anzahl an Iterationen ausreichte, um das Verfahren das beste Ergebnis finden zu



Abbildung 4.8: **Links:** Die Messdaten als Textur. **Rechts:** Die Modelldaten mit approximierten Parameterwerten. **Mitte:** Die Differenz zwischen beiden.

lassen. Der Iterationsschritt, ab dem es zu keiner weiteren Veränderung der Parameterwerte mehr kam, ist dabei ein hilfreicher Wert. Wenn dieser so groß wie die gewählten Iterationen ist, kann ein weiterer Durchlauf evtl. zu noch besseren Parameterwerten führen. Sollte es schon nach einigen Iterationen zu keinen Veränderungen kommen und das Ergebnis nicht akzeptabel sein, sollte ein neuer Durchlauf mit anderen Startwerten versucht werden.

Zur Ergebnisbewertung kann die Fehlerzahl ein weiterer nützlicher Wert sein. Dabei ist der erste Fehler, der durch die gewählten Startwerte entsteht, und der am Ende aller Iterationen entstandene besonders von Bedeutung. Ist eine wesentliche Verbesserung zu sehen, kann davon ausgegangen werden, dass das LMV zu einem Minimum konvergierte. Eine generelle Aussage darüber, ab wann eine Fehlerzahl für eine gute Übereinstimmung niedrig genug ist, lässt sich schwer treffen, da schon kleinere Abweichungen im Rendering zu großen Unterschieden führen können. Weswegen auf eine Fehlerschranke verzichtet wird und die Iterationen meist so lange wiederholt werden, bis das LMV keine Verbesserungen liefert.

Zur ersten optischen Untersuchung lassen sich Messdaten und die mit den approximierten Parameterwerten erstellten Modelldaten als Texturen darstellen, wodurch ein Vergleich durchführbar ist. Die Wahl der Startwerte stellte sich so müheloser heraus, da Parameterwerte zur Annäherung der Messdaten getestet werden können. Zusätzlich lässt sich durch die Berechnung der Differenz der einzelnen Helligkeitswerte eine Textur erstellen, aus der ersichtlich wird, an welchen Stellen die Unterschiede am größten sind. Evtl. kann dadurch eine manuelle Verbesserung der gefundenen Parameterwerte vorgenommen werden, wenn das Verfahren keine weitere durchführt. In Abb. 4.8 sind eine gemessene BRDF, dessen ap-

proximierte Modelldaten und die Differenz zwischen beiden als Textur dargestellt.

Nachdem nun ein mathematischer sowie rudimentärer optischer Vergleich durchgeführt wurde und die vermutlich besten Parameterwerte gefunden sind, gilt es diese mit dem Ashikhmin-Shader zu rendern. Zudem werden die Messdaten mit einem speziellen Shader gerendert, womit ein finaler Vergleich zwischen Messdaten und Modelldaten stellen lässt. Eine Übersicht der Ergebnisse und Renderings folgt im *Ergebnisse* Kapitel.

4.3 Implementierung

Zunächst wird kurz die Umsetzung der Prototyp-Applikation umrissen, wobei auf die verwendete Entwicklungsumgebung eingegangen wird. Daraufhin wird der Programmablauf, durch den die Approximation erfolgt, erläutert.

4.3.1 Umsetzung mit Qt

Die Prototyp-Applikation wurde mit der Programmiersprache C++ umgesetzt. Da eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) mit dieser Sprache recht aufwendig zu implementieren ist, wurde die C++-Klassenbibliothek *Qt*¹ verwendet. Als Entwicklungsumgebung diente zusätzlich der *Qt Creator* von selbigen Unternehmen, wobei ein externer Compiler gewählt werden musste und dafür der in *Microsoft Visual Studio 2015*² integrierte zum Einsatz kam. Dabei handelt es sich um den *Microsoft Visual C++ Compiler 14.0*. Außerdem musste für das Auffinden und Lösen von Programmierfehlern ein externer Debugger eingebunden werden. Der *Microsoft Console Debugger* (CDB), der ein Bestandteil der *Debugging Tools for Windows* ist, wurde für diesen Zweck verwendet.

In *Qt* werden grafische Bedienelemente, wie z. B. ein Button oder Textfeld, als *Widgets* bezeichnet. Diese lassen sich mit dem Design-Editor auf einer Benutzeroberfläche beliebig positionieren. Die Funktionen für die *Widgets* lassen sich dann im Code-Editor bearbeiten. Für die Prototyp-Applikation wurden zunächst *Widgets* implementiert, mit denen sich Messdaten öffnen oder erstellen, sowie Startwerte und Eingangsvariablen bestimmen lassen. Der Benutzer kann durch einen Button die Approximation starten und sich das Ergebnis ausgeben lassen. Für beide Schritte wurden einfache Klassen von *Qt* benutzt, dazu gehörten *QFileDialog*, *QPushButton*, *QLineEdit* und weitere. Ein *Widget* kann auch als Container dienen. Für die optische Darstellung der Mess- und Modelldaten diente ein *QWidget* als Container für die grafischen Funktionen von *OpenGL*. Standard C++-Klassen, wie die Mathematik Bibliotheksdatei, konnten ohne Probleme eingebunden werden, wodurch sich diese mit vorhandenen *Qt*-Klassen verbinden ließen

¹<https://www.qt.io>

²<https://www.visualstudio.com/de/>

4.3.2 Programmablauf

Der Benutzer muss im ersten Schritt die Messdaten, Startwerte und Eingangsvariablen bestimmen. Dabei werden folgende Werte festgelegt:

- Der Dateipfad zur Messdaten-Datei per Öffnen-Dialog.
- Die Anzahl an Iterationen, die das LMV durchgehen soll.
- Ein Update-Wert, bei dem jeweils die OpenGL Vorschau berechnet wird.
- Der Begrenzungsbereich, der vom LMV berücksichtigt werden soll. Dieser geht von 90° bis 0° in jeweils 5° Schritten, wobei der Wert sowohl für den Lichteinfall- als auch für den polaren Kamerawinkel gilt.
- Ein Lambda-Wert, der die Sprungweite des Verfahrens beeinflusst.
- Ob eine Gewichtung vom LMV berücksichtigt werden soll.
- Zuletzt die drei Startwerte für das Ashikhmin-Modell: n_s , c_d und c_s .

Als nächstes startet der Benutzer zunächst das LMV für die monochrome Stufe. Der Programmablauf, der durch den Start ausgelöst wird, ist in Abb. 4.9 zu sehen. Dieser gilt sowohl für die monochrome Stufe, als auch für die zweite Stufe, bei der das Verfahren jeweils für die Farbkanäle Rot, Grün und Blau verwendet wird.

Während der Berechnungen durch das LMV werden die approximierten Werte für n_s , c_d und c_s angezeigt, sowie ein Update der grafischen Darstellung der Modelldaten. Am Ende der Iterationen werden die gefundenen Parameterwerte zusammen mit der finalen Fehlerzahl angezeigt. Durch Beachtung der Fehlerzahl, sowie eines optischen Vergleichs zwischen Messdaten und approximierten Modelldaten, lässt sich schließen, ob die Berechnung positiv oder negativ ausgefallen ist. Bei einer fehlgeschlagenen Approximation, sollte das Verfahren mit neuen Startwerten und Eingangsvariablen wiederholt werden. Bei einer positiven Berechnung, kann die zweite Stufe zur Ermittlung der Werte c_d und c_s für den jeweiligen RGB-Farbkanal gestartet werden. Die gefundenen Werte für c_d und c_s werden dabei als Startwerte und n_s als Konstante übernommen.

Nach Abschluss der zweiten Stufe kann davon ausgegangen werden, dass die bestmöglichen Parameterwerte approximiert wurden. Zur Überprüfung kann die Differenz angezeigt werden. Um einen Vergleich zu den gefundenen Parameterwerten zu haben kann es sinnvoll sein, das komplette Verfahren mit anderen Startwerten und Eingangsvariablen zu wiederholen. Dadurch lässt sich überprüfen, ob das globale oder ein lokales Minimum gefunden wurde. Da eine Approximation mit beiden Stufen und 500 Iterationen ca. 15-20 Sekunden dauert, ist eine Mehrfachberechnung nicht besonders zeitintensiv.

Die letztlich für den Benutzer akzeptabel approximierten Parameterwerte werden im Dateiformat CSV (engl. *Comma Separated Values*) abgespeichert. Für das Rendering werden diese dann innerhalb einer 3D-Anwendung ausgelesen.

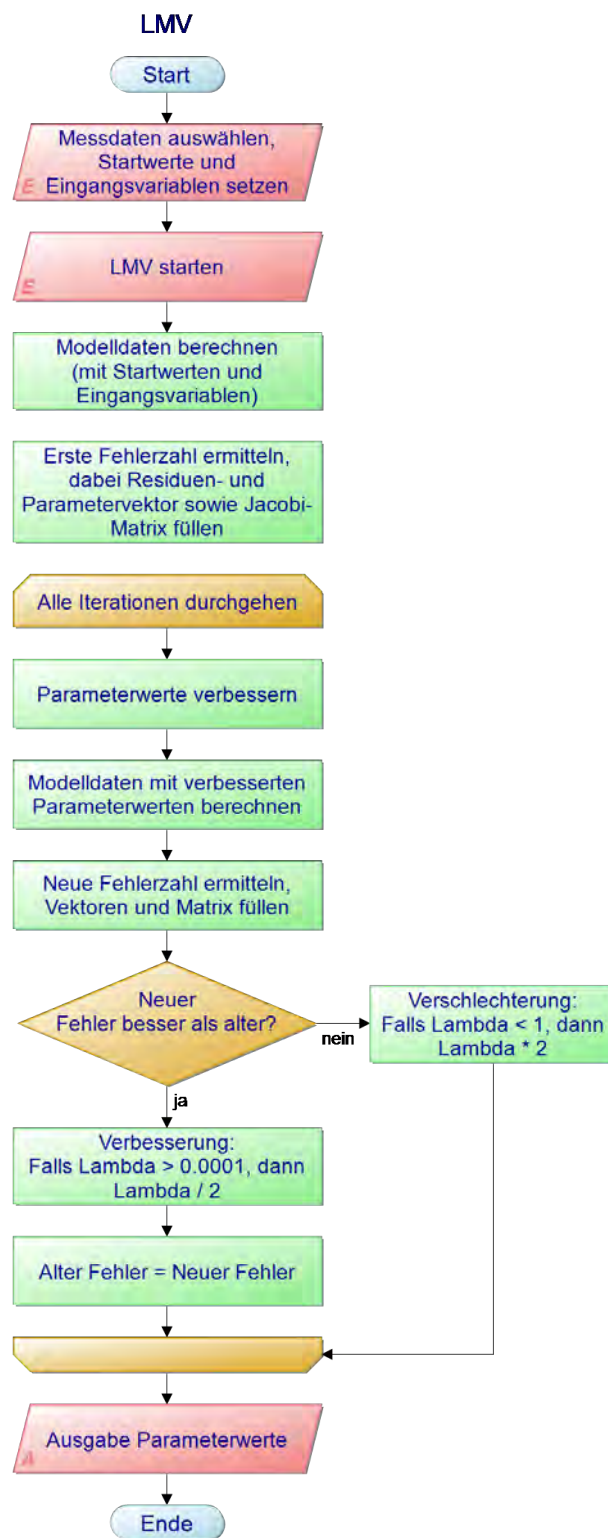


Abbildung 4.9: Ablaufplan für das LMV.

Kapitel 5

Ergebnisse

Im Vorfeld wurde sich mit der gewählten Methodik zur Parametrisierung gemessener BRDFs befasst. Dazu wurde ein Überblick zum verwendeten Messsystem gegeben, sowie der Aufbau der entstandenen Messdaten untersucht, wobei die Vor- und Nachteile, durch einen Wechsel einer gemessenen BRDF hin zu einem analytischen Modell, erörtert wurden. Abschließend wurde sich mit der Umsetzung der Parametrisierung unter Verwendung des LMVs befasst, wobei sich die Frage stellte, womit ein Ergebnis auf seine Güte hin geprüft werden kann. Die Fehlerzahl lieferte ein mathematisches Ergebnis über Abweichungen zwischen Mess- und Modelldaten und gab einen Hinweis auf die Qualität der Parameterwerte. In der Prototyp-Applikation ließen sich zusätzlich alle Helligkeitswerte einer Messung, sowie die Werte der approximierten Modelldaten als Textur gleichzeitig darstellen.

Dies ist eine eher rudimentäre Variante der optischen Ergebnisanalyse. Zur finalen Beurteilung, sollten echte Renderings, entstanden aus beiden Datenformen, im Fokus stehen.

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse der Arbeit vor. Dazu gehört die Aufarbeitung des verwendeten Verfahrens, bei der zunächst auf dessen Lauffähigkeit eingegangen wird. Dabei werden die Einflüsse von Startwerten, Gewichtung und Begrenzung, sowie der Form des Messdaten deutlich.

Als nächstes werden die gerenderten Ergebnisse analysiert. Durch den Vergleich zwischen Mess- und Modell-Renderings lässt sich dabei überprüfen, ob mit dem gewählten Verfahren eine erfolgreiche Parametrisierung umgesetzt werden konnte. Dabei wird geklärt, was die Vorschau in Texturform und die Fehlerzahl, über die Qualität der approximierten Parameterwerte aussagt.

Im Anschluss gilt es zu beurteilen, ob sich das Ashikhmin-Modell als ausreichend leistungsfähig zur Nachbildung der gemessenen BRDFs zeigte. Zuletzt wird ein Fazit über: Funktionsfähigkeit, Leistung und Ergebnisse der gewählten Methodik gezogen.

5.0.1 Verfahrensanalyse

Zunächst sei erwähnt, dass neben den Messdaten, die eine Klarlackschicht berücksichtigen, zusätzlich einige, ohne Klarlackschichtberücksichtigung, zur Verfügung standen. Daher wurde auch das vollständige Ashikhmin-Modell, mit Fresnel-Term und erweitertem diffusen An-

5. ERGEBNISSE

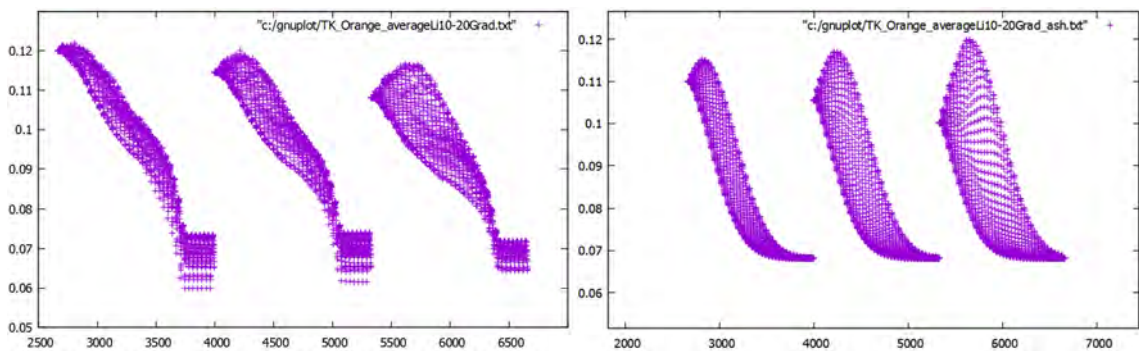


Abbildung 5.1: Links: Verteilung der Helligkeitswerte einer Messdaten Datei bei Lichteinfallswinkel von 10° , 15° und 20° . Rechts: Funktionsverteilung des Ashikhmin-Modells ohne Fresnel Berücksichtigung mit approximierten Parameterwerten.

teil, in das Verfahren implementiert, da ohne eine Klarlackschicht der fehlende Fresnel-Effekt des eigentlichen Materials auffälliger sein kann. In diesem Modell sind jedoch Parameter enthalten, die sich gegenseitig in dem Maße negativ beeinflussen, dass das LMV seine Stabilität verlor und somit keine vernünftigen Ergebnisse ausgab. Durch eine eingefügte Brute-Force-Methode, bei der die maximalen und minimalen Werte der Parameter begrenzt werden, ließ sich jedoch eine Approximation durchführen. Somit konnten optische Vergleiche zwischen beiden Modellvarianten gezogen werden. Für die Stabilität des LMV spielen, neben der Modellfunktion, noch andere Faktoren eine Rolle. Dazu zählt zunächst die Verteilungsform der diffusen und spekularen Helligkeitswerte einer gemessenen BRDF. Bei synthetisch erstellten entspricht diese exakt der Ashikhmin-Funktion und das Verfahren hatte daher keine Schwierigkeiten, die verwendeten Parameterwerte zu approximieren. Die zur Verfügung stehenden Messdaten sind komplexer aufgebaut, da sie einem realen Material und keiner mathematischen Funktion entsprechen. In Abb. 5.1 sind die Unterschiede bei der Verteilungsform zwischen Mess- und Modelldaten zu erkennen.

Das Ashikhmin-Modell kann sich diesen realen Materialien nur annähern. Abhängig davon, ob die Messwerte schon ansatzweise der Modellform ähnelten, war das Verfahren zuverlässiger in der Lage, verwendbare Parameterwerte zu approximieren. Bei einigen Messdaten lief das Verfahren daher insgesamt stabiler als bei anderen. Stabilität beschreibt dabei die Fähigkeit des LMVs, überhaupt schlüssige Parameterwerte zu approximieren. Ob diese Werte nun auch der Qualität der Messdaten genügen, ist von der Leistungsfähigkeit des Ashikhmin-Modells abhängig, die an Hand der Renderings überprüft wurde. Ein weiterer Faktor der Stabilitätsbeeinflussung, stellen die Startwerte dar. Dabei hängt das Verfahren vor allem von einem gut gewählten Wert für den Exponenten-Parameter n_s ab.

Je nach Aufbau der Messdaten kam es vor, dass für verschiedene Startwerte entweder fast die selben oder recht unterschiedliche Endwerte approximiert wurden. Eine Vermutung besteht darin, dass bei den Daten im letzteren Fall, verschiedene lokale Minima existieren, zu denen das Verfahren je nach Startwert hin konvergierte. Ein anderer Grund wäre, dass das Verfahren an einer Stelle im Iterationsverfahren stecken blieb, weil es zu keiner Verbesserung mehr kommen konnte. Die Vorschau mittels OpenGL bot jedoch eine Möglichkeit,

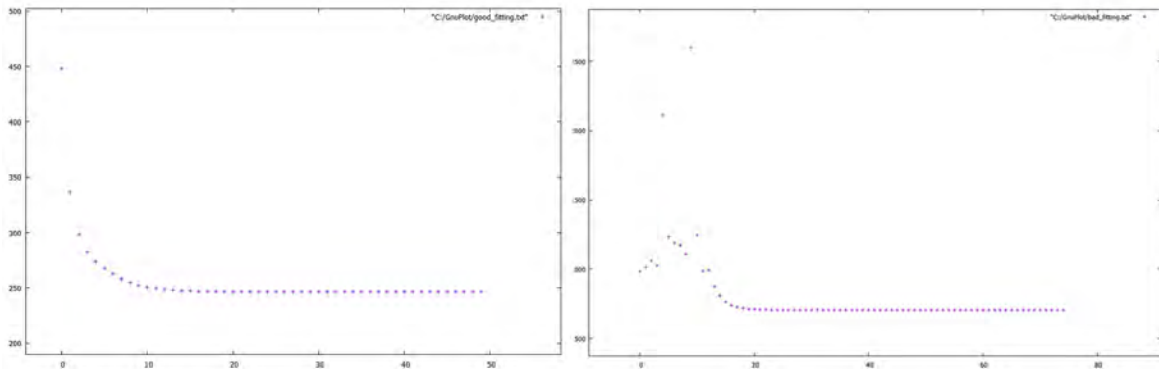


Abbildung 5.2: Links: Verlauf der Fehlerzahl bei einer Approximation, wobei die Abweichungen bei jeder Iteration verbessert werden konnte. Rechts: Sprunghafte Veränderung der Fehlerzahl ist ein Hinweis für eine problematische Approximation.

die Startwerte meistens hinreichend genug abschätzen zu können. Es zeigte sich dabei, dass es vorteilhaft ist, mit einem niedrigeren Wert für n_s zu starten und das Verfahren somit zu einem höheren und passenderen Wert laufen zu lassen. Die Startwerte für c_d und c_s beeinflussten die Approximation kaum und konnten daher bei einem sinnvollen Standardwert, der hierbei auf 0,2 bestimmt wurde, bleiben.

Das modifizierte Verfahren, mit Berücksichtigung des Fresnel-Effekts, zeigte sich äußerst anfällig für schlecht gewählte Startwerte. Daher wurden immer erst die monochromen Parameterwerte mit der Variante ohne Fresnel ermittelt, worauf diese dann als Startwerte für die andere Variante dienten. Dadurch ließen sich in den meisten Fällen Werte für n_s , c_d und c_s , sowie auch R_s approximieren.

Einen zusätzlichen Einfluss zeigte die Gewichtung der Residuumsfunktion. In seltenen Fällen ließ sich dadurch keine vernünftige Approximation durchführen. Vermutlich hat die, mit der Gewichtung zusammenhängende, rapide Verkleinerung der Fehlerwerte im Residuenvektor, eine negative Wirkung auf das Verfahren. Letztendlich müsste dies jedoch noch weiter untersucht werden. In der Regel führten aber die gewichteten, approximierten Werte zu einer geringeren Fehlerzahl. Zur Überprüfung, inwieweit sich die Gewichtung auf die Qualität der approximierten Parameterwerte auswirkt, wurden Renderings mit und ohne deren Einsatz erstellt.

Die Begrenzung, also der maximale Lichteinfall- und Betrachtungswinkel, der vom LMV berücksichtigt werden soll, richtete sich nach der Stelle, ab der es bei den Messdaten zu einer Extrapolation kam. Dieser lag bei 75° , weshalb auch hier die Begrenzung festgelegt wurde. Teilweise sind die Messdaten aber so aufgebaut, dass sich ein Großteil der variablen Helligkeitswerte im Bereich von 0° - 45° befindet. Um zu überprüfen, ob eine Approximation mit einer Begrenzung in diesem Bereich zu besseren Parameterwerten führt, wurden zusätzlich Renderings mit einer 45° Begrenzung erstellt.

Meist ließ sich, neben der optischen Überprüfung, an der Fehlerzahl erkennen, ob das Verfahren erfolgreich eine Approximation durchführen konnte. Die Berechnung dieser Zahl wurde so angepasst, dass eine evtl. Gewichtung bei der Approximation unberücksichtigt

bleibt. Dadurch sind die ermittelten Fehlerzahlen, die mit und ohne Gewichtung entstanden, vergleichbar. Für unterschiedliche Begrenzungen trifft dies jedoch nicht zu. Indem die Fehlerzahlen und die dazugehörigen Renderings verglichen wurden, konnte letztendlich ein Rückschluss über die Aussagekraft dieser Zahl getroffen werden.

Bei Messdaten, mit denen das Verfahren eher problemlos Parameterwerte approximiert, verbesserte sich die Fehlerzahl mit jeder Iteration und konvergierte somit zu einem lokalen oder gar globalen Minimum. Im Gegensatz dazu, gab es problematische Approximationen, bei denen das Verfahren sprunghafte Veränderungen machte, ohne zu einem befriedigenden Ergebnis zu kommen und blieb irgendwann an einer Stelle stecken. In Abb. 5.2 sind beide Fälle anhand eines Plots der Fehlerzahländerungen zu erkennen. Zu einem stabil laufenden Verfahren, führte dann oft eine Änderung der Einstellungen oder Startwerte.

Auf Grund der aufgeführten Probleme beim Verfahren, kann die Parametrisierung durch das Tool nicht automatisch ablaufen. Da nicht verlässlich davon ausgegangen werden kann, dass Modelldaten, Startwerte und Einstellungen für die Approximation passend sind, ist immer eine manuelle Überprüfung der Ergebnisse notwendig.

5.0.2 Optische Analyse

Da die verwendeten Shader lizenztlich nicht zur Verfügung gestellt werden konnten, wurden zur optischen Überprüfung der approximierten Parameterwerte, Renderings durch die kooperierende Firma durchgeführt. Gerendert wurden die verschiedenen gemessenen BRDFs, sowie, für jede davon, mehrere approximierten Modelldaten, mit jeweils unterschiedlich gewählten Startwerten und Einstellungen. Die Klarlackschicht wurde nur bei den Messdaten von Daimler hinzugerechnet. An den Renderings ließ sich letztendlich beurteilen, welchen Einfluss, unterschiedliche Startwerte, eine Klarlackschicht, aktivierte Gewichtung und der Fresnel-Effekt, sowie verschiedene Begrenzungen, auf das Ergebnis haben. Dabei wurden zwei 3D-Modelle mit jeweils eigenem Beleuchtungsszenario eingesetzt. Zum einen wurde ein Ei-Modell genutzt, mit dessen runder Form der Verlauf der Reflexionsstärke zum Rand hin gut erkennbar ist. Die Beleuchtung fand bei diesem Modell mittels einer *Environment Map* statt, die mehr Umgebungsdetails in den Reflexionen erkennen lässt. Zum anderen wurde das Modell eines Audi TTs verwendet. Dabei kam eine typische Studio-Ausleuchtung zum Einsatz. Diese bietet weniger Details in den Reflexionen, entspricht aber einem beliebten Einsatzszenario.

Es folgen einige beispielhafte Ergebnisse, die sowohl erfolgreiche als auch negative Parametrisierungen widerspiegeln. Zunächst werden Kriterien vorgestellt, durch die eine Beurteilung für eine erfolgreiche Parametrisierung möglich ist. Als nächstes wird die Frage nach der Aussagekraft der OpenGL Vorschau geklärt. Zuletzt wird eine Auswahl an Ergebnissen vorgestellt, an denen untersucht wurde:

- Inwieweit sich die Ergebnisse durch unterschiedliche Startwerte und Einstellungen verändern.
- Ob die Fehlerzahl auf eine gute Approximation hinweist.

-
- Welchen Einfluss der Fresnel-Effekt hat, wobei Renderings mit und ohne Klarlack-schicht berücksichtigt wurden.
 - Ob die Leistungsfähigkeit des Ashikhmin-Modells zur Simulation der Messwerte ausreicht.

Die Beurteilungen sind dabei subjektiv anzusehen. Alle Renderings, die dieses Kapitel nicht behandelte, sind im Anhang aufgeführt. Zusätzlich befindet sich dort eine Auflistung aller approximierten Parameterwerte, wobei deren Nummerierungen mit denen der Renderings übereinstimmen.

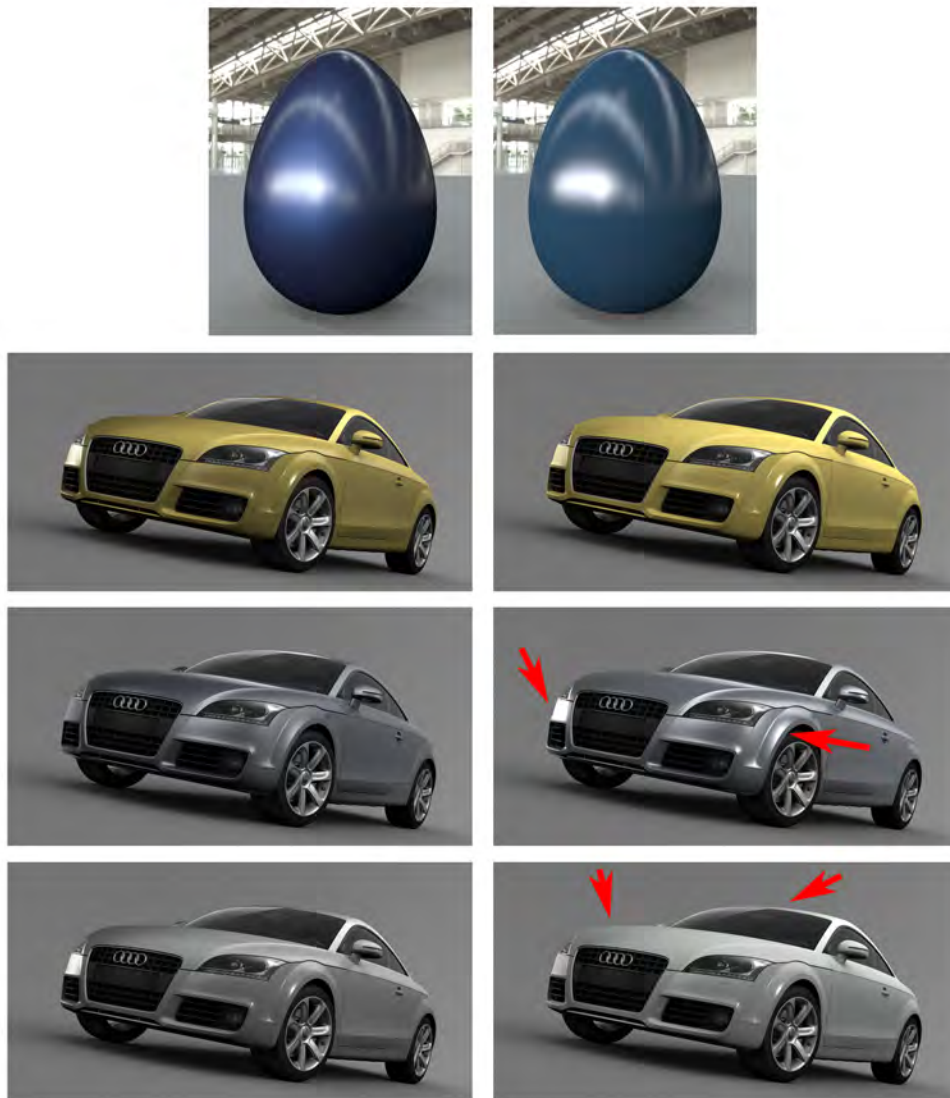


Abbildung 5.3: Mögliche Kriterien zur Beurteilung der Ergebnisse. **Links:** Messdaten. **Rechts:** Approximierte Modelldaten.

In Abb. 5.3 sind Details bzw. Kriterien, auf die bei der Beurteilung der Renderings geachtet werden sollte, sichtbar. Die erste Reihe zeigt, das Ausmaß eines falsch approximierten Farbtons. In der Zweiten scheint der Farbton richtig zu sein, aber der Glanz ist zu intensiv. Beides hängt von den Parameterwerten c_d und c_s für den jeweiligen Farbkanal ab. Auf die Glanzform, die der n_s Wert gestaltet, sollte zusätzlich geachtet werden. Reihe drei zeigt die Folgen einer zu spitz approximierten Glanzform, die besonders an der Frontschürze und am Radkasten des Audi TTs auffallen. Zuletzt sind die Stellen auf dem Dach und der Motorhaube markiert, bei denen der Fresnel-Effekt besonders hervortreten bzw. fehlen kann.

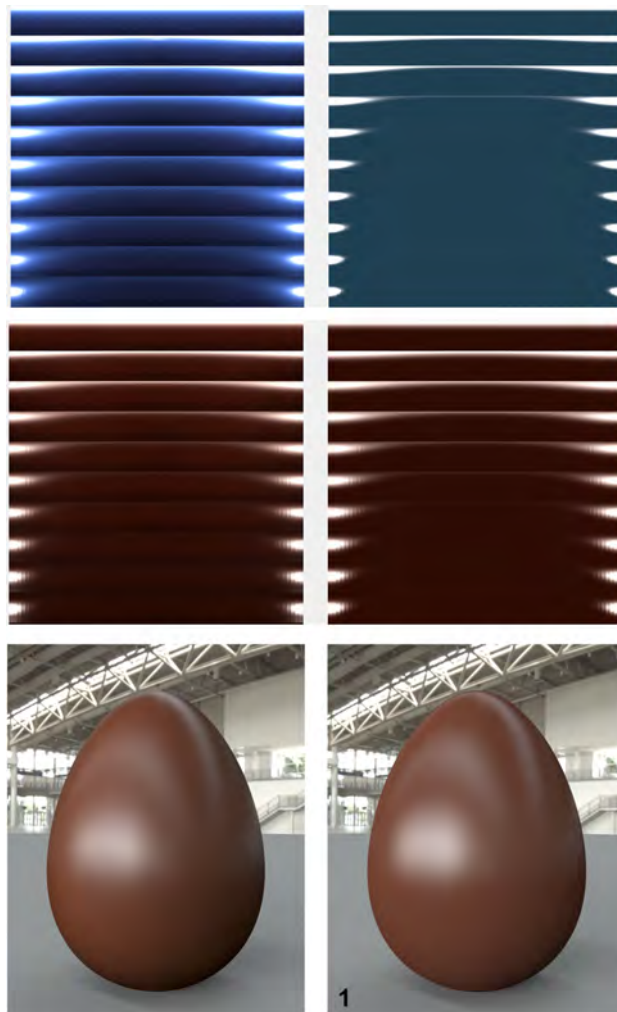


Abbildung 5.4: Vorschau der Farbwerte in OpenGL. **Links:** Messdaten. **Rechts:** Approximierte Modelldaten.

Die Vorschau von Mess- und Modelldaten mittels einer Textur zeigt, dass sich ein falsch approximierter diffuser Farbwert bereits hier erkennen ließ. Die oberste Reihe stellt die Texturen der Datei Audi_SepangBlau dar. Diese Datei wurde ebenfalls für das Rendering der Ei-Bilder von Abb. 5.3 verwendet und ist beispielhaft für ein schlechtes Fitting der Farbe. Der Helligkeitsverlauf der Messdaten scheint dabei recht komplex zu sein, was vermutlich ein Grund für die fehlgeschlagene Parametrisierung darstellt. Die zweite Reihe, mit den Daten von ThyssenKrupp_RedMing, zeigt einen etwas einfacheren Verlauf und ließ sich daher erfolgreicher approximieren, was an den Renderings der dritten Reihe zu sehen ist. Alle vier Texturen wurden in der Prototyp-Applikation aufgehellt. Diese Funktion zeigte sich somit als sehr hilfreich, da die Originaldaten ähnlich dunkel wie in Abb. 4.6 sind.

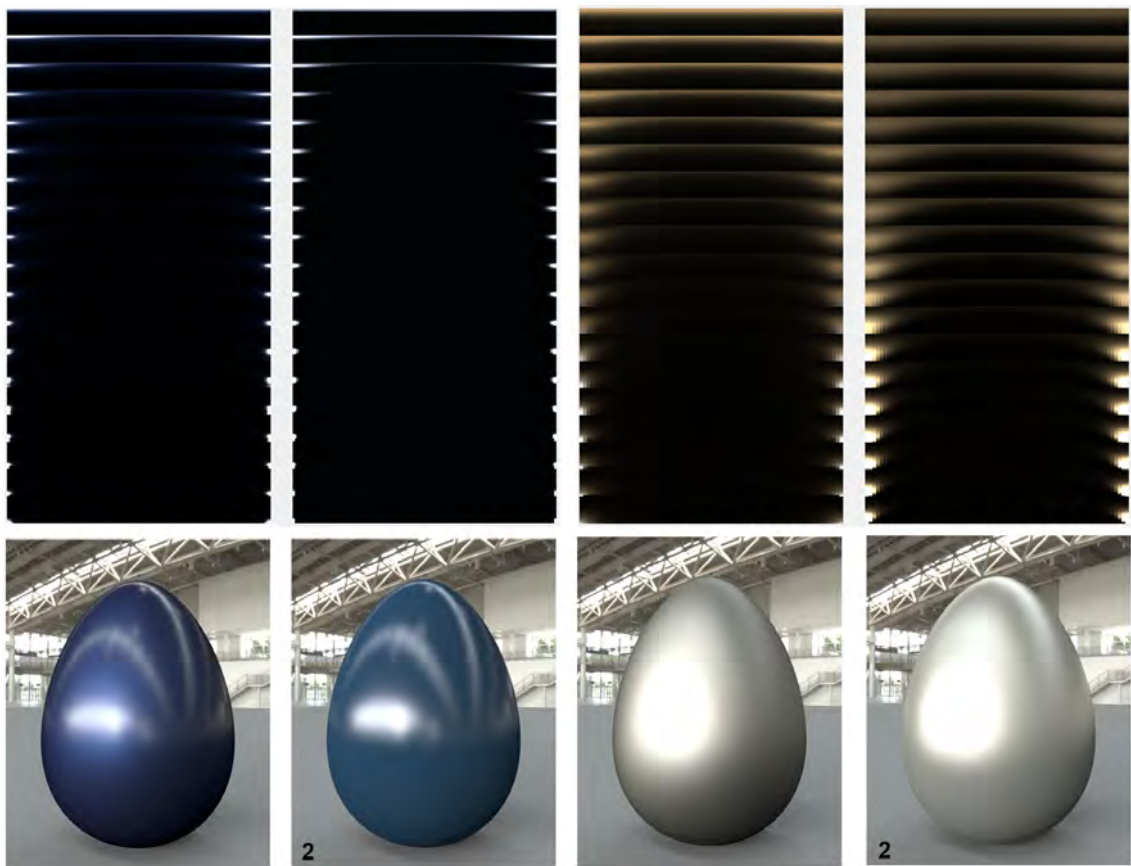


Abbildung 5.5: Vorschau der Glanzverteilung in OpenGL, sowie korrespondierende Renderings. Von links nach rechts: Messdaten Audi_SepangBlau, approximierten Modelldaten, Messdaten ThyssenKrupp_Champagne, approximierten Modelldaten.

Neben den Farbwerten ließ sich in der Vorschau ebenfalls ein Vergleich zu den Unterschieden im Glanzverhalten ziehen. Zuvor wurde gezeigt, dass Audi_SepangBlau sich farblich problematisch zeigt. Das Glanzverhalten konnte aber relativ gut approximiert werden, was im linken Teil der Abb. 5.5 erkennbar ist. Daneben zeigt sich, dass der Glanz von ThyssenKrupp_Champagne nur ansatzweise approximiert wurde. Beim Ei-Rendering ist daher gerade an der Spitze ein zu starker Glanz vernehmbar. Die Glanzlichtform scheint ebenfalls nicht ganz zu stimmen, da die Glanzpunkte spitzer erscheinen. Wird bei Renderings eine Klarlack-schicht hinzugefügt, so wirkt sich ein falsch approximiertes Glanzverhalten, sowohl in Form also auch in Stärke, etwas schwächer auf das gesamte Erscheinungsbild aus.

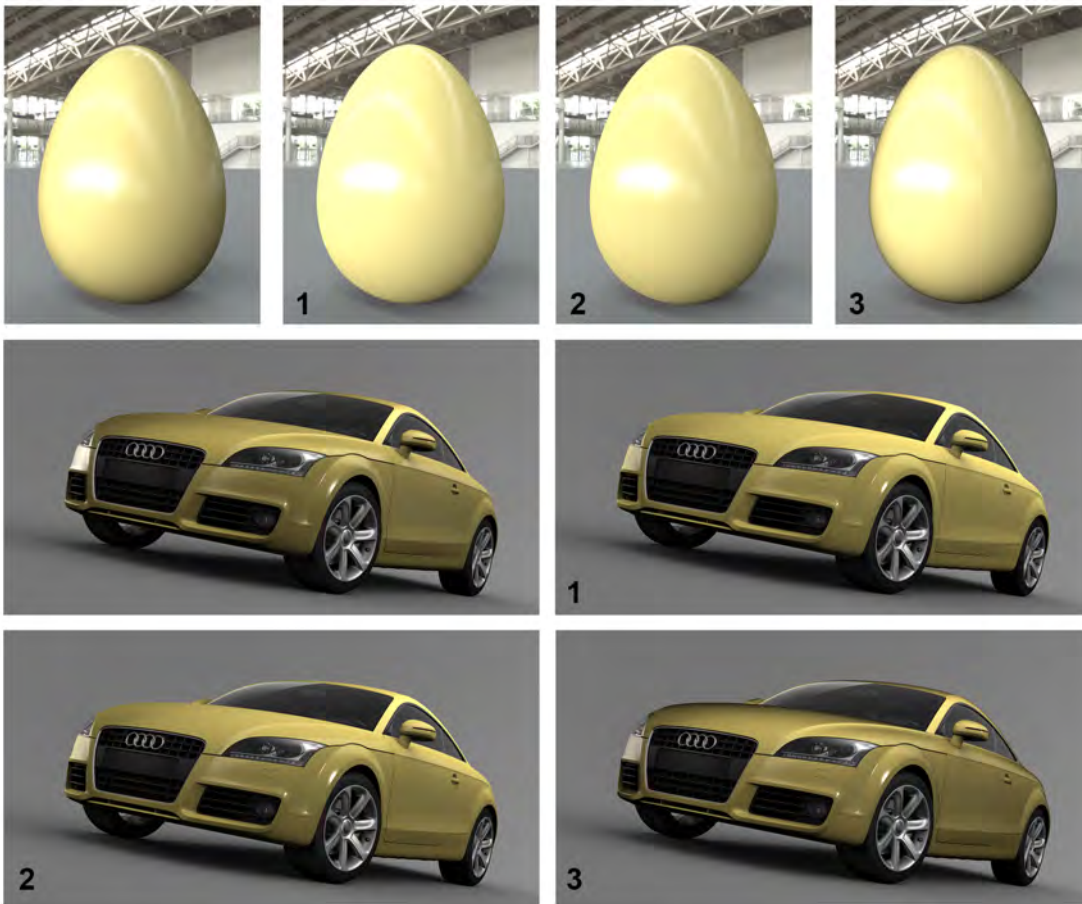


Abbildung 5.6: Mess- und verschiedene Modelldaten von ThyssenKrupp_Lime.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Einstellungen fielen bei der Parametrisierung der Messdaten von ThyssenKrupp_Lime auf. Der Startwert für n_s wurde bei 1 ungünstig gewählt. Dadurch wurde der Endwert zu hoch approximiert und die Glanzform erscheint zu spitz. Im Vergleich dazu wurde bei 2 ein niedrigerer Startwert gewählt und dessen Glanzlichtform stimmt mehr mit dem Original überein. Bei 3 wurde das Verfahren mit Fresnel verwendet. Dabei dienten die Endwerte von 2 als Startwerte. Durch den Fresnel-Effekt gewinnt das Modell an Tiefe, was eher den Modelldaten entspricht. Da keine Klarlackschicht hinzugefügt wurde, ist der Effekt deutlicher zu erkennen. Er ist aber etwas zu stark, gerade am hinteren Rand der Motorhaube. Der Glanz an der linken Frontschürze konnte kaum nachgebildet werden, ebenso nicht der exakte Farbton. 2 und 3 scheinen die bestmögliche Ergebnisse zu bieten, noch eher wenn bei 3 der Fresnel-Effekt runter geregelt werden könnte. Insgesamt sind die Abweichungen der Modelldaten etwas hoch, was sich auch in der durchschnittlichen Fehlerzahl widerspiegelt. Diese ist bei 2 mit 498 am niedrigsten, bei 1 liegt der Wert bei 634, was ebenfalls dem optischen Eindruck nachkommt. Bei 3 scheint der Fresnel-Effekt einen negativen Einfluss auf die Fehlerzahl zu haben und ist mit 529 etwas höher als bei 1.

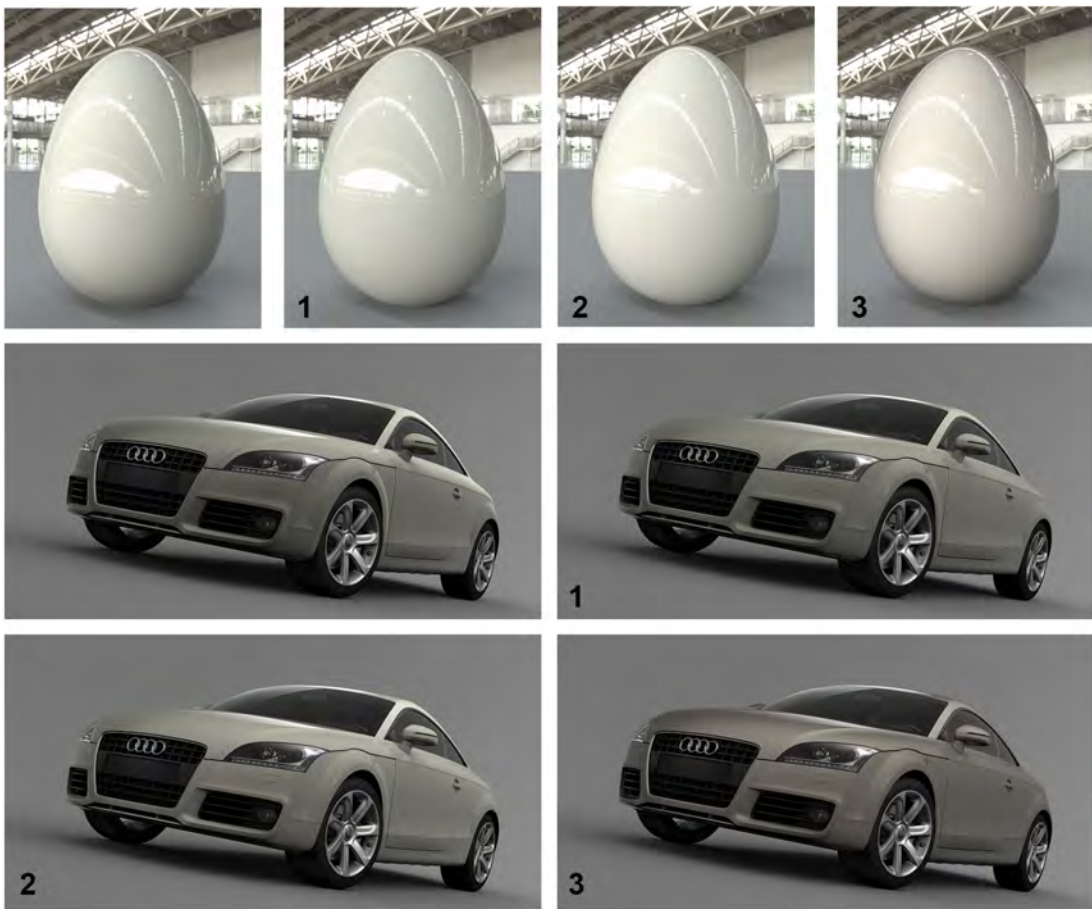


Abbildung 5.7: Mess- und verschiedene Modelldaten von Daimler_Kieselgrau.

Die Parametrisierung der gemessenen BRDF von Daimler_Kieselgrau erwies sich als schwierig. Mit einer verwendeten Gewichtung war dies einer der seltenen Fälle, in denen das Verfahren zu keinen vernünftigen Parameterwerten kam. Ohne Gewichtung wurden Werte approximiert, die nicht immer den Messdaten genügten. Rendering 1 weist mit 362 die niedrigste Fehlerzahl auf, was auch dem optischen Eindruck entspricht. Dabei erscheint der Glanz auf der Haube nicht stark genug und die Farbe etwas dunkler. Der n_s Wert ist bei allen zu hoch, wodurch der Glanzpunkt am vorderen Radkasten zu offensichtlich ist. Bei 2 wurde die Begrenzung auf 45° gesetzt. Der Farbton ist hier ebenfalls wieder zu hell. Der aktivierte Fresnel-Effekt bei 3 ist, trotz der Klarlackschicht, erkennbar. Jedoch nicht so dominant, wie es bei Abb. 5.6 im Rendering 3 ohne Berücksichtigung dieser Schicht der Fall ist. Am Ei-Rendering der Messdaten ist zu sehen, das der linke Rand eher hell ist. Beim Ei-Rendering 3 erwirkt der Fresnel-Effekt aber eine schwarze Umrandung, die so nicht den Messdaten entspricht. Der Fehlerwert ist bei 3 mit 480 daher auch höher als bei 1.

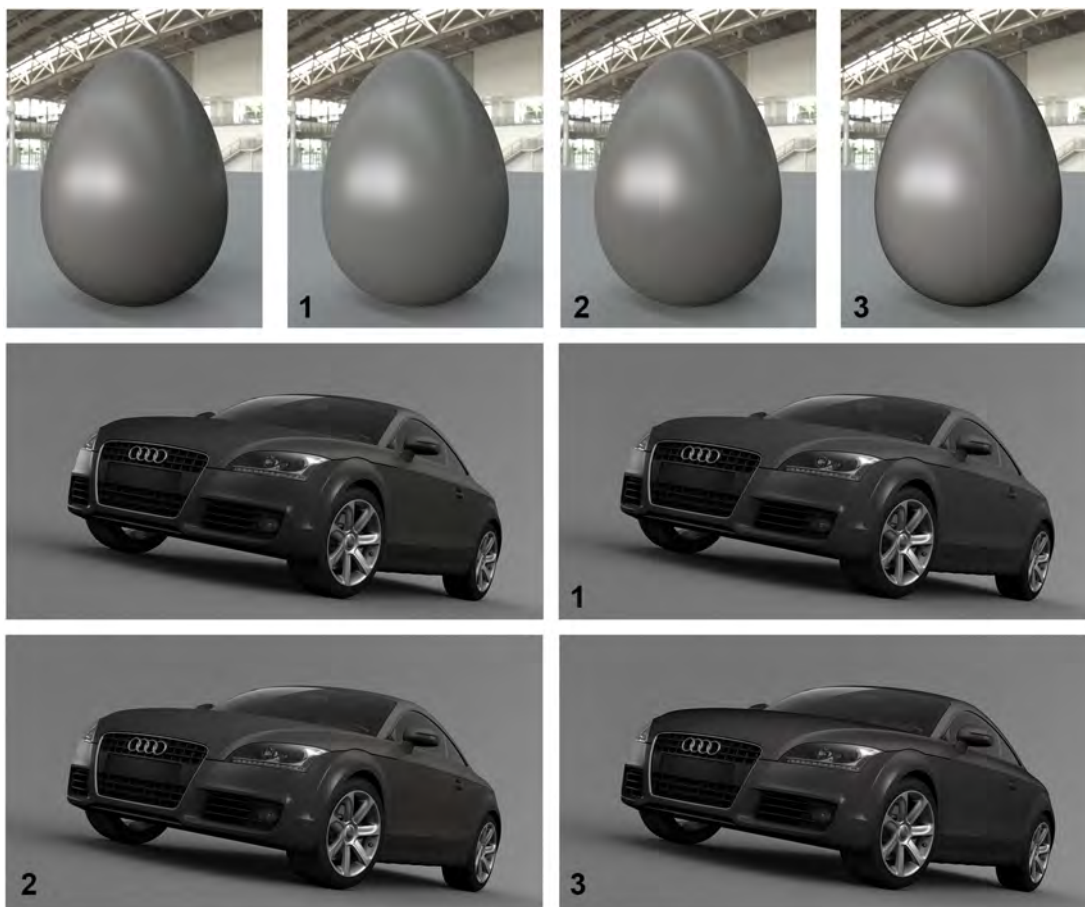


Abbildung 5.8: Mess- und verschiedene Modelldaten von ThyssenKrupp_Iron.

Bei den folgenden Beispielen lief das Verfahren stabiler. Für die Qualität der Ergebnisse waren jedoch auch hier die Startwerte und Einstellungen entscheidend. Bei den Messdaten von ThyssenKrupp_Iron wurde zunächst mit Gewichtung das Ergebnis 1 erlangt, das bei den Ei-Renderings minimal heller als das Original erscheint. 2 wurde ohne Gewichtung und mit den selben Startwerten berechnet und wirkt dunkler als 1. Die Fehlerzahl ist auch mit 137 etwas kleiner als bei 1 mit 140. Bei den Audi TT-Renderings ist der Unterschied minimal. Dennoch ist dies einer der wenigen Fällen, bei denen die Gewichtung eine Verschlechterung herbeiführt, wenn auch kaum wahrnehmbar. Glanzstärke und -Form scheint bei allen Modelldaten leicht abzuweichen. 1 und 2 ähneln schon sehr den Messdaten, es fehlt aber, gerade an der Motorhaube, an Tiefe. Der verwendete Fresnel-Effekt bei 3 ist zwar etwas zu präsent, trotzdem ist mit einer Fehlerzahl von 44 hier die mathematisch beste Approximation entstanden.

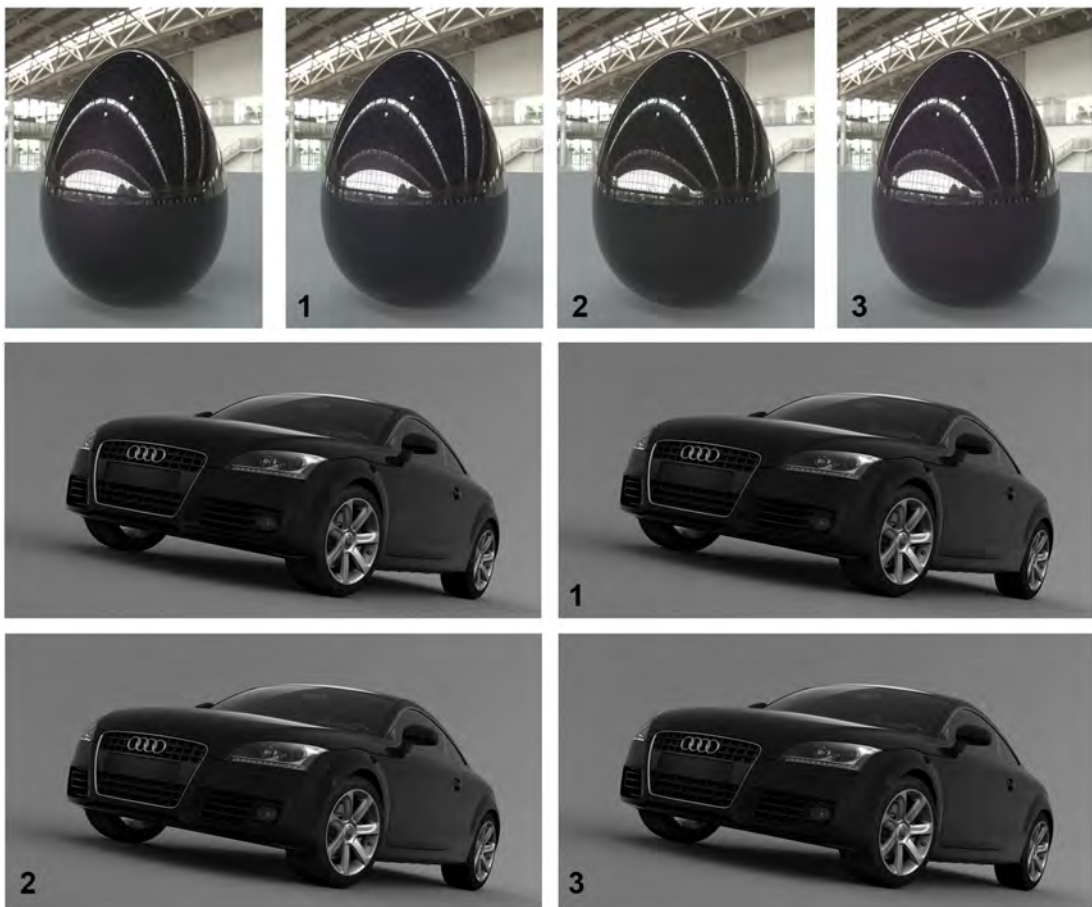


Abbildung 5.9: Mess- und verschiedene Modelldaten von Daimler_NordlichtViolett.

Bei Daimler_NordlichtViolett fällt zunächst auf, dass eine sehr dunkle Farbe, kombiniert mit einer Klarlackschicht, dazu führt, dass der Fresnel-Effekt von 3 nicht sichtbar ist. Bei Ei-Rendering 3 ist ebenfalls zu sehen, dass die Begrenzung von 45° wieder dazu führte, dass der Farbton zu hell approximiert wurde. Bei 2 sind die Glanzlichter am Radkasten zu spitz, hier wurde mit 250 ein zu hoher Startwert für n_s gewählt, als im Vergleich zu 1 mit 25. Außerdem ist nur bei 1 die Gewichtung aktiviert worden. Das Ergebnis von 1 ist optisch nahe an den Messdaten, was sich auch in der Fehlerzahl von 10 widerspiegelt. Am Ei-Rendering ist erkenntlich, dass der Helligkeitsverlauf zum Rand hin nicht so wie bei den Messdaten nachgebildet werden kann.

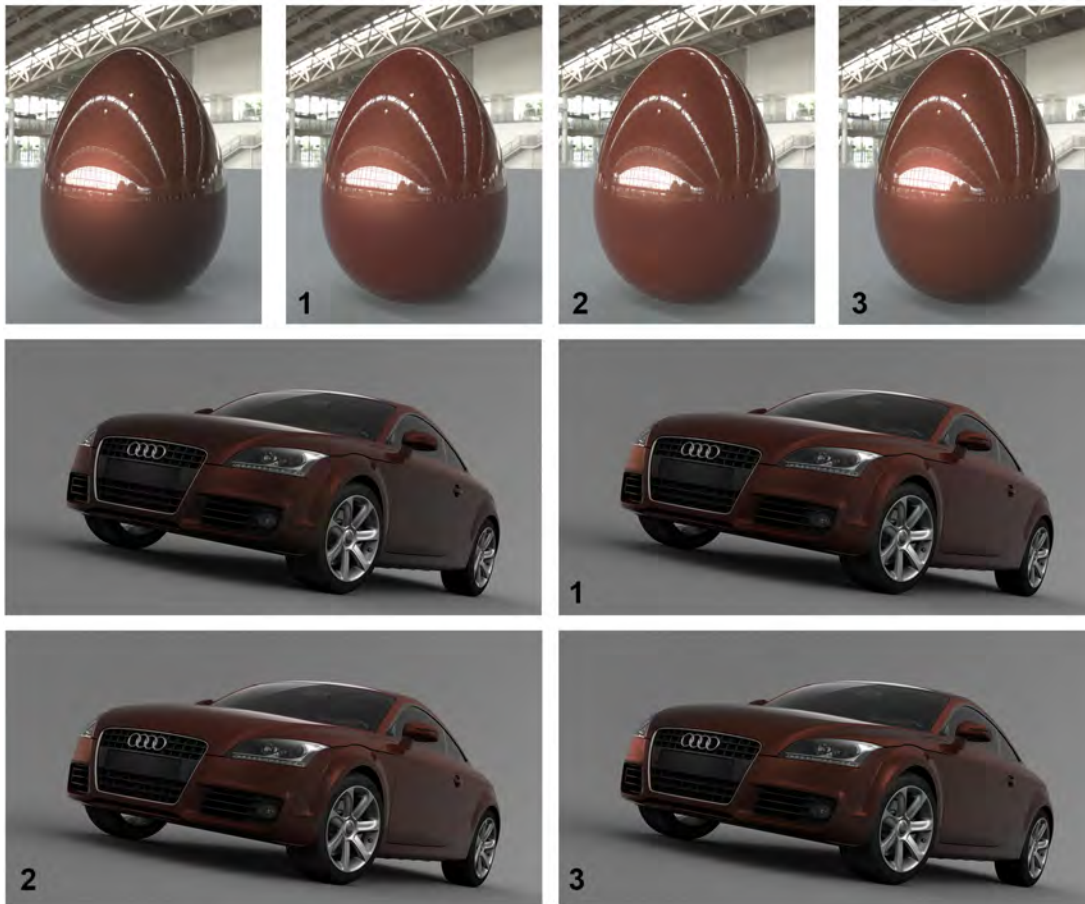


Abbildung 5.10: Mess- und verschiedene Modelldaten von Daimler_BornitRot.

Bei Daimler_BornitRot fällt der spezielle Helligkeitsverlauf im Ei-Rendering besonders stark auf. Selbst mit Fresnel-Effekt bei 3 kann dieser Verlauf nicht nachgebildet werden, die Begrenzung von 45 führt zusätzlich zu einem helleren Farbton. Zum Rand hin verringert sich die Helligkeit bei allen Modelldaten zu schleppend, daher sind die Renderings dort etwas zu hell. Bei 1 wurde mit 25 ein besserer Startwert für n_s gewählt als bei 2 mit 50. Die Glanzlichtform ist daher bei 2 etwas zu spitz. Der Fresnel-Effekt bei 3 ist auch hier wegen der Klarlackschicht kaum wahrnehmbar, verbessert aber die Annäherung beim Ei-Rendering. 1 liefert ein gutes optisches und mathematisches Ergebnis mit einer Fehlerzahl von 89, verglichen mit 127 bei 2. Der langsame Helligkeitsverlauf verhindert ein besseres Ergebnis, was sich gerade an der Frontschürze links erkennen lässt, die zu hell ist.

5.0.3 Schlussfolgerung

Die subjektive Beurteilung der Renderings, und damit auch verbunden die des Verfahrens und des Ashikhmin-Modells, basiert auf Renderings mit nur zwei Beleuchtungsszenarien. Andere Szenarien oder Animationen mit bewegten Lichtquellen würden mehr Informationen zum Reflexionsverhalten liefern, standen aber nicht zur Verfügung. Die Textur Vorschau mittels OpenGL bewies sich als hilfreich. Passende Startwerte können damit vor einer Approximation ermittelt werden. Zusätzlich lassen sich, bei einer negativen Berechnung, extreme Abweichungen im Glanzverhalten sowie bei der Farbe erkennen. Subtilere Abweichungen sind in der Vorschau kaum sichtbar, können im Rendering aber zu offensichtlicheren Unterschieden führen. Die Fehlerzahl wies recht zuverlässig auf eine erfolgreiche Parametrisierung hin. Im Rendering erschien der subjektive Eindruck in seltenen Fällen anders, daher kann die Zahl nicht zuverlässig als alleiniges Hauptmerkmal geltend gemacht werden.

Durch die Renderings ließ sich zunächst feststellen, dass in den Bildern keine Artefakte oder sonstige negative Eigenschaften bei den Messdaten erkennbar sind. Eventuell erscheinen diese durch andere Aufnahmeszenarien. Somit ist der Vorteil einer Parametrisierung hierbei in erster Linie durch die Flexibilität des Ashikhmin-Shaders gegeben.

Das Ashikhmin-Modell, und somit auch der Shader, konnte qualitativ jedoch nicht exakt den Messdaten genügen. Diese wirken bei den Helligkeitsverläufen zu den Rändern hin wesentlich plastischer, was vor allem bei Daimler_BornitRot und Daimler_NordlichtViolett auffällt. Man kann vermuten, dass der Aufbau der Messdaten, je nach Material, recht komplex ist. Das Ashikhmin-Modell kann daher solche Materialien, selbst mit Fresnel-Effekt, nur bedingt simulieren. Mit diesem Effekt wird der erweiterte diffuse Anteil von Ashikhmin, bei dem der Farbton abnimmt, je größer der Winkel zwischen Betrachtungs- und Flächennormalenvektor wird, eingesetzt. Diese Variante des Modells zeigte sich zumindest realistischer als das Lambert-Modell, da in diesen Fällen der Helligkeitsverlauf zum Rand hin stärker abnahm.

Die Parametrisierung war somit zunächst vom Aufbau der Messdaten abhängig. Kam dieser dem Modell nahe, so gelang die Parametrisierung recht erfolgreich, wie bspw. bei ThyssenKrupp_RedMing zu sehen ist. War der Aufbau zu komplex, wurden nur bedingt verwertbare Parameterwerte approximiert.

Die Glanzform wurde eher passend approximiert, im Gegensatz dazu schien die Stärke des Glanzes und der diffusen Reflexion mehr Probleme zu bereiten.

Der Startwert für n_s zeigte sich dabei nicht nur entscheidend für dessen approximierten Endwert, sondern zusätzlich auch für die jeweiligen Endwerte von c_d und c_s . Dies gilt für beide Stufen des Verfahrens. Ein zu hoher Startwert war dabei eher problematisch. Daher sollte dieser zunächst niedrig angesetzt und bei einem negativen Fitting erhöht werden.

Die Begrenzung war mit 75° passend gewählt. Den Bereich auf 45° zu verringern führte dazu, dass die diffuse Helligkeit zu stark wurde, und sollte daher vermieden werden.

Bei aktivierter Gewichtung kam es, je nach Art der Messdaten, evtl. zu einer Instabilität des Verfahrens. Gleichwohl wurden bessere Ergebnisse bei aktivierter Gewichtung erlangt, obwohl bei der Textur Vorschau teilweise ein anderer Eindruck entstand.

Durch den Einsatz der Modell Variante mit Fresnel-Term wurde deutlich, dass sich dieser

Effekt ohne Klarlackschicht zu stark hervortat, aber dennoch half, das 3D-Modell plastischer darzustellen. Mit einer Klarlackschicht war der Effekt schwach präsent, konnte aber gerade bei hellen Farben den Gesamteindruck verbessern. Somit ist der Einsatz des Fresnel-Terms im Ashikhmin-Modell vom Anwendungsbereich abhängig.

Dass das Ashikhmin-Modell nicht vollständig die Messdaten rekonstruieren konnte, bestätigt die Ergebnisse von Ngan et al., bei denen das Modell auch nur bedingt den Messdaten gerecht wurde. Ob die Qualität des Modells trotzdem ausreicht, kommt auch hier auf den Anspruch des Anwendungsbereichs an. Der geplante Einsatz des Verfahrens in einer Produktion, bei der automatisch zwischen Mess- und Modelldaten gewechselt werden kann, erwies sich in dieser Form als nicht durchführbar. Dazu ist das Verfahren, bei unpassenden Messwerten, zu instabil. Außerdem bedarf es unter Umständen einiger manueller Versuche mit Startwert- und Einstellungsänderungen, bis erfolgreich passende Parameterwerte gefunden werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich das angestrebte Ziel dieser Arbeit, eine Parametrisierung der aufbereiteten Messdaten mittels Ashikhmin-Modell und LMV durchzuführen, als machbar zeigte. Wodurch auch die erhofften Vorteile der Flexibilität erreicht wurden. Jedoch erlauben die Messdaten-abhängige Instabilitäten des Verfahrens, deren Ursache in dieser Arbeit nicht geklärt werden konnte, sowie die unterlegene Qualität des Ashikhmin-Modells, keinen praktischen Einsatz in einer Produktion.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Gemessene BRDFs können Messfehler enthalten, die im Rendering durch Rauschen und Artefakte sichtbar werden. Außerdem haben die Messdaten einen relativ hohen Speicherbedarf und sind in ihrem Erscheinungsbild kaum veränderbar. Diese Flexibilität gilt es jedoch hauptsächlich zu erlangen. Das analytische BRDF-Modell von Ashikhmin kommt mit wenigen Parametern aus, durch die sich die Reflexionseigenschaften eines simulierten Materials beliebig verändern lassen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob das Modell ausreichend genug die hohe Qualität der aufbereiteten Messdaten nachbilden kann. In der Arbeit von Ngan et al. wurde bereits ermittelt, dass das Ashikhmin-Modell eines der leistungsfähigeren BRDF-Modelle ist, wobei trotzdem Abweichungen teilweise deutlich sichtbar waren.

Um die Parameterwerte des Ashikhmin-Modells an die Messdaten anzufitten, wurde das Levenberg-Marquardt Verfahren (LMV) implementiert. Als entscheidend für die Stabilität und Ergebnisse des Verfahrens zeigte sich dabei die Residuumsfunktion. Die absolute Abweichung von dem jeweiligen Mess- und Modellwert, unter Berücksichtigung gleicher Winkelpositionen und Lichtwellenbereiche, ist die Basis dieser Funktion. Erweitert wurde diese um Gewichtungen, die den verwendeten Lichteinfall- und Raumwinkel bei jedem Messwert berücksichtigten. Die letztlich daraus resultierende Fehlerzahl erwies sich als ein wichtiger Anhaltspunkt für die Güte der approximierten Parameterwerte.

Da der im Rendering verwendete Shader leicht vom ursprünglichen Ashikhmin-Modell abweicht, musste das Modell angepasst werden. Diese angepasste Variante führte jedoch zu Instabilitäten beim LMV. Eine vollständige Antwort auf die Ursachen dieses Problems, kann mit dieser Arbeit nicht gegeben werden. Das Modell wurde darauf vereinfacht, so dass kein Fresnel-Term mehr berücksichtigt wurde. Somit wechselte auch der erweiterte diffuse Anteil zum einfacheren Lambert-Modell. Diese Modell-Variante zeigt sich stabil lauffähig und liefert passende Parameterwerte. Das instabile Ashikhmin-Modell konnte mittels eines Brute-Force-Verfahrens doch noch zur Parametrisierung verwendet werden, und dient so zumindest dazu, Vergleiche zum vereinfachten Modell zu ziehen.

Um die approximierten Parameterwerte bereits vor einem Rendering bewerten zu können, wurde zu diesem Zweck eine Vorschau implementiert, bei der mittels OpenGL die Helligkeitswerte der Mess- und Modelldaten als Textur dargestellt werden. Daraus ergibt sich, dass durch diese Vorschau bereits eine Aussage über die Qualität der Approximation, be-

sonders im Bezug auf Farbton und Glanzform, gegeben werden kann. Mit der Vorschau und Fehlerzahl stehen somit zwei Kriterien zur Verfügung, die auf ein gutes Fitting hinweisen können.

Die Güte der Parametrisierung konnte aber erst durch Renderings abschließend bewertet werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen zunächst, dass die aufbereiteten Messdaten kein Rauschen oder Artefakte verursachen. Somit liegt bei diesen Messdaten der Vorteil einer Parametrisierung allein in der Flexibilität des Ashikhmin-Modells. Aus den Renderings der Modelldaten lässt sich beurteilen, dass das BRDF-Modell von Ashikhmin nur bedingt die komplexen Verläufe der Messdaten nachbilden konnte. Die Modell-Variante mit Fresnel-Effekt kam dabei näher an diese Verläufe heran, wobei der Effekt teilweise zu stark war. Der Erfolg der Parametrisierung war gebunden an den Messdaten, wodurch sich zeigt, dass das Verfahren abhängig von der Komplexität des vermessenen Materials ist. Zudem besteht eine starke Abhängigkeit von der Startwertwahl, daher muss die Approximation teilweise nach der Trial-and-Error-Methode durchgeführt werden.

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen abschließend, dass die Parametrisierung von gemessenen und aufbereiteten BRDFs, mit Hilfe des analytischen BRDF-Modells von Ashikhmin und dem Levenberg-Marquardt Optimierungsverfahren, durchführbar ist. Die Methodik jedoch zu instabil für eine Automatisierung ist und das Ashikhmin-Modell nicht dem Detailreichtum der Messdaten gerecht wird.

Das Resultat dieser Arbeit liefert einige Möglichkeiten für Untersuchungen und Erweiterungen. So stellt sich die Frage, wie Modelldaten, die die Messdaten exakter nachbilden, generiert werden könnten. Ausgehend von den bisherigen Ergebnissen wäre zu untersuchen, weshalb das Verfahren den Glanz und die Helligkeit teilweise zu hoch ermittelt. Die gesamte erzeugte Helligkeit könnte auf einen Wert begrenzt werden, der sich durch eine Analyse der Messwerte bestimmen lässt. Eventuell ließe sich dies auch für den Glanz umsetzen.

Da die Renderings mit Fresnel-Effekt je nach Anwendungsbereich plastischer wirken, wäre es lohnenswert zu untersuchen, wie diese Modell-Variante stabil in das LMV implementiert werden kann. Wobei ein hinzugefügter Parameter evtl. hilfreich wäre, um die Stärke des Effekts stufenlos zu variieren.

Es ließe sich auch untersuchen, ob das Ashikhmin-Modell mit mehreren Glanzlichtkeulen dazu führt, dass die Form der Messdaten exakter nachgebildet werden. Wobei die Flexibilität des Modells jedoch leiden würde.

Die Implementation anderer analytischer BRDF-Modelle könnte dazu führen, dass ein passenderes für die Messdaten gefunden wird. Zudem könnten mehrere Modelle miteinander verglichen werden.

Die Vorschau der approximierten Parameterwerte in der Prototyp-Applikation könnte dahingehend erweitert werden, dass bereits im Vorfeld ein einfaches Rendering zur Verfügung steht. Auch könnten die Glanzlichtkeulen von Mess- und Modelldaten visuell dargestellt und verglichen werden.

Zuletzt stellt sich die Frage, ob eventuell eine anders gewichtete Residuumsfunktion im LMV zu besseren Approximationen führt. Es könnten allerdings auch andere Optimierungsverfahren, wie z. B. *Simulated Annealing*, implementiert und deren Ergebnisse mit dem LMV verglichen werden.

Anhang A

Renderings und approximierte Parameterwerte

A. RENDERINGS UND APPROXIMIERTE PARAMETERWERTE



Abbildung A.1: Audi_SepangBlau

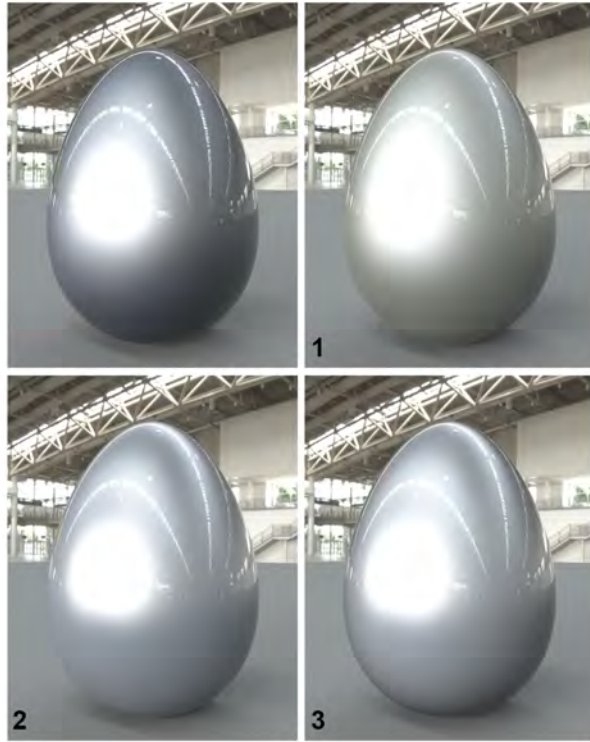


Abbildung A.2: Daimler_DiamantSilber

A. RENDERINGS UND APPROXIMIERTE PARAMETERWERTE



Abbildung A.3: Daimler_PfefferGrün

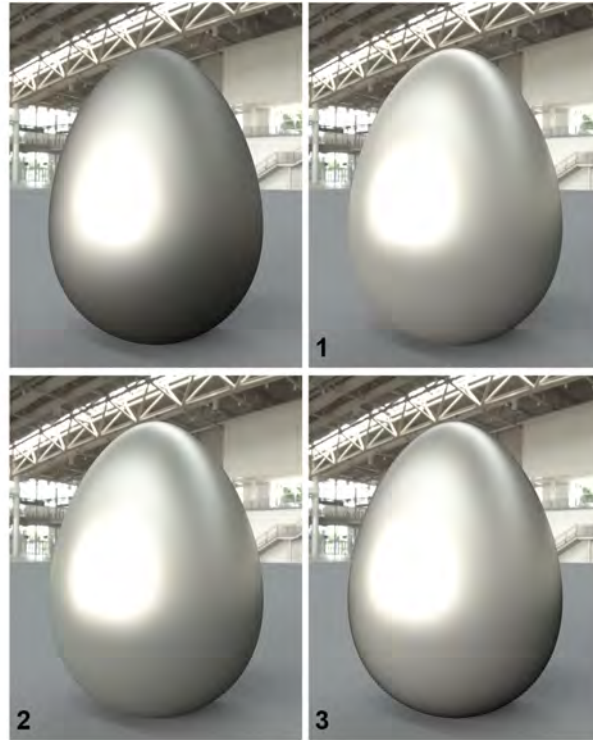


Abbildung A.4: ThyssenKrupp_Champagne

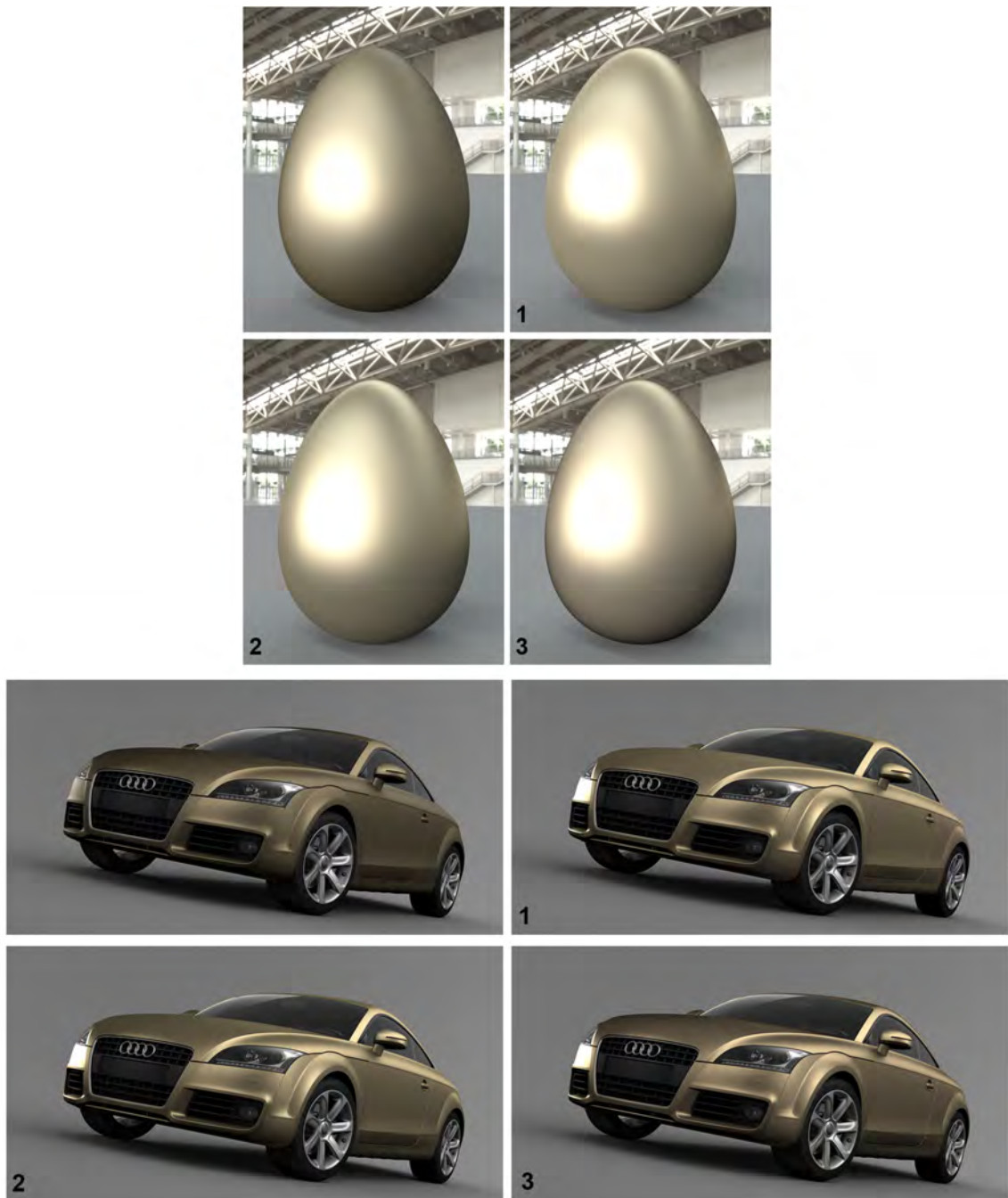


Abbildung A.5: ThyssenKrupp_Gold

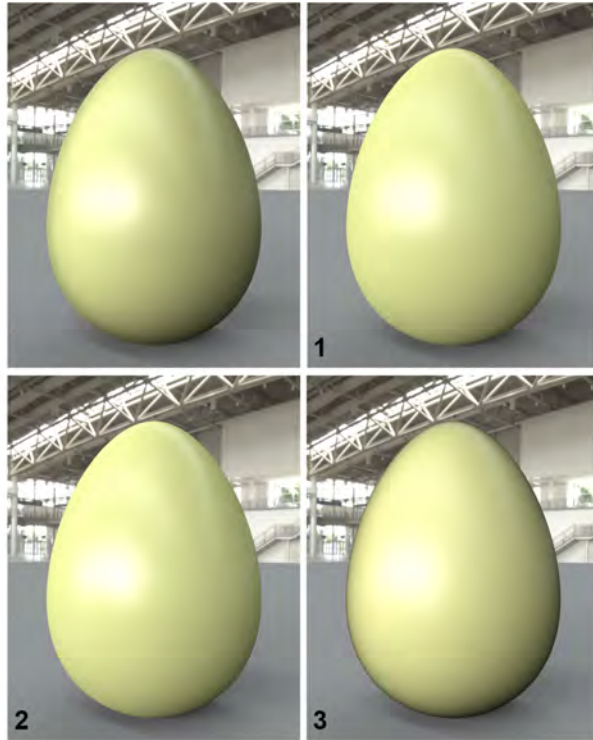


Abbildung A.6: ThyssenKrupp_GreenApple



Abbildung A.7: ThyssenKrupp_RedMing

Audi SepangBlau

1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein
Begrenzung	75	Begrenzung	45	Begrenzung	45
START	-----	START	-----	START	-----
n	25	n	250	n	534.991
END	-----	END	-----	END	-----
n	1299	n	534.991	n	632.084
CdR	0.025	CdR	0.009	CdR	0.021
CdG	0.043	CdG	0.031	CdG	0.047
CdB	0.063	CdB	0.061	CdB	0.137
CsR	0.036	CsR	0.05	CsR	0.08
CsG	0.036	CsG	0.051	CsG	0.08
CsB	0.035	CsB	0.058	CsB	0.088
ERROR	1522.06	ERROR	462.03	ERROR	424.29

Daimler BornitRot

1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	ja	Gewichtung	nein
Begrenzung	75	Begrenzung	75	Begrenzung	45
START	-----	START	-----	START	-----
n	25	n	50	n	53.038
END	-----	END	-----	END	-----
n	53.038	n	143.714	n	105.142
CdR	0.057	CdR	0.074	CdR	0.072
CdG	0.012	CdG	0.017	CdG	0.02
CdB	0.009	CdB	0.012	CdB	0.012
CsR	0.045	CsR	0.025	CsR	0.066
CsG	0.018	CsG	0.012	CsG	0.022
CsB	0.012	CsB	0.008	CsB	0.017
ERROR	89.35	ERROR	126.534	ERROR	97.79

Daimler Kieselgrau

1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	nein	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein
Begrenzung	75	Begrenzung	45	Begrenzung	75
START	-----	START	-----	START	-----
n	250	n	250	n	664.192
END	-----	END	-----	END	-----
n	664.192	n	1121.13	n	450.880
CdR	0.343	CdR	0.417	CdR	0.398
CdG	0.339	CdG	0.411	CdG	0.374
CdB	0.299	CdB	0.366	CdB	0.334
CsR	0.002	CsR	0.001	CsR	0.002
CsG	0.002	CsG	0.001	CsG	0.002
CsB	0.002	CsB	0.001	CsB	0.002
ERROR	362.254	ERROR	51.757	ERROR	480.088

Daimler NordlichtViolett

1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein
Begrenzung	75	Begrenzung	75	Begrenzung	45
START	-----	START	-----	START	-----
n	25	n	250	n	872.007
END	-----	END	-----	END	-----
n	117.626	n	872.007	n	105.142
CdR	0.005	CdR	0.007	CdR	0.072
CdG	0.005	CdG	0.007	CdG	0.02
CdB	0.007	CdB	0.007	CdB	0.012
CsR	0.005	CsR	0.001	CsR	0.066
CsG	0.004	CsG	0.001	CsG	0.022
CsB	0.005	CsB	0.002	CsB	0.017
ERROR	10.423	ERROR	15.702	ERROR	25.002

Daimler DiamantSilber

1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein
Begrenzung	75	Begrenzung	45	Begrenzung	45
START	-----	START	-----	START	-----
n	25	n	250	n	21.094
END	-----	END	-----	END	-----
n	21.094	n	143.714	n	66.482
CdR	0.122	CdR	0.074	CdR	0.181
CdG	0.129	CdG	0.017	CdG	0.195
CdB	0.117	CdB	0.012	CdB	0.214
CsR	0.333	CsR	0.025	CsR	0.319
CsG	0.334	CsG	0.012	CsG	0.317
CsB	0.347	CsB	0.008	CsB	0.327
ERROR	934.693	ERROR	126.534	ERROR	128.965

Daimler PfefferGrün

1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	ja
Begrenzung	75	Begrenzung	45	Begrenzung	75
START	-----	START	-----	START	-----
n	25	n	50	n	383.179
END	-----	END	-----	END	-----
n	383.179	n	863.356	n	1634.62
CdR	0.289	CdR	0.315	CdR	0.329
CdG	0.269	CdG	0.293	CdG	0.299
CdB	0.12	CdB	0.132	CdB	0.138
CsR	0.002	CsR	0.001	CsR	0.001
CsG	0.002	CsG	0.001	CsG	0.001
CsB	0.002	CsB	0.002	CsB	0.001
ERROR	239.943	ERROR	377.516	ERROR	335.553

Abbildung A.8: Approximierte Parameterwerte

A. RENDERINGS UND APPROXIMIERTE PARAMETERWERTE

ThyssenKrupp_Champagne						ThyssenKrupp_Gold					
1		2		3		1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja	Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein	Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein
Begrenzung	75	Begrenzung	45	Begrenzung	45	Begrenzung	45	Begrenzung	75	Begrenzung	75
START	-----	START	-----	START	-----	START	-----	START	-----	START	-----
n	50	n	25	n	51.589	n	25	n	25	n	34.387
END	-----	END	-----	END	-----	END	-----	END	-----	END	-----
n	52.856	n	51.589	n	53.022	n	49.817	n	34.387	n	35.596
CdR	0.188	CdR	0.144	CdR	0.197	CdR	0.164	CdR	0.108	CdR	0.148
CdG	0.183	CdG	0.147	CdG	0.191	CdG	0.145	CdG	0.097	CdG	0.127
CdB	0.166	CdB	0.133	CdB	0.175	CdB	0.102	CdB	0.066	CdB	0.095
CsR	0.317	CsR	0.366	CsR	0.411	CsR	0.296	CsR	0.38	CsR	0.403
CsG	0.303	CsG	0.342	CsG	0.39	CsG	0.255	CsG	0.329	CsG	0.341
CsB	0.275	CsB	0.31	CsB	0.352	CsB	0.183	CsB	0.232	CsB	0.237
ERROR	191.317	ERROR	163.001	ERROR	134.136	ERROR	122.011	ERROR	130.408	ERROR	130.77

ThyssenKrupp_Iron						ThyssenKrupp_Lime					
1		2		3		1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja	Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	ja	Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein
Begrenzung	75	Begrenzung	75	Begrenzung	75	Begrenzung	75	Begrenzung	75	Begrenzung	75
START	-----	START	-----	START	-----	START	-----	START	-----	START	-----
n	25	n	25	n	143.280	n	500	n	250	n	767.596
END	-----	END	-----	END	-----	END	-----	END	-----	END	-----
n	143.280	n	146.673	n	169.156	n	1388	n	767.596	n	786.613
CdR	0.091	CdR	0.085	CdR	0.114	CdR	0.575	CdR	0.502	CdR	0.607
CdG	0.091	CdG	0.082	CdG	0.109	CdG	0.498	CdG	0.433	CdG	0.518
CdB	0.087	CdB	0.078	CdB	0.105	CdB	0.2	CdB	0.17	CdB	0.205
CsR	0.034	CsR	0.037	CsR	0.035	CsR	0.024	CsR	0.035	CsR	0.048
CsG	0.034	CsG	0.036	CsG	0.035	CsG	0.024	CsG	0.034	CsG	0.046
CsB	0.034	CsB	0.036	CsB	0.036	CsB	0.024	CsB	0.033	CsB	0.048
ERROR	139.63	ERROR	136.661	ERROR	442.073	ERROR	634.116	ERROR	497.633	ERROR	528.729

ThyssenKrupp_GreenApple						ThyssenKrupp_RedMing					
1		2		3		1		2		3	
Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja	Fresnel	nein	Fresnel	nein	Fresnel	ja
Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	ja	Gewichtung	nein	Gewichtung	nein	Gewichtung	ja
Begrenzung	75	Begrenzung	45	Begrenzung	75	Begrenzung	75	Begrenzung	45	Begrenzung	75
START	-----	START	-----	START	-----	START	-----	START	-----	START	-----
n	25	n	250	n	103.120	n	100	n	25	n	383.179
END	-----	END	-----	END	-----	END	-----	END	-----	END	-----
n	103.120	n	133.060	n	85.221	n	128.811	n	127.507	n	120.383
CdR	0.377	CdR	0.397	CdR	0.423	CdR	0.079	CdR	0.096	CdR	0.094
CdG	0.395	CdG	0.417	CdG	0.427	CdG	0.024	CdG	0.03	CdG	0.028
CdB	0.16	CdB	0.17	CdB	0.182	CdB	0.013	CdB	0.017	CdB	0.014
CsR	0.038	CsR	0.046	CsR	0.055	CsR	0.035	CsR	0.032	CsR	0.062
CsG	0.038	CsG	0.045	CsG	0.05	CsG	0.035	CsG	0.031	CsG	0.062
CsB	0.042	CsB	0.043	CsB	0.057	CsB	0.035	CsB	0.03	CsB	0.062
ERROR	427.979	ERROR	100.681	ERROR	455.274	ERROR	94.947	ERROR	184.467	ERROR	111.28

Abbildung A.9: Approximierte Parameterwerte

Literaturverzeichnis

- [Ag216] AG2GAEH: *Kugelkoordinaten: Definition*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41627945>. Version: Dezember 2016
- [alp17] ALPHA, Mathematik: *Numerische Näherungsverfahren*. <http://mathematikalpha.de/numerische-naeherungsverfahren>. Version: Januar 2017
- [AMHH08] AKENINE-MÖLLER, T. ; HAINES, E. ; HOFFMAN, N.: *Real-Time Rendering*. 3. Auflage. Wellesley, Massachusetts : A K Peters, Ltd., 2008. – ISBN 978–1–56881–424–7
- [APS00] ASHIKHMIN, Michael ; PREMOŽE, Simon ; SHIRLEY, Peter: A Microfacet-based BRDF Generator. In: *Computer Graphics (SIGGRAPH 2000 Proceedings)* (2000), Juli, S. 67–74
- [AS00] ASHIKHMIN, Michael ; SHIRLEY, Peter: An Anisotropic Phong BRDF Model. In: *J. Graph. Tools* 5 (2000), Februar, Nr. 2, S. 25–32. – ISSN 1086–7651
- [Aut17] AUTODESK, Area: *Vray 2.0 Materials Guide*. http://area.autodesk.com/learning/vray_2_0_materials_guide. Version: Februar 2017
- [Bir14] BIRN, J.: *Digital Lighting and Rendering*. 3. Auflage. San Francisco : New Riders Publishing, 2014. – ISBN 978–0–321–92898–6
- [Bli77] BLINN, James F.: Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 11 (1977), Juli, Nr. 2, S. 192–198. – ISSN 0097–8930
- [Che17] CHEMGAROO: *Extrema einer Funktion einer Variablen*. http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ma/1/mc/ma_05/ma_05_05/ma_05_05_03.vlu.html. Version: Januar 2017
- [CT82] COOK, R. L. ; TORRANCE, K. E.: A Reflectance Model for Computer Graphics. In: *ACM Trans. Graph.* 1 (1982), Januar, Nr. 1, S. 7–24. – ISSN 0730–0301
- [DGNK99] DANA, Kristin J. ; GINNEKEN, Bram van ; NAYAR, Shree K. ; KOENDERINK, Jan J.: Reflectance and Texture of Real-world Surfaces. In: *ACM Trans. Graph.* 18 (1999), Januar, Nr. 1, S. 1–34. – ISSN 0730–0301

- [Dü04] DÜR, A.: On the Ward model for global illumination. (2004), September
- [Duv13] DUVENHAGE, B.: Numerical verification of bidirectional reflectance distribution functions for physical plausibility. In: *Proceedings of the South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists Conference (2013)*, S. 200–208
- [FPBP09] FORÉS, A. ; PATTANAİK, S.N. ; BOSCH, C. ; PUEYO., X.: BRDFLab: A general system for designing BRDFs. In: *XIX Congreso Español de Informática Gráfica (2009)*
- [Geo16] GEORGE, K.: *The BRDF And Microfacet Theory*. <http://kevin-george-2n3x.squarespace.com/blog/2014/5/25/the-brdf-and-microfacet-theory>. Version: Dezember 2016
- [Gla95] GLASSNER, A. S.: *Principles of Digital Image Synthesis*. 1. Auflage. Burlington, Massachusetts : Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1995. – ISBN 978–1–55860–276–2
- [Haf03] HAFERKORN, H.: *Optik*. 4. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2003. – ISBN 3–527–40372–8
- [Hec02] HECHT, E.: *Optics: International Edition*. 4. Auflage. San Francisco : Addison Wesley, 2002. – ISBN 0–321–18878–0
- [HF13] HAINDL, M. ; FILIP, J.: *Visual Texture*. 1. Auflage. London : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978–1–4471–4901–9
- [HH16] HAABE ; HABIB.MHENNI: *Solid angle definition*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Angle_solide_coordonnees.svg. Version: Dezember 2016
- [HTSG91] HE, Xiao D. ; TORRANCE, Kenneth E. ; SILLION, François X. ; GREENBERG, Donald P.: A Comprehensive Physical Model for Light Reflection. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 25 (1991), Juli, Nr. 4, S. 175–186. – ISSN 0097–8930
- [Inc17] INC., Apple: *Lighting Models*. https://developer.apple.com/reference/scenekit/scnmaterial/1655321-lighting_models. Version: Januar 2017
- [KDS96] KOENDERINK, Jan J. ; DOORN, Andrea J. ; STAVRIDIS, Marigo: Bidirectional reflection distribution function expressed in terms of surface scattering modes. In: BUXTON, Bernard (Hrsg.) ; CIPOLLA, Roberto (Hrsg.): *Computer Vision — ECCV '96: 4th European Conference on Computer Vision Cambridge, UK, April 15–18, 1996 Proceedings Volume II*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1996. – ISBN 978–3–540–49950–3, 28–39
- [Ke99] KE, Lun: *A method of light reflectance measurement*, Diss., Jun 1999

- [KKT11] KÜHTREIBER, Patrick ; KNECHT, Martin ; TRAXLER, Christoph: BRDF approximation and estimation for Augmented Reality. In: *15th International Conference on System Theory, Control and Computing*, 2011
- [Lam60] LAMBERT, J. H.: *Photometria, sive de Mensura et Gradibus Luminis, Colorum et Umbrae*. Augsburg, 1760
- [Lev44] LEVENBERG, K.: A method for the solution of certain problems in least squares. In: *Quart. Applied Math.* 2 (1944), S. 164–168
- [Lew94] LEWIS, Robert R.: Making Shaders More Physically Plausible. In: *Computer Graphics Forum* (1994). – ISSN 1467–8659
- [LFTG97] LAFORTUNE, Eric P. F. ; FOO, Sing-Choong ; TORRANCE, Kenneth E. ; GREENBERG, Donald P.: Non-linear Approximation of Reflectance Functions. In: *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997 (SIGGRAPH '97). – ISBN 0–89791–896–7, S. 117–126
- [LKG⁺01] LENSCH, Hendrik P. A. ; KAUTZ, Jan ; GOESELE, Michael ; HEIDRICH, Wolfgang ; SEIDEL, Hans-Peter: Image-Based Reconstruction of Spatially Varying Materials. In: GORTLE, S. J. (Hrsg.) ; MYSZKOWSKI, K. (Hrsg.): *Eurographics Workshop on Rendering*, The Eurographics Association, 2001. – ISBN 3–211–83709–4
- [LW94] LAFORTUNE, Eric P. ; WILLEMS, Yves D.: Using the modified Phong reflectance model for physically based rendering / Departement Computerwetenschappen, KU Leuven. Celestijnenlaan 200A, 3001 Heverlee, Belgium, November 1994 (197). – Report CW. – 19 S.
- [Mar16] MARASOV, S.: *Image Based Lights*. <http://brabl.com/tag/ibl>. Version: Dezember 2016
- [MCS90] MURRAY-COLEMAN, J.F. ; SMITH, A.M.: The Automated Measurement of BRDFs and their Application to Luminaire Modeling. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 19 (1990), Nr. 1, S. 87–99
- [Mob94] MOBLEY, C. D.: *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters (PDF-Version)*. 1. Auflage. Academic Press Inc., 1994 https://www.researchgate.net/publication/234014400_Light_and_Water_Radiative_Transfer_in_Natural_Waters. – ISBN 978–0–12502–750–2
- [MPBM03] MATUSIK, Wojciech ; PFISTER, Hanspeter ; BRAND, Matt ; MCMILLAN, Leonard: A Data-driven Reflectance Model. In: *ACM Trans. Graph.* 22 (2003), Juli, Nr. 3, S. 759–769. – ISSN 0730–0301

- [MU] MONTES, R. ; UREÑA, C.: *An Overview of BRDF Models*. Universidad de Granada : LSI Technical Reports (2012-001) <http://hdl.handle.net/10481/19751>
- [MWLT00] MARSCHNER, Stephen R. ; WESTIN, Stephen H. ; LAFORTUNE, Eric P. F. ; TORRANCE, Kenneth E.: Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement. In: *Appl. Opt.* 39 (2000), Jun, Nr. 16, S. 2592–2600
- [NDM05] NGAN, Addy ; DURAND, Frédo ; MATUSIK, Wojciech: Experimental Analysis of BRDF Models. In: *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, Eurographics Association, 2005, S. 117–226
- [NMP07] NISCHWITZ, A. ; M.FISCHER ; P.HABERÄCKER: *Computergrafik und Bildverarbeitung*. 2. Auflage. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2007. – ISBN 978–3–8348–0186–9
- [NNSK99] NEUMANN, Laszlo ; NEUMANN, Attila ; SZIRMAY-KALOS, Laszlo: Compact Metallic Reflectance Models. In: *Computer Graphics Forum* (1999). – ISSN 1467–8659
- [NRH⁺77] NICODEMUS, F.E. ; RICHMOND, J.C. ; HSIA, J.J. ; GINSBERG, I.W. ; LIMPERIS, T.: *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. National Bureau of Standards (US), 1977
- [ON94] OREN, Michael ; NAYAR, Shree K.: Generalization of Lambert's Reflectance Model. In: *In SIGGRAPH 94*, ACM Press, 1994, S. 239–246
- [Pfe01] PFEIFER, R.: *Effektive Messauswertung mit der Gauß'schen Fehlerquadratmethode*. 1. Auflage. Köln : Verlag SPORT und BUCH Strauß, 2001. – ISBN 3–89001–251–5
- [Pho75] PHONG, Bui T.: Illumination for Computer Generated Pictures. In: *Commun. ACM* 18 (1975), Juni, Nr. 6, S. 311–317. – ISSN 0001–0782
- [Pro16] PROJECT, SEOS: *differential solid angle*. <http://www.seos-project.eu/modules/laser-rs/laser-rs-c03-s02-p02.html>. Version: Dezember 2016
- [RB16] RAHMANN, S. ; BURKHARDT, H.: *Beleuchtungsmodelle*. http://lmb.informatik.uni-freiburg.de/lectures/praktika_brox/bvpraktikum/BVAnl_beleuchtung.pdf. Version: Dezember 2016
- [Ree16] REED, M.: *Computer Graphics (Spring 2008) COMS 4160, Lecture 20: Illumination and Shading 2*. <http://www1.cs.columbia.edu/~cs4160/html08spr/slides/lecture20.pdf>. Version: Dezember 2016
- [Sch94] SCHLICK, C.: An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering. In: *Computer Graphics Forum* 13 (1994), Nr. 3, S. 233–246

-
- [Sch10] SCHÄFER, A.: *Generating a BRDF-Editor for the reflectance of surfaces inside refractive substances*. Institut für Computergraphik, TU Braunschweig, 2010
- [Scr17] SCRATCHPIXEL: *The Phong Model, Introduction to the Concepts of Shader, Reflection Models and BRDF*. <https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/phong-shader-BRDF>. Version: Januar 2017
- [TC16] THE-CRANKSHAFT: *Applications of Spectral Imaging and Reproduction to Cultural Heritage (Digital Imaging) Part 3*. <https://goo.gl/UogGaI>. Version: Dezember 2016
- [TK08] T. KOLLIG, A. O.: BRDF-Scanner: Ein Gerät zur effektiven Messung der Lichtstreu-Eigenschaften von Materialien / [0x1] Software und Consulting GmbH. Hamburg, 2008. – Forschungsbericht
- [War92] WARD, Gregory J.: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 26 (1992), Juli, Nr. 2, S. 265–272. – ISSN 0097–8930
- [Wik16] WIKIPEDIA: *Fresnel equations*. https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations. Version: Dezember 2016
- [Wik17a] WIKIPEDIA: *Cholesky decomposition*. https://en.wikipedia.org/wiki/Cholesky_decomposition. Version: Januar 2017
- [Wik17b] WIKIPEDIA: *Gauß-Newton-Verfahren*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Gau%C3%9F-Newton-Verfahren>. Version: Januar 2017
- [Wik17c] WIKIPEDIA: *Methode der kleinsten Quadrate*. https://de.wikipedia.org/wiki/Methode_der_kleinsten_Quadrate. Version: Januar 2017
- [Wik17d] WIKIPEDIA: *Optimierung (Mathematik)*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Optimierung_\(Mathematik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Optimierung_(Mathematik)). Version: Januar 2017
- [Wyn16] WYNN, C.: *An Introduction to BRDF-Based Lighting*. www.nvidia.com/attach/6568. Version: Dezember 2016
- [YDMH99] YU, Yizhou ; DEBEVEC, Paul E. ; MALIK, Jitendra ; HAWKINS, Tim: Inverse Global Illumination: Recovering Reflectance Models of Real Scenes from Photographs. In: WAGGENSPACK, Warren N. (Hrsg.): *SIGGRAPH*, ACM, 1999. – ISBN 0–201–48560–5, 215–224
- [zS17] ZERONE ; STEINHILBER, Jan: *Porsche Panamera*. http://www.zerone-group.de/fileadmin/content/00_project_datas/CGI/960/CGI_Panamera_JS_04_960@2x.jpg. Version: Februar 2017

