universität wien

DISSERTATION

Die Physik des Make Up

angestrebter akademischer Grad

Doktorin der Naturwissenschaften (Dr. rer.nat.)

Verfasserin / Verfasser:	Dipl.-Ing. Mag. Ursula Schmitzer
Matrikel-Nummer:	8025319
Dissertationsgebiet (lt. Studienblatt):	Physik
Betreuerin / Betreuer:	Univ.-Prof. i.R. Dr. Helmuth Horvath

Wien, im April 2011

Kurzfassung

Das Versprechen des „verschönerten Aussehens“ vermittelt der Make Up Industrie einen weltweiten Marktanteil von zweistelligen Milliardenbeträgen an US$, noch vor Pflege- oder Sonnenschutzprodukten. Nachdem Schönheit im Auge des Betrachters liegt, ist „verschönertes Aussehen“ primär ein subjektiver Eindruck.

Es war das Ziel dieser Arbeit eine objektive Methode zu definieren, mit der man diesen subjektiven Eindruck durch technische Hilfsmittel beurteilen kann, einen Evaluierungskontext zu definieren und ein einfaches mathematisches Modell anzuwenden, um die prinzipielle Machbarkeit einer Modellierung und Simulation zu zeigen.

Es wurde beachtlicher Aufwand in die verschiedenen Gebiete der Objektivierung des visuellen Eindrucks von Make Up auf Haut investiert. Dazu mussten experimentelle Auswertungen für spektrophotometrische Erfassung und Auswertung mit einer Standard-Digitalcamera konzipiert werden, genauso wie eine Kalibration beider Aufbauten mit angemessenen Referenzstandards, die Nachvollziehbarkeit gewährleisteten. Dazu mussten auch die radiometrischen Größen (wie spektraler Fluss) in ihre photometrischen Gegenstücke (wie Beleuchtungsstärke) im Kontext der Farbmetrik und des kolorimetrischen „Standardbeobachters“ umgesetzt werden, wie er von der CIE (Commission Internationale de l´Éclairage) definiert wurde.

Zusätzliche Anstrengungen wurden unternommen, um ausgewählte Produkte (Make Up, Abdeckstift, Faltenauffüller) auf ihre optischen Eigenschaften zu untersuchen (Absorption, Streuung). Sowohl Licht- als auch Elektronenmikroskopie wurde verwendet, um Abschätzungen zu Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung dieser ausgewählten Produkte zu erhalten, um die Basis für ein mathematisches Modell des gestreuten Lichts zu liefern.

Der letzte Abschnitt dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Modellerstellung und der Simulation eines „theoretischen“ Make Up Produkts auf der Basis von modifizierten Parametern. Die Betonung liegt hier auf „einfachem“ Modell, nicht eine ausgedehnte Simulation aller Details des visuellen Eindrucks, der durch von Make Up bedeckter Haut entsteht. Dies sollte die prinzipielle Machbarkeit der Möglichkeit eines verhältnismäßig einfachen Streumodells zur Reproduktion der Schlüsseleigenschaften des visuellen Eindrucks qualitativ (z.B. ausgewogener Farbeindruck) und quantitativ (z.B. zurückgeworfene Lichtintensität) aufzeigen. Es wurde ein Standardmodell der Lichtstreuung durch Partikel gewählt (das hauptsächlich für atmosphärische Streuung angewendet wird und für Make Up auf der Haut adaptiert wurde), wobei die Parameter für das Modell aus den zuvor bestimmten physikalischen Eigenschaften gewonnen wurden. Es wurde eine gute Übereinstimmung innerhalb der Messunsicherheit zwischen den Experimentdaten und dem Modell gefunden. Verschiedene Simulationen mit speziellen Modellparametern beschließen diese Arbeit.

Obwohl technische Hilfsmittel und wissenschaftliche Methoden – die in dieser Arbeit verwendet wurden – das Verständnis des fundamentalen Prozesses der Lichtstreuung in Make Up steigern, die für den allgemeinen visuellen Eindruck verantwortlich ist, wird der ultimative Test immer die subjektive Wahrnehmung des Betrachters sein. An verschiedensten Stellen dieser Arbeit wurde zufriedenstellend festgestellt, dass die objektiven Daten mit dem subjektiven visuellen Eindruck übereinstimmen und ihn bestätigen.

Diese Arbeit bemüht sich um einen multi–disziplinären Zugang, sie berührt – wie oben erwähnt – verschiedene Fachgebiete. Die im Text zitierten Referenzen zu der technischen und wissenschaftlichen Literatur wurden daher mit großer Sorgsamkeit erstellt.

Abstract

With a worldwide market share in the tens of billions of US$ make-up is big business living on the promise of „improved appearance“. Besides this, skin care and other functions are a big revenue. Since beauty is in the eye of the beholder, the “improved appearance” is a subjective impression of the observer.

It was the goal of this work to define an objective method of assessing this subjective impression by technical means, to define the context of evaluation, and to apply a simple mathematical model as proof of concept regarding feasibility of simulation.

Considerable effort was involved in the various areas of objectifying the visual impression of make-up on skin. This consisted of defining experimental setups for spectroscopic evaluation and standard photo-camera evaluation as well as cross-calibration of both setups with appropriate reference standards ensuring traceability. It also involved the translation of radiometric properties (such as spectral flux) into their photometric counterparts (such as illuminance) in the context of colour theory and colorimetric “standard oberservers” as defined by CIE, the International Commission on Illumination.

A separate effort was dedicated to characterize selected skin care products (make-up, cover-up, wrinkle eraser) in terms of their optical properties (absorption, scattering albedo). Both light and electron microscopy was employed to derive estimates on particle size and distribution contained in these selected products to provide the basis for a mathematical model of light scattered by these products.

The final section of this work deals with modelling and simulation of “theoretical” make-up products based on modified model parameters. The emphasis here was on a “simple” model, not on a comprehensive simulation of all details of the visual impression created by skin covered with make-up. This was intended as a proof of concept of the feasibility of employing comparatively simple scattering models to reproduce the key features of the visual impression both qualitatively (e.g. colour balance) and quantitatively (e.g. returned intensity of light). A well established model of light scattering by particles was chosen (primarily employed in atmospheric scattering and adapted to make-up on skin) and input parameters for the model were derived from the physical properties obtained before. Good agreement was achieved between experimental results and model within the limits of uncertainty. Various simulations of specific model parameters conclude the work.

Though technical means and scientific methods – as have been employed in this work – might enhance the understanding of fundamental processes of light scattering responsible for the overall visual impression, the ultimate test will always be the subjective perception of the observer. It has been satisfactorily noted at various points of this work that objective data does coincide with and support subjective visual impression.

This work realizes a multi-disciplinary approach, touching upon various areas of expertise as outlined above. Diligence has been applied to provide full references for all technical and scientific literature quoted throughout the text.

Danksagung

Ich möchte Gott, meinem liebevollen Vati im Himmel, dafür danken, dass es mir ermöglicht wurde, diese Arbeit durchzuführen und dass ich von so vielen Seiten hilfreiche Unterstützung bekommen habe.

Vielen Dank an Univ.–Prof. i.R. Dr. Helmuth Horvath, dass er das Thema, das ich gewählt habe angenommen hat, für seine Geduld, die Hilfestellung bei den Experimenten an der Uni, die Einsichten, die er mir in das Thema Streuung gewährt hat, die vielen Hinweise auf gangbare Wege und für seine ermutigende und ruhige Art.

Ich danke Dr. Christian Schmitzer, meinem Ehemann, für die Geduld und vielen angeregten Diskussionen über das Thema, die Unterstützung beim Programmieren in Fortran und für die vielen Tipps in Bezug auf automatisierte Verarbeitung in Excel. Auch dafür, dass er mich immer wieder ermuntert und akzeptiert hat, dass viel Zeit in diese Arbeit geflossen ist.

Meiner Tochter Mag. Karin Schmitzer danke ich für Ermutigung und den Druck, den sie mir gemacht hat und dass sie sich Zeit für Korrekturlesen genommen hat.

Meinem Sohn, Matthias Schmitzer BSc(WU), möchte ich danken für die Programmierung des sRGB – Ausleseprogramms und die Programmierung eines Programms um in Excel automatisiert Daten zu lesen und zu verarbeiten. Auch er hat mich immer wieder sehr ermutigt.

Ich danke meinen Freunden für die Geduld die sie mit mir hatten, für die Auferbauung, die sie mir zukommen ließen, die vielen Gebete, die sie für mich gesprochen haben und dafür, dass sie die ganze Zeit ein offenes Ohr für mich hatten.

Vielen Dank an Toni Nirschl für die Herstellung des für die Messungen nötigen Hautersatzes samt Störstellen aus PET.

Auf Grund des Entgegenkommens des Leiters des Labors für Laser und Optische Strahlung der Seibersdorf Labor GmbH, Dr. DI Karl Schulmeister, und speziell seines langjährigen Mitarbeiters DI Marko Weber, war es mir möglich Messungen im genannten Labor zu machen, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ich bin ihnen zu größtem Dank verpflichtet.

Ich möchte Rainer Haselberger, Mitarbeiter der Firma Mettler in der Niederlassung in Wien, danken, dass er es mir ermöglicht hat, mit einem Messgerät der Firma Brechzahlmessungen durchzuführen.

Ich bedanke mich auch bei Ao. Univ.–Prof. Mag. Dr. Claudia Valenta, Uni Wien, und meinem Hautarzt Dr. Walter Klein herzlich für die zur Verfügungstellung von Literatur für diese Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG 1

2 ÜBERSICHT 2

2.1 WISSENSCHAFTLICHE FRAGEN, EXEMPLARISCH 2
2.1.1 Gerichtete und über alle Richtungen gemittelte Eindrücke 3
2.1.2 Reduktion von Falten 3
2.1.3 Abdecken von Farbflecken im Gesicht 4
2.1.4 Weitere Fragen 4
2.2 VORGEHENSWEISE 4

3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN 6

3.1 PHYSIK 6
3.1.1 Reflexion 6
3.1.2 Brechung 9
3.1.3 Streuung 10
3.1.4 Transmission 14
3.1.5 Extinktion 15
3.1.6 Absorption 15
3.1.7 Albedo 16
3.1.8 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) 16
3.1.9 Radiometrische und photometrische Messgrößen 17
3.1.10 Quadratisches Abstandsgesetz 21
3.1.11 Lambert'sches Gesetz 22
3.1.12 Planck'sches Strahlungsgesetz 24
3.1.13 Stefan–Boltzmann Gesetz 25
3.1.14 Wien'sches Verschiebungsgesetz 25
3.2 FARBMETRIK 26
3.2.1 Kolorimetrie 28
3.2.2 Auge und Sehen – Wahrnehmung 46
3.3 THEORIE DER HAUT 58
3.3.1 Aufbau der Haut 58
3.3.2 Hauttypen 62
3.3.3 Optische Eigenschaften der Haut 64
3.3.4 Unerwünschte Eigenschaften der Haut 66
3.3.5 Veränderung der optischen Eigenschaften der Haut bei Make Up Auftrag 69
3.3.6 Anforderungen der Benutzerin an Make Up 69

4 MAKE UP 71

4.1 EINLEITUNG 71
4.1.1 Begriffsbestimmung und Definition 71
4.1.2 Make Up Produkte zur Verschönerung 72
4.1.3 Geschichte 74
4.2 AUSSAGEN DER KOSMETIKPRODUZENTEN 83
4.3 AUFBAU UND HERSTELLUNG 84
4.3.1 Vehikel 84
4.3.2 Feuchtigkeitsspender als Wirkstoffe 86
4.3.3 Farbpigmente 86
4.3.4 Feuchtigkeitsspender 89
4.3.5 Viskositätsveränderer und Stabilisatoren 90
4.3.6 Silicone 91
4.3.7 Anti – Faltenprodukte 91
4.3.8 Aufbau von Foundation 91
4.3.9 Begriffsdefinitionen laut INCI-Datenbank 92

5 LÖSUNGSANSATZ 94

5.1 SUBJEKTIVE EINDRÜCKE OBJEKTIV MESSEN ... 94
5.2 GEMITTELTER UND GERICHTETER EINDRUCK ... 94
5.3 MODELLIERUNG ... 95
5.4 SIMULATION ... 95

6 EXPERIMENTELLE DURCHFÜHRUNG ... 97

6.1 FESTLEGUNG DER EXPERIMENTELLEN METHODIK ... 97
6.1.1 Produkte ... 97
6.1.2 Hautersatz ... 97
6.1.3 Lichtquelle ... 97
6.1.4 Reflexionsstandard ... 97
6.1.5 Messgeräte ... 98
6.2 AUFBAU DER PRODUKTE ... 98
6.2.1 Produktinhaltsstoffe ... 98
6.2.2 Subjektive Beurteilung von Probanden ... 101
6.2.3 Probenpräparation ... 103
6.3 MESSGERÄTE ... 105
6.3.1 Tageslichtlampe Philips Tornado CDL 865 ... 105
6.3.2 Ulbrichtkugel UPK-150F ... 105
6.3.3 Bentham DMc 150V Double Monochromator ... 106
6.3.4 Bentham DTMc 300V Double Monochromator ... 107
6.3.5 Photomultiplier Tube Bentham DH-30-Te ... 107
6.3.6 Strahldichteteleskop Bentham TEL301 ... 107
6.3.7 Kalibrierlampe Bentham SRS8(Q) Spectral Radiance/Luminance Standard ... 108
6.3.8 Xenonlampe Bentham IL7S ... 109
6.3.9 Software BenWin+ ... 110
6.3.10 Schrittmotor MS 140E Mercury DLL ... 110
6.3.11 Präzisionsdrehtisch M–038 DG ... 110
6.3.12 Canon Power Shot 520 ... 110
6.3.13 OP.DI.MA. Reflexionsstandard ... 111
6.3.14 PET–Block ... 111
6.3.15 ColorChecker ... 114
6.3.16 Suprasil–Plättchen ... 114
6.3.17 Schwarzer optischer Samt ... 115
6.3.18 Optischer Tisch ... 115
6.3.19 Waage ... 115
6.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG ... 116
6.4.1 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke der Philips Tornado Lampe ... 116
6.4.2 Reflexionsmessung der Proben ... 116
6.4.3 Messung der spektralen Strahldichte mit CIE Farbkoordinaten ... 119
6.4.4 Bildverarbeitung Canon Power Shot A 520 ... 121
6.5 AUSWERTUNG ... 124
6.5.1 Spektrale Bestrahlungsstärke der Philips Tornado ... 124
6.5.2 Reflexionsspektrum der Proben ... 124
6.5.3 Spektrale Strahldichte der Proben ... 131
6.5.4 Auswertung der farbmetrischen Ergebnisse der spektralen Strahldichtemessung ... 134
6.5.5 Auswertung der sRGB Daten (Canon Power Shot A 520) ... 145
6.6 ABSCHÄTZUNG DER MESSUNSICHERHEIT ... 166

7 THEORETISCHE MODELLIERUNG ... 167

7.1 MODELLBESCHREIBUNG ... 167
7.2 HERSTELLEN DER VORBEDINGUNGEN ... 168
7.2.1 Partikelgröße und Größenverteilung ... 169
7.2.2 Extinktionskoeffizient und optische Dicke ... 187
7.2.3 Absorptionskoeffizient ... 190
7.2.4 Single Scattering Albedo ... 194
7.2.5 Phasenfunktion ... 194

7.2.6 Messung der Brechzahl ... *200*
7.2.7 Dichte ... *205*
7.2.8 Lichtquelle ... *206*
7.3 MODELLIERUNG ... 206
7.3.1 Spezifische Fragestellungen ... *207*
7.3.2 Durchführung der Modellierung ... *208*
7.3.3 Diskussion der Ergebnisse ... *210*
7.4 SIMULATION MIT GEÄNDERTEN PARAMETERN ... 217
7.4.1 Parameter für die Simulationen ... *217*
7.4.2 Phasenfunktionen der Simulationen ... *220*
7.4.3 Rückstreuung an der Oberfläche der simulierten Make Ups ... *225*
7.4.4 Flüsse in einer optischen Dicke von 0,25 ... *229*
7.4.5 Schlussfolgerung aus den Simulationen ... *236*
7.5 ABSCHÄTZUNG DER MESSUNSICHERHEITEN ... 240

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN ... 242

9 SOFTWARE ... 244

9.1 MOTORANSTEUERUNGSPROGRAMM ... 244
9.2 BILDAUSWERTEPROGRAMM FÜR REGIONS OF INTEREST ... 244
9.3 BILDAUSWERTEPROGRAMM ZUM AUSLESEN DER sRGB–FARBKOORDINATEN IN JPG-BILDDATEIEN 247
9.4 PROGRAMM ZUR ÜBERNAHME VON SPEKTRALDATEN IN EXCEL ... 247
9.5 VERSCHIEDENE BENUTZERDEFINIERTE FUNKTIONEN IN EXCEL ... 248
9.6 FORTRAN PROGRAMM WB4.EXE ... 248
9.7 DISORT ... 248
9.7.1 DISORT zugrundeliegende Gleichungen ... *249*
9.7.2 Übersicht über die durchgeführten Berechnungen (Programmdurchläufe) mit DISORT ... *250*

10 LITERATURVERZEICHNIS ... 252

11 ANHANG ... 257

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spiegelnde Reflexion und Brechung 6
Abbildung 2: Diffuse Reflexion 7
Abbildung 3: Reflexion, Transmission, Absorption 8
Abbildung 4: Streuung elektromagnetischer Wellen an einem Partikel 10
Abbildung 5: Wechselwirkung von Licht mit Materie: Einfachstreuung 11
Abbildung 6: Wechselwirkung von Licht mit Materie: Mehrfachstreuung 11
Abbildung 7: Mie - und Rayleigh - Streuung 12
Abbildung 8: Veranschaulichung der Volumenstreufunktion 13
Abbildung 9: Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) 17
Abbildung 10: Helligkeitsempfindlichkeitskurve V(λ) des Standardbeobachters nach CIE 19
Abbildung 11: Veranschaulichung des quadratischen Abstandsgesetzes 21
Abbildung 12: Streuung an einer Lambertsche Fläche 22
Abbildung 13: Hennastrauch 26
Abbildung 14: Hennapulver 26
Abbildung 15: Henna Bemalung 26
Abbildung 16: Indigopflanze 26
Abbildung 17: Indigofärbemittel 26
Abbildung 18: Farbmusterkarten 27
Abbildung 19: Farbmuster und gemischte Farbe 27
Abbildung 20: Czerny-Turner Monochromator 29
Abbildung 21: Beispiel für eine spektrale Reflexionskurve 29
Abbildung 22: Trichromatische Empfindlichkeitskurve nach Brewster 32
Abbildung 23: Aufbau eines Kolorimeter 33
Abbildung 24: Kolorimeter mit negativer Primärvalenz 34
Abbildung 25: RGB – Tristimuluskurven nach CIE 35
Abbildung 26: XYZ – Tristimuluskurven nach CIE 35
Abbildung 27: CIE Normfarbtafel 37
Abbildung 28: CIE-Lab Farbraum 39
Abbildung 29: RGB Farbwürfel 40
Abbildung 30: Entstehung optischer Eindrücke 46
Abbildung 31: Aufbau des menschlichen Auges 47
Abbildung 32: Augenhintergrund 47
Abbildung 33: Spektrale Absorptionskurven von Zapfen und Stäbchen 48
Abbildung 34: Photorezeptoren, Zapfen und Stäbchen 49
Abbildung 35: Sehsystem – vom Auge bis zur primären Sehrinde 50
Abbildung 36: Farberkennung im Gehirn – Hyperkolumne 51
Abbildung 37: Gehirnlappen 52
Abbildung 38: Psychophysischer Effekt: Kontraststeigerung 53
Abbildung 39: Psychophysischer Effekt: Nachbild 54
Abbildung 40: Psychophysischer Effekt: Bezold-Effekt 55
Abbildung 41: Psychophysischer Effekt: Optische Täuschung 55
Abbildung 42: Psychophysischer Effekt: Bekanntes erkennen 56
Abbildung 43: Psychophysischer Effekt: Helligkeitsillusion 56
Abbildung 44: Psychophysischer Effekt: Verschiedene Referenzsysteme 56
Abbildung 45: Psychophysischer Effekt: Peripheral Drift Illusion 57
Abbildung 46: Aufbau der Haut 59
Abbildung 47: Aufbau der Epidermis 60
Abbildung 48: Absorption der Hautschichten 64
Abbildung 49: Wellenlängenabhängige Reflektivität der Haut 66
Abbildung 50: Haut - Produkt - Psyche Dreieck 69
Abbildung 51: Nofretete - Altes Museum Berlin 74
Abbildung 52: Bhimbetka Rock Painting 75
Abbildung 53: Lapis Lazuli 76
Abbildung 54: Azurit 76
Abbildung 55: Malachit 76
Abbildung 56: Talk 76
Abbildung 57: Azurit Pigment 76

Abbildung 58: Brauner Ocker 76
Abbildung 59: Pigment für ägyptische Kajal - Galenit 76
Abbildung 60: Fayum Mumien Porträt 78
Abbildung 61: Kosmetikanwendung - Madame Pompadour, Françoise Boucher, 1756 80
Abbildung 62: Kosmetikanwendung - Marquise de Pompadour at the Toilet-Table 80
Abbildung 63: Make Ups auf PET1 für subjektive Beurteilung 102
Abbildung 64: Make Up - Proband mit sehr heller Haut 102
Abbildung 65: Make Ups - Proband mit heller Haut 102
Abbildung 66: Füllgrad der Falte mit Faltenauffüller 104
Abbildung 67: Tageslichtlampe (TaLi) Philips Tornado CDL 865 105
Abbildung 68: Messgerät: Ulbrichtkugel UPK-150F 106
Abbildung 69: Messgerät: Bentham Strahldichteteleskop TEL301 107
Abbildung 70: Messgerät: Bentham TEL301 Aufbau 108
Abbildung 71: Bentham Kalibrierlampe SRS8 108
Abbildung 72: Bentham Xenonlampe IL7S 109
Abbildung 73: Reflexionsspektren Xenon- und Tageslichtlampe 110
Abbildung 74: OP.DI.MA. Referenzstandard (Opdi) 111
Abbildung 75: Rückstrahlung TaLi vom Opdi 111
Abbildung 76: Reflektivität PETn relativ zu Opdi 112
Abbildung 77: PET1-Block 113
Abbildung 78: Planskizze des PET1-Blocks 113
Abbildung 79: PET1 Faltenquerschnitt 114
Abbildung 80: Messaufbau: Spektrale Bestrahlungsstärke Philips Tornado (TaLi) 116
Abbildung 81: Schematischer Versuchsaufbau der Messung mit Ulbrichtkugel 117
Abbildung 82: Versuchsaufbau mit Ulbrichtkugel 118
Abbildung 83: PET Block mit schwarzem Samt und 3 mm Loch 118
Abbildung 84: Abmessungen Versuchsaufbau Strahldichteoptik 119
Abbildung 85: Versuchsaufbau Strahldichteoptik 120
Abbildung 86: Kalibrieraufbau Strahldichteoptik 120
Abbildung 87: Skizze des Versuchsaufbaus mit Canon Camera 121
Abbildung 88: Messaufbau Canon Camera, PET fixiert, Cameraarm frei 122
Abbildung 89: Abmessungen Versuchsaufbau Camera, Aufriss 123
Abbildung 90: Winkel Versuchsaufbau Canon Camera, Grundriss 123
Abbildung 91: Aufnahme von Opdi, PET2, PET1 im Camerafokus 123
Abbildung 92: Spektrale Bestrahlungsstärke Philips Tornado CDL 865 (TaLi) 124
Abbildung 93: Vergleich Reflektivität Opdi - PET 132
Abbildung 94: Rückstrahlung TaLi - PET mit und ohne Make Up 1 133
Abbildung 95: Rückstrahlung TaLi - PET mit und ohne Make Up1 relativ zum Opdi 133
Abbildung 96: Helligkeitsverlauf Opdi bei senkrechtem Lichteinfall (aL=0) 148
Abbildung 97: Helligkeitsverlauf PET2 bei senkrechtem Lichteinfall (aL=0) 149
Abbildung 98: sRGB–Verlauf PET2 bei senkrechtem Lichteinfall (aL=0) 149
Abbildung 99: Helligkeitsverlauf PET1 bei senkrechter Beobachtung (aC=0) 150
Abbildung 100: Helligkeitsverlauf PET1 für Lichteinfall aL = 0°, 22,5°, 45° 150
Abbildung 101: Helligkeitsverlauf MU1 und MU2 151
Abbildung 102: sRGB–Verlauf MU1 und MU2 151
Abbildung 103: Helligkeitsverlauf der unbedeckten Falte 152
Abbildung 104: Falte erscheint dunkel bei - 60° Lichteinfall 152
Abbildung 105: Falte erscheint hell bei 15° Lichteinfall 153
Abbildung 106: Helligkeitsverlauf Faltenauffüller 1 153
Abbildung 107: Helligkeitsverlauf Faltenauffüller 2 154
Abbildung 108: sRGB–Verlauf Faltenauffüller 2 154
Abbildung 109: Helligkeitsverlauf Faltenauffüller, Falte, PET1 155
Abbildung 110: Aufnahme mit der CanonCamera PET1 mit Faltenauffüller 1 unter aL 0°, aC 0° 155
Abbildung 111: Aufnahme mit der Canon Camera PET1 - Falte unter aL 0°, aC 0° 156
Abbildung 112: Aufnahme mit der Canon Camera PET1 Faltenauffüller 2 unter aL 0°, aC 0° 156
Abbildung 113: Helligkeitsverlauf Falte mit MU1 und MU2 156
Abbildung 114: sRGB–Werte Roter Fleck bei Beleuchtung unter 22,5° (aL=22,5°) 157
Abbildung 115: Helligkeit des roten Flecks am Glanzwinkel 158
Abbildung 116: R - Farbkoordinate des roten Flecks am Glanzwinkel 158
Abbildung 117: Helligkeitsverlauf roten Fleck 159
Abbildung 118: sRGB–Werte roter Fleck 159
Abbildung 119: Helligkeit roter Fleck mit Make Ups, Helligkeit Make Ups 160

Abbildung 120: sRGB–Werte roter Fleck unter Make Ups, ... 160
Abbildung 121: Helligkeitsverlauf Abdeckstift 161
Abbildung 122: sRGB–Werte Abdeckstift 161
Abbildung 123: Helligkeitsverlauf Abdeckstift, roter Fleck, PET1 161
Abbildung 124: sRGB–Werte Abdeckstift über rotem Fleck 162
Abbildung 125: sRGB Farbbeispiel - Abdeckstift (RGB als Hintergrundfarbe) 162
Abbildung 126: sRGB Farbbeispiel - Roter Fleck (RGB als Hintergrundfarbe) 162
Abbildung 127: sRGB Farbbeispiel - Abdeckstift auf rotem Fleck (RGB als Hintergrundfarbe) 162
Abbildung 128: Helligkeitsverlauf roter Fleck mit Abdeckstift und MU1 163
Abbildung 129: sRGB–Werte roter Fleck mit Abdeckstift und MU1 163
Abbildung 130: Helligkeitsverlauf roter Fleck mit Abdeckstift und MU2 164
Abbildung 131: sRGB–Werte Roter Fleck mit Abdeckstift und MU2 164
Abbildung 132: Modellbeschreibung Wechselwirkung Licht – Make Up – Haut 168
Abbildung 133: Software Suruga Micromanipulator 169
Abbildung 134: Carbonprobenhalter mit Make Up 169
Abbildung 135: Faltenauffüller 1, 5-fache Vergrößerung 170
Abbildung 136: Faltenauffüller 1, 20-fache Vergrößerung 170
Abbildung 137: Faltenauffüller 1, 50-fach, Partikel mit 8,9 µm 171
Abbildung 138: Faltenauffüller 1, 50-fach, Partikel mit 0,5 µm 171
Abbildung 139: Faltenauffüller 2, 5-fache Vergrößerung 171
Abbildung 140: Faltenauffüller 2, 20-fache Vergrößerung 172
Abbildung 141: Faltenauffüller 2, 50-fach, Partikel mit 8,1 µm 172
Abbildung 142:Faltenauffüller 2, 50-fach, Partikel mit 0,5 µm 172
Abbildung 143: Make Up 1, 5-fache Vergrößerung 174
Abbildung 144: Make Up 1, 20-fache Vergrößerung 174
Abbildung 145: Make Up 1, 50-fach, Partikel mit 2,1 µm 174
Abbildung 146: Make Up 2, 5-fache Vergrößerung 175
Abbildung 147: Make Up 2, 20-fache Vergrößerung 175
Abbildung 148: Make Up 2, 50-fach, Partikel von 0,4 µm 175
Abbildung 149: Abdeckstift, 5-fache Vergrößerung 177
Abbildung 150: Abdeckstift, 20-fache Vergrößerung 177
Abbildung 151: Abdeckstift, 50-fach, Partikel mit 0,5 µm 177
Abbildung 152: Beladung des Carbonprobenhalters des Elektronenmikroskops 178
Abbildung 153: Probenhalter des Elektronenmikroskops 178
Abbildung 154: Proben im Elektronenmikroskop 179
Abbildung 155: Faltenauffüller 1, 600-fache Vergrößerung 180
Abbildung 156: Faltenauffüller 1, 1000-fache Vergrößerung 180
Abbildung 157: Faltenauffüller 1, 2500-fach, Partikel von 3,28 µm 180
Abbildung 158: Faltenauffüller 1, 2500-fach, Partikel von 8,66 µm 180
Abbildung 159: Faltenauffüller 2, 950-fache Vergrößerung 180
Abbildung 160: Faltenauffüller 1, 950-fach, Partikel von 5,14 µm 180
Abbildung 161: Make Up 1, 1300-fache Vergrößerung 181
Abbildung 162: Make Up 1, 5000-fach, Partikel von 2,8 µm 181
Abbildung 163: Make Up 2, 800-fache Vergrößerung 182
Abbildung 164: Make Up 2, 1300-fach, Partikel mit 8,5 µm 182
Abbildung 165: Make Up 2, 1300-fach, Partikel von 13,7 µm 182
Abbildung 166: Make Up 2, 10000-fache Vergrößerung 182
Abbildung 167: Abdeckstift, 85-fache Vergrößerung 183
Abbildung 168: Abdeckstift, 430-fache Vergrößerung 183
Abbildung 169: Abdeckstift, 4500-fach, Partikel mit 1,77 µm 183
Abbildung 170: Abdeckstift, Messung der schweren Elemente 183
Abbildung 171: Partikelgrößenverteilung Faltenauffüller 1 184
Abbildung 172: Skizze Versuchsaufbau Langwegphotometer 187
Abbildung 173: Küvettenaufbau und -maße 188
Abbildung 174: Extinktionskoeffizienten von Make Up 1 189
Abbildung 175: Magnetrührer mit anhaftenden Eisenpartikel 190
Abbildung 176: Schablone für Isopore Filter 191
Abbildung 177: Massenbelegung des Isopore Filter 192
Abbildung 178: Halterung für Isopore Filter 192
Abbildung 179: Absorptionskoeffizienten von Make Up 1 193
Abbildung 180: Integrationsschrittweite für Streukoeffizient FA1 (λ H_2O) 195
Abbildung 181: Streukoeffizienten Faltenauffüller 1 (λ H_2O) 196

Abbildung 182: Phasenfunktion Faltenauffüller 1 (λ H_2O)..... 196
Abbildung 183: Asymmetriefaktoren Faltenauffüller 1 (λ H_2O) 197
Abbildung 184: Phasenfunktion Make Up 1 (λ H_2O) 198
Abbildung 185: Phasenfunktion Make Up 1 Kugeln (λ H_2O)..... 198
Abbildung 186: Phasenfunktion Make Up 1 grießartige Substanz (λ H_2O)..... 199
Abbildung 187: Streukoeffizienten Make Up 1 (λ H_2O)..... 199
Abbildung 188: Asymmetriefaktoren Make Up 1 (λ H_2O) 200
Abbildung 189: Abbé Refraktometer..... 201
Abbildung 190: Lichtbrechung im Abbé Refraktometer..... 202
Abbildung 191: Ergebnisskala Abbé Refraktometer..... 202
Abbildung 192: Prismenanordnung Abbé Refraktometer 202
Abbildung 193: Lichteintritt Abbé Refraktometer..... 203
Abbildung 194: Mettler Toledo RE40 Refraktometer..... 204
Abbildung 195: Kugelkoordinaten, Definition von Polar– und Azimutalwinkel..... 207
Abbildung 196: Legendre Approximation der Phasenfunktion von Make Up 1 (λ H_2O) 209
Abbildung 197: Vergleich der Rückstrahlung von Experiment und Modell..... 211
Abbildung 198: Flussverteilungen im Make Up l..... 213
Abbildung 199: Flussverteilung modelliertes Make Up, Bulk-Material, Rückstreuung an der Oberfläche 214
Abbildung 200: Flussverteilung modelliertes Make Up, Composite, Rückstreuung an der Oberfläche..... 214
Abbildung 201: Azimutale Flusskomponenten Make Up (Composite) an der Oberfläche..... 215
Abbildung 202: Flussverteilung modelliertes Make Up, Bulk-Material, in OD = 0,25 215
Abbildung 203: Flussverteilung modelliertes Make Up, Composite, in OD 0,25..... 216
Abbildung 204: Azimutale Flusskomponenten Make Up (Composite), in OD=0,25 216
Abbildung 205: Extinktionskoeffizient σ_E, Absorptionskoeffizien σ_A, Single Scattering Albedo ω_0..... 218
Abbildung 206: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α), SIM1 (m2SIM1-α), SIM2 (m2SIM2-α) 221
Abbildung 207: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α) und MU1-n (m2std- αx)..... 222
Abbildung 208: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α), SIM1 (m2SIM1-α), SIM1-n (m2SIM1-αx) 223
Abbildung 209: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α), SIM2 (m2SIM2-α), SIM2-n (m2SIM2-αx) 224
Abbildung 210: Phasenfunktion MU1 (m1std-α), SIM3-n (m3sim31- αx) 225
Abbildung 211: Rückstrahlung an Oberfläche für SIM1 (m2SIM1) 226
Abbildung 212: Rückstrahlung an Oberfläche für SIM2 (m2SIM2) 226
Abbildung 213: Rückstrahlung Make Up mit neuer Brechzahl (m2stdX)..... 227
Abbildung 214: Rückstrahlung SIM1 mit Brechzahl 2,0/0,1 (m2SIM1X) 228
Abbildung 215: Rückstrahlung SIM2 mit Brechzahl 2,0/0,1 (m2SIM2X) 229
Abbildung 216: Flussverteilung für das modellierte Experiment, 450 nm, in OD = 0,25 230
Abbildung 217: Flussverteilung odelliertes Experiment, 600 nm, diffuser Fluss in OD = 0,25 231
Abbildung 218: Diffuser Fluss des Experiments mit BZ = 2,0 / 0,1, 450 nm, in OD = 0,25..... 232
Abbildung 219: Diffuser Fluss des Experiment mit BZ = 2,0 / 0,1, 600 nm, in OD = 0,25 232
Abbildung 220: SIM1, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm..... 233
Abbildung 221: SIM1x, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm..... 233
Abbildung 222: SIM1, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm..... 233
Abbildung 223: SIM1x, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm..... 233
Abbildung 224: SIM2, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm..... 234
Abbildung 225: SIM2x, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm..... 234
Abbildung 226: SIM2, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm..... 234
Abbildung 227: SIM2x, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm..... 234
Abbildung 228: Azimutale Schnitte der Flussverteilung SIM2X, 450 nm, in OD = 0,25 235
Abbildung 229: Azimutale Schnitte der Flussverteilung SIM2X, 450 nm, in OD = 0,25 235
Abbildung 230: SIM3x diffuser Fluss in OD = 0,25, 450 nm..... 236
Abbildung 231: SIM3x diffuser Fluss in OD = 0,25, 600 nm..... 236
Abbildung 232: Reflexionsvermögen für bestimmte Brechzahlen laut Fresnel..... 239
Abbildung 233: Emission für m3sim3x bei 70° Lichteinfall 240
Abbildung 234: Screenshot MakeUp.exe..... 246
Abbildung 235: Screenshot MakeUp.exe, Helligkeits- und Farbprofile..... 246
Abbildung 236: Screenshot PictureAverage 247
Abbildung 237: ScreenShot DISS Merger..... 248

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Photometrische und Radiometrische Größen 21
Tabelle 2: 16 Grundfarben für HTML Seiten 27
Tabelle 3: sRGB Primärvalenzen 39
Tabelle 4: Qualitative Beurteilung des Farbabstands ΔE_{ab} 41
Tabelle 5: Farbeindruck bei verschiedener Beleuchtung (Farbfilter) 44
Tabelle 6: CIE Normlichtarten 45
Tabelle 7: Adjektive zur Beschreibung von schöner Haut 66
Tabelle 8: Verschönerndes und dekorierendes Make UP 72
Tabelle 9: In Ägypten verwendete Pigmente 76
Tabelle 10: Farbpigmente für dekoratives Make Up 87
Tabelle 11: Pigmente - Brechzahlen 89
Tabelle 12: ΔE_{Lab} PET und Make Up 125
Tabelle 13: ΔE_{ab} PET und Make-Up 126
Tabelle 14: ΔE_{L} PET und Make Up 126
Tabelle 15: ΔE_{Lab} Opdi, PET, PET plus roter Fleck 127
Tabelle 16: ΔE_{ab} Opdi, PET, PET plus roter Fleck 127
Tabelle 17: ΔE_{L} Opdi, PET, PET plus roter Fleck 127
Tabelle 18: Cie Lab Opdi, PET, PET und roter Fleck 128
Tabelle 19: ΔE_{Lab} PET mit rotem Fleck und Make Ups 128
Tabelle 20: ΔE_{ab} PET mit rotem Fleck und Make Ups 128
Tabelle 21: ΔE_{L} PET mit rotem Fleck und Make Ups 129
Tabelle 22: CIE–Lab PET mit rotem Fleck , PET mit Make Ups 129
Tabelle 23: ΔE_{Lab} Falte mit Produkten und Samt 130
Tabelle 24: ΔE_{ab} Falte mit Produkten und Samt 130
Tabelle 25: ΔE_{L} Falte mit Produkten und Samt 131
Tabelle 26: ΔE_{Lab} unbedeckter PET 134
Tabelle 27: Verschiebung Lab PET 135
Tabelle 28: Farbtemperatur Opdi und PET 135
Tabelle 29: ΔE_{Lab} Roter Fleck ohne und mit grünem Abdeckstift und Make Up 136
Tabelle 30: ΔE_{Lab} roter Fleck unbedeckt 136
Tabelle 31: Vergleich CIE Lab Farbkoordinaten roter Fleck, Make Up 137
Tabelle 32: ΔE_{Lab} Roter Fleck mit Produkten 138
Tabelle 33: ΔE_{Lab} Falte mit und ohne Produkt 139
Tabelle 34: ΔE_{Lab} Falte ohne Make Up 139
Tabelle 35: Farbtemperatur Falte 140
Tabelle 36: ΔE_{Lab} Falte mit Make Up 140
Tabelle 37: CIE Lab Farbkoordinaten Falte mit und ohne Make Up 141
Tabelle 38: ΔE_{ab} Roter Fleck mit und ohne Produkte 142
Tabelle 39: ΔE_{L} roter Fleck mit und ohne Produkte 143
Tabelle 40: ΔE_{ab} Falte mit und ohne Produkt 144
Tabelle 41: ΔE_{L} Falte mit und ohne Produkte 144
Tabelle 42: Liste der ROI 145
Tabelle 43: Camera Serien, erste Messreihe 146
Tabelle 44:Camera Serien, zweite Messreihe 146
Tabelle 45: Opdi Helligkeit und sRGB 147
Tabelle 46: MU1 und MU2 151
Tabelle 47: Helligkeitssteigerung Falte durch Faltenauffüller 2 154
Tabelle 48: Helligkeit und G–Koordinate Falte, Faltenauffüller, PET1 155
Tabelle 49: Helligkeitsverhältnisse Falte und Falte mit Make Ups 157
Tabelle 50: Roter Fleck unter MU 1, aC 60° 159
Tabelle 51: Lab Farbkoordinaten roter Fleck (Camera) 165
Tabelle 52: ΔE_{Lab} [MU1 – rF MU1], und [MU1 – rF AS MU1] 165
Tabelle 53: ΔE_{ab} MU1 und roter Fleck mit MU1, mit Abdeckstift und MU1 165
Tabelle 54: ΔE_{L} MU1 und roter Fleck mit MU1, mit Abdeckstift und MU1 165
Tabelle 55: ΔE_{Lab}, ΔE_{ab}, ΔE_{L} roter Fleck mit/ohne Abdeckstift und MU2 166
Tabelle 56: Farbabstand, Farbänderung und Helligkeitsänderung SDO - Camera 166
Tabelle 57: Faltenauffüller im Vergleich 173

Tabelle 58: Make Ups im Vergleich 176
Tabelle 59: Partikelgrößenverteilung Faltenauffüller 1 184
Tabelle 60: Anzahl und Größe der runden Partikel in Make Up 1 185
Tabelle 61: Optische Dicke und Extinktionskoeffizienten MU1 189
Tabelle 62: Optische Dicke Make Up 1 auf dem PET1 190
Tabelle 63: Berechnung der Schablonenfläche für die Filterbelegung 191
Tabelle 64: Massenbelegung des Isopore Filter 192
Tabelle 65: Messergebnisse der integrierenden Platte für Filter F1b/11-09 193
Tabelle 66: Absorptionskoeffizienten und optische Dicke für Absorption 193
Tabelle 67: Optische Dicke des Make Up 1 auf PET1 194
Tabelle 68: Single Scattering Albedo von Make Up 1 194
Tabelle 69: Streukoeffizienten Faltenauffüller 1 196
Tabelle 70: Asymmetriefaktoren Faltenauffüller 1 197
Tabelle 71: Streukoeffizienten Make Up 1 199
Tabelle 72: Asymmetriefaktoren Make Up 1 200
Tabelle 73: Messergebnisse für die Brechzahlen mit Mettler Toledo RE40 204
Tabelle 74: Dichte von Make Up 1 206
Tabelle 75: Einfalls- und Beobachtungsrichtung DISORT 211
Tabelle 76: σ_A und ω_0 für die Simulation 218
Tabelle 77: Partikelgrößen, - verteilung und weitere Parameter für Modellierung Experiment und Simulation 220
Tabelle 78: Flussverteilungen SIM3x, 20° polar, 50° azimutal 238

Formelverzeichnis

Formel 1: Brechzahl 7
Formel 2: Reflektierte Strahlstärke bei senkrechtem Lichteinfall 7
Formel 3: Reflexionskoeffizient 8
Formel 4: Fresnel'sche Formeln 8
Formel 5: Wellenlänge im Medium 9
Formel 6: Brechungsgesetz nach Snellius 9
Formel 7: Brechungsquotient 10
Formel 8: Größenparameter 13
Formel 9: Volumenstreufunktion $\beta(\theta)$ 13
Formel 10: Phasenfunktion 14
Formel 11: Streukoeffizient 14
Formel 12: Asymmetriefaktor 14
Formel 13: Transmissionsgrad 15
Formel 14: Extinktion und Extinktionskoeffizient 15
Formel 15: Absorption und Absorptionskoeffizient 15
Formel 16: Single Scattering Albedo aus den Wirkungsquerschnitten 16
Formel 17: Single Scattering Albedo ω_0 aus σ_e und σ_A 16
Formel 18: BRDF $\rho(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r)$ 17
Formel 19: Photometrisches Strahlungsäquivalent 19
Formel 20: Bestrahlungsstärke pro Fläche im Abstand r von der Lichtquelle 22
Formel 21: Bestrahlungsstärke im Abstand r von punktförmiger Lichtquelle 22
Formel 22: Lambert'sches Gesetz 22
Formel 23: Strahldichte Lambertsche Fläche 23
Formel 24: Strahldichte einer Lambert'schen Oberfläche 23
Formel 25: Strahldichtefaktor β 23
Formel 26: Strahldichtekoeffizient 24
Formel 27: Beziehung zwischen Strahldichte und Bestrahlungsstärke 24
Formel 28: Plank'sches Strahlungsgesetz für die spektrale Strahldichte 24
Formel 29: Stefan–Boltzmann Gesetz 25
Formel 30: Strahlungsemission eines schwarzen Körpers 25
Formel 31: Wien'sches Verschiebungsgesetz 25
Formel 32: Tristimuluswerte normalisiert 36
Formel 33: Ermittlung Lab aus XYZ 38
Formel 34: Farbabstand ΔE_{Lab} 41
Formel 35: Farbänderung ΔE_{ab} 41
Formel 36: Helligkeitsänderung ΔE_L 41
Formel 37: Ermittlung von CIE-XYZ eines Farbstimulus 42
Formel 38: Transformation XYZ in RGB 42
Formel 39: Transformation RGB in sRGB 43
Formel 40: Strahlungstransportgleichung 249
Formel 41: Source Funktion 249
Formel 42: 2M Legendre Polynome 250
Formel 43: Legendre Koeffizienten 250

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Abk.	Abkürzung
AS	Abdeckstift
aC	Winkel zur Camera
aL	Winkel zur Lampe
Bm	Mittelwert Blau – Farbkoordinate (sRGB)
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
Bsd	Standardabweichung Blau – Farbkoordinate (sRGB)
Bsp.	Beispiel
b	Streukoeffizient
CCD	Charge Coupled Device
CIE	Commission Internationale de l´Éclairage
CIE–Lab	Farbraum der CIE
CIE–XYZ	Farbraum der CIE
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c_m	Lichtgeschwindigkeit im Medium
d.h.	das heißt
E	Bestrahlungsstärke, Beleuchtungsstärke
E_e, E_r	Elektrische Feldstärkevektor, e – einfallend, r – reflektiert
e	Emissionsgrad
F	Falte
FA, FA1, FA2	Faltenauffüller, Faltenauffüller 1, Faltenauffüller 2
FK	Farbkarte
Gm	Mittelwert Grün – Farbkoordinate (sRGB)
Gsd	Standardabweichung Grün – Farbkoordinate (sRGB)
g	Asymmetriefaktor
H	Bestrahlung, Belichtung
I	Strahlstärke, Lichtstärke
INCI	International Nomenclature of Cosmetic Ingredients
IR	Infrarote Strahlung
ISO	International Organisation for Standardisation
J	Joule
Jhdt.	Jahrhundert
K	Kelvin
K_m	Maximales photometrisches Strahlungsäquivalent

$K(\lambda)$	Photometrisches Strahlungsäquivalent
L	Strahldichte, Leuchtdichte
lm	Lumen
lx	Lux
M	Spezifische Strahlungsemission, spezifische Lichtausstrahlung
MU, MU1, MU2	Make Up, Make Up 1, Make Up 2
m	Meter
NMF	Natural Moisturizing Factor
n	Brechzahl
n_d	Brechzahl Dermis
n_e	Brechzahl Epidermis
n_{sc}	Brechzahl Stratum corneum
nm	Nanometer
OD	optische Dicke
Opdi	OP.DI.MA. Referenzsstandard
P_e	Emittierte Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers
PET, PET1, PET2	Polyethylenterephthalat, PET–Blöcke 1 und 2
PETx, x steht für:	f – Falte, f-e – Make Up 1 in Falte, n – unbedeckt, n-e – Make Up 1 auf PET, gr – Abdeckstift auf rotem Fleck gr-e – Make Up 1 auf Abdeckstift auf rotem Fleck r – roter Fleck
$p(\theta)$	Phasenfunktion
Q	Strahlungsenergie, Lichtmenge
q	Strahldichtekoeffizient
RGB	Rot Grün Blau Farbraum
Rm	Mittelwert Rot – Farbkoordinate (sRGB)
Rsd	Standardabweichung Rot – Farbkoordinate (sRGB)
ROI	region of interest
r	Abstand
rF	Roter Fleck
Sc	Stratum corneum, Hornschicht
sRGB	Standard RGB Farbraum
SD–Card	Secure Digital Speicherkarte
SDO	Strahldichteoptik
s	Sekunde
sr	Steradiant
S_{sca}	Single Scattering Albedo
T	Absolute Temperatur

TaLi	Tageslichtlampe Philips Tornado CDL 865
t	Zeit
Uni Wien	Fakultät für Physik, Gruppe Aerosolphysik und Umweltphysik
UV	Ultraviolette Strahlung
u. a.	und andere
V(λ) Kurve	Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges
vgl.	vergleiche
W	Watt
Xm	Mittelwert der Helligkeit (sRGB)
Xsd	Standardabweichung der Helligkeit (sRGB)
z.B.	zum Beispiel
ΔE_{ab}	Farbänderung
ΔE_{L}	Helligkeitsänderung
ΔE_{Lab}	Farbabstand
α	Größenparameter
β	Strahldichtefaktor
$\beta(\theta)$	Volumenstreufunktion
δ	Temperaturkorrekturfaktor
ϕ	Strahlungsfluss, Lichtstrom
λ	Wellenlänge
ν	Frequenz
ρ	Reflexionskoeffizient
$\rho(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r)$	BRDF
σ	Stefan–Boltzmann Konstante ($5{,}67051 \cdot 10^{-8}$ W $\cdot$ m^{-2} $\cdot$ K^{-4})
σ_A	Absorptionskoeffizient
σ_e	Extinktionskoeffizient
τ	Transmissionsgrad
ω_0	Single Scattering Albedo

1 Einleitung und Problemstellung

Kosmetikfirmen machen für ihre Make Up Produkte unter anderem damit Werbung, dass sie Begriffe und Aussagen verwenden, die die physikalischen Eigenschaften ihrer Produkte betreffen. Diese Eigenschaften sollen einerseits Ergebnisse liefern, die im subjektiven Empfinden der Käuferin und Anwenderin begründet liegen, sind aber mit Hilfe von physikalischen Messungen auch objektiv feststellbar. Mit Hilfe von physikalischen Instrumenten – wie zum Beispiel Aufnahmen mit einer Digitalcamera, einer Strahldichteoptik bzw. einer Ulbrichtkugel – lässt sich die subjektive Wahrnehmung der Anwenderin auf die objektiven Farbwerte reduzieren, die ihr Auge aufnimmt. Physikalische Messungen – wie Absorption, Reflexion, Streuung, Partikelgröße, Brechzahl – an den Produkten liefern relevante Daten, mit deren Hilfe ihre physikalisch-optischen Eigenschaften festgestellt werden können.

Kosmetikfirmen geben aus Konkurrenzgründen ihre Ergebnisse nicht bekannt. In wie weit die Forschung in Konzernen der Kosmetikindustrie vorangeschritten ist, kann nur an Hand von öffentlich zugänglichen Arbeiten beurteilt werden. In diese Arbeit fließen Themen aus den verschiedensten Forschungsgebieten ein.

Wie Haut auf Strahlung des sichtbaren Wellenlängenspektrums reagiert, wie viel davon absorbiert wird und wieder zurückgestreut, bzw. reflektiert wird, ist nicht nur ein Forschungsgebiet der Lasersicherheit sondern auch der Medizin. Diese Untersuchungen wurden von Yamada et al.[1] auch für Haut mit aufgetragenem Make Up mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation durchgeführt. Seine Gruppe untersuchte, welche Faktoren Haut „schön“ aussehen lassen, was wohl in der japanischen Kultur etwas anderes bedeutet, als in unseren Kulturkreisen, jedoch von den gleichen physikalischen Vorgängen bestimmt wird. Dabei wurde die Transmission und Reflexion von Licht verschiedener Wellenlängen von Haut mit Make Up untersucht und der Einfluss auf das Aussehen der Haut.

Diese Arbeit soll mit ihrer Forschungsfrage noch einen Schritt weitergehen und nicht nur allgemein die Oberfläche von Haut untersuchen, sondern auch, ob die Wahrnehmung unerwünschter „Schönheitsmängel“ (Falten, rote Flecken) durch Make Up und andere Produkte korrigiert werden kann.

[1] Yamada (2005).

2 Übersicht

Kosmetika sind Alltagsprodukte, die marktwirtschaftlich eine immer größere Rolle spielen. Mit welchen Methoden und Experimenten lässt sich die Güte eines Make Up Produktes in Bezug auf die Erwartungshaltung der Konsumentin feststellen? Kosmetikfirmen werben nicht nur mit Produktnamen, die eine bestimmte Wirkung suggerieren, sie machen auch konkrete Aussagen über diese. Teilweise werden sie mit physikalischen Aussagen beworben, die zum Kauf verlocken sollen. Diese Arbeit untersuchte Produkte, für die die Produzenten mit Hilfe von physikalischen Effekten eine Verbesserung und Verschönerung des Aussehens der Haut der Konsumentin versprachen. Es wurde überprüft, ob die Produkte diese Aussagen in physikalischer Hinsicht auch rechtfertigen.

Es sollte gezeigt werden, dass es möglich ist, für Make Up ein einfaches Modell aufzustellen. Mit Hilfe dieses Modells wurde versucht, durch geeignete Änderung der für das Make Up gefundenen Parameter dessen Eigenschaften (Deckfähigkeit, Helligkeit) zu verändern.

Dafür war es wichtig sich mit der auftretenden Problemstellung auseinander zu setzen, die Frage zu klären, was mit dem Auftragen von Make Up erreicht werden soll. Das Einsatzgebiet von Make Up ist recht umfangreich. Ursprünglich wurden mehrere Fragen zu verschiedensten Einsatzgebieten zur Beantwortung der Forschungsfrage ausgewählt. Im Laufe der Bearbeitung des Themas wurden die Fragen jedoch eingeschränkt. Die Fragen, die mit dieser Arbeit beantwortet werden sollen sind im Folgenden angeführt.

Um die Wahrnehmung zu objektivieren und zur sinnvollen Durchführung der Experimente war es wichtig, sich zuerst mit den theoretischen Grundlagen der Optik, der Farbmetrik, des Aufbaus der Haut und der Zusammensetzung von Make Up auseinander zu setzen. Das lieferte die Basis dafür, die Problemstellungen zu definieren. Darüber konnten dann die Lösungsansätze definiert und die Experimente für die nötigen Messungen ausgewählt werden.

2.1 Wissenschaftliche Fragen, exemplarisch

Nachdem eine Untersuchung aller von physikalischen Effekten in Make Up aufgeworfenen Fragen zu umfangreich für diese Arbeit wäre, wurden die Untersuchungen auf die Frage der Minderung von Falten und der Abdeckung der Haut generell und von roten Flecken auf der Haut im speziellen beschränkt.

Das Hauptaugenmerk fiel auf den Sachverhalt, ob die subjektive Empfindung über einen vorhandenen Makel der Make Up Anwenderin nach dem Auftragen von Make Up bzw. anderen Produkten eine Verbesserung ergab und ob das mit den Ergebnissen einer physikalischen Messung bestätigt werden kann.

Eine weitere Frage, die beantwortet werden sollte, war, sind es wirklich die physikalischen Eigenschaften der Inhaltsstoffe von Make Up (Brechzahl, Partikelgröße, Partikelverteilung, etc.) die den gewünschten Effekt der Produkte hervorrufen, und kann man diese Eigenschaften auf Basis theoretischer Modellierung verbessern?

Letztendlich war das Ziel dieser Arbeit, mit Hilfe von verschiedenen Messergebnissen ein Modell aufzustellen, mit dem die Wirkung von Make Up überprüft werden kann. Und es soll-

te auf Grund einer theoretischen Änderung der physikalischen Eigenschaften des Make Up eine Verbesserung seiner Wirkung ermöglicht werden. Das heißt dieses Modell sollte in einer Simulation mit geänderten physikalischen Parametern verbesserte Ergebnisse für die erwarteten Resultate des Make Up liefern.

Es gibt viele Anwendungsgebiete, für die Make Up eingesetzt wird, um eine Verbesserung des Hautbildes herbeizuführen. Einige Bereiche wurden herausgegriffen, für die die Forschungsfragen beantwortet werden sollten und sind im Folgenden beschrieben.

2.1.1 Gerichtete und über alle Richtungen gemittelte Eindrücke

Beobachter sehen Gesichter aus einer bestimmten Richtung. Welchen Eindruck hat ein Beobachter, wenn er aus einer bestimmten Richtung auf eine Störstelle (Rötung, Falte, etc.) und ihre Umgebung auf der Haut blickt und welche Werte liefert ein objektiver (gemessener) „Eindruck“?

Das Gegenüber eines Beobachters bleibt nicht in Ruhe und die ständige Bewegung der Augen führt dazu, dass er nicht nur einen gerichteten sondern auch einen aus verschiedenen Richtungen gemittelten Eindruck von dieser Störstelle erhält. Wie sehen dieser gemittelte Eindruck und der dazu objektive „Eindruck“ aus?

2.1.2 Reduktion von Falten

In Abschnitt 3.3.4.1 wird beschrieben, dass Falten durch ihr nicht Vorhandensein, bzw. ihr nicht sichtbar sein, ein jugendliches Aussehen ermöglichen. Gerade über Produkte, die diesem Zweck dienen, werden von der Werbeindustrie Aussagen gemacht, die einen physikalischen Hintergrund des Erfolges des Produkts vorgeben. Das machte sie für eine Untersuchung interessant.

Einige Make Up Produkte versprechen ein jugendlich und frisch wirkendes Hautbild. Es sollte untersucht werden, welche Verbesserung des Aussehens einer Falte sich bei Make Up Auftrag, bzw. bei Verwendung eines Produkts, das die Reduzierung der optischen Sichtbarkeit von Falten verspricht, ergeben. Welche physikalischen Eigenschaften haben diese Produkte? Kann man mit den gegebenen physikalischen Eigenschaften die Aussage der Versprechen, die über die Reduktion der Sichtbarkeit von Falten durch die Produkte gemacht werden, unterstützen?

Zwei Arten von Produkten, die eine Faltenminderung versprechen wurden untersucht:

- spezielle Faltenauffüller, die in der Falte aufgetragen werden
- speziell beworbene Make Ups mit „dafür gut gewählten besonders Licht reflektierenden oder streuenden Partikeln“

Es sollte geklärt werden, ob es mit Hilfe der Faltenauffüller bzw. den Make Ups möglich ist, eine Falte optisch zum Verschwinden zu bringen, weil aus der Falte Licht so zurückgeworfen wird, dass diese der umgebenden Haut vom Aussehen her gleich wird.

2.1.3 Abdecken von Farbflecken im Gesicht

Die Frage der Abdeckung der Haut, um ein ebenmäßiges Erscheinen zu gewährleisten, war speziell deshalb von Interesse, weil hier nicht nur das Gebiet der physikalischen Optik, sondern auch die Farbmetrik mit ihren Messmethoden eine Möglichkeit zur Untersuchung der Produkte lieferte.

Die Abdeckung von Hautfehlern (Pigmentflecken, rote Flecken) im Gesicht kann auf verschiedenste Art und Weise erfolgen (mehr dazu in Abschnitt 4.1.2). Besonders interessant schien die Frage, wie ein grüner Abdeckstift bei der Abdeckung von roten Flecken wirkt und die physikalische Grundlage dazu ist. Es sollte überprüft werden, ob die weithin geläufige Annahme, dass dieser rote Flecken „neutralisiert“, den Tatsachen entspricht.

Es wurde auch untersucht, ob Make Up allein bereits eine genügende Abdeckung von Fehlstellen und damit eine einheitliche Hautfarbe bewerkstelligen kann.

2.1.4 Weitere Fragen

Die an sich sehr interessanten Fragen, wie die Produkte physikalisch wirken, die vergrößerte Poren mindern, bzw. ob Kontrastverstärkung (z.B. durch Verwendung von orangem Lidschatten für jemanden mit blauen Augen) ein messbarer Effekt ist, wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

2.2 Vorgehensweise

Die subjektiven gerichteten und gemittelten Eindrücke, die ein Beobachter von einer Störstelle in Bezug auf ihre Umgebung bekommt, müssen durch objektive, auf Messgeräten basierende Aussagen, untersucht werden.

Um für die subjektiven Eindrücke eines Beobachters objektiv gemessene Werte zu erhalten, sollen die Forschungen und Ergebnisse der Farbmetrik, gemäß der internationalen Beleuchtungskommission CIE herangezogen werden. Sie sollen dabei helfen, über eine Digitalcamera und den sRGB - Daten, die sie liefert, und die nötigen Transformation die „objektiven“ Lichtfarbwerte zu erhalten, die im Auge eintreffen. Mit Hilfe von Vergleichsmessungen „makelloser“ Stellen der Haut soll festgestellt werden, ob sich objektiv eine messbare Verbesserung des Eindrucks ergeben hat.

Ebenso liefern Daten über die spektrale Intensitätsverteilung, die bei Messung der Reflexion und Streuung der Produkte mit Hilfe einer Strahldichteoptik, bzw. Ulbrichtkugel und einem Bentham–Doppelmonochromator durchgeführt werden, „objektiv“ gemessene Werte.

Mit diesen Experimenten sollten die Fragen zu gemitteltem bzw. gerichtetem Eindruck eines Beobachters, der Qualität von Faltenreduktion und Abdeckung von Störstellen beantwortet werden können.

Um ein Modell aufzustellen, mit dem die Wirkung von Make Up auf der Haut sinnvoll überprüft werden kann, soll auf die Erkenntnisse der Streutheorie in der Aerosolphysik zurückgegriffen werden. Sie sollen die Möglichkeit liefern, Messergebnisse aus verschiedenen Expe-

rimenten zu erhalten, die zur Modellbildung und anschließenden Simulation die wesentlichen Voraussetzungen bilden.

Vorhandene Modelle und Softwareprodukte, die für Aerosolmessungen zum Einsatz kommen sollen so angepasst werden, dass sie den vorliegenden Gegebenheiten entsprechen und das Make Up auf der Haut mit den gegebenen physikalischen Messwerten modellieren und dann mit sinnvoll veränderten Werten auch simulieren können. Damit soll festgestellt werden, welche Verbesserungsmöglichkeiten es für die Produkte gäbe.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Physik

Die Natur und Eigenschaften der Lichtausbreitung wurde von vielen Physikern untersucht und beschrieben und seit dem 17. Jhdt. sind verschiedenste Theorien über die Wellen- und Teilchennatur des Lichts aufgestellt worden. Physiker wie Newton, Huygens, Young, Fresnel und Foucault beschäftigten sich mit dem Thema. Mitte des 18. Jahrhunderts veröffentlichte Maxwell seine Feldgleichungen, die von Hertz einige Zeit später in Versuchen bestätigt wurden. Einsteins Arbeit über den Photoeffekt, seine Erkenntnis, dass die Energie der Photonen proportional zur Frequenz ist, die Arbeiten darüber, dass auch Atome, Moleküle und Elektronen einen dualen Welle–Teilchen–Charakter haben und die Theorien von Physikern wie Rutherford, Bohr und Schrödinger, die den Quantencharakter von Licht beschrieben, bestimmten die Erkenntnisse über elektromagnetische Wellen im vorigen Jahrhundert.[2]

In diesem Kapitel werden die Effekte bei der Ausbreitung von Licht, wie Reflexion, Brechung, Absorption, Streuung, Transmission und Extinktion beschrieben und die physikalischen Größen definiert, die sich bei der Messung von Licht ergeben.

3.1.1 Reflexion[3]

Reflexion tritt dort auf, wo Licht auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien trifft. Sie wird verursacht von einer Lichtwelle, die auf die Grenzfläche trifft und dort von den Atomen des reflektierenden Mediums absorbiert und wieder abgestrahlt wird – dadurch wird eine Welle hervorgerufen, die sich von der Grenzfläche wegbewegt. Trifft Licht auf ein für es durchlässiges Medium wird ein Teil der Energie reflektiert und ein Teil dringt ins Medium ein (Transmission). Der reflektierte Anteil der Welle hängt vom Einfallswinkel, der Orientierung des elektrischen Feldes der Welle und dem Lichtgeschwindigkeitsverhältnis in den beiden Medien ab.

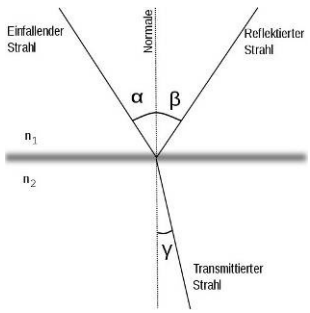


Abbildung 1: Spiegelnde Reflexion und Brechung[4]

Mit α als Einfallswinkel und β als Reflexionswinkel, besagt das Reflexionsgesetz, dass einfallender, reflektierter Strahl und Einfallslot (die Normale auf die Grenzfläche) in einer Ebene (Einfallsebene) liegen und β gleich α entspricht (siehe Abbildung 1).

---

2 Vgl. Tipler (2000), S. 1023f.
3 Vgl. ebenda, S. 1030ff.
4 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Reflexion_(Physik) [14.1.2010], Grafik erstellt von Tim Hellwig, GNU Free Documentation License.

Zur Charakterisierung der optischen Eigenschaft eines Mediums bildet man das Verhältnis zwischen der Vakuumslichtgeschwindigkeit c und der Geschwindigkeit c_m des Lichts in ebendiesem Medium und erhält die Brechzahl n.

$$n = \frac{c}{c_m}$$

Formel 1: Brechzahl[5]

Bei senkrechtem Einfall eines Lichtstrahls der Strahlstärke I_0 auf eine Grenzfläche zwischen einem Medium mit Brechzahl n_1 und einem Medium mit Brechzahl n_2 ergibt sich für den reflektierten Strahl die Strahlstärke nach Formel 2, die Differenz zwischen der einfallenden und der reflektierten Strahlstärke transmittiert durch das Medium.

$$I = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 I_0$$

Formel 2: Reflektierte Strahlstärke bei senkrechtem Lichteinfall[6]

Grundsätzlich ist zwischen spiegelnder Reflexion und diffuser Reflexion zu unterscheiden. Erstere findet an glatten, ebenen Flächen statt, die Lichtstrahlen fallen alle aus einer Richtung ins Auge, sie werden von der Oberfläche alle in eine Richtung umgelenkt. Von rauen Oberflächen wird Licht diffus reflektiert, die Lichtstrahlen werden dann von der Oberfläche in alle Richtungen gelenkt und fallen so von vielen Punkten mit unterschiedlichen Winkeln ins Auge oder auf ein Messgerät (siehe Abbildung unten).

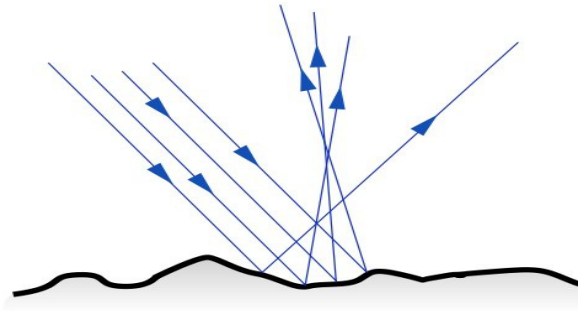


Abbildung 2: Diffuse Reflexion[7]

Ob eine Oberfläche diffus oder regelmäßig reflektiert hängt auch von der Wellenlänge des auffallenden Lichts ab. Letzteres ist der Fall, wenn die Größenordnung der Wellenlänge die der Oberflächenunebenheiten übersteigt. Man beobachtet z.B. dass von gebürstetem Stahl sichtbares Licht diffus reflektiert wird, das Licht eines CO_2 Lasers (λ = 10,6 µm) jedoch spiegelnd reflektiert wird.[8]

5 Vgl. Tipler (2000), S. 1030.
6 Vgl. ebenda.
7 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Reflexion_(Physik) [5.3.2010], Grafik erstellt von Marcelo Reis am 27.9.2005, Lizenz Creative Commons, Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Unported.
8 Vgl. Henderson (1998), S. 56.

3.1.1.1 Reflexionskoeffizient ρ

Das Reflexionsverhalten von Materialien wird quantitativ über den Reflexionskoeffizient ρ beschrieben. Er gibt das Verhältnis zwischen einfallendem und reflektiertem Strahlungsfluss (Φ und Φ_ρ [W], siehe 3.1.11.1) an.

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi_0}$$

Formel 3: Reflexionskoeffizient

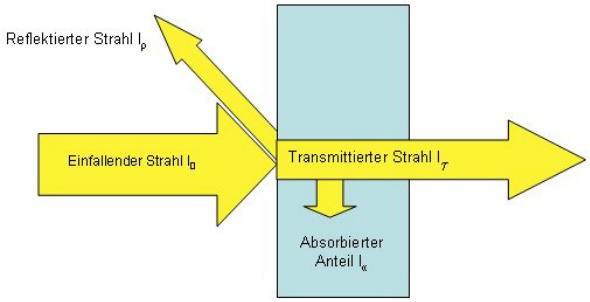


Abbildung 3: Reflexion, Transmission, Absorption[9]

Der Wert des Reflexionskoeffizienten ρ liegt zwischen 0 und 1.

3.1.1.2 Fresnel'sche Formeln[10]

Das Verhalten der Amplituden der elektrischen und magnetischen Feldstärke von Licht, das auf eine ladungs– und stromfreie Grenzschicht trifft, wird durch die Fresnel'schen Formeln beschrieben, die auf die Maxwell'schen Gleichungen zurückzuführen sind.

Die Feldvektoren des elektrischen und magnetischen Feldes werden dazu in ihre senkrechte und parallele Komponente in Bezug auf die ebene Grenzfläche zerlegt. Die Amplitudenverhältnisse aus reflektiertem und einfallendem Strahl des elektrischen Feldes (E_r - reflektiert und E_e einfallend) für den Spezialfall von gleichen magnetischen Permeabilitäten ergeben sich nach Formel 4. Die senkrechte und die parallele Komponente sind mit dem Index s und p gekennzeichnet.

$$\left(\frac{E_r}{E_e}\right)_p = \frac{n_2 \cdot \cos\alpha - n_1 \cdot \cos\gamma}{n_2 \cdot \cos\alpha + n_1 \cdot \cos\gamma}$$

$$\left(\frac{E_r}{E_e}\right)_s = \frac{n_1 \cdot \cos\alpha - n_2 \cdot \cos\gamma}{n_1 \cdot \cos\alpha + n_2 \cdot \cos\gamma}$$

Formel 4: Fresnel'sche Formeln

[9] Quelle: URL http://www.osram.co.at/osram_de/Lichtplanung/Ueber_Licht/Licht_&_Mensch/Reflexionskoeffizienten/index.html# [5.3.2010].

[10] Vgl. Jahns (2001), S. 77ff.

Hierbei ist n_1 die Brechzahl des Mediums, in dem das Licht reflektiert wird, n_2 diejenige des Materials, auf das das Licht auffällt (siehe Abbildung 1). α bezeichnet den Einfallswinkel und γ den resultierenden Brechungswinkel im Medium, auf den das Licht auftrifft.

Für die Intensitätsverhältnisse quadriert man die Amplitudenverhältnisse der elektrischen Feldstärken.

3.1.2 Brechung[11]

Ein Lichtstrahl der aus einem Medium kommt und auf ein anderes trifft und in dieses eindringt, wird auf Grund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Lichts in den beiden Medien im zweiten von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Im Medium ist seine Geschwindigkeit immer langsamer als im Vakuum, was durch Streuprozesse der Atome des Mediums zustande kommt. Diese führen zu einer Phasenverzögerung des Strahls. Die Brechzahl (siehe Formel 1) für Medien ist daher immer größer als eins. Der Begriff optisch dichter in Bezug auf zwei Medien bezeichnet das Medium mit der höheren Brechzahl. Die Frequenz der Lichtwelle ändert sich beim Durchtritt durch ein Medium nicht.

Da die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum sich durch das Produkt aus Wellenlänge λ und Frequenz ν ergibt, beträgt die Wellenlänge λ_n im Medium

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

Formel 5: Wellenlänge im Medium[12]

Das Brechungsgesetz von Snellius gibt an, in welche Richtung der Lichtstrahl nach Eintritt in das Medium abgelenkt wird. Kommt der Lichtstrahl aus dem Medium mit der Brechzahl n_1 und dringt in eines mit der Brechzahl n_2 ein, und ist der Einfallswinkel α, so ergibt sich der Berechungswinkel γ des transmittierten Strahls (siehe Abbildung 1) nach Formel 6. Einfallender Strahl, gebrochener Strahl und Einfallslot liegen dabei in einer Ebene.

$$\sin\gamma = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin\alpha$$

Formel 6: Brechungsgesetz nach Snellius[13]

Totalreflexion tritt beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium auf, wenn gemäß Formel 6 die rechte Seite der Gleichung größer oder gleich eins wird. Sin γ = 1 (γ = 90°) definiert den Grenzwinkel α für den eintretenden Strahl.

3.1.2.1 Brechungsquotient

Die Brechzahl n gibt an, wie sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einem beliebigen Medium im Vergleich zu der im Vakuum ändert. Betrachtet man das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht in zwei beliebigen Medien zueinander erhält man den Brechungsquotient. Er ist der Quotient aus den Brechzahlen der beiden Medien.

[11] Vgl. Tipler (2000), S. 1032ff.
[12] Vgl. ebenda, S. 1033.
[13] Vgl. ebenda, S. 1034.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}$$

Formel 7: Brechungsquotient[14]

Der Winkel α ist der Winkel des einfallenden Lichtstrahls, γ derjenige des gebrochenen Strahls in Bezug zum Einfallslot (Abbildung 1).

3.1.2.2 Dispersion[15]

Die Brechzahl n steigt bei transparenten Stoffen im sichtbaren Wellenlängebereich mit der Frequenz des Lichts an. Je kleiner die Frequenz des Lichts, desto kleiner ist die Geschwindigkeitsänderung und damit die Brechzahl n beim Durchtritt durch das Medium. Rotes Licht wird weniger stark gebrochen als violettes. Dieser Effekt, der Dispersion genannt wird, führt zur Aufspaltung von weißem Licht in die einzelnen spektralen Anteile beim Durchtritt durch ein Prisma oder in einem Regentropfen (Regenbogen).

3.1.3 Streuung

Streuung bedeutet, dass Atome Lichtwellen absorbieren und sie danach wieder in alle Richtungen aussenden.[16] Die Strahlstärke I_0 eines Lichtstrahls, der in einer bestimmten Richtung in ein Medium einfällt nimmt auf dem Weg in Einfallsrichtung durch das Medium ständig ab. Verursacht wird Streuung durch Inhomogenitäten in den optischen Eigenschaften von Materie, wenn z.B. kleine Partikel mit unterschiedlicher Brechzahl eingelagert sind oder wenn verschiedene Materialien in einer Mischung vorliegen und die Dichte variiert.[17] Ebenso kann die Form der Partikel, die im Material verschieden orientiert vorliegen, oder eine Schwankung in der Konzentration einer Lösung zu Streuung führen.[18]

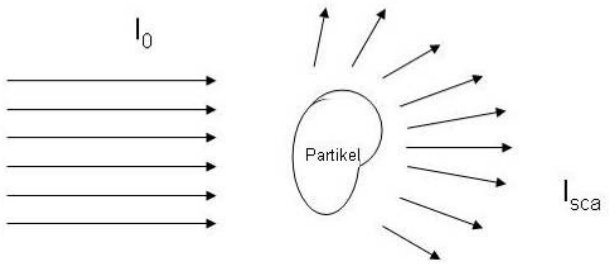


Abbildung 4: Streuung elektromagnetischer Wellen an einem Partikel[19]

Trifft eine Lichtwelle auf ein Hindernis (z.B. ein Elektron, ein festes oder flüssiges Partikel, u. a.) versetzt es in diesem elektrische Ladungen in Schwingungen. Die beschleunigten Ladungen senden gestreutes Licht (I_{sca}) in alle Richtungen aus – es kommt zu einer Anregung

[14] Vgl. Sexl (2007), S. 10.
[15] Vgl. Tipler (2000), S. 1038.
[16] Vgl. ebenda, S. 1032.
[17] Vgl. Henderson (1998), S. 54.
[18] Vgl. Bohren (1983), S. 6.
[19] Quelle: modifiziert übernommen von ebenda, S. 4.

durch elektromagnetische Wellen und zu einer Rückausstrahlung derselben. Wird ein Teil der einfallenden Energie in eine andere umgewandelt, findet auch Absorption statt.[20]

3.1.3.1 Einfachstreuung

Einfachstreuung tritt auf, wenn die Partikel klein im Verhältnis zur Lichtwellenlänge und weit voneinander entfernt sind. Einzelne Partikel treten in Wechselwirkung mit der einfallenden Strahlstärke und es kommt zu keiner weiteren Wechselwirkung des einmal gestreuten Lichts. Die Gesamtstrahlstärke, die durch die Wechselwirkung aller Partikel im Streuvolumen entsteht, ist klein im Vergleich zur einfallenden Strahlstärke. Im Labor kann Einfachstreuung an Partikeln mit einer entsprechend verdünnten Lösung erreicht werden.[21]

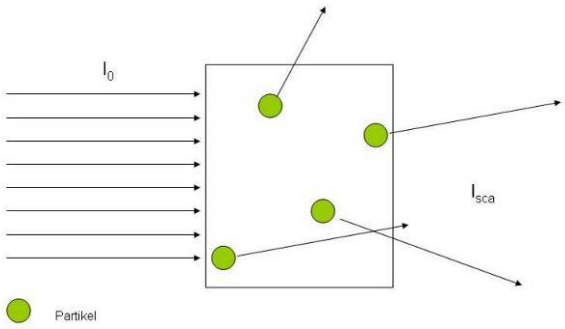


Abbildung 5: Wechselwirkung von Licht mit Materie: Einfachstreuung

3.1.3.2 Mehrfachstreuung

Mehrfachstreuung tritt auf, wenn in das Streuvolumen einfallendes Licht von einem Partikel absorbiert und wieder emittiert wird und dieses gestreute Licht mit weiteren Partikeln wechselwirkt.[22]

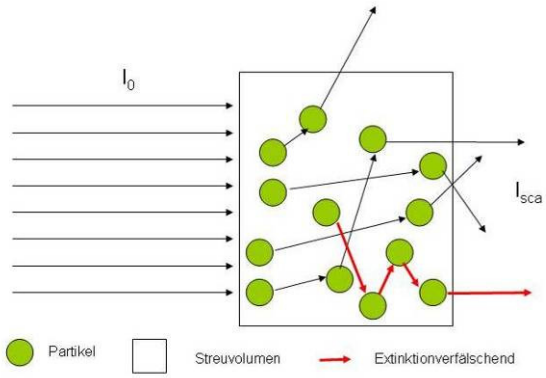


Abbildung 6: Wechselwirkung von Licht mit Materie: Mehrfachstreuung

Kommt es in einem Streuvolumen zu Mehrfachstreuung, wird die in diesem Volumen stattfindende Extinktion verfälscht, weil das Licht, nach mehreren Wechselwirkungen das Streuvolumen wieder in Vorwärtsrichtung ($\theta = 0°$) verlassen kann und dadurch die Extinktion mindert (siehe Abbildung oben).

---

20 Vgl. Bohren (1983), S. 3ff.
21 Vgl. ebenda, S. 9.
22 Vgl. Jonasz (2007), S. 150.

3.1.3.3 Elastische und inelastische Streuung

Licht wird elastisch gestreut, wenn die gestreuten Lichtwellen dieselbe Frequenz haben, wie die einfallende Lichtwelle. Ein Beispiel dafür ist Rayleigh–Streuung (siehe unten).[23]

Im Gegensatz dazu ist inelastische Streuung dadurch gekennzeichnet, dass sich die Energie und damit die Frequenz des gestreuten Lichts von der des einfallenden unterscheiden. Ein Teil der Energie wird in den Bindungszustand der bei der Streuung betroffenen Moleküle investiert. Die Frequenz des Lichts wird niedriger, wenn das Molekül nach dem Streuvorgang einen höheren Energiezustand hat. Ein Beispiel für inelastische Streuung wäre Raman–Streuung.[24]

3.1.3.4 Rayleigh– und Mie–Streuung

Die Streuung an kugelförmigen Teilchen lässt sich in drei Bereiche gliedern, die von der Größe der Teilchen in Bezug auf die Wellenlänge des einfallenden Licht abhängen.

Ist der Durchmesser des Teilchens sehr viel kleiner als die Wellenlänge ($< \lambda/10$) des einfallenden Lichts tritt Rayleigh–Streuung auf. Die Intensität, die Teilchen jedweder Form in diesem Fall in eine bestimmte Richtung streuen ist proportional zu λ^{-4} und fast isotrop. Das Licht wird in 90° Richtung mit der halben Intensität der Vorwärtsstreuung gestreut, außerdem wird das Licht polarisiert.[25] Das Blau des Himmels ist ein Beispiel für diese Streuung. [26] Es kommt zustande, weil kurze Wellenlängen durch die Rayleighstreuung von Licht an den Gasmolekülen der Luft stärker gestreut werden.

Die Abbildung unten zeigt die Verteilung des Streulichts bei Rayleigh– und bei Mie–Streuung.

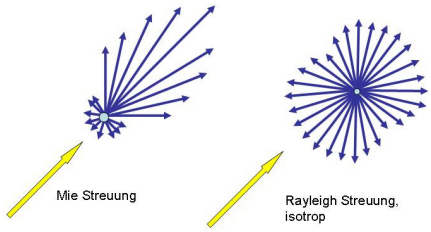


Abbildung 7: Mie - und Rayleigh - Streuung

Entspricht die Größenordnung des Teilchendurchmessers der Lichtwellenlänge oder ist er größer, kommt es zu Mie–Streuung. Alles auf ein Partikel einfallendes Licht wird in gleicher Form aber stark richtungsabhängig gestreut. Zu sehen ist das am Beispiel von weiß erscheinenden Wolken. Im Gegensatz zur Rayleigh–Streuung kommt es bei Mie–Streuung verstärkt zu Streuung in Vorwärtsrichtung.

---

[23] Vgl. Bohren (1983), S. 7.
[24] Vgl. Jonasz (2007), S. 8.
[25] Vgl. URL http://www.andor.com/learning/glossary/ [16.10.2010].
[26] Vgl. Bohren (1983), S. 132.

Ist der Größenparameter (siehe unten) der Teilchen sehr viel größer als eins, so finden an ihnen Reflexion, Beugung und Brechung nach den Gesetzen der geometrischen Optik statt.

3.1.3.5 Größenparameter

Teilchen, an denen Streuung stattfindet, werden oft der Einfachheit halber als kugelförmig angenommen und der Größenparameter α wird über ihren Radius r mit Hilfe von Formel 8 bestimmt.

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

Formel 8: Größenparameter

3.1.3.6 Volumenstreufunktion

Die Volumenstreufunktion β(θ) beschreibt, wie Licht von einem Medium, das ein Volumen erfüllt (Teilchen in Wasser oder in Gasen), in verschiedene Richtungen gestreut wird und gibt die winkelmäßige Verteilung des gestreuten Lichts an.[27]

Für axial symmetrische Ausbreitung des einfallenden Strahls im Medium ergibt sich die Volumenstreufunktion β zu:

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{EdV} \qquad [\beta(\theta)] = m^{-1}sr^{-1}$$

Formel 9: Volumenstreufunktion β(θ)[28]

θ ist der Winkel, in dem das gestreute Licht gemessen wird (türkises Element in Abbildung 8), dI(θ) [W sr^{-1}] die Intensität des gestreuten Lichts in diese Richtung und E die Bestrahlungsstärke [W m^{-2}] des Streuvolumens dV ([m³], graues Element in Abbildung 8), die sich durch eine ebene Lichtwelle im Streumedium ergibt.

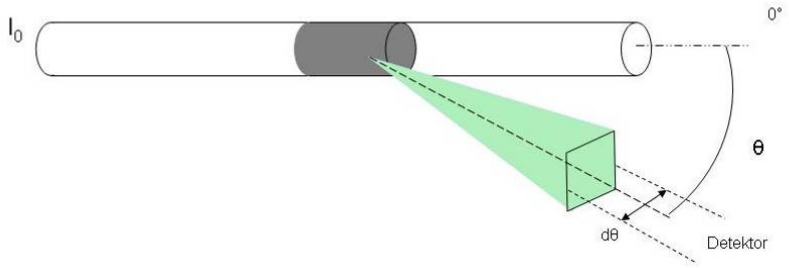


Abbildung 8: Veranschaulichung der Volumenstreufunktion[29]

Der Streuwinkel θ ist jener Winkel, der sich zwischen der Richtung des einfallenden Lichtstrahls und der optischen Achse des Detektors, der das gestreute Licht misst, ergibt (siehe Abbildung oben).

[27] Vgl. Jonasz (2007), S. 146.
[28] Vgl. ebenda.
[29] Quelle: adaptiert nach Jonasz (2007), S. 147.

3.1.3.7 Phasenfunktion und Streukoeffizient

Die Phasenfunktion p(θ) liefert die Form der Volumenstreufunktion, also die Verteilung der Intensität des gestreuten Lichts rund um das Streuvolumen.

$$p(\theta) = \frac{\beta(\theta)}{b} \qquad [p] = sr^{-1}$$

Formel 10: Phasenfunktion[30]

Formel 10 enthält den Streukoeffizienten b, der in m^{-1} angegeben wird. Er ergibt sich aus dem Integral der Volumenstreufunktion über den gesamten Raumwinkel und gibt den Betrag der Intensität des gestreuten Lichts an.

$$b = 2\pi \int_0^{\pi} \beta(\theta) \sin\theta d\theta \qquad [b] = m^{-1}$$

Formel 11: Streukoeffizient[31]

Für eine axial symmetrische Volumenstreufunktion können auch der Vorwärts- und Rückwärtsstreukoeffizient, durch Einsetzen der entsprechenden Grenzen (0 – π/2 bzw. π/2 – π) in die Integrale, ermittelt werden.

3.1.3.8 Asymmetriefaktor

Der Asymmetriefaktor g gibt an, in welche Richtung ein einfallender Lichtstrahl von einem Partikel bevorzugt gestreut wird und wie sich das gestreute Licht um das Streuzentrum herum verteilt. Er ergibt sich aus dem mittleren Cosinus des Streuwinkels.

$$g = \langle \cos\theta \rangle = 2\pi \int_{-1}^{1} p(\theta) \cos\theta \, d\cos\theta$$

Formel 12: Asymmetriefaktor[32]

Bei isotropen (d.h. das Licht wird in alle Richtungen gleich gestreut) oder symmetrischen Phasenfunktionen geht der Asymmetriefaktor gegen Null. Dies ist der Fall bei der Lichtstreuung an Partikeln, deren Größe viel kleiner als die Lichtwellenlänge ist (Rayleigh–Streuung). Er ist positiv, wenn die Streuung mehr in Vorwärtsrichtung (in dieselbe Richtung wie das einfallende Licht, θ = 0°) gerichtet ist und negativ für rückwärts gerichtete Streuung (θ = 180°).[33]

3.1.4 Transmission

So wie der Reflexionskoeffizient das Reflexionsverhalten von Materialien beschreibt, beschreibt der Transmissionsgrad τ das Verhalten von Licht bei der Transmission durch ein Material. Er gibt das Verhältnis zwischen auf ein Medium einfallender Lichtintensität I_0 und aus

30 Vgl. Jonasz (2007), S. 148.
31 Vgl. ebenda.
32 Vgl. ebenda, S. 150.
33 Vgl. Bohren (2004), S. 72.

diesem austretender Lichtintensität I_τ, bzw. einfallendem und austretendem Lichtstrom (Φ und Φ_τ, siehe Abbildung 3) an.[34]

$$\tau = \frac{I_\tau}{I_0}$$

Formel 13: Transmissionsgrad

3.1.5 Extinktion

Extinktion bezeichnet in der Optik die Abschwächung von elektromagnetischer Strahlung bei Durchgang durch ein Medium durch Absorption, Streuung, Beugung und Reflexion. Sie ändert sich mit der Wellenlänge.[35]

Der Extinktionskoeffizient σ_e [m^{-1}]ergibt sich aus folgender Formel

$$\frac{I_\tau}{I_0} = e^{-\sigma_e \cdot L}$$

Formel 14: Extinktion und Extinktionskoeffizient

I_0 bezeichnet die einfallende Strahlung und I_τ die durchgehende Strahlung. L entspricht der Wegstrecke der elektromagnetischen Strahlung durch das Medium.

Die optische Dicke für Extinktion eines Mediums ergibt sich aus dem negativen natürlichen Logarithmus des Transmissionsgrades $\tau = \sigma_e L$.

3.1.6 Absorption

Beim Durchtritt eines Lichtstrahls durch ein Medium kann dieser in seiner Strahlstärke abgeschwächt werden, weil ein Teil seiner Energie vom Medium absorbiert wird.

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\sigma_A \cdot L}$$

Formel 15: Absorption und Absorptionskoeffizient[36]

Während der Extinktionskoeffizient alle den Hauptstrahl schwächenden Einflüsse berücksichtigt, bezieht sich der Absorptionskoeffizient σ_A [m^{-1}] nur auf durch Absorptionsverluste hervorgerufene Abschwächung der Intensität ($\sigma_e > \sigma_A$). Streulicht muss bei der Bestimmung von σ_A berücksichtigt werden.

Die optische Dicke für Absorption ergibt sich aus dem negativen natürlichen Logarithmus des Strahlstärkenverhältnisses.

---

34 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Transmissionsgrad [1.9.2010].
35 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Extinktion_(Optik) [1.9.2010].
36 Vgl. Jonasz (2007), S. 9.

3.1.7 Albedo

Der Begriff Albedo kommt aus dem Lateinischen und bedeutet „Weißheit“. Die Albedo gibt das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden Oberflächen an und wird durch den Quotient aus einfallender zu zurückgestrahlter Lichtintensität bestimmt.[37]

3.1.7.1 Single Scattering Albedo ω_0

Die Single Scattering Albedo ω_0 [arbitrary units] gibt an, in welchem Verhältnis Streuung und Absorption an der Abschwächung von Licht beteiligt sind. Sie wird über Extinktions– und Absorptionswirkungsquerschnitt (Formel 16) oder Extinktions- und Absorptionskoeffizient nach Formel 17 ermittelt.

$$\omega_0 = \frac{c_{ext} - c_{abs}}{c_{ext}}$$

Formel 16: Single Scattering Albedo aus den Wirkungsquerschnitten[38]

$$\omega_0 = \frac{\sigma_e - \sigma_A}{\sigma_e}$$

Formel 17: Single Scattering Albedo ω_0 aus σ_e und σ_A [39]

3.1.8 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

Über die „Bidirectional Reflectance Distribution Function“, kurz BRDF, erhält man Einblick darüber, wie Licht unter einer gewissen Beleuchtungssituation von einer definierten Oberfläche in Richtung eines Beobachters reflektiert wird. Sie ist abhängig von der Wellenlänge und von den Eigenschaften der Oberfläche (Struktur, optische Eigenschaften).

Die BRDF wird für vielfältigste Aufgabenstellungen genutzt. Sie wird in der Meteorologie unter anderem zur Bestimmung von Albedo und Wolkenanalysen und in der Klimatologie für Aussagen zum Strahlungstransport in der Atmosphäre genutzt. Auf dem Gebiet der Computergrafik und Animation werden die Ansprüche immer höher, hier wird sie zur Bestimmung der reflektierenden Eigenschaften von Oberflächen und deren Modellierung eingesetzt.[40] Ein Modell das mit stark vereinfachten Annahmen Oberflächen phänomenologisch beschreibt ist z.B. das Phong Modell. Die darin verwendeten Parameter sind intuitiv verständlich. Physikalische Modelle sind darauf aufgebaut exaktere Ergebnisse zu liefern.

---

37 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Albedo [14.11.09].
38 Vgl. Bohren (2004), S. 445.
39 Vgl. URL http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data-holdings/PIP/aerosol_single_scattering_albedo.shtml [14.11.09].
40 Vgl. URL http://www-modis.bu.edu/brdf/brdfexpl.html [12.12.10].

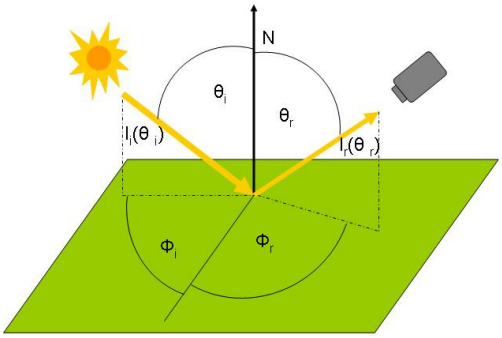


Abbildung 9: Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)[41]

Die Abbildung oben zeigt die Beleuchtungs- und Betrachtungssituation für die Bestimmung der reflektierten Strahlstärke I_r (Beobachtungswinkel polar θ_r und azimutal Φ_r), die sich über die einfallende Strahlstärke I_i (Einfallswinkel polar θ_i und azimutal Φ_i)und die BRDF $\rho(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r)$, ergibt.

$$I_r(\theta_r, \phi_r) = \rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cdot I_i(\theta_i, \phi_i)$$

Formel 18: BRDF $\rho(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r)$

Ist die Oberfläche, die betrachtet wird, glatt und eben, wird für $(\theta_r, \Phi_r) = (\theta_i, \Phi_i)$ die größte reflektierte Strahlstärke I_r gemessen werden, an der Oberfläche wird ein Glanzpunkt sichtbar sein. Je rauer die Oberfläche ist, desto weiter wird der reflektierte Strahl aufgeweitet werden (diffuse Reflexion).

3.1.9 Radiometrische und photometrische Messgrößen

Radiometrie beschäftigt sich mit der Messung von elektromagnetischer Strahlung ohne Bewertung durch einen Empfänger.[42] Photometrie schränkt diese Messungen auf das für das menschliche Auge sichtbare Spektrum der elektromagnetischen Strahlung ein, befasst sich also mit der physiologisch bewerteten Messung von Licht. Beide führen zur Definition von Messgrößen, die sich naturgemäß aber voneinander unterscheiden.

In der Bezeichnung unterscheiden sich die Größen in ihrer Angabe durch den Index e (Bsp. Q_e für Strahlungsenergie), der die radiometrischen Größen als energetische, objektiv ermittelte Messgrößen kennzeichnet, während der Index v (Bsp. Q_v für Lichtmenge) die photometrischen Größen die vom visuellen System des menschlichen Sehapparats subjektiv vorgegeben werden, kennzeichnet.

3.1.9.1 Radiometrische Größen

Der **Strahlungsfluss** (oder die Strahlungsleistung) $\mathbf{\Phi_e}$ gibt die Strahlungsenergie Q_e an, die pro Zeiteinheit von einer Strahlungsquelle ausgestrahlt wird. Die Einheit des Strahlungsflusses ist das Watt.[43]

41 Quelle: adaptiert nach Dumont (2010), S. 2508.
42 Vgl. Nolting (2005c), S. 34.
43 Vgl. Ohno (1999), S. 5.

Die **Strahlungsenergie Q_e** ergibt sich aus dem Integral des Strahlungsflusses Φ_e über eine gewisse Zeitdauer Δt. Die Einheit ist das Joule.[44]

Der Strahlungsfluss allein könnte z.B. einen Autoscheinwerfer, der asymmetrisch den rechten Straßenrand stärker ausleuchtet nicht beschreiben.[45] Daher wird die **Strahlstärke I_e** (Intensität) definiert als der Strahlungsfluss, der von einer Punktquelle pro Steradiant in eine gewisse Raumrichtung ausgestrahlt wird. Die Einheit ist Watt je Steradiant.[46]

Auf der Empfängerseite trifft die Strahlung auf einer Fläche auf, diese könnte auch in einem gewissen Winkel zur Strahlungsquelle stehen.[47] Die **Bestrahlungsstärke E_e** ist die Dichte des an einem Punkt einer Oberfläche auftreffenden Strahlungsflusses, sie gibt den Strahlungsfluss je Flächeneinheit an. Die Einheit ist Watt je Quadratmeter.[48]

Von zwei Lichtquellen, die die gleiche Strahlstärke aufweisen, jedoch von der Größe her unterschiedlich sind, erscheint die kleinere einem Betrachter heller. Setzt man die Strahlstärke in Relation zur Größe der abstrahlenden Fläche erhält man die **Strahldichte L_e**.[49] Sie ist der Strahlungsfluss pro Raumwinkeleinheit, der von einem Oberflächenelement in eine bestimmte Richtung pro projizierte Flächeneinheit senkrecht abgestrahlt wird. Die Einheit ist Watt je Steradiant und Quadratmeter.[50] Über die Strahldichte erhält man Informationen über die Orts- und Richtungsabhängigkeit der von einer Fläche abgegebenen Strahlung. Für eine punktförmige Lichtquelle ist die Strahldichte ident mit der Intensität I_e der Quelle.[51]

Die gesamte auftreffende Energie pro Flächeneinheit erhält man, wenn man die Bestrahlungsstärke E_e mit der Zeit, in der die Strahlung auf der Fläche auftrifft, multipliziert. Als Ergebnis erhält man die **Bestrahlung H_e**, mit der Einheit Joule je Quadratmeter.[52]

Die **spezifische Strahlungsemission M_e** gibt die Strahlungsenergie an, die pro Zeiteinheit von einem Flächenelement emittiert wird. Sie wird in Watt je Quadratmeter angegeben.[53]

In Tabelle 1 ist eine Gegenüberstellung der radio- und photometrischen Größen dargestellt.

3.1.9.2 Photometrische Größen

Sie werden dort eingesetzt, wo Eigenschaften von Beleuchtung angegeben werden sollen und sind so gewählt und gewichtet, dass sie dem Sehvermögen des menschlichen Auges angepasst sind. Die Messgeräte, die verwendet werden, um photometrische Größen festzustellen, werden derart gebaut, dass sie der spektralen Empfindlichkeit des Auges entsprechen. Dadurch wird grünes Licht stärker gewichtet als rotes oder blaues. Infrarot und Ultraviolett sind, in

[44] Vgl. Ohno (1999), S. 7.
[45] Vgl. Nolting (2005c), S. 34.
[46] Vgl. Ohno (1999), S. 5.
[47] Vgl. Nolting (2005c), S. 37.
[48] Vgl. Ohno (1999), S. 6.
[49] Vgl. Nolting (2005c), S. 36.
[50] Vgl. Ohno (1999), S. 6.
[51] Vgl. URL http://users.physik.fu-berlin.de/~wbrewer/ph3_photomet.html [2.3.2010].
[52] Vgl. Nolting (2005c), S. 37.
[53] Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Radiometrie [5.3.2010].

photometrischen Größen angegeben, gleich null. Wesentlich ist nur die Größe der Strahlung im sichtbaren Lichtspektrum.[54]

Die photometrischen Größen geben die für den menschlichen Sehapparat tatsächlichen effektiven Werte an. Z.B. ist die Beleuchtungsstärke (photometrisch) die im Sehsystem des menschlichen Auges tatsächlich wirkende Bestrahlungsstärke (radiometrisch).[55]

Die Empfindlichkeitskurve (V(λ) Kurve, siehe unten) für Helligkeitssehen des menschlichen Auges hat ihr Maximum für Tagsehen bei 555 nm (maximales photometrisches Strahlungsäquivalent K_m). Abbildung 10 zeigt die Empfindlichkeitskurven für den photopischen (Tagsehen, rote Kurve) und skotopischen Bereich (Nachtsehen, blaue Kurve). Die Empfindlichkeitskurve wurde von der CIE für den Bereich von 380 bis 830 nm definiert und auf das Maximum bei 555 nm normiert.

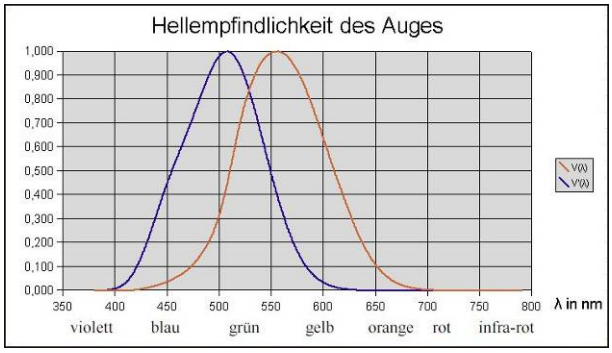


Abbildung 10: Helligkeitsempfindlichkeitskurve V(λ) des Standardbeobachters nach CIE[56]

Monochromatische Lichtquellen der gleichen Strahldichte L_e sehen für den menschlichen Betrachter nicht gleich hell aus, was darauf zurückzuführen ist, dass ein Strahlungsfluss von 1 W bei der Wellenlänge von 555 nm einem Lichtstrom von 683 Lumen, bei 470 nm nur einem Lichtstrom von 68 Lumen entspricht.[57]

Das photometrische Strahlungsäquivalent K(λ) verbindet photometrische mit radiometrischen Größen, es bezeichnet den Quotienten aus Lichtstrom Φ_v und Strahlungsfluss Φ_e. Der Wert des maximalen photometrischen Strahlungsäquivalents K_m ergibt sich durch die Definition der Candela, das photometrische Strahlungsäquivalent für Licht mit der Frequenz von $540 \cdot 10^{12}$ Hz (λ = 555.016 nm in Luft) mit 683 lm/W definiert (K_m = 683 lm/W).[58]

Für alle anderen Werte K(λ) gilt:

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda)$$

Formel 19: Photometrisches Strahlungsäquivalent[59]

54 Vgl. Henderson (1998): S. 10.
55 Vgl. ebenda, S. 52.
56 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Hellempfindlichkeitskurve [2.3.2010], Grafik erstellt von User Anton, Gnu Free Documentation License.
57 Vgl. Nolting (2005d), S. 32f.
58 Vgl. Ohno (1999), S. 2.
59 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Photometrisches_Strahlungs%C3%A4quivalent [2.3.2010].

Die **Lichtmenge Q_v** ergibt sich aus dem zeitlichen Integral des Lichtstroms Φ_v über die Zeitdauer Δt. Sie wird in Talbot, einer aus Lumen mal Sekunde zusammengesetzten Größe, angegeben.[60]

Dem Strahlungsfluss Φ_e umgelegt auf den menschlichen Sehapparat (V(λ) Kurve) entspricht der **Lichtstrom Φ_v,** er gibt die pro Sekunde abgegebene Lichtmenge Q_v einer Lichtquelle im sichtbaren Lichtwellenlängenbereich an, und wird in Lumen angegeben.[61]

Die **Lichtstärke I_v** gibt den von einer Punktquelle emittierten Lichtstrom Φ_v an, der in einer bestimmten Raumrichtung ausgestrahlt wird.[62] Ihre Einheit Candela, ist aus Lumen je Steradiant zusammengesetzt.

Das Schweizer Bundesamt für Metrologie gibt auf seiner Webseite die Definition für das Candela so an: *„Die Candela (cd) ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 · 10^{12} Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt pro Steradiant beträgt.*“[63] Eine Lichtstärke von 1 cd hätte z.B. eine gewöhnliche Haushaltskerze. Ursprünglich wurde diese SI - Basisgröße über Schwarzkörperstrahlung definiert. Heute erhält man eine Lichtstärke von 1 cd wenn man einen Laser, der Licht im 555 nm Wellenlängenbereich aussendet, mit einer Strahlstärke in Messrichtung auf 1/683 W/sr einstellt.[64]

Die **Beleuchtungsstärke E_v** gibt die Stärke des einfallenden Lichtstromes Φ_v an einem Punkt einer Oberfläche an. Sie ist als Lichtstrom je Flächeneinheit, mit der Einheit Lux (Lumen je Quadratmeter) definiert.[65]

Die **Leuchtdichte L_v** ergibt sich aus dem Lichtstrom Φ_v pro Steradiant, der von einem Oberflächenelement in einer gegebenen Richtung normal zu ihr ausgestrahlt wird. Sie wird in Candela je Quadratmeter angegeben.[66]

Die **Belichtung H_v** gibt an, wie lange eine Fläche mit einer gewissen Beleuchtungsstärke bestrahlt wurde. Sie ist das Produkt aus Beleuchtungsstärke E_v und Zeit Δt und wird in Lux mal Sekunde angegeben.[67]

Die **spezifische Lichtausstrahlung M_v** gibt die Lichtmenge Q_v an, die pro Zeiteinheit von einem Flächenelement emittiert wird. Sie wird in Lumen je Quadratmeter (nicht Lux) angegeben.[68]

3.1.9.3 Gegenüberstellung der radio- und photometrischen Größen

In Klammern sind die englischen Bezeichnungen der Größen angegeben.

---

60 Vgl. Ohno (1999), S. 7.
61 Vgl. ebenda, S. 5.
62 Vgl. ebenda.
63 Schweizer Bundesamt für Metrologie, URL http://www.metas.ch/metasweb/Themen/Masseinheiten/Candela [5.3.2010].
64 Vgl. Nolting (2005d), S. 33.
65 Vgl. Ohno (1999), S. 6.
66 Vgl. ebenda.
67 Vgl. Nolting (2005d), S. 33.
68 Vgl. Ohno (1999), S. 7.

Photometrische Größe	Abk.	Einheit (Symbol) [in Basiseinheiten]	Radiometrische Größe	Abk.	Einheit
Lichtstrom (Luminous flux)	Φ_v	Lumen [lm]	Strahlungsfluss, Strahlungsleistung (Radiant flux, Radiant power)	Φ_e	W
Lichtmenge (Luminous Energy)	Q_v	Talbot [lm s]	Strahlungsenergie (Radiant Energy)	Q_e	J
Lichtstärke (Luminous Intensity)	I_v	Candela (cd) [lm sr^{-1}]	Strahlstärke (Radiant Intensity)	I_e	W sr^{-1}
Beleuchtungsstärke (Illuminance)	E_v	Lux (lx) [lm m^{-2}]	Bestrahlungsstärke (Irradiance)	E_e	W m^{-2}
Leuchtdichte, Helligkeit (Luminance, brightness)	L_v	cd m^{-2} [lm m^{-2} sr^{-1}]	Strahldichte (Radiance)	L_e	W m^{-2} sr^{-1}
Belichtung (Luminous Exposure)	H_v	lx s [lm m^{-2} s]	Bestrahlung (Radiant Exposure)	H_e	J m^{-2}
Spezifische Lichtausstrahlung (Luminous exitance)	M_v	lx [lm m^{-2}]	Spezifische Strahlungsemission (Radiant exitance)	M_e	W m^{-2}

Tabelle 1: Photometrische und Radiometrische Größen

3.1.10 Quadratisches Abstandsgesetz

Das quadratische Abstandsgesetz beschreibt, wie die Bestrahlungsstärke E bzw. die Strahlungsenergie Q einer punktförmigen Lichtquelle mit dem Abstand zur Quelle abnimmt. Die Strahlungsenergie (Lichtmenge) Q einer punktförmigen Lichtquelle verteilt sich gleichförmig auf eine Kugelschale mit der Oberfläche $4\pi r^2$.[69]

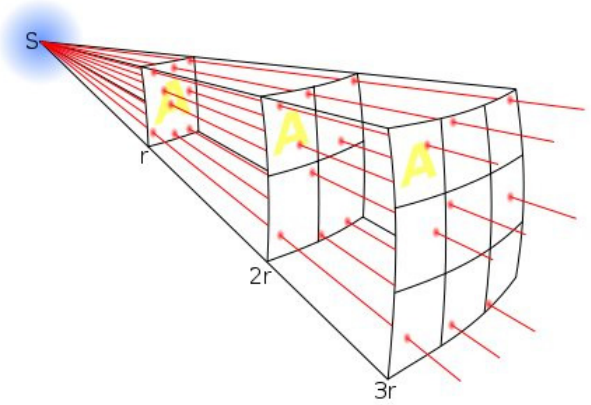


Abbildung 11: Veranschaulichung des quadratischen Abstandsgesetzes[70]

[69] Vgl. Tipler (2000), S. 466.

[70] Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Abstandsgesetz [7.3.2010], Grafik erstellt von User Borb, GNU-Lizenz für freie Dokumentation.

Der Bestrahlungsstärke (Beleuchtungsstärke) E pro Flächenelement im Abstand r von der Quelle beträgt dann

$$E = \frac{dQ}{4\pi r^2 dt}$$

Formel 20: Bestrahlungsstärke pro Fläche im Abstand r von der Lichtquelle

Wie aus Abbildung 11 leicht einsichtig ist, nimmt die Bestrahlungsstärke (Beleuchtungsstärke) E im Abstand r von der punktförmigen Lichtquelle wie in Formel 21 beschrieben ab.

$$E \ \alpha \frac{I}{r^2}$$

Formel 21: Bestrahlungsstärke im Abstand r von punktförmiger Lichtquelle

Formel 21 gilt wegen der flächenmäßigen Ausdehnung einer Lichtquelle bei genügend großem Abstand zu dieser.

3.1.11 Lambert'sches Gesetz

Eine ideale Lambertsche Oberfläche reflektiert auf sie auffallendes Licht vollständig in alle Richtungen ($\rho = 1$), was perfekter diffuser Reflexion entspricht. Sie wirkt aus jeder Richtung gleich hell (siehe Formel 23).[71]

Die Strahlstärke (Lichtstärke) I einer Lambertschen Oberfläche erhält man durch die Beziehung

$$I(\theta) = I_n \cos\theta$$

Formel 22: Lambert'sches Gesetz

wobei θ der Winkel zwischen der Normalen auf die Fläche und der Richtung ist, aus der ein Beobachter auf die Oberfläche blickt, bzw. in der ein Sensor zur Messung angebracht ist. I_n ist die Strahlstärke, die so ausgesandt wird, dass sie normal von der Fläche ausgeht.

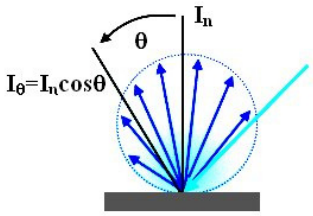


Abbildung 12: Streuung an einer Lambertsche Fläche[72]

Aus Formel 22 wird ersichtlich, dass die Strahlstärke bei diffuser Reflexion von einer Lambertschen Oberfläche ihr Maximum bei Messung normal zur Oberfläche hat. Die Strahldich-

[71] Vgl. Ohno (1999), S. 10.

[72] Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Lambertsches_Gesetz [6.3.2010], Grafik erstellt von User Anton, GNU-Lizenz für freie Dokumentation.

te L der Oberfläche ist gegeben durch den Quotient der Strahlstärke im Winkel θ durch die Fläche

$$L = \frac{I_\theta}{A_\theta} = \frac{I_n \cos\theta}{A \cos\theta} = const$$

Formel 23: Strahldichte Lambertsche Fläche[73]

Ein Beobachter, bzw. Sensor, der sich im Winkel θ zur Flächennormalen einer Fläche A befindet, sieht die perspektivisch verkürzte Fläche A_θ. Man erhält sie, indem man A mit cosθ multipliziert, wie man erkennen kann, bleibt damit die Strahldichte L einer Lambertschen Fläche in alle Richtungen konstant.

Wie groß die Strahldichte der diffusen Reflexion ist, hängt davon ab, in welchem Winkel die Flächennormale der Lambertschen Fläche zur Lichtquelle steht. Je größer dieser Winkel ist, desto flacher ist der Lichteinfall und desto kleiner ist die Bestrahlungsstärke E.

3.1.11.1 Beziehung zwischen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte

Beleuchtet man eine Lambert'sche Oberfläche, erhält man die Strahldichte L durch:

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi}$$

Formel 24: Strahldichte einer Lambert'schen Oberfläche[74]

Wobei E die Beleuchtungsstärke und ρ den Reflexionskoeffizienten der Oberfläche darstellen.

Um einen Zusammenhang zwischen Strahldichte und Beleuchtungsstärke für reale Oberflächen herzustellen führt man den Strahldichtefaktor β und den Strahldichtekoeffizient q ein.

Der Strahldichtefaktor β[75]

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), in Braunschweig und Berlin, gibt folgende Definition des Strahldichtefaktors auf ihrer Webseite an: *„Dieser ist definiert als Quotient der Strahldichte der Probe zur Strahldichte des in gleicher Weise bestrahlten absolut mattweißen Körpers (perfectly reflecting diffuser …).“* [76]

Mit L_0 als Strahldichte eines Lambert'schen Reflektors und L_P als Strahldichte einer realen Probe erhält man für β, unter spezifizierten Beleuchtungsbedingungen

$$\beta = \frac{L_P}{L_0}$$

Formel 25: Strahldichtefaktor β

---

73 Vgl. Gauckler (2009), S. 10.
74 Vgl. Ohno (1999), S. 11.
75 Vgl. ebenda.
76 Vgl. URL http://www.ptb.de/cms/de/fachabteilungen/abt4/fb-45/ag-452/hemisphaerisch-gerichtete-geometrien-kugelgeometrien-strahldichtefaktor.html [30.3.2010].

Im Gegensatz zum Reflexionskoeffizienten ρ kann β größer als 1 sein. Dieser Fall tritt bei spiegelnder Reflexion auf.

Die von einer Fläche ausgehende Strahldichte ist proportional zur Bestrahlungsstärke E mit der die Fläche bestrahlt wird. Ersetzt man in Formel 24 den Reflexionskoeffizienten ρ durch den Strahldichtefaktor β der Oberfläche der realen Probe, erhält man die Strahldichte, die von dieser zurückgeworfen wird.[77]

Der Strahldichtekoeffizient q

Der Strahldichtekoeffizient q einer Fläche, die mit einer definierten Strahlungsquelle in einer gewissen Richtung beleuchtet wird, ergibt sich durch Bildung des Quotienten der Strahldichte der Fläche durch die Bestrahlungsstärke E auf ebendiese.

$$q = \frac{L}{E}$$

Formel 26: Strahldichtekoeffizient[78]

Der Strahldichtekoeffizient q verbindet die Bestrahlungsstärke E mit der Strahldichte L einer gegebenen Fläche in einer gewissen Richtung.[79]

$$L = q \cdot E$$

Formel 27: Beziehung zwischen Strahldichte und Bestrahlungsstärke[80]

Die entsprechenden photometrischen Größen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke werden auf die gleiche Weise gebildet.

3.1.12 Planck'sches Strahlungsgesetz

Die spektrale Strahldichte L_e eines schwarzen Körpers der Temperatur T im Vakuum ergibt sich zu

$$L_e(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Formel 28: Plank'sches Strahlungsgesetz für die spektrale Strahldichte[81]

In die Formel fließt die Wellenlänge λ, die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum, die absolute Temperatur T, die Boltzmann – Konstante k ($k = 1{,}380658 \cdot 10^{-23}\ J \cdot K^{-1}$)[82] und das Plank'sche Wirkungsquantum h ($h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$)[83] ein.

77 Vgl. Ohno (1999), S. 11.
78 Vgl. ebenda.
79 Vgl. ebenda.
80 Vgl. ebenda.
81 Vgl. ebenda, S. 13.
82 Vgl. Kuchling (1999), S. 299.
83 Vgl. ebenda, S. 526.

3.1.13 Stefan–Boltzmann Gesetz

Das Stefan–Boltzmann Gesetz macht Aussagen darüber, wie viel elektromagnetische Strahlung von der Oberfläche eines Körpers abgegeben wird.

$$P_e = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Formel 29: Stefan–Boltzmann Gesetz[84]

Die emittierte Leistung P_e [W] ist direkt proportional zu σ, der Stefan–Boltzmann–Konstante (Strahlungskonstante, $\sigma = 5{,}67051 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)[85], zu e dem Emissionsgrad der Oberfläche (zwischen 0 und 1), der von deren Beschaffenheit abhängt, zur Fläche A und zur vierten Potenz der Temperatur des Körpers.[86] Sie entspricht dem Strahlungsfluss Q_e [W].

Integriert man über das gesamte Wellenlängenspektrum ergibt sich die spezifische Strahlungsemission eines schwarzen Körpers der Temperatur T ([T] = K) im Vakuum.

$$M_e(T) = \int_0^\infty M_e(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

Formel 30: Strahlungsemission eines schwarzen Körpers[87]

Die spezifische spektrale Strahlungsemission M_e eines schwarzen Körpers im Vakuum ist proportional zum Produkt der Stefan Boltzmannkonstante und der Temperatur zur vierten Potenz. Ihre Einheit ist Watt je Quadratmeter.

3.1.14 Wien'sches Verschiebungsgesetz

Wie aus Formel 29 erkennbar ist, steigt die Strahlungsleistung eines Körpers mit der Temperatur. Die Wellenlängen der dabei ausgesandten elektromagnetischen Wellen erreichen dabei immer kleinere Werte. Unterhalb von 873 K liegen die ausgesandten Wellenlängen über 800 nm (IR – Bereich), steigt die Temperatur, nimmt die Strahlungsleistung des schwarzen Körpers zu (siehe Formel 29) und er sendet elektromagnetische Wellen im sichtbaren Wellenlängenbereich aus, z.B. ab 4140 K Licht im roten Wellenlängenbereich (700 nm).

Die Wellenlänge der dabei maximal ausgestrahlten Strahlungsleistung ist durch das unten angegebene Wien'sche Verschiebungsgesetz gegeben.[88]

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K}{T}$$

Formel 31: Wien'sches Verschiebungsgesetz[89]

Mit dem Wien'schen Verschiebungsgesetz lässt sich die Wellenlänge mit der höchsten Intensität der von heißen Körpern ausgesandten Strahlung ermitteln.

---

84 Vgl. Tipler (2000), S. 550.
85 Vgl. Kuchling (1999), S. 320.
86 Vgl. Tipler (2000), S. 550.
87 Vgl. Ohno (1999), S. 13.
88 Vgl. Tipler (2000), S. 551.
89 Vgl. ebenda.

3.2 Farbmetrik

Bereits Höhlenmenschen verwendeten Farben zur Bemalung von Felswänden. Bis zum Beginn des 19. Jhdt. waren pflanzliche und tierische Färbemittel und mineralische Farben die einzigen Materialien, die zum Färben und für die Farbmalerei zur Verfügung standen. Erst 1866 gelang es Perkin aus Kohle den Farbstoff „mauve“ ein helles violett zu synthetisieren. Das leitete die Entdeckung von tausenden von synthetischen Färbemitteln und Pigmenten ein. Die Unzahl an verfügbaren Farben machte es notwendig, dass eine neue Methode zur Spezifikation von Farbe gefunden wurde. Davor wurden Farben nach ihrem Ursprung bezeichnet – z.B. das im Lichtspektrum vorkommende Indigo, eine Farbe, die durch ein Färbemittel, das aus der Pflanze Indigo gewonnen wurde, erreicht werden konnte. Ein weiteres Beispiel wäre Henna, das ebenfalls aus einer Pflanze – der Hennapflanze gewonnen wird.[90]



Abbildung 13: Hennastrauch



Abbildung 14: Hennapulver



Abbildung 15: Henna Bemalung



Abbildung 16: Indigopflanze



Abbildung 17: Indigofärbemittel

Sämtliche Bilder von
http://de.wikipedia.org
[11.1.2010][91]

Auch heute gibt es noch Farbsysteme, in denen Farben mit einem Namen bezeichnet werden – solche Systeme sind z.B. Pantone (fünfte Farbe beim Druck, Firmenlogos), RAL (Industrie, Lacke und Anstriche) und HKS (Firmenlogos). Die durch sie standardisierten und exakten Farbmuster werden von der Industrie eingesetzt.[92] RAL 95 bezeichnet z.B. einen Weißton, der unter anderem für Lacke zum Streichen von Türen verwendet wird.

Abbildung 18 zeigt ein Kleidungsstück, das im Farbton Indigo eingefärbt ist und Farbmusterkarten. Die am unteren Rand abgebildete weiße Karte wurde zur Festlegung des Weißabgleiches für die Kamera verwendet. Abbildung 19 zeigt einen Farbtopf, der die nach Wunsch ge-

[90] Vgl. MacAdam (1985), S. 1.
[91] Die Quellenhinweise zu den Bildern finden sich im Anhang auf Seite 259.
[92] Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/Farbmodelle-Farbnamen.shtml [16.1.2010], Ulrike Hässler.

mischte Farbe und die dazugehörige Farbkarte, nach der sie ausgewählt wurde, zeigt (Firma Hornbach, April 2010).



Abbildung 18: Farbmusterkarten



Abbildung 19: Farbmuster und gemischte Farbe

Auch die für Bildschirme im Webdesign eingesetzten Farben können mit ihrem Namen oder ihrem Hex–Code angegeben werden. Die VGA–Palette definiert 16 Grundfarben, die sicherlich auch auf älteren Bildschirm im Internet darstellbar sind. In der unten angeführten Tabelle sind diese 16 Farben der VGA–Palette mit ihrem Farbnamen und dem Hex–Code angegeben.

Farbname	Hexadezimal	Farbe	Farbname	Hex-Code	Farbe
black	#000000		silver	#C0C0C0	
maroon	#800000		red	#FF0000	
green	#008000		lime	#00FF00	
olive	#808000		yellow	#FFFF00	
navy	#000080		blue	#0000FF	
purple	#800080		fuchsia	#FF00FF	
teal	#008080		aqua	#00FFFF	
gray	#808080		white	#FFFFFF	

Tabelle 2: 16 Grundfarben für HTML Seiten[93]

Die Netscape–Palette definiert über Hex–Code 216 Farben und mittels Farbnamen und zugehörigem Hex–Code 120 Farben.[94]

Färbemittel und Pigmente werden, um neue Farbeindrücke zu generieren, in verschiedenen Anteilen zusammengemischt, was eine physikalische Prozedur darstellt. Farbe im physikalischen Sinn ist eine Eigenschaft eines Körpers, die mit Hilfe der Optik beschrieben wird. Sie beschäftigt sich unter anderem damit, welche Körperfarben auf Grund von verschiedenen

[93] Quelle: HTML Einführungskurs an der PA Baden, Webseite erstellt von Helmut Weber, 2001.
[94] Vgl. URL http://de.selfhtml.org/html/allgemein/farben.htm [17.1.2010], Stefan Münz.

physikalischen Gegebenheiten zu Stande kommen, indem die relevanten optischen Eigenschaften des Materials des Körpers gemessen werden.[95]

Die Farbmetrik beschäftigt sich damit, Farben physikalisch auf Grund von objektiven Messungen zu spezifizieren und Formeln und Methoden anzubieten, die helfen, mit Hilfe dieser Spezifikationen Farben für die verschiedensten Einsatzgebiete zu standardisieren.[96]

Moderne Farbsysteme sollen Farben nicht nur identifizieren, sondern auch Abstände zwischen Farben angeben und Aussagen über veränderte Lichtverhältnisse machen.[97]

In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, welche Standards, Formeln und Methoden heute Stand der Technik sind.

3.2.1 Kolorimetrie

Farbmodelle beschreiben geometrisch oder mathematisch, wie das menschliche Auge Farben sieht und zueinander in Beziehung setzt. Sie stellen das sichtbare Spektrum in einer oder mehr Dimensionen dar und liefern außerdem eine numerische Darstellung für die Farben.[98]

3.2.1.1 Farbspezifikation über Spektrophotometer

Um eine objektive Spezifikation der Farbe eines Objektes zu erhalten, beleuchtet man es mit einer geeigneten Lichtquelle. Das Licht der Quelle wird durch ein Prisma in seine spektralen Komponenten aufgespaltet und nur eine der Komponenten, z.B. Violett wird auf das Objekt gelenkt. Der Betrag des violetten Lichts, der vom Objekt reflektiert wird, wird in Bezug zum einfallenden violetten Licht gebracht – man erhält den Reflexionskoeffizienten für diesen Teil des Spektrums. Diese Messung wird für alle Spektralfarben durchgeführt.[99]

Heutzutage werden diese Messungen automatisiert mit Hilfe von Spektrophotometer durchgeführt, damit kann die Farbe eines Objektes objektiv bestimmt werden, indem das Licht, das vom Objekt diffus reflektiert wird, in das Spektrophotometer geleitet und die entsprechende Intensität von der Software des Gerätes für alle Wellenlängen ausgegeben wird.

[95] Vgl. MacAdam (1985), S. 1.
[96] Vgl. ebenda, S. 2.
[97] Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/vomBuntZurOrdnung.shtml [16.1.2010], Ulrike Hässler.
[98] Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/Farbmodelle-RGB-CMYK-HSS-HSL.shtml [16.1.2010], Ulrike Hässler.
[99] Vgl. MacAdam (1985), S. 3.

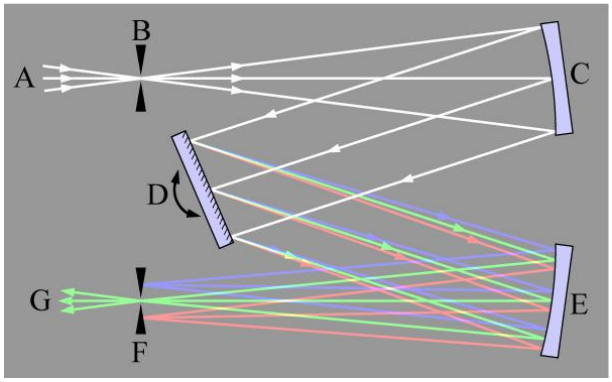


Abbildung 20: Czerny-Turner Monochromator[100]

Anstelle Licht durch ein Prisma aufzuspalten, wird es in einem Mono- oder Dichromator durch ein Gitter in die einzelnen spektralen Bestandteile zerlegt. Im oben abgebildeten Monochromator wird das an der Stelle (A) kollimierte Licht durch einen Spalt (B) in das Gerät geleitet, durch einen Hohlspiegel (C) umgelenkt und parallelisiert, im drehbaren Gitter (D) durch Beugung in die verschiedenen Lichtfarben zerlegt und durch einen weiteren Hohlspiegel bei (E) zur Messapparatur umgelenkt. Die Messzellen bestehen aus Charge Coupled Devices (CCDs). Die Intensität des Lichts, das bei (F) auftrifft, wird von der Software für die einzelnen Wellenlängen in Nanoampere ausgegeben. Wobei die Größe der Messintervalle üblicherweise frei wählbar ist.

In Experimenten wurde gezeigt, dass der Reflexionskoeffizient für eine spezielle Lichtfarbe eine der Oberfläche innewohnende Eigenschaft ist. Daher liefert die Angabe des Reflexionskoeffizienten für jede Spektralfarbe eine objektive Spezifikation der Farbe dieser Oberfläche. Die Messungen werden so durchgeführt, dass der Reflexionskoeffizient im Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums (ungefähr von 400 – 700 nm) in vordefinierten Abständen (1 nm, 2 nm, 5 nm, 10 nm) gemessen und angegeben wird. Als Ergebnis erhält man eine Kurve der spektralen Intensitätsverteilung der untersuchten Oberfläche.

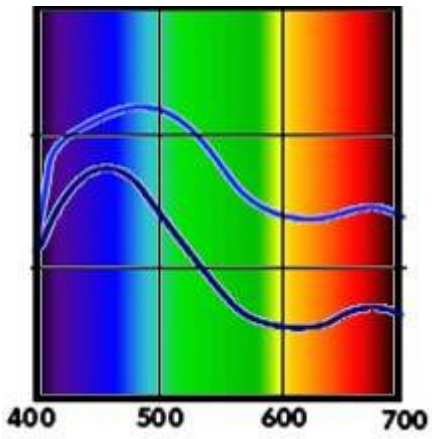


Abbildung 21: Beispiel für eine spektrale Reflexionskurve[101]

[100] Quelle: URL http://en.wikipedia.org/wiki/Monochromator [14.1.09], Grafik erstellt von DrBob, GNU free Documentation License.

[101] Quelle: modifiziert übernommen von URL http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_reflectance_curve#The_measurement_devices_-_in_depth [14.1.2010], Grafik erstellt von Drkroll2, GNU Free Documentation License.

Die Oberfläche, deren Reflexionskurve in Abbildung 21 angegeben ist, reflektiert Licht im kurzwelligen (blauen) Bereich und absorbiert Licht im langwelligen (gelben bis roten) Bereich. Sie erscheint bläulich. Bei der Untersuchung eines perfekten weißen Diffusors würde die Spektralkurve eine Gerade bei einer gewissen Intensität ergeben, hätte man eine schwarze, perfekt absorbierende Oberfläche untersucht, würde sich eine Gerade im unteren Bereich des Diagramms ergeben. Die von einem gewissen Material gemessenen Werte werden in Relation mit denen eines perfekten weißen Standarddiffusers, dessen Reflexionsgrad 1.00 ist, und der mit derselben Lichtquelle beleuchtet wird, gesetzt.[102]

Im Gegensatz zum menschlichen Ohr, das fähig ist, den Sinneseindruck eines gehörten Musikstückes in die Komponenten zu zerlegen, die durch einzelne Musikinstrumente zustande kommen, ist das Auge nicht fähig, die spektralen Anteile des aufgenommenen Lichts voneinander zu unterscheiden. Das macht die Verwendung einer spektralen Reflexionskurve zur Definition der Farbe eines vermessenen Objektes unhandlich. Sie ist aber zum Beispiel unerlässlich, wenn man Farben erhalten möchte, die unter jeder Art von Beleuchtung gleich ausschauen, für die Festlegung und Verbesserung von Farbstandards und für die Interpretation von Mischungsphänomenen.[103]

Für viele andere Problemstellungen reicht es vollkommen, wenn man das menschliche Farbsehvermögen zur Grundlage macht. Wie z.B. wenn man sämtliche Farbeindrücke, die das menschliche Auge wahrnehmen kann, standardisieren möchte.

3.2.1.2 Commission Internationale de L'Éclairage (CIE)

Die internationale Beleuchtungskommission (kurz CIE) hat das Ziel, eine weltweite Zusammenarbeit in wissenschaftlichen Belangen bezüglich Licht, Beleuchtung, Farbe und Sehvermögen, Photobiologie und Bildverarbeitung, zu gewährleisten. Sie ist eine gemeinnützige Organisation mit Mitgliedschaft auf freiwilliger Basis. Sie wurde 1913 gegründet und ist eine professionelle Organisation, die von der International Organization for Standardization (ISO) anerkannt wird.[104]

1924 definierte die CIE die Helligkeitsempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges V(λ), die sie 1931 im Rahmen der Definition des Standardbeobachters neu definierte (siehe Abbildung 10).[105]

Empfehlungen bezüglich Kolorimetrie gab die CIE erstmals 1931 heraus. Diese wurden ständig weiterentwickelt und bilden damit die Basis für heute Standards auf diesem Gebiet. 1971 wurden die Ergebnisse und Arbeiten, die sich bis dahin ergeben hatten, in der CIE Publikation No. 15 zusammengefasst. Sie ist als Referenz für die Standards gedacht, die die moderne Kolorimetrie bestimmen. Im Jahr darauf wurden der Publikation zwei Erweiterungen hinzugefügt, eine Arbeit zu Metamerie (siehe 3.2.1.4) und eine über gleich verteilte Farbräume, Farbabstände und Begriffe zu psychophysischen Effekten. 1981 folgte unter anderem eine Arbeit zu Tageslichtsimulatoren für Kolorimetriemessungen und danach einige Arbeiten zu Farbabstandsberechnungen. Alle Arbeiten über die Grundlage der Kolorimetrie wurden im CIE

[102] Vgl. MacAdam (1985), S. 4.
[103] Vgl. ebenda.
[104] Vgl. URL http://www.cie.co.at/index.php/About+us [14.1.2010].
[105] Vgl. Ohno (1999), S. 1.

Technical Report 15:2004 zusammengefasst. Im Report werden die verschiedenen Messbedingungen, die bei Kolorimetriemessungen zu beachten sind, beschrieben. Folgende Abschnitte beschreiben die einzelnen Elemente, die die moderne Kolorimetrie bestimmen.[106]

3.2.1.3 CIE System

Die CIE hat ein Farbsystem aufgestellt, dessen Basis das menschliche Farbsehvermögen ist. Es gibt Farben in CIE Farbkoordinaten an. Die Energie der spektralen Verteilung des Lichts eines Objektes wird durch Funktionen (siehe 3.2.1.4) für die drei Lichtfarben Rot, Grün und Blau angegeben.[107]

3.2.1.4 Tristimuluswerte

Das menschliche Auge setzt zum Farbsehen drei Zapfenarten (siehe 3.2.2) mit unterschiedlich spektralem Verlauf der Empfindlichkeit ein. Sind die Erregungsanteile der drei Zapfenarten gleich, entsteht beim Beobachter ein gleicher Farbeindruck, egal wie das Licht spektral zusammengesetzt ist. Zwei Farben sind gleich, wenn sie sich durch additive Farbmischung gleich ergeben (z.B. Orange aus Rot und Gelb und Orange aus Rot und Grün).[108] Diese Farben heißen dann metamere Farben, der physikalische Begriff Metamerie. In der Praxis bedeutet das, dass zwei bei einer Beleuchtung gleich erscheinende Farbmuster sich bei unterschiedlicher Beleuchtung in der Farbe unterscheiden. Die Auswertung dieser Farbmuster mit einem Spektralfotometer liefert Spektralkurven, die einander schneiden, aber sich nicht decken.[109]

Thomas Young hat bereits im Jahre 1807 in seinen „Lectures on Natural Philosophy“ beschrieben, dass drei einfache Farbvalenzen (Rot, Grün und Violett) ausreichen, um verschiedene Farben zusammenzumischen. In seiner Arbeit beschreibt er auch das Phänomen, das uns heute unter Additiver Farbmischung bekannt ist. Außerdem war er der erste, der die Wellenlänge für die Spektralfarben des Lichts bestimmte.[110]

David Brewster entwickelte dieses System aus drei Grundfarben weiter. Seine Untersuchungsergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt. Obwohl im grünen Wellenlängenbereich ein Maximum vorhanden ist, verwendete er als dritte Grundfarbe Gelb. Er bewies, dass alle wahrnehmbaren Farbempfindungen durch diese Grundfarben herstellbar waren und zeichnete trichromatische Empfindlichkeitskurven.[111]

---

106 Vgl. CIE, “Colorimetry” (2004), S.1.
107 Vgl. Colantoni (2002), S. 3.
108 Vgl. Nolting (2005b), S. 50.
109 Vgl. URL http://www.laser-line.de/news/der-farbabstand.html [16.7.2010]
110 Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/vomFarbkreisZumAuge.shtml [14.1.2010], Ulrike Hässler.
111 Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/vomFarbkreisZumAuge.shtml [14.1.2010], Ulrike Hässler.

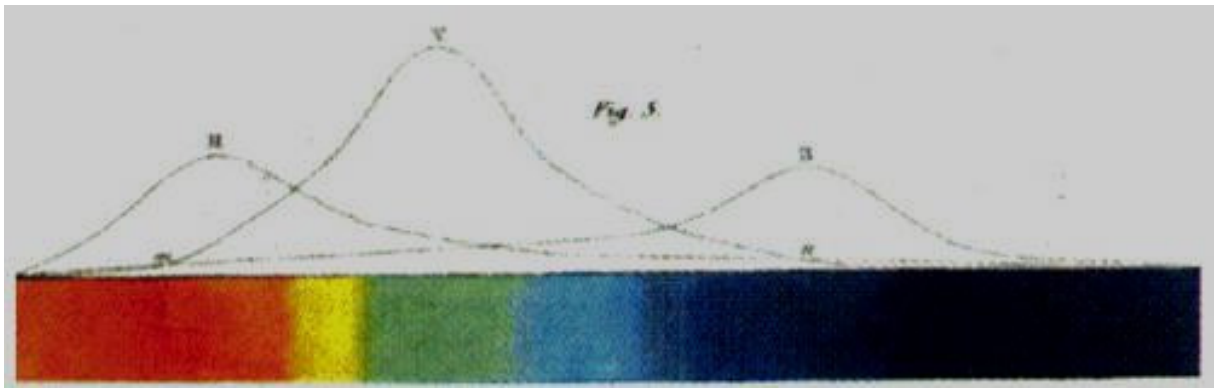


Abbildung 22: Trichromatische Empfindlichkeitskurve nach Brewster[112]

Aus diesen Vorarbeiten formulierte Hermann von Helmholtz 1850 die Trichromatische Theorie, die besagt, dass das menschliche Auge drei Farbrezeptoren besitzt und dass aus drei Primärlichtfarben alle beliebigen Farben gemischt werden können. Darauf basieren heute sowohl Farbbildschirme als auch der Farbendruck.[113]

1861 konnte Maxwell beweisen, dass jede Farbe näherungsweise aus drei Lichtfarben reproduzierbar ist. Er machte mit einer speziellen Kamera und mit Hilfe von drei Farbfiltern Aufnahmen von einer mehrfarbigen Szene und konnte diese bei Übereinanderprojektion der drei Aufnahmen wieder korrekt reproduzieren.[114]

Aus all den Arbeiten auf diesem Gebiet folgt, dass ein normalsichtiger Beobachter jeden beliebigen Farbstimulus aus drei Primärvalenzen reproduzieren kann. Die Reproduktion des Stimulus erfolgt mittels eines Kolorimeters. Ein Kolorimeter besitzt ein zweigeteiltes Sichtfenster. In einer Hälfte wird dem Beobachter der Stimulus dargeboten, den er reproduzieren soll, im zweiten Fenster mischt er Licht der drei Primärvalenzen so zusammen, dass sich für ihn der Farbstimulus des Originals ergibt. Der Betrag der Strahlungsleistung der drei Primärvalenzen ergibt die Tristimuluswerte zur Reproduktion des Farbstimulus. Der Farbstimulus wird damit durch Zahlenwerte, die die Intensität der drei Primärvalenzen angeben, ausgedrückt.[115]

[112] Quelle: URL http://farbe.wisotop.de/vomFarbkreisZumAuge.shtml [15.1.2010], Grafik erstellt von Ulrike Hässler, Creative Commons Namensnennung – keine kommerzielle Verwendung 2.0 Deutschland, http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/de/ .

[113] Vgl. http://farbe.wisotop.de/vomFarbkreisZumAuge.shtml [15.1.2010], Ulrike Hässler.

[114] Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/vonLichtwellenZurFarbempfindung.shtml [16.1.2010], Ulrike Hässler.

[115] Vgl. MacAdam (1985), S. 9.

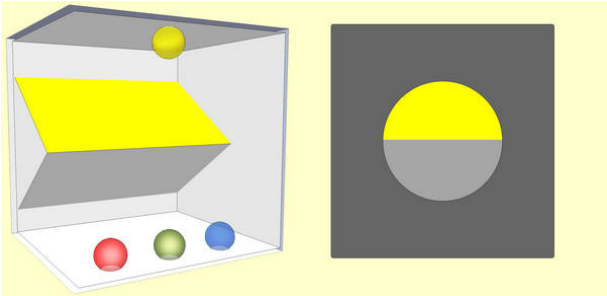


Abbildung 23: Aufbau eines Kolorimeter[116]

Die Tristimuluswerte sind also spezifisch für die gewählten Primärvalenzen und den Beobachter, der sie zusammengemischt hat. Jeder andere normalsichtige Beobachter würde zu anderen Ergebnissen für die Tristimuluswerte des entsprechenden Farbstimulus kommen.

Die im Kolorimeter gewählten Primärvalenzen müssen zwei Bedingungen erfüllen. Keine von ihnen ist ein Metamer einer Kombination der beiden anderen und eine spezielle Kombination aller drei ergibt weißes Licht. Nachdem es eine Unmenge an Kombinationen gibt, die diese Bedingungen erfüllen, kann man die Primärvalenzen frei nach Bequemlichkeit wählen. Sie können sogar imaginär, d.h. nicht mit Lichtquellen reproduzierbar, sein.[117]

Wright verwendete im Gegensatz der für den CIE Standardbeobachter verwendeten Primärvalenzen (siehe unten) die Spektralfarben mit der Wellenlänge 650 nm, 530 nm und 460 nm.[118]

3.2.1.5 Der CIE Standardbeobachter

Als in der CIE darüber nachgedacht wurde, wie man Farben standardisieren könnte, standen bereits jede Menge wissenschaftliche Erkenntnisse zur Verfügung (siehe 3.2.1.4) auf die zurückgegriffen werden konnte. Darauf basierend wurde als eine der Grundlagen, die die CIE einsetzt, um Farbe zu standardisieren und verifizieren, im Jahre 1931 der CIE Standard-Beobachter definiert.

Für die Definition dieses Standardbeobachters wurden mit Hilfe von menschlichen Beobachtern Standardwerte für Farbreize festgelegt, die das sichtbare Spektrum in bestimmte Intervalle teilen. Verwendet wurden Primärvalenzen in den Grundfarben Rot, Grün und Blau (genannt RGB). Dazu wurden gewisse Wellenlängen in dem speziellen Wellenlängenbereich gewählt, z.B. 700 nm für Rot, 436 nm für Blau und 546 nm für Grün. Mit Hilfe von additiver Farbmischung kann man aus diesen Primärvalenzen jeden Farbreiz erzeugen, wenn die Strahlungsleistungen entsprechend angepasst werden (siehe 3.2.1.4).

Die CIE definierte den „2°-Standardbeobachter“ im Jahre 1931. Die dabei festgelegten Spektralwerte gelten, wenn der gemessene Bereich 2° im Gesichtsfeld beträgt, was einer 1 Euro Münze entsprechen würde, die man in Armeslänge vom Körper weg hält. Diese 2° entspre-

---

116 Quelle: URL http://farbe.wisotop.de/vomLichtZumXYZ.shtml [27.2.2010], Grafik erstellt von Ulrike Hässler, Creative Commons Namensnennung – keine kommerzielle Verwendung 2.0 Deutschland, http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/de/ .

117 Vgl. Shepperd (1968), S. 25.

118 Vgl. McAdam (1985), S. 10.

chen der Abbildung des Farbfeldes in der Fovea, dem Bereich der Netzhaut, mit dem wir am schärfsten sehen (siehe 3.2.2). [119]

Im Jahre 1964 gab die CIE Tristimuluswerte für einen 10° Standardbeobachter heraus. Dabei wurde das Testfeld, in dem die Farbempfindung reproduziert werden sollte vergrößert (A4 Blatt in einem Abstand von ungefähr 30 cm vor dem Auge), um die Weitwinkelsichtfunktion des menschlichen Auges mit einzubeziehen.

Die Tristimuluswerte des CIE Standardbeobachters wurden für 320 bis 780 nm in 2 nm, bzw. 5 nm Schritten ermittelt oder interpoliert und in einer Tabelle festgehalten. Diese Wertetabelle ergibt eine Charakteristik für das menschliche Farbempfinden der einzelnen Farben des Spektrums, gemittelt und interpoliert aus vielen Einzelbeobachtungen.

3.2.1.5.1 Ermittlung der Tristimuluswerte

Um eindeutig definierte Farbwerte für die Farbreize zu finden, wurden die Beobachter angehalten ein Lichtfeld mittels der Kombination der 3 Primärvalenzlichter an ein Testlicht anzupassen. Das Ergebnis sollten Felder sein, die in der Farbe übereinstimmten.

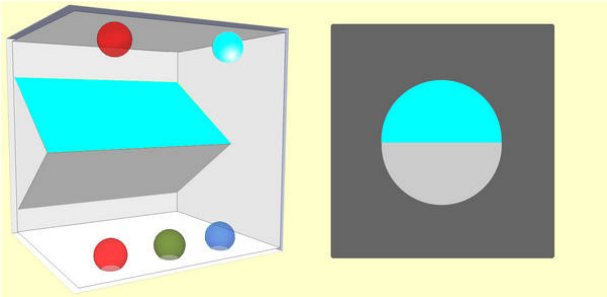


Abbildung 24: Kolorimeter mit negativer Primärvalenz[120]

Manche Farben waren nur darstellbar, wenn man dem Testlicht rotes Licht hinzugefügt hat. Was dazu führt, dass auch negative Farbwerte im Rotbereich vorkommen können (siehe Abbildung 25). Z.B. ist eine der Farben, die durch eine Kombination von Rot-, Grün- und Blaulicht nicht darstellbar ist, spektrales Cyan. Um es doch darzustellen, wird zum Farbstimulus, der reproduziert werden soll die Primärvalenz Rot „dazuaddiert“. Das wirkt wie eine Subtraktion dieses Primärvalenzlichtes (siehe Abbildung 24).

119 Vgl. Nolting (2005a), S. 47f.

120 Quelle: URL http://farbe.wisotop.de/vomLichtZumXYZ.shtml [27.2.2010], Grafik erstellt von Ulrike Hässler, Creative Commons Namensnennung – keine kommerzielle Verwendung 2.0 Deutschland, http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/de/ .

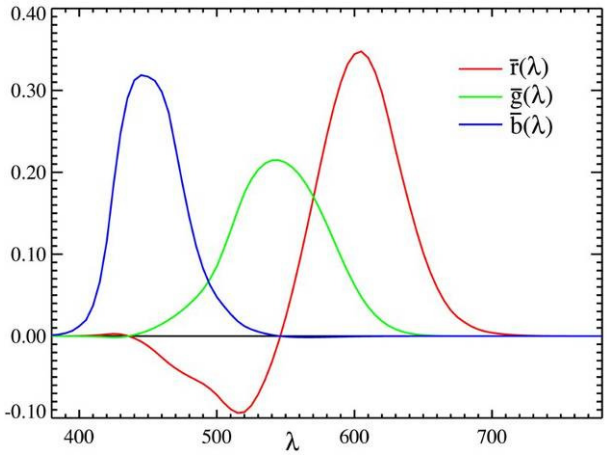


Abbildung 25: RGB – Tristimuluskurven nach CIE[121]

Mit dem CIE RGB Farbmodell können alle Farbempfindungen des menschlichen Auges in Tristimuluswerte umgewandelt werden, der Nachteil des Systems liegt allerdings in den negativen Werten, die dabei auftreten können und vor allem auch darin, dass diese Werte nicht intuitiv mit Farbempfindungen verbunden werden. Aus diesem Grund definierte die CIE 1931 das XYZ Farbsystem, das mit imaginären Primärvalenzen arbeitet.[122]

3.2.1.5.2 CIE XYZ Farbsystem

Das positive XYZ–Tripel erhält man über lineare Transformation der Wertetripel des RGB - Farbsystems. Alle realen Farben sind über positive Primärvalenzen X, Y und Z darstellbar (siehe Abbildung unten). [123]

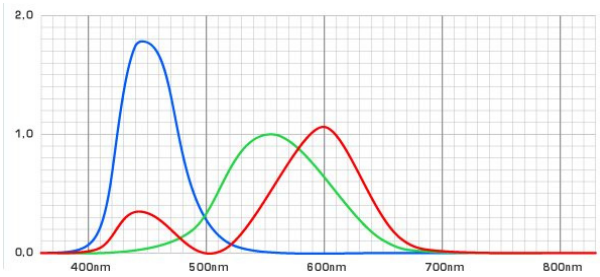


Abbildung 26: XYZ – Tristimuluskurven nach CIE[124]

Die CIE wählte die drei Primärvalenzen X, Y und Z so, dass der sich ergebende Y Wert der relativen Helligkeit der Probe entspricht. Das menschliche Auge hat sein Maximum beim Farbsehen bei 555 nm (siehe Abbildung 33). Das Maximum der empfundenen Helligkeit entspricht bei 555 nm einem Wert von 683 Lumen bei einem Watt Strahlungsleistung. Für jede andere Wellenlänge ist der Wert der empfundenen Helligkeit je Watt Strahlungsleistung geringer, bei 400 bzw. 700 nm gleich null. Die Skala für Y reicht von 0 für absolut Schwarz bis 100 für perfektes Weiß. [125]

---

121 Quelle: URL http://en.wikipedia.org/wiki/Tristimulus_values#Tristimulus_values [27.2.2010], Grafik erstellt von User Marco Polo, Public Domain.

122 Vgl. Purgathofer (2008b), Folie 283f.

123 Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/vomLichtZumXYZ-2.shtml [27.2.2010], Ulrike Hässler.

124 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem [28.2.2010], Grafik erstellt von Torge Anders, GNU Lizenz für freie Dokumentation.

125 Vgl. MacAdam (1985), S. 16.

3.2.1.5.3 CIE xyY Farbsystem

Werden X und Y normalisiert erhält man die CIE xyY–Farbkoordinaten. Aufgetragen in einem Diagramm liefern sie die typische hufeisenförmige Normfarbtafel, die dazu verwendet wird, Farbe in der Praxis zu spezifizieren (siehe Abbildung 27).

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \qquad x+y+z=1$$

Formel 32: Tristimuluswerte normalisiert[126]

Die beiden xyY–Farbtripel $Y_1 = 24{,}19$, $x_1 = 0{,}2487$, $y_1 = 0{,}3881$ und $Y_2 = 39{,}42$, $x_2 = 0{,}2487$, $y_2 = 0{,}3881$ unterscheiden sich in der Helligkeit, haben aber denselben Farbwert. Das lässt sich aus den Werten für die zugehörigen XYZ–Farbkoordinaten ($X_1 = 15{,}5$, $Y_1 = 24{,}19$, $Z_1 = 22{,}64$ und $X_2 = 25{,}26$, $Y_2 = 39{,}42$ und $Z_2 = 36{,}89$) nicht direkt ablesen.[127]

3.2.1.6 CIE Normfarbtafel

Die Farbkoordinaten x, y und z hängen vom Farbton und der Sättigung ab, sie sind von der Helligkeit unabhängig. So werden alle Farbempfindungen, die sich nur durch ihre Helligkeit unterscheiden auf einen Punkt projiziert.[128] Damit kann in der CIE xyY Normfarbtafel über die Werte x und y eine Farbe ohne Helligkeitsinformation beschrieben und in einer zweidimensionalen Darstellung erfasst werden.

Die Normfarbtafel ist für additive Farbmischung einsetzbar, enthält aber nicht alle Farben einer Farbpalette, weil die Informationen, für helligkeitsbezogene Farbempfindungen nicht dargestellt werden. Z.B. enthält die Tafel kein Braun, das eine Mischung aus Rot und Orange mit sehr geringem Helligkeitswert darstellt.[129]

In der CIE Normfarbtafel (siehe Abbildung unten) ist das hufeisenförmige Farbfeld von der Spektralfarblinie begrenzt, sie enthält die reinen Spektralfarben in der stärksten Sättigung in nm. Die Begrenzungslinie unten (Purpurlinie) entspricht Mischfarben, die das menschliche Auge wahrnehmen kann, die aber keiner reinen Spektralfarbe entsprechen. Je weiter man im Diagramm nach innen geht, desto grauer und ungesättigter werden die Farben.[130]

Die im Diagramm gekennzeichnete Schwarzkörperkurve gibt die Farbtemperatur der Planck'schen Strahler von 1500 K bis unendlich an (siehe 3.2.1.7). Die Farbtemperatur von Sonnenlicht bei bedecktem Himmel entspricht einem Planck'schen Strahler von 6500 – 7500 K.

126 Vgl. MacAdam (1985), S. 17.
127 Vgl. Beispiel übernommen von ebenda.
128 Vgl. Hoffmann (2006), S. 8.
129 Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/CIE-Normfarbtafel.shtml [28.2.2010], Ulrike Hässler.
130 Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/CIE-Normfarbtafel.shtml [28.2.2010].

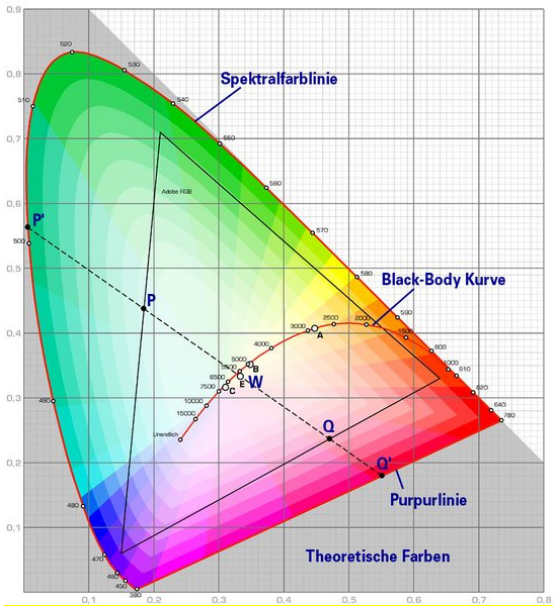


Abbildung 27: CIE Normfarbtafel[131]

Wesentlich ist auch der Weißpunkt, bei dem x, y und z zu jeweils 1/3 ihrer maximalen spektralen Sättigung repräsentiert sind. Jeder Lichtquelle kann in der Normfarbtafel ihr eigener Weißpunkt zugeordnet werden. Die CIE hat verschiedene Normlichtquellen spezifiziert, um die Berechnung der spektralen Reflexion einer Oberfläche zu standardisieren (siehe 3.2.1.13).

Die Normfarbtafel ermöglicht es, das Ergebnis der Mischung eines beliebigen Lichtes aus zwei anderen farbigen Lichtern zu ermitteln. Mischt man zwei Lichter L_1 und L_2 (n Intensitäts–Anteile von L_1 mit m Intensitäts–Anteilen von L_2), dann liegt das sich ergebende Licht L_3 im Diagramm auf der Gerade zwischen L_1 und L_2 am Punkt m/(m+n) des Abstands zwischen L_1 und L_2. Über diesen Zusammenhang werden die Farben auf der Purpurlinie aus einer Mischung von Blau und Rot in der entsprechenden Intensität zusammengesetzt. [132]

3.2.1.7 Farbtemperatur und Planck'sche Strahler

Gemäß Planck'schem Strahlungsgesetz (siehe 3.1.12) ändert sich die spektrale Strahldichte, die ein schwarzer Körper abgibt, mit seiner Temperatur. Über das Wien'sche Verschiebungsgesetz (siehe 3.1.14) erhält man die Wellenlänge, bei der die Strahldichte den Maximalwert erreicht. Aus den spektralen Strahldichten bei den einzelnen Wellenlängen im sichtbaren Spektrum erhält man die Chromatizität, in der dieser schwarze Körper erscheint. Jeder Temperatur eines schwarzen Körpers kann eine Farbkoordinate in der CIE Normfarbtafel zugeordnet werden (Schwarzkörperkurve, siehe Abbildung 27).

Die Chromatizität der ausgesandten Strahlung einer Strahlungsquelle wird mit der Chromatizität von schwarzen Körpern verglichen. Die Temperatur des schwarzen Körpers, dessen Chromatizität mit der der Lichtquelle am besten übereinstimmt, wird die Farbtemperatur der Strahlungsquelle genannt.[133]

---

131 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem [27.2.2010], Grafik erstellt von Torge Anders, GNU Lizenz für freie Dokumentation.
132 Vgl. Shepperd (1968), S. 31.
133 Vgl. MacAdam (1985), S. 28.

Ein roter Farbeindruck entsteht bei einer Farbtemperatur von 3000 K. Erhöht man die Farbtemperatur verschiebt sich der Farbeindruck gemäß Wien'schen Verschiebungsgesetz in Richtung kürzerer Wellenlängen.

Um standardisierte Lichtquellen zur Verfügung zu stellen hat die CIE verschiedene Lichtquellen konzipiert, die gewissen Farbtemperaturen entsprechen. Diese werden in Abschnitt 3.2.1.13 näher erläutert.

3.2.1.8 Farbsystem CIE Lab

Ein Nachteil des CIE XYZ Farbraums ist, dass die Abstände in den Farbkoordinaten zweier Farbmuster nicht in Beziehung zu ihrem empfundenen Farbunterschied liegen. Damit der Abstand zwischen zwei Farbeindrücken über den Abstand ihrer Farbkoordinaten zueinander bestimmbar wird, wurde der CIE Lab Farbraum entwickelt.[134]

Definiert werden die CIE Lab Farbkoordinaten aus CIE XYZ Farbkoordinaten über folgende Gleichungen:

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \qquad b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right]$$

$$t \in \left\{\left(\frac{X}{X_n}\right), \left(\frac{Y}{Y_n}\right), \left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right\}$$

$$f(t) = t^{1/3} \quad \text{für } t > 0{,}008856 \qquad f(t) = 7{,}787t + 16/116 \quad \text{für } t \le 0{,}008856$$

Formel 33: Ermittlung Lab aus XYZ[135]

$X_nY_nZ_n$ sind die Tristimuluswerte des Weißpunktes, zum Beispiel der Weißpunkt der verwendeten Lichtquelle oder die Reflexionswerte eines Lambert'schen Reflektors.

Ich erlaube mir darauf hinzuweisen, dass Brainard in seinem Artikel einen Tippfehler bei der Formel zur Berechnung von b* aufweist, anstelle eines Faktors von 200 hat er fälschlicherweise 500 angegeben.

Zur Berechnung der Farbabstände zweier Farbmuster zueinander siehe 3.2.1.11.

An Hand von Abbildung 28 erkennt man recht gut, dass sich die a–Achse im negativen Bereich von Grün über den Unbuntpunkt (im Zentrum, ein mittleres Grau, L = 50%) zu Rot im positiven Bereich bewegt. Die b–Achse reicht von Gelb im positiven Bereich zu Blau im negativen Bereich. Die L–Achse gibt die Helligkeit an und erstreckt sich von Schwarz (0%) zu Weiß (100%). Alle Farben gleicher Helligkeit liegen in einer Ebene auf einer kreisförmigen Scheibe. Die Sättigung der Farben nimmt vom Kreisumfang zum Zentrum hin ab, Komplementärfarben liegen einander gegenüber.[136]

---

134 Vgl. Brainard (2003): S. 202.
135 Vgl. CIE (2004), S.17.
136 Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/vomXYZzumLAB.shtml [16.7.2010]

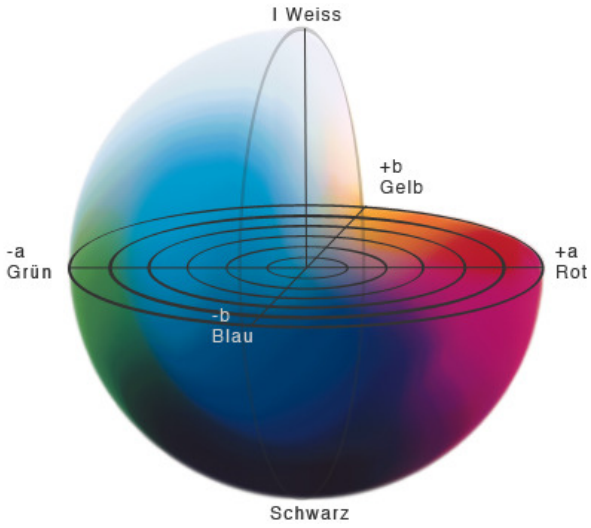


Abbildung 28: CIE-Lab Farbraum[137]

3.2.1.9 sRGB Farbraum[138]

Der sRGB Farbraum (standardisierter RGB Farbraum) wurde unter anderem für Farbmonitore, Drucker, digitale Cameras, Scanner und das Internet geschaffen. Seine Einführung wurde von Microsoft und Hewlett–Packard angeregt. Dieser Farbraum sollte eine geräteunabhängige Farbdefinition ermöglichen. Er basiert auf den Spezifikationen eines durchschnittlichen Computermonitors. Der Umfang seiner Farbskala ist zwar kleiner, als die CIE Normfarbtafel, aber ausreichend für die meisten Anwendungen.

In Monitoren wird über die angelegte Spannung gesteuert, wie stark die Fluoreszenzfarben auf der Bildschirmvorderseite angeregt werden. Der Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Intensität ist nicht linear, er wird über den Gamma Wert des Monitors angegeben. Auch Fernsehcameras haben einen standardisierten Gamma Wert, der dazu dient, Tristimuluswerte in Bildschirmfarben umzuwandeln. Für den sRGB Farbraum wurde ein Gamma Wert von 2,4 festgelegt.

Für den sRGB Farbraum gelten bestimmte Referenzbedingungen. Eine davon ist der Weißpunkt, der mit der CIE D65 Standardlampe festgelegt wurde (x = 0,3127, y = 0,3290, z = 0,3583). Der Weißpunkt befindet sich beim Punkt W in Abbildung 29. Die Primärvalenzen (für HDTV standardisiert) sind in Tabelle 3 dargestellt.

sRGB	x	y	z
R	0,64	0,33	0,03
G	0,3	0,6	0,10
B	0,15	0,06	0,79

Tabelle 3: sRGB Primärvalenzen[139]

[137] Quelle: URL http://farbe.wisotop.de/vomXYZzumLAB.shtml [16.7.2010], Grafik erstellt von Ulrike Hässler, Creative Commons Namensnennung – keine kommerzielle Verwendung 2.0 Deutschland, http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/de/ .

[138] Vgl. URL http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html [18.10.2010].

Bei der Berechnung der sRGB–Werte aus CIE Farbkoordinaten muss das Ausgabe– und das Eingabegerät spezifiziert werden.

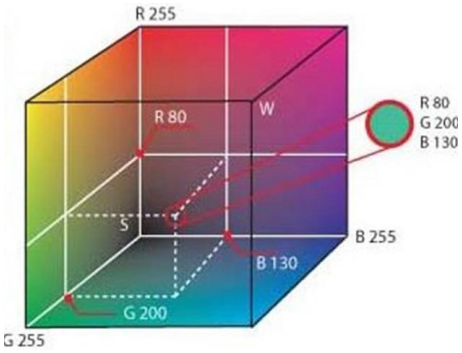


Abbildung 29: RGB Farbwürfel[140]

Abbildung 29 zeigt beispielhaft die Lage des Punktes RGB = (80,200,130) im sRGB–Farbraum. Der Wert von 0 – 1 für RGB ist auf 0 – 255 normiert.

Die Transformation von CIE XYZ– und RGB– Farbkoordinaten wird in Abschnitt 3.2.1.12 beschrieben.

3.2.1.10 Farbwiedergabeindex und Farbabstimmung

Der Farbwiedergabeindex gibt an, ob ein Gegenstand mit einer bestimmten Lichtquelle beleuchtet natürlich aussieht oder ob er unnatürlich wirkt. Letzteres ist der Fall, wenn im Spektrum der Lichtquelle mit der er beleuchtet wird Farbanteile fehlen, die der Gegenstand reflektieren würde. Das natürlichste Aussehen haben Objekte, wenn sie mit Sonnenlicht beleuchtet werden, ihm wird ein Farbwiedergabeindex von 100 zugeordnet. Der schlechteste Wert ergibt sich für eine Natriumdampf Niederdrucklampe, mit 20. Der Farbwiedergabeindex wird mit einer Bezugslichtquelle und vorgegebenen Farbmustern ermittelt, dessen Farbverschiebung er angibt.[141]

Soll die Farbe von verschiedenen Mustern aufeinander abgestimmt werden und sollen sie für jeden Beobachter unter jedweder Beleuchtungssituation gleich aussehen, ist es wichtig, dass sie Licht aller Wellenlängen gleich reflektieren und dass ihre Oberflächenstruktur und ihr Glanzverhalten gleich sind. Z.B. sollte die Farbabstimmung einer Kombination von Materialien mit glänzender Oberfläche mit solchen, die eine matte Oberfläche haben, unter diffuser Beleuchtung und normaler Blickrichtung erfolgen. Ergeben sich unter diesen Bedingungen für sie die gleichen Tristimuluswerte, nimmt man an, dass sie zufriedenstellend aufeinander abgestimmt sind.[142]

3.2.1.11 Farbabstand ΔE_{Lab}

In der Industrie ist es wichtig, dass sichtbare Differenzen zu einem Originalfarbmuster festgestellt werden können. Der Farbabstand soll ein geeignetes Werkzeug als Qualitätskriterium

---

139 Vgl. Colantoni (2002), S. 8.
140 Quelle: adaptiert nach URL http://en.wikipedia.org/wiki/File:RGB_farbwuerfel.jpg [16.7.2010], Ersteller: Horst Frank, Creative CommonsAttribution-Share Alike 3.0 Unported License
141 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Farbwiedergabe [18.10.2010].
142 Vgl. MacAdam (1985), S. 14.

zur Beurteilung von Farbe verschiedener Produkte liefern (z.B. Autolack, der verwendet wird, um eine schadhafte Stelle auszubessern).

Der Unterschied zwischen zwei Farbeindrücken wird mittels des euklidischen Abstandes der CIE–Lab Farbkoordinaten zueinander ermittelt. Der Farbabstand ΔE_{Lab} ergibt sich zu

$$\Delta E_{Lab}^{*} = \sqrt{(\Delta L^{*})^2 + (\Delta a^{*})^2 + (\Delta b^{*})^2}$$

Formel 34: Farbabstand ΔE_{Lab} [143]

In Formel 34 wird die Differenz der jeweiligen Elemente der Farbkoordinaten verwendet. In der Tabelle unten wird der Zusammenhang zwischen dem ermittelten Farbabstand und dessen Registrierbarkeit in der Empfindung eines Betrachters hergestellt.

Farbabstand ΔE_{ab}	Wirkung auf den Betrachter
< 0,2	nicht sichtbar
0,2 – 1,0	sehr gering
1 - 3	gering
3 - 6	mittel
> 6	groß

Tabelle 4: Qualitative Beurteilung des Farbabstands ΔE_{ab} [144]

Unterschiede im Farbton (der Farbachse a für Rot – Grün oder b für Blau – Gelb) werden vom Betrachter oft als störender beurteilt, als Unterschiede in der Helligkeit (Achse L). Einen Farbabstand von 1 mit bloßem Auge festzustellen ist nur einem Spezialisten möglich. Ein Laie erkennt einen Farbunterschied ab einem ΔE_{ab} von ungefähr 2,5.[145]

Um bei den Auswertungen der Messungen einen Bezug zu Farb – bzw. Helligkeitsänderung zu haben wird die Farbänderung ΔE_{ab} und die Helligkeitsänderung ΔE_L definiert mit:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta a^{*})^2 + (\Delta b^{*})^2}$$

Formel 35: Farbänderung ΔE_{ab}

ΔE_{ab} ist in der Literatur unter dem Namen Farbkoordinate C^{*}_{ab} bekannt.[146]

$$\Delta E_{L} = \sqrt{(\Delta L)^2}$$

Formel 36: Helligkeitsänderung ΔE_L

Nachdem die Unterscheidbarkeit von Farben von vielen Faktoren beeinflusst wird (z.B. Anpassung des Auges an die Lichtsituation oder Art des räumlichen und zeitlichen Auftretens des Stimulus) wird an verbesserten Formeln zur Quantisierung des Farbabstandes gearbeitet.[147]

143 Vgl. Brainard (2003): S. 203.
144 Vgl. URL http://farbe.wisotop.de/vonFarbeZuFarbe.shtml [16.7.2010].
145 Vgl. URL http://www.laser-line.de/news/der-farbabstand.html [16.7.2010].
146 Vgl. Brainard (2003), S. 205.
147 Vgl. ebenda.

3.2.1.12 Transformationen von Farbsystemen

Die einzelnen Farbsysteme sind über mathematische Funktionen ineinander überführbar. Das soll an Hand eines Beispiels demonstriert werden.

Transformation der spektralen Strahldichte in XYZ

Um die XYZ Werte des CIE Farbraums zu erhalten, werden die spektralen Ergebnisse der Stahldichtemessung $\Phi_\lambda(\lambda)$ mit den spektralen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ Werten des CIE Standard Observers 1931 multipliziert. Dabei wird folgende mathematische Operation durchgeführt:

$$X = k\sum_{\lambda}\phi_\lambda(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda$$

$$Y = k\sum_{\lambda}\phi_\lambda(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$$

$$Z = k\sum_{\lambda}\phi_\lambda(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda$$

Formel 37: Ermittlung von CIE-XYZ eines Farbstimulus[148]

Der Faktor k wird dabei so gewählt, dass Y ≈ 100.

Transformation von CIE–XYZ in CIE-Lab

Die Formeln für die Transformation der CIE–XYZ Farbkoordinaten in CIE–Lab Farbkoordinaten wurde in Abschnitt 3.2.1.8 präsentiert.

Transformation von CIE–XYZ (D65) in sRGB

Die Transformation der Farbkoordinaten vom CIE–XYZ Farbraum in den sRGB Farbraum wird in zwei Stufen durchgeführt. Die XYZ Werte werden in einem ersten Schritt in die linearen RGB Farbkoordinaten nach folgender Matrixmultiplikation umgewandelt:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3{,}2406 & -1{,}5372 & -0{,}4986 \\ -0{,}9689 & 1{,}8758 & 0{,}0415 \\ 0{,}0557 & -0{,}2040 & 1{,}0570 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Formel 38: Transformation XYZ in RGB[149]

Für die Transformation sind XYZ so normiert, dass Y = 1. Alle RGB Werte, die außerhalb von 0 – 1 liegen werden abgeschnitten.

Der zweite Schritt umfasst die Einführung der gerätespezifischen Gamma-Korrektur. Hier wird ein Gamma von 2,4 angenommen.

Es gilt:

$v \in \{R, G, B\}$

$V \in \{sR, sG, sB\}$

148 Vgl. CIE (2004), S. 12f.
149 Vgl. URL http://www.color.org/sRGB.pdf [16.7.2010].

Je nach Wert für ν ermittelt sich V zu:

$$V = \begin{cases} 12{,}92\,\nu & \nu \leq 0{,}0031308 \\ 1{,}055\,\nu^{1/2{,}4} - 0{,}055 & \nu > 0{,}0031308 \end{cases}$$

Formel 39: Transformation RGB in sRGB[150]

Sind die XYZ für eine andere als die CIE D65 Standardlichtart gegeben, muss zuerst noch eine Farbumstimmung durchgeführt werden.

[150] Vgl. URL http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_to_XYZ.html [16.7.2010].

3.2.1.13 Lichtquellen

Da die Eigenschaft von Körpern, die sie für uns farbig erscheinen lässt, davon abhängt wie viel der elektromagnetischen Strahlung des sichtbaren Spektrums sie absorbieren bzw. reflektieren, muss alle mögliche Strahlung des sichtbaren Spektrums in gleicher Intensität auf sie fallen, damit die „Farbigkeit“ optimal sichtbar wird. Das Aussehen der Materie ändert sich bei unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung des auffallenden Lichts.[151]

Ein Beispiel dazu sollen die Aufnahmen in Tabelle 5 liefern. Sie zeigen eine Zitrone, die mit einer Halogenlampe beleuchtet wurde. Zwischen Lampe und Zitrone wurden verschiedene Filter eingebaut. Die erste Reihe zeigt Aufnahmen, die mit den Additiven Primärvalenzen Rot, Grün und Blau beleuchtet wurden. Für die Aufnahmen in der zweiten Reihe wurden die Primärvalenzen für subtraktive Farbmischung Magenta, Gelb und Cyan verwendet.

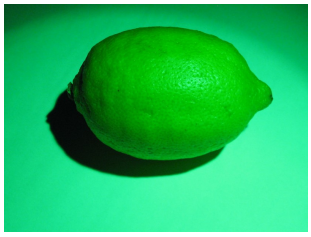
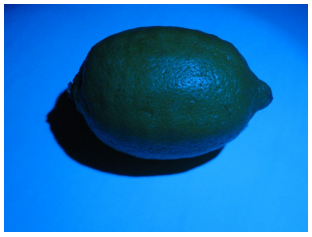
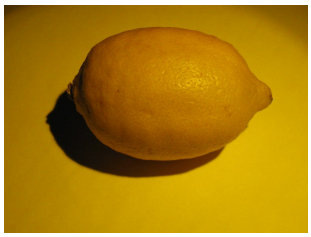
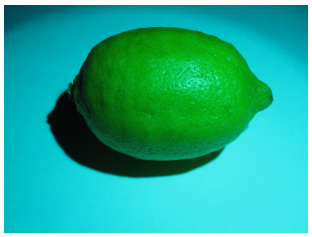
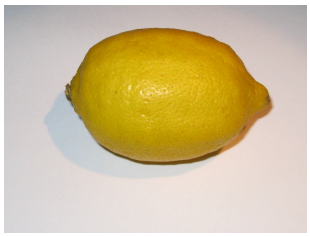
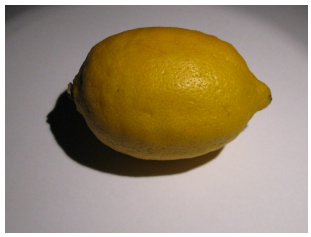
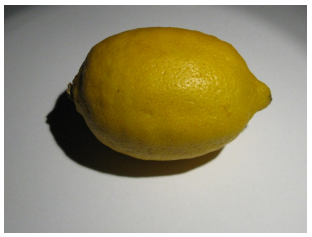
		
Filter ROT	Filter GRÜN	Filter BLAU
		
Filter MAGENTA	Filter GELB	Filter CYAN
		
Autom. Weißabgleich, Blitz	Autom. Weißabgleich, kein Blitz	Händ. Weißabgleich, kein Blitz

Tabelle 5: Farbeindruck bei verschiedener Beleuchtung (Farbfilter)

Die dritte Reihe in Tabelle 5 zeigt die Zitrone bei Aufnahme mit Verwendung des automatischen Weißabgleiches der Camera ohne und mit Blitz. Die letzte Aufnahme zeigt die Zitrone aufgenommen, nachdem manuell der Weißabgleich mittels eines weißen Blattes Papier vor-

[151] Vgl. Küppers (1987), S. 20.

genommen wurde. Die farbigen Aufnahmen wurden mittels dieses manuellen Weißabgleiches erstellt.

Die Verwendung von Farbfiltern zur Erstellung der Fotos zeigt recht deutlich, was passiert, wenn Licht einer gewissen Wellenlänge im Spektrum einer Lichtquelle fehlt oder vorherrschend ist. Jedes Objekt (hier die Zitrone), das mit Licht nur einer Wellenlänge (Rot, Grün oder Blau) beleuchtet wird, reflektiert nur das Licht in dieser Wellenlänge.

Tageslicht entspricht je nachdem, welche Tageszeit herrscht und ob der Himmel bedeckt oder wolkenlos ist, einem Schwarzkörper bestimmter Farbtemperatur. An klaren Tagen besteht das Tageslicht aus einer Mischung des blauen Streulichts des Himmels und des Sonnenlichts (6774 K). [152]

Die von einer Strahlungsquelle ausgesandte Energie kann durch die spektrale Energieverteilung für die einzelnen Wellenlängen angegeben werden. Die CIE hat standardisierte Normlichtarten definiert, die verschiedenem weißem Licht entsprechen und die für Berechnungen in der Farbmetrik herangezogen werden.

Verschiedenen CIE Normlichtarten und das Licht, dem sie entsprechen, sind in Tabelle 6 dargestellt:

Normlichtart	Entsprechung	Farbtemperatur
A	Glühbirne	2856 K
F2	Leuchtstoffröhre	4100 K
D50	Warmes Tageslicht bei Sonnenauf- oder -untergang	5000 K
D65	Tageslicht mittags	6504 K
C	Mittleres Tageslicht (Sonne + Himmel)	6774 K
D75	Licht bei bedecktem Himmel	7500 K

Tabelle 6: CIE Normlichtarten[153]

Die Normlichtarten sind über Tabellen mit den Werten für den relativen spektralen Strahlungsfluss definiert.

Das von einem Körper reflektierte Licht erhält man durch Multiplikation der spektralen Reflexionskoffizienten ρ_λ mit dem spektralen Strahlungsfluss der Lichtquelle oder der Normlichtart.

[152] Vgl. MacAdam (1985), S. 7.
[153] Vgl. HunterLab Applications Note, Vol. 17, No. 5, S. 2, URL http://www.hunterlab.com/appnotes/an05_05.pdf [20.7.2010]

3.2.2 Auge und Sehen – Wahrnehmung

Licht an sich ist nicht farbig und das gleiche gilt für alle Objekte, die Licht in unsere Augen reflektieren. Die Sensoren in unseren Augen reagieren auf Licht verschiedener Wellenlängen und damit Energien unterschiedlich. Im Gehirn entsteht auf Grund dieser Reaktion, die im Weiteren noch besprochen wird, ein Farbeindruck. Mit anderen Worten, unser Auge ist ein Messgerät, welches Licht, das aus einer Summe verschiedener Wellenlängen besteht, in „Farbe“ umsetzt. Der Weg des Lichts von einem Objekt über das Auge bis zur Verarbeitung im Gehirn (Entstehung des Farbeindrucks) ist in Abbildung 30 wiedergegeben.

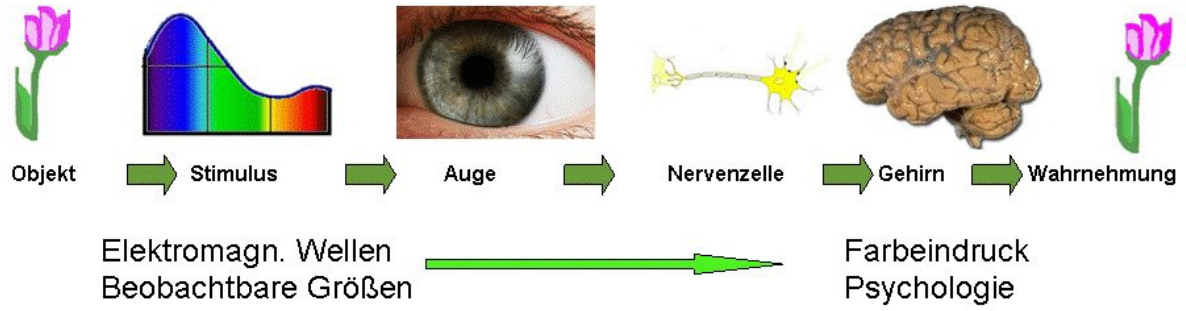


Abbildung 30: Entstehung optischer Eindrücke[154]

Abbildung 30 soll einen Aspekt verdeutlichen, den Shepperd in seiner Arbeit beschreibt, nämlich, dass Strahlung einer gewissen spektralen Mischung ein spezieller Farbname zugeordnet werden kann. Dass dies aber nicht bedeutet, dass jeder menschliche Beobachter diese Farbe gleich wahrnimmt. Die Wahrnehmung einer Farbe ist abhängig von verschiedensten Faktoren.[155]

Physiologen und Psychologen sind in Bezug auf Farbeindrücke hauptsächlich daran interessiert, wie der Sehprozess funktioniert und wie das Bewusstsein des Beobachters auf Farbstimuli reagiert. Das Farbempfinden, das sich ergibt, wenn wir ein Objekt betrachten, hängt z.B. wesentlich davon ab, wovon es umgeben ist und davon, was das Auge des Beobachters davor gesehen hat. Bei einem bekannten Objekt auch davon, wie er gewohnt ist, es zu sehen. [156]

Im folgenden Abschnitt werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen in Bezug auf Aufbau des Auges, die Verarbeitung der darin ankommenden Reize und die psychophysischen Effekte, die sich beim Farbsehen ergeben, beschrieben.

3.2.2.1 Physiologie des Auges

Das menschliche Auge besteht aus Hornhaut (Kornea), vorderer Augenkammer, Iris mit Pupille, hinterer Augenkammer, Linse mit Ziliarmuskel, Glaskörper, Netzhaut (Retina) mit blindem (Papille) und gelbem Fleck (Fovea und Makula lutea) und dem Sehnerv.

---

154 Quelle: modifiziert nach Purgathofer (2008b), Folie 237; die Quellen der Einzelelemente in der Grafik sind auf Seite 259 beschrieben.
155 Vgl. Shepperd (1968), S. 11.
156 Vgl. MacAdam (1985), S. 2.

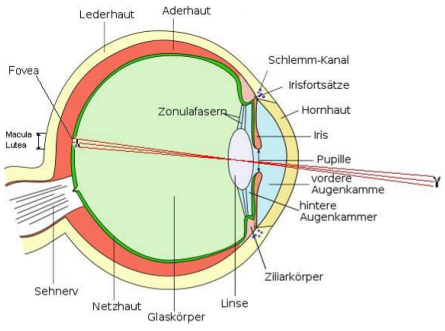


Abbildung 31: Aufbau des menschlichen Auges[157]

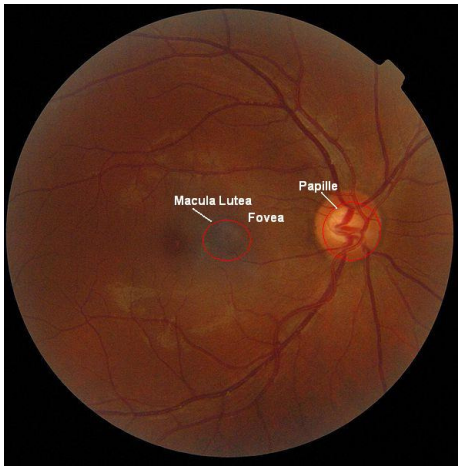


Abbildung 32: Augenhintergrund[158]

Licht, das von einem Gegenstand auf die Hornhaut fällt wird von dieser und der Linse gebrochen. Auf die Netzhaut am hinteren Auge fällt ein verkehrtes, verkleinertes Bild des Gegenstandes (siehe Abbildung 31).[159]

Der Teil der Netzhaut, mit dem wir scharf sehen, entspricht ungefähr 2° unseres binokularen Blickfeldes, das horizontal rund 170° und vertikal rund 110° umfasst. Das Auge ruht allerdings nie. Ein Punkt eines Gegenstands wird für Sekundenbruchteile erfasst und sofort wird über eine ruckartige Bewegung der nächste anvisiert. Dieses „Abtasten“ generiert das Gesamtbild. Wie die Fixationspunkte gewählt werden hängt vom Interesse und den Gewohnheiten des Betrachters ab. Werbebranche, Verhaltensforscher und Entwickler von Lügendetektoren finden hier ein ausgedehntes Forschungsgebiet.[160]

Eine Augenhintergrundspiegelung (siehe Abbildung 32) zeigt dem Augenarzt krankhafte Veränderungen der Netzhaut. Die abgebildete Aufnahme des Augenhintergrunds zeigt Blutgefäße, den blinden Fleck und den gelben Fleck. Ersterer kennzeichnet die Stelle, an dem der Sehnerv und die Blutgefäße in das Auge kommen. Der gelbe Fleck ist von keinerlei Blutgefäßen überzogen und mit ihm sehen wir am schärfsten.[161]

In der Netzhaut existieren zwei Arten von Photorezeptoren. Die Stäbchen, zuständig für Dämmerungssehen, sie sind bereits bei Auftreffen von etwa 500 Photonen gesättigt, und die Zapfen, zuständig für Farbsehen. Die Zapfen benötigen für die Sättigung wesentlich mehr Photonen, eine Million Photonen würden dem auf das Auge einfallenden Tageslicht entsprechen. In den Stäbchen ist Rhodopsin, in den Zapfen Blau-, Grün- und Rotopsin enthalten. Der Chromophor Retinal der einzelnen Opsinarten absorbiert in jeweils einem anderen Wellenlängenbereich Photonen, dabei ändert das Molekül seine Konfiguration, die bei Dunkelheit wieder in die Ursprungsform zurückwechselt.[162]

---

157 Quelle: modifiziert übernommen von: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Auge [19.1.2010], Grafik erstellt von User Talos und Jakov, GNU-Lizenz für freie Dokumentation.

158 Quelle: modifiziert übernommen aus URL http://de.wikipedia.org/wiki/Netzhaut [26.1.2010], Grafik von User Ske, GNU-Lizenz für freie Dokumentation.

159 Vgl. Frings (2003), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/auge/seh01.htm [26.1.2010].

160 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Auge [4.2.2010].

161 Vgl. Frings (2003), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/auge/fundus.htm [26.1.2010].

162. Vgl. Frings (2003), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/auge/pigm.htm [9.2.2010].

Innerhalb der Fovea existieren keine Stäbchen, daher kann man bei schlechten Lichtverhältnissen feine Strukturen nicht mehr wahrnehmen.[163]

Der Grund dafür, dass wir genau am gelben Fleck scharf sehen, liegt darin, dass dort die Zapfendichte am höchsten ist. Sie beträgt ca. 140.000 Zapfen pro mm², im Vergleich dazu ist die Dichte auf der restlichen Retina mit 10.000 pro mm² relativ gering. Außerdem ist in der Fovea jeder Zapfen mit einer Ganglienzelle verbunden, d.h. jeder Zapfen entspricht einem Bildpunkt, außerhalb der Fovea kommen ca. 130 Photorezeptoren auf eine Ganglienzelle.[164]

Die Zapfen sind wieder unterteilt in drei Arten: S–Zapfen (sensibel für kurze Wellenlängen, blaues Licht, Absorptionsmaximum bei 420 nm entspricht blauviolett), M–Zapfen (sensibel für mittlere Wellenlängen, Absorptionsmaximum bei 534 nm entspricht smaragdgrün) und L–Zapfen (sensibel im langen Wellenlängenbereich, Absorptionsmaximum bei 563 nm entspricht gelbgrün). Letzterer wird auch als Rotrezeptor bezeichnet, weil er die Wahrnehmung im Rotbereich steuert. Im Durchschnitt sind auf der Retina zehnmal mehr L–Zapfen und fünfmal mehr M–Zapfen als S–Zapfen vorhanden. Maximal je 40-mal mehr L– und M–Zapfen, als S–Zapfen. Außerhalb der Fovea sind die meisten Zapfen S–Zapfen. Bei Dämmerung oder Dunkelheit fallen auf die Zapfen nicht mehr genug Photonen und können somit das Farbsehen nicht mehr gewährleisten.[165]

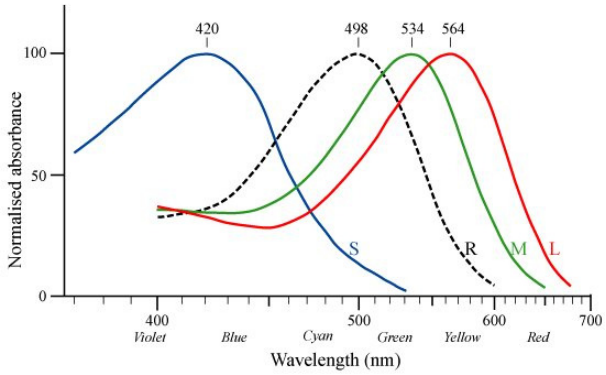


Abbildung 33: Spektrale Absorptionskurven von Zapfen und Stäbchen[166]

Abbildung 33 zeigt die spektrale Absorptionskurven der drei Farbrezeptoren und der Stäbchen, normiert auf 100% des jeweiligen Rezeptors. Man erkennt, dass das Maximum für Nacht- und Dämmerungssehen bei 498 nm liegt. Für Tagsehen ermittelt sich das Maximum über die Summe der Absorptionskurven der L–, M– und S–Zapfen, es liegt bei 555 nm (mittelgrün).[167]

163 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Fovea_centralis [4.2.2010].
164 Vgl. Frings (2003), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/auge/dichte.htm [3.2.2010].
165 Vgl. Purgathofer (2008a), Folie 19.
166 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Zapfen_(Auge) [4.2.2010], Grafik erstellt von User Maxim Rezin nach Bowmaker J.K. and Dartnall H.J.A., "Visual pigments of rods and cones in a human retina." J. Physiol. 298: pp501-511; GNU-Lizenz für freie Dokumentation.
167 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Zapfen_(Auge) [4.2.2010].

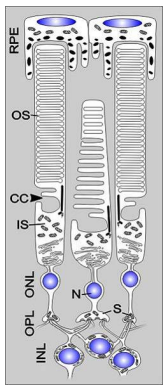


Abbildung 34: Photorezeptoren, Zapfen und Stäbchen[168]

Die Sinneszellen für Licht (Photorezeptoren, siehe Abbildung oben), die in der Netzhaut eingebettet sind, sind von Pigmentepithel (RPE) überzogen. In ihnen wird das Lichtsignal der auftreffenden Photonen über chemische Prozesse, an denen verschiedene Proteine, wie Rhodopsin, Transducin und weitere beteiligt sind, in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dieses Signal wird an die mittlere Schicht von Netzhautzellen (Bipolar-, Horizontal- und Amakrinzellen) weitergegeben, die für die laterale Verschaltung der Netzhautzellen sorgen. Aus den Bipolarzellen wird das Signal an die Ganglienzellen weitergegeben, die ihr Ausgangssignal an den Sehnerv weiterleiten, von dort wird es weiter zur Verarbeitung ins Gehirn übertragen.[169]

Das elektrische Signal, das durch das Auftreffen der Photonen entsteht, ist proportional zum Eingangssignal und der Empfindlichkeit des Rezeptors. Schwaches blaues Licht erzeugt im S–Zapfen dasselbe Resultat wie starkes rotes Licht.[170]

Rhodopsin, das lichtabsorbierende Pigment, das für Dämmerungssehen zuständig ist, ist in den sogenannten Disks (siehe Abbildung 34, Bezeichnung OS) in einer derartig hohen Konzentration eingelagert, dass bereits ein Photon mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ein Rhodopsinmolekül trifft. Das versetzt das Auge in die Lage, auch einzelne Photonen wahrzunehmen.[171]

3.2.2.2 Bildentstehung im Gehirn – Signale

Die Ausgangssignale mehrerer Rezeptoren der Netzhaut werden miteinander so verschaltet, dass sie für Ganglienzellen rezeptive Felder liefern. Jede Art von Ganglienzelle verfügt über ein spezielles rezeptives Feld. Je nach Verschaltung kann die Zelle gehemmt werden oder ein Signal weiterleiten. Diese rezeptiven Felder können ON– oder OFF–Felder sein. Die Ganglienzellen sind entweder auf Form und Farbe spezialisiert oder auf Bewegung. Manche rezeptive Felder sind ringförmig so angelegt, dass im Zentrum das ON– und außerhalb das OFF–Feld liegt, oder umgekehrt. Manche reagieren bei Ausleuchtung mit einer bestimmten Farbe. Die auf Bewegung spezialisierten, reagieren nur, wenn ein Lichtpunkt von einer gewissen Seite in ihr ON–Feld kommt. Über Fortsätze der Ganglienzellen gelangt das jeweilige Signal über die beiden Sehnerven, die im jeweiligen Blinden Fleck die Augen verlassen, zum Tha-

168 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Zapfen_(Auge) [26.1.09], Grafik erstellt von User Magnus Manske, Creative Commons Lizenz mit Namensnennung.
169 Vgl. Frings (2003), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/auge/netz.htm [26.1.2010].
170 Vgl. Purgathofer (2008a), Folie 23.
171 Vgl. Frings (2003), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/auge/pigm.htm [4.2.2010].

lamus.[172] Wobei die beiden Sehnerven sich überkreuzen und an der jeweils gegenüberliegenden Seite des Thalamus eingeleitet werden (siehe Abbildung 35). Bilder von Gegenständen, die sich links von uns befinden, werden also dem rechten Teil des Thalamus zugeführt.[173]

Im Thalamus ist die Verarbeitung der visuellen Information in Form- und Farbverarbeitung und Orts- und Bewegungsverarbeitung unterteilt. Zuständig ist für die ersteren das P–System, für die zweiten das M–System. P und M stehen für Abkürzungen der für diese Bereiche spezialisierten Thalamuszellen.[174]

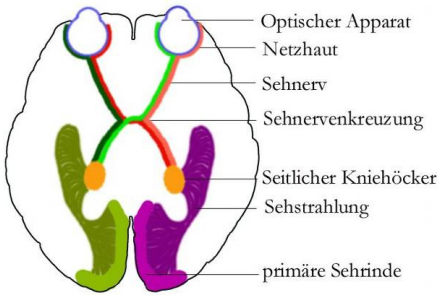


Abbildung 35: Sehsystem – vom Auge bis zur primären Sehrinde[175]

Stereoskopisches Sehen (auf kurze Distanzen räumliches Sehen) ist nur möglich, weil die Informationen, die über die Augen weitergeleitet werden, getrennt gehalten werden. Die Axone der Neuronen von M– und P–Schicht im Thalamus verlaufen vom sogenannten Kniehöcker aus getrennt zur primären Sehrinde.[176]

Die Sehbahn ist auf ihrem Weg zur primären Sehrinde breit in die „Sehstrahlung“ aufgefächert. Außerdem werden zusätzliche Signale über Thalamusaxonen an motorische Zentren geleitet, die für Licht gesteuerte Bewegungen des Auges zuständig sind (z.B. Pupille). [177]

Neurophysiologen haben über Aktionspotentiale einzelner Neuronen in der primären Sehrinde festgestellt, dass diese, wenn die gesamte Netzhaut von diffusem Licht getroffen wird oder wenn einzelne Photorezeptoren punktförmig beleuchtet sind, nicht reagieren. Am besten reagieren die Neuronen in der primären Sehrinde auf Striche und Lichtbalken. Die Orientierung des Balkens spielt eine große Rolle. Senkrecht ausgerichtete Balken liefern eine starke Aktivierung. Durch die unterschiedlich große Aktivierung, je nach Orientierung eines Lichtbalkens, sind die Neuronen geeignet, die Form von Objekten in der Umgebung zu registrieren.[178]

Auch die Neuronen der primären Sehrinde haben rezeptive Felder. Sie kommen dadurch zustande, dass mehrere Thalamuszellen mit einem Neuron der Sehrinde verschaltet sind. Nachdem die einzelnen Thalamuszellen von der Netzhaut her bereits über rezeptive Felder mit

172 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/sehen01.htm [13.2.2010].
173 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/chiasma.htm [13.2.2010].
174 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/pmsystem.htm [13.2.2010].
175 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Visuelles_System [14.2.2010], Grafik erstellt von User Hati nach Semir Z. Seki, „Das geistige Abbild der Welt“, Spektrum der Wissenschaft, Nov 1992.
176 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/knie.htm [13.2.2010].
177 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/psrinde.htm [13.2.2010].
178 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/balken.htm [13.2.2010].

Signalen versorgt wurden, setzt sich das Feld des Neurons in der Sehrinde aus allen rezeptiven Feldern zusammen, deren Signale ins Neuron geleitet werden.[179]

Die primäre Sehrinde besteht aus einer horizontal sechsfach geschichteten Struktur. In der vierten Schicht werden die meisten Fasern aus dem Kniehöcker des Thalamus empfangen. Innerhalb einer „Säule“ von 30 – 100 µm Durchmesser zeigen die Neuronen die gleiche Präferenz für eine Orientierung von Lichtbalken. In der Säule daneben reagieren die Neuronen auf eine andere Orientierung. Über mehrere dieser Orientierungssäulen werden so Linien wahrgenommen, die auf der Netzhaut abgebildet sind. Die Informationen, die einen Punkt auf der Netzhaut eines Auges betreffen, werden in einem Bündel von mehreren Säulen verarbeitet. Solche Säulenbündel sind sowohl für die einzelnen Punkte der Netzhaut des rechten, als auch für die des linken Auges vorhanden. Sie enthalten jeweils verschiedene Orientierungssäulen und außerdem Farbsäulen ohne Orientierungspräferenz. Eine Hyperkolumne (siehe Abbildung unten) fasst die Orientierungs- und Farbsäulen des Linken und des rechten Auges zusammen, sie deckt einen bestimmten Bereich des Sehfeldes ab.[180]

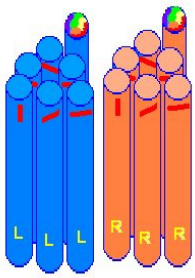


Abbildung 36: Farberkennung im Gehirn – Hyperkolumne[181]

Kurz zusammengefasst, laufen die Signale, die in der Netzhaut über rezeptive Felder vorverarbeitet werden, über den Sehnerv zur gegenüberliegenden Seite des Thalamus. Hier werden sie dem jeweiligen Auge zugeordnet und in Orts–, Bewegungs–, Form– und Farbsehen aufgegliedert. Ein Neuron in der Sehrinde erhält die Signale von mehreren Zellen des Thalamus, dadurch entstehen zusammengesetzte rezeptive Felder. In der primären Sehrinde werden die Informationen eines Bereiches des Gesichtsfeldes in einer Hyperkolumne zusammengefasst.[182]

3.2.2.3 Bildentstehung im Gehirn – Interpretation

Im obigen Abschnitt ist die Signalweiterleitung in den Neuronen und die entsprechende Verschaltung beschrieben. Die Sinneswahrnehmung leitet sich aber wesentlich davon ab, wie das Gehirn die Umwelt interpretiert. Man kann zwar das Auge vom Aufbau her mit einer Camera vergleichen, nicht jedoch das gesamte visuelle System. Das liegt daran, dass das Gehirn eine Unmenge an Annahmen über die Umwelt trifft.

---

179 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/rindrec.htm [14.2.2010].
180 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/cols.htm [13.2.2010]
181 Quelle: modifiziert nach Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/cols.htm [14.2.2010].
182 Vgl. Frings (2005, http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/bahnsum.htm [14.2.2010].

Ein Beispiel für eine dieser Annahmen wäre – entfernt oder nähert sich ein Objekt. Wir „wissen“, dass sich das Bild eines Objekts in der Größe ändert, wenn es sich nähert, dass das Objekt selbst aber seine Größe beibehält. Weitere Beispiele wären, dass aus einzelnen optischen Details ein Gegenstand erkennbar wird (siehe Abbildung 42) und dass die Größe von Objekten in Relation zu anderen Objekten festgelegt wird (siehe Abbildung 41).

Sehen wir eine Gruppe von Objekten, wählt das visuelle System des Gehirns das davon aus, das ihm am wichtigsten erscheint. Dieses dient dann als Referenz beim Zusammenbau des Gesamtbildes, das man vor sich hat (siehe Abbildung 44 und Abbildung 42).[183]

Diese Annahmen über die Umwelt werden im Gehirn über verschiedene Schritte getroffen. Von der primären Sehrinde werden die grob vorverarbeiteten Informationen an die sekundäre Sehrinde weitergeleitet. Diese besteht aus vier Rindenbereichen, die Form und Farbe (P–Weg) und Bewegung und Ort (M–Weg) parallel analysieren und verarbeiten (siehe Abbildung 37). Dabei lassen kognitive Prozesse, in speziell dafür ausgelegten Lappen der sekundären Sehrinde, die visuelle Wahrnehmung entstehen.[184]

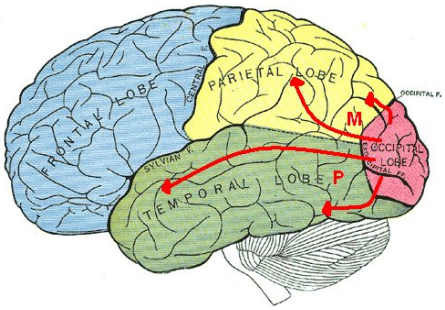


Abbildung 37: Gehirnlappen[185]

Die Striche und Lichtbalken, die in der primären Sehrinde (Okzipitallappen, siehe Abbildung oben – rosa Bereich) registriert wurden, werden in einem der Bereiche der sekundären Sehrinde (Temporallappen, siehe Abbildung oben, grüner Bereich) zu einem Objekt zusammengefügt, indem die optischen Signale mit Bekanntem verglichen werden. In anderen Bereichen (Parietallappen, siehe Abbildung oben, gelber Bereich) wird die Bewegung und der Ort bzw. die Entfernung des Objekts festgestellt.[186]

Für die Objekterkennung ist der Temporallappen zuständig. Hier gibt es Neuronenverbände die Gegenstände nach Form und Farbe analysieren und andere, die das gleiche mit Gesichtern tun. Kommt es hier zu Verletzungen, kann man z.B. Gesichter oder eine Farbe nicht mehr erkennen. Durch die Reaktion von benachbarten Zellen auf ähnliche Objekte sind im Schläfenlappen Objekte nach Kategorien geordnet.[187]

Stereoskopisches Sehen sorgt dafür, dass die räumliche Zuordnung von nahen Objekten über Entfernung und Größe und den Unterschied des Bildes vom linken und vom rechten Auge,

183 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/spunkt.htm [13.2.2010].
184 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/skrinde.htm [13.2.2010].
185 Quelle: URL http://de.wikibooks.org/wiki/Topographische_Anatomie:_Neuroanatomie:_Endhirn [23.3.2010], Grafik erstellt von User: Arcadian, nach: 20th U.S. edition of Gray's Anatomy of the Human Body, originally published in 1918, public domain.
186 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/V1.htm [13.2.2010].
187 Vgl Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/V4.htm [13.2.2010].

vom Gehirn ermittelt werden kann. Bei weiter entfernten Objekten, helfen diverse Faktoren mit, Entfernung und Größe abzuschätzen. Z.B. ihre bekannte Größe, eine Analyse der Perspektive oder die Verschiebung von verschieden weit entfernten Gegenständen. Verarbeitet wird diese Information im Parietallappen (siehe Abbildung 37).[188]

Obwohl man über das visuelle System schon viel weiß, ist immer noch unbekannt wie die drei Verarbeitungsstufen – elementares Sehen, visuelle Objekt- und Raumerkennung eine einheitliche Wahrnehmung ergeben.[189]

3.2.2.4 Psychophysische Effekte

Die Empfindung einer Farbe wird von verschiedenen Effekten beeinflusst[190] (wenn nicht anders angegeben, dann stammen die Bezeichnungen von der in dieser Fußnote angegebenen Referenz):

Adaption: Die Fähigkeit des Auges extreme Helligkeitsunterschiede zu kompensieren. Tritt man aus einem stark beleuchteten in einen abgedunkelten Raum braucht man ca. eine halbe Minute, bis man sich auf die neuen Lichtverhältnisse angepasst hat. Das funktioniert auch für jeweils nur ein Auge.[191] Diese Fähigkeit des Auges sorgt auch dafür, dass wir bei jeder Beleuchtung (außer, bei zu geringer Helligkeit, siehe Stäbchen) Helligkeitsunterschiede von Objekten erkennen.

Kontraststeigerung: Wie bei Bildschirmen, wo mit elektronischen Mitteln der Kontrast zwischen Farben erhöht werden kann, wird im Auge (siehe Zapfen) bei nebeneinander stehenden Farbwerten der gleichen Tönung der dunklere etwas dunkler und der hellere etwas heller wahrgenommen.

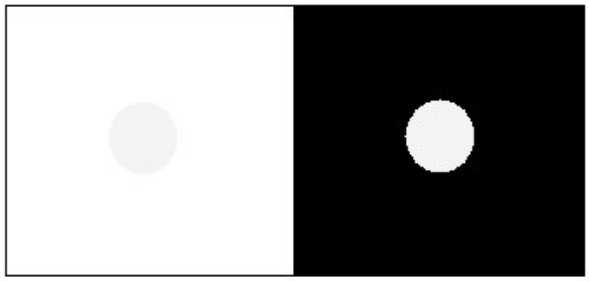


Abbildung 38: Psychophysischer Effekt: Kontraststeigerung[192]

Fällt der rechte Teil des Bildes auf die Netzhaut wird dort weniger Sehstoff zersetzt, weil die schwarze Fläche das Licht absorbiert und weniger Photonen die Netzhaut treffen. Daher kann für den grauen Punkt in der Mitte mehr zu zersetzender Sehstoff zur Verfügung stehen und er liefert ein Signal, das einem helleren Grau entspricht, als auf der linken Fläche, wo durch die weiße Fläche viel Sehstoff auf der Netzhaut zersetzt wird. Hier täuscht der physiologische Ablauf im Auge eine andere Helligkeit vor.

---

188 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/V5.htm [13.2.2010].
189 Vgl. Frings (2005), http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/bind.htm [13.2.2010].
190 Vgl. Nolting (2005b), S. 160.
191 Vgl. Küppers (1987), S. 33.
192 Vgl. ebenda, S. 35f.

Umstimmung: Auch wenn das Umgebungslicht von Weiß stark abweicht, nimmt man nach einer gewissen Anpassungszeit eine Farbe annähernd wie mit weißem Licht beleuchtet wahr. Beim Lesen eines Buches ist es egal, bei welcher Beleuchtung es gelesen wird, es wird kaum ein Unterschied zur Beleuchtung mit Tageslicht auffallen. Manchmal trifft man auf ein Buch, dessen Seiten nicht weiß, sondern getönt sind und die Druckfarbe ist nicht schwarz, sondern irgendeine andere, dunkler gehaltene Farbe. Nach einiger Zeit des Lesens sieht man die Seiten so, als wären sie weiß und die Schrift schwarz. Wer beim Skifahren orange Sonnenbrillen trägt, bemerkt besonders stark, dass er nach einiger Zeit den Schnee weiß sieht. Nimmt er die Brille ab, wirkt der Schnee blau. Außerdem sieht man einen Gegenstand in einem etwas weniger gesättigten Farbton, wenn man ihn einige Zeit betrachtet. Küppers erklärt diesen Effekt nach einer Theorie von Studnitz über die drei Sehstoffe in den Zapfen. Sie würden sich ähnlich verhalten, wie bei der Adaption an veränderte Helligkeit. Da die Augen jedoch nie lange auf ein Objekt gerichtet bleiben, sondern hin und her schweifen fällt im Alltag nicht besonders auf, dass ein Objekt nach einiger Zeit in einer weniger gesättigten Farbe erscheint. Die Umstimmung tritt auch auf, wenn man getönte Gläser trägt. Nach einiger Zeit sieht man keine Unterschiede zum Farbsehen ohne Brille. Wesentlich ist, dass im vorhandenen Licht alle Spektralbereiche des Lichts vorhanden sein müssen, damit das Auge sich adaptieren kann.[193]

Nachbilder: Das Sehpurpur der Netzhaut „bleicht“ aus, wenn man ein farbiges Objekt länger betrachtet. Schnell kann das bei hellen Objekten gehen. Man sieht, wenn man im Anschluss auf das Starren auf die Abbildung auf eine helle Wand sieht, ein Nachbild in der Komplementärfarbe des Objektes. Jedem Österreicher sollte folgendes Nachbild bekannt sein. Es wurde nach einer Idee von http://de.wikipedia.org/wiki/Nachbild [19.1.2010] gestaltet.



Abbildung 39: Psychophysischer Effekt: Nachbild

Der Effekt ist auch als Sukzessivkontrast bekannt. Große Helligkeits– und Farbunterschiede führen in der Netzhaut zu optimaler Zersetzung des Sehpurpurs. Blickt man danach auf eine helle Wand, reagiert die Netzhaut mit der Einstellung der Sehpurpurzersetzung bei vorher von Helligkeit getroffenen Bereichen und mit Zersetzen von Sehpurpur und damit Helligkeitsempfindung bei den Stellen, wo davor Dunkelheit herrschte. Bei farbigen Flächen kommt die Komplementärfarbe zum Vorschein.[194]

Bezold–Effekt: Eine farbige Fläche, die von anderen Farben umgeben ist, löst je nachdem, welches die Umgebungsfarbe ist, eine andere Farbempfindung aus. Interessant ist, dass der Effekt auch zum Tragen kommt, wenn man Licht von hinten durch das Papier scheinen lässt.

[193] Vgl. Küppers (1987), S. 37.
[194] Vgl. ebenda, S. 38.

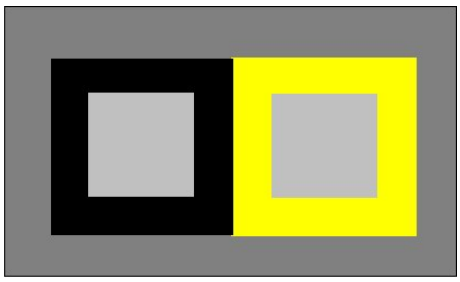


Abbildung 40: Psychophysischer Effekt: Bezold-Effekt

Dieser Effekt tritt vorwiegend bei hellen Farbnuancen auf und hängt indirekt proportional von der Größe der Flächen ab. Ein neutraler Hintergrund lässt die Fläche farbiger, ein stark gefärbter neutraler, erscheinen. Dunkle Hintergründe lassen sie heller erscheinen. Auch der Farbton kann sich verschieben. Ebenso führt ein umgebender Farbton dazu, dass eine andere Farbempfindung zu Stande kommt. Erklärt wird dieser Effekt damit, dass sich die drei Sehstoffe unabhängig voneinander regenerieren. Wie bei der Kontraststeigerung führt ein z.B. grün gefärbter Bereich innerhalb eines rot gefärbten dazu, das er stärker hervortritt, da der rote Spektralanteil für ihn wie „kein Licht“ wirkt.[195]

Optische Täuschungen: Jeder kennt sie, weiß was wirklich abgebildet ist und ist doch immer wieder verblüfft, welcher Eindruck im Gehirn aus der erhaltenen Information entsteht.

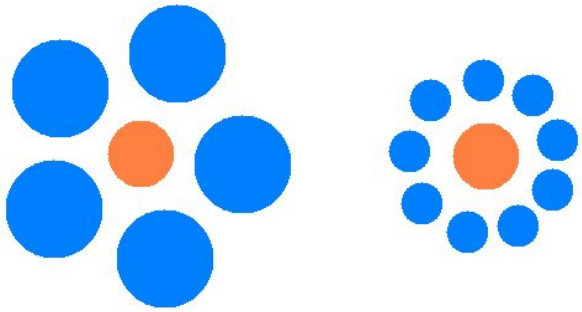


Abbildung 41: Psychophysischer Effekt: Optische Täuschung

Die Grafik wurde in Paint nach einer Idee von Harald Küppers[196] gestaltet. Deshalb ist bekannt, dass die beiden orange gefärbten Kreise gleich groß sind. Trotzdem entsteht im fertigen Bild der Eindruck, dass der rechte orange Punkt größer ist. Die Wissenschafter wissen noch nicht, wodurch dieser Effekt verursacht wird. Sie nehmen an, dass er sich aus dem Bestreben des Gehirns eine Gesamtsituation zu erfassen ableitet. D.h. dass die Größe der mittleren Kreise in Relation zu den sie umgebenden festgelegt wird.

Bekanntes Erkennen: Gegenstände, die man aus dem Alltag kennt, kann das Gehirn verstandesmäßig auf Grund der Erfahrung auch aus abstrahierter Information zusammensetzen. Ein Beispiel dazu liefert die hier abgebildete Grafik, die ebenfalls nach einer Idee von Harald Küppers gestaltet wurde.

[195] Vgl. Küppers (1987), S. 37.
[196] Vgl. ebenda, S. 34.

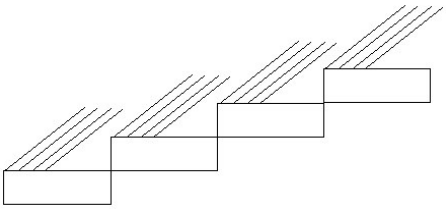


Abbildung 42: Psychophysischer Effekt: Bekanntes erkennen

Täuschung in Bezug auf Helligkeitswahrnehmung[197]: Obwohl man in der Grafik unten an den Kreuzungspunkten graue Flecken erkennt, sind die weißen Linien überall gleich hell. Wenn man einen grauen Fleck fixiert, verschwindet er. Dieser Effekt ist unter dem Namen farbloser Simultankontrast bekannt.

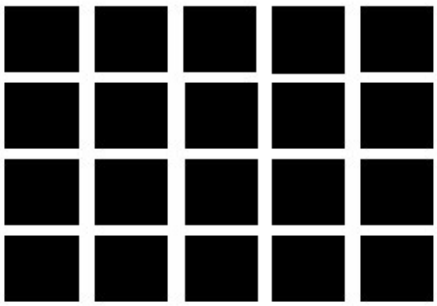


Abbildung 43: Psychophysischer Effekt: Helligkeitsillusion

Verschiedene Referenzsysteme: Beim Bild unten passen die beiden Referenzsysteme nicht zusammen. Sowohl der Elefant, als auch seine Beine können als Referenz herangezogen werden.

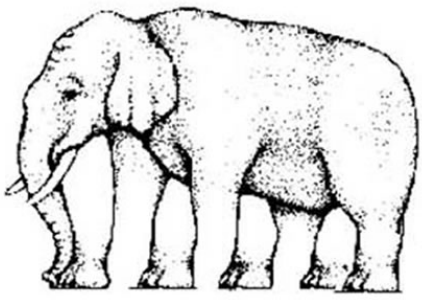


Abbildung 44: Psychophysischer Effekt: Verschiedene Referenzsysteme[198]

Der berühmte niederländische Künstler Maurits Cornelis Escher ist durch die Darstellung von dieser Art von „unmöglichen“ Bildern berühmt geworden.

Periphere Drift Illusion[199]: Hierbei handelt es sich um die Illusion einer Bewegung im peripheren Gesichtsfeld. Der Sinneseindruck entsteht nicht in der Fovea, wo die maximale Sehschärfe ausgenützt wird, sondern außerhalb, in der Retina, in der mehr Stäbchen als Zapfen enthalten sind.[200]

197 Vgl. Küppers (1987), S. 36.
198 Quelle: URL http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/sehen/spunkt.htm [13.2.2010], created by N.N.
199 Vgl. Kitaoka (2003).
200 Vgl. URL http://de.wikipedia.org/wiki/Peripheres_Sehen [19.1.2010].

Der Japaner Kitaoka Akiyoshi beschreibt auf seiner Website[201], wie seine berühmte Illusion „Rotating Snakes“ entstanden ist. Die Grafik zeigt Schlangen, die zusammengerollt sind und sich scheinbar drehen. Die Wahrnehmungsfähigkeit für Periphere Drift Illusion dürfte mit dem Alter abnehmen. Befragungen bei Personen über 60 Jahren haben ergeben, dass sie den Drifteffekt nicht wahrnehmen. Kitaoka Akiyoshi schreibt auch davon, dass er nachdem er die Grafik veröffentlicht hatte, vollkommen die Kontrolle darüber verloren hat und sie an den verschiedensten Stellen im Internet aufgetauchte. Sein Copyright soll beachtet und diese berühmte Grafik nicht einfach hier eingebaut werden, stattdessen wird seine Arbeitsanleitung[202] verwendet und eine eigene Grafik nach seinen Angaben entwickelt. Wesentlich ist, dass in den Bildern vier verschiedene Helligkeitsregionen kombiniert sind. Der Eindruck der Bewegung entsteht, wenn die Regionen der Helligkeit nach absteigend ineinander übergehen.

Ein Beispiel für eine Driftillusion, die in Richtung Uhrzeiger abläuft:

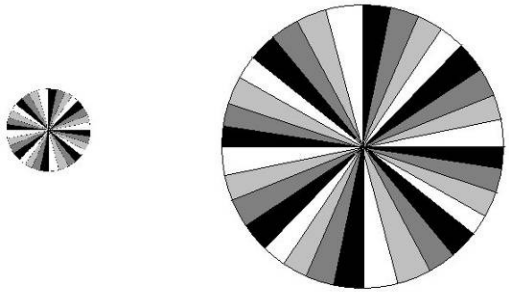


Abbildung 45: Psychophysischer Effekt: Peripheral Drift Illusion

Konzentriert man sich darauf, den kleinen Kreis scharf zu sehen, sollte der Eindruck entstehen, dass sich der große in Richtung des Urzeigers dreht. Der Effekt wird am Bildschirm während des Lesens des Absatzes oberhalb der Grafik, bzw. wenn man die Seite über den Bildschirm scrollt, besonders deutlich.

3.2.2.5 Zusammenfassung

Abschließend lässt sich über die Wahrnehmung und die Eindrücke, die im Gehirn eines Betrachters entstehen, sagen, dass der visuelle Reiz der im Auge verursacht wird auf sehr komplexe Art und Weise umgewandelt wird. Die Zuordnung einer gewissen spektralen Zusammensetzung an eine Farbe (CIE Standardbeobachter, siehe Abschnitt 3.2.1.5) hat keinen direkten Einfluss darauf, welche Farbempfindung beim Betrachter entsteht wenn Licht dieser Zusammensetzung auf seine Netzhaut fällt.[203]

[201] Quelle: modifiziert übernommen nach URL http://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/index-e.html [19.1.2010].
[202] Vgl. Kitaoka (2003).
[203] Vgl. Shepperd (1968), S. 11f.

3.3 Theorie der Haut

Die Haut spielt eine wesentliche Rolle bei der Einschätzung eines Individuums, sie ist ein „soziales Organ“.[204] Flächenmäßig ist sie das größte und vielseitigste Organ des menschlichen Organismus. Sie dient unter anderem dem Schutz vor Umwelteinflüssen und der Repräsentation.

Die Kosmetikindustrie arbeitet daran, der Konsumentin gesunde makellos schön aussehende Haut zu ermöglichen. Dies wird jedoch in verschiedenen Kulturen unterschiedlich definiert. Gerade in den letzten Jahren ist beispielsweise in Japan der Trend der Jugend zu heller, porzellanähnlicher Haut wieder zu beobachten – die Kosmetikhersteller reagieren darauf mit der Herstellung von Whitening Produkten und Pudern, die das ermöglichen. In den westlichen Ländern wiederum wird für eine „gesunde Bräune“ mit Hilfe von Bronzing Powder Werbung gemacht. Generell erwarten sich Konsumentinnen von Kosmetikprodukten, dass sie ihnen einen ebenmäßigen Teint ermöglichen.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über den Hautaufbau, die optischen Eigenschaften der Haut, die möglichen Unregelmäßigkeiten, die durch Make Up beseitigt werden sollen und die Erwartungen, die von Benutzern an Make Up gestellt.

3.3.1 Aufbau der Haut

Die Haut gliedert sich in drei miteinander verbundene Schichten. Die Oberhaut (Epidermis), die Lederhaut (Dermis) und die Unterhaut (Subcutis, Unterhautfettgewebe).

3.3.1.1 Epidermis (Oberhaut)

Die Epidermis ist ein mehrschichtiges, verhornendes Plattenepithel mit einer Dicke von 30 µm bis zu mehreren Millimetern (z.B. an den Fußsohlen). Sie unterteilt sich in die Hornschicht (Stratum corneum), die helle Schicht (Stratum lucidum), die Körnerschicht (Stratum granulosum), die Stachelzellschicht (Stratum spinosum) und die Keimschicht (Stratum basale) und sitzt auf der Basalmembran auf. [205]

Die **Keimschicht** (Stratum basale) oder auch Basalschicht, besteht aus Keratinozyten (95 %), Langer Hans Zellen (2 %), Melanozyten (2 %) und Merkel Zellen (1 %).[206]

Die **Keratinozyten** werden in der Keimschicht gebildet. Sie unterliegen einer ständigen Veränderung ihrer Form und ihres Zellinhalts, wobei sie in etwa 4 Wochen an die Oberfläche in die Hornschicht wandern. Sie enthalten Keratin und dienen nach außen als Barriere und nach innen dem Schutz vor Flüssigkeitsverlust. Während der Wanderung nach oben nimmt ihr Zellvolumen und Wassergehalt laufend ab. Zur besseren Haftung sind Keimschicht und Le-

[204] Vgl. Tschachler (2005), S. 160.
[205] Vgl. Fritsch (2004), S. 6.
[206] Vgl. Tschachler (2005), S. 120f.

derhaut miteinander verzahnt.[207] Die dadurch entstehende größere Oberfläche dient auch der besseren Durchblutung.[208]

Die **Langer Hans Zellen** spielen bei immunologischen Prozessen der Haut eine große Rolle. Diese Zellen reichen mit ihren Fortsätzen in die Zellzwischenräume. Unter dem Elektronenmikroskop sind sie als tennisschlägerartige Zellorganellen sichtbar.[209]

Die **Melanozyten** liegen zwischen der Epidermis und der Dermis. Sie bilden das Pigment Melanin, das sie verpackt in Melanosomen (Bausteine der Melaninsynthese) an die sie umliegenden Keratinozyten weitergeben. Sie stehen einzeln und regelmäßig zu 1000 bis 2000/mm². Melanine sind rötliche bis dunkelbraune Farbstoffe, die aus DOPA entstehen. Das dazu nötige Schlüsselenzym Tyrosinase kommt nur in den Melanozyten vor. Melanin fungiert als Absorber von Licht aller Wellenlängen und Fänger freier Radikale. Das Pigment bestimmt die Hautfarbe bei Menschen und dient dem Schutz vor UV Bestrahlung. Wobei das Verhältnis von Eumelanin (schwarz) zu Phäomelanin (rot), die Menge des Melanins und seine Verteilung darüber entscheidet, welche Haar- und Hautfarbe und welche UV Empfindlichkeit die Haut eines Menschen hat. Die Haut eines Europäers und Afrikaners unterscheidet sich dadurch, dass die Melanosomen in verschiedenen Stadien anders verteilt sind. Die Hautfarbe resultiert aus der unterschiedlichen Lichtbrechung.[210] Bei dunkelhäutigen Menschen reichen die Pigmente bis in die Hornschicht, bei hellhäutigen befinden sie sich nur in der Basalschicht.[211] Die Melanosomen von Kaukasiern enthalten weniger Melanin aber mehr Melaninkörner als die von Negroiden oder Mongolen.[212]

Die **Merkel Zellen** stehen mit Nervenzellen in Verbindung und unterstützen den Tastsinn.

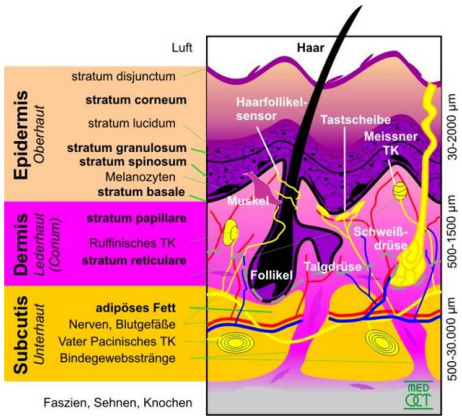


Abbildung 46: Aufbau der Haut[213]

Die Zellen der **Stachelzellschicht** (Stratum spinosum) verhelfen der Haut durch stachelförmige Fortsätze zu Elastizität. Sie ist zwei bis fünf Zelllagen dick. Hier nimmt das Zellvolumen zu und die Zellachse orientiert sich horizontal.[214]

---

207 Vgl. Gerny (1996), S. 9.
208 Vgl. URL: http://www.haut.de/wms/haut/aufbau_haut/struktur [6.7.07].
209 Vgl. Fritsch (2004): S. 22.
210 Vgl. Tschachler (2005), S. 128.
211 Vgl. Gerny (1996), S. 9.
212 Vgl. Anderson (1981), S. 16.
213 Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Haut [6.7.06], Grafik erstellt von Centre of biomedical Technology and Physics, Medical University Vienna; Creative Commons Lizenz.

In der ein bis drei Zelllagen dicken **Körnerschicht** (Stratum granulosum) bilden sich Keratohyalinkörner, die gemeinsam mit fasrigen Proteinen und Zytoplasmabestandteilen zur Verhornung und zum Absterben der Zellen führen. Hier werden die Zellen abgeplattet, die Zellkerne verschwinden, zwischen den Zellen bildet sich eine zementartige Lipidsubstanz aus. Die Zellen sind nicht mehr elastisch angeordnet sondern starr in einer streng geometrischen Form. Über die **Glanzschicht** wandern die Zellen dann in die Hornschicht.[215]

Die **Hornschicht** (Stratum corneum) ist je nach Lokalität zwischen 10 – 100 µm (10 – 20 Zelllagen) dick. Sie liegt als Art Plastikmembran über der Epidermis. Sie besteht aus Korneozyten (abgestorbenen Keratinozyten, das sind verhornte Hautzellen ohne Zellkern), die schuppenförmig übereinander gelagert sind. Diese Hornzellen werden als durchsichtige Schuppen laufend von der Oberhaut abgestoßen. Vom Aufbau her ist die Hornschicht außen aufgelockert und nach innen hin dichter. Sie besteht aus 10 – 20 % Wasser und aus Eiweißen, wasserlöslichen Stoffen und Fetten. Die Fette in der Hautschicht bestehen vor allem aus Ceramiden. Sie schützen die Haut davor, Feuchtigkeit zu verlieren.[216] Die typische Form der Korneozyten (hexagonale Plättchen) kommt dadurch zu Stande, dass die in den lebenden Schichten der Epidermis vorhandenen Keratinozyten eine oberflächensparende, zwischenraumlose Form einnehmen (Tetrakaidekaeder) und dann im Laufe ihres Lebenszyklus abplatten und schließlich erstarren.[217]

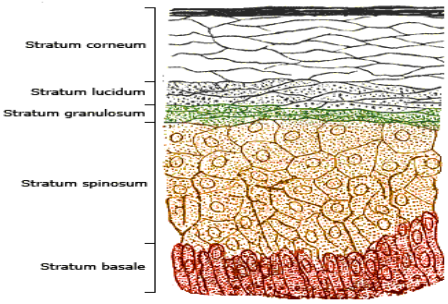


Abbildung 47: Aufbau der Epidermis[218]

3.3.1.2 Dermis (Lederhaut)

Die Lederhaut ist zwischen 0,5 und 4 mm dick. Sie ist sehr reißfest, elastisch und enthält die Haut versorgende Gefäße und Nerven. Sie besteht aus der Papillarschicht (Stratum papillare) und der darunter liegenden Faserbündelschicht (Stratum reticulare), die netzförmig aufgebaut ist. Das Gewebe besteht aus ineinander vernetzten Kollagenfaserbündeln, die parallel gerichtet sind, wobei sie in der oberen Dermis lockerer gewebt sind, als in der unteren. In der gesamten Dermis ist Kollagen vom Typ I enthalten, rund um die Hautanhangsgebilde, die hier untergebracht sind auch Kollagen vom Typ III. Es sind derzeit 17 Kollagentypen bekannt, wobei der Typ I ein Hauptbestandteil der Haut ist und auch in Knochen und Sehnen vorkommt – 50% des Trockengewichts der Dermis ist Kollagen vom Typ I. Kollagen vom

214 Vgl. Fritsch (2004), S. 6.
215 Vgl. ebenda.
216 Vgl. Gerny (1996), S. 10.
217 Vgl. Fritsch (2004), S. 6.
218 Quelle: übernommen von URL http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Skinlayers.png&filetimestamp=20061116124823 [5.1.2011], User Seraphine, gemeinfrei.

Typ III kommt in fötaler Haut, in Erwachsenenhaut in der Papillarschicht (10 % deren Trockengewichts) und um die Blutgefäße vor. Die Kollagene sind für die mechanischen Eigenschaften (Reißfestigkeit) der Haut verantwortlich. Außer den genannten Kollagentypen enthält die Dermis noch ca. 8 andere Kollagentypen.

Die Füllsubstanz der Dermis und der Subcutis besteht aus großen Molekülen, die aus einem Proteinkern mit Glykosaminglykanketten zusammengesetzt ist.[219]

3.3.1.3 Subcutis (Unterhautfettgewebe)

Die Subcutis ist aus vielen Fettläppchen aufgebaut, auf denen die Faserbündelschicht aufsetzt. Zwischen den Fettzellen verlaufen Blutgefäße und Nervenfasern. Das Fettgewebe überdeckt die gegliederte Struktur der unteren Gewebsschichten und erlaubt, dass sich die Haut verschieben lässt.[220]

Die Gefäße der Haut reichen über ein horizontales Gefäßnetzwerk am Grund der Faserbündelschicht mittels vertikaler Verbindungsgefäße bis hinauf in die Papillarschicht, wo über ein oberflächliches horizontales Netzwerk Papillengefäße ausgebildet sind. Es gibt ein Zu– und ein Ableitungssystem. Die vertikalen Verbindungsgefäße versorgen auch die Haarfollikel und Schweißdrüsen.[221] Die Dicke dieser Schicht ist von verschiedensten Faktoren abhängig (Geschlecht, Alter, Hormonstatus, Vererbung, Ernährung).[222]

Die Lymphgefäße der Haut sind ebenfalls so aufgebaut, dass ein oberflächliches und ein tiefes Netzwerk die Lymphe in die großen Lymphbahnen führen. Die Lymphspalten in der Papillarschicht kommunizieren mit den Lymphgefäßen, die aus verschiedenen Zellbestandteilen aufgebaut sind.[223]

3.3.1.4 Hautanhangsgebilde in der Dermis

Zu diesen zählen die Haare, Talgdrüsen, Schweißdrüsen, Duftdrüsen und Nägel.

3.3.1.4.1 Haare

Haare bestehen aus pigmentierten Keratinfäden (Hornsubstanz, ein Protein) und werden im unteren Bereich der Lederhaut in der Haarpapille in der so genannten Matrix gebildet. Ihre Farbe erhalten sie von Melanozyten, die in der Matrix vorhanden sind. Sie stecken im Haarfollikel, das aus der röhrenförmigen Haarwurzelscheide und dem Haarbulbus besteht. Oben ist der Follikel trichterförmig erweitert, hier münden die Talgdrüse und eine eventuell vorhandene Duftdrüse ein. Der Follikel ist von einer inneren und äußeren Haarwurzelscheide umgeben. Wobei die äußere eine Fortsetzung der Stratum basale in den Haartrichter darstellt.[224]

[219] Vgl. Fritsch (2004), S. 30f.
[220] Vgl. ebenda, S. 41.
[221] Vgl. ebenda, S. 34f.
[222] Vgl. Gerny (1996), S. 11.
[223] Vgl. Fritsch (2004), S. 35.
[224] Vgl. ebenda, S. 24f.

Bei Kälte werden die Haare durch den Haaraufrichtemuskel aufgerichtet. Er reicht von der oberen Schicht der Lederhaut unter die Talgdrüse. Der Follikel ist von Nervenfasern umwickelt.[225]

3.3.1.4.2 Talgdrüsen

Talgdrüsen sind an den Follikelapparat gebunden. Ihr Fettgemisch ist die Hauptkomponente des Oberflächenfettes der Haut. Ihre Anzahl schwankt zwischen 100 – 1000/cm² wobei im Gesicht die Drüsen viellappig und hypertroph sind. Die Talgproduktion ist individuell, sie hängt auch vom Alter und der Region des Sitzes der Talgdrüse ab. Talg besteht unter anderem aus Wachsestern, Triglyzeriden und aus dem Lipid Squalen.[226]

Im T–Bereich des Gesichts (Stirn, Nase, Kinn) befinden sich mehr Talgdrüsen pro Fläche, als in den Wangenpartien.[227] Talg hält die oberste Hautschicht geschmeidig.

3.3.1.4.3 Schweißdrüsen

Ekkrine Schweißdrüsen erreichen einen Durchmesser von 0,4 mm. Sie sind von einer Basalmembran (Proteinschicht) umgeben, gleichmäßig über den ganzen Körper (100 – 600/cm²) verteilt, im Gegensatz zu apokrinen Drüsen (Duftdrüsen) nicht an Haarfollikel gebunden und enden in einer eigenen Pore. Sie bestehen aus einem knäuelförmigen Endstück, das das Sekret abgibt und dem Gang nach außen. Das Endstück ist aus dunklen Zellen, hellen Zellen und Myoepithelialzellen aufgebaut.[228]

3.3.1.5 Farbe der Haut

Die Farbe der Haut wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören die Farbe des Blutes, Pigmente (Karotinoide und andere) und vor allem Melanin.[229] Beim Europäer unterscheidet man photobiologische Typen mit heller, hellbrauner und mittelbrauner Haut. Der Einfluss des Melanins auf die Hautfarbe wurde weiter oben bei der Besprechung der Melanozyten bereits beschrieben.[230] Ob die Haut eher gelblich oder olivfarben ist, hängt vom Gehalt an Bilirubin und Beta–Karotin ab.[231]

3.3.2 Hauttypen

Vom medizinischen Standpunkt her gibt es drei Arten von Hauttypen: [232]

- Trockene Haut (Sebostase)
- Fettige Haut, die als ölige und trockene Form der Seborrhoe (Überproduktion von Talg durch die Talgdrüsen) vorkommt

[225] Vgl. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Haare [15.8.07].
[226] Vgl. ebenda, S. 27.
[227] Vgl. Gerny (1996), S. 16.
[228] Vgl. ebenda, S. 28.
[229] Vgl. ebenda, S. 21.
[230] Vgl. Tschachler (2005), S. 128.
[231] Vgl. Baranoski (2004), S. 38.
[232] Vgl. Gerny (1996), S. 16.

- Normale Haut (alle Hautfunktionen befinden sich im Gleichgewicht). Normale Haut ist selten vorzufinden, da der Hauttyp von Faktoren wie Alter, Stoffwechsel und Jahreszeit stark beeinflusst wird.

Dr. H Gerny schreibt in „Kosmetik + Dermatologie“:

„Der Hauttyp hängt von der Talgproduktion, der Beschaffenheit des Talges, vom Stoffwechsel, von der Feuchtigkeitsproduktion und der Wasserspeicherfähigkeit der Haut sowie von den Pflegeprodukten und der Sonnenbelastung ab.“[233]

3.3.2.1 Trockene Haut[234]

Die Anzahl der Personen mit trockener Haut nimmt mit dem Alter zu. Ein Großteil der 50–jährigen hat trockene Haut. Talg– und Schweißbildung sind bei diesem Hauttyp reduziert und die Haut kann weniger Wasser binden. Sie ist trocken, spröde, weniger elastisch, hat kleine Poren und wirkt matt und stumpf. Es entstehen rote Flecken bei Wasserkontakt und die Haut reagiert empfindlich auf Einflüsse von außen. Trockene Räume im Winter und Bestrahlung mit UV führen zu Austrocknung. Durch die Benutzung von Reinigungsmitteln und Lösungsmitteln wird der Fettmantel aufgelöst und aus der Haut werden wasserbindende Stoffe herausgelöst, wodurch die Hornschicht austrocknet, da jede Herabsetzung der Barrierefunktion der Haut zu Wasserverlust führt. Die Pflegeprodukte sollten für eine ausreichende Befeuchtung der Hornhaut sorgen, damit ihre Elastizität erhalten bleibt.

3.3.2.2 Fettige Haut[235]

Dieser Hauttyp ist speziell unter jungen Personen stark vertreten. Die Talgdrüsen produzieren aufgrund eines höheren Wertes an männlichen Hormonen verstärkt Talg. Erbanlagen, hormoneller Stoffwechsel, Stress und Ernährung sind Faktoren, die hier eine Rolle spielen.

Bei der trockenen Form der Seborrhoe ist die Wasserbindung durch die Hornschicht vermindert. Wasserkontakt lässt auf der Haut Fettschuppen erscheinen, sie spannt und bekommt rote Flecken. Pfegeprodukte sollten der Haut viel Feuchtigkeit zuführen und kein Fett enthalten.

Die ölige Form der Seborrhoe ist gekennzeichnet durch normales bis gesteigertes Wasserbindungsvermögen der Hornschicht. Die Haut ist großporig und fettig. Mitesser und Akne sind Begleiterscheinungen dieses Hauttyps. Hier ist es besonders wichtig, dass in den Pflegeprodukten keine fettenden Substanzen enthalten sind und dass die Reinigung gut durchgeführt wird.

3.3.2.3 Empfindliche Haut[236]

Haut dieses Typs ist meist hell, feinporig und trocken. Verursacht wird sie unter anderem durch Umwelteinflüsse, Stress oder Allergien. Es kann zu vorzeitiger Hautalterung kommen. Die Pflege sollte auf den Hautzustand abgestimmt werden.

---

233 Gerny (1996), S. 16.
234 Vgl. ebenda.
235 Vgl. ebenda, S. 17.
236 Vgl. ebenda, S. 18.

3.3.3 Optische Eigenschaften der Haut

Eine der Schutzfunktionen der Haut ist es, Strahlung zu absorbieren. Die optischen Eigenschaften der Haut und die Eindringtiefe von Licht in die Haut hängen von der Wellenlänge ab. Kurzwelliges Licht (um 200 nm, UV–C) wird von der Hornschicht absorbiert. Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Eindringtiefe der Strahlung zu. Im Bereich des infraroten Lichtes liegt sie bei bis zu 1 cm für eine Wellenlänge von 800 nm.[237]

Sichtbares Licht wird verschieden stark von den einzelnen Hautschichten absorbiert (siehe Abbildung 48). Violettes Licht (380 – 420 nm) wird bis zu 32 % in der Epidermis absorbiert und erreicht die Dermis. Grünes Licht (490 – 575 nm) wird zu 77% von der Epidermis absorbiert, durchdringt die Dermis (5% werden absorbiert) und erreicht die Subcutis. Rotes Licht (650 – 750 nm) wird von der Epidermis mit 65 % und von der Dermis zu 21% absorbiert, wie oben bereits angeführt, dringt sie je nach Wellenlänge bis zu 1 cm tief in die Haut ein.

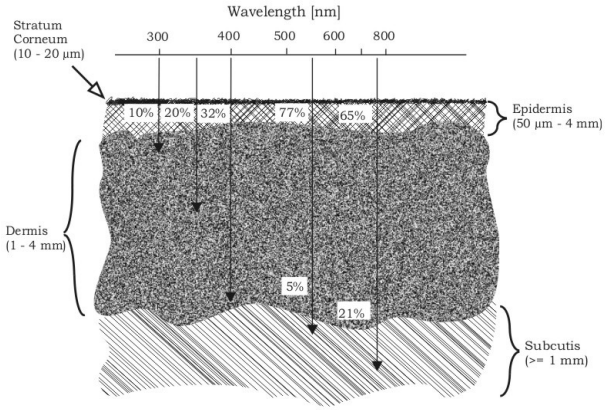


Abbildung 48: Absorption der Hautschichten[238]

Die Brechzahl der Hornschicht wird in der Literatur für den sichtbaren Wellenlängenbereich mit $n_{sc} = 1{,}55$ angegeben. Ein auf die Stratum Corneum einfallender Lichtstrahl ($\lambda = 250 – 3000$ nm) wird zu 4 – 7% spiegelnd reflektiert (Reflexionsgesetz). Diese Reflexion wird von Falten der Hautoberfläche beeinflusst. Ein in die Haut eindringender Lichtstahl wird gebrochen und durch die raue Oberfläche diffuser gemacht, d.h. aufgeweitet. Die darunter liegenden Schichten absorbieren und streuen die eindringende Strahlung mehrfach. Je nach Größe und Form der Inhomogenitäten im Gewebe und den Brechzahlverhältnissen zueinander kommt es zu verschiedenen Arten von Streuung.[239]

In der Haut kommen sowohl Rayleigh– als auch Mie–Streuung vor. Wobei letztere vorherrschend ist, da mehr Streuung an Partikeln, die in der Größenordnung der Wellenlänge oder darüber liegen, stattfindet. Das ist speziell in der Dermis der Fall, wo die Streuung an kollagenen Fasern stattfindet.[240]

[237] Vgl. Henderson (2004), S. 67f.
[238] Quelle: adaptiert nach Sliney (1980).
[239] Vgl. Anderson (1981): S. 14.
[240] Vgl. ebenda.

Die Streuung in der Stratum Corneum ist wegen der Anordnung der Fasern[241] hauptsächlich nach vorn gerichtet. Die Reflexion ist, wie oben beschrieben, minimal.[242] Die Oberflächenstreuung an der Stratum Corneum wird von Falten und der Hautstruktur beeinflusst.[243]

Die Brechzahl für die anderen Schichten der Epidermis wird mit $n_e = 1{,}45$ angenommen.[244] Die Transmissionsspektren von der Epidermis hellhäutiger Menschen zeigen, dass ein Großteil der Strahlung im UV, sichtbaren und nahen IR–Bereich durch sie durchdringt. In der Epidermis absorbiert das Melanin Strahlung zwischen 250 – 1200 nm, wobei die Absorption gegen kürzere Wellenlängen zunimmt.[245] In der Epidermis hängt der Absorptionslevel durch Melanin von der Anzahl der Melanosomen pro Volumeneinheit ab, sie liegen zwischen 1,3 % für hellhäutige und 43 % für dunkelhäutige Menschen.[246] Zu wellenlängenabhängiger Vorwärtsstreuung kommt es in der Epidermis auf Grund der Partikel, die in etwa die Größe der Wellenlänge haben.[247]

Ein typischer Wert für die Brechzahl der Dermis ist $n_d = 1{,}4$[248], in ihr sind die Kollagenfasern für die optischen Eigenschaften zuständig. Daten von Hardy, Hammell und Murgatroyd zeigen, dass die Transmission in der Dermis für längere Wellenlängen (0,5 – 1,23 µm) größer und die Streuung mehr nach vorwärts gerichtet ist.[249] Die Streuung nimmt mit kürzeren Wellenlängen in der Dermis zu. Für blutlose Dermis ist der Absorptionskoeffizient, außer für die Absorptionsbanden für Wasser im IR, kleiner als der Streukoeffizient. Die Hauptabsorber sichtbarer Strahlung in der Dermis sind die Pigmente Hämoglobin, Oxy-Hämoglobin, Beta-Karotin und Bilirubin.[250] Die Kollagenfasern (zylindrisch mit ≈ 2,8 µm Durchmesser) sorgen für Mie–Streuung, andere Mikrostrukturen für Rayleigh–Streuung. [251] Licht, das in die Dermis eindringt, wird mehrfach gestreut, bevor es diese wieder verlässt oder absorbiert wird. Es wird rasch diffus.[252]

Die aus Fettzellen bestehende Subcutis absorbiert kaum Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich.[253] Ein Großteil der Strahlung, der sie erreicht, wird von den Fetteinlagerungen in die oberen Schichten zurückreflektiert.[254]

Yamada et al. haben in ihrer Untersuchung festgestellt, dass die Reflexion, die durch Lichtstreuung in der Haut hervorgerufen wird, mit einer Lambert'schen Oberfläche verglichen ungefähr 55 % beträgt. Sie verwendeten einen He–Ne Laser (632,8 nm) und einen Ar–ion Laser (457,9 nm und 514,5 nm). Ein Großteil der reflektierten Strahlung wurde durch interne Streuung verursacht. Berücksichtigt man auch die spiegelnde Reflexion an der Oberfläche werden

241 Vgl. Baranoski (2004), S. 38.
242 Vgl. Tregear (1966), zitiert bei: Grundmann (2005): S. 35.
243 Vgl. Baranoski (2004), S. 38.
244 Vgl. Bongartz (2002): S. 29.
245 Vgl. Anderson (1981), S. 17.
246 Vgl. Baranoski (2004): S. 37.
247 Vgl. ebenda, S. 38.
248 Vgl. Bongartz (2002): S. 29.
249 Vgl. Hardy (1956), zitiert bei: Anderson (1981): S. 17.
250 Vgl. Anderson (1981), S. 17f.
251 Vgl. Jacques (1996), zitiert bei: Baranoski (2004): S. 38.
252 Vgl. Anderson (1981), zitiert bei Baranoski (2004): S. 38.
253 Vgl. Flewelling (1981), zitiert bei: Baranoski (2004): S. 38.
254 Vgl. Doi (2003), zitiert bei: Baranoski (2004): S. 38.

von der Haut in diesem Wellenlängenbereich ungefähr 60 % relativ zu einer Lambert'schen Oberfläche zurückreflektiert.[255]

Wie viel Licht von der Haut zurückreflektiert wird, hängt von der Wellenlänge ab. Für kleinere Wellenlängen im sichtbaren Spektrum sinkt die Reflektivität auf bis zu 35 % bei 350 nm, bzw. auf 55 % bei 700 nm. In Abbildung 49 ist dargestellt, wie sich die Reflektivität mit der Lichtwellenlänge ändert. Die Formeln und Gewebeparameter zur Ermittlung der Werte wurden Bongartz (2002), S. 29 – 30 entnommen.

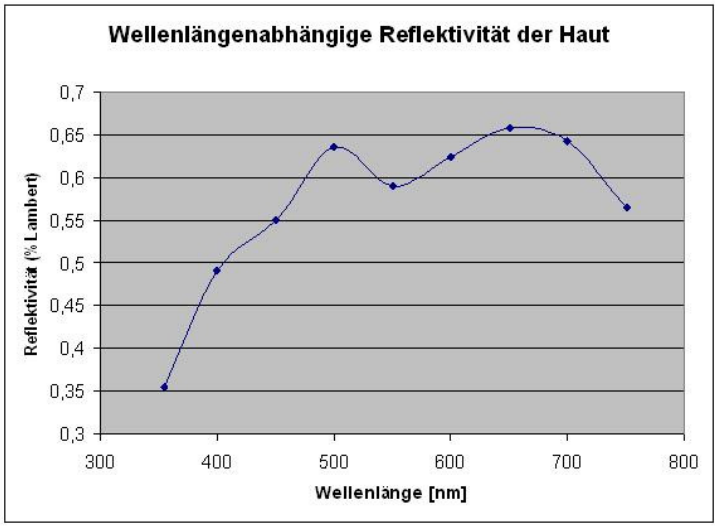


Abbildung 49: Wellenlängenabhängige Reflektivität der Haut[256]

3.3.4 Unerwünschte Eigenschaften der Haut

Der Zustand der Epidermis bestimmt wesentlich das Aussehen der Haut eines Menschen. Ihre Dicke bestimmt, ob die Blutgefäße durchschimmern können, was den Teint rosig oder blass erscheinen lässt.[257] Auch die Mikrostruktur der Hautoberfläche (Hauttextur) beeinflusst das Aussehen der Haut wesentlich. Sie hängt von verschiedenen Faktoren ab, z.B. Feuchtigkeitsgehalt der Haut, Alter, Talgproduktion, Sonnenexposition und Pflege.

Adjektive zur Beschreibung schöner Haut

Englisch	Deutsch	Gegenteil
clear, snow white	klar, durchscheinend	fleckig
fresh, moisturized	frisch, befeuchtet	trocken
fine texture	ebenmäßig	grob beschaffen
bronzed skin, tanned	gebräunt	fahl, blass

Tabelle 7: Adjektive zur Beschreibung von schöner Haut[258]

255 Vgl. Yamada (2005): S. 5.
256 Quelle: adaptiert nach Bongartz (2002), S. 29f.
257 Vgl. URL http://www.haut.de/basiswissen/haut/Aufbau-der-Haut_2.html [6.7.07].
258 Quelle: modifiziert nach Yamada (2004): S. 2.

Auf die verschiedenen Hauttypen und die Probleme, die sie mit sich bringen können, wurde in Abschnitt 3.3.2 bereits eingegangen. Im Folgenden werden unerwünschte Eigenschaften der Haut näher beschrieben.

Die Haut verändert sich sowohl durch Alterung als auch durch UV–Exposition. Zeitalterung lässt die Haut dünner, trockener und runzeliger werden, Elastizität geht verloren, die Talgproduktion nimmt ab. Die Haut kann Nährstoffe weniger gut aufnehmen. UV, Wärme, Kälte, Wind und Rauch schädigen die Haut und führen ebenfalls zu Trockenheit, Schlaffheit, rauer Hautoberfläche und gelblich, fahlem Teint, Falten und Pigmentflecken.[259]

3.3.4.1 Falten

Falten entstehen sowohl auf Grund von Zeitalterung als auch durch UV–Exposition. Die Faltenbildung beginnt in Form von Lachfalten, die dort entstehen, wo die Gesichtshaut immer wieder zusammengezogen wird bereits im Alter von 35 Jahren. Zur Pflege der Haut verwenden Frauen in diesem Alter meist eine getönte Tagescreme. Ab 45 Jahren sind bleibende Falten sichtbar, diese werden oft mit einem Fond de Teint abgedeckt.[260]

Die Vermessung von Falten kann mittels optischer Profilometrie und Bildanalysationssoftware stattfinden. Allgemein kann man das Alter einer Person anhand von Falten in der Haut und im Gesicht relativ gut einschätzen.[261]

Durch Vermeiden der Sonnenstrahlung während der Mittagsstunden und Auftragen eines Produktes mit Sonnenschutzfaktor lässt sich die Faltenbildung auf Grund von UV–Einwirkung reduzieren. Auch verschiedenen Vitaminen, die Kosmetikprodukten beigefügt werden, wird ein positiver Effekt bei der Vermeidung von Photoaging zugeschrieben.

Kosmetikprodukte verfolgen verschiedene Strategien, um das Erscheinungsbild von Falten zu verändern. Dazu gehören Peelings, die vertrocknete Hornschuppen von der Stratum Corneum entfernen, feuchtigkeitsspendende Produkte, Faltenauffüllprodukte, die die Furchen der Falten auffüllen und so „unsichtbar“ machen, Fond de Teints, die durch ihre Farbe oder Reflexionseigenschaften die Falten optisch minimieren und Sonnenschutz, der Photoaging hint an hält.

3.3.4.2 Hautunregelmäßigkeiten

Die Eipdermis, die durch die Zeitalterung dünner wird, lässt Blutgefäße stärker durch die Haut durchscheinen. Dadurch kann es zu roten Flecken im Gesicht kommen, auch Couperose genannt.

Gesicht–Couperose: hierbei handelt es sich um feine Hautäderchen oder geplatzte Äderchen im Gesicht. Sie sind stark durchblutet und aufgeweitet, ein entstehender Blutstau führt zu Rötungen der Haut im Wangen und Nasenbereich. Es wird empfohlen einen grünen Concealer unter dem Make Up aufzutragen.

[259] Vgl. Gerny (1996), S. 134f.
[260] Vgl. ebenda, S. 136.
[261] Vgl. Cunningham (2001), S. 545.

Narben: frische Narben sind leicht gerötet und über die umgebende Haut erhoben, mit der Zeit sinkt das Gewebe ein und das Narbengewebe verblasst. Es kann zu einer Verhärtung kommen. Narbengewebe ist weniger gut durchblutet.[262] Kaschieren lassen sich Narben mit stark pigmentierten Abdeckcremes. Sind sie eingesunken verwendet man Make Up mit reflektierenden Pigmenten.

Altersflecken: diese fleckigen Veränderungen der Haut, die dunkler sind, als das umliegende Gewebe, treten ab dem vierten Lebensjahrzehnt auf. Ursache ist UV–Licht und eine vermehrte Anhäufung von Melanozyten in gewissen Gebieten. Es entsteht ein nicht abbaubares Pigment. Zur kosmetischen Behebung lassen sich Concealer und Make Up einsetzen.

Pigmentstörungen: hierbei kann es sich um helle Flecken auf Grund von Pigmentmangel oder dunkle Flecken wegen eines Pigmentüberschusses handeln. Die Melaninproduktion an diesen Hautstellen ist gestört. In diese Kategorie fallen Altersflecken, Sommersprossen und helle Haustellen. Vitiligo oder Weißfleckenkrankheit ist die schwerste Pigmentstörung, die durch einen Mangel von Melanin in den betroffenen Hautpartien.[263] Pigmentstörungen und milde Formen von Vitiligo können mit Make Up abgedeckt werden.

Große Poren: entstehen in Verbindung mit öliger Haut in der T–Region des Gesichts. Es gibt spezielle Pore Minimizer um sie zu kaschieren. Gut gewähltes Make Up verdeckt sie ebenfalls.

Komedo (Mitesser): entstehen durch eine gesteigerte Bildung von Hornzellen, die zur Verstopfung der Talgdrüsenkanäle führt. Es entstehen weiße und schwarze Pünktchen (Komedonen).[264] Mitesser können mit Make Up kaschiert werden.

Entzündungen: entstehen dadurch, dass Bakterien in die Haut eindringen und sie reizen. Dies führt zu Rötungen, Schwellungen und Pickeln. Dieses Problem ist besonders in der Pubertät, wo es zu vermehrter Talgproduktion der Haut und zu Komedonen kommt, zu beobachten. Wichtig ist Produkte mit antibakteriellen Wirkstoffen zu verwenden, und die Entzündung abheilen zu lassen. Spezielle Produkte, die nicht komedogen sind, unterbinden die Bildung von Mitessern und Pickeln.

Pickel: sind mit Eiter gefüllte Bläschen an verschiedenen Stellen der Körperhaut.[265] Bei Teenagern treten sie verstärkt im Gesicht auf. In verschiedenen Ratgebern im Internet wird Frauen und Männern empfohlen Pickel mit Abdeckstiften zu kaschieren. Trägt Mann/Frau zuerst einen grünen Concealer auf, wird die Farbe rot „neutralisiert“. Darüber aufgetragene beige Töne sollten eine Schattierung heller als der Hautgrundton sein. Frau trägt darüber das Make Up auf und fixiert mit Puder.

[262] Vgl. URL http://www.miomedi.de/sport-fitness/sportverletzungen/narben/narben-symptome.html [6.1.2011]
[263] Vgl. URL http://www.chirurgie-portal.de/haut-dermatologie/vitiligo.html [6.1.2011].
[264] Vgl. URL http://www.chirurgie-portal.de/haut-dermatologie/akne-vulgaris.html [6.1.2011].
[265] Vgl. Gerny (1996), S. 18.

3.3.5 Veränderung der optischen Eigenschaften der Haut bei Make Up Auftrag

Kosmetikfirmen setzen verschiedene Partikel und Inhaltsstoffe in Kosmetika ein, um der Haut zu bestimmten Eigenschaften zu verhelfen (siehe 4.2). Nachdem ein Großteil der von der Haut reflektierten Strahlung durch Mehrfachstreuung in dieser zu Stande kommt, ist ein wesentlicher Faktor für deren Aussehen, wie viel Strahlung sie erreicht und in sie eindringen kann. Yamada et al. haben den Einfluss von Kosmetika auf den Strahlungstransfer der Haut untersucht. Eines der Ergebnisse ihrer Untersuchung zeigte, dass wegen Mehrfachstreuung in der Haut weder der Asymmetriefaktor (siehe 3.1.3.8) noch der Winkel des einfallenden Strahls die BRDF der Hautoberfläche beeinflussen.[266] Die Hauttextur mit ihrer die Strahlung aufweitenden Funktion hat keinen Einfluss auf die Reflexion, die durch die interne Streuung verursacht wird. Die spiegelnde Reflexion der Haut wird durch deren Textur diffuser. Die Autoren erwarteten den gleichen Effekt für Kosmetikprodukte.[267] Ihre Untersuchung zeigte, dass eine pudrige Foundation[268] die spiegelnde Reflexion abschwächt und die diffuse Reflexion erhöht.[269]

Die Brechzahl der Haut wird durch Befeuchtung erniedrigt, damit sinkt auch die Eindringtiefe von Strahlung in die Haut.[270]

3.3.6 Anforderungen der Benutzerin an Make Up

Das Aussehen der Haut ruft nicht nur eine gewisse Sinnesempfindung bei einem Betrachter aus, sondern hat auch Auswirkungen auf die Psyche. Eine Konsumentin will mit dem Benutzen eines Make Ups nicht in erster Linie Falten oder Problemstellen abdecken, sondern den Eindruck einer jugendlichen Erscheinung hervorrufen. Während der Anwendung eines Produkts nimmt sie sich Zeit für sich selbst, womit Lebensqualität assoziiert wird.

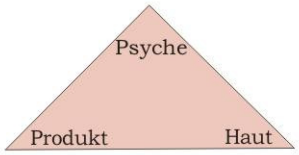


Abbildung 50: Haut - Produkt - Psyche Dreieck[271]

Abbildung 50 soll verdeutlichen, dass die Verwendung von verschönernden und pflegenden Produkten vielfältige Aufgaben erfüllt, die sich auf das gesamte Wohlbefinden der Konsumentin auswirken.

Die Anforderungen einer Benutzerin über die Eigenschaften an die verschiedenen Produkte zur Verschönerung der Haut und Gestaltung des Gesichts richten sich danach, für welchen Zweck diese eingesetzt werden.

---

266 Vgl. Yamada (2005), S. 5.
267 Vgl. ebenda, S. 8.
268 Das Fett in einer pudrigen Foundation trocknet nach dem Auftragen ab.
269 Vgl. Yamada (2005), S. 9.
270 Vgl. Martin (2004), S. 7.
271 Quelle: adaptiert nach Serup (2001), S. 482

Je nachdem, ob die die Benutzerin will, dass ihre Haut feucht und strahlend wirkt oder eher matt erscheint, wird ein anderes Produkt zum Einsatz kommen müssen. Die Anforderungen an Make Up (im Sinne von Foundation) unterscheiden sind je nach Hauttyp und Einsatzzweck. Fotoshootings von Models, Theaterschauspieler und Filmschauspieler die unter Scheinwerferlicht arbeiten, und Besuche in Discos stellen besondere Anforderungen an Make Up. In diesen Fällen muss es besonders schweißresistent sein und im ersten Fall auch besonders deckend, um Unregelmäßigkeiten der Haut ausgleichen.

Make Up sollte:

- Feuchtigkeit spenden für trockene Haut.
- Glänzen unterbinden bei öliger Haut.
- Verträglich sein und nicht zu Irritationen führen.
- Mit der Haut verschmelzen und nicht wie eine eigene Schicht auf der Haut liegen, sondern sich gut mit ihr verbinden.
- Lange haltbar sein und ohne Puder das Aussehen lange behalten, sowohl im Sommer bei Hitze, als auch im Winter bei Kälte.
- Keine Ränder auf der Kleidung hinterlassen.
- Sich gleichmäßig verteilen lassen und leicht entfernbar sein.
- Einen ansprechenden Geruch haben.
- Auf keinen Fall zu einem maskenhaften Aussehen führen.
- In normalem Gesprächsabstand die Haut so erscheinen lassen, als wäre sie unbedeckt.
- Das natürliche Aussehen der Benutzerin unterstreichen.

Wichtig für natürliches Aussehen ist, dass der Farbton dem Hautton entspricht und ausgleichend wirkt, das heißt kleine Rötungen oder andere Verfärbungen sollten verschwinden. Auf keinen Fall sollte das Make Up dunkler sein, als der Hautton. Das würde dazu führen, dass die Haut im Gesicht alt und fahl wirkt.

An Make Up, das im Alltag getragen wird, werden andere Ansprüche gestellt, als an festliches Abend Make Up, das bei ganz anderen Lichtverhältnissen zum Einsatz kommt, letzteres kann etwas stärker sein. In einer schummrigen Disko oder auf der Bühne wird noch mehr Make Up aufgetragen. Wobei das nicht nur die Foundation allein betrifft, sondern die gesamte Gestaltung des Gesichtes durch die verschiedenen Produkte, die der Verschönerung dienen.

Beauty Experten geben Tipps, wie man die Produkte zur Verschönerung so einsetzen kann, dass der gewünschte Effekt möglichst gut erreicht wird. Zu dem Thema sind viele Bücher auf dem Markt erhältlich.

4 Make Up

4.1 Einleitung

Der Begriff Kosmetikprodukt allgemein umfasst die Produkte, die verschönern und verändern und auch jene, die zur Reinigung verwendet werden. In dieser Arbeit ist es die erste Kategorie, die untersucht wird und diese hat für Konsumenten den Zweck, den Eindruck, den seine Haut bei einem Betrachter hervorruft, positiv zu verändern. Der Begriff Make Up steht einerseits als Wort für die Gesamtheit der Verschönerungs- und Veränderungsaktionen, die an einem Gesicht durchgeführt wurden, andererseits für das Produkt Foundation (Grundierung), das allgemein auf die Gesichtshaut aufgetragen wird.

Letzteres soll Hautunregelmäßigkeiten und Pigmentveränderungen abdecken und jugendliches Aussehen gewähren. Neben den Bestandteilen, die die optischen Eigenschaften der Haut verbessern, enthalten diese Produkte oft auch pflegende Bestandteile, die das Hautbild allgemein verbessern.

4.1.1 Begriffsbestimmung und Definition

International gibt es für Make Up keine einheitliche Definition – so wie die erlaubten Inhaltsstoffe in den verschiedenen Handelszonen voneinander abweichen, so weichen auch die Definitionen voneinander ab.

Im Folgenden die Definition des Begriffes „cosmetic“ wie er im U.S. Food, Drug, and Cosmetic Act von 1938 angeführt ist:

> …1) *articles intended to be rubbed, poured, sprinkled, or sprayed on, introduced into, or otherwise applied to the human body or any part thereof for cleansing, beautifying, promoting attractiveness, or altering the appearance, and 2) articles intended for use as a component of any such articles; except that such term shall not include soap …*[272]

In dieser Definition wird jedoch kein Bezug darauf genommen, ob dieses „cosmetic“ die Struktur oder Funktion des Körpers beeinflusst. Eine beeinflussende Wirkweise wird durch den Begriff „drug“ in den Vorschriften definiert.

Die U.S. Food and Drug Administration teilt Kosmetikprodukte in 13 Kategorien ein. Diese stimmen mit dem überein, was der Normalverbraucher unter Kosmetika und Reinigungsprodukten zusammenfasst. Sie dienen dazu die verschiedenen Körperregionen zu reinigen, Körperteile in „dekorativen“ Farben zu schmücken und dem Schutz der Haut vor Feuchtigkeitsverlust durch Umweltbedingungen.[273]

Im Gesetz werden darunter sämtliche Bestandteile von Kosmetikprodukten verstanden, die der Reinigung (von Duschgel bis Augen–Make Up Entferner), der Geruchsunterdrückung (Deodorants), der Veränderung des Haarschmucks (Dauerwellenprodukte, Haartön- und

[272] Milstein (2001), S. 6.
[273] Vgl. Milstein (2001), S. 7.

Haarfärbemittel), des Feuchtigkeitsverlustes (Hautpflege) und der Verschönerung und Dekoration dienen.

4.1.2 Make Up Produkte zur Verschönerung

Tabelle 8 enthält eine Liste verschiedenster Make Up Produkte zur Verschönerung:[274]

Augen Make Up	**Make Up**
Augenbrauenstift	Abdeckstifte oder Cremen (Concealer)
Eyeliner	Make Up Grundierung (Foundation)
Lidschatten	Make Up Fixierung (Gesichtspuder)
Mascara	Blusher oder Rouge
Lippen Make Up	
Lipliner	**Faltenprodukte**
Lippenstift	Faltenminimizer
Lipgloss	Faltenauffüllprodukte

Tabelle 8: Verschönerndes und dekorierendes Make UP

Spalte eins von Tabelle 8 enthält die Produkte, die die Veränderung der Augen- und Lippenform und ihres Ausdrucks ermöglichen.

Augenbrauenstifte werden verwendet, um Lücken in den Härchen der Augenbrauen auszufüllen, sie werden entweder in der Nuance der Brauenfarbe oder etwas heller als die Haarfarbe gewählt.

Eyeliner werden über den Wimpern am Lidrand aufgetragen. Sie sind in den verschiedensten Farben erhältlich und werden je nach Mode stärker oder dünner gezeichnet. Sie werden in Stiftform oder in flüssiger Form mit Pinsel angeboten. Mit ihrer Hilfe kann die Augenform verändert werden. Je nach Auftrag des Produktes entsteht die Illusion, dass die Wimpern dichter sind und die Augen größer oder kleiner.

Wie Eyeliner sind **Lidschatten** stark der Mode unterworfen. Jede Jahreszeit bringt einen anderen Look und eine andere Farbe in verschiedensten Nuancen. Lidschatten sind in Puder oder Cremeform in allen Farben erhältlich. Sie können matt sein oder reflektierende Partikeln enthalten. Mit Hilfe von Lidschatten kann die Augenform verändert werden. Je nach Auftrag, kann über Illusion der Eindruck tiefliegender oder hervorstehender Augen gemindert werden. Dunkle Farbabschattungen lassen einen subtilen Eindruck entstehen.

Mascara wird mit einer Bürste in Cremeform auf die Wimpern aufgetragen, um sie zu verlängern oder dichter erscheinen zu lassen. Auftragen von Mascara lässt den Kontrast von Iris und weißem Augapfel stärker erscheinen. Nachdem der Blick des Gegenübers fast immer auf die Augen gerichtet ist, wird Mascara von Starvisagisten als das Minimum an Aktion zur Verschönerung des Gesichts betrachtet, wenn man für mehr keine Zeit hat.[275] Lidschatten kommt besser zur Geltung, wenn Mascara aufgetragen wurde.

[274] Vgl. Milstein (2001), S. 9.
[275] Vgl. URL http://www.topmodels.de/info/schminktipps.html [6.5.2010].

Mit Hilfe von **Liplinern** wird die Form der Lippen nachgezogen. Je nachdem, wo er angesetzt wird, können die Lippen anschließend schmäler oder breiter mit Lippenstift ausgemalt werden. Es ist sogar möglich, durch entsprechendes Gestalten der Mundwinkel die Lippen leicht lächelnd erscheinen zu lassen. Lipgloss sorgt für glänzende Lippen, die dadurch voller wirken. Die Produkte sind in den verschiedensten Rot-, Rosa, Violett, und Brauntönen erhältlich.

Lippenstifte geben dem Gesicht Farbe, sie formen die Lippen und pflegen sie. Je nach Farbe und Glanz lassen sie die Lippen dünner oder voller erscheinen.

Spalte zwei von Tabelle 8 zählt Produkte auf, die das Hautbild ebenmäßiger erscheinen lassen, die Gesichtsform optisch modellieren und je nach angewandter Technik auch einen jüngeren Gesamteindruck vermitteln.

Das Wort **Concealer** kommt aus dem Englischen und bedeutet kaschieren, verbergen, verdecken. Genau das ist die Aufgabe dieses Produktes. Es soll Unregelmäßigkeiten im Hautbild abdecken. Abdeckprodukte werden in Stiftform oder als Cremen angeboten. Sie sind in grün und beige Tönen erhältlich. Die Concealer in grün kommen zur Anwendung, um rote Stellen im Gesicht zu „neutralisieren“.

Faltenabdeck- oder **Faltenauffüllprodukte** sollen Falten auffüllen und mittels lichtstreuender Pigmente zum Verschwinden bringen. Sie enthalten feuchtigkeitsspendende Substanzen.

Foundation (Make Up Grundierung, Fond de Teint) sorgt für ein gleichmäßiges Erscheinungsbild der Haut im ganzen Gesicht. Es kommt in verschiedenen Produktformen zum Einsatz. Es kann transparent oder deckend sein, und als Puder, Creme oder in flüssiger Form aufgetragen werden. Es gibt Make Up, dessen ölige Bestandteile nach dem Auftragen trocknen, es erscheint dann matter. Um Fältchen abzudecken werden von Visagisten die flüssigen bzw. cremigen Varianten empfohlen. Um stärkere Hautauffälligkeiten zu kaschieren werden Make Ups auf Wachsölbasis empfohlen.[276] Make Up wird mit dem Finger gleichmäßig in die Haut eingeklopft oder mit einem Schwämmchen aufgedrückt. Je dünner die Schicht auf der Haut ist, desto natürlicher wirkt sie. Je nach Zusammensetzung lässt eine Foundation die Gesichtshaut matt, scheinend oder frisch erscheinen.

Die **Make Up Fixierung** (Puder) dient dazu, das Make Up haltbar zu machen. Üblicherweise wird dazu loser Puder verwendet, der in verschiedenen Schattierungen die Gesichtsform auch modelliert. Er wird mit Hilfe von Pinsel oder Quaste aufgetragen. Gesichtspuder in kompakter Form dient dazu glänzende Stellen, die sich während des Tages im Gesicht bilden, zu mattieren.

Blusher oder **Rouge** helfen, Teile des Gesichts frischer aussehen zu lassen und außerdem setzen sie Akzente, die die Form der Wangenknochen anders erscheinen lassen. Sie sind in Puder und Cremeform erhältlich und werden mit einem Pinsel oder den Fingern aufgetragen. Rouges gibt es in den verschiedensten Farbschattierungen. Der Farbton sollte zum übrigen Make Up passen.

[276] Vgl. URL http://www.50plus.at/beauty/foundation.htm [6.1.2011].

4.1.3 Geschichte



Abbildung 51: Nofretete - Altes Museum Berlin[277]

Lippen, so rot wie Blut
Haut, so weiß wie Schnee
Haare, so schwarz wie Ebenholz[278]

Durch die Menschheitsgeschichte zieht sich bis ins 20. Jhdt. ein Schönheitsideal, das von zartem, ebenmäßigen Teint, roten Lippen und kräftigem Haar gekennzeichnet ist.

Sally Pointer hat in ihrem Buch „The Artifice of Beauty“ den Einsatz von Haut dekorierenden Produkten durch die gesamte Geschichte der Menschheit zusammengestellt. Ein Großteil der im Folgenden präsentierten Informationen stammt aus diesem Werk.[279]

4.1.3.1 Früheste Hinweise

In den Malereien, die zu prähistorischen Zeiten entstanden sind, findet man bereits Darstellungen von Menschen, deren Haut mit Ornamenten versehen war. Die Bilder wurden mit Hilfe von mineralischen Pigmenten auf Höhlenwände aufgetragen. Archäologen nehmen an, dass die Verzierung aus rituellen Gründen vorgenommen wurde. Die Verwendung von Ocker lässt sich auf bis zu 140.000 Jahre zurückverfolgen. Es wurde mit Fett vermischt auf die Haut aufgetragen.[280]

Für Archäologen ist es vorstellbar, dass diese Ornamente ursprünglich in Riten dazu dienen sollten, z.B. die Tiere, die gejagt wurden, darzustellen und sich unsere Vorfahren dann an die Bemalung gewöhnten und sie auch zu verschönernden Zwecken einsetzten.

Es wurden auch schwarze Bemalungen aufgebracht, die z.B. mit Mangandioxid hergestellt werden konnten. Derartige Bemalungen wurden in den Höhlen in Lascaux in Frankreich gefunden. Die Malereien entstanden vor ungefähr 15.000 Jahren. Ocker und Sienaerde ergaben

277 Aufgenommen im Alten Museum Berlin im Sommer 2009
278 Aus Kinder- und Hausmärchen der Gebrüder Grimm
279 Pointer (2005).
280 Vgl. ebenda, S.4.

gelbe und rote Töne. [281] Auch Eisenoxide wurden schon vor 35.000 Jahren für Darstellungen verwendet. Sie lieferten haltbare gelbrote bis braunrote Töne.[282]



Abbildung 52: Bhimbetka Rock Painting[283]

4.1.3.2 Altertum

Die frühen Zivilisationen in Ägypten und in Mesopotamien haben den Grundstein für die Pflege der Haut und ihrer Verschönerung gelegt. Die Aufzeichnungen, die aus dieser Zeit gefunden wurden, liefern Informationen über die Herstellung von verschiedenen Kosmetikprodukten.

Die Assyrer verwendeten bereits aufwendige Kosmetikpräparate. In Gräbern aus der Zeit der Sumerer (2500 vor Christus) wurden Überbleibsel von Augenschminke und Lippenfarbe gefunden. Wobei es sich meist um farbige Pigmente handelt, die in Muscheln aufbewahrt waren. Wie erwartet fanden die Archäologen Kupferverbindungen für grüne oder blaue, Eisenoxid für rote und Mangandioxid für schwarze Töne. Viele der mineralischen Farben wurden durch Beigabe von weißen Pigmenten verändert und aufgehellt. Dazu wurde Kreide, Bleikarbonat und auch Calziumphosphat, das aus verbrannten Tierknochen hergestellt wurde, verwendet. Calziumphosphat war noch bis ins achtzehnte Jahrhundert ein Hauptbestandteil von Haarpuder und wurde auch in Höhlenmalereien in Amerika gefunden. Grüne Pigmente waren entweder aus Malachit oder Atacamit. Der letztere entsteht wenn sich Kupfer mit Patina überzieht. Grüne Augenfarbe wurde in Ägypten sowohl aus medizinischen, als auch aus dekorativen Gründen geschätzt. [284] Die Abbildungen unten zeigen verschiedene dieser Mineralien und Pigmente.

[281] Vgl. Pointer (2005), S.5f.
[282] Vgl. URL: http://www.seilnacht.com/Lexikon/FLexikon.htm [18.7.07], Seilnacht, T.: „Lexikon der Farbstoffe und Pigmente“.
[283] Quelle: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bhimbetka_rock_paintng1.jpg [18.12.10], User Conscious, GNU Free Documentation License.
[284] Vgl. Pointer (2005), S. 15f.

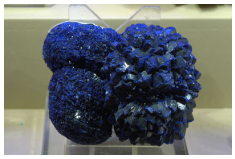
		
Abbildung 53: Lapis Lazuli	**Abbildung 54: Azurit**	**Abbildung 55: Malachit**
		
Abbildung 56: Talk	**Abbildung 57: Azurit Pigment**	**Abbildung 58: Brauner Ocker**

Tabelle 9: In Ägypten verwendete Pigmente[285]

Viele der Informationen über den Einsatz von Kosmetika der Ägypter stammen aus Grabmalereien. Außerdem sind Texte über die Herstellung erhalten geblieben. Zum Beispiel der Ebers Papyrus, der aus der Zeit von 1550 vor Christus stammt. Georg Ebers hat ihn 1873 in Luxor erworben. Der Ebers Papyrus ist eine der wichtigsten altertümlichen Arbeiten über medizinische Anwendungen. Er enthält auch einige kosmetische Rezepte.[286]

Die Ägypter verwendeten Malachit und Bleiglanz (Galenit) in Kajal um die Augen zu umrahmen. Die Mineralien wurden zerkleinert und die so entstehenden Pigmente mit Wasser oder Rizinusöl vermischt und mit den Fingern oder einem Applikator auf die Augen aufgetragen.[287] Das Mineral Bleiglanz nimmt eine rötliche Färbung an, wenn es nach dem Zerkleinern noch geröstet wird und konnte so als Rouge zum Färben von Lippen und Wangen eingesetzt werden. Malachit und Bleiglanz sind beides Mineralien, die negative Folgen für die Gesundheit haben, das erstere wirkt als Brechmittel, wenn es in Wasser gelöst ist und setzt in Pulverform Kupfer frei, das zu Reizungen führen kann, letzteres ist bei Kontakt mit der Haut giftig.



Abbildung 59: Pigment für ägyptische Kajal - Galenit[288]

Roter Ocker wurde als Rouge und Lippen Make Up verwendet. Rouge zählt zu den Make Up Arten, die schon immer am häufigsten verwendet wurden. Dies könnte daran liegen, dass es die Spektralfarbe mit der längsten Wellenlänge ist, die das menschliche Auge wahrnehmen kann. Oder auch daran, dass Blut für uns Rot erscheint und damit eine Schock- bzw. eine Signalfarbe darstellt und daher Aufmerksamkeit auf sich zieht. Außerdem stellen gut durchblute-

[285] Quellen: siehe Seite 259.
[286] Vgl. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Ebers_papyrus [15.5.07].
[287] Vgl. Pointer (2005), S. 17f.
[288] Quelle: URL http://de.wikipedia.org/wiki/Galenit [3.1.2011], Urheber Rob Lavinsky, iRocks.com, Creative Commons-Lizenz – Namensnennung.

te Wangen, die rosig schimmern, ein Zeichen von Gesundheit dar. Für die Präparate wurde roter Ocker fein gemahlen und als Puder aufgetragen oder mit Harz oder Fett vermischt, um so eine haftende Paste zu erhalten.[289]

Das Bild von der Büste Königin Nofretetes, die im Alten Museum in Berlin ausgestellt ist, lässt vermuten, welch großen Wert die Frauen der damaligen Zeit auf ihr Aussehen legten und welche Produkte sie dafür einsetzten.

Dazu gehört auch, das Altern der Haut hintan zu halten. Bereits vor 3000 Jahren wurden Rezepturen gegen das Altern der Haut hergestellt. Spezielle Mischungen halfen der Haut ihre Feuchtigkeit zu erhalten. Unter anderem wurde dazu Weihrauch mit Ölen, Wachsen und Pflanzensäften zu einer reichhaltigen Creme verarbeitet.

Die Perser unter König Darius I waren für ihren Hang zum Luxus bekannt. Sie entwickelten einen regen Handel mit den Ägyptern. Auf den Friesen im Palast von Darius in Susa sind die Krieger mit stark betonten Augen dargestellt. Das könnte auf die Verwendung von Kajal hinweisen. Auch heute verwenden einige Männer im Mittleren Osten noch Kajal. Durch die Eroberung des Perserreiches durch Alexander den Großen wurden deren Gewohnheiten kosmetische Produkten zu verwenden nach Griechenland und weiter nach Rom verbreitet. [290]

Auf Malereien und Statuetten aus der Ägäis findet man Gesichter, die stark bemalt sind, z.B. sind die Augen klar umrissen, die Lippen und Wangen deutlich rot bemalt. Hiezu könnte Purpur, das man aus Schnecken gewinnt, verwendet worden sein. Mit Kreide aufgehellt und dann mit Öl versetzt könnte es als Paste aufgetragen worden sein.[291]

4.1.3.3 Römer und Griechen

Nachdem aus der Zeit des 8. – 4. Jhdt. vor Christus viele Kosmetikutensilien gefunden wurden, kann man annehmen, dass der Einsatz von Kosmetika bei Römern und Griechen weit verbreitet war. Die Griechen bewahrten die Präparate, wie Rouge und weißes Blei, in Behältern auf, die man Pyxide nennt. Rouge und Lippenfarbe dürften die Griechen hauptsächlich aus der Wurzel einer Pflanze oder aus Zinnoberrot hergestellt haben. Seltener fand man Spuren vom Purpur der Purpurschnecke. Für Puder wurden Kreide, weißes Blei und Orris Wurzeln verwendet.[292] Die Verwendung von weißem Blei hatte den Vorteil, dass es nicht einer ölhältigen Creme beigemengt werden musste, um auf der Haut gut zu haften.[293]

Aus verschiedenen Quellen kann man Rückschlüsse auf den Einsatz von kosmetischen Produkten ziehen. Eine davon sind Malereien auf griechischen Töpferwaren - diese zeigen Themen aus dem Alltagsleben, unter anderem die Darstellung von Hochzeiten und von „Verschönerung“ – speziell auf Gefäßen, die zur Lagerung der Kosmetikartikel dienten. Die Bilder auf den Vasen erlaubten es den Frauen einem idealisierten Ideal nachzustreben. Eine Schriftstelle bei Xenophon beschreibt wie ein junger Mann seine Braut dazu auffordert, es zu unter-

289 Vgl. Pointer (2005), S. 19f.
290 Vgl. ebenda, S. 29ff.
291 Vgl. ebenda, S. 28f.
292 Vgl. ebenda, S. 33f.
293 Vgl. ebenda, S. 38.

lassen Kosmetika, wie Alkanet oder weißes Blei zu verwenden, um sich attraktiver zu machen.[294]

Von den Abbildungen auf Mumiensärgen aus römischer Zeit (5. Jhdt. vor Christus) kann man sich ein Bild der Römerinnen von damals machen. Die Lippen lassen auf Verwendung von Lippenfarbe schließen. Auf manchen Porträts kann man den Einsatz von Kajal vermuten. Dioscorides erwähnt den Einsatz von Lampenruß für Kajal und gibt einige Rezepte zur Erzeugung an. Ovid nennt Safran und Asche, die als Lidschatten verwendet wurden.[295]

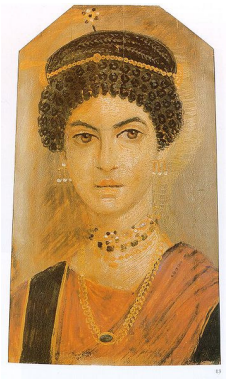


Abbildung 60: Fayum Mumien Porträt[296]

Den Römerinnen war auch bewusst, dass die Oberflächenstruktur der Haut deren Aussehen sehr beeinflusst – sie verwendeten Peelings, die aus zerdrückten Samen von Lupinen, Orris Wurzel und Honig hergestellt wurden und trugen reichhaltige Gesichtsmasken auf.[297]

Über einen Fund in einem römischen Tempel in London im Herbst 2004 wird in der Berliner Zeitung folgendes berichtet:

„Die Patrizierinnen des Alten Rom haben eine Tagescreme aus Tierfett, Stärke und Zinn benutzt, um ihrer Gesichtshaut einen reinen, weißen Teint zu geben. Diese Vermutung äußern der Chemiker Richard Evershed von der britischen University of Bristol und seine Kollegen in der Forschungszeitschrift Nature. Die Forscher haben den Inhalt eines Cremetöpfchens untersucht, das aus dem zweiten Jahrhundert stammt. Das bislang einzige vollständig erhaltene Fundstück dieser Art war von Archäologen entdeckt worden, als sie im Sommer dieses Jahres in London einen römischen Tempel freilegten.“ [298]

Die keltischen Stämme in Britannien waren bekannt dafür, dass sie ihre Körper mit blauer Farbe verzierten, die sie aus Waid (eine Pflanze, die ähnlich wie Indigo einen blauen Farbstoff enthält) gewannen.[299]

Die Briten haben schon vor der Eroberung durch die Römer in kleinen Steinmühlen roten Ocker, Kohle und Azurit zu feinem Pulver gemahlen. Die Mühlen stammen aus dem ersten

[294] Vgl. Pointer (2005), S. 35.
[295] Vgl. ebenda, S. 36ff.
[296] Quelle: http://en.wikipedia.org/wiki/Fayum_mummy_portraits [18.12.10], User Eloquence, Public Domain
[297] Vgl. ebenda, S. 48.
[298] o.V. (2004), zitiert in: Berliner Zeitung.
[299] Vgl. Pointer (2005), S. 38.

und zweiten Jahrhundert vor Christus und konnten auch dazu verwendet werden aus Farbpigmenten, mit Hilfe von Fetten oder Cremen, dicke färbige Pasten herzustellen.[300]

4.1.3.4 Frühes Mittelalter

Die Verbreitung des Christentums in Europa brachte eine Veränderung dahingehend, dass mehr Augenmerk auf den ewigen Leib, als auf die Verschönerung des Sterblichen gelegt wurde. Außerdem wurden den Toten keine Grabbeigaben mehr mitgegeben. Daher stehen aus der Zeit sehr wenige Informationen zur Verfügung. Der Zustand der Zähne mancher Skelette aus dieser Zeit lässt darauf schließen, dass Körperpflege und damit wohl auch Verschönerung weniger üblich war.[301]

Aus der Zeit sind einige wenige schriftliche Aufzeichnungen zum Thema Make Up vorhanden. Zum Beispiel schreibt der arabische Chronist und Reisende Ibn at-Tartuschi um 950 über die Volksstämme an der Südgrenze des wikingerzeitlichen Dänemarks, dass sie ein Kosmetika für die Augen verwenden, das ihre Schönheit erhöht.[302]

Frühe mittelalterliche irische Literatur erwähnt Farbe zum Färben der Augenbrauen und gnostische irische Mönche bemalten ihre Augenlider.

In Gedichten aus Wales' wird auf die Schönheit von Maiden Bezug genommen,
"*And whiter was her skin than the bloom of crystal, and her hair and her two eyebrows were blacker than jet, and on her cheeks were two red spots, redder than whatever is reddest."*[303]

4.1.3.5 Mittelalter

Durch die Kreuzzüge wurden die alten Handelsbeziehungen in den arabischen Raum wieder intensiviert. Ein Bericht aus dem 13. Jahrhundert beschreibt, dass die Einwohner von Mekka großen Wert auf Pflege und Verschönerung legten und dass sie viel Kajal verwendeten. Der zunehmende arabische Einfluss führte dazu, dass das Hervorheben von Schönheit wieder mehr Bedeutung gewann. In einem Text aus dem 13. Jahrhundert wird ein Rezept überliefert, das weißes Gesichts Make Up beschreibt.[304] Dazu wurde aus Weizen ein feines Stärkepulver gewonnen, das mit Rosenwasser vermischt auf dem Gesicht aufgetragen und mit einem Tuch abgetrocknet wurde. Die Haut erhielt dadurch ein blasses, mattes Aussehen.[305]

Am Hof von Edward IV (1442 – 1483) verwendeten die Frauen aufhellendes Make Up für das Gesicht, rote Lippensalbe und eventuell Kajal aus Lampenruß.[306]

4.1.3.6 Sechzehntes und siebzehntes Jahrhundert

Das sechzehnte und siebzehnte Jahrhundert war geprägt von der Entdeckung der Handelswege in die bisher nicht so einfach erreichbaren Regionen der Erde. Die meisten Frauen bei Hof

[300] Vgl. Pointer (2005), S. 41.
[301] Vgl. ebenda, S. 58f.
[302] Vgl. ebenda, S. 60.
[303] Pointer (2005), S. 67.
[304] Vgl. Pointer(2005), S. 72ff.
[305] Vgl. ebenda, S. 74.
[306] Vgl. ebenda, S. 75.

verwendeten Make Up. Um einen hellen, matten Teint zu erhalten wurde Bleicarbonat oder –oxid eingesetzt. Die Wangen wurden mit Ocker, Kochenille (ein Farbstoff, der aus Läusen gewonnen wird) oder Zinnoberrot gefärbt. [307] Es wurden Kosmetikstifte hergestellt, die aus gemahlenem Alabaster oder Gips, die mit Farbstoffen versehen waren, bestanden. Die Handelswege in den Osten ermöglichten es Farbpigmente wesentlich billiger zu importieren und so konnten es sich auch Dienstboten leisten, sie zu erwerben.[308]

4.1.3.7 Achtzehntes Jahrhundert

Zu dieser Zeit setzten am französischen Hof die Hofdamen Make Up verschwenderisch ein. Eine der hervorstechendsten Persönlichkeiten war Madame Pompadour.



Abbildung 61: Kosmetikanwendung - Madame Pompadour, Françoise Boucher, 1756[309]

Eines der Gemälde, auf dem sie abgebildet ist, zeigt sie mit heller Haut und sehr rosigen Wangen (siehe Abbildung unten). In den Händen hält sie eine Dose mit Rouge und einen Pinsel, mit dem sie es aufträgt. Gemalt wurde es von François Boucher im Jahre 1758. Es hängt im Fogg Art Museum.



Abbildung 62: Kosmetikanwendung - Marquise de Pompadour at the Toilet-Table[310]

307 Vgl. Pointer (2005), S. 92ff.
308 Vgl. ebenda, S. 104ff.
309 Quelle: http://en.wikipedia.org/wiki/Madame_de_Pompadour [18.12.2010], User Andrew0921, Public Domain.

In der Mitte des achtzehnten Jahrhunderts wurde der Einsatz von verschönernden Mitteln noch dadurch verstärkt, dass die ersten Modemagazine gedruckt wurden. Dadurch wurde es möglich, dass verschiedenste Modetrends von Frankreich aus auch in England und Amerika weite Verbreitung fanden. In Amerika wurden die Anwendungen jedoch nicht so dick aufgetragen, wie in Europa.[311]

Das Schönheitsideal war immer noch von heller Haut, dunklen klar definierten Brauen und roten Lippen geprägt. Allerdings wurden jetzt den Farbpigmenten auch Gelbtöne beigemischt. Andere Farbschattierungen konnten mit Karminrot, das bläuliche Rottöne, Menninge (rotes Blei) mehr ins Orange gehende Töne und Alkanet, das ein klares Rot lieferte, erreicht werden.[312]

Aus dieser Zeit stammen verschiedenste Bücher, die sich auch mit der Herstellung von verschönernden Kosmetika beschäftigen und Rezepte zu deren Herstellung beinhalten.
Zum Beispiel findet man im „Toilet of Flora“ erste Hinweise auf Wimperntusche. Sie wurde mittels verbrannten Pechs unter Beimischung anderer Zutaten hergestellt und diente dazu Wimpern und Augenbrauen zu färben.[313]

Lillie erwähnt in seinem Buch „The British Parfumer“, dass Puder mit Perlmutterglanz unerschwinglich teuer sei und dieses durch Wismut (giftig) ersetzt werden könne.[314]

Es wurden aber auch Produkte propagiert, die gesundheitsschädigende Bestandteile wie Blei vermieden. Zum Beispiel wurde zu der Zeit Talkumpuder vermehrt eingesetzt. Für die Herstellung von Rouge gab es verschiedenste Rezepte. Die Färberdistel, die Geishas heute noch zur Herstellung von Lippenstiften verwenden, ergab ein Rouge, das auf verschiedenste Weise auf Wangen und Lippen aufgetragen werden konnte. Daneben existierten aber auch eigene Rezepturen, die nur speziell zum Färben der Lippen gedacht waren.[315]

4.1.3.8 Neunzehntes Jahrhundert

Das achtzehnte Jahrhundert endete in Frankreich mit der französischen Revolution und mit ihr stieg das Verlangen danach, natürlich auszusehen. Der natürliche Look wurde im neunzehnten Jahrhundert durch die Thronbesteigung Königin Viktorias in England, die Sittsamkeit propagierte, noch forciert. Erst mit der Weltausstellung in London 1851 gewannen die Toiletteartikel wieder mehr an Ansehen. Rezepte dafür konnte man Ratgebern entnehmen. Lampenruß war ein einfach zu erhaltendes Mittel um Augenbrauen zu färben. Händler aus Paris lieferten Lidschatten mit exotischen Namen wie „Poudre Circassienne“ oder „Fard Indien“.[316]

Die oft hochgiftigen Farbpigmente führten zu Schädigung der Haut oder bei übermäßiger Verwendung auch zum Tod. Lola Montez, bekannt als die Geliebte Ludwigs von Bayern,

---

310 Quelle: URL http://www.francoisboucher.org/Marquise-de-Pompadour-at-the-Toilet-Table-1758.html [18.12.2010], Creative Commons Licence.
311 Vgl. Pointer (2005), S. 113ff.
312 Vgl. ebenda, S. 119.
313 Vgl. ebenda.
314 Vgl. ebenda, S. 135.
315 Vgl. ebenda, S. 136f.
316 Vgl. ebenda, S. 140.

empfahl in ihrem selbst herausgegebenen Handbuch, Rouge aus Pflanzenpigmenten ohne Beimengung von Blei zu verwenden.[317]

Im Ratgeber „Beauty and How to Keep it“ wurde darauf verwiesen, Karminrot in Puderform als Rouge über einer Fettcreme aufzutragen und dann mit einem Tuch abzuwischen. Das schützte die Haut vor dem Eindringen von beigemengtem Blei und außerdem vor zu viel Farbe.[318]

Es wurden auch Vorschläge gemacht, mit welchen Farbtönen man der Natur etwas nachhelfen könnte - „Godey’s Lady’s Book“ gab Tipps, wie man den natürlichen Hautton korrigieren oder verbessern könnte. Er empfahl allen Frauen mit heller Haut, denen Rosa fehlte, ein zartes Grün zu verwenden.[319]

Am Ende des neunzehnten Jahrhunderts kamen Lippenfarben auf, die an Leuchtkraft mit den heutigen Produkten vergleichbar sind. Damit war die Schlacht gegen das „Bemalen“ der Gesichter verloren.[320] Der erste Lippenstift wurde auf der Weltausstellung in Amsterdam vorgestellt. Der von Pariser Parfumeuren erzeugte Stift war in Papier eingewickelt und bestand aus Hirschtalg mit roter Pomade. Sein Preis auf heutige Währung umgerechnet lag bei 50 Euro. Ein Erfolg wurde er erst, als Sarah Bernhardt ihm in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts den Namen „Stylo d’Amour“ gab.[321]

4.1.3.9 Zwanzigstes Jahrhundert

Das Jahrhundert der Kosmetikindustrie begann. Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts kamen die ersten Augenbrauenstifte auf den Markt. Als Ersatz wurden in Notzeiten (Erster Weltkrieg) abgebrannte Zündhölzer eingesetzt. Außerdem wurden die ersten festen Puder vertrieben. Sie wurden zu dieser Zeit eher in gelblichen Tönen gehalten (Aprikose und Pfirsich). Ein Nebeneffekt der aufkommenden Autoindustrie und der für sie entwickelten Lacke war die Einführung der ersten Nagellacke. Lippenstifte konnten nun aus einer Hülse gedreht und somit in aller Öffentlichkeit einfach aufgetragen werden und Rouge in Cremeform wurde unter dem Puder aufgetragen.[322]

Zweitausend Jahre lang war das Schönheitsideal von hellhäutigen Frauen geprägt gewesen – in den 20 Jahren des vorigen Jahrhunderts setzte Coco Chanel den Trend zum gebräunten Look. Die weit verbreiteten Filmmagazine führten dazu, dass Trends weltweit Aufmerksamkeit fanden.[323].

Während der Kriegsjahre wurde in der Werbung betont, dass auch arbeitende Frauen sich die Zeit nehmen sollten, auf ihr Aussehen zu achten. Die Verwendung von Lippenstift war plötzlich ein Muss. Die Namen der Kosmetikprodukte wurden so gewählt, dass sie das Bedürfnis der Trägerinnen nach Romantik und Abwechslung ansprachen. Chemischen Technologien

317 Vgl. Pointer (2005), S. 114.
318 Vgl. ebenda, S. 146.
319 Vgl. ebenda., S. 148.
320 Vgl. ebenda.
321 Vgl. Quelle http://www.cosmopolitan.de/beauty/pflege-und-make-up/a-21047/125-jahre-lippenstift.html [13.1.2011]
322 Vgl. Pointer (2005), S. 155ff.
323 Vgl. ebenda, S. 159.

wurden nach dem Krieg für die Entwicklung noch feinerer Puder und kräftigerer Pigmente eingesetzt.[324]

Ab den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts änderten sich sowohl die Mode als auch die Make Up Trends rasch. Die Rolle der Frau wurde wieder hinter dem Herd gesehen und ein blasser Teint wurde wieder modern.[325]

Ein Jahrzehnt später schon wurden die Augen wieder stark betont und die Lippen mit pastellfarbigen oder silbrig schimmernden Lippenstiften verziert. Die Stifte enthielten Titaniumpigmente, die deckende, blasse Farben lieferten. In den Siebzigern schwang das Pendel zurück, der natürliche Look wurde wieder bevorzugt. Schönheit hervorzuheben und doch so auszusehen, als hätte man nicht nachgeholfen, erforderte einiges an Aufwand.[326]

Seit den Neunzigern wird das Aufhalten des Alterns hervorgehoben. Unter anderem sollen die Produkte Licht reflektieren, ohne dass viele Schichten auf die Haut aufgetragen werden mussten. Seit dem Ende des zwanzigsten Jahrhunderts, wo es ermöglicht wurde, Kosmetikprodukte im Supermarkt zu kaufen, werden die Produkte darauf ausgerichtet jugendliches Aussehen zu gewährleisten, die Bevölkerung in den industrialisierten Ländern, die immer älter wird, bildet ein Gewinn versprechendes Marktsegment.[327]

4.1.3.10 Zusammenfassung

Die Trends und Vorstellungen von Schönheit haben sich im Laufe der Menschheitsgeschichte immer wieder geändert. Ein ebenmäßiger Teint mit dunklen Brauen und roten Lippen wurde bereits in der Antike angestrebt und ist auch heute noch immer wieder in Modemagazinen zu finden. Das Verdecken von Unregelmäßigkeiten und akzentuieren von Augen, Wangen und Lippen wurde mit verschiedensten Mitteln erreicht. Farbe und Pigmente und die entsprechenden Zubereitungen spielten und spielen dabei eine große Rolle.

4.2 Aussagen der Kosmetikproduzenten

Kosmetikfirmen beschreiben ihre Produkte unter anderem mit Begriffen, die die physikalischen Eigenschaften ihrer Produkte betreffen. Die nachfolgende Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die angeführten Aussagen über Make Up (im Sinne von Foundation) wurden auf Produktverpackungen oder Webseiten von Kosmetikherstellern veröffentlicht.

- Leuchtkraft verstärkendes Make Up.
- Reproduziert das Licht schöner Haut.
- Spezielle lichtreflektierende Pigmente und transparente Farbpigmente sorgen für natürliches Aussehen.
- Fältchen und Falten werden optisch vermindert.
- Das Make Up passt sich Lichtveränderungen an und korrigiert Unebenmäßigkeiten optisch.

[324] Vgl. Pointer (2005), S. 160.
[325] Vgl. ebenda, S. 161.
[326] Vgl. ebenda, S. 162f.
[327] Vgl. ebenda, S. 164f.

- Kaschiert feine Linien durch reflektierende Pigmente.
- Make Up für optische Glättung der Haut.
- Optische „Glätter“ – radieren durch lichtreflektierende Wirkung Schatten aus.
- Gleicht Unebenheiten optisch aus.
- Lichtreflektierende Pigmente gleichen erste Fältchen optisch aus.
- Lichtreflektierende Pigmente gleichen den Hautton optisch aus.
- Farbkorrigierende Pigmente sorgen für ein natürliches Ergebnis.
- Die Poren werden optisch verfeinert.
- Auf Grund Lichtreflektierender Eigenschaften des Make Up erstrahlt die Haut ebenmäßiger.
- Fältchen werden durch den zusätzlichen „Filling“ Effekt des Bestandteils optisch gemildert.

Wie in Abschnitt 2 angeführt, werden einige dieser Aussagen in dieser Arbeit untersucht.

4.3 Aufbau und Herstellung

Kosmetische Produkte bestehen aus einem Vehikel, in das aktive Substanzen (Wirkstoffe) eingebettet sind. Eine scharfe Trennung zwischen diesen beiden Gruppen ist nicht möglich, da beide das Aussehen der Haut beeinflussen.

Die Inhaltsstoffe von Kosmetika werden mit ihrer Funktionsweise in der INCI–Datenbank (International Nomenclature of Cosmetic Ingredients[328]) beschrieben. Jeder einzelne Stoff ist dort unter einer eindeutigen Nummer angeführt (Bsp. C.I. 77499 für Pigment Black).

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über mögliche Inhaltsstoffe und ihre Funktion und Eigenschaften gegeben.

4.3.1 Vehikel

Vehikel kommen in flüssiger, halbfester und fester Form vor. Sie können sowohl isotrop als auch anisotrop (grobe Dispersionen) sein. Sie dienen dazu, den Wirkstoff auf die Hautstelle aufzutragen, die man verändern möchte. Sie reinigen, dekorieren, pflegen und schützen die Haut und führen ihr Feuchtigkeit zu.[329]

Teilt man Vehikel nach ihren physikalisch chemischen Eigenschaften ein, ergeben sich folgende Unterscheidungskriterien: [330]

- Aussehen
  Beinhält die makroskopische Beurteilung von Farbe, Klarheit oder Trübheit, Transparenz und eine mikroskopische Beurteilung
- Polarität
  Diese gibt an, ob die Moleküle des Vehikels elektrisch neutral sind oder ob sie ein elektrisches Dipolmoment besitzen, das als Maß für die Polarität gilt.

[328] Vgl. URL http://acronyms.thefreedictionary.com/INCI [12.1.2011].
[329] Vgl. Buchmann (2001), S. 146f.
[330] Vgl. ebenda, S. 149f.

- pH-Wert
  Der pH-Wert kann sauer oder alkalisch sein.
- Homogenität
  Die Homogenität gibt an, ob ein Gemisch in allen Teilen gleiche physikalische und chemische Eigenschaften hat oder ob seine Bestandteile in unterschiedlichen Zuständen vorliegen und es aus unterschiedlichen Substanzen besteht.
- Zustand
  Der Zustand des Vehikels kann fest, halbfest oder flüssig sein.
- Größe der Partikel
  Je nach der Größe der in der Mischung enthalten Partikel unterscheidet man:
  Molekulare Dispersionen – Teilchengröße < 1nm
  Colloidale Dispersionen – Teilchengröße 1 nm – 500 nm
  Grobe Dispersionen – Teilchengröße > 500 nm
- Löslichkeit
  Die Löslichkeit gibt an, wie gut sich ein Stoff in einem Lösungsmittel löst.
- Rheologie und Viskosität
  Das Fließverhalten des Vehikels und die Verformbarkeit der darin enthaltenen Partikel wird untersucht. Meist handelt es sich um nicht-newtonsche Flüssigkeiten, was bedeutet, dass sich die Viskosität ändert, wenn Scherkräfte einwirken.
- Beschaffenheit des Hauptbestandteils
  Diese kann ölig, wässrig oder hydrophil (wasserbindend) sein.

4.3.1.1 Arten von Vehikelsystemen[331]

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, Wirkstoffe in Vehikeln einzubetten. Hier soll nur auf Stifte, Gels und Emulsionen eingegangen werden, da diese Form für die untersuchten Produkte (Abdeckstifte, Foundation, Faltenauffüller) von Bedeutung sind.

4.3.1.1.1 Stifte

Die Wirkstoffe (Duftstoffe, Farbpigmente) werden durch Reiben auf der Haut aufgetragen. Beispiele sind Lippen-, Abdeck-, sowie Deodorantstifte. Als Vehikel (Trägerstoffe) kommen Mischungen aus Wachsen und Ölen, verfestigte Alhoholmischungen oder gelierte Silikone zum Einsatz.

4.3.1.1.2 Gels

Hierbei handelt es sich um feinstverteilte Systeme. Eine Flüssigkeit wird mit einem Geliermittel (Polymer) eingedickt. Ihre Erscheinung ist transparent, klar oder opaleszent. In Gels können feste oder ölige Lipide eingebettet werden.

4.3.1.1.3 Emulsionen (Lotionen und Cremes)

Ihre Hauptkomponenten sind Lipide und Wasser, die durch einen Emulgator (kann auf Grund eines hydrophilen und eines lipophilen Teils an beide andocken) in einem metastabilen, vermischten Zustand gehalten werden. Es gibt Emulsionen auf Wasser in Öl und Öl in Wasser

[331] Vgl. Buchmann (2001), S. 150ff.

Basis. In flüssiger Form nennt man sie Lotionen, in halbfester Form Cremen (rheologisch festgelegt).[332]

4.3.1.1.4 Suspensionen

basieren auf wässrigen, wässrig – alkoholischen oder inerten öligen Vehikeln mit kleinsten, im Medium fein verteilten Partikel. Voraussetzung ist eine gute Löslichkeit des zu lösenden Stoffes im Lösungsmittel.

4.3.2 Feuchtigkeitsspender als Wirkstoffe

Ein wesentlicher Faktor für das Aussehen der Haut ist ihr Feuchtigkeitsgehalt. Ein erwünschter Effekt eines Kosmetikproduktes ist also das Feuchthalten der Haut. Hierbei wird ein geeignetes Vehikel gewählt, dem Komponenten zugefügt werden, die den Wasserverlust der Haut minimieren. Dadurch wird Wasser in die Lederhaut eingebettet und die Haut schaut glatter aus.[333] Sowohl das Vehikel, als auch der Wirkstoff werden so gewählt, dass der befeuchtende Effekt eintritt.

4.3.3 Farbpigmente

Farbpigmente werden dazu verwendet, um Kosmetikprodukte einzufärben und lassen sich in organische und anorganische Pigmente einteilen. Des Weiteren gibt es noch Perlglanzpigmente und Pigmente aus Metallflocken. Im Unterschied zu Färbemitteln sind Farbpigmente im verwendeten Medium nicht löslich. Der „Colour Index“ der „Society of Dyers und Colorists“ enthält mehrere tausend Farbpigmente in verschiedensten chemischen Kategorien. Er wird laufend aktualisiert. Farbpigmente sind darin mit einer Nummer und dem gängigen Namen angeführt (Beispiele dazu sind in Tabelle 10, Spalte vier, zu finden). Die Farbpigmente, die in Nahrungsmitteln und Kosmetikprodukten eingesetzt werden dürfen, unterliegen zusätzlich bestimmten gesetzlichen Bestimmungen (z.B. der U.S. Food and Drug Administration). Ihre Anwendungsgebiete sind streng definiert und falls notwendig werden die Definitionen an neue Erkenntnisse angepasst.[334]

Anorganische Farbpigmente wurden, wie in Abschnitt 4.1.3 ausgeführt, schon von frühesten menschlichen Kulturen aus verschiedenen Zwecken zum Dekorieren der Haut eingesetzt. Erdpigmente, wie z.B. Ocker wurden schon in der Eiszeit für Höhlenmalereien benutzt. Rote und Violette Pigmente für Töpferwaren konnten vor 4000 Jahren durch Brennen von Ocker hergestellt werden. Bei den Ägyptern und Römern waren verschiedenste Pigmente in Verwendung (Malachit, Lapis Lazuli, Bleiglanz, Zinnober, Bleiweiß). Die industrielle Erzeugung startete im 18. Jhdt. Zu der ersten industriell hergestellten Pigmenten zählten Preußisch Blau und Chromgelb. Im 19. Jhdt. gelang die Herstellung von Ultramarinblau (1828) und ab dem 20. Jhdt. konnten durch neue Methoden viele andere Pigmente, wie z.B. Titandioxid oder Manganblau, industriell, erzeugt werden.[335]

[332] Vgl. Buchmann (2001), S. 152f.
[333] Vgl. ebenda, S. 145.
[334] Vgl. Nassau (1983), S. 285ff.
[335] Vgl. Neumüller (1985), S. 3213ff.

Auch organische Pigmente, wie Purpur, Indigo, Chlorophyll und Tierkohle wurden schon sehr früh in der Menschheitsgeschichte eingesetzt. Durch Synthese konnten sie erst nach den anorganischen industriell hergestellt werden. Ein Beispiel dafür ist die von Adolf von Bayer entdeckte Strukturformel für Indigo, an deren Entwicklung er seit dem Jahre 1865 arbeitete. Einige Jahre konnte es industriell gefertigt werden.[336]

Die Bedenklichkeit der Verwendung gewisser Stoffe führte dazu, dass in einzelnen Ländern Gesetze verabschiedet wurden, die den Einsatz gefährlicher Stoffe unterbinden sollten. In Deutschland wurde 1887 die Beimengung von Pigmenten, die Schwermetalle enthielten verboten. In Österreich wurden 1906 noch zusätzlich Reinheitsbestimmungen erlassen und die Verwendung von Farbstoffen, die Steinkohlenteer enthielten, unterbunden. Nach dem zweiten Weltkrieg boomte die Entwicklung der Färbemittel und vermehrt wurden toxikologische und dermatologische Untersuchungen verlangt. Welche Färbemittel verwendet werden dürfen, ist in einzelnen Ländern unterschiedlich. Dies gilt speziell für Ingredienzen die in Augenmakeup verwendet werden. Beispiele dafür sind Patent Blau (C.I. 42051) und Fast Yellow (C.I. 13015), die in den Vereinigten Staaten und in Japan den Produkten nicht beigemischt werden dürfen, in europäischen Ländern aber in Kosmetikprodukten verwendet werden dürfen.[337]

In der Natur vorkommende Pigmente weisen eine geringere Farbechtheit auf. Das heißt sie behalten unter äußeren Einflüssen ihre Farbe nicht. Sie spielen daher eine kleine Rolle bei der Produktion von Kosmetikprodukten. Zu den natürlichen Färbemitteln zählen unter anderem Karotenoide und Chlorophyll. Das natürliche Pigment Karminrot (C.I. 57470) wird in Lippenstiften und für Augenmakeup eingesetzt und ist das einzige rote Pigment, das auch in den Vereinigten Staaten für Augenmakeup verwendet werden darf.[338]

Die anorganischen Pigmente werden sehr oft in der Kosmetikproduktion eingesetzt. In Tabelle 10 sind Farbpigmente angeführt, die für dekorative Kosmetikprodukte eingesetzt werden.

Name	Verbindung	Farbe	Colour Index	Anwendung
Titanium Dioxid	TiO_2	Weiß	C.I. 77891	Alle kosmetischen Anwendungen
Eisenoxidrot	Fe_2O_3	Rot	C.I. 77491	Alle kosmetischen Anwendungen
Eisenoxidgelb	$Fe_2O_3.xH_20$	Gelb	C.I. 77492	Alle kosmetischen Anwendungen
Pigment Black 11	Fe_3O_4	Schwarz	C.I. 77499	Alle kosmetischen Anwendungen
Ultramarinblau	$Na_xAl_ySi_zO_vS_t$	Blau,Violett	C.I. 77007	Augen, Lippenstift, Seife
Preußischblau			C.I. 77510	Augen
Manganviolett	$(NH_4)_2Mn_2(P_2O_7)_2$		C.I. 77742	Dekorative Kosmetika
Perlglanzpigmente		Mica	C.I. 77019	Dekorative Kosmetika
Pigment Grün 17	Cr_2O_3	Grün	C.I. 77288	Dekorative Kosmetika

Tabelle 10: Farbpigmente für dekoratives Make Up[339]

- Verschiedene Brauntöne, so wie sie in Foundation zum Einsatz kommen, werden aus einer Kombination von Eisenoxiden und Titandioxid hergestellt.

336 Vgl. URL http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1905/baeyer-bio.html [18.1.2011]
337 Vgl. Otterstätter (2001), S. 317f.
338 Vgl. ebenda, S. 318.
339 Vgl. ebenda, S. 321ff.

- Pigment Black 11 kommt in der Natur als Magnetit (Trieisentetraoxid) vor und ist gemahlen, ein tiefschwarzes Pulver.
- Ultramarinblau leuchtet kräftig und löst sich nicht in Lösungsmitteln. Die im Molekül eingebauten Schwefelatome sind für die färbende Wirkung verantwortlich.
- Für Lidschatten werden auch Perlglanzpigmente (Interferenzpigmente) verwendet. Diese bestehen aus Glimmer der mit ungiftigen Metalloxiden und Farbpigmenten beschichtet wird. Auf der Haut aufgetragen ergeben sie einen sehr dezenten Farbeindruck.[340]

4.3.3.1 Herstellung der Pigmente

Die natürlichen organischen Pigmente wurden z.B. von den Tieren gewonnen, die den Farbstoff in irgendeiner Weise mit sich trugen.

- Sepia – in der Blase des Tintenfisches
- Purpur – extrahiert aus Purpurschnecken
- Karminrot – Cochinelle aus Schildläusen

Die synthetischen organischen Pigmente werden im Labor hergestellt (siehe oben Indigo).

Natürliche anorganische Pigmente werden durch Methoden wie Mahlen, Schlemmen und Trocknen aus den entsprechenden Materialien gewonnen (z.B. Ocker). Die synthetischen anorganischen Pigmente erhält man aus chemischer und eventueller physikalischer Umwandlung (z.B. Titandioxid).[341]

Die Pigmente können als einzelne Teilchen in verschiedenen Formen vorliegen (quaderförmig, kugelförmig, stabförmig, unregelmäßig geformt). Diese Teilchen können Aggregate oder Agglomerate bilden.[342]

4.3.3.2 Effektfarbpigmente

Moderne Farbpigmente (Effektpigmente) bestehen aus einer Kombination verschiedenster Einzelelemente. Einige wenige Beispiele dazu sollen Farbpigmente, die die Firma Merck anbietet, aufzeigen. Die Firma Merck stellt Farbpigmente her, die in Kosmetika verwendet werden dürfen. Sie bietet Farbglanzpigmente (Glimmer beschichtet mit TiO_2 und organischen oder anorganischen Pigmenten) an, die besonders intensive Farbtöne durch die Reflexion des Interferenzpigments hervorrufen. Ebenfalls im Programm hat sie Metallic–Farbglanzpigmente (Glimmer beschichtet mit Fe_2O_3), bei denen der Farbeffekt von der Dicke der Oxidschicht abhängt. Die schimmernden Schwarzpigmente, die sie anbietet, bestehen aus Glimmer, der mit schwarzem Eisenoxid in verschiedenen Stärken überzogen ist.[343]

---

340 Vgl. URL http://www.omikron-online.de/naturhaus/preise/022perlg.htm [15.1.2011].
341 Vgl. Neumüller (1985), S. 3213f.
342 Vgl. URL http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Vorlagen/pigmente_3.pdf [18.1.2011], Caroline Röhr.
343 Vgl. URL http://www.merck-chemicals.de/ [18.1.2011], Sparte Pigmente und Füllstoffe.

4.3.3.3 Farbigkeit der Pigmente

Der Farbeindruck, den die in einer Substanz eingebetteten Pigmente hervorrufen, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die farbigen Partikel absorbieren gewisse Lichtfarben und reflektieren die Lichtanteile, die nicht absorbiert werden. Daraus resultiert ein gewisser Farbeindruck. Je höher die Konzentration der Pigmente, desto gesättigter ist der Farbeindruck. Die Partikelgröße hat wesentlichen Einfluss darauf, ob und wie die Pigmente Licht streuen. Werden die Durchmesser der Partikel kleiner, wird mehr Licht gestreut, ohne in tiefe Schichten einzudringen. Dadurch wird der Farbeindruck etwas abgemindert und die Sättigung verringert.[344] Gute Lichtstreuung wird erreicht, wenn die Größe der Partikel ungefähr die halbe Lichtwellenlänge beträgt.

Die Brechzahl der Pigmente verändert den resultierenden Farbeindruck dahingehend, dass er die Lichtstreuung und Absorption beeinflusst. Soll Licht stark gestreut und reflektiert werden, erreicht man das, indem man den Brechzahlunterschied zwischen Farbpigmenten und Vehikel groß wählt (das ist speziell bei Weißpigmenten, wie TiO_2, der Fall). Sollen die Pigmente Licht gut reflektieren, wählt man eine größere Partikelgröße und Pigmente mit großer Brechzahl. Das ist z.B. bei anorganischen Pigmenten der Fall, bei denen man die Partikelgrößen entsprechend wählt (1 µm und mehr). Die Brechzahl von Vehikeln und organischen Farbpigmenten ist in etwa gleich groß. Hier wird mehr Licht reflektiert und der vermittelte Farbeindruck entspricht dem eines gesättigteren Farbtons, wenn die Partikelgröße kleiner wird.[345]

Pigment	**n**
Weißpigmente	
Rutil (TiO_2)	2,8
Anatas (TiO_2)	2,55
Buntpigmente	
Magnetit (Fe_3O_4)	2,42
Hämatit (α-Fe_2O_3)	2,98
Ultramarin	1,5

Tabelle 11: Pigmente - Brechzahlen[346]

In Tabelle 11 sind die Brechzahlen einiger Weiß- und Buntpigmente angegeben.

4.3.4 Feuchtigkeitsspender

Feuchtigkeitsspendende Substanzen sollen verhindern, dass ein auf die Haut aufgetragenes Produkt diese austrocknet und ihr zusätzlich Feuchtigkeit zuführen. Die Haut wird vom Körper her mit Feuchtigkeit versorgt, enthält aber auch in der Stratum corneum natürliche Feuchtigkeitsspender (Natural Moisturizing Factor, kurz NMF), die bis zu 10 % des Gewichts der Stratum corneum ausmachen können. Dazu gehören unter anderem Aminosäuren, Lactate und

344 Vgl. Nassau (1983), S. 287.
345 Vgl. ebenda, S. 290.
346 Vgl. URL http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Vorlagen/pigmente_3.pdf [18.1.2011], Ersteller: Caroline Röhr.

Urea. Diese Substanzen bewahren die oberste Hautschicht davor trocken und schuppig zu werden.[347]

Der Feuchtigkeitsgehalt der Haut hat großen Einfluss auf ihr Aussehen, daher werden Make Up Produkten Substanzen beigefügt, die dem Erhalt der Hautfeuchtigkeit dienen. Folgende Substanzen werden unter anderen dazu verwendet:[348]

Butylene Glykol
Befeuchtet die Haut ohne zu Allergien zu führen und dient als Lösungsmittel.

Glycerin
Schützt die Haut und erhält ihre Feuchtigkeit. Glycerin nimmt Wasser aus der Luft auf. Es diffundiert aus Cremen in die Stratum corneum und lagert sich dort an, was zu einem verbesserten Aussehen der Haut führt.

Hyaluronsäure
Bildet auf der Haut eine dünne Feuchtigkeitsschicht. Sie kann auf Grund ihres hohen Molekulargewichts nur zwischen den abgestorbenen Zellen einlagern und nicht tiefer gelangen.

Milchsäure
Sie erhöht die Fähigkeit der Haut, Feuchtigkeit zu binden und sich zu dehnen.

Urea (Harnsäure)
Wird zur Behandlung von trockener Haut eingesetzt. Sie verhindert, dass die Haut Feuchtigkeit verliert.

Eine Kombination von NMF, die die Zellzwischenräume stärken, und Feuchtigkeitsspendern verhilft Haut zu einem verbesserten Aussehen.

4.3.5 Viskositätsveränderer und Stabilisatoren[349]

Viskositätsveränderer und Stabilisatoren werden den Produkten beigefügt

- um Flüssigkeiten einzudicken
- um in ihnen beigemengte Stoffe zu verteilen, ohne dass sie absinken oder sich zusammenballen
- um die Stabilität bei Temperaturänderungen zu erhöhen
- damit sie besser aufgetragen werden können

Verwendet werden dazu z.B. Eindickungsmittel (Silica Gel, Carbon Black, TiO_2, Aluminium Magnesium Stearate) und Aufschlämmungsmittel (Xantham Gum, Celluloseether).

[347] Vgl. Lodén (2001), S. 347.
[348] Vgl. ebenda ff.
[349] Vgl. Ekong (2001), S. 377ff.

4.3.6 Silicone[350]

Silicone werden seit den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts in der Kosmetikproduktion eingesetzt. Sie bestehen aus einem anorganischen Siloxane–Grundgerüst (Si - O). Daran wird eine organische Gruppe (z.B. Methyl) angeschlossen. Die Methylgruppe sorgt für gute Oberflächeneigenschaften. Silicone sind stabil gegenüber Temperaturänderungen und Oxidation und verhelfen den Kosmetikprodukten dazu, dass diese auf der Haut gleichmäßig als dünner Film aufgetragen werden können, der atmungsaktiv ist. Sie pflegen die Haut und verhelfen ihr zu einem glatteren, samtigen Aussehen.

In der Kosmetikindustrie werden verschiedene Arten von Silikonen eingesetzt unter anderem:

- Cyclomethicone:
  sind gute Lösungsmittel und haben eine kleine Verdampfungswärme, was den kühlenden Effekt beim Trocknen mindert. Die Firma Dow Corning gibt für die Brechzahl von Cyclomethicone 1,397 an.[351]
- Dimethicone
  sind Fluide, die in verschiedenen Viskositätsstufen herstellbar sind. Dimethicone wirkt schaumvermindernd. Durch Beifügung von Dimethiconen wird die Haut geschmeidiger und die Haltbarkeit des auf die Haut aufgetragenen Produktfilms verlängert. Dimeticone hat eine Brechzahl von 1,404 (siehe Abschnitt 7.2.6.2).
- Phenyl Trimethicone:
  einige der Methylgruppen werden in Trimethiconen durch Phenolgruppen ersetzt, diese erhöht die Brechzahl dieses Silicones (Brechzahl 1,46 bei 25°C).[352]

4.3.7 Anti – Faltenprodukte

Die Entstehung und Beschreibung von Falten wurde in Abschnitt 3.3.4.1 beschrieben. Kosmetikprodukte, die den Anspruch erheben, bereits bestehende Falten zu mindern, basieren entweder darauf, dass die Falten aufgefüllt werden, oder dass sie Farbpigmente oder Substanzen enthalten, die durch Reflexion das Erscheinungsbild der Falte mindern. Aufgefüllt können Falten werden, indem aktive Substanzen in die Haut eindringen und so die Haut „aufpolstern“ oder indem das Produkt in die Falte gestrichen wird und so oberhalb der Haut zu liegen kommt. Für die zwei Faltenauffüller, die für diese Arbeit untersucht wurden, wurde von den Herstellern angegeben, dass sie beide Funktionen erfüllen.

4.3.8 Aufbau von Foundation[353]

Produkte, die eingesetzt werden, um den Eindruck des Gesichts zu verändern und zu einer Verschönerung zu verhelfen, wurden in Abschnitt 4.1.2 angeführt. Dieser Abschnitt soll speziell die Zusammensetzung und den Aufbau von Foundation behandeln.

---

350 Vgl. Blakely (2001); S. 389ff.
351 Vgl. URL http://www.dowcorning.de/applications/search/products/details.aspx?prod=04018275&type=PROD [23.1.2011].
352 Vgl. URL http://www.dowcorning.com/applications/search/products/details.aspx?prod=01010476&type=PROD [23.1.2011].
353 Vgl. Schlossmann (2001), S. 654ff.

Foundation kann als Emulsion, Suspension oder wasserfrei ausgeführt sein.

Die meisten Foundations auf Basis einer Emulsion sind als anionische Emulsionen ausgeführt. Sie sind stabil, die Pigmente lassen sich gut verteilen, sie lassen sich gut auftragen, die Haut fühlt sich gut an und sie gleiten gut beim Auftrag.

Wasserfreie Foundations haben eine pudrige Konsistenz. Sie enthalten Weichmacher, Wachse, Pigmente in verschiedenen Partikelgrößen (TiO_2, ZnO, Eisenoxide), Feuchtigkeitsspender und Stoffe, die dem aufgetragenen Produkt Textur verleihen (wie z.B. Nylon, Stärke, Silikonpuder).

4.3.9 Begriffsdefinitionen laut INCI-Datenbank

Die folgenden Begriffe sind nicht als umfassende Liste zu verstehen. Es handelt sich um jene Eigenschaften, die die Inhaltsstoffe der in dieser Arbeit verwendeten Produkte haben. Sie sind in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

Begriffserklärung[354]

- Abrasiv: Verunreinigungen auf der Oberfläche werden entfernt
- Absorbierend: in Wasser oder Öl gelöste oder fein verteilte Substanzen werden aufgenommen
- Antibackmittel: Zusammenbacken von Feststoffen im Produkt wird verhindert, ihre Beweglichkeit erhalten
- Antimikrobiell: Wachstum von Mikroorganismen wird verhindert
- Antioxidant: Oxidation und ranzig werden wird verhindert
- Antistatisch: elektrische Ladungen werden neutralisiert
- Bindend: Zusammenhalt von Zubereitungen in Pulver- oder Puderform wird gewährleistet
- Chelatbildend: reagiert mit Metallionen, um Aussehen und Stabilität des Produkts zu erhalten
- Desodorierend: Körpergeruch wird reduziert und verdeckt
- Emulgierend: Grenzflächenspannung von Flüssigkeiten wird verändert, so dass sie mischbar werden
- Emulsionsstabilisierend: Emulsionen werden leichter gebildet und haltbar gemacht
- Feucht haltend: Feuchtigkeit des Produkts oder der Haut wird erhalten
- Feuchtigkeitsspendend: Feuchtigkeit der Haut wird erhöht
- Filmbildend: beim Auftragen entsteht ein zusammenhängender Film auf der Haut
- Geschmeidig machend: Haut wird geglättet und geschmeidig gemacht
- Glättend: Unregelmäßigkeiten der Haut werden ausgeglichen, Rauhigkeit reduziert
- Haarkonditionierend: Kämmbarkeit wird erhöht, das Haar wird weich und glänzend, erhält mehr Volumen, Geschmeidigkeit, Glanz
- Hautpflegend: sorgt für guten Hautzustand
- Hautschützend: die Schädlichkeit von Umwelteinflüssen wird reduziert
- Konservierend: Mikroorganismen werden an der Entwicklung gehindert

[354] Vgl. URL http://www.haut.de/service/inci/ [26.9.2010].

- Kosmetischer Farbstoff: Einsatz zum Färben von kosmetischen Produkten, Haut, Haaren
- Kräftigend: angenehmes Gefühl wird hervorgerufen
- Lindernd: reduziert Unbehagen auf Haut und Kopfhaut
- Lösungsmittel: andere Stoffe werden gelöst und der gelöste Zustand wird stabilisiert
- Maskierend: Grundgeruch wird überdeckt
- Parfümierend. Geruch wird verändert, angenehm gemacht
- Puffernd: pH–Wert stabilisierend
- Quellend: Schüttdichte kosmetischer Mittel wird verringert
- Rückfettend: Lipide werden für Haut und Haar zur Verfügung gestellt
- Schaumvermindernd: Schaumbildung wird unterdrückt
- Schaumverstärkend: Volumen, Gefüge oder Beständigkeit eines Schaums wird verbessert
- Tensid: Grenzflächenspannung von kosmetischen Präparaten wird verringert, sie lassen sich besser verteilen
- Trübend: Transparenz und Lichtdurchlässigkeit wird reduziert
- UV–Absorber: das Produkt wird vor UV–Strahlung geschützt
- UV–Filter: Schützt die Haut vor schädlichen UV–Strahlen
- Vergällend: soll den Genuss von enthaltenem Alkohol verhindern (Brandtweinsteuer in der BRD)
- Viskositätsregelnd: verändert die Viskosität
- Weichmachend: ein schlecht formbarer Stoff wird formbar gemacht

5 Lösungsansatz

Um die Messungen durchführen zu können, wurde nach einem passenden Material gesucht, auf das das Make Up aufgetragen werden konnte. Die Wahl fiel auf Polyethylenterephthalat (kurz PET). Für die Experimente wurde ein speziell geformter PET – Block hergestellt (siehe 6.3.14). In allen Fällen wurde dieser an „makellosen“ und an Störstellen mit den gewählten Produkten versehen und dort die entsprechenden Messungen durchgeführt. Die Messwerte wurden entweder direkt in Excel ausgewertet oder entsprechenden Software–Programmen zugeführt, um die verschiedenen physikalischen Größen zu ermitteln, die weiter verwendet wurden oder zu den gesuchten Aussage führten.

Die verschiedenen Experimente, die durchgeführt wurden, um die Forschungsfragen zu beantworten sind in den folgenden Abschnitten angeführt.

5.1 Subjektive Eindrücke objektiv messen

Die Experimente zur objektiven Ermittlung der Werte für subjektive Farbeindrücke wurden mit einem speziell aufgebauten Versuchsaufbau durchgeführt. Dazu wurde der PET–Block, der mit vorgefertigten Störstellen versehen war, auf den die Produkte aufgetragen wurden, aus verschiedensten Winkeln mit einer Digitalcamera aufgenommen (siehe 6.4.4). Die Farbinformationen der Stellen der Bilder, die von Interesse waren (abgedeckte Störstellen, abgedeckte makellose Stellen), wurden mittels speziell erstellter Software extrahiert und die Informationen verglichen. So konnte über die sich ergebenden Messwerte objektiv festgestellt werden, wie groß der Farb- und Helligkeitsabstand zwischen den betrachteten Stellen war und ob ein Beobachter einen bemerkbaren Unterschied feststellen könnte.

5.2 Gemittelter und gerichteter Eindruck

Nachdem das Aussehen von Haut davon abhängt, welcher Eindruck bei einem Betrachter entsteht, wurde verifiziert, welcher gerichtete und welcher über verschiedene Richtungen gemittelte Eindruck beim Betrachter in Bezug auf die Haut und auf abgedeckte Störstellen der Haut, wie Falten oder rote Flecken, entsteht.

Um objektive Messwerte für den gemittelten und gerichteten Eindruck, den ein Beobachter von verschiedenen mit Make Up Produkten bedeckten Hautstellen bekommt, konnten Messungen mit DI Marko Weber im Labor für „Laser und optische Strahlung“ der Seibersdorf Labor GmbH gemacht werden.

Um Werte für den gemittelten Eindruck eines Beobachters zu erhalten wurde für die Messung eine Ulbrichtkugel herangezogen (siehe Abschnitt 6.4.2). Mit ihrer Hilfe konnten die in den gesamten Halbraum emittierten, integralen spektralen Reflexionsspektren der verwendeten Proben ermittelt werden. Diese Spektren wurden unter Berücksichtigung der jeweiligen Beleuchtungsverhältnisse in die entsprechenden Farbkoordinaten des CIE transformiert und über den daraus ermittelten Farb- und Helligkeitsabstand konnte eine objektive Beurteilung über eine etwaige Verbesserung des Erscheinungsbildes von verschiedenen Hautstellen gemacht werden.

Die Messwerte, die Ergebnisse für den gerichteten Eindruck eines Beobachters liefern sollten, wurden mit Hilfe einer Strahldichteoptik ermittelt (siehe Abschnitt 6.4.3). Sie lieferten die spektrale Strahldichte für eine bestimmte Beobachtungsgeometrie und über die verwendete Software auch die CIE Farbkoordinaten. So wie bei den Messungen mit der Ulbrichtkugel konnte darüber der Farb- und Helligkeitsabstand der gemessenen Stellen ermittelt werden.

Nachdem Farbeindrücke subjektiv im Gehirn des Sehenden entstehen, wurden zusätzlich über die Aufnahmen mit einer Digitalcamera objektiv messbare Ergebnisse (sRGB) in Bezug auf das menschliche Sehen ermittelt.

Mit Hilfe der Farbmetrik wurden die Aufnahmen mit der Camera und der Strahldichteoptik ausgewertet und Aussagen über Farbabstände in Bezug auf vorhandene abgedeckte „Störstellen“ gemacht. Die Untersuchungen wurden so durchgeführt, dass damit die Eindrücke aus verschiedenen Winkeln untersucht werden konnten. Damit konnte objektiv angegeben werden, ob sich eine Verbesserung durch Auftrag eines Produktes ergeben hatte.

5.3 Modellierung

Make Up auf der Haut kann mit der Atmosphäre über der Erde verglichen werden. Licht trifft auf die Atmosphäre und tritt in Wechselwirkung mit ihren Partikeln. Es wird gestreut, reflektiert, absorbiert. All das findet auch in Make Up statt. Es wurde versucht mit Hilfe von Software (DISORT, siehe 9.7), die ursprünglich für Betrachtungen von Wechselwirkung von Licht in der Atmosphäre geschrieben wurde, ein einfaches Modell für Make Up auf Haut aufzustellen.

Die nötigen Eingangsdaten für die Modellierung (Phasenfunktion, optische Dicke, Asymmetriefaktor, Single Scattering Albedo) mit DISORT wurden mit verschiedenen Experimenten (siehe 7.2) und mit dem Fortran Programm wb4.exe (siehe 9.6) ermittelt. Es wurden die physikalischen Eigenschaften der Produkte, wie ihre Brechzahl, ihr Reflexions- und Streuvermögen, die Partikelgröße und Form, Absorptions- und Extinktionskoeffizient, Single Scattering Albedo und weitere ermittelt.

Die Modellierung des Rückstreuverhaltens des Make Up (siehe Kapitel 7) erfolgte nach Ermittlung der Phasenfunktion des Streuverhaltens auf Grund der ermittelten Partikelverteilung mit DISORT. Es wurde ein den Make Up Inhaltsstoffen entsprechendes Verfahren (je nach Partikelart) gewählt, um DISORT möglichst optimal einzusetzen.

Die Ergebnisse, die DISORT lieferte (winkelabhängige Intensitätsverteilungen), wurden in Excel übertragen und dort so miteinander verknüpft, dass sinnvolle Aussagen über den Lichtfluss und das Streuverhalten im Make Up getroffen werden konnten.

5.4 Simulation

Um herauszufinden, ob das Make Up mit anderen physikalischen Parametern noch bessere Ergebnisse bei der Rückstreuung von Licht, bzw. den vom Hersteller angegebenen Eigenschaften liefern würde, wurden die gegebenen Parameter verändert und mit Hilfe von DISORT modelliert.

Es wurde versucht, ob die Eigenschaften des Make Up mit Hilfe geeigneter Parameteränderungen zu verbessern. So wurde ein simuliertes „theoretisches Make Up“ geschaffen. Die geänderten Parameter flossen in die Simulation mit DISORT ein. Durch geeignet gewählte Darstellungsmethoden wurde es möglich, Aussagen darüber zu treffen, ob dieses theoretische Make Up eine Verbesserung des real untersuchten Make Ups darstellte.

6 Experimentelle Durchführung

Um Vergleichsdaten für die Modellbildung zu erhalten und um den subjektiven Eindruck objektiv messbar zu machen, wurden verschiedene Experimente durchgeführt. Es wurden Messungen mit einem Spektrophotometer durchgeführt, um Auskünfte über die spektralen Daten der Produkte und untersuchten Störstellen und einer geeignet gewählten Lichtquelle zu erhalten. Eine Digitalcamera wurde dazu verwendet, einen objektiven Farbeindruck zu ermitteln.

6.1 Festlegung der experimentellen Methodik

6.1.1 Produkte

Zur sinnvollen Durchführung von Experimenten war es nötig, herauszufinden, wie die Produkte aufgebaut sind, bzw. wie sie sich am günstigsten auf einem Probenträger auftragen lassen.

Die Inhaltsstoffe der Produkte konnten an Hand der Listen, die auf den Packungen vom Hersteller angegeben waren, festgestellt werden. Zur Beurteilung der Produktkonsistenz und der Leichtigkeit des Auftrags der Produkte, wurden Probanden befragt. Detailliertere Informationen zu den Produkten konnten mit Brechzahlmessungen, Lichtmikroskop- und Elektronenmikroskopaufnahmen gewonnen werden.

Es wurden Make Ups, Faltenauffüller und ein grüner Abdeckstift untersucht.

6.1.2 Hautersatz

Die Produkte wurden mit verschiedensten Experimenten untersucht, wobei eine Bedingung war, dass die untersuchte Stelle absolut unbeweglich war. Ein Proband war zu diesem Zweck nicht geeignet. Es wurde nach einem Material gesucht, dessen Oberflächenbeschaffenheit der Haut ähnlich ist und dessen Reflektivität die Haut möglichst gut nachbildet. Auf diesem Hautersatz wurden „Störstellen“ angebracht, so dass überprüfbar war, ob Make Up eine Verbesserung des Aussehens herbeiführt. Diese bestanden aus einer nachgebildeten Falte und einem roten Fleck.

6.1.3 Lichtquelle

Es wurde eine Lichtquelle verwendet, die vom Spektrum her Tageslicht nachbildet, um die Untersuchungen bei Alltagsbedingungen durchführen zu können. Es wurde ein geeignetes Produkt aus den am Markt verfügbaren Tageslichtlampen gewählt.

6.1.4 Reflexionsstandard

Für die relativen Messungen war es nötig, einen geeigneten Referenzstandard zu finden, der einem Lambert’schen Reflektor entspricht.

6.1.5 Messgeräte

Die Messungen der Proben auf dem Hautersatz mit dem Spektrophotometer wurden mit einer Ulbrichtkugel und einer Strahldichteoptik im sichtbaren Wellenlängenspektrum durchgeführt. Die Aufnahmen mit der Digitalcamera wurden automatisiert.

6.1.5.1 Messungen mit Ulbrichtkugel – spektrale Bestrahlungsstärke

Mit Hilfe der Ulbrichtkugel wurde der gemittelte Eindruck, den ein Betrachter von Haut bekommt gemessen. Es wurde die spektrale Bestrahlungsstärke der mit Produkten bedeckten Störstellen (Falte, roter Fleck) auf dem Hautersatz allein und mit ihrer unmittelbaren Umgebung aufgezeichnet. Als Referenz wurden der Reflexionsstandard und der Hautersatz gemessen. Damit konnten die Reflexionsspektren ermittelt werden. Es wurde auch eine Messung der gewählten Tageslichtlampe durchgeführt, um Auskunft über ihr Spektrum zu erhalten.

6.1.5.2 Messung mit Spektrophotometer – spektrale Strahldichte

Mit Hilfe der Strahldichteoptik wurde die spektrale Strahldichte der mit Produkten bedeckten Störstellen aufgenommen. Die Aufzeichnung erfolgte so, dass es möglich war, aus den spektralen Strahldichtewerten die CIE–XYZ Farbkoordinaten zu ermitteln. Diese dienten dazu, den Farbeindruck mittels Farbabstand quantitativ zu beurteilen. Dazu wurden die Störstellen auf dem Hautersatz mit und ohne Produkte vermessen. Die Messungen wurden in geeigneten Winkelstellungen von untersuchtem Objekt und Lichtquelle bzw. Strahldichteoptik durchgeführt.

6.1.5.3 sRGB–Werte mit Digitalcamera

Da die Aufnahmen mit der Strahldichte nur für bestimmte Winkelstellungen durchgeführt wurden, wurde für die Verdichtung der Messungen ein automatisierter Aufbau mit einer Digitalcamera geschaffen. Dabei wurde der Hautersatz in fixer und in variabler Stellung zur Lichtquelle und Camera aufgenommen. Ein Auswerteprogramm half die sRGB-Farbkoordinaten der aufgenommenen Störstellen herauszufiltern. Daraus wurden Helligkeits- und Farbverläufe ermittelt, die der objektiven Beurteilung der Veränderung der Störstellen bei verschiedenen Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrien bei Produktauftrag dienten. Der Hautersatz und die Störstellen wurden mit und ohne Produkte untersucht.

6.2 Aufbau der Produkte

In diesem Abschnitt werden die untersuchten Produkte und ihre Inhaltsstoffe mit ihren Eigenschaften angeführt. Außerdem wurden vier Versuchspersonen zu ihren persönlichen Eindrücken über die Make Ups befragt. Ihre Eindrücke sind am Ende des Abschnitts angeführt.

6.2.1 Produktinhaltsstoffe

Die Inhaltsstoffe werden auf der Packung in der Produktinhaltsliste angeführt. Sie muss laut gesetzlichen Bestimmungen immer angegeben werden und führt die Inhaltsstoffe absteigend nach ihrer Massen an. Die Inhaltsstoffe sind in Bezug auf ihre Funktionalität in der INCI Datenbank beschrieben, welchen Effekt die einzelnen Eigenschaften haben, wurde in Abschnitt 4.3.9 behandelt. Nachdem die Farbstoffe immer am Ende der Produktinhaltsstoffliste ange-

führt sind, wurde nicht die gesamte Liste angeführt. Drei Punkte in der Liste zeigen, wo die Liste unterbrochen und dann wieder fortgesetzt wurde.

6.2.1.1 Inhaltsstoffe von Make Up 1

- Aqua (Lösungsmittel)
- Dimethicone (schaumvermindernd, geschmeidig machend, hautpflegend, hautschützend)
- Isostearyl Linoleate (geschmeidig machend, hautpflegend)
- Butylene Glycol (feuchthaltend, maskierend, hautpflegend, Lösungsmittel, viskositätsregelnd)
- Ethylhexyl Methoxycinnamate (UV–Absorber, UV–Filter)
- Octyldodecyl Stearoyl Stearate (geschmeidig machend, viskositätsregelnd)
- Silica (abrasiv, absorbierend, Antibackmittel, quellend, trübend, viskositätsregelnd)
- Cyclopentasiloxane (geschmeidig machend, haarkonditionierend, hautpflegend, Lösungsmittel)
- Polysicone-11 (filmbildend)
- Stearet-21 (reinigend, emulgierend, Tensid)
- Phenyl Trimeticone (schaumvermindernd, haarkonditionierend, hautpflegend)
- Trometamine (puffernd, maskierend)
- Stearic Acid (reinigend, emulgierend, emulsionsstabilisierend, maskierend, rückfettend, Tensid)
- Isostearic Acid (bindend, reinigend, emulgierend, Tensid)
- Hexylene Glycol (emulgierend, parfümierend, hautpflegend, Lösungsmittel, Tensid)
- Sigesbeckia Orientalis Extract (hautpflegend, kräftigend)
- Coleus Barbatus Extract (hautpflegend)
- Pisum Sativum (Pea) Extract (hautpflegend, hautschützend)
- …
- Disodium EDT (chelatbildend, viskositätsregelnd)
- Potassium Sorbate (konservierend)
- Phenoxyethanol (konservierend)
- Chloroxyleol (antimikrobiell, desodorierend, konservierend)
- +/- Titanium Dioxide (Cl 77891) (trübend, UV–Absorber, UV–Filter)
- +/- Mica (trübend)
- +/- Iron Oxide Cl 77491, 77492, 77499 (kosmetischer Farbstoff)

6.2.1.2 Inhaltsstoffe von Make Up 2

- Aqua (Lösungsmittel)
- Cyclopentasiloxane (geschmeidig machend, haarkonditionierend, hautpflegend, Lösungsmittel)
- Phenyl Trimeticone (schaumvermindernd, haarkonditionierend, hautpflegend)
- Ethylhexyl Methoxycinnamate (UV–Absorber, UV–Filter)

- Cyclohexosiloxane (geschmeidig machend, haarkonditionierend, hautpflegend, Lösungsmittel)
- Butylene Glycol (feuchthaltend, maskierend, hautpflegend, Lösungsmittel, Viskositätsregelnd)
- Cetyl PEG/PPG-10/1 Dimethicone (emulgierend, hautpflegend, Tensid)
- Pentylene Glycol (hautpflegend, Lösungsmittel)
- Polyglyceryl-4 Isostearate (emulgierend)
- Zea Mais Corn/Kernel Extract (bindend, quellend)
- PEG–30 Glyceryl Stearate (emulgierend, Tensid)
- PEG/PPG-18/18 Dimethicone (emulgierend)
- Linalool (desodorierend, parfümierend)
- Ceramide 3 (hautpflegend, hautschützend)
- Glycine Soja/Soybean Oil (geschmeidig machend, parfümierend, hautpflegend)
- …
- Methylparaben (konservierend)
- Phenoxyethanol (konservierend)
- Butylparaben (maskierend, konservierend)
- Tocopherol (Antioxidant, maskierend, hautpflegend)
- Bismuth Oxychloride CL 77163 (kosmetischer Farbstoff)
- Iron Oxides Cl 77492, Cl 77499, CL 77491 (kosmetischer Farbstoff)
- Titanium Dioxide Cl 77891 (kosmetischer Farbstoff)

6.2.1.3 Inhaltsstoffe von Faltenauffüller 1

- Aqua (Lösungsmittel)
- Dimethicone/ Vinyl Dimethicone Crosspolymer (viskositätsregelnd)
- Cyclomethicone (antistatisch, geschmeidig machend, haarkonditionierend, feucht haltend, Lösungsmittel, viskositätsregelnd)
- Hexanediol (Lösungsmittel)
- Glycerin (vergällend, feuchthaltend, parfümierend, Lösungsmittel)
- Methyl Methacrylate (Antibackmittel, trübend)
- Crosspolymer (in der Datenbank nicht vorhanden)
- Hexyldecanol (feucht haltend, hautpflegend, Lösungsmittel)
- Bisabolol (maskierend, hautpflegend, lindernd)
- Panthenol (antistatisch, haarkonditionierend, hautpflegend)
- Pyrus Malus Oil (hautpflegend)
- Dimethylsilanol Hyaluronate (feuchthaltend, feuchtigkeitsspendend, hautpflegend)
- Sodium Hyaluronate (feuchthaltend, hautpflegend)
- Palmitoyl Oligopeptide (reinigend, hautpflegend)
- …
- …
- Parfum (desodorierend, maskierend, parfümierend)
- Phenoxyethanol (konservierend)
- Methylparaben (konservierend)

- Ethylparaben (konservierend)
- Propylparaben (parfümierend, konservierend)
- Butylparaben (maskierend, konservierend)
- Isobutylparaben (konservierend)

6.2.1.4 Inhaltsstoffe von Faltenauffüller 2

- Aqua (Lösungsmittel)
- Glycerin (vergällend, feuchthaltend, parfümierend, Lösungsmittel)
- Polyglyceryl-3 Methylglucose Distearate (emulgierend)
- Squalane (geschmeidig machend, haarkonditionierend, rückfettend, hautpflegend)
- Coco-Caprylate/Caprate (geschmeidig machend, hautpflegend)
- Diethylhexyl Adipate (geschmeidig machend, filmbildend, weichmachend, hautpflegend, Lösungsmittel)
- Glyceryl Stearate Citrate (geschmeidig machend, emulgierend, hautpflegend)
- Butyrosperum Parkii Butter (hautpflegend, viskositätsregelnd)
- Corn Starch modified (absorbierend, filmbildend, hautpflegend, viskositätsregelnd)
- Cetearyl Isononanoate (geschmeidig machend, haarkonditionierend, hautpflegend)
- Cetearyl Alcohol (geschmeidig machend, emulgierend, emulsionsstabilisierend, schaumverstärkend, trübend, Tensid, viskosiätsregelnd)
- Niacinamide (glättend)
- Cyclopentasiloxane (geschmeidig machend, haarkonditionierend, hautpflegend, Lösungsmittel)
- Collagen (haarkonditionierend, feuchtigkeitsspendend, hautpflegend)
- Urea (antistatisch, puffernd, feuchthaltend, hautpflegend)
- …
- Phenoxyethanol (konservierend)
- Sodium Hydroxide (puffernd, vergällend)
- Methylparaben (konservierend)
- Ethylparaben (konservierend)
- Propylparaben (parfümierend, konservierend)
- Butylparaben (maskierend, konservierend)
- Isobutylparaben (konservierend)
- Sodium Chloride (quellend, maskierend, desodorierend, viskositätsregelnd)
- Citric Acid (puffernd, chelatbildend, maskierend)

6.2.2 Subjektive Beurteilung von Probanden

Vier Probanden wurden zu ihren subjektiven Eindrücken über das Make Up befragt. Sie sollten die Konsistenz, die Farbe, die Deckfähigkeit und den Gesamteindruck beurteilen.

Zur Konsistenzbeurteilung bekamen die Probanden je eine gleiche Menge Make Up 1 und 2 zwischen Daumen und Zeigefinger. Zusätzlich trugen zwei Probanden die Make Ups in gleicher Menge auf die Handrücken auf, die sollten die Fähigkeit der Make Ups sich gleichmäßig verteilen zu lassen beurteilen und eine Beurteilung der Make Ups bei Auftrag auf heller Haut ermöglichen.

Zur farblichen Beurteilung und für Aussagen zur Deckkraft und zum allgemeinen Aussehen, wurden die aufgetragenen Make Ups auf dem PET1 beurteilt. Die Beurteilung fand im freien, bei bewölktem Himmel um ca. 17:00 nachmittags statt. Make Up 1 und 2 wurden dazu in gleicher Menge links und rechts auf den PET aufgetragen, indem sie mit dem Finger leicht aufgedrückt, bzw. verstrichen wurden. Make Up 1 haftete dabei am PET nicht so gut, wie Make Up 2, daher wurde mit dem Finger abschließend leicht darüber gestrichen.

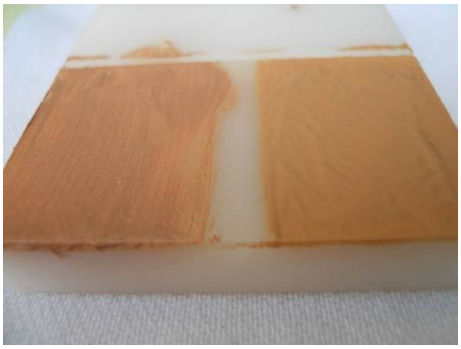


Abbildung 63: Make Ups auf PET1 für subjektive Beurteilung

Abbildung 63 zeigt auf dem PET links Make Up 1 und rechts Make Up 2 aufgetragen.

Da Make Up beim Kauf am Handrücken der Käuferin auf den passenden Farbton getestet wird, wurden Aufnahmen der beiden Make Ups bei Testung auf sehr heller und heller Haut gemacht.



Abbildung 64: Make Up - Proband mit sehr heller Haut

Abbildung 64 zeigt die Make Ups auf den zwei Handrücken einer Probandin mit sehr heller Haut aufgetragen. Links (Make Up 1) und rechts (Make Up 2) kann man deutlich erkennen, wo die Grenzen zwischen den Produkten und der unbedeckten Haut verlaufen.



Abbildung 65: Make Ups - Proband mit heller Haut

Der zweite Proband hat helle Haut. Abbildung 65 zeigt links (Make Up 1), den Rand zur umgebenden Haut deutlich ausgeprägt. Rechts (Make Up 2) ist jedoch kein Unterschied zur Haut der Umgebung zu erkennen. Subjektiv wäre für diesen Hautton Make Up 2 passend gewählt.

Verbale subjektive Beurteilungen der Probanden

Es wurden bewusst auch männliche Probanden befragt, da diese sich verbal anders ausdrücken und die Produkte anders beurteilen.

Proband 1 (weiblich, 28 Jahre)

Make Up 1: kühler, mehr ins blaue gehend, auf Hand aufgetragen setzt es sich mehr in Fältchen ab.

Make Up 2: wärmer, „Schweinchenrosa“, heller als Make Up 1, passt besser zu heller Haut.

Beide Make Ups: leicht strahlend.

Proband 2 (männlich, 36 Jahre)

Make Up 1: dunkler, trockener, Schimmer matter, Struktur gröber, leicht rose schimmernd, schnell antrocknend, nicht klebrig, leicht ölig, regelmäßiger beim Verteilen.

Make Up 2: feuchter, farblich durchgehend nicht so fleckig, heller, stärker deckend, feinstrukturierter, auf PET ungleichmäßiger aufgetragen, wo feuchter mehr Lichtreflexe, flüssiger, spiegelnd, bleibt lang flüssig und feucht, fast schmierig nach einer gewissen Zeit.

Proband 3 (männlich, 53 Jahre)

Make Up 1: rötlich spiegelnd, grob strukturiert, Konsistenz schmierig und fein.

Make Up 2: mehr gelblich ocker, homogener, glatter, spiegelt mehr.

Proband 4 (weiblich, 24 Jahre)

Make Up 1: fleckiger, schaut nicht haltbar aus, dickflüssiger, von der Konsistenz her gut auftragbar.

Make Up 2: deckt mehr, homogener, von der Optik her besser, mehr beige in Richtung Hautton, heller, ebenfalls gut auftragbar, milchiger flüssiger, verschwindet mehr beim Auftragen, vielleicht doch nicht so haltbar.

6.2.3 Probenpräparation

Das Auftragen der Produkte auf den PET1 erfolgte unterschiedlich für die einzelnen untersuchten Produkte. Wie Make Up, Faltenauffüller und Abdeckstift appliziert wurden, wird im Folgenden beschrieben.

6.2.3.1 Make Up

Vor der Bedeckung des PET1 mit Make Up wurde dreimal seine Masse bestimmt und aus den Werten der Mittelwert und die Standardabweichung gebildet. Die Make Ups wurden in die

Falte vorsichtig mit einem Pinsel gestrichen, auf die Seiten links und rechts davon mit dem Finger aufgedrückt. Bei Make Up 1, das von der Konsistenz her klebriger war, war es zusätzlich nötig, es vorsichtig mit dem Finger zu verstreichen. Die Masse der Menge Make Up, die auf den PET1 aufgetragen wurde, wurde so wie vor dem Auftrag mit Mittelwert und Standardabweichung bestimmt. Aus der aufgetragenen Masse und der PET-Fläche wurde die aufgetragene Schichtdicke ermittelt.

Es wurde kein Puder verwendet, weil der Pinsel, bzw. die Quaste, die zum Auftrag verwendet wird, das Make Up wieder vom PET1 abgehoben hätte und dann die Menge, die aufgetragen wurde, unbestimmt gewesen wäre.

6.2.3.2 Faltenauffüller

Die Faltenauffüller wurden nur ohne Make Up verwendet, weil es nicht möglich gewesen wäre, dieses ohne Probleme über den Auffüllern zu verteilen. Der PET1 wurde vor und nach dem Auftragen der Produkte drei Mal gewogen und der Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt.



Abbildung 66: Füllgrad der Falte mit Faltenauffüller

Die Auffüller wurden mit Hilfe eines Fingers vorsichtig so in der Falte verteilt, dass sie ihren Grund auffüllten und die Oberfläche eine leichte Senke bildete. Siehe Abbildung 66.

6.2.3.3 Abdeckstift

Der Abdeckstift wurde mit Hilfe eines Pinsels auf den roten Fleck aufgetragen. Die Masse der Menge Abdeckstift, die auf dem roten Fleck, bzw. links davon aufgetragen wurde, war zu gering, als dass sie auf der Waage angezeigt wurde. Es wurde daher geschätzt, wie dick die Schicht des Abdeckstiftes war.

6.3 Messgeräte

6.3.1 Tageslichtlampe Philips Tornado CDL 865

Die Philips Tornado CDL 865 (kurz Philips Tornado Lampe, siehe Abbildung 67) ist eine Tageslichtlampe, deren Licht einer Farbtemperatur von 6500 K entspricht.

Technische Daten der Lampe[355]: Spannung: 230–240 V, 50–60 Hz,
Leistung: 23 Watt (entspricht einer 125 W Glühbirne)
Lichtstrom: 1450 Lumen
Stromstärke: 165 mA
Farbtemperatur: 6500 K
X-Koordinate: 313
Y-Koordinate: 337



Abbildung 67: Tageslichtlampe (TaLi) Philips Tornado CDL 865[356]

Das Spektrum der Lampe ist in Abbildung 92 ersichtlich. Es enthält 4 Peaks bei 410 nm, 440 nm, 550 nm und 610 nm. Es wurde mit dem Doppelmonochromator DTMc300V und der Ulbrichtkugel UPK-150 F in den Seibersdorf Laboratories gemessen.[357]

Die Messung der spektralen Bestrahlungsstärke der Lampe wird in Kapitel 6.4.1 besprochen.

6.3.2 Ulbrichtkugel UPK-150F[358]

Die Ulbrichtkugel UPK-150-F mit OP.DI.MA. Beschichtung stammt von der Firma Gigahertz-Optik. Sie ist für eine hohe Reflektivität im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2500 nm ausgelegt. Der Hohlraum der UPK-150F besteht aus einer Kugel mit 150 mm Durchmesser und der Durchmesser der Eintrittsöffnung beträgt 25 mm. Die Ulbrichtkugel koppelt über Quarzfaser in einen Doppelmonochromator ein. Die OP.DI.MA. Beschichtung

355 Quelle: URL http://datasheets.emcc-europe.com/datasheets/download.php/Germany_(de,de)_-_Lampen,_Vorschaltgeräte_und_Trade_Leuchten/Energiesparlampen/Energiesparlampen,_Spezialform/TORNADO_ESaver.pdf [11.5.2010].

356 Quelle: URL http://www.bulbs.ch/product_info.php?products_id=3637 [7.5.08].

357 Quelle: DI Marko Weber, Laser und Optische Strahlung, Seibersdorf Labor GmbH.

358 Vgl. URL http://www.gigahertz-optik.de/database_de/html/anwendungen-anleitungen/anleitungen/v.-ulbrichtsche-kugeln/ [5.3.08].

garantiert eine gleichmäßige Lichtverteilung (Lambert-Reflexion) innerhalb der Ulbrichtkugel.

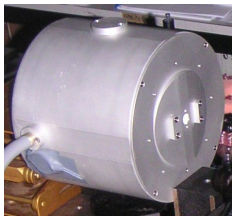


Abbildung 68: Messgerät: Ulbrichtkugel UPK-150F

OP.DI.MA. Beschichtung[359]

Die OP.DI.MA. Beschichtung besteht aus einem optisch hochwertigen weißen Kunststoff mit hervorragenden diffusen Reflexionseigenschaften. Die Charakteristik für diffuse Reflexion ist der eines Lambertschen Reflektors ähnlich. Sie garantiert eine gleichmäßige Lichtverteilung. Die spektrale Reflexion deckt einen Bereich von 250 nm bis zu 2500 nm mit mehr als 95% Reflexion und einer Spitzenreflexion von mehr als 98% im sichtbaren und nahen IR-Bereich ab.[360]

Funktionsweise der Ulbrichtkugel

An der inneren Kugeloberfläche wird durch mehrfache Lambert–Reflexion eine homogene Strahlungsverteilung erreicht. Für die reflektierte Strahlung, die Bereiche innerhalb der Kugel erreicht, gilt, dass die Strahldichte innerhalb der Kugel proportional zur gesamten Strahlung, die in die Kugel gelangt, ist. Sie hat eine konstante Richtungsverteilung und ist unabhängig davon, wo sie reflektiert wird. Die an der Ausgangsöffnung der Kugel abgegebene Strahlung hat eine homogene Richtungsverteilung und eine homogene Strahldichte. Eintritts- und Austrittsöffnung sind deutlich kleiner, als der Innendurchmesser der Kugel. Dadurch kann nur innerhalb der Kugel mehrfach reflektiertes Licht die Austrittsöffnung erreichen, dieses erfüllt das Lambertsche Gesetz. [361]

6.3.3 Bentham DMc 150V Double Monochromator

Mit einem Monochromator werden spektrale Informationen im optischen Bereich zerlegt und abgebildet. Er verfügt über einen Eingangs- und einen Ausgangsspalt, der eine Lichtfarbe aus dem Spektrum filtert. Doppelmonochromatoren bieten ein geringeres Streulichtniveau. Streulicht entsteht in einem Spektrometer durch interne Reflexionen, Licht, das von Oberflächen gestreut wird oder von unerwünscht gebeugtem Licht. Eine gute Oberflächenqualität der verwendeten Materialien garantiert eine geringere Streuung (Streulichtunterdrückung).[362]

Der Bentham DMc 150 ist symmetrisch nach dem Czerny–Turner Prinzip aufgebaut und verfügt über einen Sinusantrieb. Der Spiegel ist geteilt. Die Spalte des verwendeten Gerätes sind

[359] Vgl. URL http://www.gigahertz-optik.de/database_de/html/produkte/ulbrichtsche-kugel/op.di.ma..html [25.2.08].
[360] Vgl. Integrating_Spheres-Ulbrichtskugel.pdf, S. 107, Prospekt der Firma Gigahertz-Optik, [25.2.2008].
[361] Vgl. Integrating_Spheres-Ulbrichtskugel.pdf, S. 107, Prospekt der Firma Gigahertz-Optik, [25.2.2008].
[362] Vgl. URL http://www.spectra-magic.de/D-GL_Spektro.htm [5.3.08].

mit Mikrometerantrieb einstellbar. Die Gitter werden händisch umgebaut. Messungen können im Bereich von 10^{-2} mW m^{-2} bis zu 10^{5} mW m^{-2} durchgeführt werden (Dynamikbereich).

Das Gerät ist so konstruiert, dass es zu Feldmessungen auch verpackt und transportiert werden kann.

6.3.4 Bentham DTMc 300V Double Monochromator

Das Gerät ist von der Streulichtunterdrückung und im Dynamikbereich genauso aufgebaut, wie der DMc 150V. Die Gitter werden hier jedoch per Software verstellt und das Gerät ist nicht transportfähig. Von der Messtechnik und der Messqualität her entsprechen sich die beiden Geräte.

6.3.5 Photomultiplier Tube Bentham DH-30-Te

Dieser Detektor kann auf bis zu – 25 °C gekühlt werden, um das Rauschen des Dunkelstroms möglichst klein zu halten. In diesem speziellen Fall wurde für die Messungen der Photomultiplier auf Grund von langjähriger Erfahrung auf eine Temperatur von -5 °C gekühlt.[363]

6.3.6 Strahldichteteleskop Bentham TEL301[364]



Abbildung 69: Messgerät: Bentham Strahldichteteleskop TEL301[365]

Zum Abbilden der Quelle wird eine Spiegeloberfläche verwendet. Der Benutzer schaut durch das Okular auf den Spiegel und kann einen Ausschnitt der Quelle dadurch lokalisieren, dass er einen schwarzen runden Punkt durch Verstellen des Teleskops entsprechend fokussiert. Auf dem Spiegel entspricht dieser Punkt einem lichtdurchlässigen Loch. Nur das Licht, das durch das Loch fällt, wird über einen Lichtleiter in den Monochromator eingeleitet (siehe Abbildung 70). Es stehen verschiedene Lochdurchmesser zur Verfügung.

[363] Information von DI Marko Weber, Laser und Optische Strahlung, Seibersdorf Labor GmbH.
[364] Vgl. URL http://www.bentham.co.uk/tel301.HTM [5.3.08].
[365] Quelle: URL http://www.bentham.co.uk/tel301.HTM [17.5.2010].

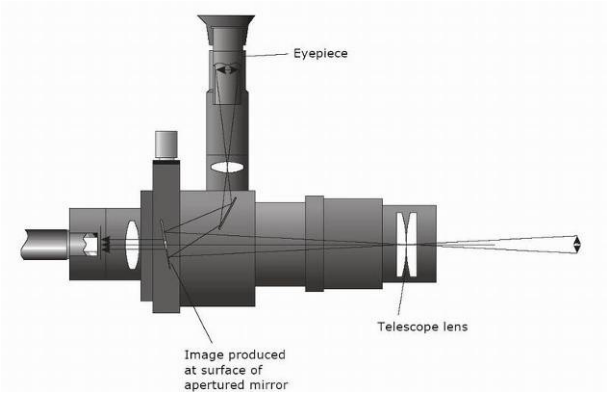


Abbildung 70: Messgerät: Bentham TEL301 Aufbau[366]

Das verwendete Teleskop ist mit einer Linse ausgestattet, mit der man im 350 – 1200 nm Wellenlängenbereich arbeiten kann.

6.3.7 Kalibrierlampe Bentham SRS8(Q) Spectral Radiance/Luminance Standard

Die Kalibrierlampe Bentham SRS8 wird zum Kalibrieren von Strahldichte- und Leuchtdichteoptiken, die mit Bentham Chromatoren messen, eingesetzt. Sie besteht aus einer Ulbricht–Kugel mit einem Durchmesser von 200 mm und einem 50 mm Fenster mit Diffuser. Lichtquelle ist eine 50 W Quarzhalogenlampe. Die Lampe ist auf das Normal der PTB rückführbar. Der Kalibrierbereich liegt standardmäßig zwischen 380 nm und 2500 nm. Im sichtbaren Spektrum dient sie zum Kalibrieren eines Messbereichs von 380 – 800 nm.[367]

Leuchttechnische Daten:	Helligkeit	18 000 cd m^{-2}
	Farbtemperatur	3200 K
	Farbwert	x = 0,4262
		y = 0,4077



Abbildung 71: Bentham Kalibrierlampe SRS8[368]

Die Firma Bentham erläutert auf ihrer Webseite zum Einsatz der Kalibrierlampe SRS8:

> *"Spectral radiance is probably the most common spectroradiometric measurement, especially in the visible region and is most easily visualised as surface brightness. It is useful for characterising displays.*
>
> *In order to measure spectral radiance which has the units W. m-2 sr-1 nm-1 we need to be able to measure the flux emitted per nm into a known solid angle by a known area of the source.*

366 Quelle: URL http://www.bentham.co.uk/pdf/Tel301.pdf [15.3.2010].
367 Vgl. URL http://www.bentham.co.uk/srs8.htm [15.3.2010].
368 Quelle: URL http://www.bentham.co.uk/srs8.htm [15.3.2010].

…this can be achieved using the TEL301 telescope.
The solid angle w is set by the diameter of the telescope lens and its distance to the source. The area of the screen from which light is measured is determined by the size of the aperture used in the telescope. For radiance measurement it is essential that the element of the screen actually measured is determined only by the aperture. In practice this is easily achieved by ensuring that the image of the source produced at the aperture overfills the aperture.
The system is calibrated by measuring from a source of known spectral radiance (Bentham SRS8) using the selected aperture. Once again it is essential that the image of the source overfills the aperture.
Accurate measurement of luminance from most sources also requires control of the viewing direction. For lambertian sources (e.g. SRS8) the viewing direction does not matter as the area viewed increases at the same rate as the output in the view direction decreases. (The same effect makes the full moon appear as a flat disc).
Most display devices, however, are not lambertian and show a variation in output as a function of viewing direction which is much greater than that due to the cosine law.
In these cases, it is important to ensure that a constant (usually normal) view direction is used."[369]

6.3.8 Xenonlampe Bentham IL7S

Lichtquelle in dieser Lampe ist eine 150 W Xenonlampe mit dem größten Output im Wellenlängenbereich von 250 nm – 1000 nm. Diese kalibrierte Lampe enthält verschiedene Emissionslinien. Sie wurde für eventuelle Vergleichsmessungen eingesetzt.



Abbildung 72: Bentham Xenonlampe IL7S[370]

Abbildung 73 zeigt zum Vergleich das Reflexionsspektrum des Opdi (siehe 6.3.13) beleuchtet mit der Xenon- und der Philips Tornado Tageslichtlampe.

[369] Zitat von Produktbeschreibung Kalibrierlampe SRS8 URL http://www.bentham.co.uk/srs8.htm [15.3.2010].
[370] Quelle: URL http://www.bentham.co.uk/IL1.htm [15.3.2010].

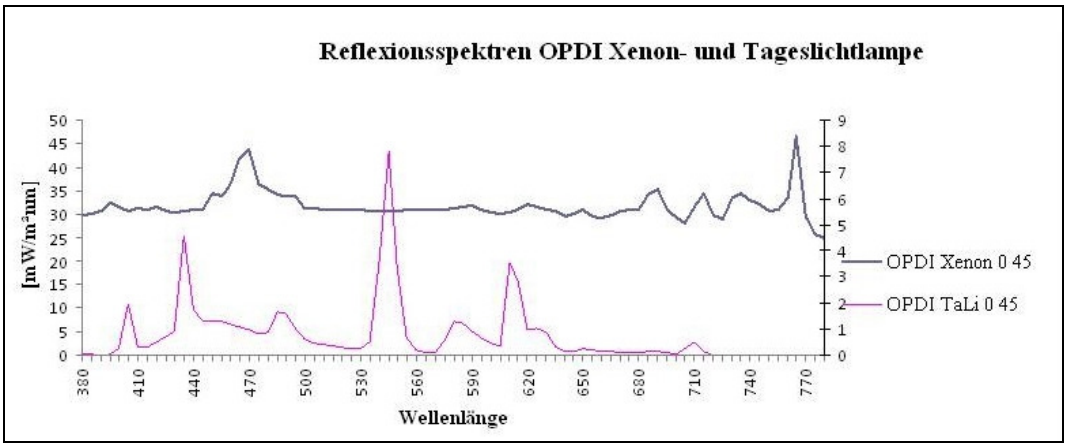


Abbildung 73: Reflexionsspektren Xenon- und Tageslichtlampe

6.3.9 Software BenWin+

Die Software BenWin+ wird von der Firma Bentham geliefert und dient zur Ansteuerung von ihren Doppelmonochromatoren. Je nach Version wird der Software ein entsprechendes Konfigurationsfile eingespielt. Sie ist komfortabel handhabbar und erlaubt die Spektren direkt in MS Excel zu übernehmen oder auch direkt Farbdiagramme auszugeben.

6.3.10 Schrittmotor MS 140E Mercury DLL

Der Schrittmotor MS 140E Mercury DLL der Firma PI[371] ist mit einem programmierbaren DC–Motor Controller (C-862 Mercury) ausgestattet. Über die mitgelieferte Software PI Motion kann der Schrittmotor angesteuert werden.

6.3.11 Präzisionsdrehtisch M–038 DG

Der Präzisionsdrehtisch der Firma Physik Instrumente(PI) GmbH & Co. KG verfügt über einen Schneckenantrieb und erreicht Winkelgeschwindigkeiten bis zu 6°/s. Er hat einen Durchmesser von 100 mm, sein Rotationsbereich beträgt 360°, die kleinste Schrittweite beträgt 3,5 µrad und das maximale Drehmoment ± 6 Nm. Der Stellbereich ist in beide Richtungen kontinuierlich ausgeführt. Er verfügt über eine Schnittstelle zur Ansteuerung über einen Schrittmotor.

6.3.12 Canon Power Shot 520

Die Canon Power Shot 520 ist eine vier Megapixel Camera, die per Software über einen PC (über USB-Anschluss) ferngesteuert ausgelöst und außerdem extern mit Strom versorgt werden kann. Über die Ansteuerungssoftware hat man die Möglichkeit Werte für Weißabgleich (Tageslicht, Wolkig, Kunstlicht, Leuchtstoff, Leuchtstoff H), Empfindlichkeit, Verschlusszeiten, Kompression und Zoom einzustellen. Die Ausgabe der Aufnahmen erfolgt im Jpeg - Format[372] entweder auf einer SD–Card oder über die Software direkt auf dem Computer. Die Camera verfügt über einen ½ Zoll CCD und ein Objektiv mit Weitwinkel und Teleobjektiv.

[371] Physik Instrumente(PI) GmbH & Co. KG.
[372] Entwickelt von der Joint Photographic Experts Group.

6.3.13 OP.DI.MA. Reflexionsstandard

Als Reflexionsstandard wurde der scheibenförmige ODM89-MD01 der Firma Gigahertz-Optik verwendet, der aus OP.DI.MA. Material besteht. Eine Seite ist in optischer Qualität ausgeführt. Der Durchmesser der Scheibe beträgt 31,75 mm und die Dicke 10,5 mm. Als Reflexionsgrad wird in den Spezifikationen 98 % für den sichtbaren Spektralbereich angegeben. Aus Zeitgründen wurde eine unkalibrierte Scheibe erworben.

Das OP.DI.MA. Material ist ein weißer Kunststoff, der Licht ausgezeichnet in alle Richtungen diffus reflektiert und sehr haltbar ist. Der diffuse Reflexionsgrad entspricht nahezu dem eines Lambert'schen Reflektors (siehe 6.3.2).

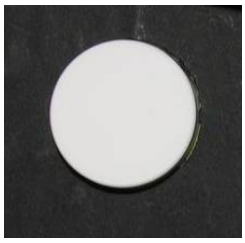


Abbildung 74: OP.DI.MA. Referenzstandard (Opdi)

Die Messungen mit der Strahldichteoptik haben ergeben, dass der erworbene OP.DI.MA. Reflexionsstandard (künftig kurz Opdi) im gesamten Spektralbereich einen Reflexionsgrad von 97 % aufweist (siehe Abbildung 75), also einem ideal diffusen Lambert'schen Reflektor entspricht.

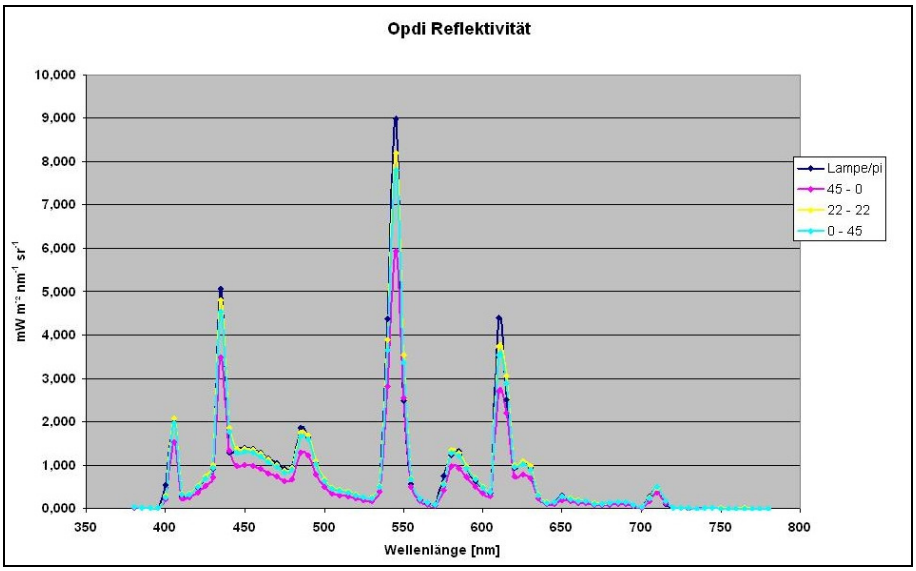


Abbildung 75: Rückstrahlung TaLi vom Opdi

6.3.14 PET–Block

Als Versuchsobjekt wurde nicht Haut gewählt, da für die Messungen mit der Ulbrichtkugel und der Strahldichteoptik sich das zu messende Objekt nicht bewegen darf, das wäre mit Hilfe der Haut eines Probanden nur sehr schwer möglich gewesen. Künstliche Haut ist selten, schwer herstellbar, teuer und nicht einfach zu bekommen.

Polyethylenterephthalat (kurz PET) ist ein Kunststoff der Polyesterfamilie und wird zur Herstellung von Behältern verwendet. Je nach Herstellungsart ist es kristallin oder amorph von Gestalt. Je nach Partikelgröße ist semikristallines PET transparent (<500 nm) opaque oder weiß (einige µm).[373]

Eigenschaften von PET:

- Es ist leicht greifbar und bearbeitbar.
- PET wird durch Make Up nicht verfärbt und dieses ist von PET wieder leicht entfernbar.
- Die Brechzahl von PET beträgt 1,58 – 1,64 und ist damit dem der Stratum corneum ähnlich.[374]
- Untersuchungen mit der Strahldichteoptik haben ergeben, dass PET eine der Haut ähnliche Reflektivität hat (siehe unten).

Im Wesentlichen wird mit deckendem Make Up gearbeitet, so dass die optischen Eigenschaften des Trägermaterials (Haut) nur geringsten Einfluss auf die Rückstrahlung des untersuchten Make Up haben.

Aufgrund der detaillierten Untersuchungen und guten Eigenschaften wurde deshalb PET zur Herstellung von Probenträgern für das Make Up gewählt.

6.3.14.1 Reflektivität von unbedecktem PET1

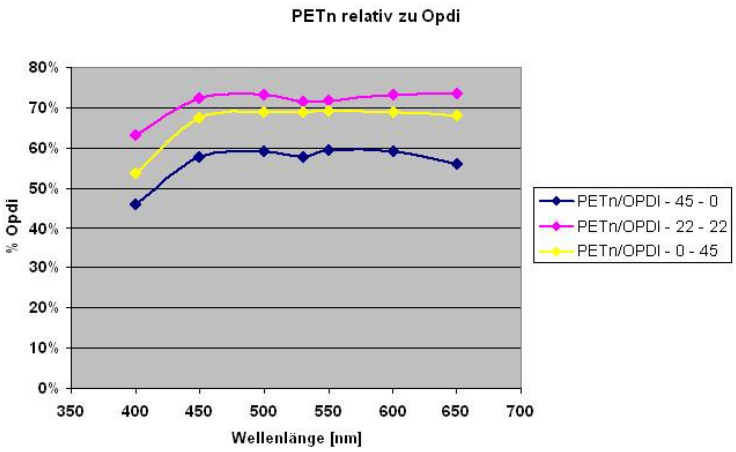


Abbildung 76: Reflektivität PETn relativ zu Opdi

Abbildung 76 zeigt die gemessene Rückstrahlung des unbedeckten PET im Verhältnis zu einem idealen Lambert'schen Reflektor (Opdi). Die blaue und die gelbe Linie, die für bestimmte Lichteinfallsrichtungen charakteristisch sind, zeigen, dass PET im Vergleich mit diesem eine Reflektivität von 60 % bis 70 % hat. Diese Werte stimmen mit den Erkenntnissen für die absolute und die wellenlängenabhängige Rückstrahlung, wie sie in der Literatur bei Yamada für Haut beschrieben werden, mit Ausnahme des blauen Wellenlängenbereichs, gut überein.[375]

[373] Vgl. URL http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate [4.8.2010].
[374] Vgl. URL http://www.goodfellow.com/G/Polyethylenterephthalat.html [5.1.2011].
[375] Vgl. Yamada (2004), S. 5ff.

6.3.14.2 Herstellung der PET Versuchsblöcke

Für die Experimente wurden zwei PET–Blöcke hergestellt. PET1, der mit einer leicht angerauten Oberfläche und mit „Störstellen“ versehen wurde, an denen die verschiedenen Produkte getestet wurden, und PET2. PET2 hat dieselbe Oberflächenbeschaffenheit wie PET1, aber keine Störstellen. Er diente als Referenzobjekt.

6.3.14.3 PET1

Abbildung 77 zeigt den PET1 mit den auf ihm angebrachten „Störstellen“, sie sind weiter unten beschrieben. In Abbildung 78 finden sich die Abmessungen des PET1 und der einzelnen „Störstellen“.

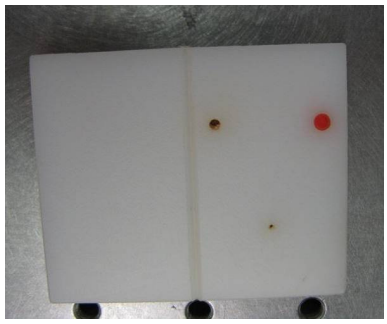


Abbildung 77: PET1-Block

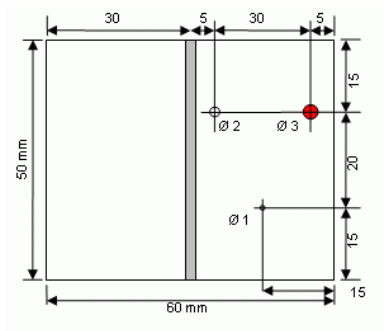


Abbildung 78: Planskizze des PET1-Blocks

Die Gesamtfläche des PET1 beträgt 31 cm² für die Falte und die Flächen links und rechts davon. Die Flächen links und rechts wurden aufgeraut, um die Textur von Haut zu simulieren. Die Falte (Rille in der Mitte) hat eine glatte Oberfläche.

Die Störstellen, oder „regions of interest“, das heißt, die auf dem PET1 vorhandenen Elemente, die für weitere Untersuchungen herangezogen wurden, werden im Weiteren mit der Bezeichnung ROI abgekürzt.

PET nackt
Jede Stelle am PET1, die nicht als Störstelle konzipiert ist.

Falte
In der Mitte des PET1 wurde eine Rille eingefräst, die eine tiefe Falte simuliert.

Dimension der Rille (Falte):	Tiefe:	1,73 mm
	Breite:	2,00 mm
	Öffnungswinkel:	60º



Abbildung 79: PET1 Faltenquerschnitt

Abbildung 79 zeigt die Falte im Querschnitt. Die einzelnen Produkte (Faltenauffüller, Make Up) wurden entweder mit dem Finger oder einem Pinsel an der Faltenwand aufgetragen.

Roter Fleck
Ein Modell für eine Entzündung der Haut, wurde durch den roten Fleck realisiert. Er besteht aus einem durchgehend rot gefärbten PET–Zylinder mit Durchmesser von 3 mm, der in den PET1 eingesetzt wurde. Der rote Fleck ist mit einer glatten Oberfläche versehen, was die gespannte Haut über einer Entzündung simuliert.

Andere Elemente
Um eventuelle Untersuchungen mit einem Pore Minimizer zu ermöglichen, wurden eine kleine (1mm) und eine größere (2 mm) Pore im rechten Teil des PET1 durch Bohren von entsprechenden Löchern angebracht.

6.3.15 ColorChecker

Verwendet wurde das ColorChecker® Classic-Target der Firma X-rite. Sie spezifiziert das Target folgendermaßen:

Das ColorChecker® Classic-Target enthält 24 speziell ermittelte Farbfelder, die sich über den gesamten Farbraum erstrecken mit Feldern in Natur- und Primärfarben sowie Graubalance- und chromatischen Feldern. Die Naturfarben entsprechen natürlichen Objekten, wie zum Beispiel der Haut, Blättern oder dem Blau des Himmels. Nicht nur die Farben, auch die Reflexionskurven dieser Farbfelder entsprechen nahezu ihren natürlichen Gegenstücken und reflektieren somit das auftreffende Licht auf dieselbe Weise. Das ermöglicht Reproduktion der Farben in fast allen Ausgabeprozessen und Lichtbedingungen.[376]

Das ColorChecker Target wurde zum Vergleich für die sRGB (siehe Abschnitt 6.5.5) eingesetzt.

6.3.16 Suprasil–Plättchen

Suprasil besteht aus einer speziellen Quarzglassorte, das für elektromagnetische Wellen bestimmter Wellenlängen durchlässig ist. Dazu gehört das sichtbare Lichtspektrum.[377] Das Suprasil–Plättchen wurde eingesetzt, um die Beschichtung der Ulbrichtkugel an der rückwärtigen Austrittsöffnung vor Verschmutzung zu schützen.

[376] URL http://www.xrite.com/product_overview.aspx?ID=820 [6.6.2010].
[377] Quelle: DI Marko Weber, Laser und optische Strahlung, Seibersdorf Labor GmbH.

6.3.17 Schwarzer optischer Samt

Der schwarze Samt, der dazu verwendet wurde, reflektierende Stellen am Tisch oder in der Umgebung abzudecken, hat im sichtbaren Wellenlängenspektrum einen Reflexionsgrad von nahezu null, im ultravioletten Bereich reflektiert er ungefähr 3% der eingefallenen Strahlung, im IR Bereich ist der Reflexionsgrad größer. Für die Experimente war das aber gegenstandslos.

6.3.18 Optischer Tisch

Der optische Tisch der Firma TMC ist mit einer Clean Top II Oberfläche ausgestattet. Die ferromagnetische Oberfläche erlaubt ein einfaches Fixieren der einzelnen verwendeten Objekte mit Hilfe von Magnetständern und Schrauben. Seine Masse verhindert ein etwaiges Vibrieren während der Experimentdurchführung.

6.3.19 Waage

Zur Messung der Masse der auf dem PET1 aufgetragenen Produkte wurde eine Waage der Firma Radwag angeschafft, mit der Produkte in Milligramm gemessen werden konnten (Messbereich 200 g ± 0,001 g).

Die Wägung der Isopore–Filterbelegung zur Messung des Absorptionskoeffizienten mit der Integrierenden Platte wurden mit einer Präzisionswaage der Firma Mettler Toledo im Aerosollabor im Keller der Uni Wien durchgeführt, deren Genauigkeit im µg Bereich liegt.

6.4 Versuchsdurchführung

Die verschiedenen Messungen der Bestrahlungsstärke mittels Ulbrichtkugel und der Strahldichte mittels Strahldichteoptik wurden in der Seibersdorf Labor GmbH, Abteilung Laser und Optische Strahlung, mit Unterstützung von DI Marko Weber durchgeführt.

6.4.1 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke der Philips Tornado Lampe

6.4.1.1 Aufbau und Durchführung der Messung

Mittels der Ulbrichtkugel UPK-150F wurde die spektrale Bestrahlungsstärke der Philips Tornado Lampe, deren Ausgangssignal über Quarzfaser in den Bentham DTMc300V Doppelmonochromator (siehe 6.3.4) eingekoppelt wurde, gemessen. Als Detektor fungierte der gekühlte Photomultiplier DH-30-Te von Bentham Instruments. Der Abstand zwischen Vorderkante Lampe und Eingangsport der Ulbrichtkugel betrug 60 cm. Der Messbereich lag zwischen 300 bis 900 nm. Die Auflösung zwischen 300 und 400 nm betrug 2 nm (Gitter mit 2400 Linien/mm) und zwischen 402 bis 900 nm 4 nm (Gitter 1200 Linien/mm).

Um Reflexionen vom optischen Tisch zu minimieren wurde zwischen Ulbrichtkugel und Lampe eine Blende so angebracht, dass die Ulbrichtkugel lediglich die Lampe „sah“ und kein vom optischen Tisch reflektiertes Licht in die Kugelöffnung fiel.

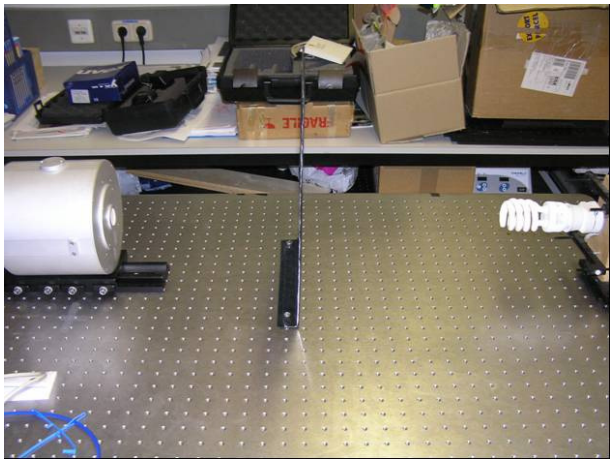


Abbildung 80: Messaufbau: Spektrale Bestrahlungsstärke Philips Tornado (TaLi)[378]

Die Messergebnisse finden sich in Abschnitt 6.5.1.

6.4.2 Reflexionsmessung der Proben

Diese Messung diente dazu, festzustellen, welche Änderungen sich für einen Betrachter im gemittelten Eindruck der Betrachtung einer Störstelle auf der Haut seines Gegenübers ergeben, wenn auf der Störstelle ein Produkt aufgetragen wird, das den Eindruck einer Störung abmindern soll. Die Messung mit einer Ulbrichtkugel wurde gewählt, weil sie das Licht im

[378] Quelle: DI Marko Weber, Laser und Optische Strahlung, Seibersdorf Labor GmbH.

ganzen Halbraum vor der Probe misst und so dem „gemittelten Eindruck“ des Betrachters, dessen Augapfel- und Kopfbewegungen dazu führen, dass er die Störstelle immer aus einem anderen Blickwinkel sieht, entspricht.

Das Licht, das von den Proben in den Halbraum davor zurückgestreut wird, wurde mittels der Ulbrichtkugel UPK-150F (siehe 6.3.2) und dem Bentham DTMc300V Doppelmonochromator (siehe 6.3.3) gemessen.

Das Coating der Ulbrichtkugel, das ideal diffus nach dem Lambert’schen Gesetz reflektiert, liefert bei Messung von einfallendem Licht die spektrale Bestrahlungsstärke (W m^{-2} nm^{-1}), die in den Halbraum (2π) davor ausgesandt wird. Nachdem die die Proben (PET1 mit Störstellen, bedeckt und unbedeckt mit Make Up) nicht ideal diffus reflektieren, sondern Licht in gewissen Wellenlängenbereichen absorbieren, werden die Messwerte in Bezug zu einem Standard gesetzt und liefern so das Reflexionsspektrum, das in den Halbraum davor zurückgeworfen wurde. Als Normal für die Messungen diente der Opdi.

Die Bestrahlungsstärkemessung der Proben zwischen 380 und 780 nm wurde mit der Ulbrichtkugel UPK–150F mit der Tageslichtlampe Philips Tornado (siehe 6.3.1) und für eventuelle nötige Vergleiche mit einer kalibrierten Xenonlampe (siehe 6.3.8) durchgeführt.

Dass der Strahl durch eine Linse kollimiert war, wirkte sich auf die Messergebnisse nicht aus, da bei dem Experiment Reflexionsmessungen gemacht und diese relativ zum Opdi als Normal vorgenommen wurden.

6.4.2.1 Aufbau des Experiments

Für die Messung wurde die Philips Tornado Lampe in einem lichtdichten Kasten eingebaut. Der Abstand zur Ulbrichtkugel betrug 90 cm. An der Vorderseite des Kastens wurde der Lichtaustritt durch eine Blende reduziert (siehe Abbildung 81).

Mittels einer plankonvexen Linse, einer weiteren Blende und einer Sammellinse wurde der Lichtstrahl so kollimiert, dass er in der Ulbrichtkugel keine Wände berührte und reflektiertes Licht nur von der an der Rückseite angebrachten Probe in die Kugel fallen konnte. Dabei hatte der Strahl einen kleineren Durchmesser als die Austrittsöffnung auf der Rückseite der Ulbrichtkugel.

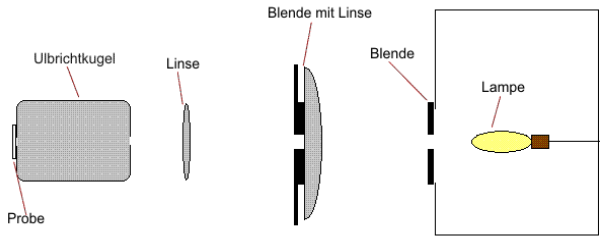


Abbildung 81: Schematischer Versuchsaufbau der Messung mit Ulbrichtkugel

Hinter der Austrittsöffnung wurden die Proben montiert. Das an der Probe reflektierte Licht fiel in die Ulbrichtkugel und wurde dort diffus gestreut und anschließend über die Messöffnung (90º zur optischen Achse) und einen Lichtleiter dem Bentham Doppelmonochromator zugeführt (siehe 6.3.3).

Um ein stabiles Spektrum zu erhalten wurde die Tageslichtlampe zwei Stunden vorgeheizt, während der restliche Aufbau vorbereitet wurde. Der Tisch wurde mit optischem Samt abgedeckt, um etwaige Reflexionen zu verhindern.

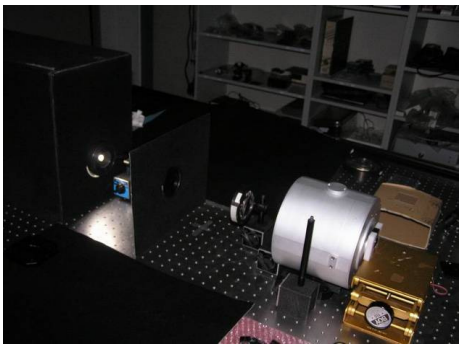


Abbildung 82: Versuchsaufbau mit Ulbrichtkugel

6.4.2.2 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden zuerst an einem 3mm Ausschnitt des PET1 durchgeführt (siehe Abbildung 83). Dazu wurde der PET mit schwarzem, optischem Samt (siehe 6.3.17) abgedeckt. Dieser Samt, versehen mit einem Loch (Durchmesser 3 mm), diente dazu, für das von den Proben in die Ulbrichtkugel reflektierte Licht einen gleich großen Ausschnitt zur Verfügung zu stellen (Durchmesser 3 mm), während die Öffnung der Ulbrichtkugel 25 mm im Durchmesser betrug. Diese Messung wurde für jeden Bereich des PET1, der von Interesse war (ROI: PET nackt, Falte, roter Fleck) durchgeführt.

Danach wurde die Messreihe der ROI nochmals ohne Samtbedeckung durchgeführt und die spektrale Bestrahlungsstärke für den Opdi ermittelt.

Die Messungen der Produkte wurden so durchgeführt, dass der PET1 mit Produkt versehen und einem Suprasil–Plättchen bedeckt, um Verschmutzung der Ulbrichtkugel zu vermeiden, die gesamten 25 mm Öffnung als Reflexionsfläche zur Verfügung hatte.

Die Bedeckung mittels Suprasil–Plättchen unterblieb bei Verwendung des optischen Samts, da er einen Kontakt der Produkte mit der OP.DI.MA. Beschichtung der Ulbrichtkugel verhinderte.

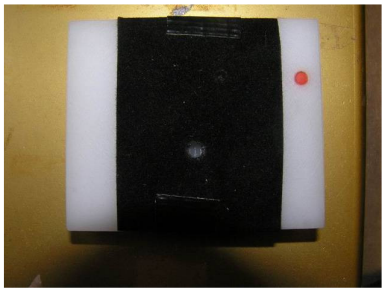


Abbildung 83: PET Block mit schwarzem Samt und 3 mm Loch

Eine Leerwertmessung diente dazu, die Werte für das statistische Rauschen zu ermitteln. Die Werte der Leerwertmessung wurden bei den Berechnungen von den Messwerten abgezogen.

Die Produkte wurden wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben auf den PET1 aufgetragen.

6.4.2.3 Messergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Reflexionsmessungen wurden von der Software BenWin+ für jede Messung in einer eigenen Exceldatei abgelegt. Die spektrale Bestrahlungsstärke der Proben wurde in 5 nm Schritten aufgezeichnet.

Die Messergebnisse, Beschreibung der Weiterverarbeitung, Auswertungen und Diskussion der Ergebnisse dieser Messungen finden sich in Kapitel 6.5.2.

6.4.3 Messung der spektralen Strahldichte mit CIE Farbkoordinaten

Um Aussagen über das von den Versuchsobjekten (Opdi, PET1 ohne und PET1 mit Produkte) zurückgestrahlte Licht machen zu können, wurden in Seibersdorf Messungen mit der Strahldichteoptik durchgeführt. Durch eine vor den Messungen durchgeführte Kalibrierung war es möglich die CIE–Farbkoordinaten (XYZ und Lab) zu bestimmen, die dazu dienten, Aussagen über geänderte Farbeindrücke zu machen.

6.4.3.1 Aufbau des Versuches

Zur Bestimmung der spektralen Strahlstärke kam die Philips Tornado Tageslichtlampe und für eventuelle Vergleichszwecke die Xenonlampe zum Einsatz. Sie wurden links und rechts neben der Strahldichteoptik aufgestellt, sodass Aufnahmen im 45° Winkel zu den Lampen und der Messoptik einfach und effizient eingestellt werden konnten. Abbildung 84 zeigt den Experimentaufbau mit seinen geometrischen Gegebenheiten. Das betrachtete Objekt (Opdi, PET1) wurde auf einem Drehtisch 20 cm vor der Optik angebracht.

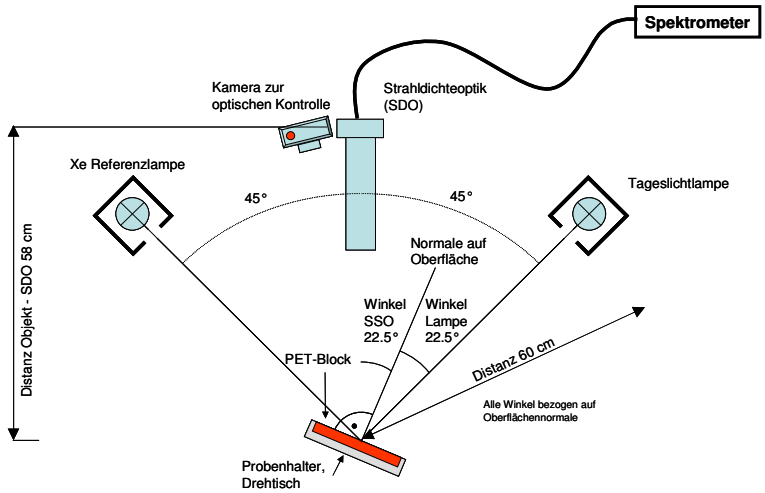


Abbildung 84: Abmessungen Versuchsaufbau Strahldichteoptik

Abbildung 85 zeigt den Aufbau. Die Lampen hatten eine genügend lange Vorlaufzeit, um stabil zu sein.

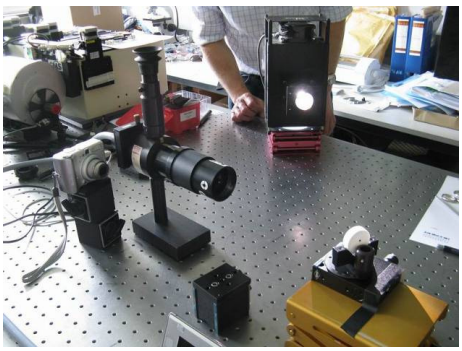


Abbildung 85: Versuchsaufbau Strahldichteoptik

Um den roten Fleck ohne Anteile des hellen PET1 untersuchen zu können, wurde für alle Messungen eine Blende von 1,17 mm für die Strahldichteoptik gewählt. Die Strahldichte wurde in den Bentham Doppelmonochromator eingekoppelt. Als Bandbreite wurden 5nm mit einer Schrittweite von 5 nm gewählt.

6.4.3.2 Durchführung der Messung

Der Experimentaufbau der Strahldichteoptik mit dem Bentham DMc 150V wurde vor der Messung kalibriert. Dazu wurde die Strahldichte Kalibrierlampe (siehe 6.3.7) im gleichen Abstand von der Strahldichteoptik, wie das später zu messende Objekt, angebracht (siehe Abbildung 86). Das Kalibrierfile wurde direkt an die Software BenWin+ übergeben und in die Messungen miteinbezogen. Durch diese Kalibrierung war es möglich für die gemessenen Spektren die CIE XYZ Farbkoordinaten zu ermitteln und auszugeben.

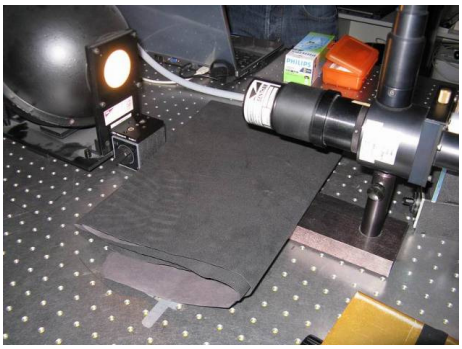


Abbildung 86: Kalibrieraufbau Strahldichteoptik

Die spektralen Strahldichten der einzelnen ROI auf dem PET wurden mit und ohne Produkte in jeweils drei Winkelstellungen zur Lichtquelle und zur Strahldichteoptik gemessen (0°, 22°, 45°). Als Referenz wurde die Strahldichte des Opdi gemessen. Gleichzeitig wurden Aufnahmen mit der Canon Power Shot 520A mit verschiedenen Belichtungszeiten gemacht (siehe 6.4.3.1). Für die Messungen kam sowohl die Philips Tornado Lampe als auch die Xenonlampe Bentham IL7S für eventuelle Vergleichszwecke zum Einsatz. Die spektralen Strahldichten der einzelnen Messdurchläufe wurden von der Software in einem Excelfile abgelegt. Jede Messung wurde intern vom Monochromator fünf Mal pro Wellenlänge durchgeführt und dann daraus der Mittelwert gebildet, dieser Wert wurde abgespeichert. Nachdem sich die Werte bei mehrmaliger Durchführung der gleichen Messung nicht änderten wurde aus Zeitgründen nur ein Messdurchlauf gemacht.

Der PET1 bzw. Opdi konnte auf dem Drehtisch in die entsprechende Winkelstellung zu Lampe und Strahldichteoptik gebracht werden (siehe Abbildung 85). Durch den hochklappbaren Spiegel im Okular wurde die Strahldichteoptik exakt auf die zu messende Stelle eingerichtet.

Vor und nach dem Auftragen des Make Up wurde der PET1 gewogen, um über die Masse die Schichtdicke des aufgetragenen Produkts feststellen zu können. Der Auftrag des grünen Abdeckstiftes ergab auf der Waage keinerlei Änderung der Masse. Die Schicht war ca. 1/100 mm dick. Der PET1 wurde vorsichtig mittels Auftrag durch den Finger mit Make Up bedeckt. In die Falte wurde es mit einem Pinsel vorsichtig eingestrichen, da ihre Form den sinnvollen Auftrag mittels Finger verhinderte.

Zur Namenskonvention der Exceldateien:

Bsp: PETn 0 45 TaLi.xlsx

Objekt	ROI	Winkel Lampe	Winkel Optik	Lichtquelle
PET	n	0	45	TaLi

Objekte: PET

PETf	PET Falte
PETf-e	PET Falte mit Make Up 1
PETn	unbedeckter PET
PETn-e	unbedeckter PET mit Make Up 1
PETgr	roter Fleck mit grünem Abdeckstift
PETgr-e	roter Fleck mit grünem Abdeckstift und Make Up 1
PETr	roter Fleck
FK Farbe	Farbfeld auf der Farbkarte

Die Auswertung dieser Messung wird in Abschnitt 6.5.3 und 6.5.4 besprochen.

6.4.4 Bildverarbeitung Canon Power Shot A 520

Bei den Messungen mit der Strahldichteoptik wurden die Messungen des vom Objekt zurückgeworfenen Lichts in drei Richtungen untersucht (0°, Glanzwinkel, 45°). Mit Hilfe dieses Experiments mit der Canon Power Shot 520 wurde es möglich, diese Daten zu unterlegen und die Winkelauflösung zu verdichten. Der objektive Betrachter Camera diente dazu, festzustellen, wie sich Farb- und Helligkeitseindrücke ändern.

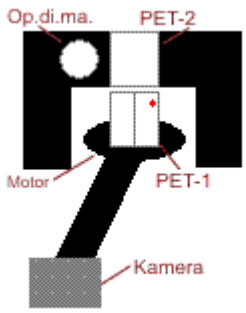


Abbildung 87: Skizze des Versuchsaufbaus mit Canon Camera

Der Versuchsaufbau wurde so gestaltet, dass die Aufnahmen mit der Camera in den verschiedenen Winkelstellungen automatisiert gemacht werden konnten. Dazu wurde ein Auslegearm mit Rad gebaut, der auf dem Präzisionsdrehtisch (siehe Referenz 6.3.11) befestigt wurde. Oberhalb der Drehachse des Präzisionsdrehtisches wurde eine Vorrichtung zum Befestigen des PET1 angebracht. Diese Vorrichtung konnte so verriegelt werden, dass sich der PET1 mit dem Arm mitdrehte (für diverse Winkel zur Lichtquelle und Winkel zur Camera 0°) oder der PET1 konnte in eine fixe Winkelstellung zur Lichtquelle gebracht werden und der Arm mit Camera war frei beweglich (siehe Abbildung 88). Die Maße des Versuchsaufbaus sind in Abbildung 89 angeführt. Über dem PET1 war der PET2 angebracht und links davon der Opdi (siehe Skizze in Abbildung 87).

Die Lichtquelle, die zum Einsatz kam, war die Philips Tornado Tageslichtlampe. Sie war in einem Abstand von 57 cm von den PET – Blöcken (Unterkante PET2, Oberkante PET1) und dem Opdi angebracht und um Streulicht zu minimieren mit einer Blende versehen.

Um die automatisierte Ansteuerung zu ermöglichen, war es nicht möglich, dass sich Lichtquelle, Camera und Versuchsobjekte in einer Ebene befanden, sondern die Camera wurde unterhalb der Lichtquelle auf einer Kreisbahn bewegt. Die Winkelkonvention bezüglich Winkel zur Lichtquelle und Winkel zur Camera sind in Abbildung 90 dargestellt. Befand sich die rechte Kante des PET1 näher bei der Lichtquelle wurden die Winkel zur Lichtquelle positiv gewertet, befand sich die linke näher bei der Lichtquelle dann negativ. Die gleiche Konvention wurde für Winkel zur Camera angenommen.

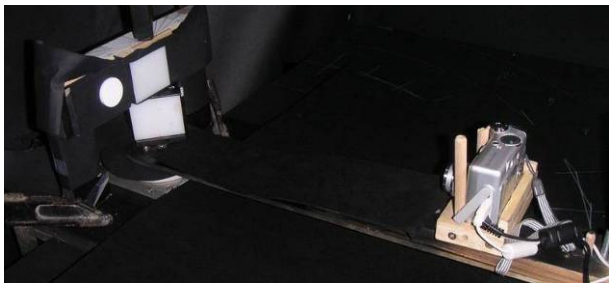


Abbildung 88: Messaufbau Canon Camera, PET fixiert, Cameraarm frei

Der gesamte Versuchsaufbau wurde mittels schwarzem Naturpapier und optischem Samt vor Streulichteinfluss geschützt.

Angesteuert wurde der Drehtisch über den Schrittmotor (siehe 6.3.10) und die dazugehörige Software. Es wurde ein Programm (Motor.exe, siehe 9.1) geschrieben, das als Eingabeparameter die Bilderserie, den Startwinkel des Arms, die Schrittweite und die Stoppposition des Arms erhielt. Der Arm wurde vom Motor an die entsprechende Stellung bewegt, das Programm gab das Auslösesignal an die Camera. Die Bilder wurden mit entsprechendem Namen an den PC übertragen und in einem Ordner abgelegt. Zusätzlich zu den Bildern wurde auch eine Info–Datei zu jedem Bild gespeichert, die Statusinformationen enthielt.

Die Aufnahmemodalitäten sind in Abschnitt 6.5.5 beschrieben.

Maße des Versuchsaufbaus für die Camera

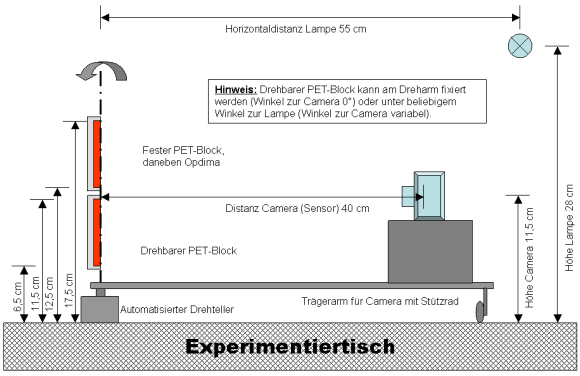


Abbildung 89: Abmessungen Versuchsaufbau Camera, Aufriss

Winkelangaben des Versuchsaufbaus

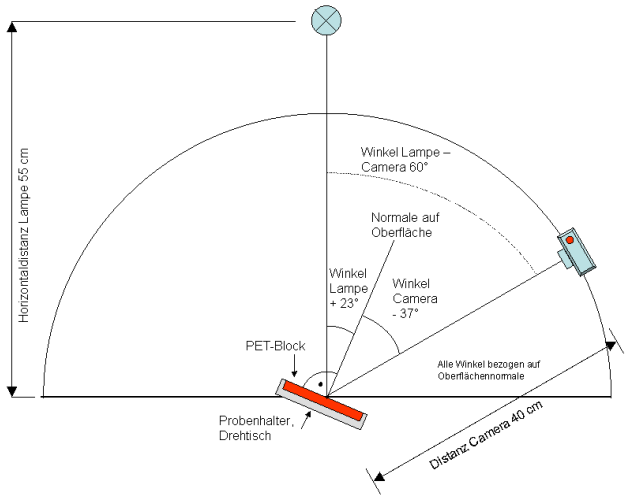


Abbildung 90: Winkel Versuchsaufbau Canon Camera, Grundriss

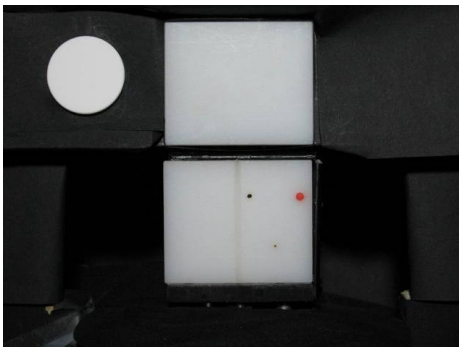


Abbildung 91: Aufnahme von Opdi, PET2, PET1 im Camerafokus

Abbildung 91 zeigt die Objekte, die die Camera während des automatisierten Ablaufs aufnimmt und die dann zur Auswertung zur Verfügung standen.

Die Bilder wurden unter folgender Konvention abgespeichert:

Serie	Datum [MMTTJJ]	Bildnummer

Bsp.: 044-032408-A_0001.JPG
Serie 44, Datum 24.3.2008, Bildnummer 1

6.5 Auswertung

Dieser Abschnitt enthält die Auswertung der einzelnen Messungen, die dazu dienten das Make Up und die anderen Produkte auf ihre zurückgestrahlte spektrale Intensität bzw. farbmetrischen Eigenschaften zu untersuchen.

6.5.1 Spektrale Bestrahlungsstärke der Philips Tornado

Die spektrale Bestrahlungsstärke der Philips Tornado Lampe wurde gemäß dem Versuchsaufbau, der in Abschnitt 6.4.1 beschrieben ist, durchgeführt. Die Messung brachten das in Abbildung 92 grafisch dargestellte Ergebnis.

Die spektrale Bestrahlungsstärke der Philips Tornado Lampe ist in Abbildung 92 dargestellt. Sie zeigt ausgeprägte Peaks bei 404 nm (8 mW m^{-2} nm^{-1}), 436 nm (21 mW m^{-2} nm^{-1}), 546 nm (29 mW m^{-2} nm^{-1}), und 612 nm (16 mW m^{-2} nm^{-1}).

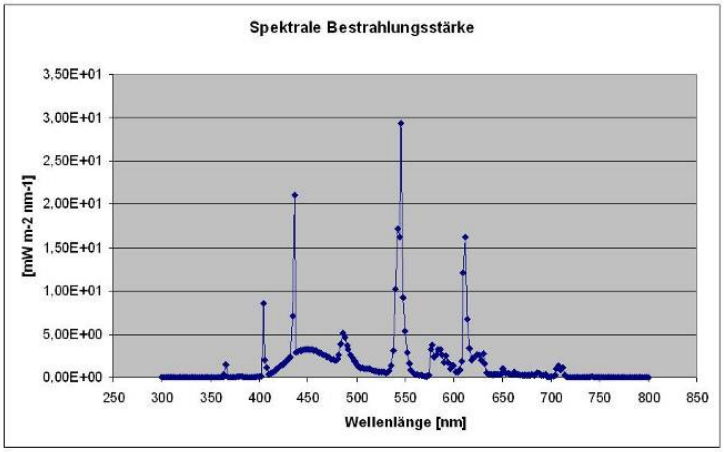


Abbildung 92: Spektrale Bestrahlungsstärke Philips Tornado CDL 865 (TaLi)

Für die zwei Peaks bei 486 nm und 578 nm lässt sich eine Bestrahlungsstärke von 4 – 5 mW m^{-2} nm^{-1} ablesen. Zwischen 442 nm und 482 nm steigt sie kurz an und sinkt dann auf 2 mW m^{-2} nm^{-1}.

6.5.2 Reflexionsspektrum der Proben

Das Reflexionsspektrum der Proben wurden wie in Kapitel 6.4.2 beschrieben, mit Hilfe einer Ulbrichtkugel und dem Spektrum des Opdi als Referenz ermittelt. Die Ulbrichtkugel misst das Licht, das von der Probe in den Halbraum davor ausgesandt wird, was dem gemittelten Eindruck eines Beobachters von einem Stück Haut seines Gegenübers entspricht.

Ergebnis der Messungen waren die spektralen Bestrahlungsstärken der Proben, die von der Software BenWin+ in einzelnen Exceldateien abgelegt wurden. Diese Werte wurden in Relation zur spektralen Bestrahlungsstärke des Opdi gesetzt, was die Reflexionskoeffizienten der Proben bei der entsprechenden Wellenlänge ergibt. Multiplikation dieser Koeffizienten mit einem beliebigen Lampenspektrum ergibt das spektrale Reflexionsspektrum der Proben.

Um die Daten mit den anderen im Labor für Laser und Optische Strahlung[379], durchgeführten Messungen zu vergleichen, wurden die Messwerte in die CIE XYZ–und Lab–Farbkoordinaten umgerechnet und der Farbabstand (die Farbänderung bzw. Helligkeitsänderung, siehe 3.2.1.11) ermittelt. Mit Hilfe dieser Werte wurden die Messergebnisse der einzelnen Proben zueinander in Beziehung gesetzt, um zu sehen welche Änderung des gemittelten Eindrucks sich für den Beobachter einer Störstelle auf der Haut seines Gegenübers ergibt.

Zur Erinnerung:

Farbabstand ΔE_{Lab}	Farbänderung ΔE_{ab}	Helligkeitsänd. ΔE_L
$\Delta E_{Lab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$	$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$	$\Delta E_L = \sqrt{(\Delta L)^2}$

6.5.2.1 Reflexionsspektrum PET und Make Up

Der Farbabstand von PET (PET1) zu den Make Ups ist in Tabelle 12 dargestellt. Der Farbabstand von Make Up 1 zum PET ist um 15 % höher als der von Make Up 2. Tabelle 13 gibt die Werte für die Farbänderung wieder , Tabelle 14 die für die Helligkeitsänderung. Man sieht, dass die Helligkeitsänderung von Make Up 1 zu PET sich stärker auswirkt, als die von Make Up 2 (hellgrau unterlegte Felder).

ΔE_{Lab}	PET	PET +MU1	PET + MU2
PET	0,0	27,6	24,1
PET + MU1	27,6	0,0	7,4
PET + MU2	24,1	7,4	0,0

Tabelle 12: ΔE_{Lab} PET und Make Up

Der Farbabstand der Make Ups zum Opdi wurde nicht gesondert dargestellt, das Verhältnis der Farbabstände von Make Up 1 und Make Up 2 zum Opdi sind gleich denen zum PET.

[379] Seibersdorf Labor GmbH.

ΔE_{ab}	PET	PET + MU1	PET + MU2
PET	0,0	23,9	22,5
PET + MU1	23,9	0,0	5,2
PET + MU2	22,5	5,2	0,0

Tabelle 13: ΔE_{ab} PET und Make-Up

Die Farb- bzw. Helligkeitsänderungen der Make Ups zueinander tragen gleich stark zu ihrem Farbabstand bei (dunkelgrau unterlegte Felder); im Detail Tab. 13: $5{,}2^2$ + Tab. 14: $5{,}3^2$ = Tab. 12: $7{,}4^2$

Hinweis: Zur Berechnung des Helligkeitsabstands wurde in den Tabellen der Wert der CIE L–Koordinate des Objekts in der Überschriftenzeile von der des Objekts in der ersten Spalte abgezogen *(Links – Oben)* (siehe Tabelle 14).

ΔE_L	PET	PET + MU1	PET + MU2
PET	0,0	13,9	8,5
PET + MU1	-13,9	0,0	-5,3
PET + MU2	-8,5	5,3	0,0

Tabelle 14: ΔE_L PET und Make Up

Zu Bedenken ist, dass der PET vom Farbton her weiß ist. Haut ist im Allgemeinen dunkler. Passendes Make Up sollte von der Farbe her immer dem Hautton der Benutzerin entsprechen. Make Up 1 wäre für dunklere Hauttypen, Make Up 2 für hellere geeignet. Eine Benutzerin von Make Up 1 neben einer Benutzerin von Make Up 2 würde auf Grund des Farbabstands von 7,4 (siehe Tabelle 12, dunkelgrau unterlegt) dunkler erscheinen.

Ergebnis: Make Up 1 ist objektiv (über die Messwerte) für dunklere Hauttypen geeignet, Make Up 2 für hellere. Eine Make Up Beraterin könnte über eine Farbmessung den Make Up–Ton dem Hautton der Benutzerin entsprechend anpassen. Erfahrungswerte zeigen, dass eine rein subjektive Beratung in einer Parfümerie nicht immer zum Ziel führt (passender Make Up–Ton), eine objektive Messung wäre zielsicherer.

6.5.2.2 Reflexionsspektrum PET mit rotem Fleck

Das Reflexionsspektrum des roten Flecks wurde unter verschiedenen Gegebenheiten untersucht.

- Auf dem unbedeckten PET, so dass der Fleck einen Teil der gemessenen Fläche ausmachte.
- Im Vergleich zum mit Make Up bedeckten PET.
- Die Messung mit dem optischen Samt und einem 3 mm Ausschnitt, der gerade die Fläche des roten Flecks frei lässt, wurde durchgeführt, führte jedoch zu keinem realistischen Ergebnis.

6.5.2.2.1 PET mit Rotem Fleck im Vergleich zu Opdi und PET allein

Ein Vergleich des Farbabstands (Tabelle 15) und der Helligkeitsänderung (Tabelle 17) zum Opdi von PET allein und von dem rotem Fleck auf dem PET zeigt, dass der rote Fleck für den gemittelten Eindruck eine Farbänderung (siehe Tabelle 16) und eine Helligkeitsänderung (siehe Tabelle 17) bewirkt, die sich prozentuell in etwa gleich auswirken (beide ca. 16 % Veränderung). Die a–Farbkoordinate vom rotem Fleck im Vergleich zum Opdi (dieser liegt am Weißpunkt) ist erwartungsgemäß in Richtung rot verschoben (Wert 2,6; siehe Tabelle 18).

ΔE_{Lab}	Opdima	PET	PET und roter Fleck
Opdi	0,0	25,3	29,6
PET	25,3	0,0	6,4
PET und roter Fleck	29,6	6,4	0,0

Tabelle 15: ΔE_{Lab} Opdi, PET, PET plus roter Fleck

Der Farbabstand zwischen PET mit rotem Fleck und PET ist mit einem Wert von 6,4 (dunkelgrau unterlegtes Feld Tabelle 15) für einen Beobachter objektiv eindeutig bemerkbar scheint aber nicht sehr groß zu sein. Eine Erklärung liefert die Untersuchung des Unterschieds der spektralen Reflexionskoeffizienten von PET mit rotem Fleck und PET allein, die am Ende dieses Abschnitts dargestellt ist.

ΔE_{ab}	Opdima	PET	PET und roter Fleck
Opdi	0,0	5,0	4,3
PET	5,0	0,0	4,6
PET und roter Fleck	4,3	4,6	0,0

Tabelle 16: ΔE_{ab} Opdi, PET, PET plus roter Fleck

ΔE_{L}	Opdima	PET	PET und roter Fleck
Opdi	0,0	24,8	29,2
PET	-24,8	0,0	4,4
PET und roter Fleck	-29,2	-4,4	0,0

Tabelle 17: ΔE_{L} Opdi, PET, PET plus roter Fleck

Die CIE Lab Farbkoordinate von PET mit rotem Fleck und PET unterscheiden sich in der a–Koordinate (rot – grün – Achse), wobei diejenige des PET mit rotem Fleck auf der roten Koordinatenachse, der PET allein auf der grünen zu liegen kommt.

Cie Lab	L	a	b
Opdi	101,2	0,0	0,0
PET	76,4	-1,8	-4,6
PET und roter Fleck	71,9	2,6	-3,4

Tabelle 18: Cie Lab Opdi, PET, PET und roter Fleck

Ein Vergleich der Reflexionskoeffizienten bei den verschiedenen Wellenlängen, zeigt, dass der PET mit rotem Fleck unter 590 nm bis zu 17 % weniger Licht reflektiert, ab 595 nm verschwindet der Unterschied im Reflexionskoeffizienten. Zwischen 715 und 780 nm gibt es Bereiche, wo der PET mit rotem Fleck bis zu 36 % mehr Licht als der PET allein reflektiert. Einen Ausreißer gibt es bei 755 nm, wo der rote Fleck um 29 % weniger Licht als der PET1 reflektiert.

6.5.2.2.2 PET mit rotem Fleck im Vergleich zu Make Ups

In diesem Abschnitt werden die Farbabstände von PET1 (in der Tabelle kurz PET) mit rotem Fleck im Vergleich zu PET1 mit den beiden Make Ups bedeckt betrachtet. Der PET1 mit rotem Fleck entspricht einer Störstelle auf der Make Up nicht gut haftet, die von mit Make Up bedeckter Haut umgeben ist.

ΔE_{Lab}	PET + MU1	PET + MU2
PET	27,6	24,1
PET und roter Fleck	23,1	21,1

Tabelle 19: ΔE_{Lab} PET mit rotem Fleck und Make Ups

Der Farbabstand von ungeschminktem PET1 zu geschminktem PET1 ist größer, als der von ungeschminktem PET1 mit Störstelle (roter Fleck) zu geschminktem PET1. Das dunklere Make Up 1 verringert in diesem Fall den Helligkeitsabstand mehr (27,6 – 23,1 = 4,5; 24,1 – 21,1 = 3), als das helle Make Up 2 (siehe Tabelle 19, grau unterlegte Felder). Das heißt, die Sichtbarkeit einer Störstelle im gemittelten Eindruck eines Betrachters sinkt, wenn sie von mit Make Up bedeckter Haut umgeben ist.

ΔE_{ab}	PET + MU1	PET + MU2
PET	23,9	22,5
PET und roter Fleck	21,1	20,7

Tabelle 20: ΔE_{ab} PET mit rotem Fleck und Make Ups

Ein ähnlicher Befund ergibt sich für die Farbänderung. Die Farbänderung von ungeschminktem PET1 zu geschminktem PET1 ist größer, als die von ungeschminktem PET1 mit Fehlstelle (roter Fleck) zu geschminktem PET1. Der gemittelte Eindruck um eine Hautirritation, der durch diesen Vergleich dargestellt wird, wird durch Make Up Auftrag verbessert. Wobei Make Up 1 geringfügig bessere Resultate erzielt (siehe Tabelle 20, grau unterlegte Felder).

Die CIE–Farbkoordinaten in Tabelle 22 zeigen, dass die b–Farbkoordinate (blau–gelb–Achse) der beiden Make Ups nahezu ident ist, die a–Farbkoordinate von Make Up 1 aber mehr im roten Bereich liegt, als die von Make Up 2.

ΔE_L	PET + MU1	PET + MU2
PET	13,9	8,5
PET und roter Fleck	9,4	4,1

Tabelle 21: ΔE_L PET mit rotem Fleck und Make Ups

Die Unterschiede der Helligkeiten des roten Flecks und der der Make Ups werden an ihrem Helligkeitsabstand zum PET sichtbar. Das hellere Make Up 2 hat sowohl zum PET1 allein, als auch zum roten Fleck eine geringere Helligkeitsabweichung (siehe Tabelle 21, grau unterlegte Felder). Besonders deutlich sieht man das an den L–Farbkoordinaten der Produkte und des PET mit rotem Fleck, die in Tabelle 22 in der ersten Spalte dargestellt sind.

CIE-Lab	**L**	**a**	**b**
PET + MU1	62,5	8,6	16,8
PET + MU2	67,8	3,4	17,3
PET und roter Fleck	71,9	2,6	-3,4

Tabelle 22: CIE–Lab PET mit rotem Fleck , PET mit Make Ups

Ergebnis: Da Haut dunkler als der PET ist, wird sich die Helligkeitsänderung einer Störstelle durch Make Up Auftrag je nach Hautton nicht so stark auswirken, speziell wenn das Make Up gut gewählt wurde. Die Störstelle (z.B. erhabene, gerötete Pustel) wird, wenn das Make Up an ihr nicht überall gleich gut haftet, sichtbar bleiben. Im Vergleich zu ungeschminkter Haut wird sie aber weniger deutlich hervortreten. Dies war speziell bei rötlichem Make Up zu erwarten.

6.5.2.3 Reflexionsspektrum Falte

Aus den Farbabständen, die in Tabelle 23 dargestellt sind, kann man sehen, dass die Falte im Verhältnis zur gesamt bestrahlten Fläche ohne Produkt für den gemittelten Eindruck einen kaum erkennbaren Farbabstand bewirkt. Mit den Produkten (hellgrau unterlegte Felder) ergibt der gemittelte Farbeindruck eines Betrachters einen gerade erkennbaren Unterschied zwischen Falte und Umgebung. Die Farbänderung (siehe Tabelle 24, hellgraue Felder) fällt bei beiden Produkten gering aus und beide führen zu einer gerade erkennbaren Helligkeitsreduzierung (siehe Tabelle 25, hellgraue Felder).

ΔE_{Lab}	PET	PET + MU1	PET + MU2	Falte Samt
PET	0,0	27,6	24,1	
PET und Falte	1,0	26,8	23,2	
PET Falte MU1	29,6	3,7	10,9	
PET Falte MU2	26,7	5,2	3,2	
Falte Samt				0,0
Falte MU1 Samt				2,7
Falte MU2 Samt				2,3

Tabelle 23: ΔE_{Lab} Falte mit Produkten und Samt

Die dunkelgrau unterlegten Felder zeigen die Messwerte mit optischem Samt, der nur einen 3 mm Ausschnitt für die Falte frei ließ (dunkelgrau unterlegte Felder). Die Falte wurde ohne und mit Make Ups vermessen. Die Ergebnisse mit Make Up 1 und Make Up 2 sind hier etwas schlechter, als die ohne optischen Samt (hellgrau unterlegte Felder), weil keine zusätzliche Rückstreuung vom PET vorhanden ist. Mit einem Farbabstand von 3,2 (ohne Samt) bzw. 2,3 (mit Samt) würde die Falte, die mit Make Up 2 bedeckt ist, im gemittelten Eindruck eines Betrachters gerade erkennbar werden. Die Falte mit Make Up 1 bedeckt, mit dem Farbabstand von 3,7 (ohne Samt) bzw. 2,7 (mit Samt) wäre für einen Betrachter deutlicher sichtbar.

ΔE_{ab}	PET	PET + MU1	PET + MU2	Falte Samt
PET	0,0	23,9	22,5	
PET und Falte	1,0	22,9	21,5	
PET Falte MU1	23,9	1,3	6,4	
PET Falte MU2	24,4	4,2	2,1	
Falte Samt				0,0
Falte MU1 Samt				2,1
Falte MU2 Samt				1,3

Tabelle 24: ΔE_{ab} Falte mit Produkten und Samt

Die Farbänderung zwischen Umgebung (mit und ohne Make Up) und Falte ist für einen Betrachter kaum erkennbar (Tabelle 24, hellgraue Felder). Der Vergleich der beiden Produkte auf die Falte aufgetragen, ohne die Umgebung mit zu betrachten (d.h. mit Samt, dunkelgrau unterlegte Felder), zeigt, dass Make Up 1 die Falte von der Farbe her stärker ändert, die Farbänderung von Make Up 2 dürfte einem Betrachter kaum auffallen.

ΔE_L	PET	PET + MU1	PET + MU2	Falte Samt
PET	0,0	13,9	8,5	
PET und Falte	0,1	14,0	8,7	
PET Falte MU1	-17,4	-3,5	-8,9	
PET Falte MU2	-10,9	3,0	-2,3	
Falte Samt				0,0
Falte MU1 Samt				1,7
Falte MU2 Samt				0,8

Tabelle 25: ΔE_L Falte mit Produkten und Samt

Die Helligkeitsänderung zwischen Umgebung (mit und ohne Make Up) und Falte ist für einen Betrachter bei Make Up 1 stärker erkennbar (Tabelle 25, hellgraue Felder). Der Vergleich der beiden Produkte auf die Falte aufgetragen, ohne die Umgebung mit zu betrachten (mit Samt, dunkelgrau unterlegte Felder) zeigt, dass es einen gering wahrnehmbaren Helligkeitsunterschied gibt.

Ergebnis: Der gemittelte Eindruck eines Betrachters, der eine Falte seines Gegenübers ungeschminkt oder geschminkt sieht, lässt die Falte für ihn von der Umgebung nicht übermäßig hervortreten. Das Gesamtbild der Haut schaut für ihn mit und ohne Make Up nahezu unverändert aus.

6.5.3 Spektrale Strahldichte der Proben

Die Ergebnisse der spektralen Strahldichte wurden auf zwei Arten untersucht. Dieser Abschnitt zeigt die spektralen Verläufe der Daten, die im Weiteren für die Modellierung des Make Up von Interesse waren. Im nächsten Abschnitt werden die farbmetrischen Ergebnisse verschiedenster Messungen (PET1, ROI[380], Make Ups, Faltenauffüller, Abdeckstift) zueinander in Beziehung gesetzt.

6.5.3.1 Reflektivität von Opdi und PET

Über die Messungen mit der Strahldichteoptik konnten Aussagen über die Reflektivität des Opdi und des PET1 gemacht werden. Abbildung 75 auf Seite 111 zeigt die vom Opdi zurückgestrahlte spektrale Strahldichte. Für einen ideal lambertschen Reflektor gilt, dass die Intensität des rückgestrahlten Lichts $1/\pi$ der eingestrahlten Intensität beträgt.

[380] Zur Erinnerung: ROI - regions of interest (freie Fläche, Falte, roter Fleck).

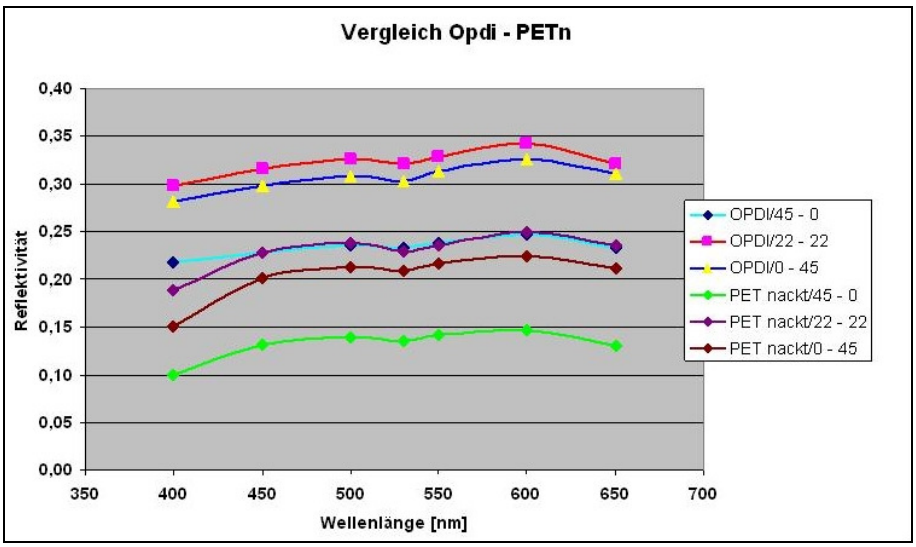


Abbildung 93: Vergleich Reflektivität Opdi - PET

Aus Abbildung 93 (sie zeigt die vom Opdi rückgestrahlte Strahldichte im Verhältnis zur von der Lampe eingestrahlten) ist erkennbar, dass der Opdi am Glanzwinkel und für normalen Lichteinfall dieses erfüllt.

Die Reflektivität des PET–Blocks, die ebenfalls der Abbildung 93 entnommen werden kann, beträgt zwischen einem und zwei Drittel der des Opdi.

6.5.3.2 PET mit Make Up 1

Die Messergebnisse der Strahldichteoptik für den PET1 mit aufgetragenem Make Up sind in Abbildung 94 dargestellt. In jeder Messsituation (Winkelstellung zur Lampe bzw. zur Strahldichteoptik) liegen die Werte erwartungsgemäß für das auf dem PET aufgetragene Make Up 1 unter denen des PET1, da es dunkler als dieser ist und nicht alles Licht zurückreflektiert. Im langen Wellenlängenbereich (ab 620 nm) reflektiert das rötliche Make Up mehr der einfallenden Lichtintensität, als im kurzen Wellenlängenbereich.

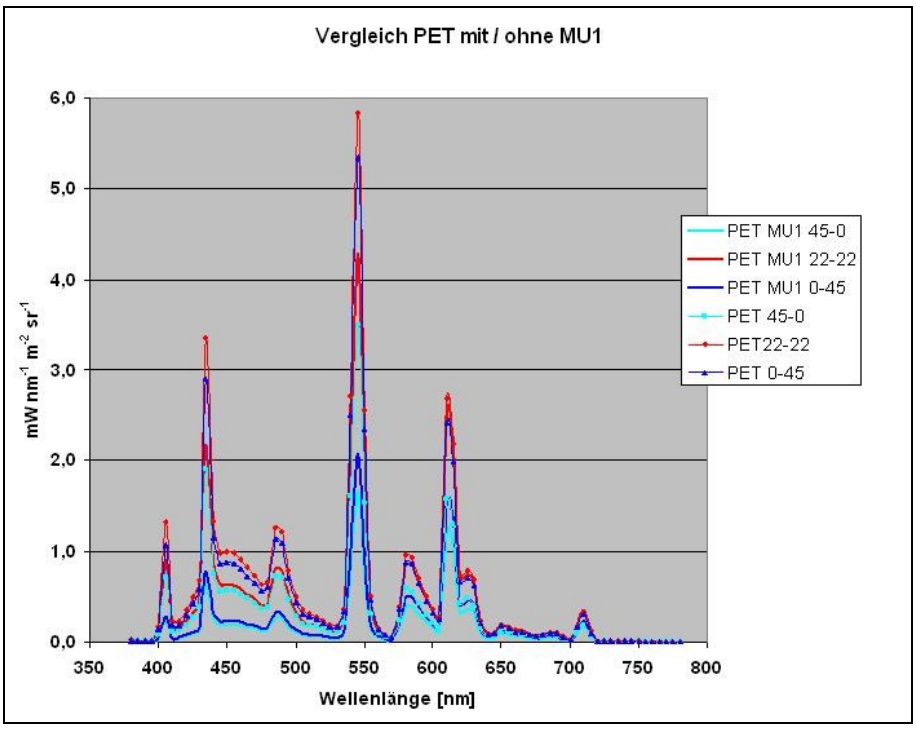


Abbildung 94: Rückstrahlung TaLi - PET mit und ohne Make Up 1

Diese Rohdaten wurden für die Modellierung verwendet. Für sie wurden für die vorhandenen Wellenlängen der durchgeführten Extinktionsmessung Stützpunkte ermittelt (siehe Abschnitt 7.3.2).

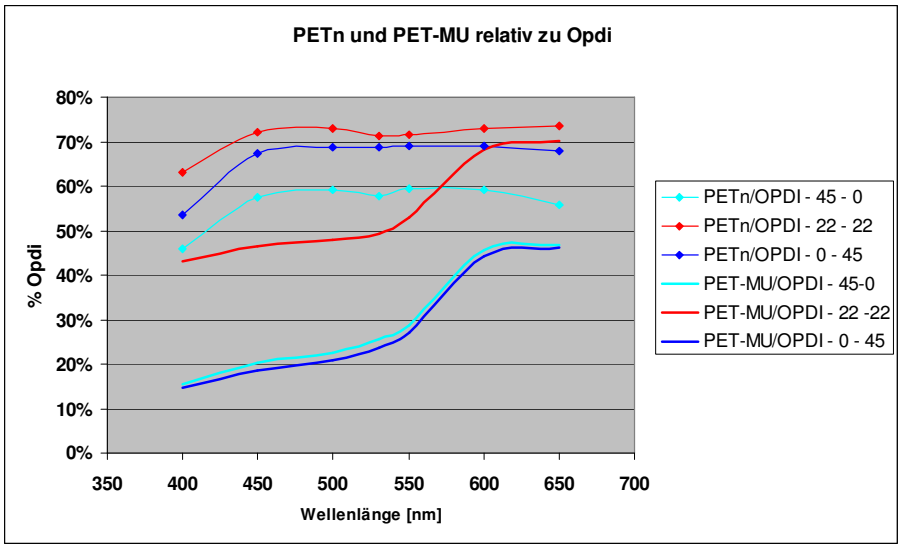


Abbildung 95: Rückstrahlung TaLi - PET mit und ohne Make Up1 relativ zum Opdi

Die spektrale relative Reflexion von unbedecktem (gekennzeichnet mit PETn) und mit Make Up 1 (gekennzeichnet mit PET–MU) bedecktem PET1 bezogen auf den Opdi sind in Abbildung 95 ablesbar.

6.5.4 Auswertung der farbmetrischen Ergebnisse der spektralen Strahldichtemessung

Der Aufbau und die Versuchsdurchführung dieser Messung sind in Abschnitt 6.4.3 beschrieben. Sie dienten dazu, Aussagen über den gerichteten Farbeindruck eines Beobachters machen zu können.

Die Daten, die von der Software BenWin+ geliefert wurden, enthielten die CIE-xyz und -XYZ Farbkoordinaten. Um festzustellen, welche Änderungen sich mit und ohne Produktauftrag bei den ROI ergaben, wurden die XYZ Werte in CIE Lab Werte umgerechnet (siehe 3.2.1.7). Mittels letzterer wurde der Farbabstand ΔE_{Lab} (siehe 3.2.1.11), die Farbänderung ΔE_{ab} und die Helligkeitsänderung ΔE_L ermittelt. Die Ergebnisse werden im Weiteren diskutiert.

ΔE_{ab} und ΔE_L wurden gesondert betrachtet, um Angaben darüber machen zu können, ob eine geänderte Wahrnehmung auf eine Verschiebung der Farbe oder auf eine Helligkeitsänderung zurückzuführen ist.

Die Namenskonvention zu den Dateien ist in Abschnitt 6.4.3.2 beschrieben.

6.5.4.1 Unbedeckter PET

ΔE_{Lab}	**PETn 0 45 TaLi.xlsx**	**PETn-e 0 45 TaLi.xlsx**	**PETn 22 22 TaLi.xlsx**	**PETn-e 22 22 TaLi.xlsx**	**PETn 45 0 TaLi.xlsx**	**PETn-e 45 0 TaLi.xlsx**
PETn 0 45 TaLi.xlsx	0	33,5	3,4	14,2	5,1	31,9
PETn 22 22 TaLi.xlsx	3,4	35,3	0,0	15,3	7,0	33,7
PETn 45 0 TaLi.xlsx	5,1	30,0	7,0	12,4	0,0	28,5

Tabelle 26: ΔE_{Lab} unbedeckter PET

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

Aus den Farbabständen in dieser Tabelle wird ersichtlich, dass sich die Farbwerte des PET verschieben (grau unterlegte Zellen), wenn der Lichteinfall unter verschiedenen Einstrahlungswinkeln den PET beleuchtet. Fällt das Licht unter 22° oder 45° auf den PET ein, kommt es zu einer Änderung des Farbabstands. Wobei aus Tabelle 38 und Tabelle 39 abzulesen ist, dass es sich dabei nicht in erster Linie um eine Farb- sondern um eine Helligkeitsänderung handelt (ΔE_{ab} ist 0,6 und 2,5; ΔE_L ist 5,1 bzw. 6,5). Dies war zu erwarten, da weniger Licht einfällt.

Die gemessenen CIE XYZ Farbkoordinaten zeigen eine Reduzierung bei Y von 65 % wenn die Lichtquelle unter 45° zum PET steht. Laut Lambert Gesetz ist bei einem Lichteinfall unter 45° nur noch 70 % der Helligkeit vorhanden, was im Einklang mit diesem Ergebnis steht.

Wie die Daten zeigen, ist der PET1 kein idealer diffuser Reflektor (siehe Kapitel 6.3.14). Das Streulicht wird nicht über den gesamten Wellenlängenbereichbereich gleich gut zurückgestreut. Das Licht dringt in den PET1 ein und wird gestreut und zurückreflektiert, die dabei auftretende Energieminderung führt zu einer geringen Verschiebung des Farbeindrucks (siehe Tabelle 27)von grün zu rot (34 %, a–Achse Lab Farbraum) und von gelb zu blau (12 %, b–Achse Lab Farbraum).

Lab Verschiebung	**L**	**a**	**b**
PETn 0 45 TaLi.xlsx	86,45	-1,62	2,77
PETn 45 0 TaLi.xlsx	81,34	-1,08	2,44

Tabelle 27: Verschiebung Lab PET

Ein weiteres Indiz dafür, dass es bei verschiedenen Beleuchtungs– und Betrachtungswinkeln des PET zu einer Farbänderung kommt, ergibt sich durch einen Farbtemperaturvergleich von PET und Opdi, der in Tabelle 28 dargestellt ist.

Farbtemperatur		ΔT [K]
Opdi 0 45 TaLi.xlsx	6589	
PETn 0 45 TaLi.xlsx	6396	193
Opdi 22 22 TaLi.xlsx	6583	
PETn 22 22 TaLi.xlsx	6535	48
Opdi 45 0 TaLi.xlsx	6572	
PETn 45 0 TaLi.xlsx	6369	203

Tabelle 28: Farbtemperatur Opdi und PET

Am Glanzwinkel ist stärkere Reflexion und ein geringerer Streueffekt vorhanden, ebenfalls ein Hinweis auf den nicht ideal diffusen Reflektor. Daher kommt es hier zu einer geringeren Farbtemperaturverschiebung in Bezug auf den Opdi, der ein idealer diffuser Reflektor ist (siehe Kapitel 6.3.10). Die Verschiebung geht in Richtung niedrigere Wellenlängen, was sich auch in den veränderten Lab Werten (siehe Tabelle 27) ausgedrückt hat.

6.5.4.2 Roter Fleck mit und ohne Produkte

Tabelle 29 zeigt den Farbabstand ΔE_{Lab}, der sich auf Grund des Vergleichs der Lab Werte von den Messungen der Strahldichteoptik des roten Flecks ergeben hat.

ΔE_{Lab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx
PETn 0 45 TaLi.xlsx	0	33,5	3,4	14,2	5,1	31,9
PETn 22 22 TaLi.xlsx	3,4	35,3	0,0	15,3	7,0	33,7
PETn 45 0 TaLi.xlsx	5,1	30,0	7,0	12,4	0,0	28,5
PETgr 0 45 TaLi.xlsx	15,0	23,8	17,8	14,8	11,1	22,5
PETgr 22 22 TaLi.xlsx	6,6	28,8	9,7	12,6	4,3	27,3
PETgr 45 0 TaLi.xlsx	16,1	23,0	18,7	15,1	11,9	21,8
PETgr-e 0 45 TaLi.xlsx	34,4	3,5	36,1	22,4	30,5	4,4
PETgr-e 22 22 TaLi.xlsx	16,7	17,4	18,1	5,0	13,5	15,8
PETgr-e 45 0 TaLi.xlsx	33,2	2,5	34,9	20,9	29,5	2,9
PETr 0 45 TaLi.xlsx	66,8	38,7	67,3	52,9	64,0	39,6
PETr 22 22 TaLi.xlsx	41,3	21,6	41,4	27,7	38,9	21,4
PETr 45 0 TaLi.xlsx	68,3	40,3	68,8	54,3	65,5	41,2

Tabelle 29: ΔE_{Lab} Roter Fleck ohne und mit grünem Abdeckstift und Make Up

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

Da immer wieder auf verschiedene Kreuzungspunkte in der Tabelle Bezug genommen werden wird, wird jeweils eine Kopie davon mit entsprechenden Markierungen bei der Diskussion der interessanten Aspekte der Sichtbarkeit des roten Flecks eingefügt.

6.5.4.2.1 Roter Fleck unbedeckt

ΔE_{Lab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx
PETr 0 45 TaLi.xlsx	66,8	38,7	67,3	52,9	64,0	39,6
PETr 22 22 TaLi.xlsx	41,3	21,6	41,4	27,7	38,9	21,4
PETr 45 0 TaLi.xlsx	68,3	40,3	68,8	54,3	65,5	41,2

Tabelle 30: ΔE_{Lab} roter Fleck unbedeckt

Der Farbabstand des roten Flecks zum PET (hellgrau unterlegt) bzw. zum mit Make Up bedeckten PET (dunkelgrau unterlegt) liefert die größten Werte für Farbabstände aller betrachteten ROI (siehe Kapitel 6.3.14). Betrachtet man die Situation, wo das Make Up auf einem Pickel nicht haftet, sondern seine Umgebung bedeckt, so dass er sichtbar bleibt, ist ein Vergleich zwischen rotem Fleck und Make Up sinnvoll. Erkennbar ist bei Vergleich mit den reinen Farb– bzw. Helligkeitsänderungen in Tabelle 38 und Tabelle 39 (siehe Seite 142), dass sich die Farbänderung für den gerichteten Eindruck eines Betrachters sowohl beim unbedeckten, als auch beim mit Make Up bedeckten PET stark bemerkbar macht.

Laut Tabelle 39 beträgt die Helligkeitsänderung ΔE_L -35,6 wenn man den roten Fleck mit dem nackten PET bei Lichteinfall unter 0° vergleicht; Im Vergleich zum geschminkten PET ergibt sich ΔE_L zu –11,7. Das heißt der starke Helligkeitsunterschied im Vergleich zum unbedeckten PET wird durch das Make Up gedämpft. Bei Lichteinfall unter 45° ergibt sich nahezu das gleiche Ergebnis. Am Glanzwinkel führt die glatte Oberfläche des eingesetzten roten PET–Zylinders dazu, dass er nach dem Reflexionsgesetz Licht zurückwirft (ΔE_L geringer). Das kann je nach Störstellenbeschaffenheit auch bei einer Entzündung der Haut, bei der die Haut gerötet und gespannt ist, auftreten.

Der rote Fleck weist unter allen Beleuchtungswinkeln erwartungsgemäß eine starke Rotkomponente im a–Farbwert auf, sowie eine deutliche Gelbkomponente (b–Farbkoordinate, CIE Lab). Die Rotkomponente des Make Up am PET beträgt cirka ein Viertel dieses Werts. Das heißt, dass die a–Farbkoordinate im CIE Lab Farbdiagramm des Make Up ist im Vergleich mit der des roten Flecks in Richtung grün verschoben. Die b–Farbkoordinate des Make Up liegt im Vergleich mit der des roten Flecks näher in Richtung blau (siehe Tabelle 31).

CIE Lab MakeUp Roter Fleck	L	a	b
PETr 0 45 TaLi.xlsx	50,8	47,6	30,6
PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	62,6	11,7	22,1
PETr 22 22 TaLi.xlsx	67,8	32,2	17,4
PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	79,8	8,2	10,6
PETr 45 0 TaLi.xlsx	51,1	49,1	31,6
PETn-e 45 0 TaLi.xlsx	64,0	11,5	21,2

Tabelle 31: Vergleich CIE Lab Farbkoordinaten roter Fleck, Make Up

Make Up wird üblicherweise so gekauft, dass es von der Helligkeit her dem Hautton der Benutzerin entspricht, was bedeutet, dass die geringer ausfallende Helligkeitsänderung bei Betrachtung von einer Störstelle auf der Haut kaum eine Auswirkung haben sollte. Die Farbänderung wird sich eher auswirken, sie ist es, die zum unerwünschten Effekt der Sichtbarkeit der Störstelle führt.

Ergebnis: Änderungen in der Farbachse wirken sich für einen Betrachter meist störender aus, als Änderungen in der Helligkeitsachse (siehe 3.2.1.11). Die Messungen haben objektiv ergeben, was subjektiv jedem bekannt ist, dass eine Störstelle, um sich von der Umgebung nicht abzuheben, gut abgedeckt werden muss.

6.5.4.2.2 Roter Fleck mit grünem Abdeckstift mit und ohne Make UP

ΔE_{Lab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx
PETgr 0 45 TaLi.xlsx	15,0	23,8	17,8	14,8	11,1	22,5
PETgr 22 22 TaLi.xlsx	6,6	28,8	9,7	12,6	4,3	27,3
PETgr 45 0 TaLi.xlsx	16,1	23,0	18,7	15,1	11,9	21,8
PETgr-e 0 45 TaLi.xlsx	34,4	3,5	36,1	22,4	30,5	4,4
PETgr-e 22 22 TaLi.xlsx	16,7	17,4	18,1	5,0	13,5	15,8
PETgr-e 45 0 TaLi.xlsx	33,2	2,5	34,9	20,9	29,5	2,9

Tabelle 32: ΔE_{Lab} Roter Fleck mit Produkten

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

Der rote Fleck mit ca. 0,01 mm Schicht des grünen Abdeckstifts bedeckt zeigt gut erkennbare Farbabstände in Bezug auf den nackten PET (hellgrau unterlegte Felder). Wird sowohl der PET als auch der jetzt grüne Fleck mit Make Up bedeckt (dunkelgrau unterlegte Felder) ist der Farbabstand bei 0° und 45° zur Lichtquelle an den Rand der Wahrnehmbarkeitsgrenze gesunken (siehe 3.2.1.11).

Aus Tabelle 38 und Tabelle 39 wird ersichtlich, dass außer am Glanzwinkel Farb- und Helligkeitsänderung gleich am Farbabstand beteiligt sind. Am Glanzwinkel wirkt sich die Farbänderung (0,6) geringer aus, als die Helligkeitsänderung (-4,9). Dies ergibt sich hieraus, dass der rote PET Zylinder, der die Störstelle modellierte, eine glatte Oberfläche hatte. Durch Auftrag des Abdeckstiftes, wurde die Oberfläche rauer und damit wurde der Glanzeffekt vermindert.

Ergebnis: Der grüne Abdeckstift allein kann keine Reduzierung der Sichtbarkeit einer roten Störstelle bewirken. Über dem grünen Abdeckstift aufgetragenes Make Up lässt eine Störstelle im Vergleich zur Umgebung verschwinden.

6.5.4.3 Falte mit und ohne Produkt

Tabelle 33 zeigt den Farbabstand ΔE_{Lab}, der sich auf Grund des Vergleichs der Lab Werte von zwei Messungen der Strahldichteoptik der Falte ergeben hat.

ΔE_{Lab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx	PETf 0 45 TaLi.xlsx	PETf 22 22 TaLi.xlsx	PETf 45 0 TaLi.xlsx
PETn 0 45 TaLi.xlsx	0,0	33,5	3,4	14,2	5,1	31,9	2,7	6,9	7,7
PETn 22 22 TaLi.xlsx	3,4	35,3	0,0	15,3	7,0	33,7	5,1	9,4	10,5
PETn 45 0 TaLi.xlsx	5,1	30,0	7,0	12,4	0,0	28,5	2,6	2,9	4,9
PETf 0 45 TaLi.xlsx	2,7	31,9	5,1	13,4	2,6	30,3	0,0	4,6	5,9
PETf 22 22 TaLi.xlsx	6,9	27,9	9,4	11,5	2,9	26,4	4,6	0,0	2,4
PETf 45 0 TaLi.xlsx	7,7	26,5	10,5	10,2	4,9	25,0	5,9	2,4	0,0
PETf-e 0 45 TaLi.xlsx	39,3	8,6	41,0	27,7	35,2	9,9	37,3	33,1	32,2
PETf-e 22 22 TaLi.xlsx	44,3	15,4	46,0	33,5	39,9	16,6	42,2	37,9	37,2
PETf-e 45 0 TaLi.xlsx	52,8	22,3	54,4	41,7	48,4	23,8	50,7	46,4	45,7

Tabelle 33: ΔE_{Lab} Falte mit und ohne Produkt

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

Da immer wieder auf verschiedene Kreuzungspunkte in der Tabelle Bezug genommen werden wird, wird jeweils eine Kopie davon mit entsprechenden Markierungen bei der Diskussion der interessanten Aspekte der Sichtbarkeit der Falte eingefügt.

6.5.4.3.1 Falte unbedeckt

ΔE_{Lab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx
PETf 0 45 TaLi.xlsx	2,7	31,9	5,1	13,4	2,6
PETf 22 22 TaLi.xlsx	6,9	27,9	9,4	11,5	2,9
PETf 45 0 TaLi.xlsx	7,7	26,5	10,5	10,2	4,9

Tabelle 34: ΔE_{Lab} Falte ohne Make Up

Die Farbabstände in Tabelle 34 (grau unterlegte Felder) zeigen, dass die unbedeckte Falte am Glanzwinkel deutlich sichtbar wird und bei direktem Lichteinfall und Betrachtung unter 45° kaum erkennbar. Auch bei Lichteinfall unter 45° und Betrachtung normal zur Falte wird sie deutlich erkennbar.

Aus den Farbänderungswerten in Tabelle 40 und den Helligkeitsänderungswerten in Tabelle 41 kann man ablesen, dass außer beim Lichteinfall unter 45° die Helligkeitsänderung den maßgeblichen Anteil am Farbabstand beiträgt. Signifikant ist die Helligkeitsänderung am

Glanzwinkel, was dadurch zu Stande kommt, dass das Licht auf die Falte fällt und nicht direkt in die Beobachtungsrichtung reflektiert wird, dadurch erscheint sie dunkler.

Bei streifendem Lichteinfall (45°) ist der Helligkeitsunterschied zwischen glattem Block und Falte geringer, hier kommt die Farbänderung signifikanter zum Tragen. Erklärbar wird das dadurch, dass der PET kein ideal diffuser Reflektor ist und dass auf Grund von Streuvorgängen zu einer Farbverschiebung kommt (siehe 6.5.4.1). Diese Verschiebung kommt in der Falte stärker zum Ausdruck.

Ein Farbtemperaturvergleich der Falte mit dem PET und dem Opdi zeigt, dass die Farbtemperaturänderung der Falte im Vergleich zum Opdi dreimal so groß ist, wie die des nackten PET beim Lichteinfall aus 45°.

Farbtemperatur		ΔT
PETf 45 0 TaLi.xlsx	5909	663
PETn 45 0 TaLi.xlsx	6369	203
Opdi 45 0 TaLi.xlsx	6572	

Tabelle 35: Farbtemperatur Falte

Ergebnis: Wesentlich für die Sichtbarkeit einer Falte ist der Lichteinfall und die Beobachtungsrichtung. Eine Falte führt zu einer geänderten Helligkeits- und einer geänderten Farbwahrnehmung.

6.5.4.3.2 Falte mit Make Up

ΔE_{Lab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx	PETf 0 45 TaLi.xlsx	PETf 22 22 TaLi.xlsx	PETf 45 0 TaLi.xlsx
PETf-e 0 45 TaLi.xlsx	39,3	8,6	41,0	27,7	35,2	9,9	37,3	33,1	32,2
PETf-e 22 22 TaLi.xlsx	44,3	15,4	46,0	33,5	39,9	16,6	42,2	37,9	37,2
PETf-e 45 0 TaLi.xlsx	52,8	22,3	54,4	41,7	48,4	23,8	50,7	46,4	45,7

Tabelle 36: ΔE_{Lab} Falte mit Make Up

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

In Tabelle 36 sind die Werte des Farbabstandes zwischen der mit Make Up 1 bedeckten Falte und dem mit Make Up 1 bedecken PET angegeben (dunkelgrau unterlegt). Der Unterschied am Glanzwinkel resultiert daraus, dass das Licht, das in die Falte leuchtet, nicht nach dem Reflexionsgesetz reflektiert wird, sondern innerhalb der Falte zwischen den Wänden mehrfach reflektiert. Es tritt eine Farbänderung von 9,2 auf (siehe Tabelle 40), signifikanter ist aber die Helligkeitsänderung von 32,2 (siehe Tabelle 41).

Der Farbabstand der unbedeckten Falte mit derjenigen, auf die Make Up aufgetragen ist (hellgrau unterlegte Felder in Tabelle 36), resultiert einerseits aus einer Helligkeitsreduktion bei

Vergleich von unbedeckter Falte zu bedeckter Falte (siehe Tabelle 37) andererseits aus der Farbverschiebung der CIE Lab–Farbkoordinate a in den roten Bereich und der Verschiebung der CIE Lab–Farbkoordinate b in den gelben Bereich.

CIE Lab Falte	L	a	b
PETf 0 45 TaLi.xlsx	83,8	-1,8	2,6
PETf-e 0 45 TaLi.xlsx	54,2	12,8	20,1
PETf 22 22 TaLi.xlsx	79,8	-1,8	4,9
PETf-e 22 22 TaLi.xlsx	47,6	12,6	18,7
PETf 45 0 TaLi.xlsx	80,1	-1,4	7,2
PETf-e 45 0 TaLi.xlsx	40,6	16,0	22,3

Tabelle 37: CIE Lab Farbkoordinaten Falte mit und ohne Make Up

Bei Vergleich der bedeckten Falte mit dem bedeckten PET tragen Helligkeitsänderung und Farbänderung bei Lichteinfall unter 0° und Betrachtung unter 45° zu gleichen Anteilen am resultierenden Farbabstand bei (siehe Tabelle 40 und Tabelle 41). Am Glanzwinkel und bei Lichteinfall unter 45° und Betrachtung unter 0° ist die Helligkeitsänderung aus bereits besprochenen Gründen höher als die Farbänderung.

Ergebnis: Durch Make Up Auftrag allein schafft man es nicht, eine Reduktion der Sichtbarkeit großer Falten zu erreichen. Die Helligkeits- und Farbänderung ist nach Make Up Auftrag bei tiefen Falten gegenüber der Umgebung ausgeprägter.

6.5.4.4 Farb– und Helligkeitsänderung bei rotem Fleck

In Tabelle 38 sind die Farbänderungswerte (siehe 3.2.1.11) des roten Flecks im Vergleich mit PET und PET mit Make Up eingetragen. Der Farbänderungswert gibt die Farbverschiebung auf der rot–grün und gelb–blau Achse an, im Gegensatz zum Farbabstand, der auch die Helligkeit berücksichtigt.

ΔE_{ab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx
PETn 0 45 TaLi.xlsx	0,0	23,5	3,1	12,5	0,6	22,6
PETn 22 22 TaLi.xlsx	3,1	24,7	0,0	13,0	2,5	23,8
PETn 45 0 TaLi.xlsx	0,6	23,4	2,5	12,3	0,0	22,6
PETgr 0 45 TaLi.xlsx	6,8	21,3	9,9	13,2	7,4	20,6
PETgr 22 22 TaLi.xlsx	3,7	22,2	6,8	12,6	4,3	21,4
PETgr 45 0 TaLi.xlsx	6,3	21,1	9,4	12,7	6,9	20,3
PETgr-e 0 45 TaLi.xlsx	21,7	2,1	22,7	10,0	21,6	1,3
PETgr-e 22 22 TaLi.xlsx	12,1	12,2	12,6	0,6	11,9	11,4
PETgr-e 45 0 TaLi.xlsx	21,9	2,3	22,9	10,1	21,8	1,5
PETr 0 45 TaLi.xlsx	56,5	36,9	56,2	44,2	56,2	37,3
PETr 22 22 TaLi.xlsx	36,8	21,0	36,3	25,0	36,5	21,1
PETr 45 0 TaLi.xlsx	58,4	38,6	58,1	46,1	58,1	39,1

Tabelle 38: ΔE_{ab} Roter Fleck mit und ohne Produkte

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

In Tabelle 39 sind die Helligkeitsänderungswerte (siehe 3.2.1.11) eingetragen. Der Helligkeitsänderungswert berücksichtigt nur die Helligkeitsverschiebung.

Die Helligkeitsänderung in Tabelle 39 wurde durch Differenz des L–Wertes des Objekts in der Überschrift von dem in der Linken Spalte ermittelt *(Links – Oben).*

Beispiel: L(PETr 0 45 TaLi.xlsx) - L(PETn 0 45 TaLi.xlsx) = 50,8 – 86,7 = - 35,6

ΔE_L	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx
PETn 0 45 TaLi.xlsx	0,0	23,9	-1,4	6,6	5,1	22,5
PETn 22 22 TaLi.xlsx	1,4	25,3	0,0	8,0	6,5	23,9
PETn 45 0 TaLi.xlsx	-5,1	18,8	-6,5	1,5	0,0	17,4
PETgr 0 45 TaLi.xlsx	-13,4	10,5	-14,8	-6,8	-8,3	9,1
PETgr 22 22 TaLi.xlsx	-5,5	18,4	-6,9	1,1	-0,4	17,0
PETgr 45 0 TaLi.xlsx	-14,8	9,1	-16,1	-8,1	-9,7	7,7
PETgr-e 0 45 TaLi.xlsx	-26,7	-2,8	-28,0	-20,1	-21,6	-4,2
PETgr-e 22 22 TaLi.xlsx	-11,5	12,4	-12,9	-4,9	-6,4	10,9
PETgr-e 45 0 TaLi.xlsx	-24,9	-1,0	-26,3	-18,3	-19,8	-2,4
PETr 0 45 TaLi.xlsx	-35,6	-11,7	-37,0	-29,0	-30,5	-13,1
PETr 22 22 TaLi.xlsx	-18,6	5,3	-20,0	-12,0	-13,5	3,9
PETr 45 0 TaLi.xlsx	-35,4	-11,5	-36,8	-28,8	-30,3	-12,9

Tabelle 39: ΔE_L roter Fleck mit und ohne Produkte

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

Auf einzelne Werte dieser Tabelle wurde in den vorhergehenden Abschnitten Bezug genommen.

6.5.4.5 Farb- und Helligkeitsänderungen bei der Falte

In Tabelle 40 sind die Farbänderungswerte (siehe 3.2.1.11) der Falte im Vergleich mit PET und Falte mit und ohne Make Up 1 dargestellt.

ΔE_{ab}	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx	PETf 0 45 TaLi.xlsx	PETf 22 22 TaLi.xlsx	PETf 45 0 TaLi.xlsx
PETn 0 45 TaLi.xlsx	0,0	23,5	3,1	12,5	0,6	22,6	0,3	2,1	4,4
PETn 22 22 TaLi.xlsx	3,1	24,7	0,0	13,0	2,5	23,8	3,1	5,0	7,1
PETn 45 0 TaLi.xlsx	0,6	23,4	2,5	12,3	0,0	22,6	0,7	2,5	4,8
PETf 0 45 TaLi.xlsx	0,3	23,7	3,1	12,8	0,7	22,9	0,0	2,3	4,6
PETf 22 22 TaLi.xlsx	2,1	21,9	5,0	11,5	2,5	21,1	2,3	0,0	2,4
PETf 45 0 TaLi.xlsx	4,4	19,9	7,1	10,2	4,8	19,1	4,6	2,4	0,0
PETf-e 0 45 TaLi.xlsx	22,5	2,2	23,5	10,5	22,4	1,7	22,8	21,1	19,2
PETf-e 22 22 TaLi.xlsx	21,3	3,5	22,2	9,2	21,2	2,8	21,6	19,9	18,1
PETf-e 45 0 TaLi.xlsx	26,3	4,2	27,1	14,1	26,2	4,6	26,6	24,9	23,0

Tabelle 40: ΔE_{ab} Falte mit und ohne Produkt

Legende: PETxxx yy zz TaLi.xlsx, **yy** = Winkel Lampe, **zz** = Winkel SDO **PETxxx** siehe folgend
PETn unbedeckter PET **PETn-e** PET mit MU1 **PETf** PET Falte
PETf-e PET Falte MU1 **PETr** roter Fleck **PETgr** roter Fleck gr. Abdeckstift
PETgr-e roter Fleck, gr. Abdeckstift, MU1

In Tabelle 41 sind die Helligkeitsänderungswerte (siehe 3.2.1.11) für die Falte eingetragen (Konvention siehe 6.5.4.4).

ΔE_L	PETn 0 45 TaLi.xlsx	PETn-e 0 45 TaLi.xlsx	PETn 22 22 TaLi.xlsx	PETn-e 22 22 TaLi.xlsx	PETn 45 0 TaLi.xlsx	PETn-e 45 0 TaLi.xlsx	PETf 0 45 TaLi.xlsx	PETf 22 22 TaLi.xlsx	PETf 45 0 TaLi.xlsx
PETn 0 45 TaLi.xlsx	0,0	23,9	-1,4	6,6	5,1	22,5	2,6	6,6	6,3
PETn 22 22 TaLi.xlsx	1,4	25,3	0,0	8,0	6,5	23,9	4,0	8,0	7,7
PETn 45 0 TaLi.xlsx	-5,1	18,8	-6,5	1,5	0,0	17,4	-2,5	1,5	1,2
PETf 0 45 TaLi.xlsx	-2,6	21,3	-4,0	4,0	2,5	19,8	0,0	4,0	3,7
PETf 22 22 TaLi.xlsx	-6,6	17,3	-8,0	0,0	-1,5	15,9	-4,0	0,0	-0,3
PETf 45 0 TaLi.xlsx	-6,3	17,6	-7,7	0,3	-1,2	16,1	-3,7	0,3	0,0
PETf-e 0 45 TaLi.xlsx	-32,2	-8,3	-33,6	-25,6	-27,1	-9,7	-29,6	-25,6	-25,9
PETf-e 22 22 TaLi.xlsx	-38,9	-15,0	-40,2	-32,2	-33,7	-16,4	-36,2	-32,2	-32,5
PETf-e 45 0 TaLi.xlsx	-45,8	-21,9	-47,2	-39,2	-40,7	-23,3	-43,2	-39,2	-39,5

Tabelle 41: ΔE_L Falte mit und ohne Produkte

Auf einzelne Werte dieser Tabelle wurde in den vorhergehenden Abschnitten Bezug genommen.

6.5.5 Auswertung der sRGB Daten (Canon Power Shot A 520)

Wie bereits in Abschnitt 6.4.4 erwähnt, wurde dieser spezielle Experimentaufbau mit der Canon Power Shot entwickelt, um Betrachtungen über Farbänderungen bei weiteren Winkeln durchführen zu können.

Exemplarisch wurden die sRGB–Daten, die durch die Camera geliefert wurden, in die XYZ– und Lab–Werte umgerechnet und Farbabstand, Farb– und Helligkeitsänderung für eine spezielle Situation ermittelt.

Bei den Farbkoordinaten konnte eine gute Übereinstimmung mit den mit der Strahldichte ermittelten Werten festgestellt werden. Primär dienten diese Versuche der Ermittlung der Farbverläufe (sRGB) über unterschiedliche Beleuchtungs– und Beobachtungswinkel.

6.5.5.1 Vorgangsweise

Mit Hilfe des Auswerteprogramms MakeUp.exe (siehe Kapitel 9.2) wurden die sRGB Werte der ROI aus den Aufnahmen, die mit der Canon Power Shot 520 gemacht wurden (siehe Kapitel 6.4.4), ausgelesen und in einer Textdatei (ROIdat.txt) abgelegt. Die Details zur Bestimmung der Werte durch das Programm finden sich im Kapitel 9.2. Es wurden die Helligkeit und die sRGB–Farbkoordinaten der einzelnen ROI, die auf den Bildern dargestellt waren, aus den einzelnen Pixel der Bilder ermittelt und mit ihrer Standardabweichung abgelegt. Die Textdatei wurde dann in Excel übernommen.

ROI	Bezeichnung
Opdi	OPDIMA
PET2	F_block
PET1 links	M_left1
PET1 rechts	M_right
Roter Fleck	M_red2x2
Falte	M_grv_all

Tabelle 42: Liste der ROI

Sämtliche dieser ROI waren auf jedem Bild abgebildet. Die Aufnahmesituation änderte sich je nachdem welches Produkt auf dem PET1 aufgetragen wurde.

Die sRGB Daten des Opdi wurden von jedem Bild ausgewertet und es wurde verifiziert, dass der objektive Farbeindruck (sRGB–Werte der Camera) dieses Referenzobjektes bei allen Aufnahmen innerhalb einer Toleranzbreite von ± 3 % der Werte der einzelnen Bilder schwankte. Damit war bei eventuell aufgetretenen geringfügigen Schwankungen der Lichtquelle und im Aufbau eine hinreichend genaue Übereinstimmung der Beleuchtungssituation für jedes Bild gewährleistet.

Es wurden zwei Messreihen durchgeführt. Für Messreihe eins wurde der PET1 mit oder ohne Produkte jeweils fixiert auf dem Arm (Winkel Lampe [aL] – 60° bis + 60°, Schrittweite 15°; Winkel Camera 0°), in drei verschiedenen fixen Stellungen zur Lichtquelle (aL - 0°; 22,5°; 45°) und diversen Winkeln zur Camera (Winkel Camera [aC] - 0° bis + 60, Schrittweite 15°)

aufgenommen. Die jeweilige Winkelsituation und welches Produkt auf dem PET1 aufgetragen wurde, ist in Tabelle 43 dargestellt.

Serie	Beleuchtungswinkel				Camerawinkel				Produkt
	aL fix	aL			aC fix	aC			
		Start	Step	Stop		Start	Step	Stop	
35		-60	15	60	0				Leer
36	0, 23, 45					0	15	60	Leer
37	0, 23, 45					0	15	60	FA1 + AS
38		-60	15	60	0				FA1 + AS
39		-60	15	60	0				FA2 + AS
40	0, 23, 45					0	15	60	FA2 + AS
41	0, 23, 45					0	15	60	MU2 + AS
42		-60	15	60	0				MU2 + AS
43		-60	15	60	0				MU1
44	0, 23, 45					0	15	60	MU1

Tabelle 43: Camera Serien, erste Messreihe

Bedeutung der Abkürzungen in der letzten Spalte: FA1 – Faltenauffüller 1, FA2 – Faltenauffüller 2, AS – Abdeckstift, MU1 – Make Up 1, MU2 – Make Up 2.

Die zweite Messreihe wurde durchgeführt, um vergleichbare Aufnahmen der Make Ups auf dem roten Fleck mit Make Up und Abdeckstift auf dem roten Fleck zu ermitteln. Da durch Messreihe eins bereits abgeklärt war, wie sich die Daten ändern, wenn der Winkel zur Lichtquelle verändert wird, wurde in Messreihe zwei der PET1 nur fixiert am Arm aufgenommen. Die jeweilige Winkelsituation und welches Produkt auf dem PET1 aufgetragen wurde, ist in Tabelle 44 dargestellt.

Serie	Winkel				Produkt
	aL			aC fix	
	Start	Step	Stop		
51	-60	15	60	0	Leer
52	-60	15	60	0	MU1
53	-60	15	60	0	MU2
54	-60	15	60	0	AS + AS rF
55	-60	15	60	0	MU1 + AS
56	-60	15	60	0	MU2 + AS

Tabelle 44:Camera Serien, zweite Messreihe

Die Bilder wurden unter folgender Konvention abgespeichert:

Serie	Datum [MMTTJJ]	Bildnummer

Bsp.: 044-032408-A_0001.JPG
Serie 44, Datum 24.3.2008, Bildnummer 1

Die Nummern der Bilder sind je nachdem, ob der PET1 auf dem Arm fixiert ist, oder zur Lampe einen fixen Winkel einhält, einer gewissen Winkelstellung zugeordnet.

Um die Daten der verschiedenen Aufnahmesituationen sinnvoll vergleichen zu können wurden folgende Parameter vom Auswerteprogramm zu Datensätzen zusammengefasst:

Serie	ROI	aL	aC	Xm	Xsd	Rm	Rsd	Gm	Gsd	Bm	Bsd

Bedeutung der Abkürzungen:
Serie – siehe Tabelle 43 und Tabelle 44
ROI – region of interest, die ausgewertet wird (Liste oben)
aL – Winkel zur Lichtquelle, gemäß Abbildung 90
aC – Winkel zur Camera, gemäß Abbildung 90
Xm – Mittelwert der Helligkeit
Xsd – Standardabweichung der Helligkeit
Rm – Mittelwert Rot – Farbkoordinate sRGB
Rsd – Standardabweichung Rot – Farbkoordinate sRGB
Gm – Mittelwert Grün – Farbkoordinate sRGB
Gsd– Standardabweichung Grün – Farbkoordinate sRGB
Bm – Mittelwert Blau – Farbkoordinate sRGB
Bsd – Standardabweichung Blau – Farbkoordinate sRGB

Die Auswertung der Helligkeit und der sRGB–Werte wurde in Excel mit Hilfe von Autofiltern vereinfacht. So konnten die Werte der einzelnen ROI, die sich in verschiedenen Winkeln zu Lampe bzw. Camera befanden, einfach in Tabellen übernommen werden.

Ein Beispiel für eine Auswertetabelle, ist hier angeführt.

Serie	ROI	aL	aC	Xm	Xsd	Rm	Rsd	Gm	Gsd	Bm	Bsd
38	OPDIMA	0	60	0,775	0,003	197,6	0,901	197,5	1,118	197,9	1,024
38	OPDIMA	0	45	0,79	0,003	201,6	0,882	201,3	1,024	201,4	0,934
38	OPDIMA	0	30	0,796	0,003	203,2	0,76	203,1	0,974	202,9	0,959
38	OPDIMA	0	15	0,805	0,003	205,9	0,799	205,2	1,002	205,2	0,931
38	OPDIMA	0	0	0,811	0,003	207	0,835	206,7	1,017	206,7	0,98
38	OPDIMA	0	-15	0,816	0,002	208,4	0,711	208,1	0,798	208	0,836
38	OPDIMA	0	-30	0,809	0,002	207	0,575	206,1	0,745	206,1	0,738
38	OPDIMA	0	-45	0,801	0,002	204,2	0,598	204,7	0,81	204,2	0,752
38	OPDIMA	0	-60	0,787	0,002	200,6	0,609	201	0,756	200,9	0,704

Tabelle 45: Opdi Helligkeit und sRGB

In Tabelle 45 sind alle sRGB–Werte und die Helligkeit mit den Standardabweichungen des Opdi dargestellt. Er hatte zur Lichtquelle immer den Winkel 0° (erkennbar am Eintrag in Spalte aL), der Winkel zur Camera (aC) variierte in diesem Fall von – 60° und + 60° in 15° Schritten.

Die Änderungen in den sRGB–Werten und in der Helligkeit bei verschiedenen Winkelstellungen von Objekt zu Lichtquelle und Camera wurden mit Hilfe von Diagrammen ersichtlich gemacht. Das Diagramm zur Tabelle oben, in der die Opdi Daten dargestellt sind, findet sich in Abschnitt 6.5.5.2 in Abbildung 96.

Auf die gleiche Weise wurden Änderungen in den Werten bei Auftrag von verschiedenen Produkten auf den PET1 dargestellt. Mit diesen Hilfsmitteln konnte ein relativer Vergleich zu den Messungen mit der SDO hergestellt werden.

Im Weiteren sind die Ergebnisse der einzelnen Auswertungen dargestellt.

6.5.5.2 Opdi und Helligkeitsverlauf

Wie bereits angegeben, sind in Tabelle 45 die Daten für den Opdi bei verschiedener Aufnahmerichtung dargestellt. Die Helligkeitswerte bei den verschiedenen Winkelstellungen der Camera zum Opdi sind in Abbildung 96 dargestellt. Erkennbar ist, dass er das Licht in alle Richtungen gleich streut. Die Abweichung bei – 60 bzw. + 60° zur Lichtquelle und zu 0° zur Kamera beträgt 4% und liegt innerhalb der Messgenauigkeit. Die Abweichung bei -15° Kamerastellung zeigt, dass es trotz sorgfältigster Abschirmung mittels optischen Samtes, Einbau der Lampe und rundum Einbau der Messvorrichtung zu Streulichteinfall gekommen ist.

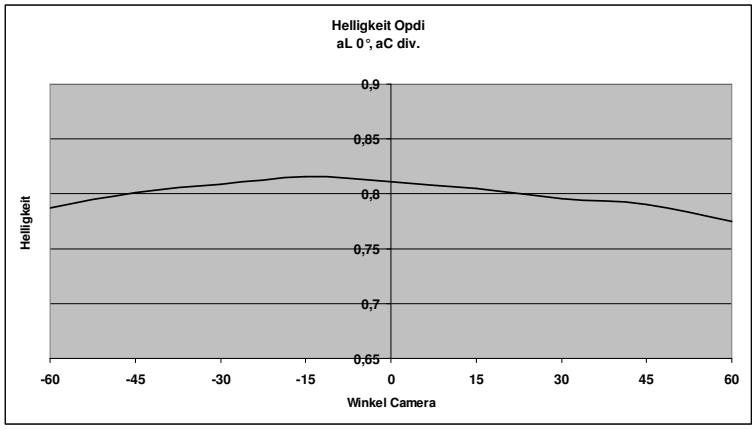


Abbildung 96: Helligkeitsverlauf Opdi bei senkrechtem Lichteinfall (aL=0)

Die Kurven der sRGB–Werte des Opdi folgen dem Kurvenverlauf der Helligkeit und werden deshalb nicht extra dargestellt. Die Kurven der drei Farbkoordinaten liegen übereinander. Die Werte bei 0° Kamerastellung sind in Tabelle 45 grau unterlegt. Sie liegen zwischen 206,8 ± 0,02% für Rot, Grün und Blau.

Ergebnis: Die Angabe des Herstellers über das Streuvermögen des Opdi wird bestätigt. Er streut Licht in alle Richtungen gleichmäßig.

6.5.5.3 Rückstreuvermögen PET

Um zu überprüfen, wie das Rückstreuvermögen der beiden PET–Blöcke ist, wurde der PET2 untersucht. Er hat, wie der Opdi immer einen Winkel von 0° zur Lichtquelle und ist im Versuchsaufbau rechts vom Opdi und oberhalb des PET1 angebracht (siehe Abbildung 91) angebracht. Die Camera durchlief die Winkel von – 60° bis + 60° in 15° Schritten.

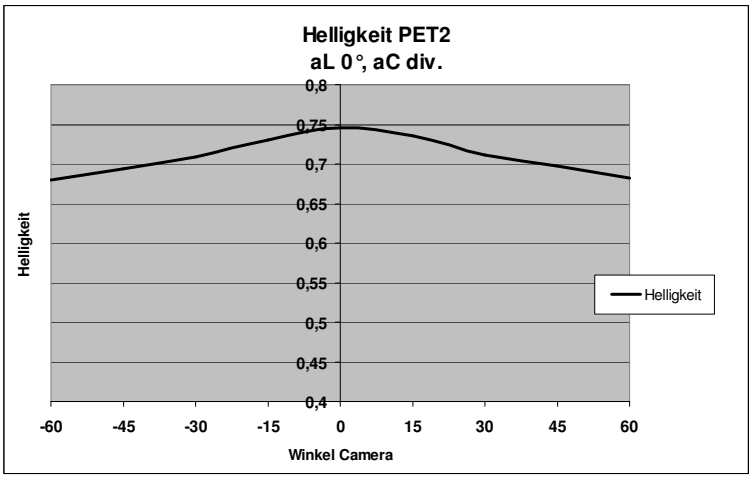


Abbildung 97: Helligkeitsverlauf PET2 bei senkrechtem Lichteinfall (aL=0)

Sowohl beim Helligkeitsverlauf des PET2 (siehe Abbildung 97), als auch im Verlauf der sRGB–Werte (dargestellt in Abbildung 98) ergibt sich bei Richtungsänderung der Camera von 0° zum PET2 zu + 60° (bzw. – 60°) eine Abnahme der Funktionswerte.

Wie aus dem Helligkeitsdiagramm ablesbar, streut der PET das auf ihn einfallende Licht nahezu gleichmäßig in alle Richtungen.

Die Farbwerte zeigen, dass der PET in etwa gleich viel Licht im blauen und grünen Spektralbereich und weniger im roten zurückwirft, er erscheint im Licht der Tageslichtlampe bläulichweiß.

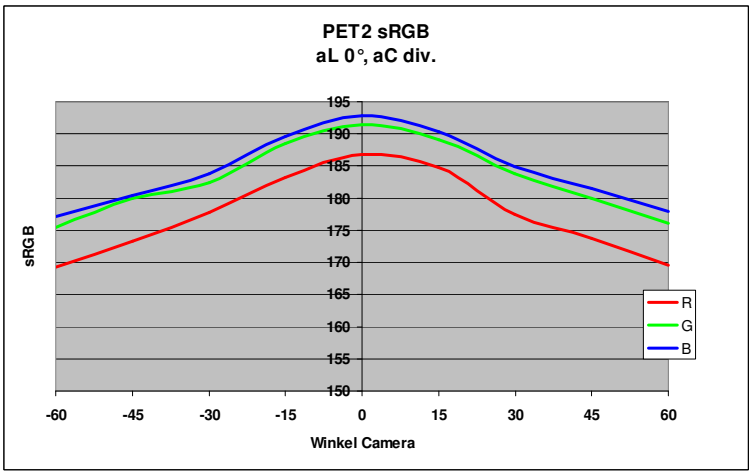


Abbildung 98: sRGB–Verlauf PET2 bei senkrechtem Lichteinfall (aL=0)

Ergebnis: Der PET2 streut einfallendes Licht in alle Richtungen nahezu gleichmäßig.

6.5.5.4 PET1 und Lichteinfall unter verschiedenen Winkeln

Um zu untersuchen, ob die PET–Blöcke sich wie Lambert'sche Reflektoren verhalten, wurde der PET1 in verschiedene Winkelstellungen zur Lichtquelle gebracht und jeweils unter 0° Camera Stellung aufgenommen. Die Auswertung der Bilder brachte zum Vorschein, dass wie erwartet, bei 0° Stellung zur Lichtquelle das Maximum der Helligkeit zu liegen kommt.

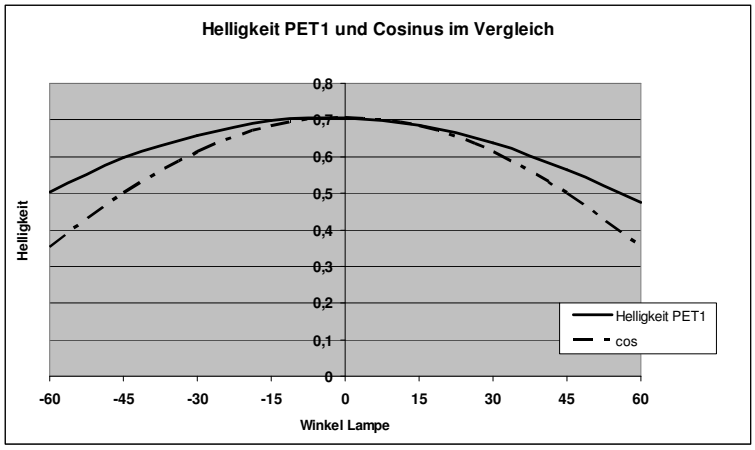


Abbildung 99: Helligkeitsverlauf PET1 bei senkrechter Beobachtung (aC=0)

Bei größerer Winkelstellung zur Lichtquelle (– 60°, + 60°) wird mehr Licht zurückreflektiert, als für einen Lambert'schen Reflektor zu erwarten wäre (gestrichelte Linie in Abbildung 99). Das ist auf Streulichteinfluss von der Seite zurückzuführen (siehe Abschnitt 6.5.5.2).

Die Untersuchung, welche Änderungen sich ergeben, wenn der PET1 seine Richtung zum Licht ändert, zeigt erwartungsgemäß, dass die Helligkeit des PET1 abnimmt, je flacher das Licht auf ihn einfällt. Am Glanzwinkel (22,5° zu Lichtquelle und -22,5° zu Camera) ist ein leichter Anstieg der Helligkeit messbar.

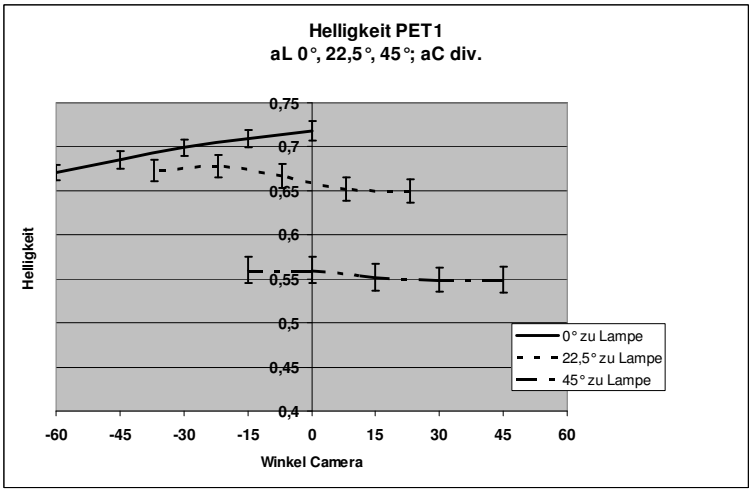


Abbildung 100: Helligkeitsverlauf PET1 für Lichteinfall aL = 0°, 22,5°, 45°

Ergebnis: Der unbedeckte PET1 streut einfallendes Licht nicht unähnlich einem ideal diffusen Reflektor.

6.5.5.5 PET1 und Make Ups

Um festzustellen, welche „Verbesserungen" im Hautbild durch Auftrag verschiedener Produkte zu Stande kommt, wurden die beiden Make Ups auf dem PET1 unter 0° zur Camera und diversen Winkeln zur Lichtquelle untersucht. Abbildung 101 und Abbildung 102 zeigen die entsprechenden Kurvenverläufe.

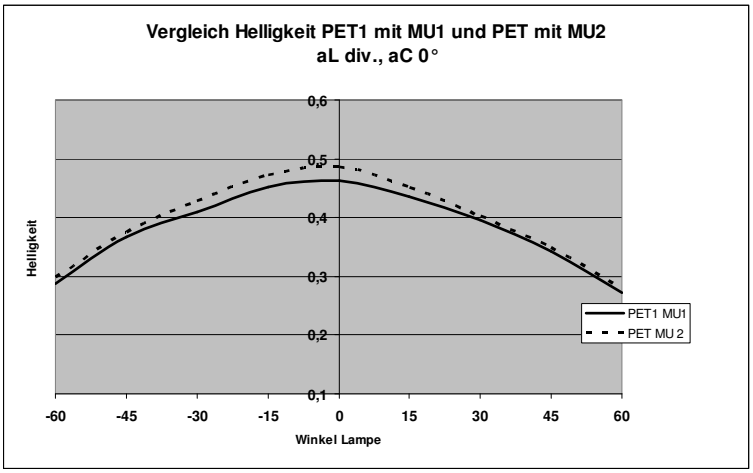


Abbildung 101: Helligkeitsverlauf MU1 und MU2

Make Up 2, das von den subjektiven Beurteilern als heller eingestuft wurde, zeigt sowohl im Helligkeits–, als auch in den Farbverläufen höhere Funktionswerte. Wobei sich speziell der Grün–Wert von dem des Make Up 1 deutlich unterscheidet.

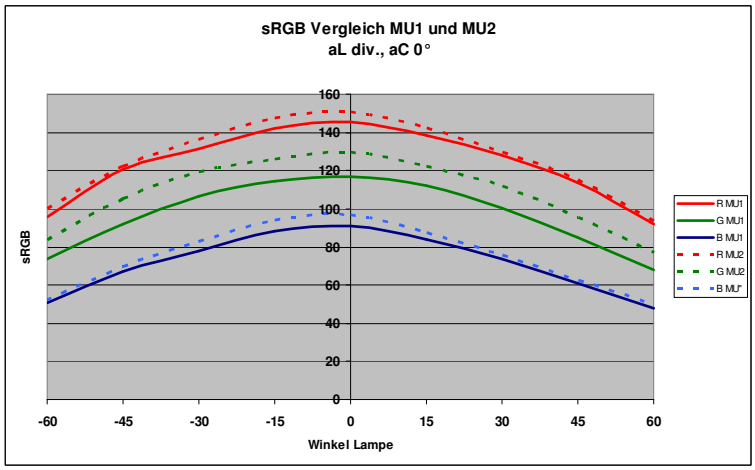


Abbildung 102: sRGB–Verlauf MU1 und MU2

Die Untersuchung der Helligkeits– und Farbkoordinaten zeigt, dass Make Up 2 in allen Werten über Make Up 1 liegt (siehe Tabelle 46). Der Grün–Wert bei Lichteinfall unter 0° und Beobachtungsrichtung 0° übersteigt den von Make Up 1 um 10 %, die Helligkeit ist um 5 % höher.

aL 0°, aC 0°	MU1	MU2	MU2/MU1
Helligkeit	0,463	0,485	1,05
R	145	151	1,04
G	117	129	1,10
B	91	97	1,07

Tabelle 46: MU1 und MU2

Bei Beobachtungsrichtung unter 0° und Lichteinfall – 60° oder + 60 ° verschwindet der Helligkeitsunterschied. Dasselbe Ergebnis liefern die R– und B–Farbkoordinate, die G– Farbkoordinate bleibt im gesamten Winkelbereich 10 % über der von Make Up 1.

Ergebnis: Die objektiv durch die Camera festgestellten Werte bestätigen den subjektiven Eindruck der Versuchspersonen und liefern dieselben Ergebnisse, wie die Messungen mit der SDO. Make Up 2 ist heller als Make Up 1. Bei einer Beobachtungsrichtung größer als 45° entsteht der Eindruck, dass die Make Ups gleich hell sind.

6.5.5.6 Falte

Betrachtung des Helligkeitsverlaufs der Falte bei verschiedenem Lichteinfall (siehe Diagramm unten) zeigt, dass der PET1 zwischen – 60° und + 20° heller ist, als die Falte. Zwischen + 30° und + 60° verschwindet der Helligkeitsunterschied. Bewirkt wird das in diesem Fall vom speziellen geometrischen Aufbau der Falte.

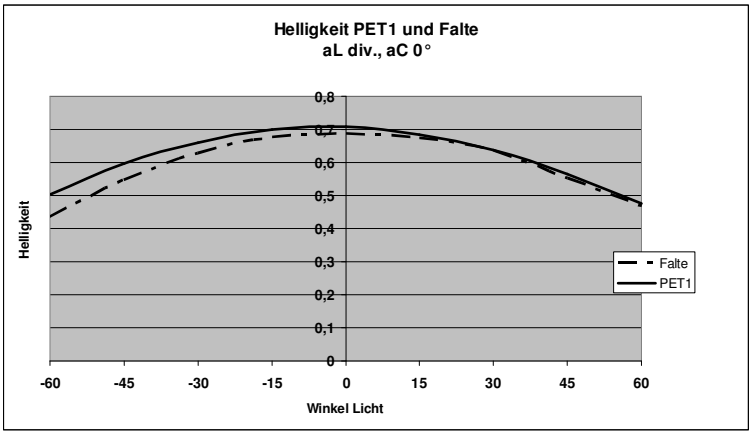


Abbildung 103: Helligkeitsverlauf der unbedeckten Falte

Die sRGB–Kurvenverläufe zeigen die gleiche Form, die Grün–Werte liegen etwas über den Rot– und Blau–Werten (max. 3 % für Rot bzw. 7 % für Blau).

Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen die Falte bei – 60° Lichteinfall und bei + 15° Lichteinfall. Der Helligkeitsunterschied ist klar erkennbar.

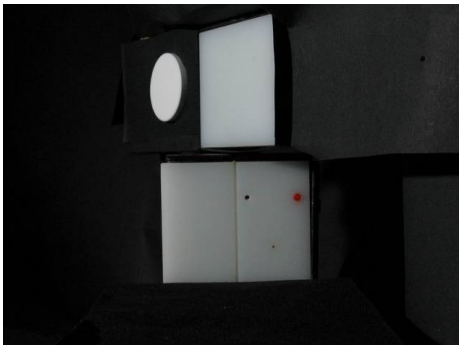


Abbildung 104: Falte erscheint dunkel bei - 60° Lichteinfall

Das Verhältnis der Helligkeit des PET1 von 0° Lichteinfall zu 60° Lichteinfall beträgt 1,4, das der Falte bei gleichem Lichteinfall 1,6. Die Falte zeigt eine zusätzliche Reduktion der Helligkeit bei streifendem Lichteinfall.

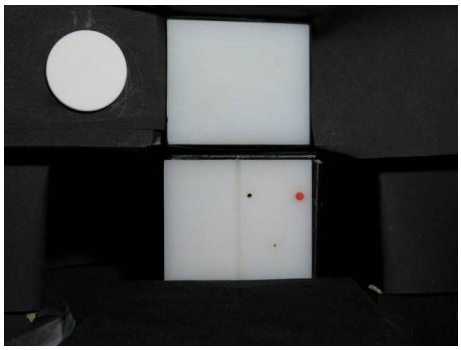


Abbildung 105: Falte erscheint hell bei 15° Lichteinfall

Ergebnis: Die Ergebnisse für die Helligkeitswerte des objektiven Beobachters Camera bei streifendem Lichteinfall auf die Falte stimmen damit überein, dass diese wie zu erwarten, umso deutlicher hervortritt, je streifender das Licht auf sie einfällt.

6.5.5.7 Faltenauffüller

Die Untersuchung der Bilder zeigt, dass sich die beiden Auffüller unterschiedlich effektiv beim Verbergen der Falte erweisen.

6.5.5.7.1 Faltenauffüller 1

Abbildung 106 zeigt den Helligkeitsverlauf der Falte, die mit Faltenauffüller 1 ausgefüllt wurde.

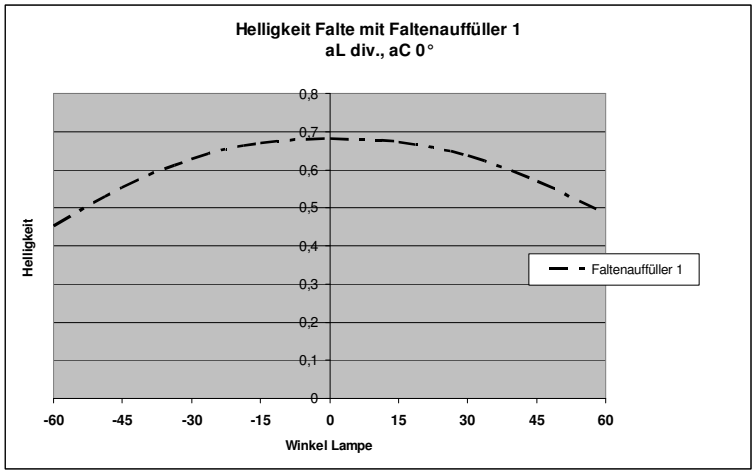


Abbildung 106: Helligkeitsverlauf Faltenauffüller 1

Die sRGB Werte liegen nahe beieinander (bei 0° - 174, 175, 172), und ihr Kurvenverlauf folgt der Helligkeitskurve. Sie wurde nicht extra dargestellt.

Die Grün–Farbkoordinate liegt nahe bei der der Aufnahme der Falte (siehe Tabelle 48). Mehr Details zur Auswertung dieser Aufnahmen finden sich weiter unten.

Ergebnis: Die Ergebnisse beider Faltenauffüller werden gemeinsam in 6.5.5.7.3 besprochen.

6.5.5.7.2 Faltenauffüller 2

Faltenauffüller 2 steigert die Helligkeit der Falte bei jedem Betrachtungswinkel (Lichteinfall unter 0°), dies wird in Tabelle 47 deutlich gemacht. Bei flachem Lichteinfall beträgt die Helligkeit der Falte mit dem Produkt bis zu 16 % mehr, als ohne.

Xm	% Steigerung
FA2 0°/F	1,04
FA2 60°/F	1,16

Tabelle 47: Helligkeitssteigerung Falte durch Faltenauffüller 2

Abbildung 107 zeigt den Helligkeitsverlauf und Abbildung 108 den Verlauf der sRGB–Farbkoordinaten, die sich in den Aufnahmen vom Faltenauffüller 2 ergeben haben.

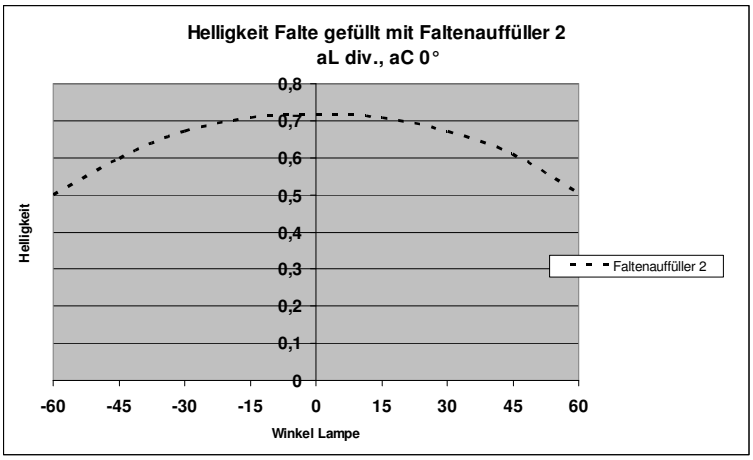


Abbildung 107: Helligkeitsverlauf Faltenauffüller 2

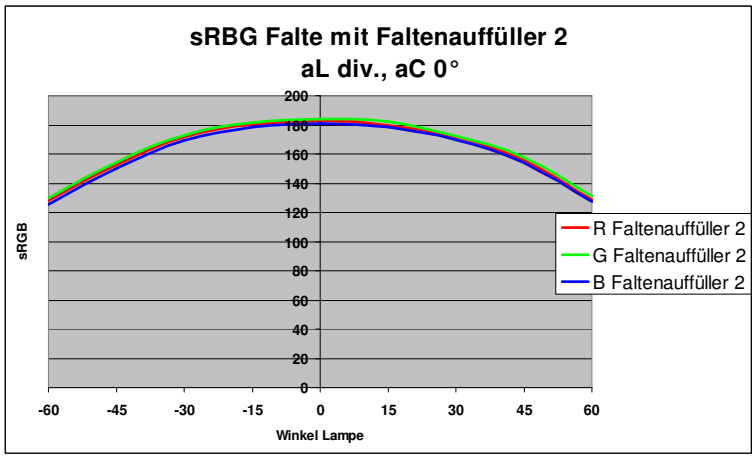


Abbildung 108: sRGB–Verlauf Faltenauffüller 2

Die sRGB–Werte liegen bei diesem Produkt bei 0° Beobachtungsrichtung bei (183, 184, 181). Das Produkt erscheint auf der Aufnahme weiß.

Ergebnis: Die Ergebnisse beider Faltenauffüller werden gemeinsam in 6.5.5.7.3 besprochen.

6.5.5.7.3 Vergleich der beiden Produkte mit Falte und PET1

Beide Faltenauffüller ergeben in der Kombination ihrer sRGB–Farbkoordinaten die Farbe „Weiß“. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrem Helligkeitsverlauf. Der Kurvenverlauf für Faltenauffüller 2 in Abbildung 109 zeigt, dass er die Falte mehr aufhellt.

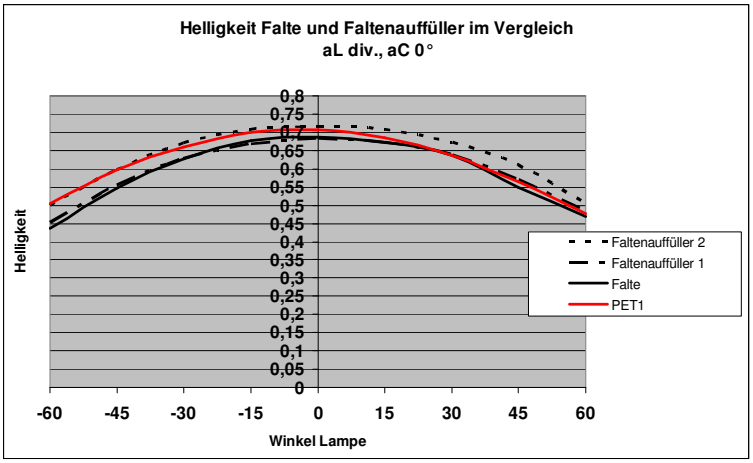


Abbildung 109: Helligkeitsverlauf Faltenauffüller, Falte, PET1

Tabelle 48 zeigt die Werte der Helligkeiten und der G–Farbkoordinaten beider Auffüller, des PET1 und der Falte. Deutlich erkennbar ist auch hier, dass Helligkeit von Falte und Faltenauffüller 1 nahezu gleich sind. Und dass der Faltenauffüller 2 die Helligkeit des PET1 sogar etwas übertrifft.

aL 0°, aC 0°	Xm	G
PET1	0,707	181
Falte	0,687	178
Faltenauffüller 1	0,681	176
Faltenauffüller 2	0,715	184

Tabelle 48: Helligkeit und G–Koordinate Falte, Faltenauffüller, PET1

Zum visuellen Vergleich dienen folgende Abbildungen. Gut erkennbar ist die Falte in Abbildung 110 und Abbildung 111. Die Bilder lassen kaum einen Unterschied der Helligkeit der Falte bei Auftrag von Faltenauffüller 1 erkennen. Faltenauffüller 2 (siehe Abbildung 112) lässt die Falte im Vergleich zu ihrer Umgebung hell und sehr schmal erscheinen.

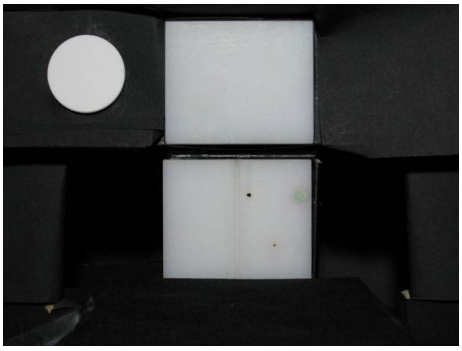


Abbildung 110: Aufnahme mit der CanonCamera PET1 mit Faltenauffüller 1 unter aL 0°, aC 0°

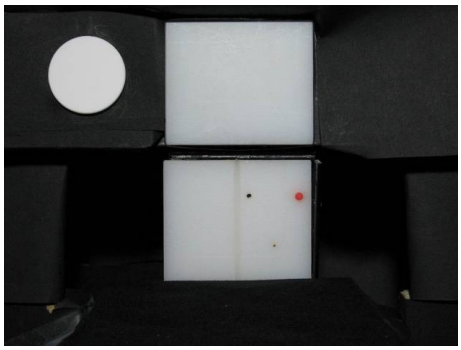


Abbildung 111: Aufnahme mit der Canon Camera PET1 - Falte unter aL 0°, aC 0°

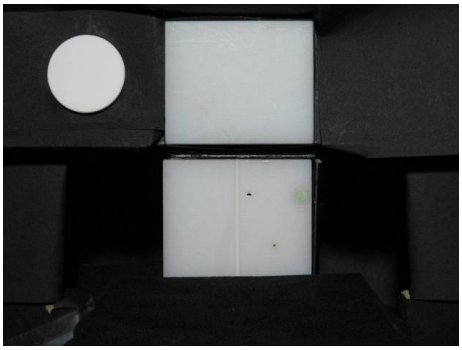


Abbildung 112: Aufnahme mit der Canon Camera PET1 Faltenauffüller 2 unter aL 0°, aC 0°

6.5.5.8 Falte mit Make Up

In Abbildung 113 sind die Helligkeitsverläufe von Falte ohne und Falte mit den beiden Make Ups dargestellt. Bei Auftrag von Make Up 2 zeigt die Falte eine geringfügig kleinere Helligkeitsreduktion. Der Kurvenverlauf zeigt aber, dass beide Make Ups die Helligkeit um mehr als die Hälfte reduzieren.

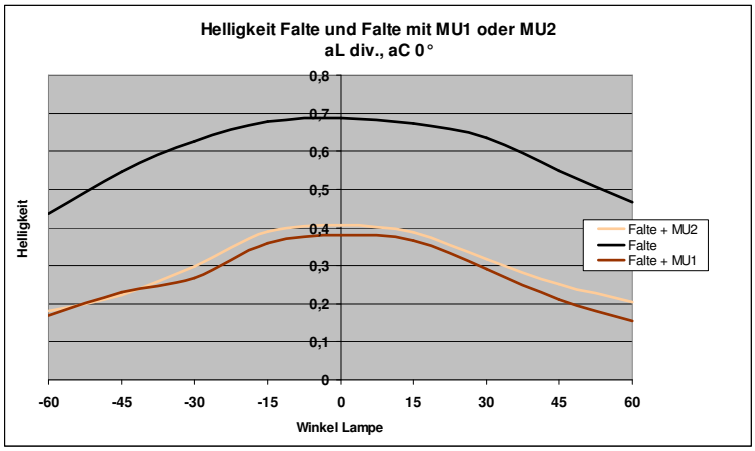


Abbildung 113: Helligkeitsverlauf Falte mit MU1 und MU2

Tabelle 49 zeigt die Verhältnisse der Helligkeiten von Falte allein und Falte mit den beiden Make Ups. Make Up 2 ist bei 60° geringfügig heller, als Make Up 1.

	Xm -60°	Xm 0°	Xm +60°
Falte/Falte MU1	2,6	1,8	3,0
Falte/Falte MU2	2,4	1,7	2,3

Tabelle 49: Helligkeitsverhältnisse Falte und Falte mit Make Ups

Ergebnis: Wie die Ergebnisse mit der SDO bereits gezeigt haben wird diese tiefe Falte durch Auftrag von Make Up durch den auftretenden Helligkeitsverlust noch deutlicher sichtbar.

6.5.5.9 Roter Fleck – Effekt am Glanzwinkel

Am Beispiel des roten Flecks kann man den Effekt der gerichteten Streuung (Reflexionsgesetz) sehen, obwohl der Versuchsaufbau mit der Lichtquelle über der Camera im allgemeinen keine Erhöhung des reflektierten Lichts am Glanzwinkel zeigt, da der PET1 das Licht in alle Richtungen gleich streute und der Glanzwinkel nicht in der Ebene mit der Camera lag. Die Oberfläche des roten Flecks ist nicht so rau, wie die des PET1. Bereits beim Experiment mit der SDO (wo Detektor, Lichtquelle und Camera in einer Ebene lagen) ist aufgefallen, dass hier am Glanzwinkel die Strahldichte höher war als bei 0° und 45° zur Lichtquelle.

Um diesen Effekt zu überprüfen, wurde der Schwenkarm gelöst und der PET1 in seiner Stellung zur Lichtquelle auf 22,5° fest gehalten. Die Camera durchlief auf dem Arm die Winkel von – 37,5° bis + 22,5 ° in 15° Schritten.

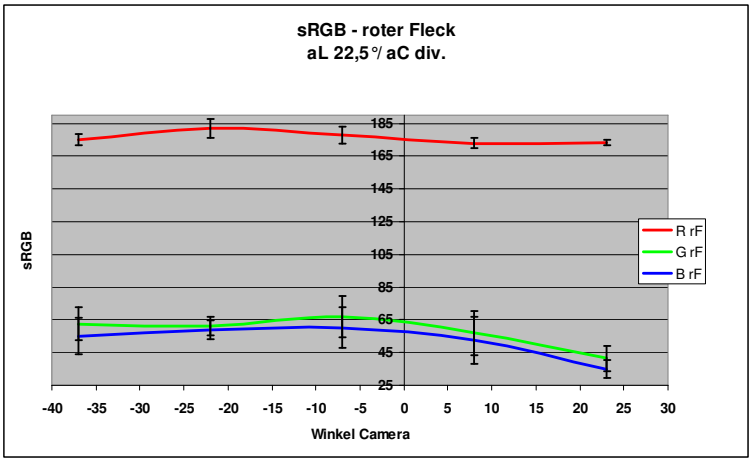


Abbildung 114: sRGB–Werte Roter Fleck bei Beleuchtung unter 22,5° (aL=22,5°)

Der Wert für die R–Farbkoordinate in Abbildung 114 zeigt wie beim roten Fleck zu erwarten, dass sie den Wert der beiden anderen wesentlich übersteigt (um das dreifache).

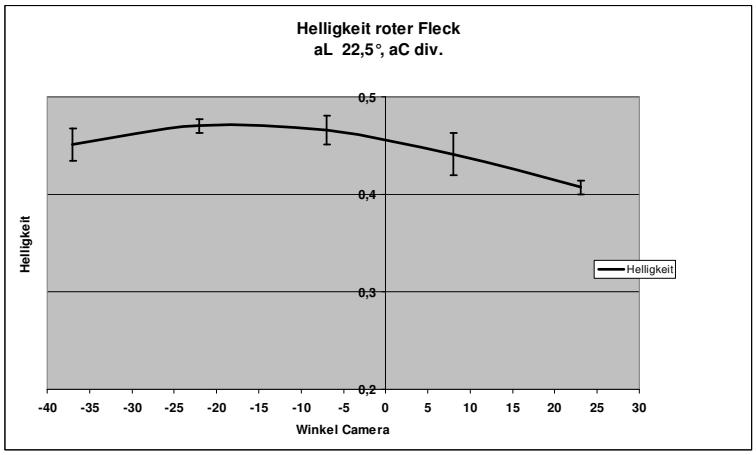


Abbildung 115: Helligkeit des roten Flecks am Glanzwinkel

Am Helligkeitsverlauf in Abbildung 115 lässt sich ein schwacher Effekt am Glanzwinkel (Camera – 22,5° und Lichteinfall unter 22,5°) ablesen, der auf die glatte Oberfläche des roten Flecks zurückzuführen ist.

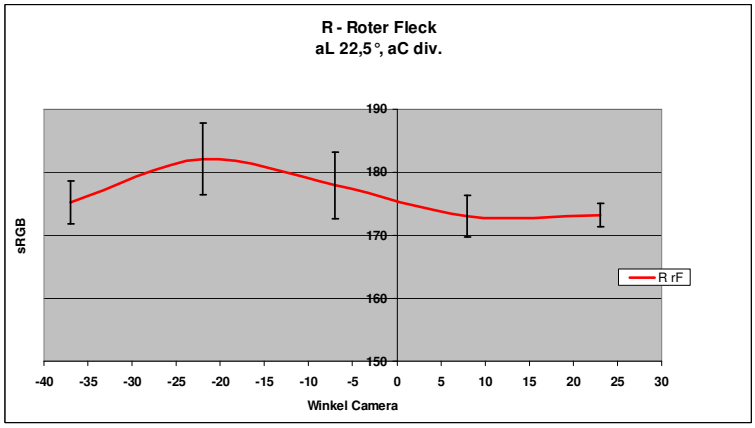


Abbildung 116: R - Farbkoordinate des roten Flecks am Glanzwinkel

Deutlicher wird der Effekt am Glanzwinkel für die R–Farbkoordinate ablesbar, die in Abbildung 116 dargestellt ist.

Ergebnis: Da im vorliegenden Versuchsaufbau die Ebenen von Lichtquelle und Detektor (Camera) nicht zusammenfallen, ist am Glanzwinkel die gerichtete Reflexion auf Grund der glatten Oberfläche des roten Flecks schwach ausgeprägt aber erkennbar.

6.5.5.10 Roter Fleck – alle Winkel

Bei Stellung der Lichtquelle zum PET1 von – 60° bis + 60° in 15° Schritten und Beobachtungsrichtung von 0° ergibt sich der Helligkeitsverlauf, der in Abbildung 117 dargestellt ist. Nachdem sich bei einer Stellung von – 60° zur Lichtquelle die rechte Kante des PET1 (und damit der rote Fleck) weiter weg von der Lichtquelle befindet, ist in diesem Bereich naturgemäß die Helligkeit geringer.

In den folgenden Abbildungen wird in manchen Abbildungen der rote Fleck mit rF abgekürzt, die Make Ups mit MU1 und MU2 und der Abdeckstift mit AS, um die Überschriften entsprechend kurz zu halten.

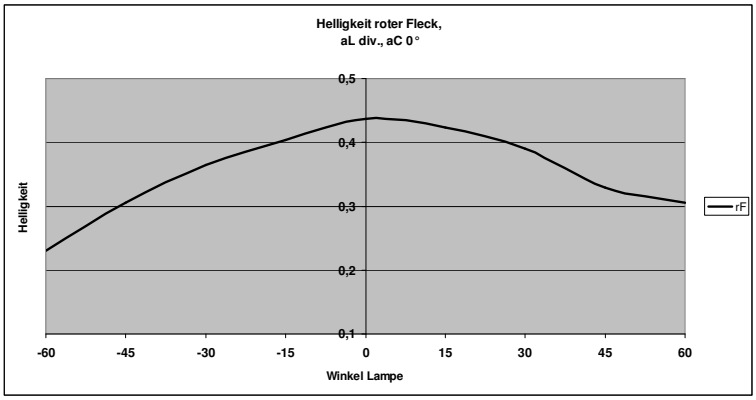


Abbildung 117: Helligkeitsverlauf roten Fleck

Der sRGB–Verlauf folgt dem Helligkeitsverlauf. Der Wert der R–Farbkoordinate ist, wie bereits in Abschnitt 6.5.5.9 beschrieben, deutlich ausgeprägt.

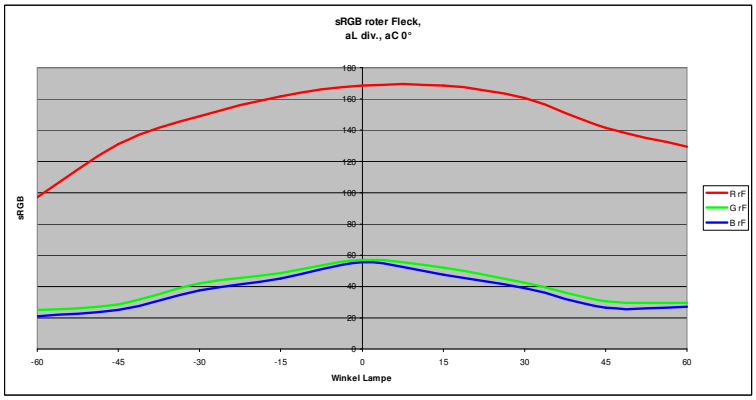


Abbildung 118: sRGB–Werte roter Fleck

Ergebnis: Der rote Fleck hat, wie zu erwarten, eine ausgeprägte R–Farbkoordinate. Seine Helligkeit ist geringer als die des PET2 (siehe Abbildung 97).

6.5.5.11 Roter Fleck unter Make UP

Trägt man die Make Ups über dem roten Fleck auf, zeigen die Ergebnisse, dass es an dieser Stelle zu einer geringfügigen Helligkeits– und Farbänderung kommt. Exemplarisch wurde die Änderung in Tabelle 50 für einen Winkel zur Lichtquelle von 0° und zur Camera von 0° dargestellt. Zu bedenken ist, dass der eingesetzte Zylinder, der als Störstelle konzipiert ist, eine glatte Oberfläche hat und das Licht anders reflektiert als andere Stellen des PET1 und – ähnlich wie in der Realität – das Make Up darauf eventuell weniger gut haftet.

aL 0°, aC 0°	rF+MU1	MU1
X (Helligkeit)	0,449	0,407
R	133	126
G	109	102
B	95	81

Tabelle 50: Roter Fleck unter MU 1, aC 60°

Der rote Fleck ist sowohl unter Make Up 1 als auch unter Make Up 2 an einer geringfügigen Helligkeitsänderung zu erkennen (Abbildung 119). Die Änderung der Farbwerte wurde in Abbildung 120 dargestellt. Der R–Wert an der Stelle des roten Flecks, der mit Make Up be-

deckt ist, ist in beiden Fällen geringfügig höher, als die R–Werte der Make Ups, die auf einer „ungestörten“ Oberfläche des PET1 aufgetragen waren.

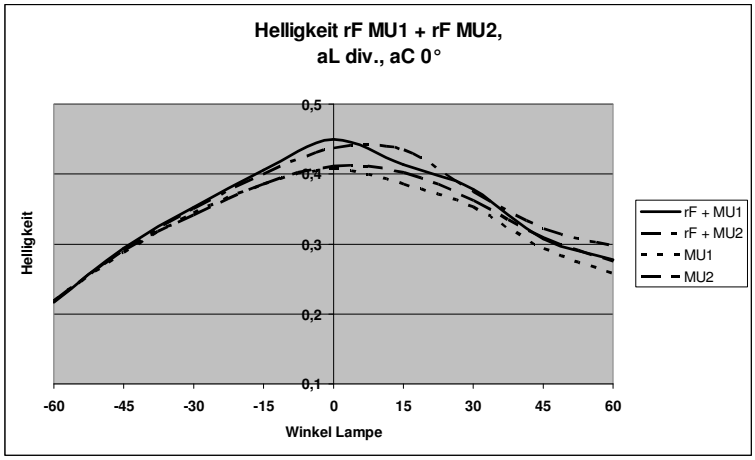


Abbildung 119: Helligkeit roter Fleck mit Make Ups, Helligkeit Make Ups

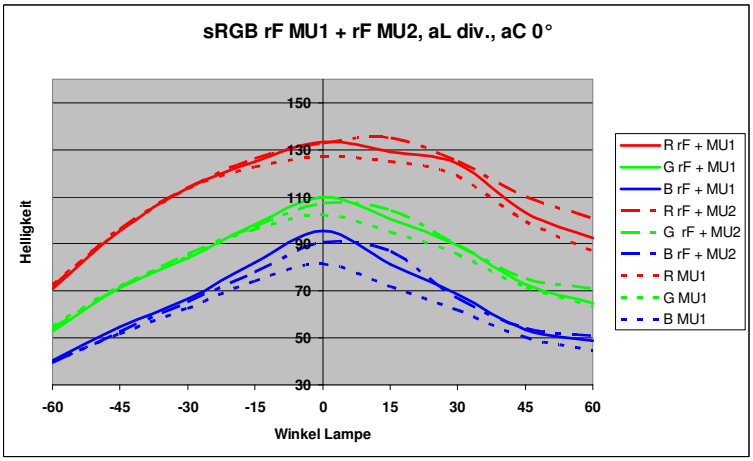


Abbildung 120: sRGB–Werte roter Fleck unter Make Ups,

Ergebnis: Wird Make Up über einer roten Störstelle auf der Haut (Entzündung) aufgetragen, gibt es an dieser Stelle eine geringfügige Änderung im Aussehen zur Umgebung in Bezug auf Helligkeit und Farbe. Bei streifenderem Lichteinfall nimmt die Wahrnehmbarkeit der Störstelle ab.

6.5.5.12 Abdeckstift auf PET1

Der Abdeckstift auf einer „gesunden“ Stelle des PET1 auf der rechten Seite, zwischen Falte und rotem Fleck ca. 5 mm x 5 mm aufgetragen, hat bei einer Stellung der rechten Kante näher (Winkel von 15° bis 60°) zur Lichtquelle die gleiche Helligkeit wie eine unbedeckte Stelle des PET1. Bei 0° zur Lichtquelle übersteigt seine Helligkeit die des PET1. Die Helligkeitskurve ist nicht symmetrisch, weil der Abdeckstift nicht in der Drehachse aufgetragen wurde und bei negativen Winkeln geringfügig weiter von der Lampe entfernt ist (sin(aL) • 1,5 cm), als bei positiven Winkeln.

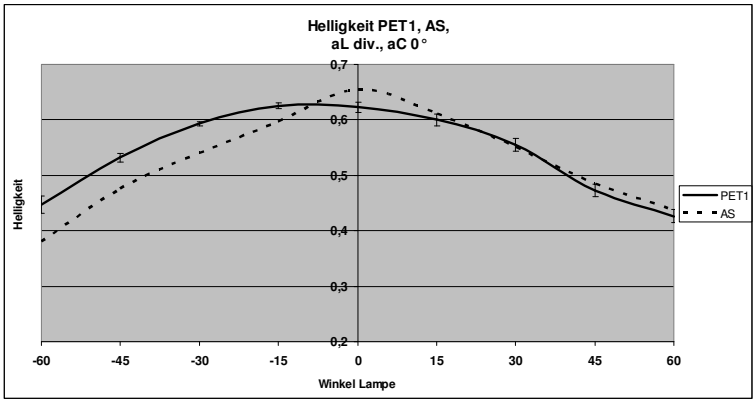


Abbildung 121: Helligkeitsverlauf Abdeckstift

Abbildung 122 zeigt die sRGB Werte des PET1 und des Abdeckstiftes im Vergleich. Der Grün–Wert des Abdeckstiftes ist erkennbar höher, als seine Rot– und Blau–Werte. Bei Lichteinfall unter 0° und Beobachtungsrichtung 0° betragen die sRGB–Werte (162, 175, 159).

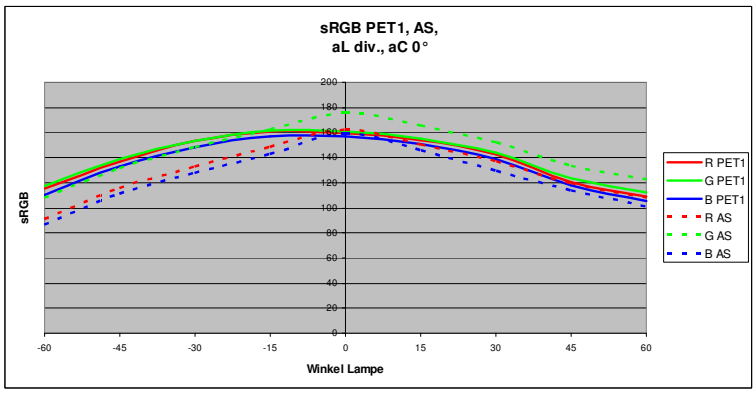


Abbildung 122: sRGB–Werte Abdeckstift

Ergebnis: Bei gewissen Lichteinfallswinkeln erhöht der Abdeckstift die Helligkeit des PET1.

6.5.5.13 Roter Fleck mit Abdeckstift

Die Vergleiche der Helligkeit von PET1, Abdeckstift auf rotem Fleck und rotem Fleck ohne Abdeckung zeigen, dass der Abdeckstift die Helligkeit des roten Flecks an die des PET1 anhebt. Die Helligkeitsdifferenz von rotem Fleck und PET1 wird durch den Abdeckstift um mehr als die Hälfte reduziert.

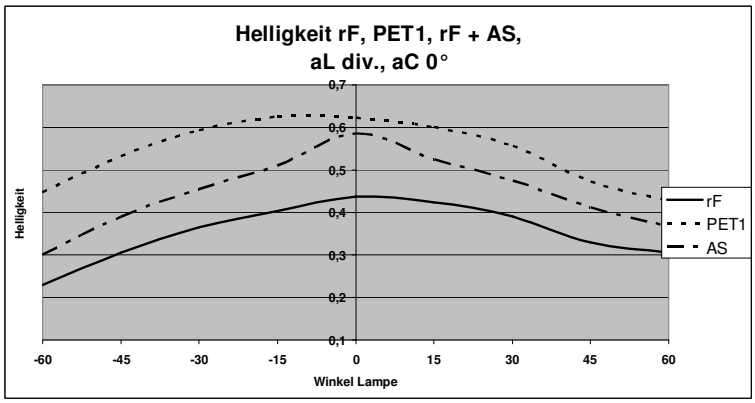


Abbildung 123: Helligkeitsverlauf Abdeckstift, roter Fleck, PET1

Ist der Abdeckstift auf den roten Fleck aufgetragen, steigt der Wert der G–Farbkoordinate auf 154 (roter Fleck allein 57), die R–Farbkoordinate sinkt auf 151 (roter Fleck allein 168). Das kann an den sRGB–Werten in der Abbildung unten abgelesen werden.

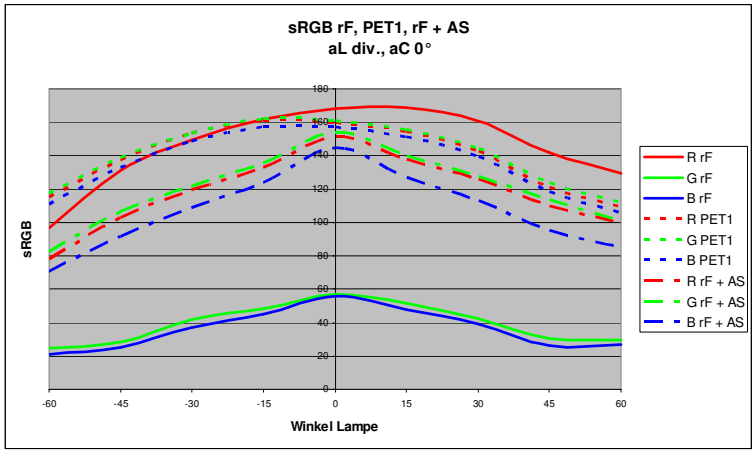


Abbildung 124: sRGB–Werte Abdeckstift über rotem Fleck

Diese sRGB–Farbwerte wurden als Hintergrundfarbe für Farbflächen verwendet. Das Ergebnis sieht man in Abbildung 125 bis Abbildung 127.



Abbildung 125: sRGB Farbbeispiel - Abdeckstift (RGB als Hintergrundfarbe)



Abbildung 126: sRGB Farbbeispiel - Roter Fleck (RGB als Hintergrundfarbe)



Abbildung 127: sRGB Farbbeispiel - Abdeckstift auf rotem Fleck (RGB als Hintergrundfarbe)

Ergebnis: Der Abdeckstift reduziert die Helligkeitsdifferenz zwischen PET1 und rotem Fleck. Bei Haut wäre die Helligkeitsdifferenz nicht so groß. Der Wert des roten Farbanteils einer Störstelle wird gesenkt und der des grünen Farbanteils wird angehoben. Der grüne Stift deckt den roten Fleck ab.

6.5.5.14 Roter Fleck mit Abdeckstift und Make Ups

6.5.5.14.1 Make Up 1 über Abdeckstift auf rotem Fleck

Die Helligkeits– und sRGB–Werte bei Auftrag von Make Up 1 auf den roten Fleck bzw. auf den Abdeckstift über dem roten Fleck sind in Abbildung 128 und Abbildung 129 dargestellt.

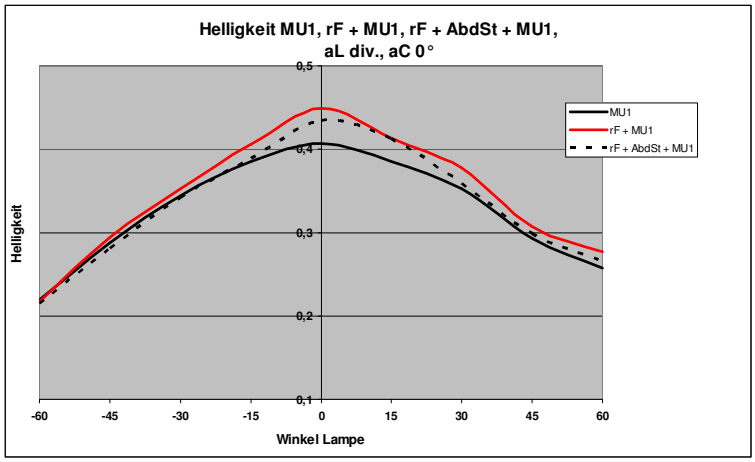


Abbildung 128: Helligkeitsverlauf roter Fleck mit Abdeckstift und MU1

Abbildung 128 zeigt die Helligkeitswerte von rotem Fleck, Make Up 1 über rotem Fleck und Abdeckstift auf rotem Fleck und darüber Make Up 1. Bei Winkeln zur Lichtquelle unter - 45° fallen die Helligkeitswerte der drei Kurven zusammen. Bei Winkeln darüber erhöht der rote Fleck die Helligkeit geringfügig. Der Abdeckstift auf dem roten Fleck unter dem Make Up senkt die Helligkeit wieder minimal ab.

Die zugehörigen sRGB–Werte in Abbildung 129 zeigen, dass der Abdeckstift unter dem Make Up die einzelnen Farbwerte des roten Flecks geringfügig absenkt.

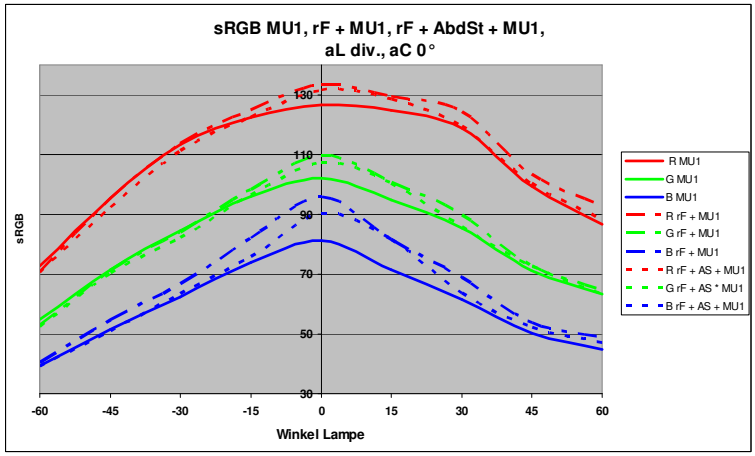


Abbildung 129: sRGB–Werte roter Fleck mit Abdeckstift und MU1

Um genauere Aussagen treffen zu können, wurden die Farbabstände ermittelt (siehe Abschnitt 6.5.5.15).

Ergebnis: Wird unter Make Up 1 der grüne Abdeckstift aufgetragen, verändert sich der Farb- und Helligkeitseindruck eines Betrachters von einer Störstelle nicht wesentlich. Die geringen

Änderungen in den Farb– und der Helligkeitskoordinate dürften teilweise auf die andere Oberflächenbeschaffenheit des roten Flecks zurückzuführen sein.

6.5.5.14.2 Make Up 2 über Abdeckstift auf rotem Fleck

Die abdeckende Funktion des Abdeckstiftes auf dem roten Fleck ist etwas ausgeprägter, wenn Make Up 2 darüber aufgetragen wird. Die Werte der Helligkeitskurve (Abbildung 130) liegen dann nahezu bei denen des PET1, bei dem das Make Up auf einer ungestörten Stelle aufgetragen wurde.

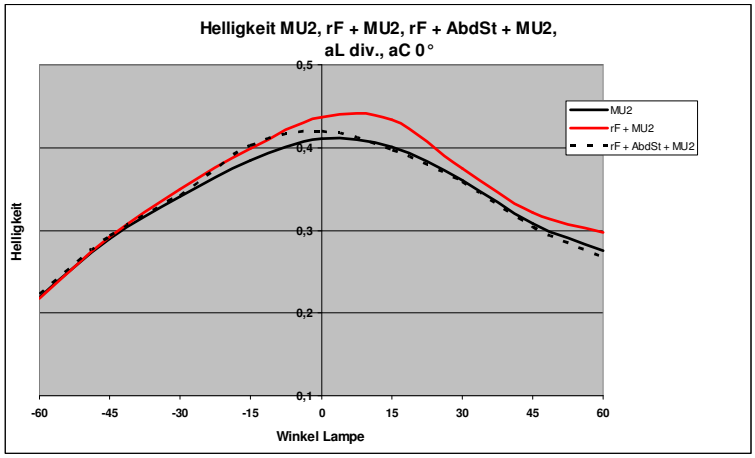


Abbildung 130: Helligkeitsverlauf roter Fleck mit Abdeckstift und MU2

Die entsprechenden sRGB–Farbwerte sind Abbildung 131 zu entnehmen. Der Rot–Wert ist bei Auftrag des Abdeckstiftes unter Make Up 1 dem des Make Ups auf PET1 angepasst. Der Grün– bzw. Blau–Wert wurde etwas abgesenkt.

Insgesamt ergibt sich bei Verwendung des Abdeckstifts unter Make Up 2 eine Vereinheitlichung des Aussehens der „Störstelle“ roter Fleck mit der Umgebung.

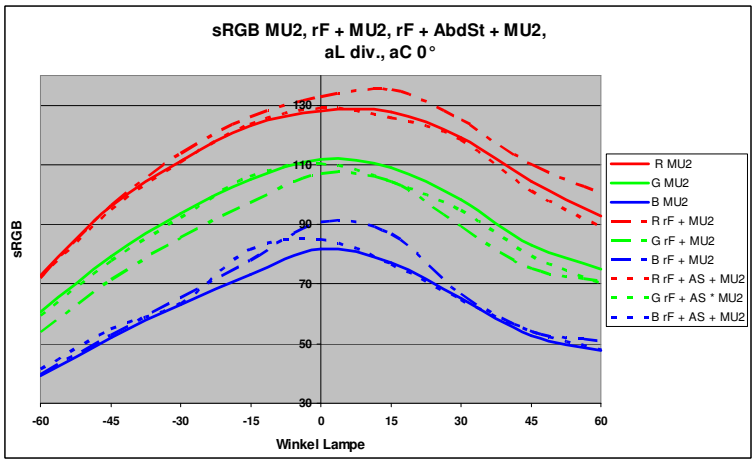


Abbildung 131: sRGB–Werte Roter Fleck mit Abdeckstift und MU2

Ergebnis: In Bezug auf die Umgebung einer Störstelle, reduziert der Abdeckstift unter dem Make Up 2 aufgetragen, den Farbeindruck einer Störstelle, der rote Fleck wird an die Umgebung angeglichen. Make Up 2 hat eine weniger gute Deckfähigkeit als Make Up 1.

6.5.5.15 Umrechnung der Camera sRGB–Werte in CIE–Lab

Um die Messungen mit der Strahldichteoptik (Abschnitt 6.5.4) von rotem Fleck und Abdeckstift mit Make Up 1, mit denen der Camera zu vergleichen, wurden die sRGB–Werte der Camera in die CIE–XYZ Farbkoordinaten und dann in die CIE–Lab Farbkoordinaten umgerechnet. Mit Hilfe dieser wurde die Helligkeitsänderung und die Farbänderung von PET1 mit Make Up 1 und PET1 – roter Fleck mit Abdeckstift unter Make Up 1 untersucht. Als Referenzwerte X_n, Y_n und Z_n dienten die entsprechenden Farbkoordinaten des Opdi.

Der Vergleich (siehe Abschnitt 6.5.5.16) wird für die Werte bei einer Stellung zur Lichtquelle von 45° und Beobachtungsrichtung 0° durchgeführt, da diese Bedingungen auch für die Messung mit der Strahldichteoptik gegeben waren. Die Ergebnisse der Umrechnung der sRGB Werte in Lab–Farbkoordinaten sind für den roten Fleck mit und ohne Produktauftrag in Tabelle 51 dargestellt.

	L	a	b
rF MU1	42,9	12,5	20,3
MU1	41,9	11,0	21,2
rF Abd MU1	42,4	10,8	20,7

Tabelle 51: Lab Farbkoordinaten roter Fleck (Camera)

Der Farbabstand, bzw. die Farbänderung und Helligkeitsänderung, die sich zwischen Make Up 1 und rotem Fleck mit und ohne Abdeckstift und Make Up ergeben, finden sich in Tabelle 52 bis Tabelle 54.

ΔE_{Lab}	MU1
rF MU1	2,1
rF AS MU1	0,8

Tabelle 52: ΔE_{Lab} [MU1 – rF MU1], und [MU1 – rF AS MU1]

Der Farbabstand zwischen Make Up 1 und rotem Fleck mit Abdeckstift und Make Up 1 ist für einen Beobachter nicht auflösbar, ist nur Make Up 1 auf dem roten Fleck aufgetragen, dann würde der Farbabstand für einen sehr geübten Beobachter gerade erkennbar. Die Werte für die Farbänderung und die Helligkeitsänderung in den Tabellen unten zeigen die gleichen Ergebnisse.

ΔE_{ab}	MU1
rF MU1	1,8
rF AS MU1	0,6

Tabelle 53: ΔE_{ab} MU1 und roter Fleck mit MU1, mit Abdeckstift und MU1

ΔE_L	MU1
rF MU1	-1,1
rF AS MU1	-0,6

Tabelle 54: ΔE_L MU1 und roter Fleck mit MU1, mit Abdeckstift und MU1

In Abbildung 128 und Abbildung 129 findet man diesen Sachverhalt an Hand der Helligkeits– bzw. sRGB–Kurven bei 45° Winkel zur Lichtquelle dargestellt.

Da die XYZ–Farbkoordinaten von Make Up 2 mit der kalibrierten Strahldichteoptik nicht mehr gemessen wurden, werden die Vergleichswerte der Camera Werte hier nicht separat

angeführt, sondern nur die Ergebnisse für den Farbabstand, die Farb– und die Helligkeitsänderung von rotem Fleck mit und ohne Abdeckstift und Make Up 2 dargestellt.

	MU2		
	ΔE_{Lab}	ΔE_{ab}	ΔE_L
rF + MU2	9,6	9,4	1,9
rF + AS + MU2	3,7	3,3	1,7

Tabelle 55: ΔE_{Lab}, ΔE_{ab}, ΔE_L roter Fleck mit/ohne Abdeckstift und MU2

Diese Werte bestätigen das Ergebnis, das an den Helligkeitskurven in Abbildung 130 und den sRGB – Kurven in Abbildung 131 zu finden ist. Der Abdeckstift auf einer roten Störstelle aufgetragen, lässt diese unter Make Up 2 verschwinden.

Ergebnis: An den Lab–Farbkoordinaten ist ebenfalls ablesbar, dass die Verwendung des Abdeckstiftes zu einer Verbesserung des Farbeindrucks eines Beobachters einer Störstelle mit ihrer Umgebung kommt, wenn das Make Up nicht deckfähig genug ist. Für das helle Make Up 2 wird diese Verbesserung deutlich.

6.5.5.16 Anschluss der Camera Werte an die Werte der Strahldichteoptik

In Tabelle 56 sind die korrespondierenden Messungen der beiden Experimente miteinander verglichen. Da die Aufbauten in Bezug auf die Lichtquelle nicht äquivalent waren (z.B. lag Lichtquelle, Detektor und Objekt bei der SDO–Messung in einer Ebene) kommt es zu einer Helligkeitsänderung. Die Farbänderung ist jedoch in allen Fällen für einen Beobachter nicht erkennbar.

Verglichene Messungen		Lab - Canon			Lab - SDO			ΔE_x Messungen		
SDO	Camera	**L**	**a**	**b**	**L**	**a**	**b**	ΔE_{Lab}	ΔE_{ab}	ΔE_L
gr-E 45 0	rF AS MU1	42,4	10,8	20,7	61,6	12,1	19,9	19,2	1,5	-19,1
n-E 45 0	MU1 45 0	41,9	11,0	21,2	64,0	11,5	21,2	22,1	0,5	-22,1
Pet n	PET1	63,9	-2,2	4,1	81,3	-1,1	2,4	17,5	2,0	-17,4
Opdi	Opdi	100,0	0,0	0,0	100	0	0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 56: Farbabstand, Farbänderung und Helligkeitsänderung SDO - Camera

Ergebnis: Die Vergleiche der Ergebnisse, die mit der Strahldichteoptik gemessen wurden, mit denen, die durch die Aufnahmen mit der Camera zustande kamen, zeigen, dass die Messungen in Bezug auf die Farbänderungen (grau hinterlegt) nahtlos aneinander anschließen und eine durchgehende Kalibrierung aller Experimente bis auf die Helligkeit gewährleistet ist.

6.6 Abschätzung der Messunsicherheit

Für die Messungen mit dem Spektrophotometer in Verbindung mit der Ulbrichtkugel oder der Strahldichteoptik ergibt sich auf Grund der Messaufbauten, der für die Aufzeichnung mit der Software gewählten Schrittweite und Bandbreite und der Kalibrierung des Messaufbaus eine Messunsicherheit von etwa ± 15 %.

Die Messunsicherheit für die Ergebnisse des Experiments mit der Digitalcamera liegen im Bereich von ± 15% - 20 % und sind auf Unsicherheiten beim Weißabgleich und der Mittelung der einzelnen Pixel im sRGB–Farbraum zurückzuführen.

7 Theoretische Modellierung

Für die theoretische Modellierung wurde ein bereits vorhandenes Modell verwendet, das bis auf die Größenordnungen große Ähnlichkeiten mit der Problemstellung des Aussehens von Haut mit und ohne Make Up hat.

Die gegebene Problemstellung ist vergleichbar mit der Situation der Einstrahlung von Sonnenlicht auf die Erdatmosphäre. Licht, das von der Sonne auf die Atmosphäre trifft, wird teilweise von den Wolken in der Atmosphäre reflektiert bzw. den Partikeln in der Atmosphäre gestreut, teilweise dringt es ein und wird an der Erdoberfläche reflektiert oder von dieser absorbiert und in Form von elektromagnetischen Wellen einer längeren Wellenlänge wieder in Richtung Weltall abgegeben. Diese Vorgänge werden recht gut mit meteorologischen Programmen modelliert, die die einzelnen Faktoren, wie Aufbau der Atmosphäre, enthaltene Aerosole und deren Eigenschaft, Licht zu streuen, Erdoberflächenbeschaffenheit, Spektrum der auftreffenden Strahlung, etc. in die Berechnungen mit einbeziehen. Im aufgestellten Modell entsprechen das Make Up der Atmosphäre und die Haut der Erdoberfläche.

Zur Modellierung von Aerosolen bzw. verschiedenen Sichtbedingungen in der Atmosphäre stehen verschiedene Softwareanwendungen zur Verfügung. Eine dieser Anwendungen ist SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer[381]). Da in SBDART viele Faktoren eingehen, die speziell für die Situationen in der Atmosphäre konzipiert sind (z.B. thermische Veränderungen) und die darin vorgegebene Bodenbeschaffenheiten eine Modellierung der Reflexion der Haut und die im Make Up eingebetteten reflektierenden Plättchen nicht einfach zulassen, wurde eines der Module, das in SBDART inkludiert ist, nämlich DISORT[382] für die Modellierung herangezogen. DISORT ist ein Fortran–Programm zur Behandlung von Strahlungstransfer in planparallelen Medien (siehe Abschnitt 9.7).

In diesem Abschnitt wird das Modell beschrieben, das angibt, wie sich Licht verhält, das auf mit Make Up bedeckte Haut fällt. Es werden die einzelnen Größen beschrieben, die in DISORT Eingang finden, und die Experimente, mit denen sie ermittelt werden. Es wird auf das Ergebnis der Modellierung eingegangen und der Vergleich mit den experimentellen Daten durchgeführt. Abschließend sollen Simulationen durchgeführt und präsentiert werden, die mit Hilfe des erstellten Modells und neu gewählten Parametern ein „verbessertes theoretisches Make Up“ konzipieren.

7.1 Modellbeschreibung

Das Modell besteht aus der Haut, auf die eine Schicht Make Up aufgetragen ist. Das Licht, das auf die Oberfläche des Make Up auftrifft, wird teilweise nach dem Reflexionsgesetz und teilweise diffus reflektiert (siehe Abbildung unten). Ein gewisser Anteil des Lichts kann in das Make Up eindringen, innerhalb des Make Up kommt es zu Lichtstreuung. An der Grenze zur Haut finden wieder Reflexions– und Transmissionsvorgänge statt. Ein Teil des Lichts, das in die Haut eindringen konnte, wird in dieser in Rückwärtsrichtung zurückgestreut und kann die Haut wieder in Richtung Make Up verlassen.

[381] Vgl. URL http://www.dca.iag.usp.br/www/material/satelite/manual_sbdart.pdf [13.10.2010].
[382] Vgl. Stamnes (2000).

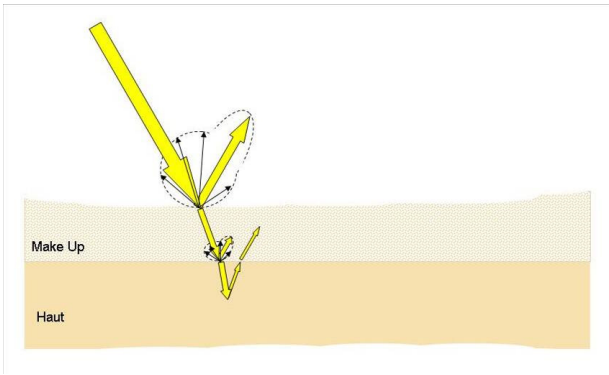


Abbildung 132: Modellbeschreibung Wechselwirkung Licht – Make Up – Haut

Die Frage die mit Hilfe von DISORT beantwortet werden soll, ist, wie viel Licht wird vom Make Up reflektiert, wie viel kann eindringen und wie viel erreicht die Haut und wird zurückreflektiert bzw. nach Streuung in der Haut wieder in das Make Up zurückgestreut.

7.2 Herstellen der Vorbedingungen

In DISORT gehen verschiedene Parameter ein. Einige dieser Parameter wurden experimentell ermittelt, einige über Berechnungen mit Hilfe von wb4.exe (siehe Abschnitt 9.6).

Folgende Liste enthält die Parameter, die in DISORT Eingang finden und wie sie ermittelt wurden:

- Das einfallende Licht wurde für die Modellierung mit DISORT mit einer Intensität von 1 mW m^{-2} nm^{-1} angenommen.
- Die spektrale Volumenstreufunktionen, Streukoeffizienten, Asymmetriefaktoren, Phasenfunktionen und Legendrepolynome für die Phasenfunktionsapproximation wurden mittels wb4.exe ermittelt. Partikelgrößen- und Partikeldichteverteilungen stammen aus Elektronenmikroskopaufnahmen des Make Up.
- Die Reflektivität der Haut konnte bei den optischen Dicken, die für das Make Up ermittelt wurden, vernachlässigt werden, da in dieser Tiefe nahezu kein direkter und diffuser Fluss nach unten vorhanden ist.
- Die Single Scattering Albedo (siehe Abschnitt 3.1.7) wurde mit Formel 16 aus dem Extinktionskoeffizienten, der über Messungen mit einem Langwegphotometer und aus dem Absorptionskoeffizienten, der mit der Methode der integrierenden Platte gemessen wurde, bestimmt.
- Die vertikale optische Dicke wurde über die Extinktionsmessung mit dem Langwegphotometer ermittelt.

Die Ausgabewerte von DISORT umfassen die direkten und diffusen Fluss– und Intensitätsverteilungen im planparallen Medium in verschiedenen vom User vordefinierten optischen Tiefen und an der Oberfläche. Sie werden im Verhältnis zur einfallenden Strahlung ausgegeben.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Experimente zur Ermittlung der oben genannten Parameter, die Modellierung des Make Up–Haut Modells und die Simulationen für die Konzeption von „theoretischem Make Up mit verbesserten Eigenschaften.

7.2.1 Partikelgröße und Größenverteilung

Um Informationen über Größe und Größenverteilung der Partikel in den einzelnen Produkten zu bekommen wurden Messungen mit einem Lichtmikroskop und mit einem Elektronenmikroskop durchgeführt. Unter dem Lichtmikroskop war es möglich einen Eindruck von der Farbe der Partikel in den Substanzen zu erhalten.

Die in den folgenden Abschnitten angegebenen Vergrößerungen beziehen sich auf die Originalbilder des Licht– bzw. Elektronenmikroskops. Für die wiedergegebenen Abbildungen sind die Maßstabsbalken im jeweiligen Bild für die exakten Größenverhältnisse heranzuziehen.

7.2.1.1 Messung mit dem Lichtmikroskop Micromanipulator M205

Die Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop, wurden mit einem Micromanipulator M205 der Firma Suruga Seiki, Japan, (kurz Mikromanipulator) durchgeführt. Dieser Mikromanipulator ermöglichte eine bis zu fünfzigfache Vergrößerung der untersuchten Produkte. Der Manipulator ist mit einer CCD Camera ausgestattet und erlaubt die Speicherung der am Bild dargestellten vergrößerten Objekte. Die Probe wird über Motoren bewegt. Zum Darstellen der vergrößerten Objekte diente SURUGA Manipulator, eine Software, die unter Windows XP oder Vista läuft (siehe Abbildung unten).

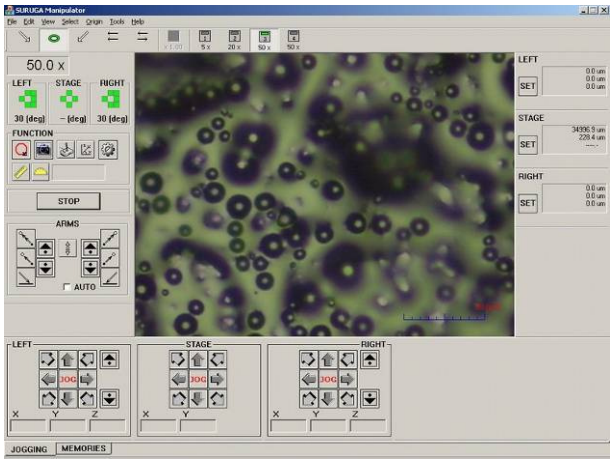


Abbildung 133: Software Suruga Micromanipulator

Die Produkte wurden auf Carbonprobenhalter, wie sie in der Elektronenmikroskopie verwendet werden, aufgetragen. Diese bestehen aus einer runden Metallplatte mit Rille, damit sie mit einer Pinzette besser gefasst werden können. An der Unterseite ist ein Dorn, mit dem man sie in die entsprechende Halterung am Mikroskop steckt. Auf der Oberseite der Metallplatte befindet sich eine klebrige Kontaktfolie (Sticky Carbon), mit der die Objekte aufgenommen werden.



Abbildung 134: Carbonprobenhalter mit Make Up

Zum Applizieren der Produkte auf den Objektträgern, wurden diese auf einem Papiertaschentuch dick aufgetragen und dann der Objektträger mit der Kontaktfolie hineingetaucht. Je nach Viskosität und Klebrigkeit haben sich die Produkte auf der Folie gleichmäßig hoch oder in unterschiedlicher Höhe verteilt. Das wurde an den Aufnahmen mit dem Mikromanipulator ersichtlich – die verschiedenen betrachteten Stellen des Objektträgers mussten auf Grund der Höhenunterschiede jeweils wieder scharf gestellt werden.

Es wurden Aufnahmen in mehreren Vergrößerungen eines Produkts von der allgemeinen Distribution der darin befindlichen Partikel gemacht. Dazu wurden unterschiedliche Stellen des Objektträgers fokussiert. Danach wurde mittels der Software die Größe einzelner Partikel in der größten möglichen Vergrößerung festgestellt.

Die Ergebnisse der einzelnen Mikroskopaufnahmen werden für jedes Produkt vorgestellt.

7.2.1.1.1 Faltenauffüller 1

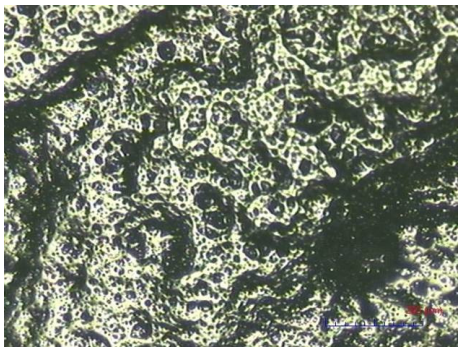


Abbildung 135: Faltenauffüller 1, 5-fache Vergrößerung

Abbildung 135 zeigt die allgemeine Struktur der Substanz bei fünffacher Vergrößerung. Man erkennt eine helle Grundsubstanz, in die dunkle Objekte relativ unregelmäßig verteilt eingebettet sind.

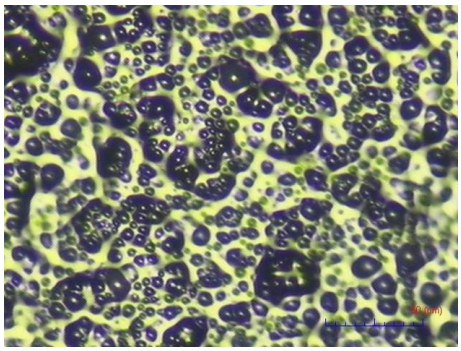


Abbildung 136: Faltenauffüller 1, 20-fache Vergrößerung

Bei zwanzigfacher Vergrößerung (siehe Abbildung oben) erkennt man den blasenartigen Aufbau der in die Grundsubstanz eingebetteten Partikel. Bei noch stärkerer Vergrößerung konnte mit SURUGA Manipulator die Größe der Partikel ermittelt werden. Dazu wird am Bildschirm mittels Maus das gewählte Partikel an gegenüberliegenden Grenzen zur Grundsubstanz markiert. Die Länge der sich ergebenden Strecke wird am Bildschirm ausgegeben.

An Hand der Aufnahmen kann man erkennen, dass die Form der meisten Partikel kugelförmig ist. Einige wenige lassen eine ellipsoide Form bzw. Ansätze von „eckigen Ausbuchtungen“ erkennen (siehe Abbildung 137).

Es waren Partikel mit 0,5 µm, 4,5 µm und bis zu 20 µm Größe erkenn- und messbar. Exemplarisch ist in Abbildung 137 die Vermessung eines Partikels mit 8,9 µm Größe abgebildet. Darunter erkennt man ein Partikel, das ungefähr20 µm groß ist.

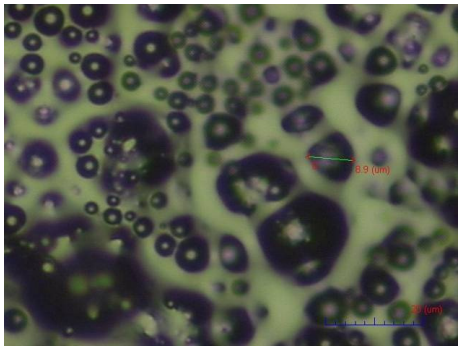


Abbildung 137: Faltenauffüller 1, 50-fach, Partikel mit 8,9 µm

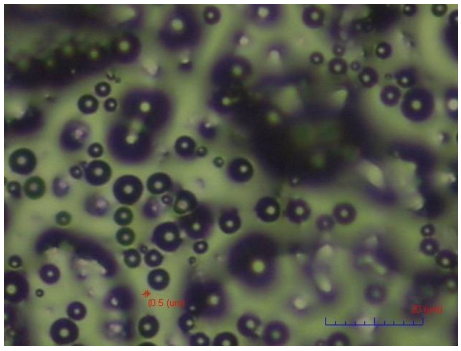


Abbildung 138: Faltenauffüller 1, 50-fach, Partikel mit 0,5 µm

Schlussfolgerungen: finden sich am Ende von Abschnitt 7.2.1.1.3. Die beiden Faltenauffüller werden dabei gemeinsam betrachtet.

7.2.1.1.2 Faltenauffüller 2

Bei fünffacher Vergrößerung zeigt dieses Produkt dunkle, kugelige Einschlüsse in der Grundsubstanz, die grünlich zu sein scheint. (siehe Abbildung 139)

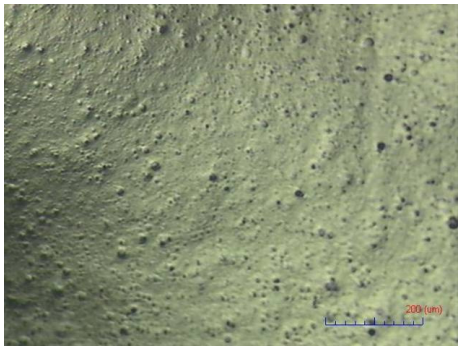


Abbildung 139: Faltenauffüller 2, 5-fache Vergrößerung

Bei weiterer Vergrößerung auf den Faktor 20 treten aus der grünlichen Grundsubstanz mehr weißliche runde Einschlüsse hervor. Es sind nur wenige dunkle, runde erkennbar (siehe Abbildung unten). Die Struktur wirkt immer noch sehr körnig.

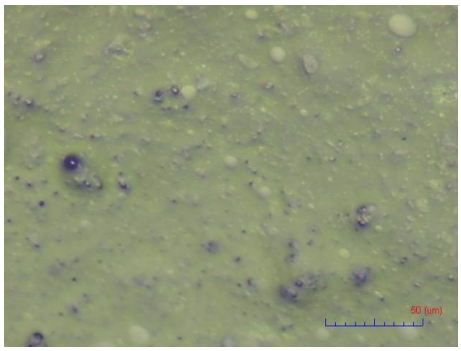


Abbildung 140: Faltenauffüller 2, 20-fache Vergrößerung

Die Vermessung der Partikel bei fünfzigfacher Vergrößerung lieferte Größen von 0,5 µm für kleinere und bis zu 8,1 µm für größere Einschlüsse. (siehe Abbildungen unten). Auch in dieser Vergrößerung wirkt die Oberfläche sehr körnig. Die Form der hellen Einschlüsse ist unregelmäßig, manche sind rund und wirken transparent (siehe Abbildung 141, rechte obere Ecke). Sie sind um die 4 µm groß. Die dunklen Einschlüsse sind größtenteils rund.

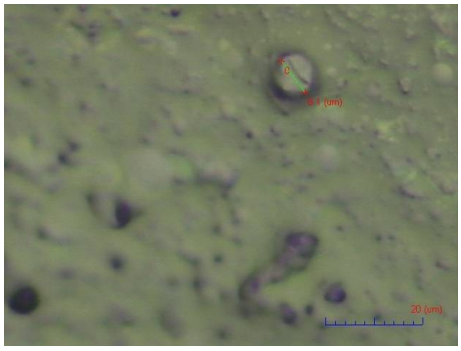


Abbildung 141: Faltenauffüller 2, 50-fach, Partikel mit 8,1 µm

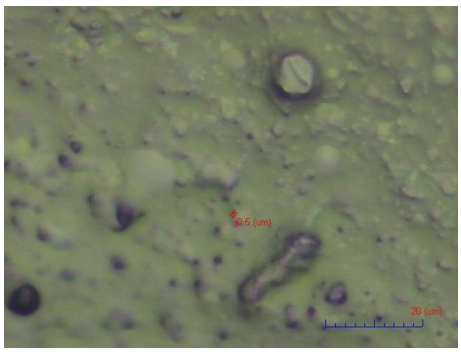


Abbildung 142:Faltenauffüller 2, 50-fach, Partikel mit 0,5 µm

Schlussfolgerungen: finden sich am Ende von Abschnitt 7.2.1.1.3. Die beiden Faltenauffüller werden dabei gemeinsam betrachtet.

7.2.1.1.3 Vergleich der beiden Faltenauffüllprodukte

Betrachtet man die Aufnahmen bei fünfzigfacher Vergrößerung von Faltenauffüller 1 und Faltenauffüller 2 (Abbildung 137 und Abbildung 141) stellt man sofort fest, dass beim ersten viele kugelförmige Partikel in der hellen, grünlich erscheinenden Grundsubstanz eingebettet

sind. Von der Volumenverteilung der beiden Substanzen im Faltenauffüller dürfte es ebenso viele dunkel erscheinende, wie hell erscheinende Anteile geben. Einige der kugelförmigen Teilchen haben eine Größe von 0,5 µ, einige von 10 µm und darüber. Der Großteil der Teilchen ist um die 4 µm groß.

Bei Faltenauffüller 2 ist bei diesen Aufnahmen das Volumen der hellen Substanz auch bei fünfzigfacher Vergrößerung bei weitem größer, als das der dunklen Einschlüsse, welche hier auch wesentlich kleiner sind. Es sind viele Teilchen mit 0,5 µm erkennbar, Das Teilchen mit 8,1 µm bildet eher die Ausnahme. Der Durchmesser des Großteils der Teilchen ist um die 4 µm und darunter (siehe Abbildung 141).

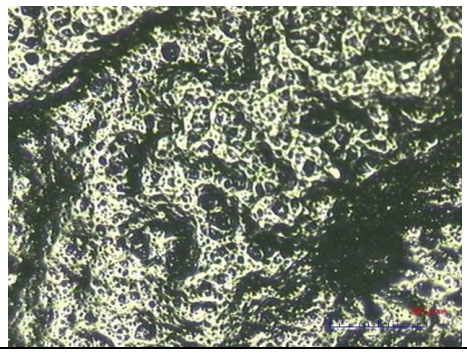
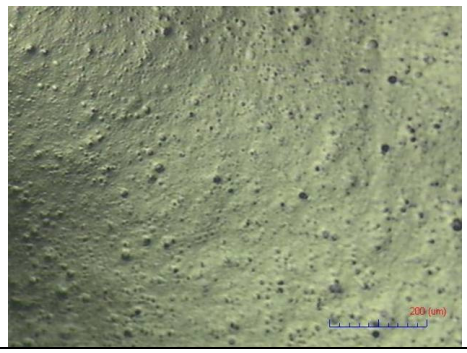
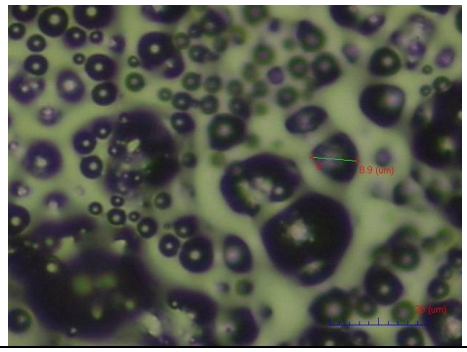
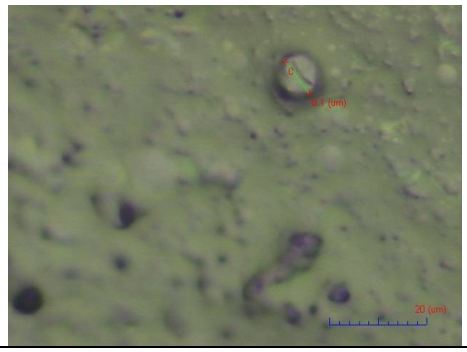
Faltenauffüller 1	**Faltenauffüller 2**
	
5-fach	**5-fach**
	
50-fach	**50-fach**

Tabelle 57: Faltenauffüller im Vergleich

Schlussfolgerung: Auf Grund der unterschiedlichen Partikelgrößen der beiden Faltenauffüller ist anzunehmen, dass sie Licht verschieden stark in gewisse Richtungen streuen. Für Faltenauffüller 1, der größere Partikel enthält, wird mehr Licht in Vorwärtsrichtung (in die Falte hinein) gestreut werden. Faltenauffüller 2, mit den Partikeln in der Größe der Lichtwellenlängen und darunter wird Licht eher nach Mie-Theorie bzw. isotrop streuen, so dass es aus der Falte wieder heraustreten kann.

7.2.1.1.4 Make Up 1

Die Mikroskopaufnahme mit fünffacher Vergrößerung zeigt eine durchgehend einheitlich gefärbte Fläche. Sie erinnert an den kristallinen Aufbau von Granit, wobei die Farbe grundsätzlich im bräunlich grünen Bereich liegt. Eingebaut sind stark irisierende, in Regenbogenfarben schillernde Teilchen (siehe unten).

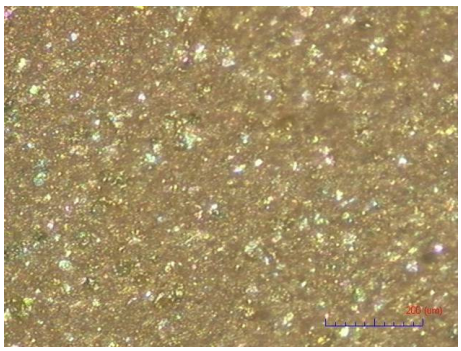


Abbildung 143: Make Up 1, 5-fache Vergrößerung

Bei zwanzigfacher Vergrößerung erkennt man, dass die schillernden Teilchen Licht sowohl im roten, im violetten und auch im blaugrünen Spektralbereich reflektieren (siehe Abbildung 144).

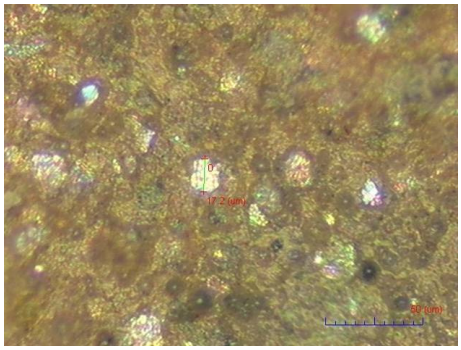


Abbildung 144: Make Up 1, 20-fache Vergrößerung

Die Teilchen sind bei fünfzigfacher Vergrößerung als kantige Vielecke mit einer Größe von 12 – 20 µm erkennbar. Es finden sich aber auch kleinere, runde Teilchen mit einer Größe zwischen 1 – 2 µm in der Substanz (siehe Abbildung unten).

Aus den Aufnahmen kann man schließen, dass ca. 5 – 10% der Fläche von den stark reflektierenden Teilchen abgedeckt werden.

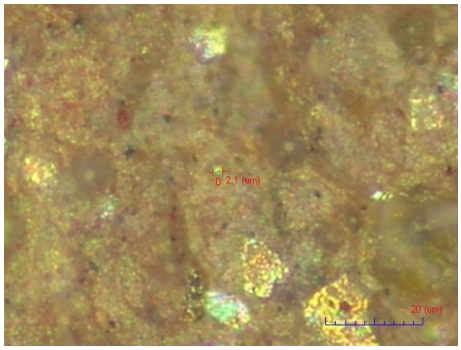


Abbildung 145: Make Up 1, 50-fach, Partikel mit 2,1 µm

Schlussfolgerung: Es sind eingebettete reflektierende Plättchen, die dazu beitragen, dass Make Up 1 Licht stark zurückreflektiert.

7.2.1.1.5 Make Up 2

Bereits bei fünffacher Vergrößerung erkennt man, dass dieses Produkt ganz anders aufgebaut ist, wie Make Up 1. Man erkennt eine helle Grundsubstanz, ähnlich wie bei den Faltenauffüllprodukten, jedoch ist hier im Gegensatz zu diesen, eine braune Substanz eingebettet, die bei dieser Vergrößerung ihrerseits sichtbare runde, dunkelbraune Elemente mit hellen Zentren enthält (siehe Abbildung 146).

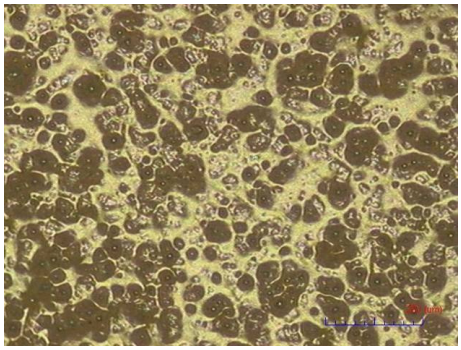


Abbildung 146: Make Up 2, 5-fache Vergrößerung

Bei weiterer Vergrößerung auf das zwanzigfache sieht man, dass die Bereiche der braun gefärbten Substanz nicht einheitlich gefärbt sind, sondern in verschiedenen Brauntönen ringartig um stark reflektierende helle Partikel angeordnet sind. Die braunen Bereiche befinden sich in einer körnigen Substanz, die sich ebenfalls aus Bestandteilen verschiedenster Farben zusammensetzt (siehe Abbildung 147).

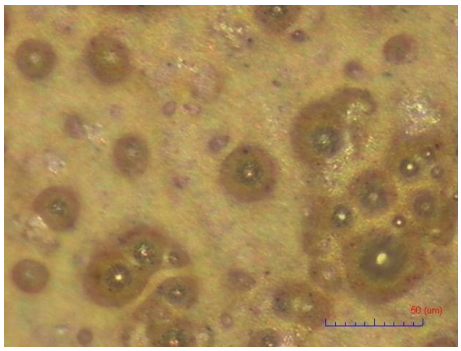


Abbildung 147: Make Up 2, 20-fache Vergrößerung

Bei fünfzigfacher Vergrößerung wird sichtbar, dass die Grundsubstanz Partikeln in der Größe von 0,4 – 2,6 µm enthält (siehe Abbildung 148). Teilweise sind sie sehr dunkel gefärbt, teilweise irisieren sie stark und schillern in Regenbogenfarben.

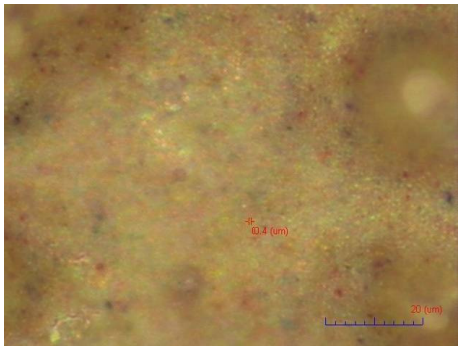


Abbildung 148: Make Up 2, 50-fach, Partikel von 0,4 µm

Leider war mit dem Lichtmikroskop keine schärfere Darstellung der Oberfläche dieses Produkts möglich.

7.2.1.1.6 Vergleich der Aufnahmen von Make Up 1 und Make Up 2

Hier noch einmal die beiden Make Up Produkte sowohl bei fünffacher, als auch bei fünfzigfacher Vergrößerung nebeneinander:

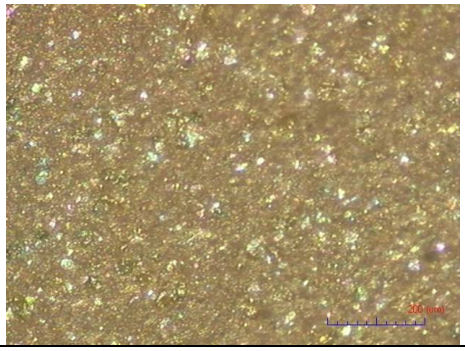
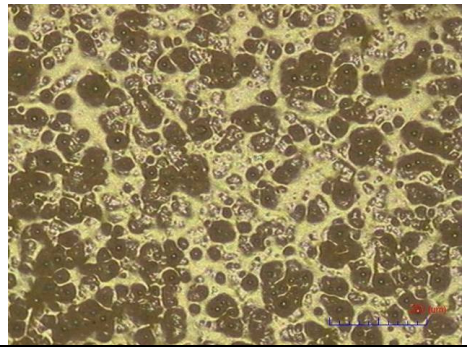
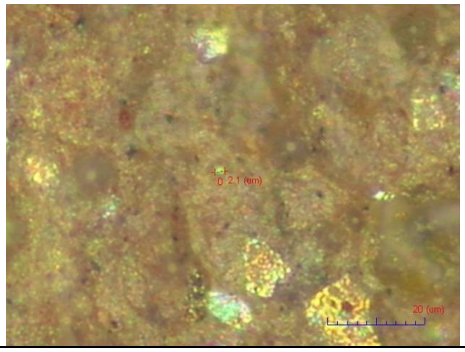
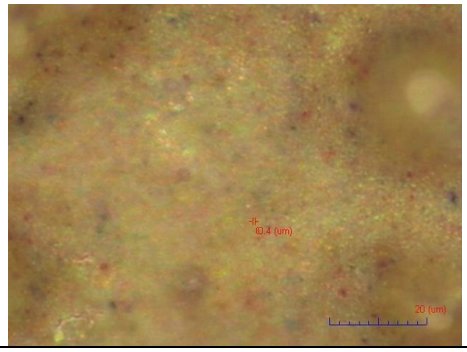
Make Up 1	**Make Up 2**
	
5-fach	**5-fach**
	
50-fach	**50-fach**

Tabelle 58: Make Ups im Vergleich

Deutlich ist bei fünffacher Vergrößerung erkennbar, dass sich die Produkte in ihrem Aufbau unterscheiden. Die kristallin wirkende Oberfläche von Make Up 1 und die irgendwie blasenförmig wirkende von Make Up 2.

Bei fünfzigfacher Vergrößerung sieht man, dass beide Produkte runde, dunkelbraune Partikel in der Größe von 0,5 µm enthalten. Das sind höchstwahrscheinlich Eisenpartikel, die in Make Up Produkten zum Einsatz kommen, um ihnen eine braune Färbung zu verleihen. In beiden Produkten sind auch stark reflektierende runde Partikel enthalten, wobei die in Make Up 2 von der Größe her halb so groß sind, wie die in Make Up 1. Bei beiden findet man helle, runde Objekte, die dunkel umrahmt sind. Bei Make Up 1 sind die irisierenden Partikel eindeutig Vielecke, die flach sein zu scheinen. Bei Make Up 2 kann man den Umriss nicht eindeutig erkennen. Das könnte daran liegen, dass diese Partikel nicht flach sind und daher die sie umgebenden Teile des Produkts auch auf den Partikeln zum liegen kommen.

Schlussfolgerung: Die Lichtmikroskopaufnahmen lassen darauf schließen, dass Make Up 1 Licht stärker reflektiert.

7.2.1.1.7 Abdeckstift

Bei fünffacher Vergrößerung erkennt man Konglomerate von vielen, verschieden gefärbten kleineren Teilchen, die wie dunkle Inseln in einer hellgrünen, mit hellen, reflektierenden Flecken durchzogenen Substanz liegen. Die gleichen reflektierenden Flecken sind auch in den dunkleren Bereichen zu erkennen (siehe unten).

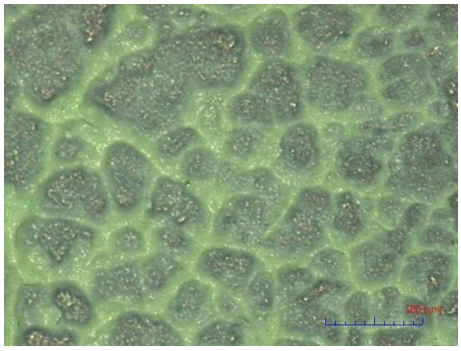


Abbildung 149: Abdeckstift, 5-fache Vergrößerung

Die dunklen Bereiche treten bei zwanzigfacher Vergrößerung stärker in den Vordergrund, die hellgrünen Bereiche dazwischen sind nicht scharf gestellt. Man sieht deutlich, dass es sich um eine Ansammlung vieler, kleiner Teilchen in den verschiedensten Farben handelt (siehe Abbildung 150).

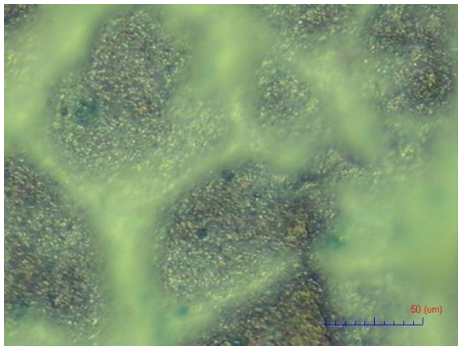


Abbildung 150: Abdeckstift, 20-fache Vergrößerung

Bei fünfzigfacher Vergrößerung ist die Größe der einzelnen Teilchen mit um die 0,4 µm auszumachen. Sie dürften eher rund sein und verschieden gefärbt (siehe Abbildung 151). Die Aufnahme zeigt viele hell erscheinende Teilchen, die Licht offensichtlich gut reflektieren. Leider ist nicht erkennbar, welche Oberfläche die Partikel haben.

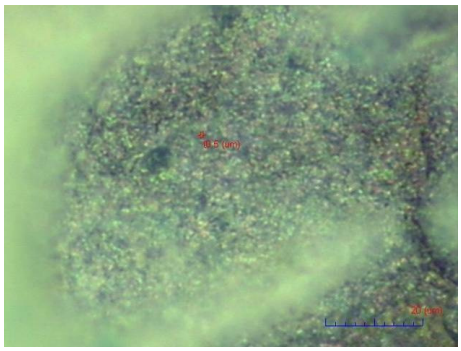


Abbildung 151: Abdeckstift, 50-fach, Partikel mit 0,5 µm

Schlussfolgerung: Partikel im Abdeckstift liegen im Bereich der Lichtwellenlänge und zeigen eine grüne Färbung.

7.2.1.2 Messung mit dem Elektronenmikroskop

Diese Aufnahmen wurden mit einem Elektronenmikroskop 6490LV hergestellt von der Firma Jeol durchgeführt.

Von der Untersuchung der Produkte mittels Elektronenmikroskop erwartete ich mir eine bessere Einschätzung der Größe und der Form der in ihnen enthaltenen Partikel, als mit dem Lichtmikroskop möglich war. Die Aufnahmen haben es ermöglicht, die Form, Größe und Anzahl der Teilchen zu bestimmen.

Die Proben waren bereits für die Lichtmikroskopaufnahmen auf speziellen Carbonprobenhaltern (kurz Sticky Carbon) aufgebracht worden (siehe Abbildung 134). Diese Probenhalter wurden für die Elektronenmikroskopaufnahmen auf speziellen Metallzylindern montiert und dann auf einem für sechs Proben vorgesehenen Rondell befestigt (Abbildung 152und Abbildung 153) und damit im Elektronenmikroskop platziert (siehe Abbildung 154).



Abbildung 152: Beladung des Carbonprobenhalters des Elektronenmikroskops

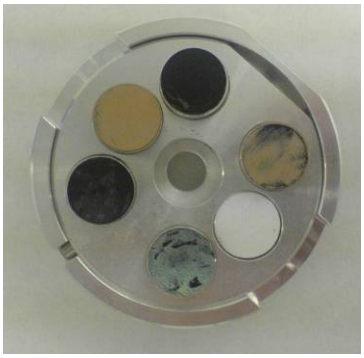


Abbildung 153: Probenhalter des Elektronenmikroskops

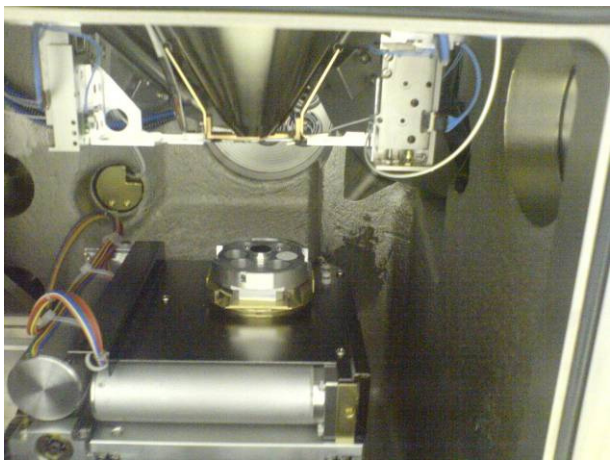


Abbildung 154: Proben im Elektronenmikroskop

Mittels Computer wurden nun die einzelnen Proben auf dem Rondell angesteuert. Die Untersuchung fand bei 10kV Beschleunigungsspannung und verschiedenen Vergrößerungen statt. Die Aufnahmen wurden elektronisch als Bitmap gespeichert und werden im Folgenden besprochen.

Die Steuerungssoftware für das Elektronenmikroskop erfasst die Einstellungen des Mikroskops für jede Aufnahme in einer Textdatei. So sind allgemeine Angaben, wie Datum und Zeit, ebenso wie die für die Aufnahmen spezifischen Daten, wie die verwendete Beschleunigungsspannung, die Vergrößerung und die Position des betrachteten Bereichs auf dem Probenhalter jederzeit auslesbar.

Die Ergebnisse der einzelnen Elektronenmikroskopaufnahmen werden im folgenden Abschnitt besprochen.

7.2.1.2.1 Faltenauffüller 1

Auf den Aufnahmen erkennt man deutlich die kugelförmige Form der in der Substanz enthaltenen Partikel. Es handelt sich um zwei Arten, die jeweils in verschiedenen Größen vorhanden sind. Die ersteren, von der Menge her stärker vertretenen, sind sphärisch und zwischen 2 µm und 8 µm groß (Abbildung 157 und Abbildung 158), die letzteren haben zusätzlich noch eine Art Aufsatz aus einer hellen Substanz, die kegelförmig zu sein scheint, diese sind zwischen 5 µm und 10 µm im Durchmesser.

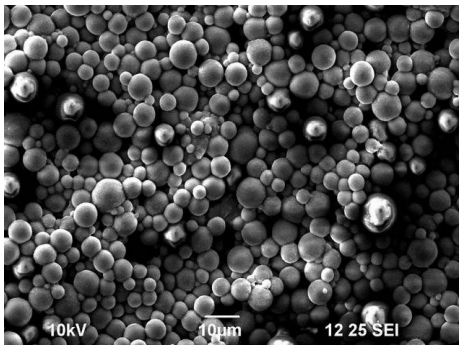


Abbildung 155: Faltenauffüller 1, 600-fache Vergrößerung

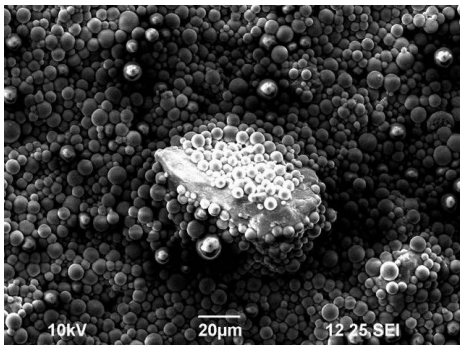


Abbildung 156: Faltenauffüller 1, 1000-fache Vergrößerung

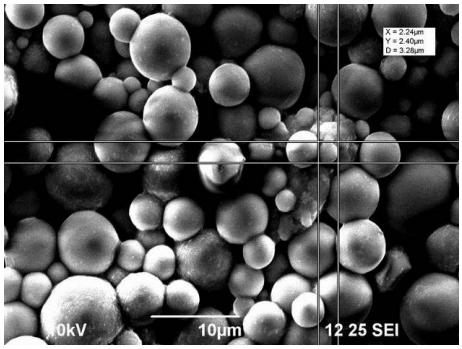


Abbildung 157: Faltenauffüller 1, 2500-fach, Partikel von 3,28 µm

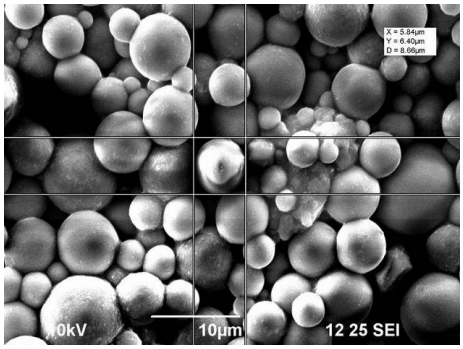


Abbildung 158: Faltenauffüller 1, 2500-fach, Partikel von 8,66 µm

Schlussfolgerung: Die Partikel im Faltenauffüller werden von ihrer Größe her Licht eher in Vorwärtsrichtung streuen.

7.2.1.2.2 Faltenauffüller 2

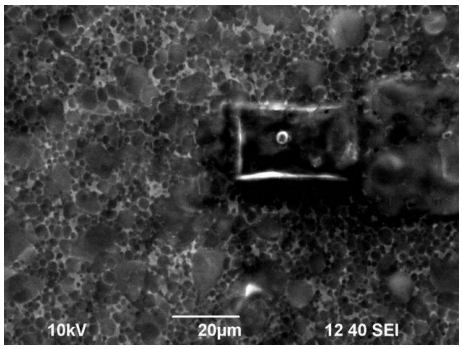


Abbildung 159: Faltenauffüller 2, 950-fache Vergrößerung

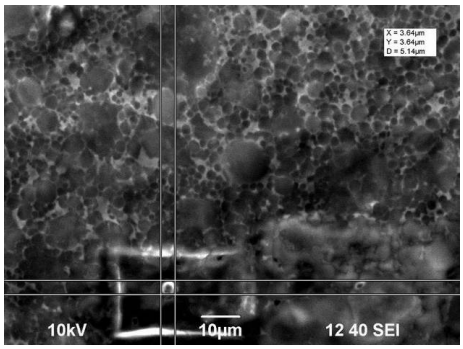


Abbildung 160: Faltenauffüller 1, 950-fach, Partikel von 5,14 µm

Leider war es für diese Probe nicht möglich, scharfe Aufnahmen zu erhalten. Das lag daran, dass das Fokussieren dadurch erschwert wurde, dass das Produkt nicht gleichmäßig aufgetragen war und an manchen Stellen große Erhebungen bildete. Auf den Aufnahmen scheint das Sticky Carbon des Carbonprobenhalters deutlich durch das Produkt durch. In einem Bereich wurde durch die verwendete Spannung die Substanz des Produkt verdampft und es wurde hier ein Partikel sozusagen „freigelegt“, das eine Größe von 5,14 µm im Durchmesser hatte (siehe Abbildung 160).

7.2.1.2.3 Make Up 1

Die Substanz enthält sphärische Partikel mit 2 bis 10 µm Durchmesser, eingebettet in ein Material aus sphärischen (0,1 – 0,7 µm Durchmesser) und nadelförmigen Teilchen (0,5 – 1 µm lang, 0,1 µm breit). In die Grundsubstanz sind schieferartige, flache Partikel mit eingebettet.

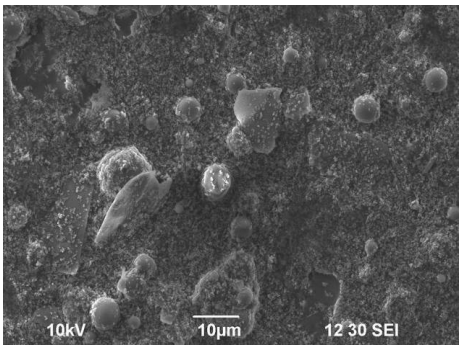


Abbildung 161: Make Up 1, 1300-fache Vergrößerung

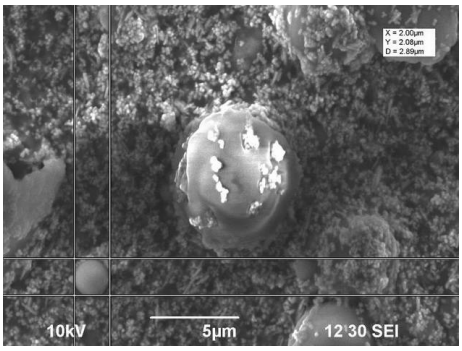


Abbildung 162: Make Up 1, 5000-fach, Partikel von 2,8 µm

Schlussfolgerung: Das Produkt enthält sphärische Teilchen, die im Vergleich zur Lichtwellenlänge sehr groß sind (Faktor 10^3). Teilchen in dieser Größe streuen Licht in Vorwärtsrichtung, also in Richtung Haut. Der Hauptanteil der Partikel besteht jedoch aus der grießartigen Substanz, deren Teilchen von der Größenordnung her im Lichtwellenlängenbereich liegen. Sie streuen das Licht gemäß Mie–Theorie.

7.2.1.2.4 Make Up 2

Das Produkt zeichnet sich dadurch aus, dass einzelne verstreut liegende sphärische Partikel in einem Grundmaterial aus teils sphärischen, teils nadelförmigen Teilchen eingebettet sind (siehe Abbildung 163). Außerdem sind auch hier Teilchen erkennbar, die unregelmäßig abgerundeten Kanten haben und sehr flach zu sein scheinen, sie erinnern in ihrer Form und Anordnung an Schiefer. Die Größe der Teilchen der Grundsubstanz bewegt sich im 0,1 µm Bereich, was bei 10000facher Vergrößerung sichtbar wird (siehe Abbildung 166). Die Nadeln sind zwischen 0,2 – 15 µm lang und 0,2 µm breit (siehe Abbildung 166).

Für die Nadeln war im Rahmen der einfachen Modellierung kein zweckmäßiger Ansatz möglich.

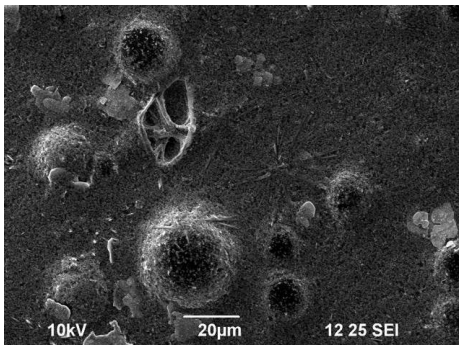


Abbildung 163: Make Up 2, 800-fache Vergrößerung

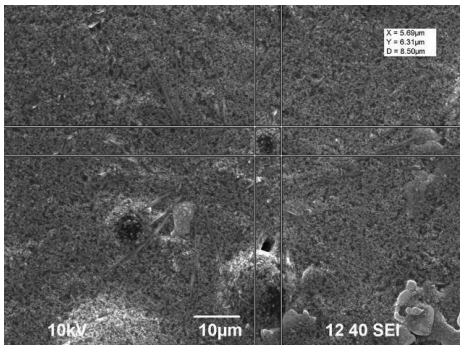


Abbildung 164: Make Up 2, 1300-fach, Partikel mit 8,5 µm

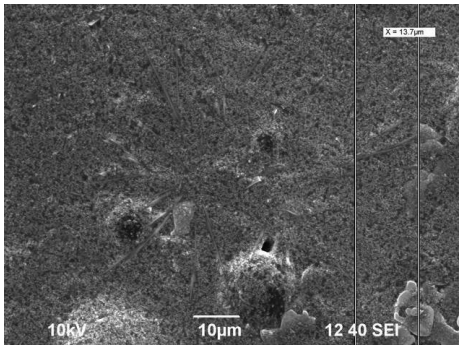


Abbildung 165: Make Up 2, 1300-fach, Partikel von 13,7 µm

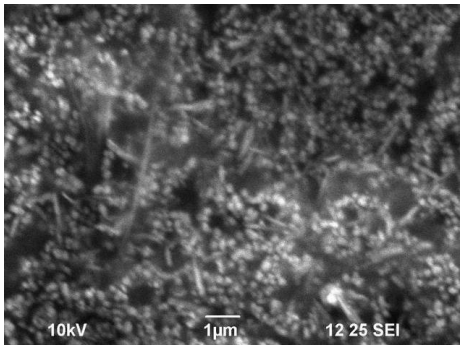


Abbildung 166: Make Up 2, 10000-fache Vergrößerung

Schlussfolgerung: Die Partikel in der grießartigen Substanz in Make Up 2 werden auf Grund ihrer Größe Licht isotrop streuen. Es sind wenige größere Partikel erkennbar, die Licht vorwärts streuen würden.

7.2.1.2.5 Abdeckstift

Die Oberfläche des Produkts sieht auf dem Sticky Carbon wie eine Wasseroberfläche gewellt aus, das ist besonders gut auf Abbildung 167 erkennbar. Bei Vergrößerung erkennt man eingeschlossene Partikel von 0,1 µm und darüber. Auch in dieser Substanz sind nadelförmige Partikel in einer Länge von 1 µm und Breite von 0,1 µm enthalten (Abbildung 169). Ein Teil der Substanz war günstig auf einer freien Fläche des Sticky Carbon verteilt, und konnte so auf schwere Elemente untersucht werden (Elektronenmikroskop Backscatterimage). Je heller die angezeigten Objekte in der Aufnahme sind, desto schwerer ist das Element, aus dem sie bestehen (siehe Abbildung 170).

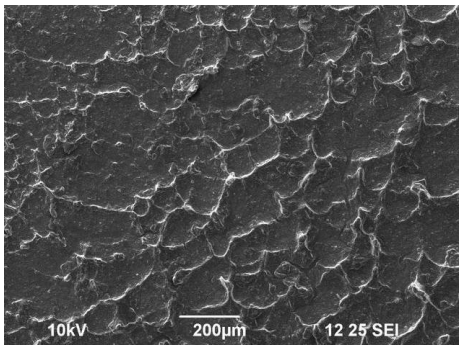


Abbildung 167: Abdeckstift, 85-fache Vergrößerung

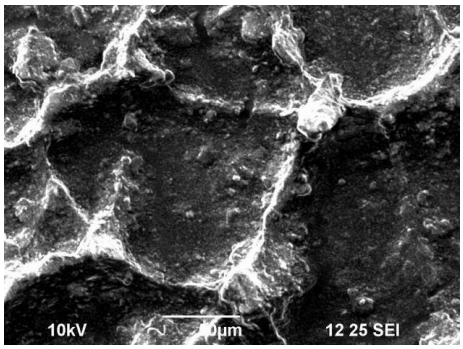


Abbildung 168: Abdeckstift, 430-fache Vergrößerung

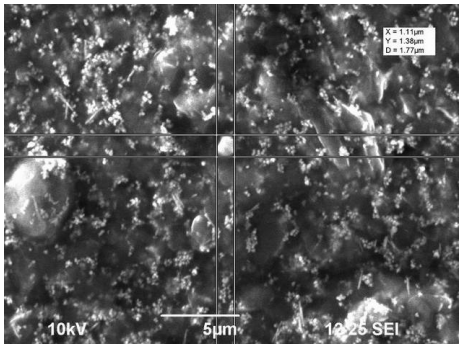


Abbildung 169: Abdeckstift, 4500-fach, Partikel mit 1,77 µm

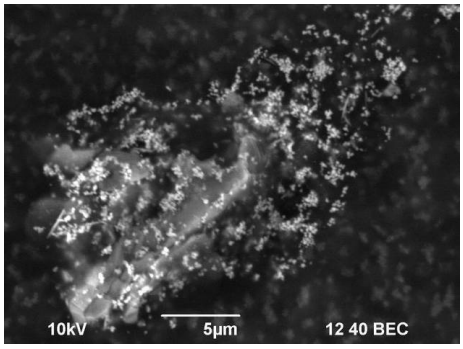


Abbildung 170: Abdeckstift, Messung der schweren Elemente

Schlussfolgerung: Die im Abdeckstift vorhandenen Partikel unter der Größe der Lichtwellenlänge lassen darauf schließen, dass Licht nach der Raleigh-Theorie gestreut wird.

7.2.1.3 Partikelgröße und Größenverteilung der Produkte

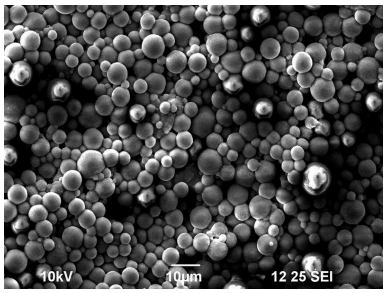
Zur Feststellung der Partikelgröße und Größenverteilung wurden die Elektronenmikroskopaufnahmen herangezogen. Je nach Partikelart, die bei den einzelnen Produkten sehr unterschiedlich war, wurden die Partikel in Größenklassen eingeteilt, in diesen die Anzahl gezählt und die Fläche bestimmt, auf denen sich die Partikel befanden. Wie im Detail vorgegangen wurde, wird im folgenden Abschnitt beschreiben und mit den Ergebnissen der Auswertungen für die einzelnen Produkte präsentiert.

7.2.1.3.1 Faltenauffüller 1

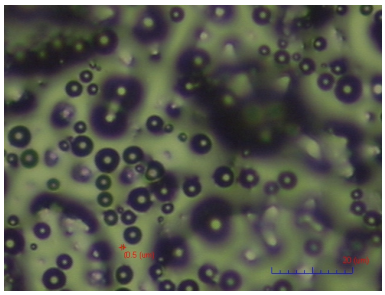
Die Substanz von Faltenauffüller 1 bestand aus kugelförmigen Teilchen mit und ohne kegelförmige Aufsätze. Auf der Elektronenmikroskopaufnahme wurden vier Flächen gekennzeichnet (je 400 µm²), auf denen die Partikel mit ihrer Größe und Anzahl bestimmt wurden. Lag ein Partikel zu mehr als 50% innerhalb des gekennzeichneten Bereiches wurde es mitgezählt.

Die Gesamtfläche, die auf der Aufnahme abgebildet war, betrug 13000 µm². Auf dieser Fläche befanden sich 10 kugelförmige Partikel mit dem kegelförmigen Aufsatz.

Faltenauffüller 1



Elektronenmikroskopaufnahme



Lichtmikroskopaufnahme

Die Ergebnisse der Zählung für eine Fläche von insgesamt 1600 µm² sind in Tabelle 59 und in Abbildung 171 dargestellt. Die Partikel sind mit ihrer Größe und der Anzahl in der jeweiligen Stichprobe eingetragen.

	Stichprobe				
Größe [µm]	**1**	**2**	**3**	**4**	**Summe**
0,5	0	0	0	1	1
1	4	3	0	0	7
1,5	2	0	0	2	4
2	3	1	0	0	4
2,5	1	4	1	1	7
3	2	2	1	2	7
3,5	1	1	5	0	7
4	1	1	4	2	8
4,5	3	1	4	1	9
5	4	2	2	1	9
5,5	1	2	1	1	5
6	3	1	1	1	6
6,5	0	1	4	0	5
7	2	0	0	1	3
7,5	1	1	0	2	4
8	1	0	0	0	1
8,5	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1

Tabelle 59: Partikelgrößenverteilung Faltenauffüller 1

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, sind die Partikel von der Größe her auf der Fläche nicht gleichmäßig verteilt. Nimmt man die Gesamtheit der gezählten Partikel ergibt sich ein Mittelwert für den Durchmesser der Teilchen von 4,2 ± 2 µm.

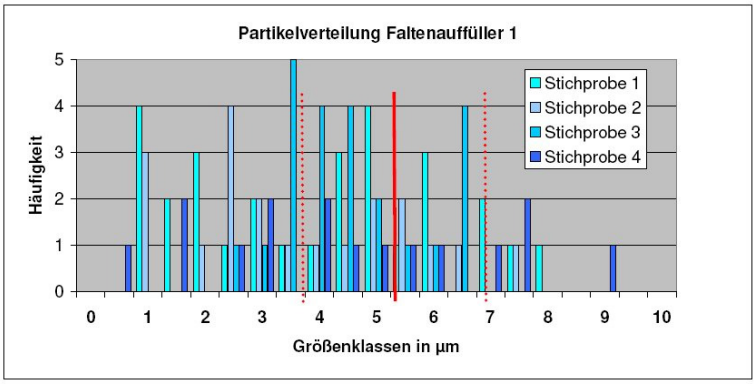


Abbildung 171: Partikelgrößenverteilung Faltenauffüller 1

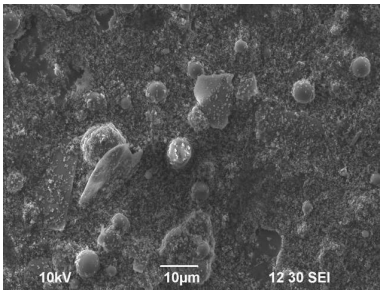
7.2.1.3.2 Faltenauffüller 2

Die Elektronenmikroskopaufnahme von Faltenauffüller 2 erlaubte keine Auszählung der Teilchen.

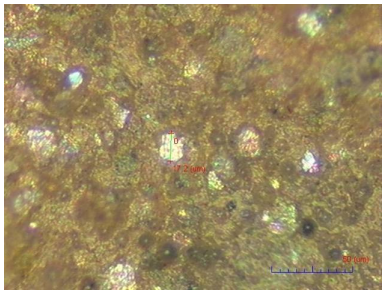
7.2.1.3.3 Make Up 1

Die Elektronenmikroskop Aufnahme von Make Up 1 ließ erkennen, dass sich das Produkt aus drei verschiedenen Arten von Partikel in unterschiedlichen Größen zusammensetzt. In einem grießartigen Untergrund sind flache kantige und runde Partikel eingebettet. An Hand der Lichtmikroskopaufnahme war erkennbar, dass die kantigen plättchenartigen Partikel das Licht stark reflektierten.

Make Up 1



Elektronenmikroskopaufnahme



Lichtmikroskopaufnahme

Die Gesamtfläche der Aufnahme betrug 6820 µm². Der Durchmesser der grießartigen Partikel betrug 0,37 µm, ihre Anzahl wurde an Hand von zwei Stichproben mit einer Fläche von je 13,7 µm² bestimmt. Auf diesen Flächen waren jeweils 44 dieser Partikel vertreten.

Die Gesamtanzahl der kugelförmigen Partikel auf einer Fläche von 4938 µm² betrug 23. Ihre Größenverteilung ist in Tabelle 60 dargestellt. Sie zeigt den mittleren Durchmesser (mD) und die Anzahl der mit diesem Durchmesser vorhandenen Teilchen.

Ø Durchmesser [µm]	Anzahl
1	8
3	6
5	6
6,5	2
7	0
9	1

Tabelle 60: Anzahl und Größe der runden Partikel in Make Up 1

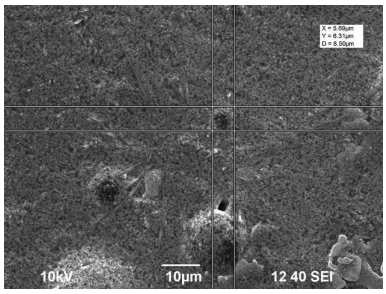
Der Mittelwert über den Durchmesser aller kugelförmigen Teilchen betrug 3,5 ± 2,2 µm.

Die kantigen, flachen Partikel waren von ihrer Geometrie her sehr unterschiedlich. Breite und Länge variierten sehr und sie waren unregelmäßig geformt. Sie wurden mit ihrer Fläche in Bezug auf die Gesamtfläche berücksichtigt. Die Fläche, die sie insgesamt bedeckten, machte ungefähr 10 % der Gesamtfläche der Aufnahme aus.

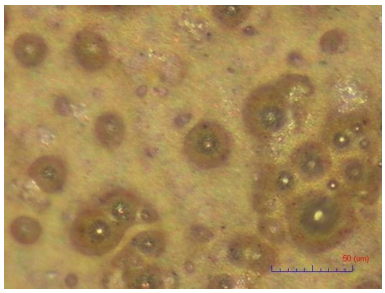
7.2.1.3.4 Make Up 2

Make Up 2 enthielt ebenfalls eine grießartige Grundsubstanz und darin eingebettete kugelförmige, plättchenartige und lange nadelförmige Teilchen.

Make Up 2



Elektronenmikroskopaufnahme



Lichtmikroskopaufnahme

Die Anzahl der Teilchen in der grießartigen Grundsubstanz wurde an Hand von zwei Stichproben mit einer Fläche von je 13,7 µm² ermittelt. Ihr Durchmesser betrug 0,35 µm und die Anzahl auf den Stichprobenflächen 48.

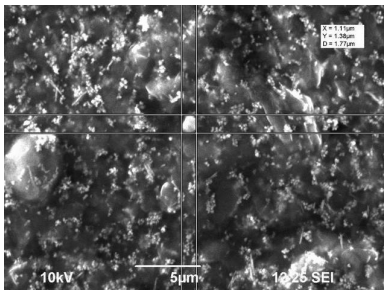
Auf einer Fläche von 1509 µm² waren drei kugelförmige Teilchen erkennbar. Ihre Durchmesser lagen zwischen 3,7 und 6,7 µm.

Die Plättchen waren unregelmäßig geformt und hatten eine Länge von 1 bis 11 µm (Mittelwert 5,5 ± 2,2 µm). Die Nadeln erreichten Längen von 3 bis 18 µm (Mittelwert 7,6 ± 3,7 µm).

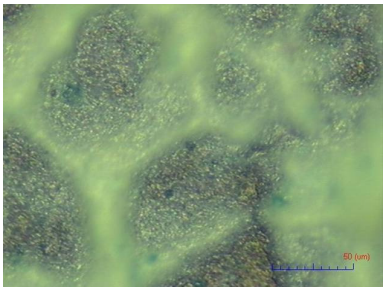
7.2.1.3.5 Abdeckstift

Wie bei Make Up 2 sind auf den Aufnahmen des Elektronenmikroskops vom Abdeckstift eine grießartige Grundsubstanz, kugelförmige und nadelförmige Teilchen und Plättchen erkennbar.

Abdeckstift



Elektronenmikroskopaufnahme



Lichtmikroskopaufnahme

Die Anzahl der Teilchen der grießartigen Substanz wurde an Hand von zwei Stichproben mit einer Fläche von je 10,63 µm² ermittelt. Auf diesen Flächen waren je 42 Teilchen mit einem Durchmesser von 0,22 µm zählbar.

Auf der Gesamtfläche waren drei kugelförmige Teilchen erkennbar. Ihre Durchmesser betrugen lagen zwischen 0,5 und 1,3 µm.

Die Plättchen, die auch hier unregelmäßig geformt waren, lagen von der Länge her zwischen 1,3 und 3 µm (Mittelwert 1,8 ± 0,5 µm).

Die nadelförmigen Teilchen hatten Längen zwischen 0,8 und 1,5 µm (Mittelwert 1,3 ± 0,3 µm).

7.2.2 Extinktionskoeffizient und optische Dicke

Wie viel Licht durch die Make Up–Schicht zur Haut durchdringt, wurde mit Hilfe einer Extinktionsmessung mit einem Langwegphotometers an der Fakultät für Physik, Gruppe Aerosolphysik und Umweltphysik, kurz Uni Wien, gemessen.

7.2.2.1 Aufbau des Versuchs

Der Versuchsaufbau bestand aus der Lichtquelle, Blenden und einem Teleskop (Satz von Linsen), das einen parallelen Strahlengang gewährleistete, dem Halter für die Küvetten, in die die untersuchten Lösungen eingefüllt wurden, einem Interferenzfilter, mit dessen Hilfe die einzelnen Wellenlängen, bei denen die Messungen durchgeführt wurden, selektiert werden konnten, einem weiteren Linsensatz, um den Lichtstrahl auf den Photomultiplier zu richten und dem zugehörigen Messgerät (siehe Abbildung 172).

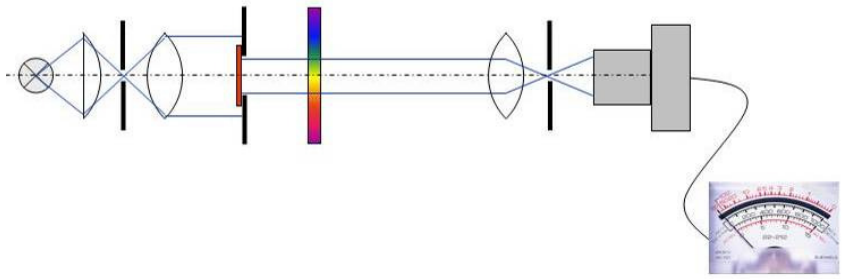


Abbildung 172: Skizze Versuchsaufbau Langwegphotometer

7.2.2.2 Vorbedingungen

7.2.2.2.1 Lichtquelle

Um stabile Verhältnisse zu gewährleisten hatte die Lampe mindestens eine Vorlaufzeit von zehn Minuten und wurde dann während der gesamten Messzeit nicht mehr abgeschaltet.

7.2.2.2.2 Streulicht

Der Raum wurde abgedunkelt und die Lampe so abgedeckt, dass der Streulichteinfluss reduziert wurde.

In regelmäßigen Abständen wurde das Streulicht kontrolliert, indem der Dunkelstrom gemessen wurde. Dabei wurde sichergestellt, dass der Zeiger des Messgerätes auf Null stand.

7.2.2.2.3 Küvetten

Die Küvetten bestanden aus zwei Objektträgergläsern (d = 0,1 ± 0,005 cm), so wie sie für Lichtmikroskope verwendet werden. Zwischen ihnen wurde durch Einbringen von zwei Deckgläsern (d = 0,0125 ± 0,002 cm) ein Hohlraum gebildet, in den mit Hilfe einer Injektionsnadel die zu untersuchenden Proben eingefüllt werden konnten. Die Objektträgergläser wurden an drei Seiten so mit Silikon versiegelt, dass sie dicht waren.

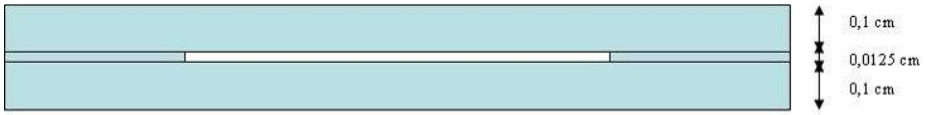


Abbildung 173: Küvettenaufbau und -maße

Da es sich um relative Messungen handelte, wurden genügend Küvetten hergestellt, um auch Leermessungen möglich zu machen.

7.2.2.2.4 Produktvorbereitung

Die Make Ups konnten nicht direkt gemessen werden, sondern mussten verdünnt werden. Bei der Verdünnung der Produkte stellte sich heraus, dass sich Make Up 2 weder in Wasser, noch in Glycerin, Dymethicon oder Alkohol gleichmäßig auflöste (nur eine Seifenlösung löste das Produkt). Daher musste auf eine Transmissionsmessung für Make Up 2 verzichtet werden.

Make Up 1 löste sich in Glycerin durch Rühren gleichmäßig auf und es wurde eine 1:20, 1:40 und 1:100 Verdünnung hergestellt. Für das verdünnte Make Up 1 und das Lösungsmittel Glycerin wurden Transmissionsmessungen durchgeführt. Die Verdünnungen mit 1:20 und 1:40 lieferten keine Messergebnisse, es konnte kein Licht durchdringen.

Auch Dymethicon verursachte Probleme beim Messen. Es war so kriechfreudig, dass es aus der Küvette „kroch“ und damit eine Messung unmöglich machte.

Die Faltenauffüller wurden durch Adhäsionskräfte derart stark von den Gläsern der Küvetten angezogen, dass interessante Muster entstanden, aber eine Messung ebenfalls unmöglich war. Eine Verdünnung ließ sich nicht herstellen.

7.2.2.3 Messung

Die Messungen fanden für verschiedene Wellenlängen statt. Der Interferenzfilter wurde so eingestellt, dass Licht der vorgesehenen Wellenlängen (400, 450, 500, 530, 550, 600 und 650 nm) durchfiel. Die Messungen bei den einzelnen Wellenlängen wurden jeweils drei Mal durchgeführt und die Mittelwerte und Standardabweichungen gebildet.

Nur für die 1:100 Verdünnung von Make Up 1 in Glycerin konnten Messwerte ermittelt werden. Für die anderen Verdünnungen war das durch die Küvette durchfallende Licht zu gering, als dass es gemessen werden konnte.

Für die Ermittlung der optischen Dicke bzw. des Extinktionskoeffizienten wurden die leere Küvette und eine mit Glycerin gefüllte Küvette gemessen.

7.2.2.4 Auswertung

Um die optische Dicke des Make Up 1 zu bestimmen, wurden die Messwerte, die sich bei Lichtdurchgang durch die 1:100 Verdünnung ergeben hatten, durch die, die sich durch Messung der Küvette mit Glycerin ergeben hatten, in Relation gesetzt. Das Verhältnis negativ genommen ergibt die optische Dicke des Make Up 1 für einen Durchgang durch 0,0125 ± 0,002 cm verdünnte Lösung.

Legt man die Verdünnung um auf die virtuelle Menge Make Up, die auf Grund der verdünnten Masse auf der Objektträgerfläche „aufgetragen" wurde, ergibt sich mit Hilfe der gemessenen Dichte des Make Up 1 (siehe 7.2.7), dass eine 1,124 ± 0,1 µm dicke Schicht Make Up 1 das Glas „bedeckt". Mit dieser Schichtdicke wurde der Extinktionskoeffizient σ_e für ermittelt. Die Endergebnisse für optische Dicke und Extinktionskoeffizient (siehe 3.1.5) werden in Tabelle 61 präsentiert.

λ [nm]	I1/I0	ln(I1/I0)	opt. Dicke	σ_e [m^{-1}]
400	0,00940635	-4,7	4,7	4150661
450	0,01053675	-4,6	4,6	4049719
500	0,01160034	-4,5	4,5	3964182
530	0,0125	-4,4	4,4	3897742
550	0,01355311	-4,3	4,3	3825794
600	0,01969791	-3,9	3,9	3493219
650	0,02703337	-3,6	3,6	3211645

Tabelle 61: Optische Dicke und Extinktionskoeffizienten MU1

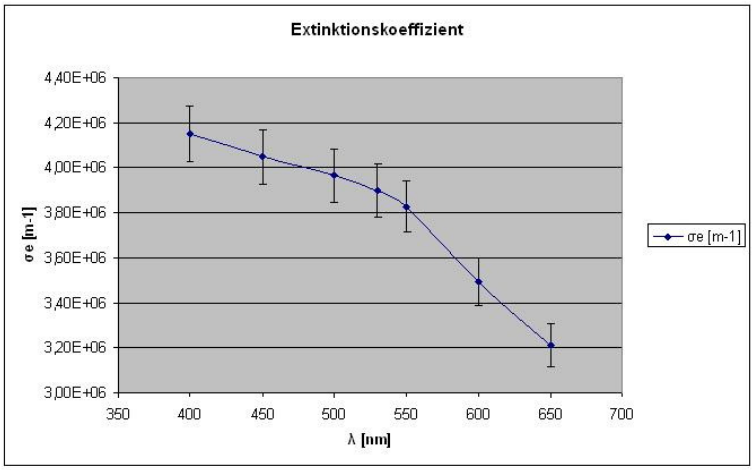


Abbildung 174: Extinktionskoeffizienten von Make Up 1

Die Schicht Make Up 1, die auf dem PET1 aufgetragen wurde, hatte eine Dicke von 17,763 ± 2 µm. Damit war die optische Dicke des Make Up 1 auf dem PET1 ca. 16 Mal so groß, wie die des verdünnten Make Up in der Küvette.

Die Ergebnisse für die Ermittlung der optischen Dicken der Make Up 1 Schicht auf dem PET1 sind für die einzelnen Wellenlängen in der Tabelle unten angeführt.

λ [nm]	opt. Dicke
400	74,0
450	72,2
500	70,7
530	69,5
550	68,2
600	62,3
650	57,3

Tabelle 62: Optische Dicke Make Up 1 auf dem PET1

Schlussfolgerung: Die Werte für die optischen Dicken zeigen, dass Licht im Make Up auftrifft beim Durchgang stark gestreut wird und nicht als gerichteter Strahl aus der Einfallsrichtung auf die darunterliegende Oberfläche auftrifft.

7.2.3 Absorptionskoeffizient

Für die Bestimmung des Lichtanteils, der vom Make Up 1 absorbiert wird, wurde eine integrierende Platte verwendet, ein spezieller Messaufbau, der durch das Medium durchgehendes und von ihm gestreutes Licht zusammen misst.

7.2.3.1 Aufbau des Versuchs

Die Messung mit der Integrierenden Platte wurde an Uni Wien durchgeführt. Die Filter wurden belegt und unbelegt gemessen, ein Photomultiplier lieferte die Messwerte für I_0 (unbelegter Filter) und I_1 (belegter Filter). Aus dem Verhältnis der beiden wurde der Absorptionskoeffizient σ_a ermittelt (siehe 3.1.6). Der Versuchsaufbau entspricht dem von Lin et al. im Journal Applied Optics beschriebenen.[383]

7.2.3.2 Vorbedingung

7.2.3.2.1 Herstellen der Verdünnung

Bereits beim Herstellen der Verdünnung traten die ersten Probleme auf. Der Betreuer dieser Arbeit, Univ.-Prof. i.R. Dr. H. Horvath, stellte dafür einen Magnetrührer zur Verfügung. Die damit hergestellte Verdünnung war aber scheinbar trotz mehrmaliger erneuter Herstellung immer wieder von „Russpartikeln“ kontaminiert. Es handelte sich um Eisenpartikel, die im Make Up zur Färbung eingesetzt werden. Sie sammelten sich auf dem Magnetrührer (siehe Abbildung unten).



Abbildung 175: Magnetrührer mit anhaftenden Eisenpartikel

[383] Vgl. Lin (1973), S.1357.

Die Verdünnung wurde letztendlich durch Mixen mit einem elektrischen Rührer hergestellt.

Herstellung der Belegung des Filters

Geplant war ursprünglich, das Make Up in Glycerin und Wasser zu lösen, mittels eines Zerstäubers kleine Tröpfchen zu generieren und als „Aerosol“ auf einem „Isopore™ Membrane Filter“ (kurz Isopore Filter; Firma: Millipore, Type: 0,2 µm GTTP) zu platzieren. Die Messung des Gasvolumens wäre dabei über einen Gaszähler erfolgt.

Für die Belegung des Filters war dieser Vorgang leider nicht möglich, weil die Partikel, die beim Zerstäuben entstanden, den Filter beim Durchsaugen nahezu sofort verstopften. Daher wurde nach einer anderen Vorgangsweise gesucht. Eine Air Brush (Airbrush AB-350, Firma Conrads Electronic), so wie sie im Modellbau eingesetzt wird, brachte die Lösung. Das Make Up wurde dafür in einem Verhältnis 1:10 in Wasser gelöst und dann mittels Air Brush auf den Filter aufgetragen.

Herstellen der unbelegten Stelle auf dem Filter

Eine Schablone diente dazu (siehe unten), die unbelegte Stelle für die Referenzmessung des einfallenden Lichts auf dem Isopore Filter herzustellen. Mittels dieser Schablone und der Air Brush wurde der Filter mit dem in Wasser verdünnten Make Up 1 belegt.

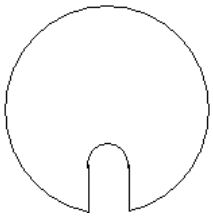


Abbildung 176: Schablone für Isopore Filter

Bei der Berechnung der Schablonenfläche für die Belegung mit verdünntem Produkt wurde die freigelassene Fläche entsprechend ihrer geometrischen Gegebenheiten berücksichtigt (siehe Tabelle 63).

Fläche der Schablone			
Radius	1,10 cm		
Kreisfläche gesamt		3,80 cm²	
Breite Finger	0,76 cm		
Länge Finger	1,00 cm		
FlächeFinger		0,85 cm²	
Schablonenfläche		2,95 cm²	± 0,1 cm²

Tabelle 63: Berechnung der Schablonenfläche für die Filterbelegung

Die Fläche, die mit verdünntem Produkt belegt wurde betrug 2,95 cm². Sie diente dazu, die Schichtdicke des Make Up 1, die auf dem Filter aufgetragen wurde, aus der Massenbelegung zu ermitteln.



Abbildung 177: Massenbelegung des Isopore Filter

Wägung der belegten Filter

Die Masse der Filter wurden vor der Belegung und nach der Belegung mit der Präzisionswaage an der Uni Wien ermittelt. Die Masse des Filters wurde mehrmals leer und belegt gemessen. Die Flächenbelegung für einen Filter mit geringerer Belegung (F1b/11-09) ist in der Tabelle 64 ablesbar.

	Masse	**Flächenbelegung**
	[mg]	[mg/cm²]
Filter leer	8,352 ± 0,006	
Filter belegt	8,790 ± 0,002	
Differenz	0,438 ± 0,007	0,148 ± 0,01

Tabelle 64: Massenbelegung des Isopore Filter

7.2.3.3 Messung

Da die Filter sehr dünn sind (2 µm) besteht die Vorrichtung zur Aufnahme des Isopore Filters in der Integrierenden Platte über einen Einschub mit Vertiefung, in den der Filter eingelegt werden konnte. Der Filter wurde dann mittels Spannring in der Vertiefung befestigt, damit er nicht durch elektrostatische Kräfte im Gerät kleben blieb. Für das Licht, das auf den Filter treffen sollte, befand sich ein Loch in der Vertiefung (siehe unten).



Abbildung 178: Halterung für Isopore Filter

Die Filter wurden drei Mal mit einer unbelegten und drei Mal mit einer belegten Fläche über dieses Loch gelegt. Mit Hilfe eines Photomultipliers wurde so je drei Mal das nicht absorbierte Licht bei drei Wellenlängen (450, 550 und 650 nm) gemessen. Die Ergebnisse für Filter F1b/11-09 sind in Tabelle 65 dargestellt (arbitrary units).

F1b/11-09		Filter unbelegt		Filter belegt		
	λ [nm]	Mittelwert I0	StAbw	Mittelwert I1	StAbw	I1/I0
blau	450	7,07E+04	1,53E+02	5,90E+04	0,00E+00	8,34E-01 ± 0,04
grün	550	5,86E+04	5,29E+02	5,38E+04	5,77E+01	9,19E-01 ± 0,05
rot	650	4,47E+04	1,00E+02	4,27E+04	3,00E+02	9,55E-01 ± 0,05

Tabelle 65: Messergebnisse der integrierenden Platte für Filter F1b/11-09

Die integrierende Platte, die verwendet wurde, stellte nur diese drei Wellenlängen zur Messung zur Verfügung, um Werte für die Wellenlängen dazwischen zu erhalten, wurden die Werte extra- und interpoliert. Die erhaltenen Werte sind in Tabelle 66 enthalten.

7.2.3.4 Auswertung

Aus den extra- und interpolierten Ergebnissen der Strahldichteverhältnisse von Filter F1b/11-09 wurden die optische Dicke der Absorption und der Absorptionskoeffizient $\sigma_A(\lambda)$ ermittelt.

λ [nm]	I1/I0	ln(I1/I0)	opt. Dicke	σ_A [m^{-1}]
400	7,74E-01	-0,25638	0,25638	233070
450	8,34E-01	-0,18141	0,18141	164919
500	8,82E-01	-0,12517	0,12517	113788
530	9,06E-01	-0,09921	0,09921	90192
550	9,19E-01	-0,08488	0,08488	77164
600	9,43E-01	-0,05878	0,05878	53440
650	9,55E-01	-0,04582	0,04582	41656

Tabelle 66: Absorptionskoeffizienten und optische Dicke für Absorption

Die Absorptionskoeffizienten nehmen mit steigender Wellenlänge ab. Anschaulich wird das in der Abbildung unten.

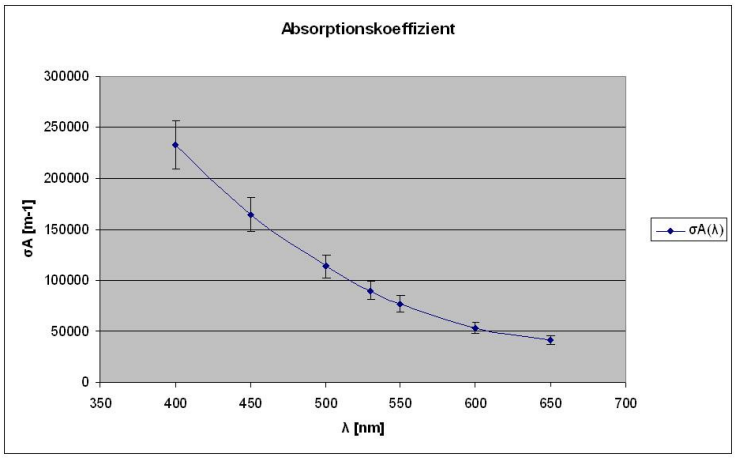


Abbildung 179: Absorptionskoeffizienten von Make Up 1

Die Schichtdicke von Make Up 1 auf dem PET1 betrug 17,763 ± 2 µm. Damit ist die optische Dicke des Make Up 1 auf dem PET1 ca. 16 Mal so groß, wie die Make Up Schicht auf dem Isopore Filter.

λ [nm]	opt. Dicke
400	4,1400
450	2,9295
500	2,0212
530	1,6021
550	1,3707
600	0,9493
650	0,7399

Tabelle 67: Optische Dicke des Make Up 1 auf PET1

Die Tabelle oben enthält die Werte für die optische Dicke der Make Up 1 Schicht auf dem PET1.

Schlussfolgerung: Das Licht kürzerer Wellenlängen wird von Make Up 1 stärker absorbiert, als jenes im längeren Wellenlängenbereich. Da das Make Up eine rötliche Färbung aufweist, entspricht das auch dem Aussehen des Make Up.

7.2.4 Single Scattering Albedo

Die Single Scattering Albedo, wurde nach Formel 17 aus den Extinktions– und Absorptionskoeffizienten ermittelt. Die Werte für die einzelnen Wellenlängen sind in Tabelle 68 dargestellt.

λ [nm]	ω_0
400	0,94
450	0,96
500	0,97
530	0,98
550	0,98
600	0,98
650	0,99

Tabelle 68: Single Scattering Albedo von Make Up 1

Schlussfolgerung: Die Intensität des Lichts, die durch Make Up 1 in Vorwärtsrichtung durchfällt wird durch Streuung wesentlich reduziert. Obwohl die Absorptionskoeffizienten im Vergleich zu den Extinktionskoeffizienten klein sind (1/20 – 1/100), könnte Absorption auf Grund von Mehrfachstreuung an der Reduktion der Intensität beteiligt sein. Für Make Up ist sicherlich von großem Vorteil, wenn es Licht kaum absorbiert und sich damit nicht erwärmt.

7.2.5 Phasenfunktion

Die Streukoeffizienten wurden für Faltenauffüller 1 und Make Up 1 für verschiedene Wellenlängen über ihre Partikelgrößenverteilung mittels Fortran Programm „wb4.exe“ ermittelt (siehe 9.6). Das Programm lieferte außerdem die Werte für die Phasenfunktionen und die Asymmetriefaktoren für die einzelnen Wellenlängen. Die Ergebnisse wurden in Excel übernommen, um sie grafisch aufzubereiten.

Eine wichtige Erkenntnis aus der Ermittlung der Streukoeffizienten war, dass die gewählte Schrittweite für den Winkel θ eine wesentliche Rolle spielt, wenn die Streuung vorwiegend in eine bestimmte Richtung gerichtet ist (siehe unten).

Berechnet wurden die einzelnen Werte für die Wellenlängen, die bei der Extinktionsmessung untersucht wurden. Der Hauptbestandteil von Make Up 1 und Faltenauffüller 1 ist Wasser. Da die Partikel darin eingebettet sind, mussten die angenommene Brechzahl und die angegebenen Wellenlängen durch die Brechzahl von Wasser dividiert werden. Die Ergebnisse werden für die daraus resultierenden Wellenlängen angegeben.

7.2.5.1 Faltenauffüller 1

Die Ergebnisse der Streukoeffizienten für Faltenauffüller 1 zeigen, dass seine Teilchen das Licht überwiegend in Vorwärtsrichtung streuen. Für eine Schrittweite für θ von 5° fließt gerade der Bereich gering in den Wert des Integrals für den Streukoeffizienten ein, der den größten Beitrag leistet. Wie Abbildung 180 zeigt, ist der Beitrag zum Streukoeffizienten für dieses Produkt für θ von 0° bis 4° am größten. Auch eine Schrittweite von 2° für θ schneidet einen beträchtlichen Teil der Kurve in diesem Bereich ab. Als Schrittweite wurde schließlich 0,1° gewählt.

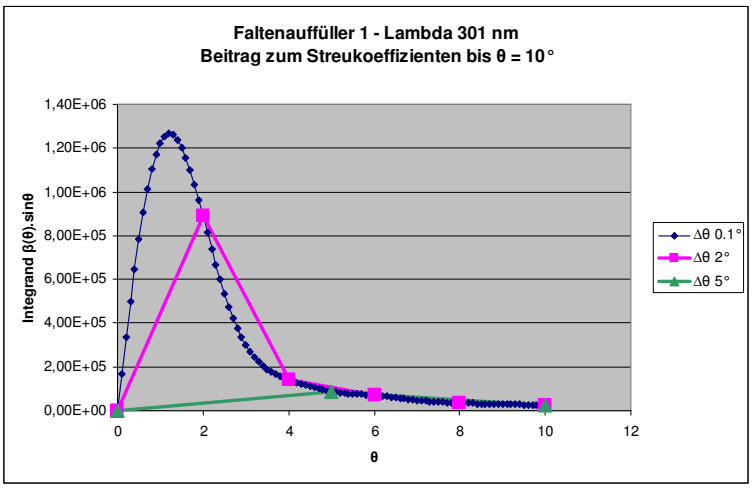


Abbildung 180: Integrationsschrittweite für Streukoeffizient FA1 (λ H_2O)

Die Ergebnisse für die Volumenstreufunktion, die Streukoeffizienten, die Phasenfunktionen und die Asymmetriefaktoren für die Partikel des Faltenauffüllers wurden vom Fortran Programm wb4.exe in eine Textdatei geschrieben, die in Excel übernommen wurde. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert.

7.2.5.1.1 Streukoeffizienten, Phasenfunktion, Asymmetriefaktoren

In Tabelle 69 und Abbildung 181 werden die Ergebnisse für die Streukoeffizienten von Faltenauffüller 1 präsentiert. Die Werte für die einzelnen Wellenlängen liegen bei $5{,}685 \cdot 10^4 \pm 1{,}83 \cdot 10^2$.

Streukoeffizienten		
λ [nm] H_2O	λ [nm] Luft	b(λ)
301	400	5,66E+04
338	450	5,67E+04
376	500	5,68E+04
398	530	5,68E+04
414	550	5,69E+04
451	600	5,70E+04
489	650	5,72E+04

Tabelle 69: Streukoeffizienten Faltenauffüller 1

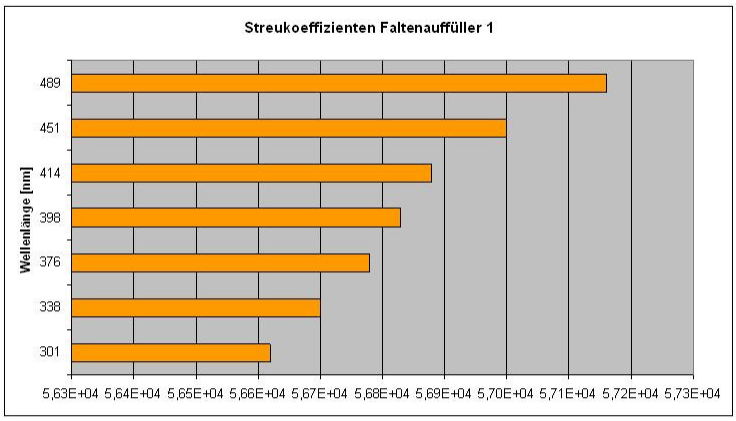


Abbildung 181: Streukoeffizienten Faltenauffüller 1 (λ H_2O)

Die Phasenfunktionen für die einzelnen Wellenlängen zeigen, wie man aus Abbildung 182 ablesen kann, dass dieses Produkt Licht aller Wellenlängen stark asymmetrisch in Vorwärtsrichtung streut. Dies bestätigt sich in den Werten für die Asymmetriefaktoren, die in Tabelle 70 und Abbildung 183 angeführt sind.

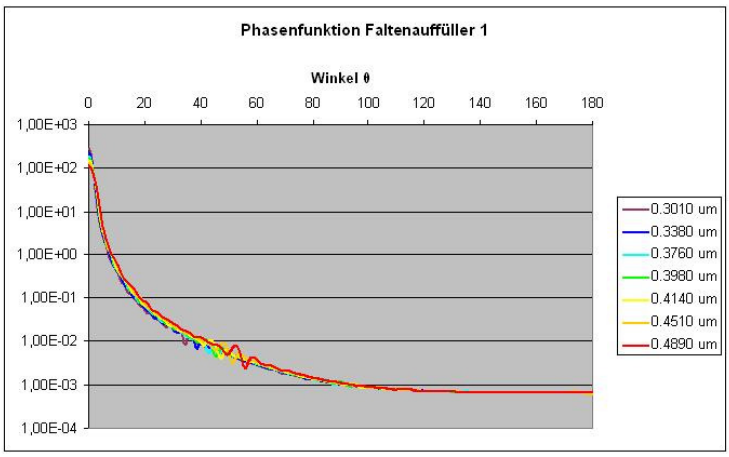


Abbildung 182: Phasenfunktion Faltenauffüller 1 (λ H_2O)

Die Asymmetriefaktoren für die einzelnen Wellenlängen liegen verteilt um einen Mittelwert von $9{,}80.10^{-1}$ mit einer Standardabweichung von $1{,}66.10^{-3}$.

Asymmetriefaktoren		
λ [nm] H_2O	λ [nm] Luft	g(λ)
301	400	9,827E-01
338	450	9,814E-01
376	500	9,808E-01
398	530	9,802E-01
414	550	9,795E-01
451	600	9,789E-01
489	650	9,777E-01

Tabelle 70: Asymmetriefaktoren Faltenauffüller 1

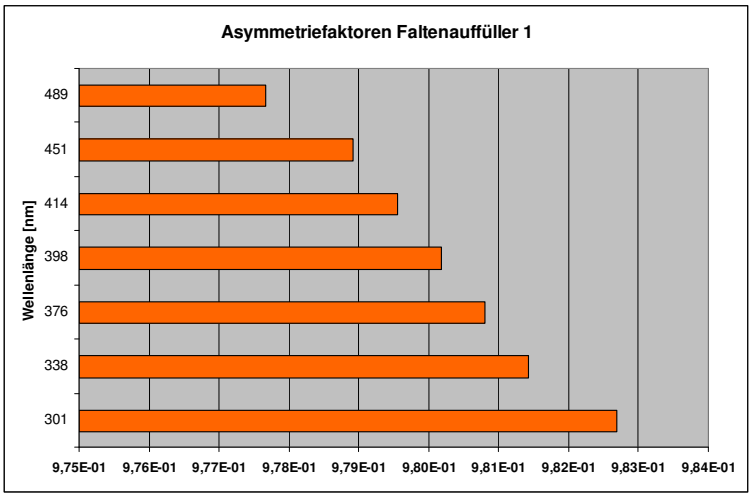


Abbildung 183: Asymmetriefaktoren Faltenauffüller 1 (λ H_2O)

Schlussfolgerung: Die Größe der Partikel in Faltenauffüller 1 führt dazu, dass dieses Produkt Licht hauptsächlich in Vorwärtsrichtung streut. Dadurch kommt je nach Faltengeometrie und Tiefe weniger Licht aus der Falte zurück. Dieses über die Partikelgrößenverteilung festgestellte Ergebnis wurde durch die in den durchgeführten Experimenten festgestellte Abdunklung der sehr tiefen Falte bestätigt (siehe Abschnitt 6.5.5.7).

7.2.5.2 Make Up 1

Obwohl die Ergebniskurven für die ermittelten Phasenfunktionen mit einer Schrittweite für θ von 0,1° und 2° kaum voneinander abwichen wurde auch hier für die Berechnung der Streukoeffizienten und der Phasenfunktion eine Schrittweite von 0,1° gewählt, um die Genauigkeit für die Ermittlung der Legendre Polynome, die in DISORT (siehe 9.7) eingesetzt werden, zu gewährleisten.

Wie in Abschnitt 7.2.1.1.4 beschrieben, enthält das Make Up 1 Partikel der verschiedensten Formen und Größen. Es besteht aus einer grießartigen Grundsubstanz, in das kugelförmige Teilchen und unregelmäßig geformte Plättchen eingebettet sind.

Die grießartige Grundsubstanz und die kugelförmigen Teilchen wurden bei der Ermittlung der Phasenfunktion gemeinsam betrachtet und mittels des Programms wb4.exe wurde die Volumenstreufunktion, die Streukoeffizienten, die Phasenfunktion und die Asymmetriefaktoren ermittelt.

Die reflektierenden Plättchen wurden direkt in DISORT als „ground reflectance“ in verschiedenen Schichten optischer Dicke berücksichtigt. Dazu wurde angenommen, dass die Winkel in denen sie auf dem Untergrund liegen einer Gaussverteilung entsprechen. Die genaue Beschreibung dazu findet sich in Kapitel 7.3.2.

7.2.5.2.1 Streukoeffizienten, Phasenfunktion und Asymmetriefaktoren für grieß- und kugelförmige Partikel

Die Phasenfunktionen der einzelnen Wellenlängen für Make Up 1 (301 nm, 338 nm, 376 nm, 398 nm, 414 nm, 451 nm und 489 nm; für die Berechnungen wurden die Wellenlängen (Extinktionsmessung) durch die Brechzahl von Wasser dividiert) werden in logarithmischer Darstellung präsentiert. Die folgenden Abbildungen zeigen die Phasenfunktion für grießartige Substanz und Kugeln gemeinsam (Abbildung 184) und getrennt (Abbildung 185 und Abbildung 186).

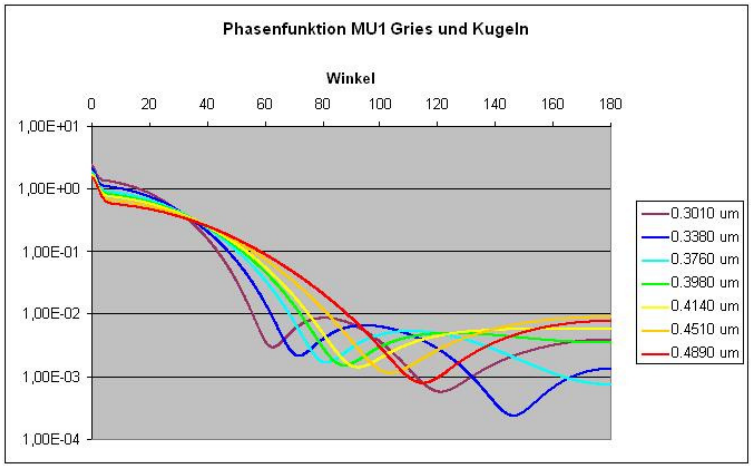


Abbildung 184: Phasenfunktion Make Up 1 (λ H_2O)

Die Ergebniskurven für die Phasenfunktionen in der Abbildung unten zeigen, dass die kugelförmigen Teilchen einfallendes Licht nach vorwärts streuen.

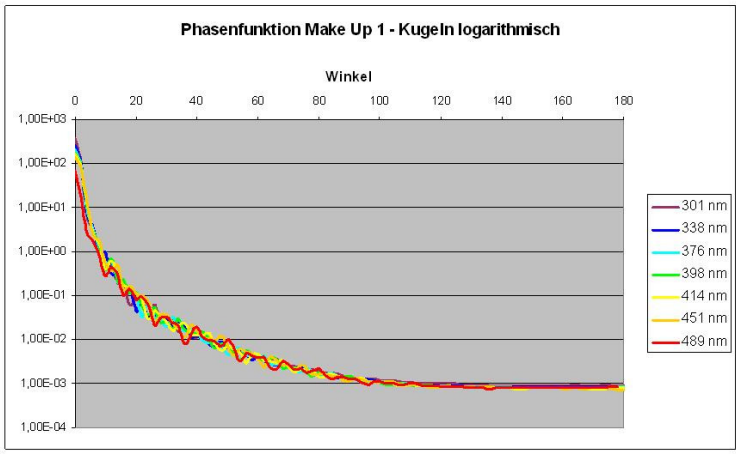


Abbildung 185: Phasenfunktion Make Up 1 Kugeln (λ H_2O)

Die Lichtstreuung der grießartigen Substanz nimmt von 0° (Vorwärtsrichtung) bis 60° Grad monoton ab und bleibt dann in etwa gleich (siehe Abbildung unten).

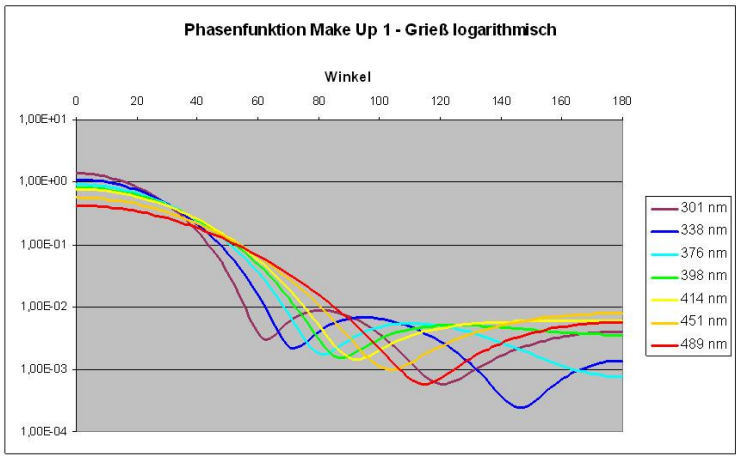


Abbildung 186: Phasenfunktion Make Up 1 grießartige Substanz (λ H_2O)

Die Streukoeffizienten für Make Up 1 (Grieß und Kugeln) sind unten tabellarisch und grafisch dargestellt, sie liegen für alle Wellenlängen in der gleichen Größenordnung und fallen von der kleinsten zur größten Wellenlänge hin um ca. den Faktor 2,5 ab.

Streukoeffizienten		
λ [nm] H_2O	λ [nm] Luft	b(λ)
301 µm	400	4,93E+05
338 µm	450	4,11E+05
376 µm	500	3,43E+05
398 µm	530	3,10E+05
414 µm	550	2,89E+05
451 µm	600	2,46E+05
489 µm	650	2,08E+05

Tabelle 71: Streukoeffizienten Make Up 1

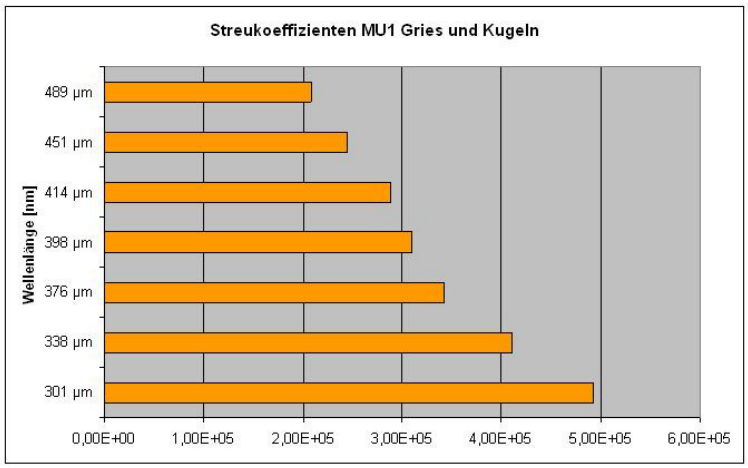


Abbildung 187: Streukoeffizienten Make Up 1 (λ H_2O)

Die Werte für die Asymmetriefaktoren des Make Up 1 (Grieß und Kugeln) zeigen, dass die Streuung asymmetrisch erfolgt. Sie sind in Abbildung 188 und Tabelle 72 dargestellt.

Asymmetriefaktoren		
λ [nm] H_2O	λ [nm] Luft	g(λ)
301 µm	400	8,69E-01
338 µm	450	8,48E-01
376 µm	500	8,19E-01
398 µm	530	7,99E-01
414 µm	550	7,85E-01
451 µm	600	7,58E-01
489 µm	650	7,40E-01

Tabelle 72: Asymmetriefaktoren Make Up 1

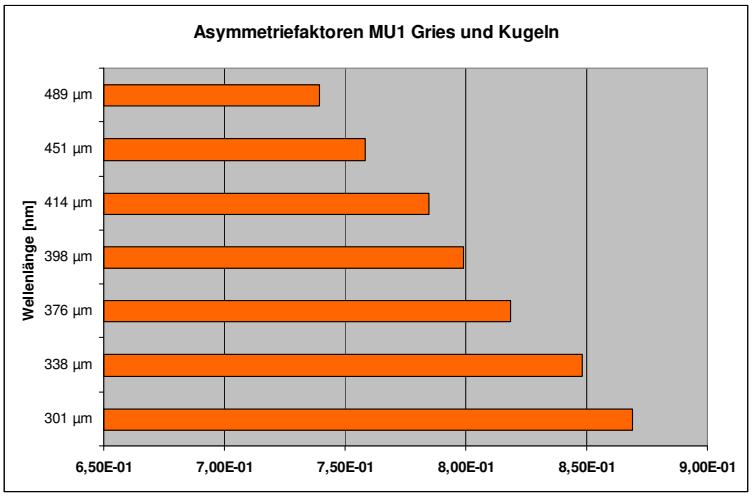


Abbildung 188: Asymmetriefaktoren Make Up 1 (λ H_2O)

Schlussfolgerung: Auf das Make Up einfallendes Licht wird in diesem stark vorwärts gestreut, ein einfallender Strahl weitet sich dabei im Make Up immer weiter auf.

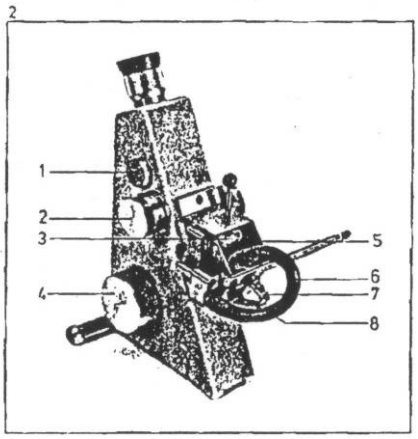
7.2.6 Messung der Brechzahl

Die Messung der Brechzahl wurde nach erfolgloser Messung mit einem Abbé Refraktometer mit Hilfe eines Mettler Toledo RE40 bei der Firma Mettler durchgeführt. Nachdem die Messweise der beiden Geräte auf demselben Prinzip beruht, aber keine genauen Daten über den inneren Aufbau des Mettler Toledo RE40 zur Verfügung stehen, folgt hier eine theoretische Beschreibung der Messung der Brechzahl mit einem Abbé Refraktometer.

7.2.6.1 Messung der Brechzahl mit Abbé Refraktometer[384]

Vom biologischen Praktikum wurde ein Zeiss Abbé Refraktometer B (Abbildung 189) zur Verfügung gestellt. Zur Beleuchtung können verschiedene Lichtquellen verwendet werden. Für besonders trübe Proben wird die Verwendung einer Natriumdampflampe empfohlen.

[384] Vgl. Zeiss, S. 5.



1 Verschluß der Justierschraube
2 Kompensatorknopf mit Skala
3 Stutzen für Temperierflüssigkeit (Zufluß)
4 Triebknopf zur Grenzlinieneinstellung
5 Lichteintrittsöffnung am Beleuchtungsprisma, geschlossen
6 Schlauch zum Verbinden der Temperierung von Beleuchtungs- u. Meßprisma
7 Stutzen für Temperierflüssigkeit (Abfluß)
8 Spiegel am Meßprisma, ausgeschwenkt

Abbildung 189: Abbé Refraktometer[385]

Das Refraktometer verwendet zur Ermittlung der Brechzahl den Grenzwinkel α_G der Totalreflexion. Licht, das schräg unter diesem Grenzwinkel α_G auf die Probe auftrifft, wird vollständig reflektiert.[386]

Das Refraktometer besteht aus einem Beleuchtungs– und einem Messprisma (siehe Abbildung 190). Die Prismen bestehen aus stark brechendem Flintglas.[387] Dazwischen befindet sich ein Hohlraum zur Aufnahme der Probe.

Die Brechzahl n_B von Beleuchtungs– und Messprisma ist gleich. Sie ist größer, als die Brechzahl n der Probe. Die Seite des Beleuchtungsprismas (Hypotenuse), die bei der Probe liegt, ist mattiert. Das führt dazu, dass das durchgehende Licht nach allen Richtungen gestreut wird und so die Probe in allen Richtungen durchdringt. Es trifft auch streifend auf die für die Messung wesentliche Grundfläche des Prismas. Beim Übertritt vom Beleuchtungsprisma in die Probe werden die Lichtstrahlen vom Lot weg gebrochen. Für alle Winkel, die größer sind als α_G, werden die Lichtstrahlen ins Beleuchtungsprisma zurückgeworfen. In der Probe kommen nur Lichtstrahlen an, deren Brechungswinkel kleiner als 90° sind. Diese Lichtstrahlen durchdringen die Probe und erreichen die Grenzfläche Probe/Messprisma. Dass die Brechzahl der beiden Prismen gleich ist bewirkt, dass alle Lichtstrahlen im Messprisma so zum Lot hin gebrochen werden, dass ihr Brechungswinkel kleiner α_G ist.

Die Lichtstrahlen durchdringen das Messprisma und werden durch ein Fernrohr, das auf unendlich gestellt ist auf die Ergebnisskala geworfen (siehe Abbildung 191).[388]

385 Quelle: Zeiss, S. 5.
386 Vgl. ebenda, S. 3.
387 Vgl. Kohlrausch (1968), S. 116.
388 Vgl. Zeiss, S. 115.

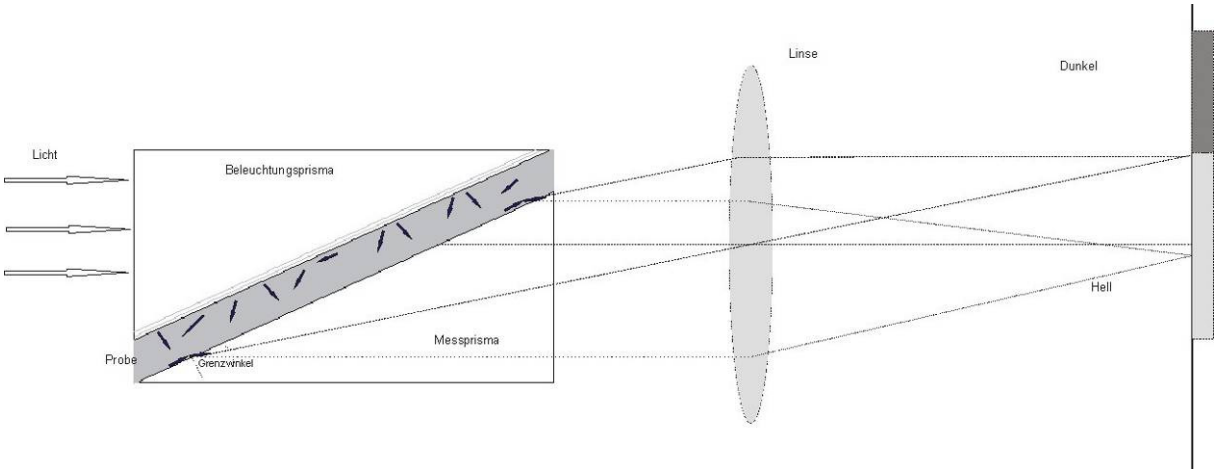


Abbildung 190: Lichtbrechung im Abbé Refraktometer[389]

Im Okular sind ein scharf abgegrenzter dunkler und ein heller Bereich zu erkennen, die vom Strahlengang der durch das Messprisma folgenden Lichtstrahlen erzeugt werden. Verschiebt man die Grenzlinie zwischen dunklem und hellem Bereich so, dass sie im Zentrum des Fadenkreuzes der Ergebnisskala zu liegen kommt, kann man auf letzterer direkt die Brechzahl n der Probe ablesen (Abbildung 190).

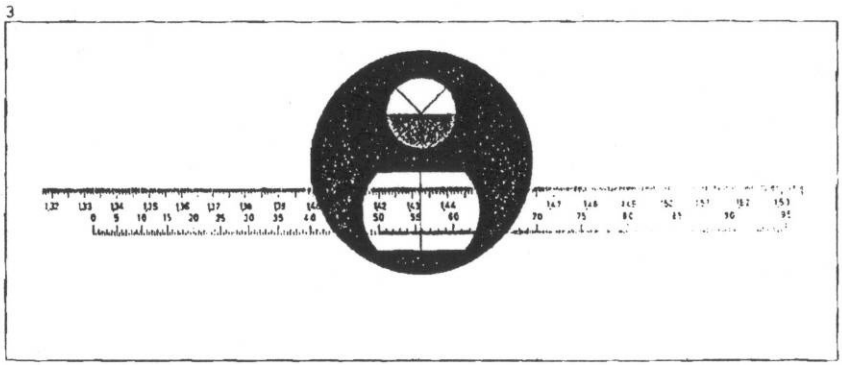


Abbildung 191: Ergebnisskala Abbé Refraktometer[390]

Der obere Teil der Ergebnisskala ist in Brechzahlen n kalibriert. Es gilt $n = 1/\sin \alpha_G$. Der Messbereich dieses Refraktometers lag zwischen 1,30 – 1,71. Die Skaleneinteilung betrug 0,0005 mit einer Messgenauigkeit von 0,0002.[391]

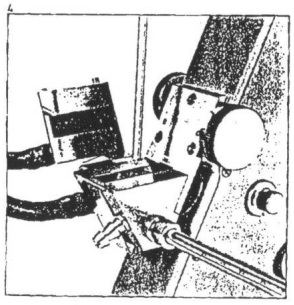


Abbildung 192: Prismenanordnung Abbé Refraktometer[392]

389 Quelle: modifiziert übernommen von URL http://gpr.physik.hu-berlin.de/Skripten/Elektrodynamik%20und%20Optik/PDF-Dateien/O7.pdf [23.07.2008].
390 Quelle: Zeiss, S. 5.
391 Vgl. ebenda, S. 3ff.

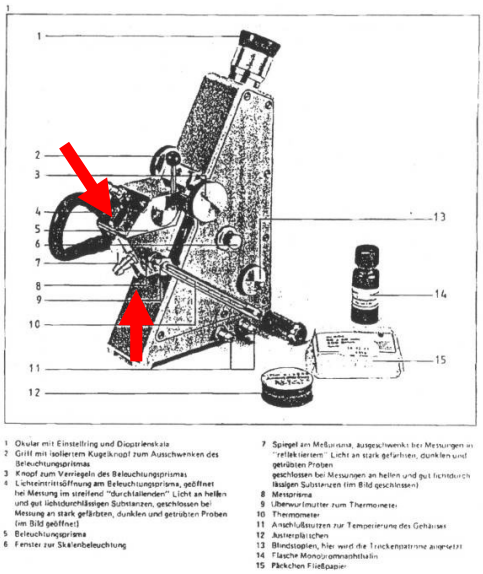


Abbildung 193: Lichteintritt Abbé Refraktometer[393]

Beim Zeiss AR sind zwei Lichteintrittsöffnungen vorhanden (siehe Pfeile in Abbildung 193). Eine am Beleuchtungsfenster, um Messungen im streifenden, durchfallenden Licht an gut lichtdurchlässigen Substanzen durchzuführen. Die andere am Messprisma, in die das Licht durch einen ausklappbaren Spiegel fällt, um stark gefärbte, dunkle oder getrübte Proben zu messen, für diese wird die Verwendung einer Natriumdampflampe empfohlen. Das Beleuchtungsprisma kann über ein Scharnier aufgeklappt werden. Zwischen den Prismen befindet sich der Hohlraum, in den die zu messende Flüssigkeit eingebracht wird (siehe Abbildung 192).[394]

Bei nicht temperierten Messräumen müssen die Proben mittels Thermostat und Wasserumwälzung auf Messtemperatur gebracht werden, weil die Brechzahlen von Flüssigkeiten temperaturabhängig sind.[395]

Nachdem die Messungen der Brechzahl der gewählten Produkte auf Grund des ungenügenden Lichteinfalls mit dem Abbé Refraktometer keine Ergebnisse erbrachten, wurden die Messungen auf Grund freundlichen Entgegenkommens bei der Firma Mettler Toledo mit einem professionellen Messgerät durchgeführt.

7.2.6.2 Messung der Brechzahl mit Mettler Toledo RE40

Das Mettler Toledo RE 40 ist dazu geeignet, auch trübe und dunkle Proben auf ihre Brechzahl zu untersuchen. Diese Art von Messgeräten wird unter anderem von Kosmetikfirmen eingesetzt, um festzustellen, ob sich die Inhaltsstoffe eines Produktes verändert haben. Ein Indikator dafür ist eine geänderte Brechzahl.

392 Quelle: Zeiss, S. 6.
393 Quelle: ebenda, S. 4.
394 Vgl. ebenda, S. 4ff.
395 Vgl. ebenda, S. 8.



Abbildung 194: Mettler Toledo RE40 Refraktometer

Das Mettler Toledo RE40 (siehe oben) ist ein Tischrefraktometer und misst Brechzahlen von 1,32 bis 1,7 mit einer Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-4}$ mit Hilfe der Methode der Totalreflexion. Die Probe wird in einen Metalltrichter, an dessen Boden ein Saphirkristall eingebaut ist, eingefüllt und mittels Peltierthermostat temperiert, um verlässliche Messwerte zu erreichen.[396]

Kalibriert wurde das RE40 laut Rainer Haselberger[397] mit Luft– (Leerwert mit gereinigtem Prisma) und einem zertifizierten Brechzahlstandard. In diesem Fall wurde ein Wasserstandard verwendet.

Es wurden Messungen von destilliertem Wasser, Glycerin, Dimethicon, den beiden Faltenauffüllern, beiden Make Ups und von Leitungswasser durchgeführt. Die Brechzahl wurde jeweils drei Mal ermittelt und daraus der Mittelwert gebildet.

Besonders zu achten war darauf, dass die Probe blasenfrei bis zur Markierung in den Behälter eingefüllt wurde. Die Temperierung der Probe spielte eine große Rolle bei der Messung der Brechzahl – war sie noch nicht über den gesamten Probenbereich durchgeführt, waren die drei Messungen in ihrem Wert sehr unterschiedlich. In diesem Fall wurden die Messungen öfter durchgeführt, bis die Abweichungen der einzelnen Messwerte voneinander klein waren.

Folgende Brechzahlen (Mittelwert und Standardabweichung) wurden für die einzelnen Proben gemessen:

Probe	Mittelwert Brechzahl	Standardabweichung	n_D Literatur
H_2O destilliert (T=20,1°C)	1,33297	5,7735E-5	1,3330 (1)
Glycerin (T=20,1°C, 99,5%)	1,45357	5,7735E-5	1,473 (2)
Dimethicon (T=20,0°C)	1,4052	0	1,404 (3)
Faltenprod. A(T=20,0°C)	1,37363	5,7735E-5	
Faltenprod. B (T=20,0°C)	1,37670	1E-4	
MakeUp A (T=20,0°C)	1,4504	1,71E-4	
MakeUp B (T=20,0°C)	1,449	1,5E-4	
H_2O Leitung (T=20,1°C)	1,333	0	

Tabelle 73: Messergebnisse für die Brechzahlen mit Mettler Toledo RE40

[396] Quelle: Mettler Toledo: Qualitätskontrolle flüssiger Produkte einfach und effizient, 9/2003, Schweiz.
[397] Mitarbeiter der Firma Mettler Toledo, Wien

(1) bei Na–Dampf Linie, λ=589,3 nm, Quelle: http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser_eigenschaften.html#kap092 [23.7.08])

(2) Quelle: http://www.chemikalienlexikon.de/cheminfo/glycerol.html [23.7.08])
die Brechzahl von Glycerin wird sehr stark davon beeinflusst, wie viel Wasser im Glycerin enthalten ist. Nachdem es stark hygroskopisch ist, kann für die Probe der exakte Wassergehalt nicht angegeben werden, die Brechzahl geht mit steigendem Wassergehalt nach unten. Herkunft des Glycerin: St. Anna Apotheke , Währinger Str. 56, 1090 Wien

(3) Quelle: http://www.hellermanntyton.si/documents/5000/SiliconeFluidsAKde(1).pdf [23.7.08])
der Vergleichswert entstammt einem Silikonöl der Fa. Wacker, Herkunft des Dimethicone: Silikonöl 350, 100g Flasche, Fa. Gatt–Koller, St. Anna Apotheke , Währinger Str. 56, 1090 Wien

Nachdem der Kontakt der Probe mit dem Saphirprisma sehr wichtig ist, wurde auf eine Messung der Haut (Fingerkuppe) verzichtet, da die Form des Messtrichters des Mettler Toledo RE40 einen vollständigen Kontakt nicht erlaubt hätte.

7.2.7 Dichte

Um für die einzelnen Verdünnungen, die massenmäßig über Einwaage von Make Up 1 und Lösungsmittel hergestellt wurden, das Verhältnis der volumsmäßigen Verdünnung ermitteln zu können, wurde die Dichte von Make Up 1 in den verwendeten Lösungsmitteln Wasser und Glycerin bestimmt.

7.2.7.1 Aufbau des Versuchs

Verwendet wurde die Waage (siehe Abschnitt 6.3.19), ein Infrarotthermometer und ein Messbecher (Tara).

Die Dichte des Produkts wurde mit Hilfe der Waage bestimmt. Der Messbehälter wurde bis zum Meniskus mit Wasser bzw. Glycerin gefüllt. Dann wurde für diese Masse das Füllvolumen bestimmt. Der Becher wurde wieder entleert und getrocknet und mit einer gewissen Masse Make Up 1 gefüllt (siehe Tabelle 74) auf das Produkt wurde bis zum Meniskus Lösungsmittel eingefüllt und davon die Masse bestimmt. Das Volumen des eingefüllten Lösungsmittels wurde aus der hinzugefügten Masse ermittelt. Die Differenz von Messbechervolumen zu Lösungsmittelvolumen ergab das eingefüllte Volumen des Make Up 1. Daraus konnte die Dichte des Make Up ermittelt werden.

7.2.7.2 Vorbedingung

Da die Dichte der Flüssigkeiten von der Temperatur abhängt, wurden die jeweilige Temperatur und die Raumtemperatur mit einem Infrarotthermometer gemessen.

Das Make Up löste sich geringfügig im Wasser, so dass eine trübe Lösung entstand. Da dadurch das Volumen des Lösungsmittels nicht mehr eindeutig bestimmt werden konnte, wurde zur Dichtebestimmung lediglich die Messung mit Glycerin herangezogen, in dem keine spontane Löslichkeit festgestellt werden konnte.

7.2.7.3 Messung und Auswertung

Die folgenden Tabellen enthalten die Ergebnisse der Dichtebestimmung. Es sind bereits die Mittelwerte der einzelnen Wägungen angegeben. Der Messbecher hatte eine Masse von 1,173 ± 0,001 g und ein Volumen von 5,304 ± 0,01 cm³. Die Dichte von Make Up 1 beträgt bei Bestimmung mit Glycerin 1,35 ± 0,04 g/cm³.

Dichte Make Up 1			
$T_{Glycerin}$	24,3 °C		
Literaturwert 86% Pharmaglycerin	1,221 - 1,232	g/cm^3	
	MW		StAbw
Masse des Glycerin mit Tara	7,666	g	± 0,001
Masse des Glycerin	6,492	g	
Dichte von Glycerin bei 24,3 °C	1,224	g/cm^3	
Make Up 1 + Tara	1,252	g	±0,001
Masse des Produkts	0,079	g	
hinzugefügt wird:			
Masse Glycerin bis Meniskus	6,421	g	± 0,001
Volumen des Glycerin	5,246	cm^3	
Bechervolumen - Glycerinvolumen	0,058	cm^3	
Dichte von Make Up 1	**1,35**	**g/cm^3**	± 0,04

Tabelle 74: Dichte von Make Up 1

7.2.8 Lichtquelle

Für die Modellierung bzw. Simulation wurden sieben Wellenlängen des sichtbaren Spektrums gewählt, die auch den Messpunkten der Extinktionsmessung entsprachen. Angenommen wurde ein einfallender Strahl mit einer Intensität von 1 mW m^{-2} nm^{-1}. Je nach Einfallswinkel wird in DISORT die Intensität des auf die Oberfläche auftreffenden Strahls mit dem Lambert'schen Cosinusgesetz ermittelt.

7.3 Modellierung

Die Modellierung wurde mithilfe zweier Programme (vorhandener Quellcode in FORTRAN) durchgeführt, wobei beide Programme den spezifischen Bedürfnissen angepasst wurden. Das Programm wb4.exe (siehe Abschnitt 9.6) wurde dazu eingesetzt, mit den vorhandenen Messgrößen die Eingangsparameter für DISORT (siehe Abschnitt 9.7) zu ermitteln. Im Anschluss daran wurden die mit DISORT erhaltenen Flussverteilungen mit den Ergebnissen der Strahldichtemessung verglichen.

Für die Simulation wurden die Eingangsparameter so verändert, dass der gewünschte Effekt, wie z.B. ein gleichmäßig verteilter Strahlungsfluss an der Oberfläche nach oben, erreicht wurde. Dazu wurden die Partikelgrößen– und Partikeldichteverteilungen verändert und die Brechzahl erhöht.

7.3.1 Spezifische Fragestellungen

Über die Modellierung des Make Up 1 soll dessen Rückstrahlung an der Oberfläche nachgebildet werden. Aufgrund der Möglichkeit in DISORT die diffusen und gerichteten Flüsse in verschiedenen optischen Dicken ausgeben zu können, soll überprüft werden, wie diese sich mit zunehmenden optischen Tiefen verändern. Dabei sollen speziell Reflexion am Glanzwinkel und Flüsse in Vorwärts- bzw. Rückwärtsrichtung mittels entsprechend gewählter Darstellungen verdeutlicht werden. Die Ergebnisse werden analog zur Darstellung der experimentellen Ergebnisse für drei bestimmte Geometrien (Einstrahlung 0° – Beobachtung 45°, Einstrahlung 20° – Beobachtung 20° und Einstrahlung 45° – Beobachtung 0°) untersucht.

Die für diese Geometrien spezifizierten Winkel werden definitionsgemäß als Beleuchtungs- oder Beobachtungswinkel - gemessen vom Lot - auf die Oberfläche verstanden, wobei 0° die Richtung des Lots bedeutet. Diese Definition ist nicht exakt, da der Energiefluss bei Einstrahlung zur Oberfläche gerichtet ist, das beobachtete zurückgestreute Licht in seiner Flussrichtung jedoch von der Oberfläche weggerichtet ist. Für die nachfolgende Modellierung wurde daher die durch das Simulationsprogramm DISORT vorgegeben Konvention übernommen, Strahlungsflüsse generell durch Polar– und Azimutalwinkel anzugeben. Polarwinkel werden vom Lot auf die Oberfläche gemessen, wobei 0° (in Lotrichtung) einen Strahlungsfluss senkrecht nach oben darstellt (siehe Abbildung 195). Die eingangs erwähnten Beobachtungswinkel entsprechen daher unmittelbar diesen Polarwinkeln. Einzig bei der Charakterisierung des einfallenden Strahls weicht DISORT von der eigenen Definition ab und verwendet - in Anlehnung an astronomische Konventionen - 0° für einen senkrecht nach unten gerichteten Strahl. Nachdem die experimentelle Anordnung zur Strahldichtemessung in einer Ebene lag waren die Versuche durch die Angabe des Beleuchtungs– und Beobachtungswinkels vollständig beschrieben. DISORT erlaubt die Darstellung der Gesamtsituation der Strahlungsflüsse in Kugelkoordinaten, sodass bei nicht–senkrechter Einstrahlung die azimutale Verteilung der Rückstreuung dargestellt werden kann. In allen Fällen nicht senkrechter Einfallsrichtung wurde als Azimut des Einfallswinkels willkürlich 50° gewählt (hauptsächlich zur Verdeutlichung des Einfalls– und Rückstreupeaks in den Diagrammen).

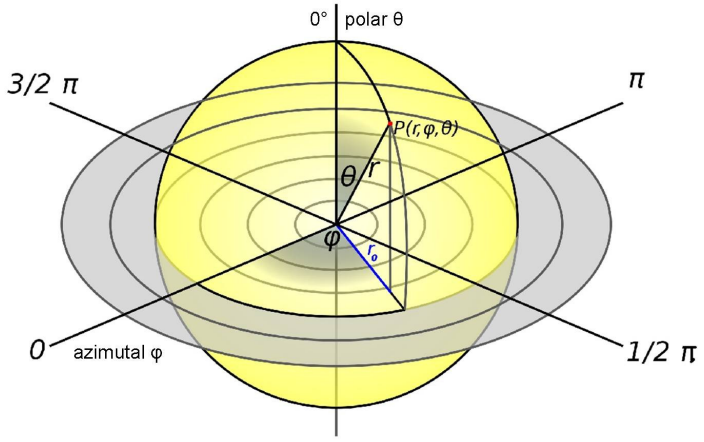


Abbildung 195: Kugelkoordinaten, Definition von Polar– und Azimutalwinkel[398]

[398] Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Polarkoordinaten [2.4.2011], User: Ichijiku, Creative Commons-Linzenz Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Unported.

7.3.2 Durchführung der Modellierung

Die Modellierung mithilfe von wb4.exe (siehe 9.6) hat als Eingabeparameter:

- Wellenlänge des Lichts
- Komplexe Brechzahl der Partikel
- Partikelverteilung in Größenklassen, errechnet aufgrund der Auszählung der Partikel aus Mikroskopaufnahmen (siehe 7.2.1.3)

Aus der Partikeldichte der Mikroskopaufnahme wurde eine räumliche Partikelverteilung mittleren Abstands abgeschätzt und mit dem Größenparameter Partikeldurchmesser/Wellenlänge die Volumenstreufunktion errechnet. Die Partikel werden dabei gemäß Bohren und Huffmann als homogen und kugelförmig angesetzt und die Volumenstreufunktion mit dem publizierten Algorithmus berechnet.[399] Daraus berechnet das Programm in weiterer Folge die Phasenfunktion, die Streukoeffizienten und Asymmetriefaktoren bei den gegebenen Wellenlängen. Die sich ergebende Phasenfunktion für Make Up 1 ist beispielhaft in Abbildung 184 (Seite 198) und Abbildung 196 (Seite 209) dargestellt.

Die Phasenfunktion dient als Input für das Simulationsprogramm DISORT, allerdings müssen dazu aus der Phasenfunktion zunächst durch Lengendretransformation die Legendrekoeffizienten ermittelt werden. Nachdem zahlreiche Berechnungsläufe für die tatsächliche und weitere simulierte Partikelverteilungen vorhersehbar waren und externe Routinen (mathematica, derive, etc) keine einfache Anbindung an das FORTRAN–Programm zuließen, wurde die Ermittlung der Legendrekoeffizienten im Programm wb4.exe realisiert. Es erwies sich als notwendig, relativ umfangreiche Koeffizientensätze zu verwenden, da die betrachteten Partikel gegenüber der Lichtwellenlänge groß waren und daher die Phasenfunktion einen stark vorwärtsgerichteten Streupeak enthielt. Typischerweise wurden 200 Legendrekoeffizienten berechnet, wobei in fast allen Fällen eine gute Näherung erzielt wurde (eine Ausnahme bilden die kurzen Wellenlängen). Abbildung 196 zeigt neben den gemäß Bohren und Huffmann berechneten Werten der Phasenfunktion (durchgezogene Linien) die Legendretransformation derselben Funktion (Punkte).

[399] Vgl. Bohren (1983/2004), S. 479.

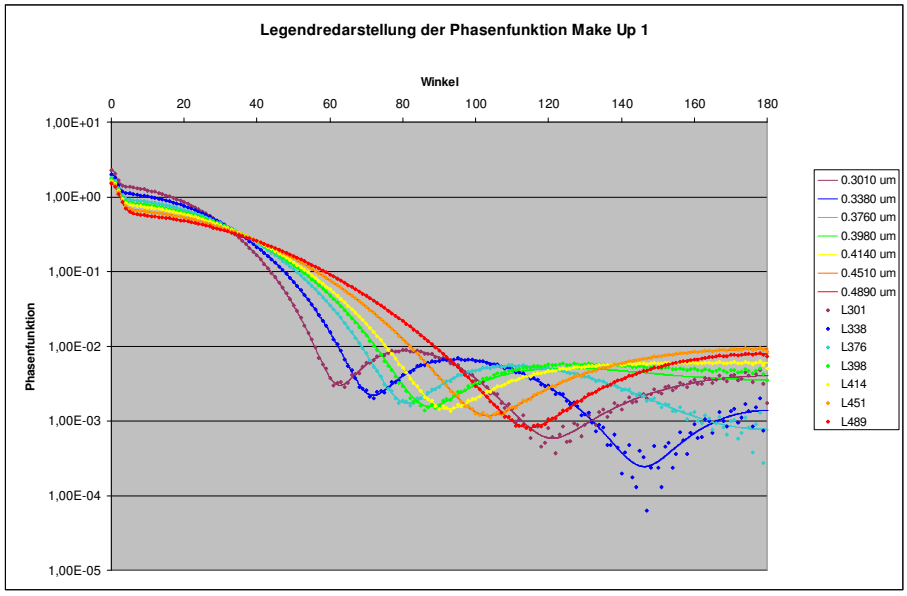


Abbildung 196: Legendre Approximation der Phasenfunktion von Make Up 1 (λ H_2O)

Das Programmpaket DISORT simuliert den Durchgang von Strahlung durch ein mehrlagiges, plan–paralleles Medium und stellt in vielen Fällen den Kern atmosphärischer Simulationsmodelle dar.[400] Der Algorithmus selbst arbeitet einheitenfrei und ist damit unabhängig von der linearen Dimension der Fragestellung. Die Eingabeparameter für DISORT (für eine bestimmte Wellenlänge) sind:

- Optische Tiefe der betrachteten Schicht (aus Messung des Extinktionskoeffizienten σ_E, siehe 7.2.2)
- Single Scattering Albedo (siehe 3.1.7)
- Einfallswinkel und Intensität des Primärlichts mit einer gewählten Annahme von 1 mW m^{-2} nm^{-1}
- Art und Stärke der Reflexion am Boden bzw. an der Unterseite der betrachteten Schicht
- Legendrekoeffizienten der Phasenfunktion

DISORT errechnet an der Oberfläche und in beliebiger Tiefe des Mediums die polare und azimutale Flussverteilung unter Berücksichtigung der Streuereignisse (multiple scattering).

Für die Simulation der im Make Up enthaltenen reflektierenden Plättchen (siehe Abbildung 144) war es nicht zweckmäßig und zielführend den Algorithmus auf Basis Bohren und Huffmann anzuwenden, da hier die Voraussetzungen hinsichtlich homogen und kugelförmig nicht erfüllt waren. Stattdessen wurde die Gesamtschicht des Make Up in 5 Teilschichten zerlegt und die Bodenreflexionsfunktion der obersten vier Schichten so gestaltet, dass den reflektierenden Plättchen Rechnung getragen wurde. Das Gesamtergebnis wurde als gewichtete Summe der Einzelschichten ermittelt. Im folgenden Text wird bei der Modellierung jeweils zwischen Bulk und Composite unterschieden. Unter Bulk wird die volle Make Up-Schicht verstanden, während Composite den geschichteten Aufbau des Bulkmaterials mit eingelagerten reflektierenden Plättchen bezeichnet.

[400] Vgl. Stamnes (2000), S. 12.

Die Bodenreflexionsfunktion (bidirectional reflectance function, DISORT Report v1.1, Formel 39[401]) erlaubt die Modellierung beliebigen Reflexionsverhaltens, von spiegelnd bis isotrop (Lambert). Hier wurde eine Gaussverteilung der Orientierung der reflektierenden Plättchen angenommen, wobei als Vorzugslage die horizontale Ausrichtung und als Standardabweichung (1σ) der Gaussverteilung ein Winkel von 15° angenommen wurde.

Bei der Auswertung der experimentellen Versuche wie auch der Modellierung ergaben sich deutliche Aufhellungen am Glanzwinkel ("spiegelnde Reflexion") gegenüber der erwarteten gleichmäßig-diffusen Lambert'schen Rückstreuung. Durch die Modellierung der "virtuellen" Spiegelschichten war es möglich - wie nachfolgend beschrieben - die beobachtete Aufhellung am Glanzwinkel zu modellieren. Der Glanzeffekt tritt aber auch als normale Konsequenz der Wechselwirkung von Licht mit Materie auf, wie dies durch die Fresnel'schen Gleichungen beschrieben wird. Dieser Effekt ist quantitativ nur bei großen Einfallswinkeln (streifender Lichteinfall) erkennbar und wurde für einen Einfallswinkel von 70° in der Modellierung des Bulkmaterials (ohne eingebettete Spiegelschichten) verifiziert (siehe Abschnitt 7.4.5.2).

Im Rahmen der Modellierung wurden jeweils 7 Wellenlängen, 3 Einfallswinkel und 5 Schichten berechnet (wobei die Rechenzeit auf einer 2.4 Ghz dual core CPU etwa 4 Minuten betrug). Eine Übersicht der Eingabeparameter für die Modellierung des Experiments und für zwei Simulationsläufe mit geänderten Parametern ist in Abschnitt 9.7 angeführt.

7.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Der Vergleich der Modellierung mit den experimentell ermittelten Ergebnissen erforderte prinzipiell eine „Kalibrierung“ des Modells betreffend der Primärstrahlintensität. Wie auch bei Yamada et al[402] wurde diese Kalibrierung durch Normierung auf den (nahezu) ideal Lambert’sch reflektierenden Opdi erzielt (Reflexion je nach Experimentgeometrie 95~100%, d.h. Primärstrahlintensität/π). Dieser Kalibrierfaktor wurde auf alle weiteren Reflexionsmessungen mit der Strahldichteoptik (siehe Abschnitt 6.5.3) angewandt und lieferte im Vergleich mit der Modellierung mit DISORT die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse.

7.3.3.1 Vergleich der Rückstrahlung von Experiment und Modell

DISORT gibt die Rückstrahlung im Verhältnis zur einfallenden Strahlung für ausgewählte Wellenlängen aus. Die Wellenlängen wurden entsprechend der Extinktionsmessungen (siehe Abschnitt 7.2.2) gewählt. Das Verhältnis zwischen Einstrahlung und Rückstrahlung wurde für diese Wellenlängen für die Experimentdaten durch Normierung auf den Opdi an den entsprechenden Messstützpunkten ermittelt. An den Stützpunkten wurden die Messergebnisse über ± 5 nm gemittelt.

Die Messergebnisse wurden in den Winkeln gemäß Tabelle 75 erhoben und dementsprechend wurden die geometrischen Verhältnisse für das Modell gewählt.

[401] Vgl. Stamnes (2000), S. 43.
[402] Vgl. Yamada (2004), S. 9.

Einfallsrichtung des Lichts	Beobachtungs-richtung	Bezeichnung
0°	45°	0 – 45
22°	22°	22 – 22
45°	0°	45 – 0

Tabelle 75: Einfalls- und Beobachtungsrichtung DISORT

Um die reflektierenden Plättchen im Make Up zu simulieren wurden diese in diskreten Schichten simuliert. Ergebnis der Modellierung war, dass die Rückstreuung zu 70 % vom homogenen Material (=Bulk-Material) des Make Up bestimmt wird , zu etwa 10 % aus einer spiegelnden Schicht in der optischen Tiefe 0,25, zu etwa je 5 % aus spiegelnden Schichten in optischer Tiefe 0,5 und 1 und zu etwa 10 % aus reflektierenden Schichten darunter. Dies waren die einzigen frei anpassbaren Parameter des Modells.

Das Diagramm in Abbildung 197 zeigt den Vergleich der experimentell ermittelten Daten (PET mit Make Up für die drei Winkelstellungen) mit den Ergebnissen der Modellrechnung in DISORT („Composite“ für drei Winkel). Die Ergebnisse an den sieben Stützpunkten (gemäß der Extinktionskoeffizientenmessung) sind durch Symbole hervorgehoben.

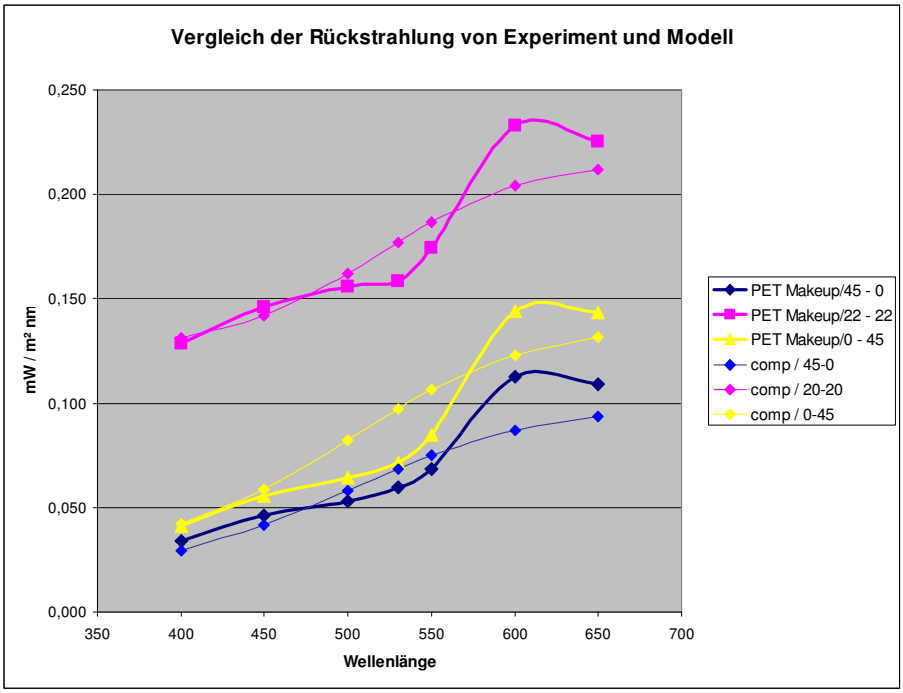


Abbildung 197: Vergleich der Rückstrahlung von Experiment und Modell

Legende: **PET Makeup/ xx-yy**, **comp/xx-yy**, **xx** = Beleuchtungswinkel, **yy** = Messwinkel
PET Makeup: Messung für Make Up mit der SDO
comp: modellierte Werte (Composite)

Diskussion der Ergebnisse des Vergleichs:

- Man erkennt, dass die Rückstrahlung des Lichts mit längeren Wellenlängen zunimmt. Das entspricht den Experimentdaten und dem rötlichen Farbton des Make Up 1.
- Bei Lichteinfall unter 45° ergibt sich auf Grund der geringeren Einstrahlung eine geringere Rückstrahlung, was dem Lambert’schen Cosinus–Gesetz entspricht.

- Die Ergebnisse 0 – 45 und 45 – 0 liegen nah beisammen, weil das Make Up durch seine Streueigenschaft nahezu eine Lambert'sche Rückstrahlung aufweist.
- Am Glanzwinkel (22°), der über die Spiegelschicht simuliert wird, tritt erwartungsgemäß die größte Rückstreuung auf. Der Glanzeffekt konnte im Modell erfolgreich nachgebildet werden.
- Die Erhöhung der Funktionskurve der Messwerte bei 600 nm liegt daran, dass die experimentellen Daten mit einer größeren Messunsicherheit behaftet waren, da dieser Wert in einer Flanke des Spektrums der Tageslichtlampe lag.

Die Modellkurven zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Strahldichtemessung, wenn man vom oben beschriebenen Problem des 600 nm Messpunktes absieht. Damit konnten die optischen Eigenschaften des Basismaterials des Make Ups sowie die eingebetteten reflektierenden Plättchen erfolgreich durch ein einfaches Modell beschrieben werden, indem korrekt der Absolutwert und die Wellenlängenabhängigkeit der rückgestreuten Intensität dargestellt wird.

7.3.3.2 Flussverteilungen im Make Up

DISORT rechnet mittlere Intensitäten und Flüsse. Mittlere Intensitäten werden aus der gesamten Intensität, die auf ein Volumen von allen Seiten trifft, ermittelt. Flüsse geben die gesamte Energie an, die pro Zeiteinheit durch eine horizontale Fläche tritt.[403]

7.3.3.2.1 Globale Betrachtung

Der Streukoeffizient der betrachteten Substanz ist auf Grund der hohen Teilchendichte sehr groß. Es erfolgt daher relativ rasch eine Umschichtung von Intensität aus dem Direktstrahl in diffuse zunächst vorwärts gestreute und rasch isotrope Intensitätsverteilung. Dieser Übergang erfolgt bereits in der Größenordnung von einer bis zwei optischen Tiefen.

Abbildung 198 zeigt die diffusen Flüsse in Vorwärts– und Rückwärtsrichtung für zunehmende optische Dicken und ausgewählte Wellenlängen.

Der diffuse Fluss nach unten (diff/dn, Abbildung 198, durchgezogene Linien) nimmt rasch zu und erreicht sein Maximum mit ≈ 55 % der einfallenden Intensität bei der optischen Dicke von 2. Danach nimmt er exponentiell ab und sinkt je 10 optischen Dicken auf ein Drittel seines Wertes ab. Bei der optischen Dicke von 80 (optische Dicke Make Up 1 bei 400 nm) ist der nach unten gerichtete Fluss auf einen verschwindend kleinen Anteil abgesunken, womit die Rückstreufähigkeit der Haut nahezu unbedeutend wird.

[403] Vgl. Stamnes (2000), S. 20.

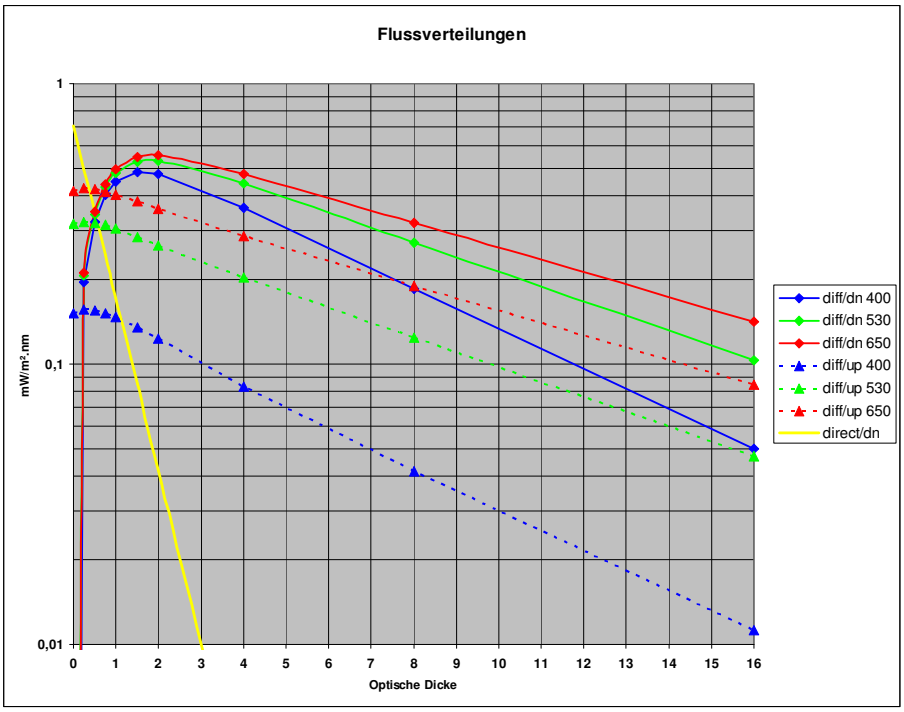


Abbildung 198: Flussverteilungen im Make Up l

Der diffuse Fluss nach oben (diff/up, Abbildung 198, strichlierte Linien) für 400 nm zeigt, dass er bis zu einer halben optischen Dicke ansteigt, einen Wert von ≈ 40% der eingestrahlten Intensität erreicht und dann je 10 optischer Dicken auf 1/3 seines Wertes absinkt. Bei der optischen Dicke von 80 ist kaum mehr Rückfluss nach oben vorhanden. Diese Flüsse nach oben sind die Quelle für die an der Oberfläche austretende Emission und der optischen Wahrnehmung der Rückstreuung vom Make Up.

Der direkte Fluss nach unten (direct/dn) nimmt exponentiell gemäß dem Extinktionskoeffizienten ab (siehe Abbildung 198, gelb durchgezogene Linie).

7.3.3.2.2 Lokale Betrachtungen

Genauere Betrachtungen der Flussverteilungen sind auf Grund der von DISORT ausgegebenen Werte in verschiedenen optischen Tiefen möglich. Hier soll der Fluss an der Oberfläche und in einer Tiefe von 0,25 für das modellierte Make Up präsentiert werden. Als Diskussionsgrundlage werden die Flüsse für die Wellenlänge 450 nm und Einstrahlungsrichtung 20° polar und 50° azimutal gewählt.

Modellierung der Experimentdaten für Einstrahlungsrichtung 20° an der Oberfläche für 450 nm

Zu beachten ist, dass es an der Oberfläche (OD = 0) keinen diffusen Fluss nach unten gibt. Der Fluss, der genau nach oben gerichtet ist (0° polar), beträgt im reinen Bulk–Material 0,065. Bei Betrachtung 20° polar beträgt er etwa 0,075 (siehe Abbildung 199). Der Oberflächenfluss nimmt in horizontaler Richtung zu und verschwindet dann bei polar > 90°.

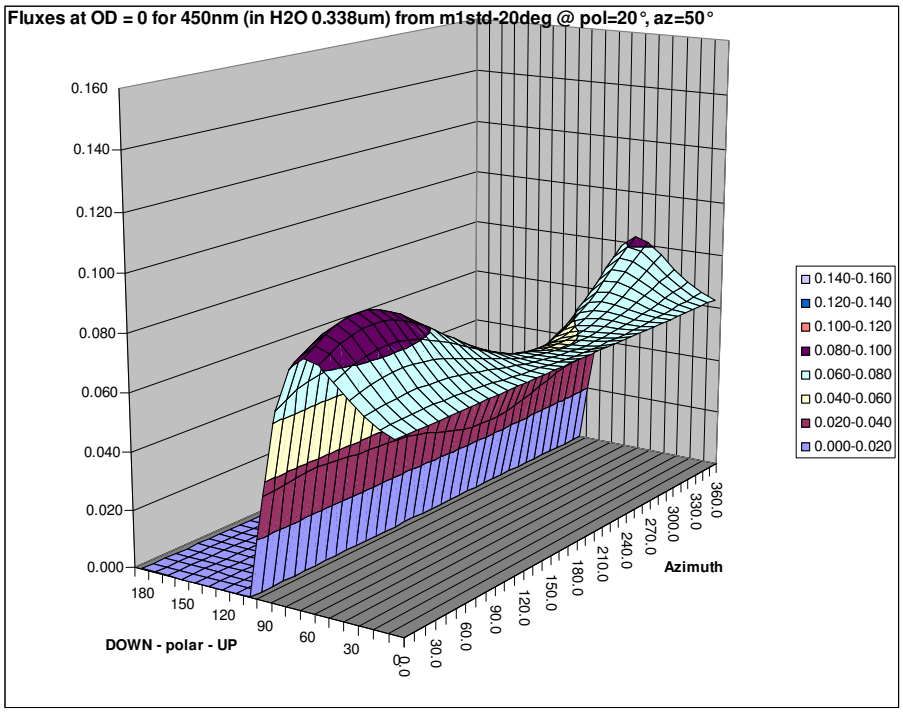


Abbildung 199: Flussverteilung modelliertes Make Up, Bulk-Material, Rückstreuung an der Oberfläche

Legende: **m1std-20deg@ pol=20°, az=50°**, **OD = 0** – an der Oberfläche,
modelliertes Experiment, Lichteinfall unter 20° polar, 50° azimutal
Bulk-Material: ohne reflektierende Plättchen

Abbildung 200 zeigt, dass sich für das Composite (mit reflektierenden Plättchen) dieselbe Struktur ergibt, wie für das Bulk–Material. Sie wird bei 20° polar 230° azimutal von einer deutlich spiegelnden Reflexion von 0,14 überlagert. Der Fluss abseits der spiegelnden Reflexion wird leicht abgedämpft auf 0,06.

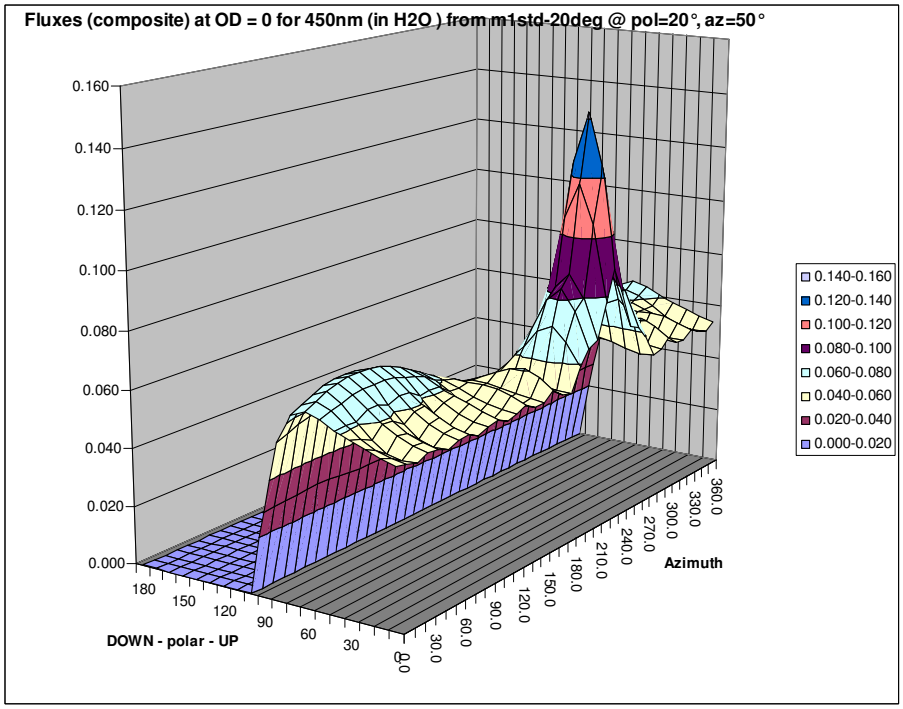


Abbildung 200: Flussverteilung modelliertes Make Up, Composite, Rückstreuung an der Oberfläche

Die in Abbildung 201 ersichtlichen Azimutalschnitte zeigen die Flussverhältnisse an der Oberfläche im Detail. Klar erkennbar ist im Diagramm rechts die spiegelnde Reflexion am Punkt polar 20° und azimutal 230°.

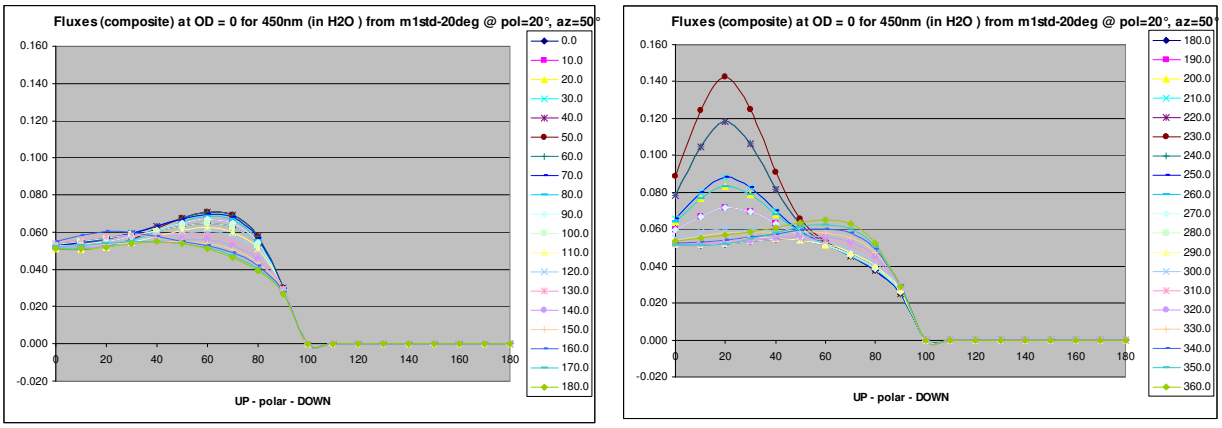


Abbildung 201: Azimutale Flusskomponenten Make Up (Composite) an der Oberfläche

Modellierung der Experimentdaten für Einstrahlungsrichtung 20° bei optischer Tiefe 0,25 für 450 nm

In der optischen Tiefe von 0,25 ist im reinen Bulk–Material ein scharf begrenzter Peak in der Größe von ≈ 0,4 des diffusen Flusses nach unten (polar 20°, azimutal 50°, Abbildung 202) erkennbar. Mit zunehmender Entfernung vom Einstrahlungspunkt weitet sich der Peak auf und der diffuse Fluss sinkt auf ein Minimum. In Aufwärtsrichtung ergibt sich ein diffuser Fluss von ungefähr 0,05.

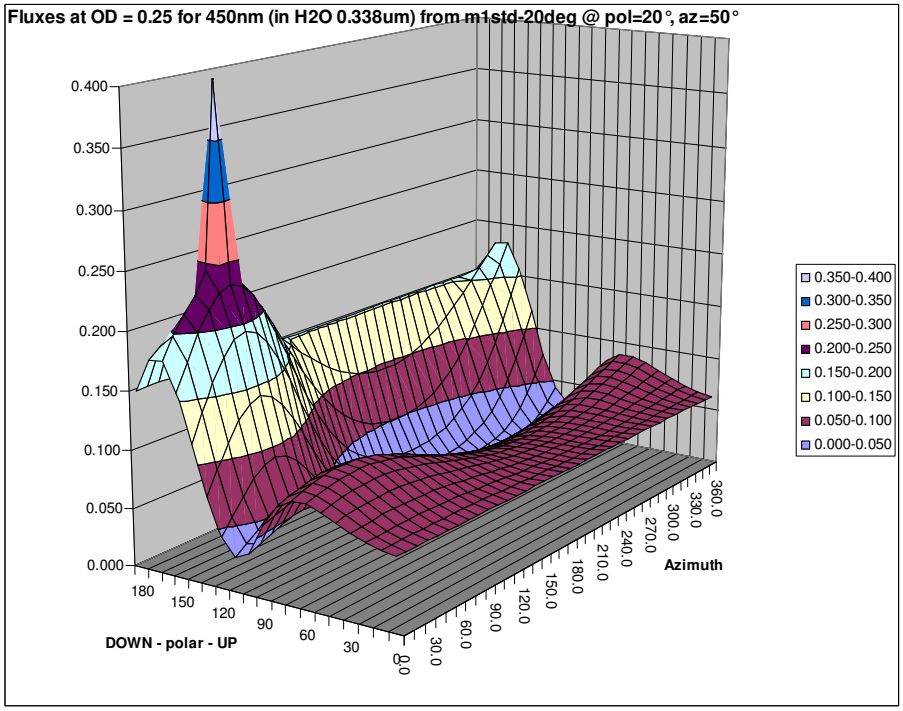


Abbildung 202: Flussverteilung modelliertes Make Up, Bulk-Material, in OD = 0,25

Der diffuse Fluss nach unten hat für das Composite die gleiche Struktur, wie im Bulk–Material. Spiegelnde Reflexion tritt auch hier auf, ist aber in dieser optischen Tiefe etwas höher und beträgt 0,15. Ablesbar sind die Werte aus Abbildung 203 und Abbildung 204.

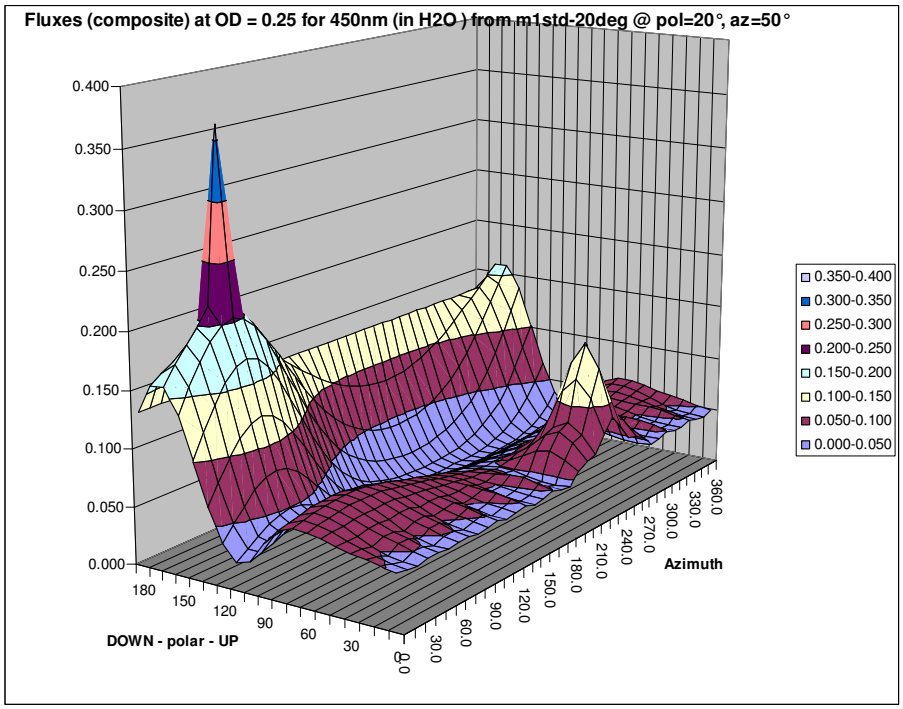


Abbildung 203: Flussverteilung modelliertes Make Up, Composite, in OD 0,25

Der direkte gerichtete Fluss der Primärstrahlung ist höher als der in der Darstellung abgebildete diffuse Fluss bei polar 160°, azimutal 50°, er beträgt 0,72. Dieser wird von der Spiegelschicht in OD = 0,25 nahezu komplett reflektiert, diese spiegelnde Reflexion geht aber nur mit der gewählten Gewichtung in das Gesamtergebnis des Composite ein (Bulk–Material 70%, erste Spiegelschicht bei OD = 0,25 10%, Rest aus tieferen Schichten).

Die Details der azimutalen Flussverteilungen des Composite–Materials sind in den beiden Diagrammen in Abbildung 204 ablesbar.

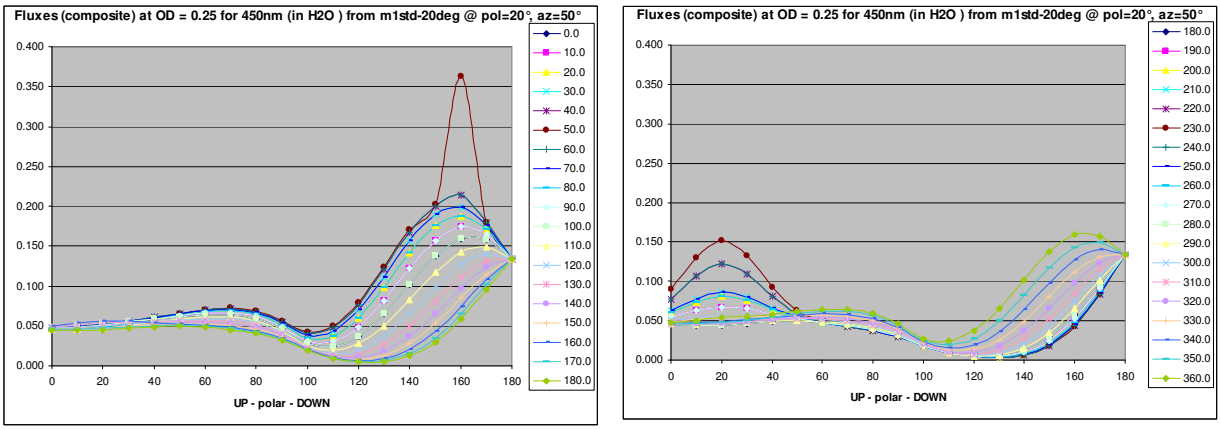


Abbildung 204: Azimutale Flusskomponenten Make Up (Composite), in OD=0,25

7.4 Simulation mit geänderten Parametern

Es wurden verschiedene Überlegungen angestellt, um das Streuverhalten des Make Up im Rahmen einer Simulation anders zu gestalten und zu einem verbesserten Ergebnis des Gesamteindrucks zu kommen. Ziel dieser Verbesserungen sollte es sein, die Intensität, die an der Make Up Oberfläche zurückgestrahlt wird, zu erhöhen, eine gleichmäßigere Intensitätsverteilung über das sichtbare Spektrum und eine bessere Kontrolle über Glanzeffekte zu erreichen. Einige Variationsmöglichkeiten von Parametern kamen in die engere Auswahl, wie die Änderung der Brechzahl, eine Variation des Absorptionskoeffizienten und eine andere Partikelgrößen- und Partikeldichtenverteilung. Es wurden enstprechende neue Parameter für die theoretische Make Up Zusammensetzung gewählt und mit diesen Werten wurden die Simulationsläufe mit wb4.exe und DISORT durchgeführt. Die ausführliche Diskussion der Wahl der Parameter und der Ergebnisse der Simulationsläufe wird in diesem Abschnitt präsentiert.

7.4.1 Parameter für die Simulationen

Um Reflektivität und damit die Helligkeit des Make Up zu steigern, wurde eine Brechzahländerung ins Auge gefasst. Ein weiterer Effekt, der bei einer großen Differenz der Brechzahlen von Vehikel und darin eingebetteten Partikeln auftritt, ist die Zunahme der Deckkraft der Gesamtsubstanz.

Ein Parameter, der eine Änderung des Streuverhaltens des Make Up mit sich bringen sollte, ist eine Änderung des Absorptionsverhaltens, da die Absorptionskoeffizienten in die Single Scattering Albedo eingehen. Eine Erhöhung des Imaginärteils der Brechzahl erhöht die Absorption des Materials ebenfalls.

Das Verhältnis von Partikelgröße zur Lichtwellenlängen hat großen Einfluss auf die Phasenfunktion (Richtung der Streuung). Die Partikeldichte bestimmt die optische Dicke des Materials und damit seine Deckkraft.

In den nächsten Abschnitten werden die Ergebnisse der Einflüsse dieser geänderten Parameter in den Simulationen, die mit DISORT durchgeführt wurden, besprochen.

7.4.1.1 Brechzahl

Eine Änderung der Brechzahl kann durch eine vermehrte Beimischung von Pigmenten mit höherer Brechzahl erreicht werden. TiO_2 Partikel haben eine große Brechzahl (Wert siehe Tabelle 11), werden sie in Wasser (n = 1,33) oder Glycerin (n = 1,45) eingebettet, ergibt sich eine resultierende Brechzahl zur Berechnung der Phasenfunktion von $n \approx 2$.

Um die Absorption zu erhöhen, wurde der Imaginärteil der für die Modellierung von Make Up 1 verwendeten Brechzahl (Re (n) = 1,2 und Im (n)= 0,075) für die Simulationen leicht angehoben, sodass für die Simulationen eine Brechzahl mit Re (n) = 2 und Im (n) = 0,1 ins Auge gefasst wurde.

7.4.1.2 Änderung des Absorptionskoeffizienten

Die gewählte Absorption des Make Up wurde so geändert, dass der Verlauf des Absorptionskoeffizienten über dem interessierenden Wellenlängenbereich flacher gestaltet wurde (siehe

Abbildung 205). Daraus ergibt sich eine geänderte Single Scattering Albedo mit flacherem Verlauf, die ebenfalls in dieser Grafik präsentiert werden und deren Werte in Tabelle 76 dargestellt sind.

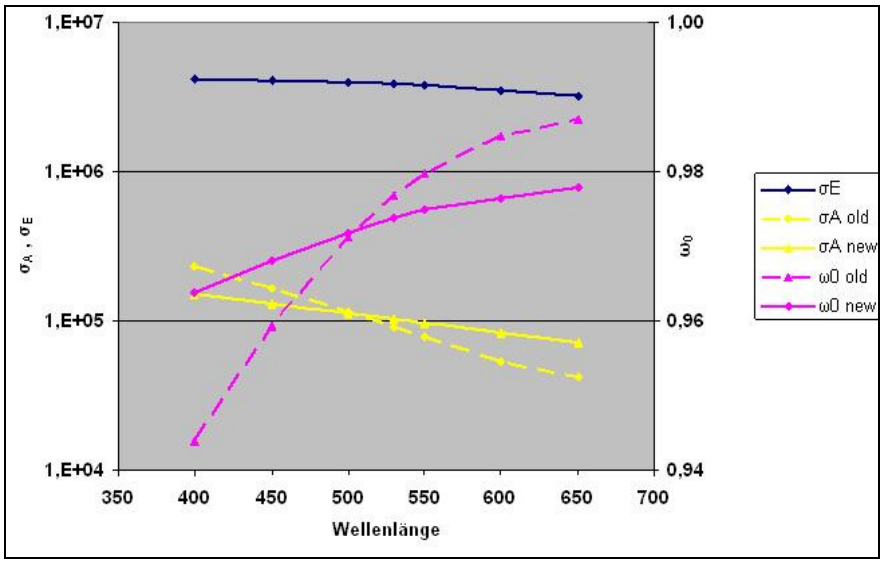


Abbildung 205: Extinktionskoeffizient σ_E, Absorptionskoeffizien σ_A, Single Scattering Albedo ω_0

	400 nm	450 nm	500 nm	530 nm	550 nm	600 nm	650 nm
σ_E [m^{-1}]	**4150661**	**4049719**	**3964182**	**3897742**	**3825794**	**3493219**	**3211645**
σ_A old [m^{-1}]	233070	164919	113788	90192	77164	53440	41656
σ_A new [m^{-1}]	**150597**	**129620**	**111565**	**101963**	**96025**	**82649**	**71137**
ω_0 old	0,9438	0,9593	0,9713	0,9769	0,9798	0,9847	0,9870
ω_0 new	**0,9637**	**0,9680**	**0,9719**	**0,9738**	**0,9749**	**0,9763**	**0,9779**

Tabelle 76: σ_A und ω_0 für die Simulation

Diese Werte wurden in allen Rechenläufen der verschiedenen Simulationen verwendet, außer bei der Simulation des Original Make Ups mit der geänderten Brechzahl.

7.4.1.3 Anzahl der Rechenläufe und Nomenklatur

In den Diagrammen in den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der einzelnen Rechenläufe zusammengefasst. Die Berechnungen erfolgten für die Originalwerte des Make Up 1 (im Diagramm m1std-α oder m2std-α), für zwei Simulationen (in den Diagrammen m2SIM1-α und m2SIM2-α). Das α im Namen steht für den Einstrahlungswinkel, mit dem in diesem DISORT-Lauf gearbeitet wurde. Jede dieser Berechnungen wurde auch mit der neu gewählten Brechzahl durchgeführt (Suffix „x“, m2std-αx, m2SIM1- αx, m2SIM-αx, m3SIM3-αx).

Jede Berechnung umfasste jeweils 7 Wellenlängen, 3 Einfallswinkel und 5 Schichten. Eine Übersicht der Eingabeparameter ist in Abschnitt 9.7 angeführt.

7.4.1.4 Partikelverteilung für die Simulationen

Die Partikelverteilungen für das Make Up wurden nach zwei Gesichtspunkten variiert. Die Größenverteilung und die Dichteverteilung der in die grießartige Substanz eingebetteten Partikeln wurden geändert (Details hierzu siehe Tabelle 77).

Es wurden sechs Simulationen gerechnet, deren Parameter im Folgenden angegeben werden. Für die gewählten Parameter wurden die Volumenstreufunktionen, Streukoeffizienten, Phasenfunktionen und Legendrepolynome in wb4.exe bestimmt und damit in DISORT die sich ergebenden Flüsse und Intensitäten ermittelt.

7.4.1.4.1 m2std-α, Simulation des Make Up mit geänderter Brechzahl

Die Partikelgrößen– und Partikeldichteverteilung des Experiments wurde mit der höheren Brechzahl (Re (n) = 2, Im (n) = 0,1) berechnet.

7.4.1.4.2 m2SIM1-α, Simulation mit geänderter Partikelgrößen- und Partikeldichteverteilung, mit Brechzahl des Experiments

Es wurden zwei Arten von Partikeln angenommen. Die im Make Up vorkommende grießartige Substanz mit ihrer Größe von 0,37 µm und größere Partikel mit 0,6 µm. Für die Verteilung wurde angenommen, dass die größeren Partikel fünfmal öfter vorkommen. Die Simulation wurde mit der Brechzahl des Experiments (Re (n) = 1,2, Im (n) = 0,075) durchgeführt.

7.4.1.4.3 m2SIM1-αx, Simulation mit geänderter Brechzahl

Hierbei wurde die Partikelgrößen- und Partikeldichteverteilung gemäß m2SIM1-α mit der neu gewählten Brechzahl (Re (n) = 2, Im (n) = 0,1) berechnet.

7.4.1.4.4 m2SIM2-α, Simulation mit geänderter Partikelgrößen- und Partikeldichteverteilung, mit Brechzahl des Experiments

Die Partikelgröße und Art entspricht denen von m2SIM1. Die Partikeldichteverteilung wurde dahingehend angenommen, dass wie beim Experiment die grießartige Substanz den größeren Anteil am Füllgrad einnimmt. Diese Teilchen wurden zehnmal so oft angenommen, wie die großen Partikel. Die Simulation wurde mit der Brechzahl des Experiments und mit der neu gewählten Brechzahl durchgeführt.

7.4.1.4.5 m2SIM2-αx, Simulation mit geänderter Brechzahl

Entspricht der Simulation m2SIM2-α. Sie wurde mit der neu gewählten Brechzahl berechnet.

7.4.1.4.6 m3SIM3- αx, Simulation mit geänderter Partikelgrößen- und Partikeldichteverteilung, mit geänderter Brechzahl

Für eine weitere Simulation wurde eine Partikelgrößenverteilung erstellt, bei der die Partikelgrößen den Größenordnungen der betrachteten Wellenlängen entsprachen. Die Partikel wurden von der Anzahl her gleichverteilt angenommen, der Füllgrad steigt mit dem Partikeldurchmesser und liegt insgesamt bei etwa 2%.

Tabelle 77 zeigt die Partikeldurchmesser, ihre Häufigkeit (analog zu Auszählung der Mikroskopaufnahmen bei einer definierten Fläche), den durchschnittlichen Abstand zu einem Partikel gleicher Art, ihre Anzahl je µm³, ihr Volumen in µm³ und den Füllgrad aller Partikel dieser Größe auf Grund ihrer Anzahl für die einzelnen Simulationen und das Experiment.

						Optical Density Estimation						
d [µm]	freq	avgdst[µm]	1/µm³	Vol 1 [µm³]	vol all [µm³]	0,40 µm	0,45 µm	0,50 µm	0,53 µm	0,55 µm	0,60 µm	0,65 µm
				Experimental data [m1std], total optical depth		82,9	73,6	66,3	62,5	60,3	55,2	51,0
				single scattering albedos (measured)		0,9438	0,9593	0,9713	0,9769	0,9798	0,9847	0,9870
0,37	15860	0,56	5,75557305	0,03	0,1526484	44,27	39,35	35,41	33,41	32,19	29,51	27,24
1,00	8	24,85	0,00006520	0,52	0,0000341	2,69	2,39	2,15	2,03	1,95	1,79	1,65
3,00	6	28,69	0,00004235	14,14	0,0005987	6,98	6,21	5,58	5,27	5,08	4,65	4,30
5,00	6	28,69	0,00004235	65,45	0,0027718	11,63	10,34	9,31	8,78	8,46	7,76	7,16
6,50	2	49,69	0,00000815	143,79	0,0011720	8,73	7,76	6,99	6,59	6,35	5,82	5,37
9,00	1	70,27	0,00000288	381,70	0,0010999	8,55	7,60	6,84	6,45	6,22	5,70	5,26
				Simulation data [m2sim1], total optical depth		51,4	45,7	41,1	38,8	37,4	34,3	31,6
				single scattering albedos (calculated)		0,9637	0,9680	0,9719	0,9738	0,9749	0,9763	0,9779
0,37	1000	2,22	0,09112421	0,03	0,0024168	11,12	9,88	8,89	8,39	8,08	7,41	6,84
0,60	5000	0,99	1,01879969	0,11	0,1152235	40,30	35,83	32,24	30,42	29,31	26,87	24,80
				Simulation data [m2sim2], total optical depth		53,2	47,3	42,5	40,1	38,7	35,4	32,7
				single scattering albedos (calculated)		0,9637	0,9680	0,9719	0,9738	0,9749	0,9763	0,9779
0,37	10000	0,70	2,88160066	0,03	0,0764254	35,15	31,24	28,12	26,53	25,56	23,43	21,63
0,60	1000	2,22	0,09112421	0,11	0,0103059	18,02	16,02	14,42	13,60	13,11	12,02	11,09
				Simulation data [m3sim3], total optical depth		83,1	73,9	66,5	62,7	60,5	55,4	51,2
				single scattering albedos (calculated)		0,9637	0,9680	0,9719	0,9738	0,9749	0,9763	0,9779
0,301	1000	2,22	0,09112421	0,01	0,0013012	9,04	8,04	7,23	6,82	6,58	6,03	5,56
0,338	1000	2,22	0,09112421	0,02	0,0018424	10,15	9,03	8,12	7,66	7,38	6,77	6,25
0,376	1000	2,22	0,09112421	0,03	0,0025363	11,30	10,04	9,04	8,52	8,21	7,53	6,95
0,398	1000	2,22	0,09112421	0,03	0,0030080	11,96	10,63	9,57	9,02	8,70	7,97	7,36
0,414	1000	2,22	0,09112421	0,04	0,0033856	12,44	11,06	9,95	9,39	9,05	8,29	7,65
0,451	1000	2,22	0,09112421	0,05	0,0043769	13,55	12,04	10,84	10,23	9,85	9,03	8,34
0,489	1000	2,22	0,09112421	0,06	0,0055790	14,69	13,06	11,75	11,09	10,68	9,79	9,04

Tabelle 77: Partikelgrößen, - verteilung und weitere Parameter für Modellierung Experiment und Simulation

Die in der Tabelle angegebenen optischen Dicken wurden für die untersuchten Wellenlängen auf Grund einer Näherungsformel abgeschätzt. Der obere Teil der Tabelle zeigt die für Make Up 1 auf Grund der Elektronenmikroskopaufnahmen gemessenen Werte (die geschätzten optischen Dicken stimmen annähernd mit den experimentell gemessenen Daten überein; m1std oder m2std). Der untere Teil zeigt die gewählten Simulationsparameter und die sich ergebenden Werte für m2SIM1, m2SIM2 und m3SIM3.

7.4.2 Phasenfunktionen der Simulationen

Die Phasenfunktionen für die Simulationen m2SIM1, m2SIM2 und m3SIM3 wurden mit Hilfe von wb4.exe auf Grund der neuen Partikelverteilungen und Partikeldichten für beide Brechzahlen (m3SIM3 nur die neue) berechnet. Für den Vergleich wurde auch die Phasenfunktion von Make Up 1 mit der gewählten Brechzahländerung ermittelt. Im Folgenden sind die Phasenfunktionen im Vergleich mit Make Up 1 dargestellt. Die sich ergebenden Änderungen werden diskutiert.

7.4.2.1 Simulationen mit Brechzahl des modellierten Make Up 1

Abbildung 206 zeigt die Phasenfunktionen für Make Up 1 und für die beiden Simulationen m2SIM1 und m2SIM2 mit der für die Modellierung gewählten Brechzahl.

7.4.2.1.1 Phasenfunktion - Vergleich MU1 Experiment und Simulation 1

Für die Simulation m2SIM1-α (α gibt den Einfallswinkel des Lichts an) wurde, wie oben beschrieben, die Annahme getroffen, dass fünfmal mehr Partikel mit einer Größe von 0,6 µm enthalten sind, als grießartige Partikel von 0,37 µm. Beide Partikelarten entsprechen von der Größe her der Größenordnung des einfallenden Lichts einer bestimmten Wellenlänge. Erwartungsgemäß verändert sich daher die Phasenfunktion bei einer Wellenlänge von 650 nm be-

sonders deutlich (m2sim1, siehe Abbildung 206). Die Phasenfunktion m2sim1-2/650 folgt in der Simulation der Phasenfunktion des Experiments bei 400 nm (m1std-2/400). Erklärbar wird das mit der neuen Situation der Partikeldichteverteilung. Im Experiment war die Partikeldichte für die grießartigen Teilchen vorherrschend (15 % des Volumens zu 0,5 % für die großen kugelförmigen Partikel). In der Simulation ist die Situation umgedreht (11 % für die 0,6 µm kugelförmigen und 0,2 % für die grießartigen 0,37 µm Teilchen) – dies führt zu analogen Wechselwirkungsmechanismen und nahezu identer Phasenfunktion.

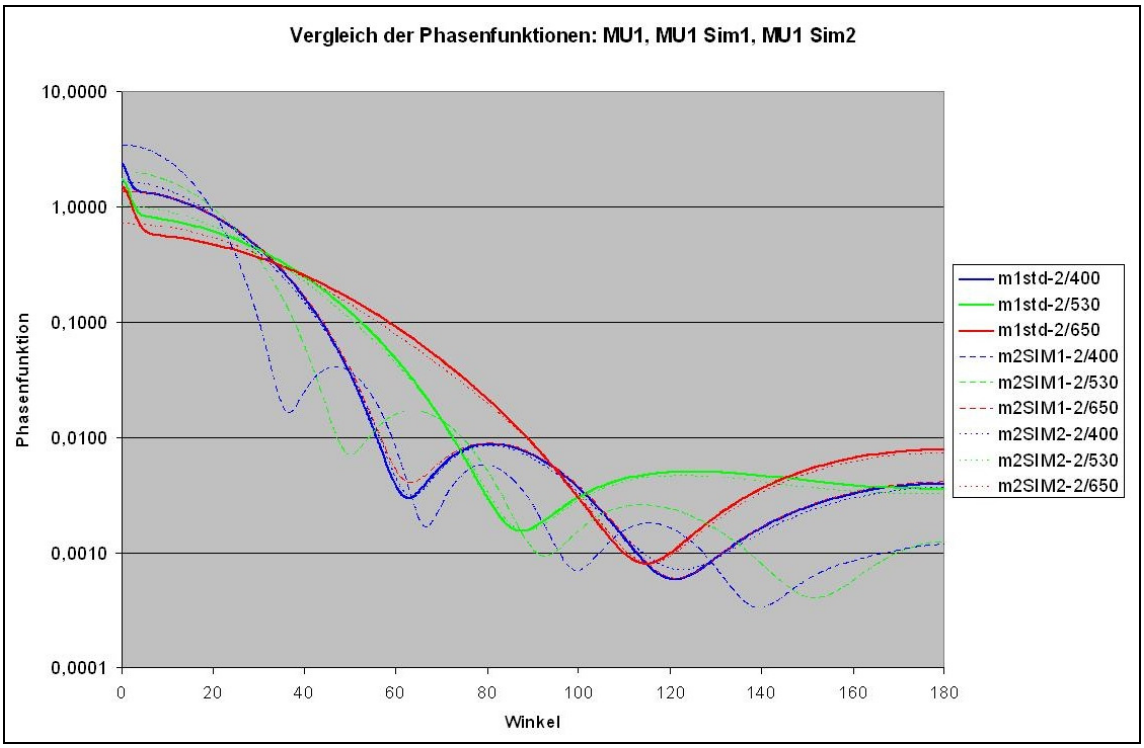


Abbildung 206: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α), SIM1 (m2SIM1-α), SIM2 (m2SIM2-α)

Legende: **xxxxx-α/nm, α = Lichteinfall, nm =** Wellenlänge
m1std: Experimentdaten
m2SIM1: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment
m2SIM2: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

Im kurzen Wellenlängenbereich zeigt sich für diese Simulation in der Phasenfunktion eine stärkere Vorwärtsstreuung, als im Experiment.

7.4.2.1.2 Phasenfunktion - Vergleich MU1 Experiment mit Simulation 2

In der Simulation m2SIM2- α wurde die Partikeldichteverteilung des Experiments so geändert, dass kugelförmige Teilchen mit Durchmesser 0,6 µm in größerer Anzahl, die aber nur ein Zehntel der der grießartigen Partikel ausmacht, simuliert wurden. In der simulierten Phasenfunktion wurde dadurch der starke Peak der Vorwärtsstreuung, der durch Partikel in der Größe von 1 – 9 µm in Make Up 1 zustande kam, abgedämpft. Ansonsten folgt sie der Phasenfunktion des Experiments, da die Partikeldichteverteilung zu Gunsten der grießartigen Partikel gestaltet ist (siehe Abbildung 206).

7.4.2.2 Simulationen mit neuer Brechzahl

7.4.2.2.1 Phasenfunktion des Experiment mit neuer Brechzahl

Die Phasenfunktionen für das Make Up 1 ändern sich wesentlich, wenn man bei der Berechnung mit wb4.exe die für die Simulationen gewählte Brechzahl (Re (n) = 2, Im (n) = 0,1) wählt. Die Funktionen der Simulation (strichlierte Linien, m2std- αx) in Abbildung 207 zeigen einen strukturierteren Verlauf, als die Originalwerte für die Phasenfunktion des Make Up 1 (durchgezogene Linien). Der starke Peak der Vorwärtsstreuung wird etwas abgedämpft, weil die Streuung der großen Partikel an Einfluss verliert, die Funktion ist bei den anderen Winkeln im Vergleich zu den Experimentwerten angehoben.

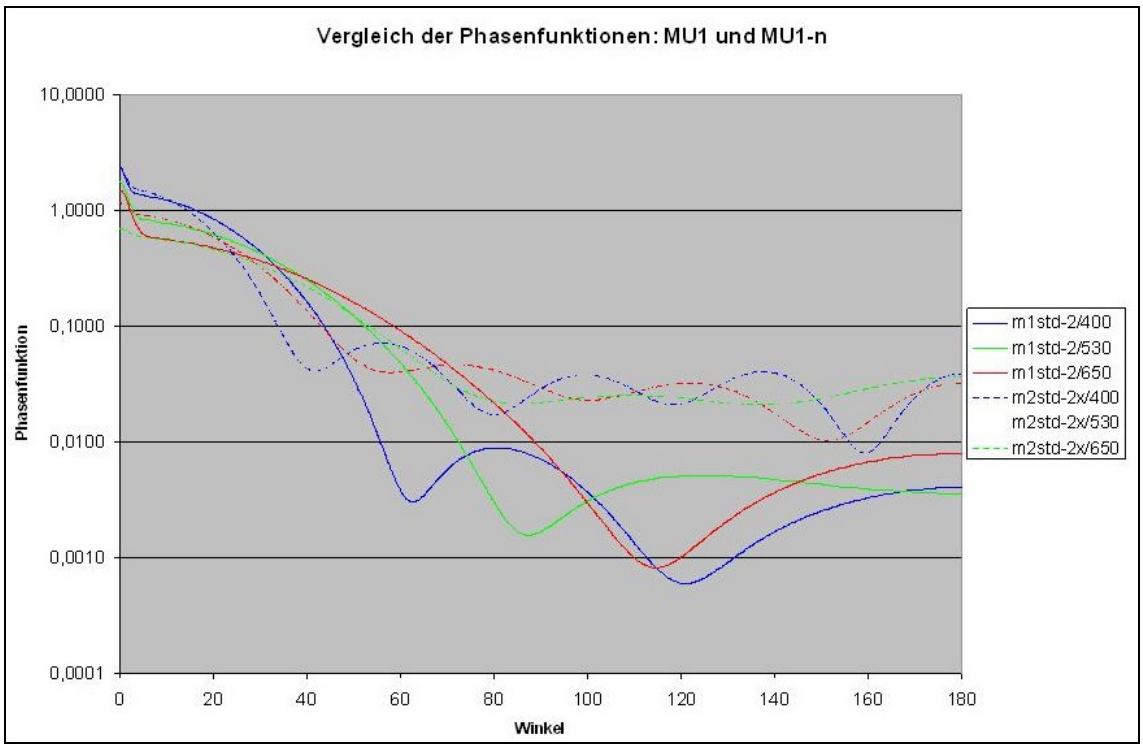


Abbildung 207: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α) und MU1-n (m2std- αx)

Legende: **xxxxx-α/nm, α = Lichteinfall, nm =** Wellenlänge, **αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl**
m1std: Experimentdaten
m2std: Experimentdaten, geänderte Brechzahl
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.2.2.2 Phasenfunktion Simulation 1 mit neuer Brechzahl

Abbildung 208 zeigt die Phasenfunktionen des Experiments (durchgezogene Linie, m1std-α), der Simulation mit der Experimentbrechzahl (gepunktete Linie) und der Simulation mit der neu gewählten Brechzahl (Re (n) = 2, Im (n) = 0,1, strichlierte Linie). Letztere zeigt einen strukturierteren Verlauf der Phasenfunktion für die einzelnen Wellenlängen. Ab einem Winkel von 60° sind sie weiter auseinander gespreizt.

Beide Simulationen zeigen im kurzen Wellenlängenbereich eine erhöhte Vorwärtsstreuung.

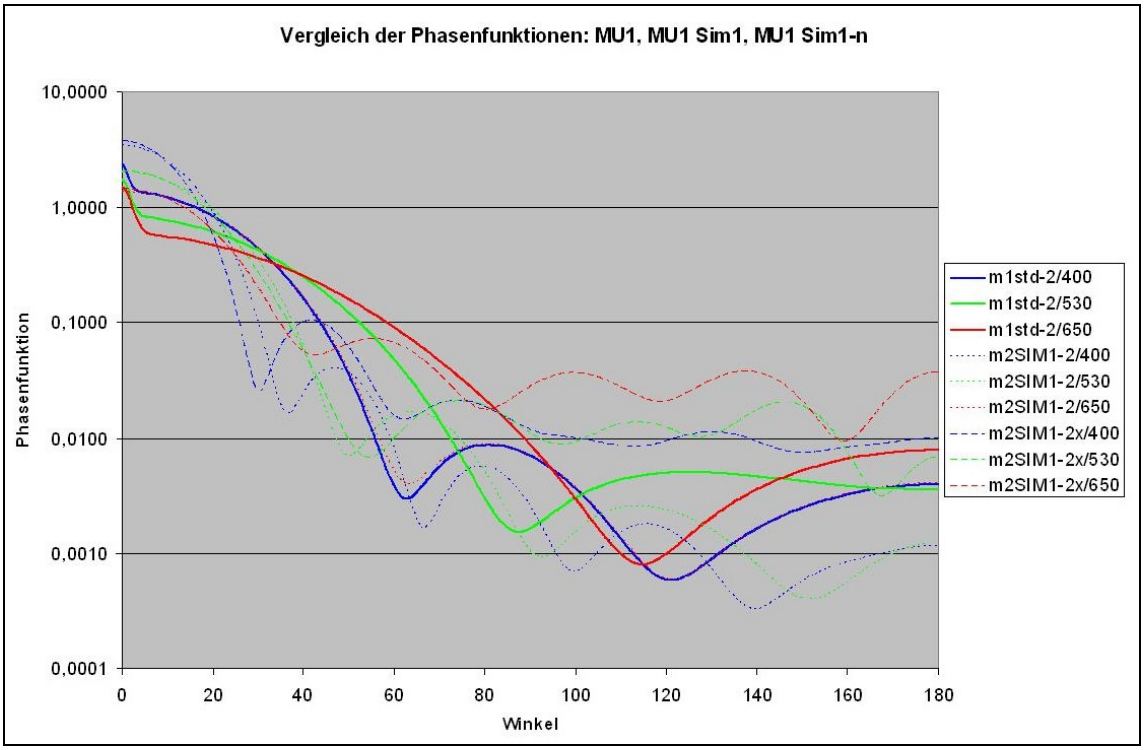


Abbildung 208: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α), SIM1 (m2SIM1-α), SIM1-n (m2SIM1-αx)

Legende: **xxxxx-α/nm, α = Lichteinfall, nm =** Wellenlänge, **αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl**
m1std: Experimentdaten
m2SIM1: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment
m2SIM1-αx: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.2.2.3 Phasenfunktion Simulation 2 mit neuer Brechzahl

Durch die Änderung der Brechzahl auf den neuen Wert (Re (n) = 2, Im (n) = 0,1) kommt es in Simulation 2 (m2SIM2-αx) zu einer Anhebung der Phasenfunktion (siehe Abbildung 209). Die Funktionen liegen für die betrachteten Wellenlängen näher beisammen und sind homogener gestaltet, als bei Berechnung mit der Brechzahl des Experiments. Dies führt zu einer deutlichen Änderung gegenüber der Phasenfunktion m2SIM2-α (ohne erhöhte Brechzahl), die wie in 7.4.2.1.2 weitestgehend der Originalphasenfunktion des Experiments folgt (punktierte Linien).

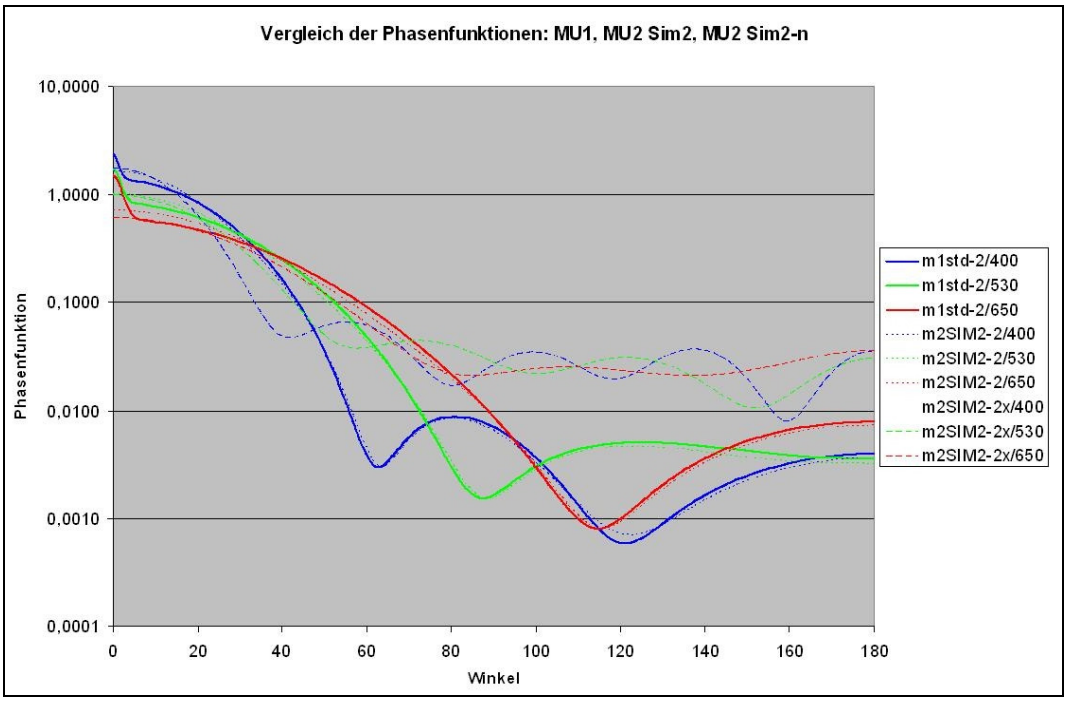


Abbildung 209: Phasenfunktionen MU1 (m1std-α), SIM2 (m2SIM2-α), SIM2-n (m2SIM2-αx)

Legende: **xxxxx-α/nm, α = Lichteinfall, nm =** Wellenlänge, **αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl**
m1std: Experimentdaten
m2SIM2: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment
m2SIM2- αx: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.2.2.4 Phasenfunktion Simulation 3, geänderte Partikelgrößen- und Partikeldichteverteilung, geänderte Brechzahl

Die Phasenfunktion für die in dieser Simulation gewählten Parameter (siehe Abbildung 210) zeigt einen glatteren, leicht angehobenen Verlauf. Der scharf abgegrenzte Peak der Vorwärtsstreuung beim Experiment wird abgeflacht.

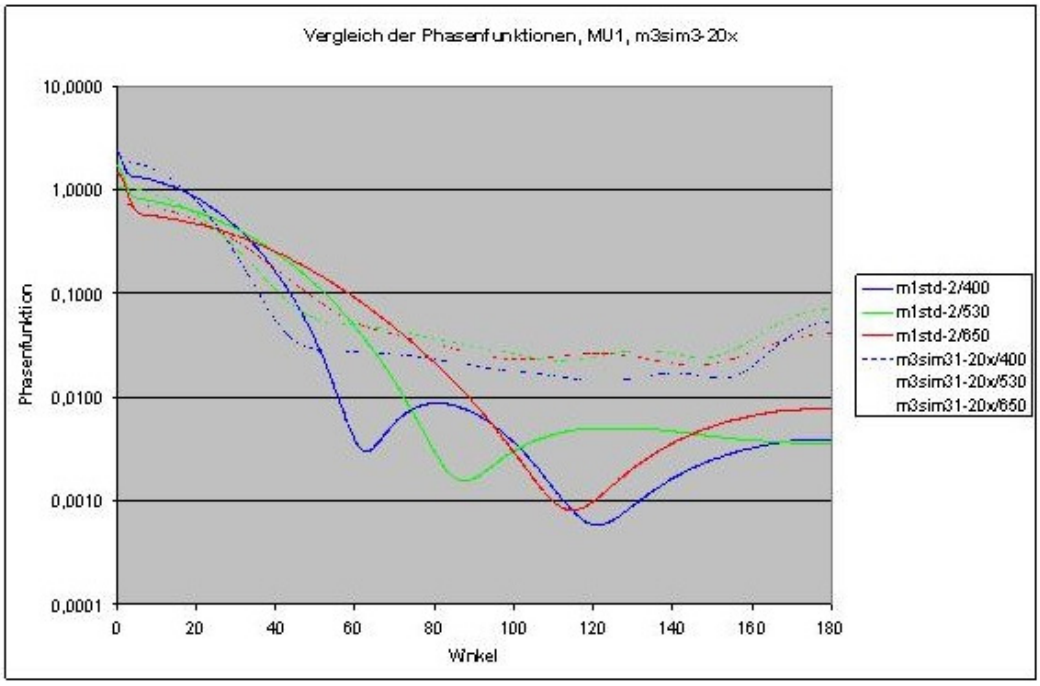


Abbildung 210: Phasenfunktion MU1 (m1std-α), SIM3-n (m3sim31- αx)

Legende: **xxxxx-α/nm, α = Lichteinfall, nm =** Wellenlänge, **αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl**
m1std: Experimentdaten
m3SIM3-αx: 7 gleich verteilte Partikelarten, höhere Brechzahl
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.3 Rückstreuung an der Oberfläche der simulierten Make Ups

7.4.3.1 Simulationen mit Brechzahl des modellierten Make Up 1

Die Berechnungen von DISORT für die verschiedenen Simulationen mit der für das modellierte Make Up gewählten Brechzahl (Re (n) = 1,2, Im (n) = 0,075) zeigt eine gleichmäßigere Verteilung der Rückstrahlung im sichtbaren Spektralbereich. Die Einzelergebnisse der Simulationen werden hier zunächst in derselben Form präsentiert, wie auch die Experimentdaten diskutiert wurden; anschließend folgen detailliertere Auswertungen.

7.4.3.1.1 Rückstreuung an der Oberfläche für Simulation 1

Abbildung 211 zeigt die Rückstrahlung von der Oberfläche des simulierten Make Up bei den Einstrahlungs- und Beobachtungswinkeln, die auch bei der Durchführung des Experiments in Seibersdorf untersucht wurden. Für das Bulk-Material (m2SIM1 bulk / α-β, strichlierte Linien) ergibt sich eine sanft linear mit der Wellenlänge ansteigende Kurve. Das Bulk–Material allein ist weniger hell, als das untersuchte Make Up (PET Make Up, dicke durchgezogene

Linien), ergäbe aber dem Kurvenverlauf nach, einen gleichmäßigeren und weniger roten Farbeindruck.

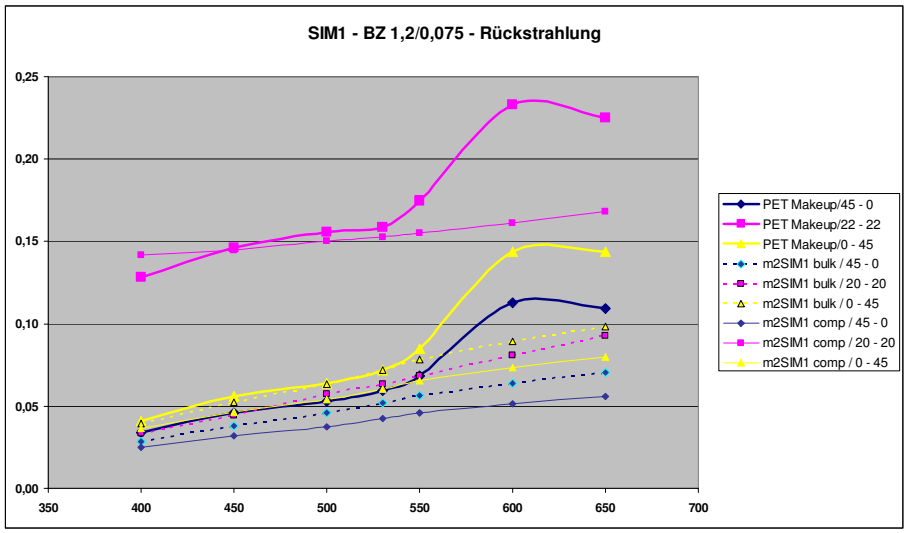


Abbildung 211: Rückstrahlung an Oberfläche für SIM1 (m2SIM1)

Legende: **PET Makeup/ xx-yy**, **xx** = Beleuchtungswinkel, **yy** = Messwinkel
PET Makeup: Messung mit der SDO
m2SIM1 bulk: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment, modellierte Werte Bulk
m2SIM1 comp: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment, modellierte Werte Composite
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

Eine Berücksichtigung der Spiegelschichten gemäß Gewichtung, wie in der Modellierung (m2SIM1 comp/ α-β, dünne durchgezogene Linien) senkt die Reflektivität des reinen Bulk–Materials ausgenommen am Glanzwinkel ab. Am Glanzwinkel wird die Reflektivität im roten Wellenlängenbereich gesenkt. Das simulierte Make Up erscheint weniger rötlich.

7.4.3.1.2 Rückstreuung an der Oberfläche für Simulation 2

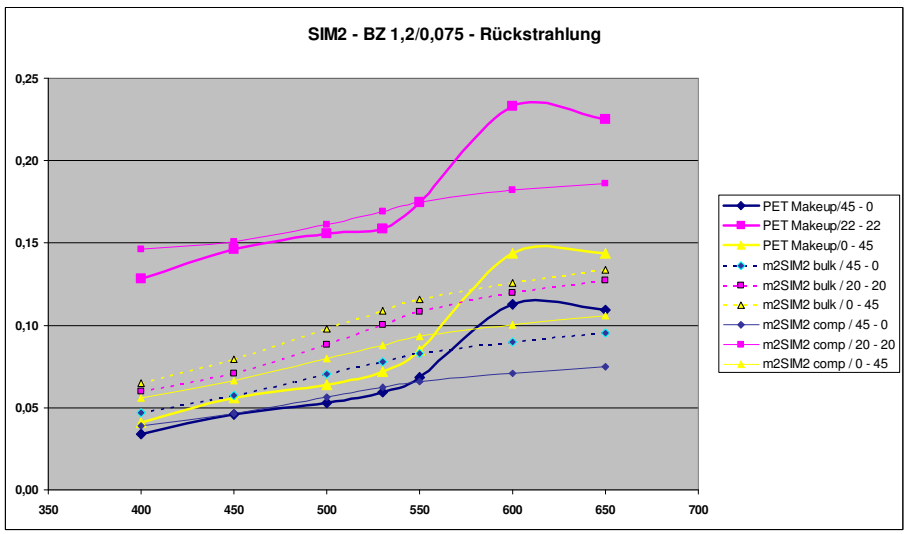


Abbildung 212: Rückstrahlung an Oberfläche für SIM2 (m2SIM2)

Legende: **PET Makeup/ xx-yy**, **xx** = Beleuchtungswinkel, **yy** = Messwinkel
PET Makeup: Messung mit der SDO
m2SIM2 bulk: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment, modellierte Werte Bulk
m2SIM2 comp: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment, modellierte Werte Composite
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

Die Rückstreuung an der Oberfläche für die Simulation 2 mit der Brechzahl des Original Make Up ist in Abbildung 212 dargestellt. Hier zeigt das Bulk–Material (m2SIM2 bulk/ α-β, strichlierte Linien) bei allen Einstrahlungs– und Betrachtungswinkeln eine höhere und gleichmäßigere Reflektivität. Es ergäbe einen helleren und gleichmäßigeren rötlichen Farbeindruck als das modellierte Make Up 1 (PET Make up, dicke durchgezogene Linien). Die zusätzliche Berücksichtigung der Spiegelteilchen senkt die Reflektivität, da das im Make Up gestreute Licht zusätzlich in verschieden Richtungen abgelenkt wird. Die Spiegelteilchen erhöhen erwartungsgemäß die Reflektivität am Glanzwinkel (m2SIM2 comp/ α-β dünne durchgezogene rosa Linie).

7.4.3.2 Simulationen mit neuer Brechzahl

7.4.3.2.1 Rückstreuung bei Simulation des Experiments mit geänderter Brechzahl

Das mit höherer Brechzahl simulierte Make Up zeigt für das Bulk–Material (siehe Abbildung 213, m2stdX bulk / α-β, strichlierte Linien) eine Erhöhung der Reflektivität bei 450 nm am Glanzwinkel. Dies ist bemerkenswert insofern im Bulk–Material bisher keine spiegelnden Reflexionen beobachtbar waren (zur Erklärung dazu siehe 0). An den anderen Winkeln ist die Reflektivität des Bulk-Materials höher, als die von m2SIM1 und m2SIM2 mit Brechzahl Re (n) = 1,2 und Im (n)= 0,075. Das Bulk–Material allein müsste einen helleren, ausgewogeneren Farbeindruck beim Beobachter hinterlassen (weißlich bis zart rosa), da der Anstieg in Richtung längere Wellenlängen sehr gering ist. Am Glanzwinkel schimmert das simulierte Make up blau–grünlich.

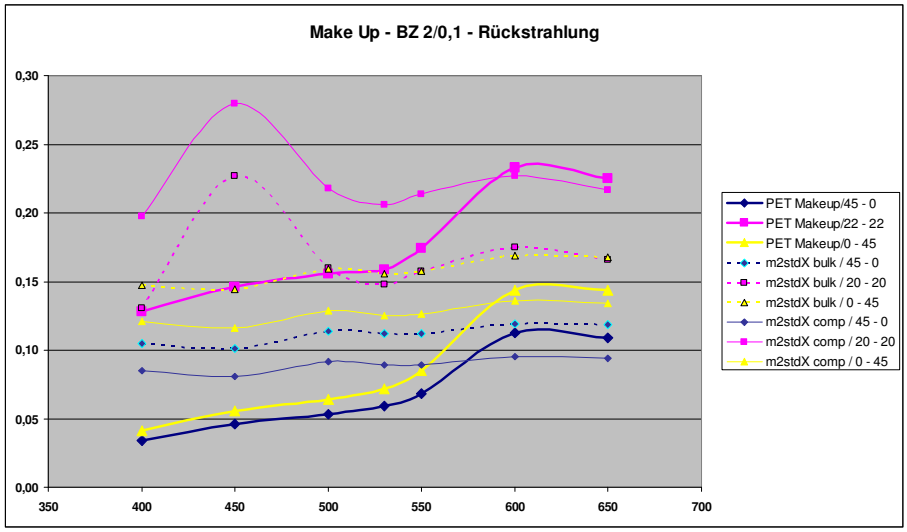


Abbildung 213: Rückstrahlung Make Up mit neuer Brechzahl (m2stdX)

Legende: **PET Makeup/ xx-yy**, **xx** = Beleuchtungswinkel, **yy** = Messwinkel
PET Makeup: Messung mit der SDO
m2stdX bulk: 7 Partikelarten - Experiment, höhere Brechzahl, modellierte Werte Bulk
m2stdX comp: 7 Partikelarten - Experiment, höhere Brechzahl, modellierte Werte Composite
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

Die Spiegelteilchen (m2stdX comp/ α-β, dünne durchgezogene Linien) senken die Reflektivität für alle Wellenlängen bei allen Beobachtungswinkeln, außer am Glanzwinkel (20 – 20). Derselbe Effekt zeigt sich für alle anderen Glanzwinkeln (45 – 45, 0 - 0) und wird nicht gesondert dargestellt.

7.4.3.2.2 Simulation 1 mit geänderter Brechzahl

Das Bulk–Material (siehe Abbildung 214, m2SIM1X bulk / α-β, strichlierte Linien) zeigt eine Erhöhung der Reflektivität bei höheren Wellenlängen und insbesondere am Glanzwinkel bei 600 nm. Das Bulk–Material allein würde einen weniger hellen und rötlicheren Gesamteindruck (Steigung in Richtung lange Wellenlängen höher), als das simulierte Make Up mit höherer Brechzahl ergeben (m2stdX). Die Spiegelteilchen senken die Reflektivität bei allen Einstrahlungs– und Beobachtungswinkeln, außer am Glanzwinkel. Das in m2SIM1X comp / α-β (durchgezogene dünne Linien in Abbildung 214) simulierte Make Up würde außer am Glanzwinkel einen ausgewogenen, rötlichen Farbeindruck hinterlassen. Am Glanzwinkel ergibt sich ein rötlicher Schimmer.

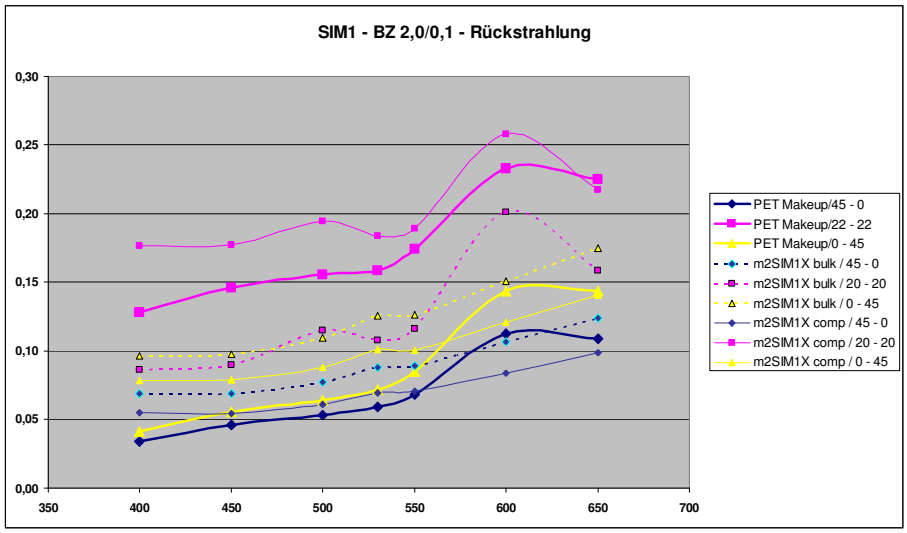


Abbildung 214: Rückstrahlung SIM1 mit Brechzahl 2,0/0,1 (m2SIM1X)

Legende: **PET Makeup/ xx-yy**, **xx** = Beleuchtungswinkel, **yy** = Messwinkel
PET Makeup: Messung mit der SDO
m2SIM1X bulk: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl, modellierte Werte Bulk
m2SIM1X comp: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl, modellierte Werte Composite
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.3.2.3 Simulation 2 mit geänderter Brechzahl

Für die zweite Simulation ergibt sich ein Anstieg der Reflektivität für das Bulk–Material (siehe Abbildung 215, m2SIM2X bulk/ 20 – 20, strichlierte Linien) am Glanzwinkel (20 – 20). Die Reflektivität wird am Glanzwinkel durch Mitberücksichtigung der Spiegelteilchen noch zusätzlich erhöht (m2SIM2X comp/ 20 – 20, durchgezogene dünne Linien). An den anderen Winkeln ergibt sich für das Bulk–Material ein ausgewogener, heller Farbeindruck.

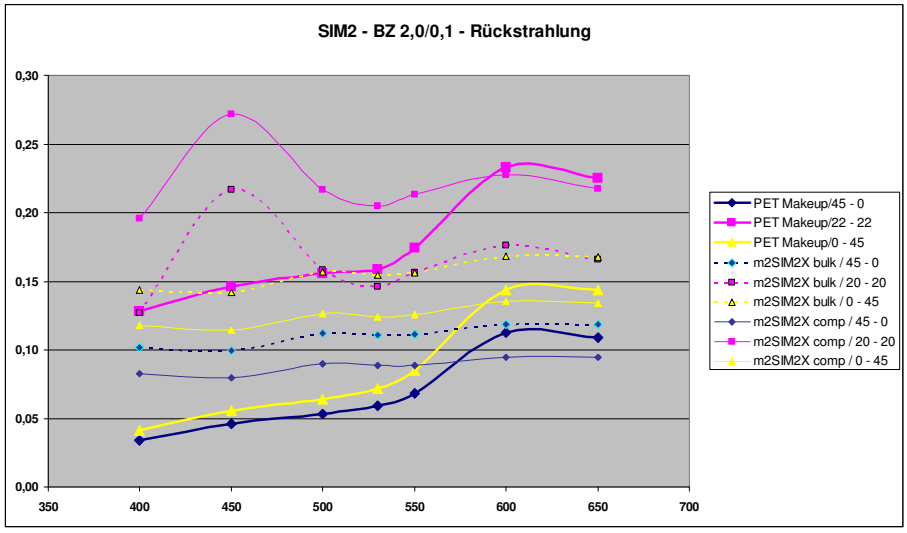


Abbildung 215: Rückstrahlung SIM2 mit Brechzahl 2,0/0,1 (m2SIM2X)

Legende: **PET Makeup/ xx-yy**, **xx** = Beleuchtungswinkel, **yy** = Messwinkel
PET Makeup: Messung mit der SDO
m2SIM2X bulk: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl, modellierte Werte Bulk
m2SIM2X comp: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl, modellierte Werte Composite
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.3.2.4 Simulation 3

Die Simulation mit den mengenmäßig gleichverteilten Partikeln wurde durchgeführt, um herauszufinden, welcher Effekt dem Anstieg der Reflektivität des Bulk–Materials bei gewissen Wellenlängen zu Grunde liegt. Sie wird in Abschnitt 7.4.4.1 näher besprochen.

7.4.4 Flüsse in einer optischen Dicke von 0,25

DISORT ermöglicht es, die Flüsse in verschiedenen optischen Dicken auszugeben. Verschiedene interessante Flussverteilungen werden hier an Hand von Diagrammen verglichen. In allen Diagrammen wurde eine optische Tiefe von 0,25 gewählt, obwohl die Rückstrahlung der Oberfläche der bestimmende Faktor ist. Allerdings liegt unmittelbar an der Materialoberfläche noch kein diffuser nach unten gerichteter Fluss vor, sodass zur Abbildung desselben eine geringfügig tiefer liegende Schicht zu wählen ist (zur tiefenabhängigen Flussverteilung siehe Abbildung 198).

7.4.4.1 Modelliertes Experiment und simuliertes Experiment mit höherer Brechzahl

In Abbildung 216 sind die Flüsse in 0,25 optischer Dicke für das modellierte Experiment (m1std) bei 450 nm dargestellt. Für den Einstrahlungswinkel (polar 20° und azimutal 50°) zeigt sich ein scharf begrenzter nach unten gerichteter diffuser Fluss (polar 160° und azimutal 50°). Ebenfalls deutlich erkennbar ist die bereits weitgehend isotrope Rückstreuung (diffuser Aufwärtsfluss, Polarwinkel zwischen 0° und ~70°). Die geringe Flusserhöhung bei polar 70° und azimutal 50° ist auf stärkere Rückstreuung längs der Strahleintrittsrichtung zurückzuführen. Die gerade Linie der Azimutalwinkeln bei 0° polar zeigt den „Nordpol“ der polaren Darstellung an.

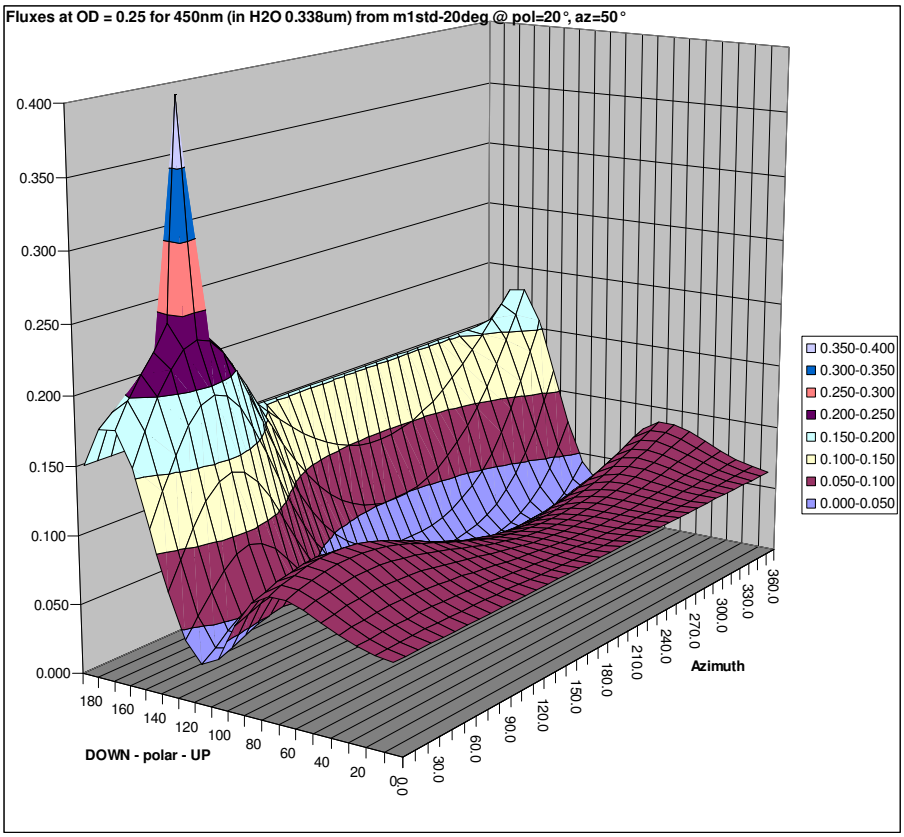


Abbildung 216: Flussverteilung für das modellierte Experiment, 450 nm, in OD = 0,25

Legende: **m1std-20deg@ pol=20°, az=50°, OD = 0,25, λ=450nm**
modelliertes Experiment, Lichteinfall unter 20° polar, 50° azimutal

Abbildung 217 zeigt die sich ergebenden Flüsse für eine Wellenlänge von 600 nm. Der diffuse Fluss nach unten ist in diesem Fall niedriger, als vorher bei 450 nm. Der rückgestrahlte diffuse Aufwärtsfluss erreicht einen Wert von 0,15 – 0,20 und führt zu stärkerer Emission an der Oberfläche als bei 450 nm (rötlicher Eindruck).

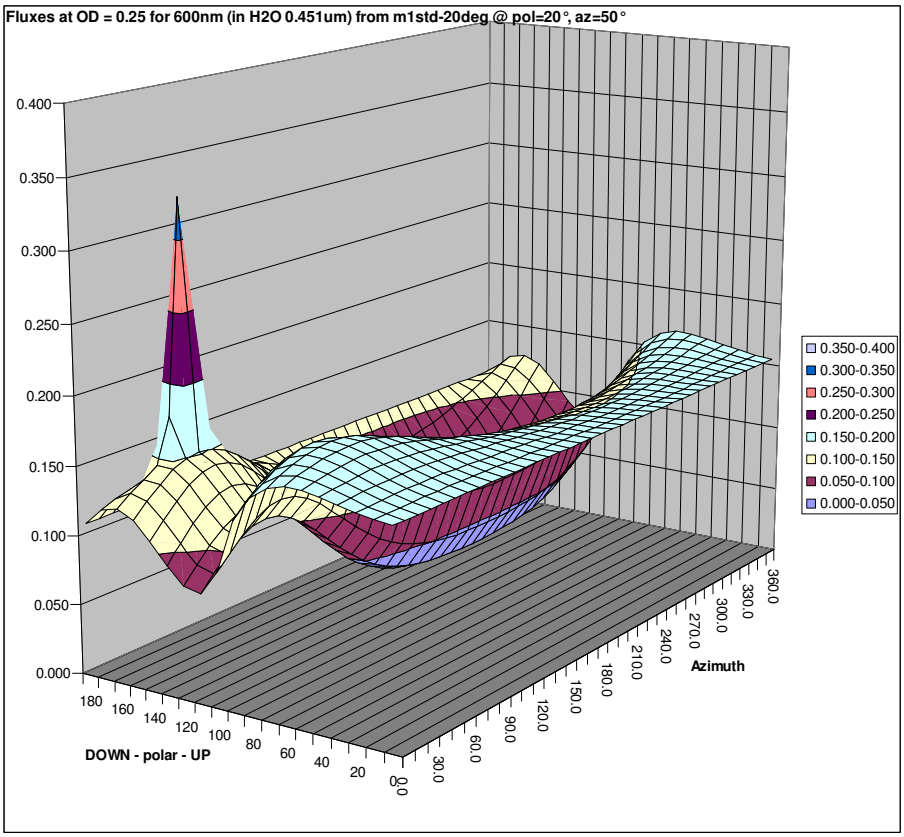


Abbildung 217: Flussverteilung odelliertes Experiment, 600 nm, diffuser Fluss in OD = 0,25

Legende: **m1std-20deg@ pol=20°, az=50°, OD = 0,25, λ=600nm**
modelliertes Experiment, Lichteinfall unter 20° polar, 50° azimutal

Das mit der höheren Brechzahl (Re (n) = 2,0 und Im (n) = 0,1) simulierte Make Up (m2std-20X) zeigt beim Einstrahlungswinkel (polar 20° und azimutal 50°) für 450 nm einen etwas geringeren diffusen Fluss nach unten (siehe Abbildung 218) als das modellierte Experiment. In der Aufwärtsrichtung (polar 0°) sind die aus der Phasenfunktion zu erwartenden erhöhten Rückstreuungen klar erkennbar. Bei polar 20° azimutal 230° kommt es für diese Brechzahl und diese Wellenlänge zu deutlich spiegelnder Reflexion, auf die in Abschnitt 0 besonders eingegangen wird. Rückstreuungen aus dem Primärstrahl formen die breite Flussüberhöhung im Umfeld von polar 70° und azimutal 50°.

Abbildung 219 zeigt die Flussverhältnisse für die optische Dicke von 0,25 bei 600 nm. Der diffuse Fluss nach unten ist wesentlich geringer, er zerfließt und führt zu einem genauso großen Fluss nach oben. Es ist eine sehr geringe Zunahme des Flusses in Richtung spiegelnder Reflexion bei polar 20° azimutal 230° abzulesen. Der Anteil dieses Flusses sinkt mit zunehmenden optischen Dicken.

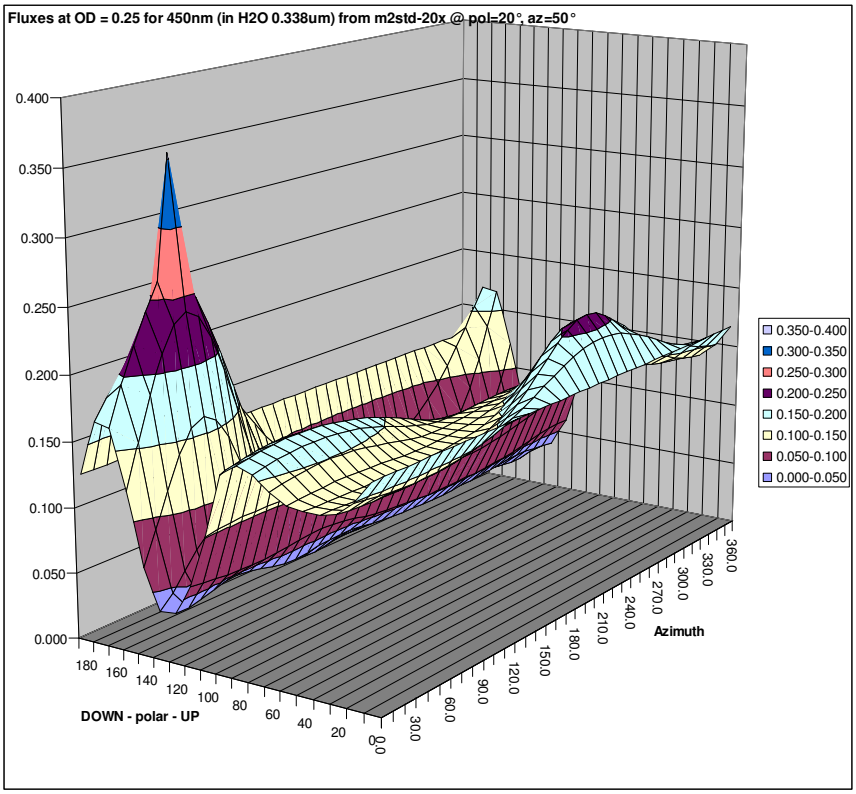


Abbildung 218: Diffuser Fluss des Experiments mit BZ = 2,0 / 0,1, 450 nm, in OD = 0,25

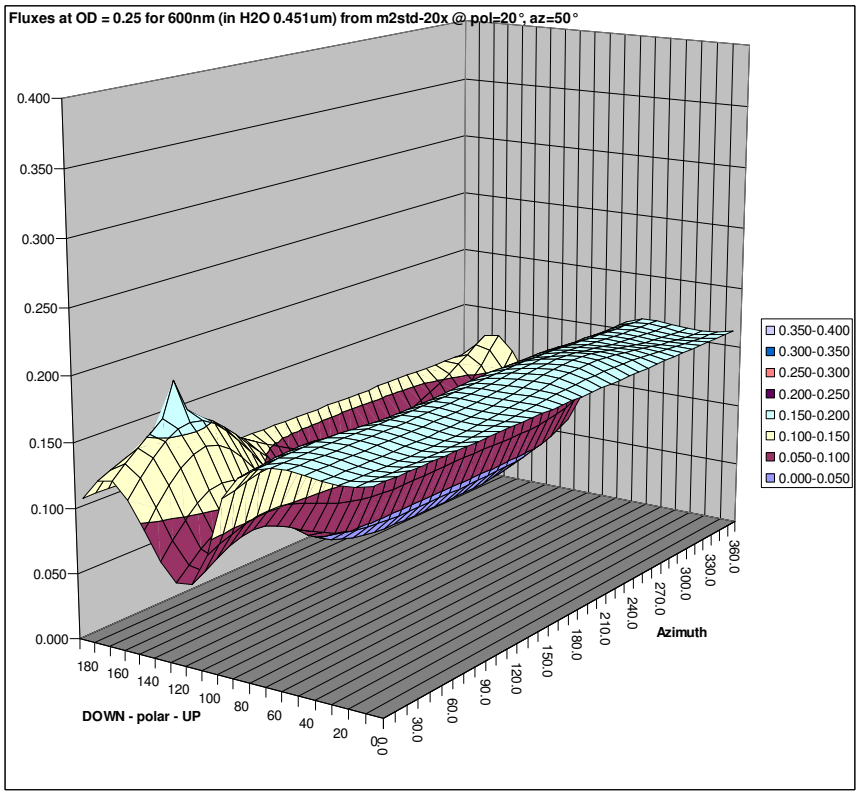


Abbildung 219: Diffuser Fluss des Experiment mit BZ = 2,0 / 0,1, 600 nm, in OD = 0,25

Legende: **m2std-20x@pol=20°,az=50°, OD= 0,25, nm, λ=450 bzw. 600 nm**
m2std-αx: Experimentdaten, geänderte Brechzahl
Lichteinfall 20° polar und azimutal 50°
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.4.2 Diffuser Fluss Simulation 1

Die Abbildungen unten zeigen die diffusen Flussverteilungen für Simulation 1 für die beiden berechneten Brechzahlen. Der diffuse Fluss nach unten läuft breit auseinander. Bei 600 nm kommt es zu einem erhöhten diffusen Fluss in Aufwärtsrichtung. Bei 600 nm und der höheren Brechzahl kommt es am Glanzwinkel zu deutlich spiegelnder Reflexion.

Vergleich Simulation 1 mit verschiedenen Brechzahlen bei 450 nm

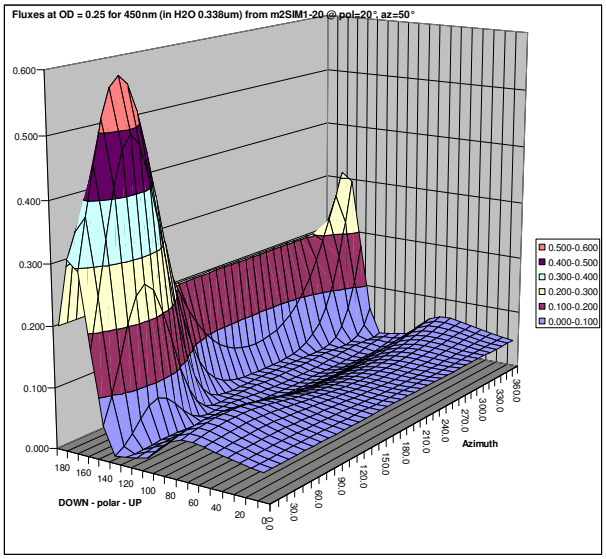


Abbildung 220: SIM1, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm

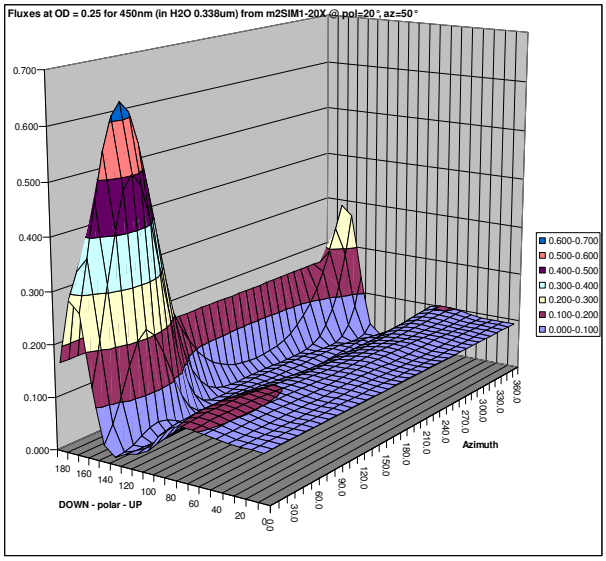


Abbildung 221: SIM1x, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm

Vergleich Simulation 1 mit verschiedenen Brechzahlen bei 600 nm

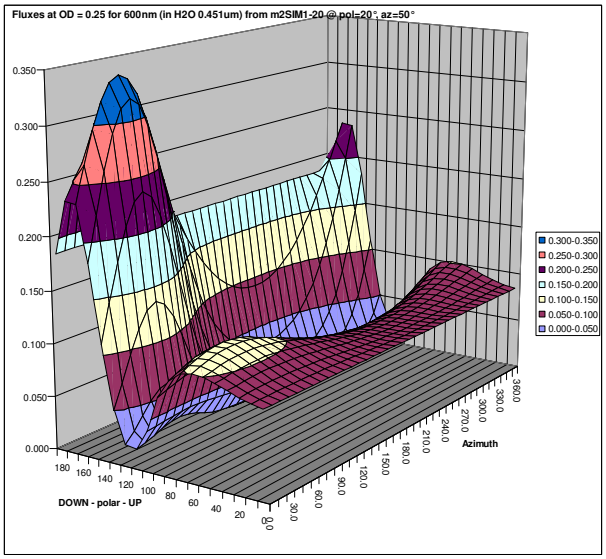


Abbildung 222: SIM1, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm

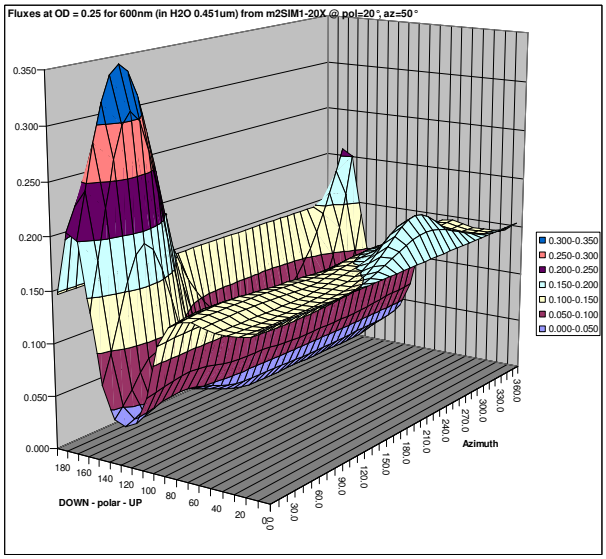


Abbildung 223: SIM1x, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm

Legende: **m2SIM1-aa: aa - α = Lichteinfall, αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl, λ= 450 bzw. 600 nm**
m2SIM1-α: SIM1: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment
m2SIM1-αx: SIM1x: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl
Lichteinfall 20° polar, 50° azimutal, OD = 0,25
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.4.3 Diffuser Fluss Simulation 2

Die diffusen Flüsse in Simulation 2 zeigen ebenfalls einen vom Einstrahlungswinkel her stark auseinanderlaufenden Fluss in Richtung unten und bei der höheren Brechzahl (Diagramme rechts) markante Rückstreueffekte. Die starke Variation (Austrittswinkel, Wellenlänge) der Strahlungsflüsse an der Oberfläche wird aufgrund der Gesamtflussverteilung im Material verständlich, insbesondere der bei 600 nm deutlich stärker ausgeprägte Aufwärtsfluss wie auch die bei 450 nm auftretende spiegelnde Reflexion beim Glanzwinkel.

Vergleich Simulation 2 mit verschiedenen Brechzahlen bei 450 nm

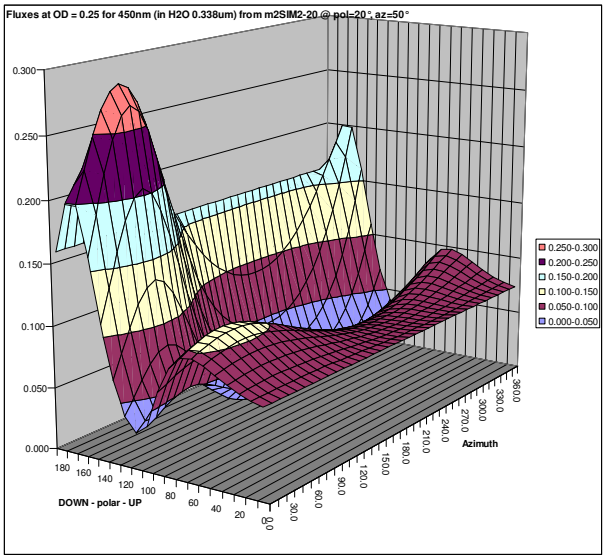


Abbildung 224: SIM2, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm

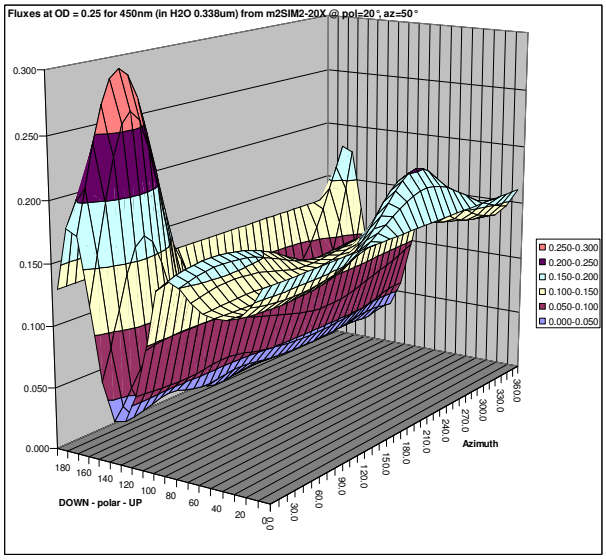


Abbildung 225: SIM2x, diffuser Fluss OD=0,25, 450 nm

Vergleich Simulation 2 mit verschiedenen Brechzahlen bei 600 nm

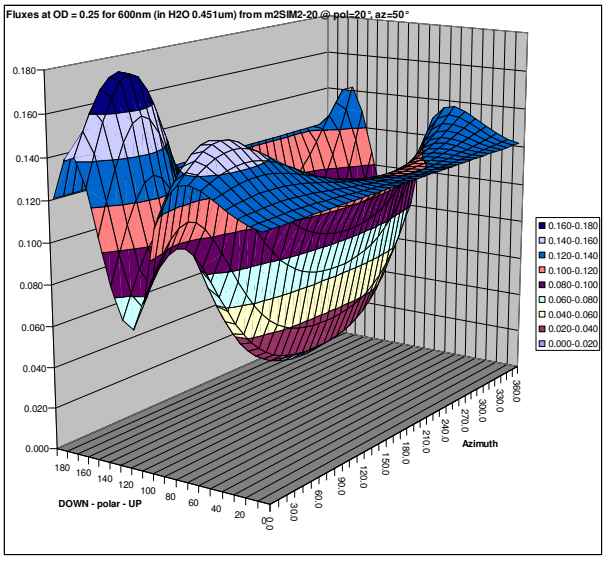


Abbildung 226: SIM2, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm

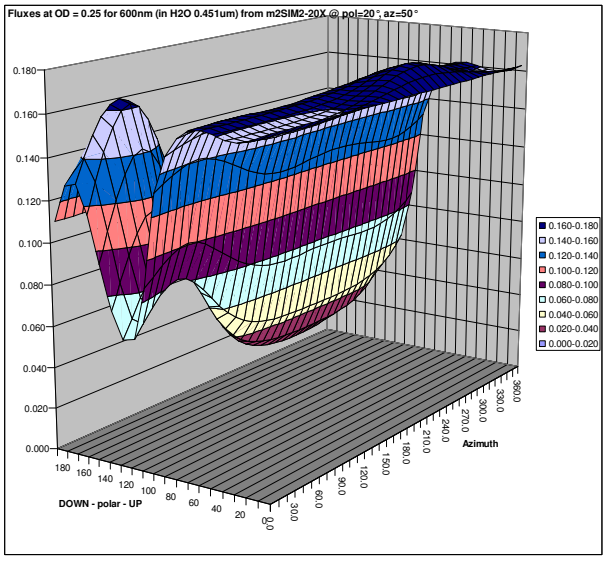


Abbildung 227: SIM2x, diffuser Fluss OD=0,25, 600 nm

Legende: **m2SIM2-aa: aa - α = Lichteinfall, αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl; λ= 450 bzw. 600 nm**
m2SIM2-α: SIM2: 2 Partikelarten, Brechzahl Experiment
m2SIM2-αx: SIM2x: 2 Partikelarten, höhere Brechzahl
Lichteinfall 20° polar, 50° azimutal, OD=0,25
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

Abbildung 228 und Abbildung 229 stellen Detailinformationen zu Abbildung 225 dar und zeigen Flussgrößen entlang der Schnittlinien gewählter Azimutalwinkel. Der nach unten gerichtete diffuse Fluss ist als breiter Peak bei 50° azimutal und polar 160° zu erkennen. Der aufwärts gerichtete rückgestreute Fluss ist für das Plateau zwischen polar 0° und 80° für fast alle Azimutalwinkel gut erkennbar, die spiegelnde Reflexion hat erwartungsgemäß ihr Maximum bei polar 20° und azimutal 230°.

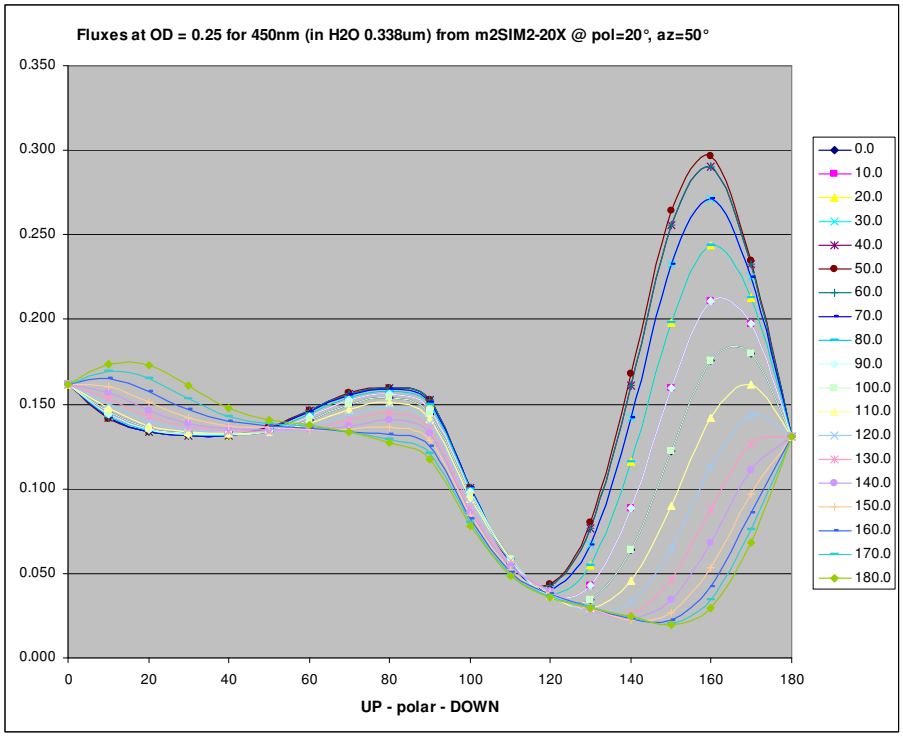


Abbildung 228: Azimutale Schnitte der Flussverteilung SIM2X, 450 nm, in OD = 0,25

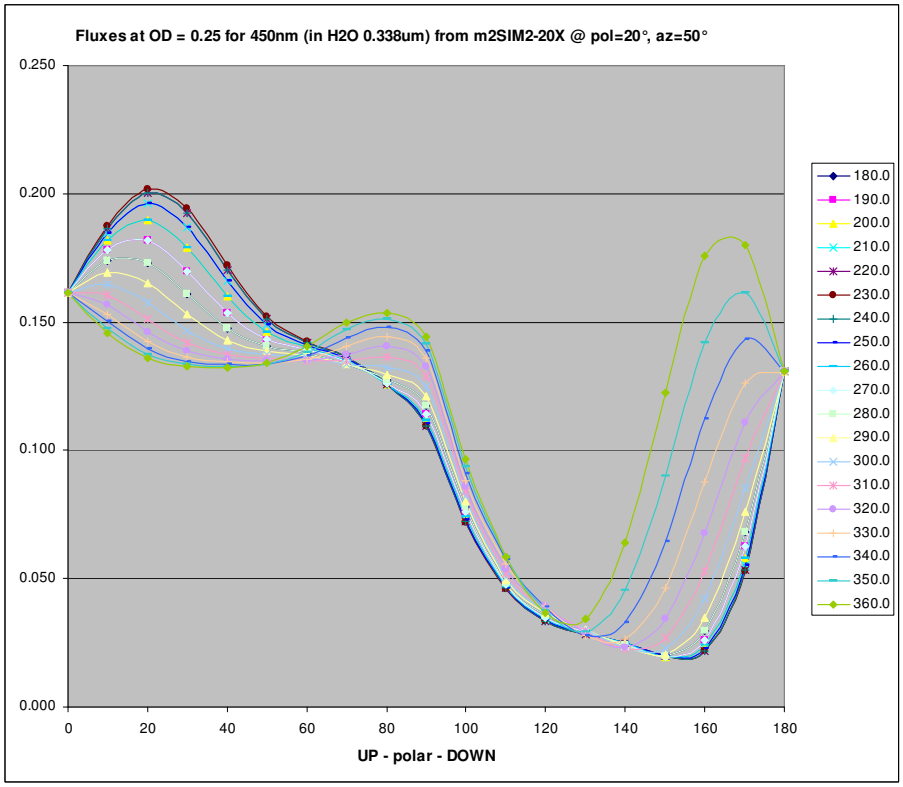


Abbildung 229: Azimutale Schnitte der Flussverteilung SIM2X, 450 nm, in OD = 0,25

7.4.4.4 Diffuser Fluss für Simulation 3

Die Simulation (m3SIM3-20X) mit gleichverteilter Partikelanzahl und Größe der Partikel entsprechend der betrachteten Lichtwellenlängen zeigt einen breit auseinanderfließenden Fluss nach unten. Abbildung 230 und Abbildung 231 zeigen die Verteilung der Flüsse für 450 nm und 600 nm. Bei polar 20° und azimutal 230° ist ein geringer Anstieg des zurück gestreuten Flusses am Glanzwinkel ablesbar.

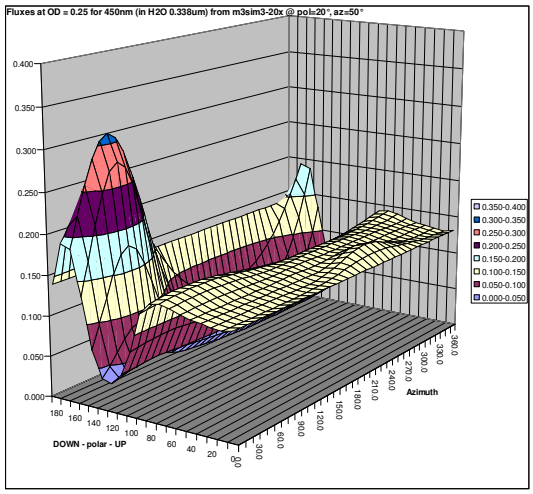


Abbildung 230: SIM3x diffuser Fluss in OD = 0,25, 450 nm

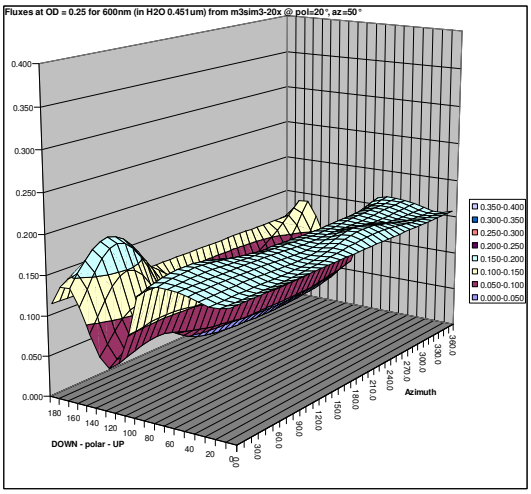


Abbildung 231: SIM3x diffuser Fluss in OD = 0,25, 600 nm

Legende: **m3SIM3-αx: αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl, λ= 450 bzw. 600 nm**
m3SIM3-αx: SIM3x: 7 Partikelgrößen des Experiments, gleichverteilt, höhere Brechzahl
Lichteinfall 20° polar, 50° azimutal
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

Auch für diese Simulation ist der nach unten gerichtete diffuse Fluss geringer für 600 nm (siehe Abbildung 231). Der zurück gestreute Fluss zeigt bei dieser Wellenlänge eine geringe Zunahme am Glanzwinkel.

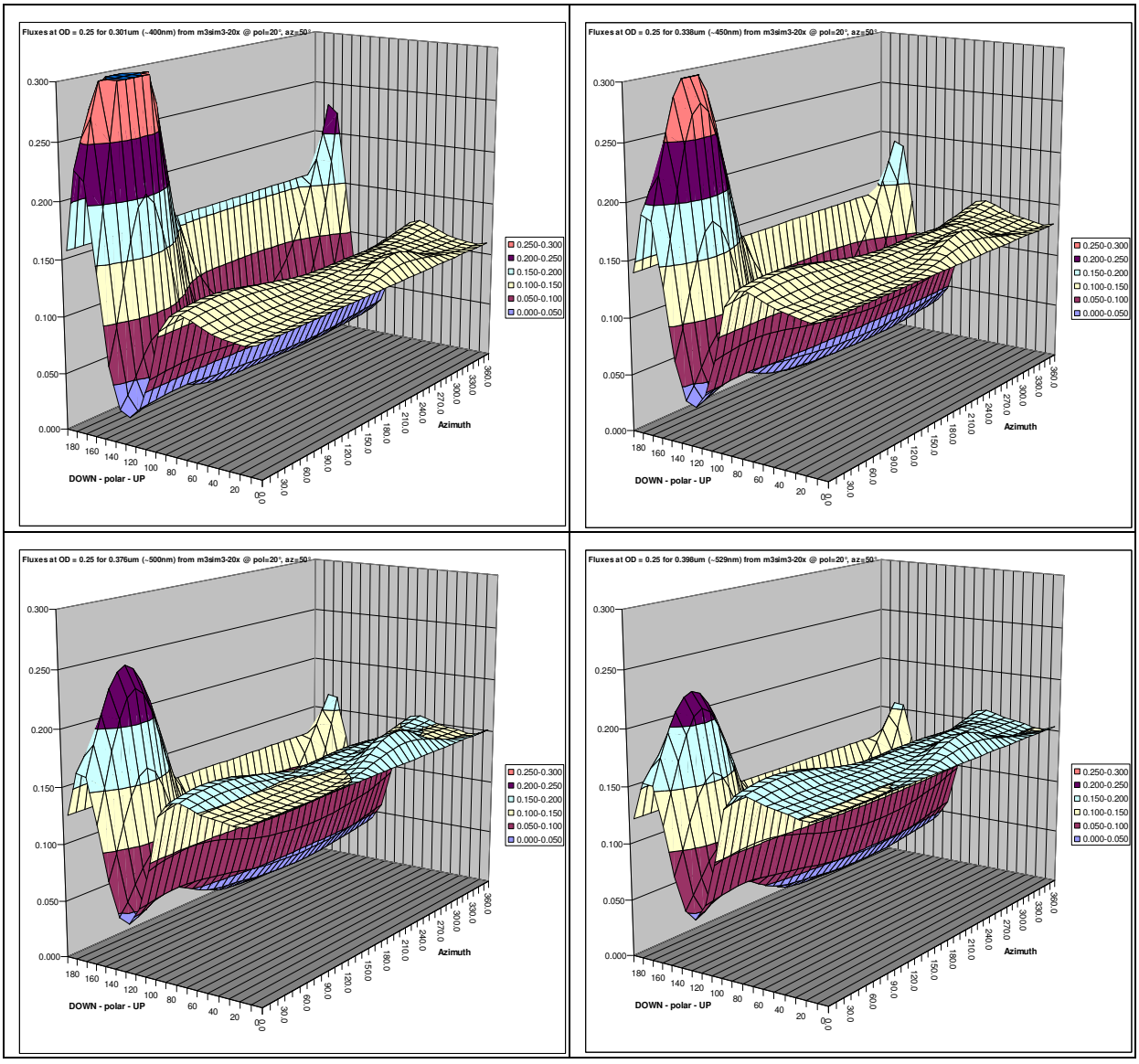
7.4.5 Schlussfolgerung aus den Simulationen

7.4.5.1 Diskussion der Ergebnisse

DISORT ist ein vereinfachtes Modell der Wechselwirkung (primär Streuverhalten) elektromagnetischer Strahlung mit einem planparallelen, mehrschichtigem Medium. Wesentliche das Medium charakterisierende Parameter werden dabei auf wenige physikalische Größen reduziert. Die streuenden Partikel werden durch ihre Phasenfunktion beschrieben, das Streuvermögen (im Verhältnis zur Absorption) durch die Single Scattering Albedo. Unterschiedliche Materialdichten werden in der optischen Dicke des Mediums subsummiert, die sich aus dem Extinktionskoeffizienten experimentell ableiten lässt. Die Phasenfunktion wird durch eine Reihenentwicklung in Legendrepolynome dargestellt, die in allen vorliegenden Fällen 200 Glieder zur Erreichung hinreichender Genauigkeit umfasst und extern ermittelt wird (mittels Programm wb4.exe). Für die Herleitung der Phasenfunktion nach Mie–Theorie werden Partikelgrößen und –dichten sowie Brechzahl der Partikel herangezogen. Die wichtigste Kenngröße ist dabei der Größenparameter, das Verhältnis von Partikeldurchmesser zu betrachteter

Lichtwellenlänge. In einem ersten Ansatz wurden die experimentell ermittelten Daten herangezogen um mittels DISORT eine geeignete Modellierung zu finden. Im zweiten Schritt wurden wesentliche Parameter gezielt verändert, um durch Simulation einen verbesserten Gesamteindruck des Make Up zu erzielen. Dabei konnten die beabsichtigten Steigerungen der Helligkeit bzw. spektral ausgewogeneren Farbeindrücke theoretisch erzielt werden, wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt.

Die nachfolgende Tabelle 78 legt dar, wie aus den simulierten Flussverteilungen für eine bestimmte Wellenlänge (in diesem Fall m3sim3-20x für Lichteinfallswinkel 20° und hohe Brechzahl) die spektrale Emission rekonstruiert wird. In der Diskussion wurde für Lichteinfall 20° stets der Glanzwinkel (Emission unter 20° polar und azimutal 230°) berücksichtigt. Die sieben Flussverteilungen (entsprechend den sieben Wellenlängen von 400 nm bis 650 nm) werden an der Oberfläche (OD = 0) für die jeweils gewünschte Flussrichtung ausgewertet und ergeben damit die ausgezogene Kurve im Diagramm. Unabhängig von der gewählten Darstellung in Anlehnung an die Diskussion der Experimentaldaten könnten weitere Informationen extrahiert werden (strichlierte/punktierte Kurven im Diagramm, Auswertungen z.B. für Beobachtung unter 0° bzw. 45°).



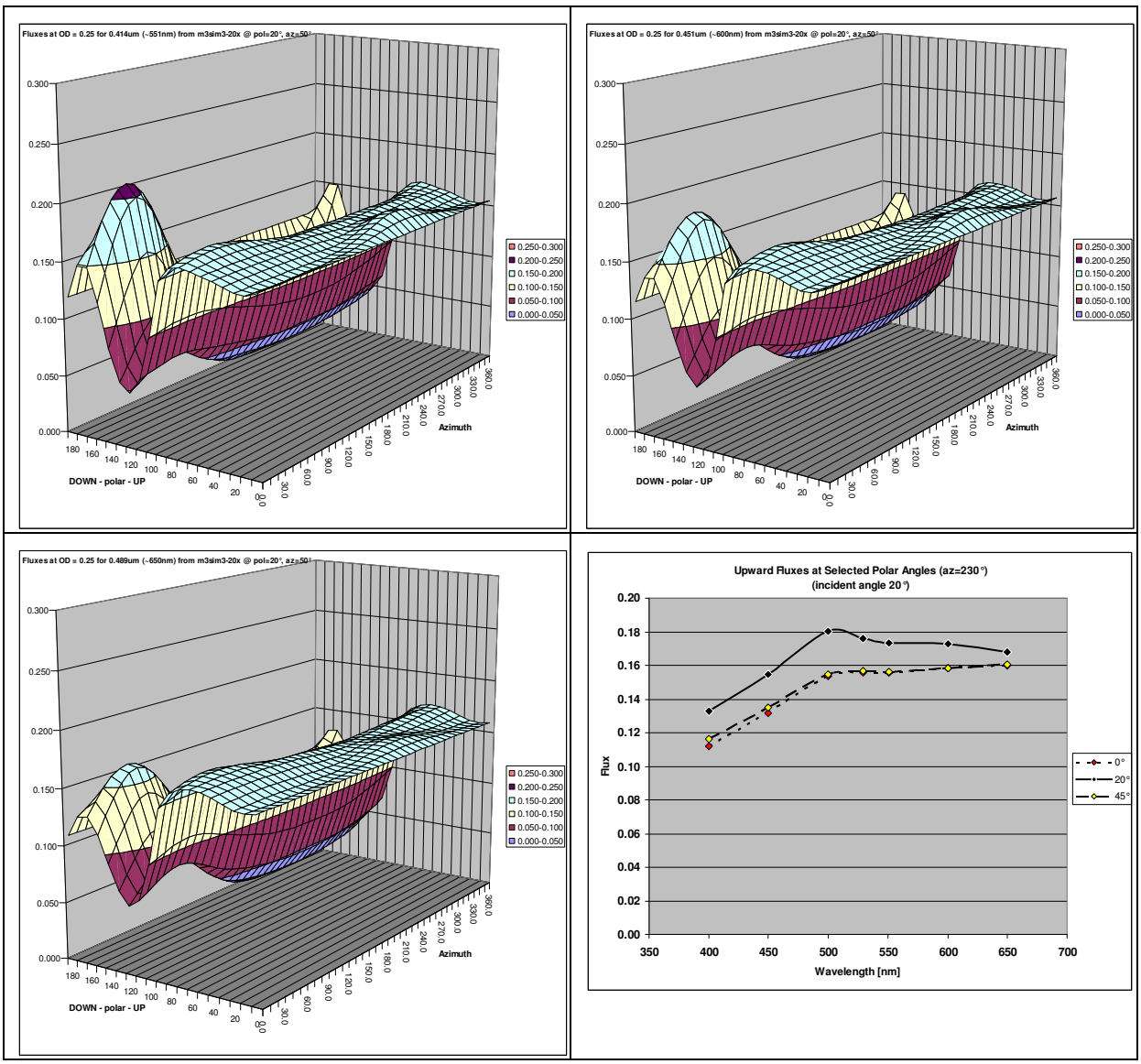


Tabelle 78: Flussverteilungen SIM3x, 20° polar, 50° azimutal

Legende: **m3SIM3-αx: αx = Lichteinfall, geänderte Brechzahl, λ= 450 bzw. 600 nm**
m3SIM3-αx: SIM3x: 7 Partikelgrößen des Experiments, gleichverteilt, höhere Brechzahl
Lichteinfall 20° polar, 50° azimutal
detaillierte Erklärung in Abschnitt 7.4.1.4.

7.4.5.2 Besonderheiten der Simulation

Im Gegensatz zur Volumenstreufunktion, die das Streuvermögen der Partikel sowohl betreffend absoluter Größe und Winkelabhängigkeit wiedergibt, beinhaltet die Phasenfunktion nur noch die winkelabhängige Komponente. In DISORT selbst wird diese in der Darstellung durch Legendrepolynome auf $g_0 = 1$ normiert (Koeffizient des Lengendrepolynoms nullter Ordnung stets 1). DISORT kann damit die einzelnen Beiträge unterschiedlicher Streupartikel nur unzureichend modellieren. Ihre Modellierung erfolgt über die optische Dicke und die Single Scattering Albedo.

DISORT ist als Simulationsprogramm nicht darauf ausgelegt, Grenzflächenphänomene zu modellieren (Übergang von Licht zwischen zwei Medien mit Reflexion und Brechung).Da aber die modellierten Streuphänomene als Wechselwirkung von Licht mit Materie den Max-

well'schen Gleichungen genügen müssen, um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen, ist auch eine prinzipielle Wiedergabe der z.B. durch die Fresnel'schen Gleichungen beschriebenen Grenzflächenphänomene zu erwarten, insbesondere die Modellierung eines Glanzeffekts (regelmäßige Reflexion).[404] Dieser Effekt ist bei Reflexionswinkeln unter 60° nicht sehr stark ausgeprägt (je nach Annahme der – komplexen – Brechzahl erst ab Re (n) > 2 beobachtbar – siehe Abbildung 232) und tritt in der Flussverteilung wahrnehmbar nur bei Partikeldurchmessern/Lichtwellenlänge ~ 1 auf. Eine Modellierung einer Partikelgrößenverteilung über den gesamten sichtbaren Spektralbereich führt daher durch Überlagerung der einzelnen Reflexionseffekte zu einer Anhebung der reflektierten Intensität über den gesamten Spektralbereich, wie beispielhaft in Simulation 3 durchgeführt (siehe 7.4.3.2.4).

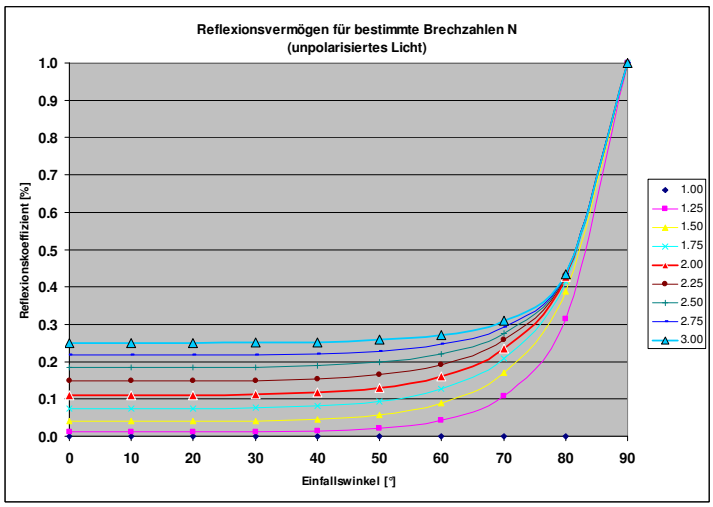


Abbildung 232: Reflexionsvermögen für bestimmte Brechzahlen laut Fresnel

Zur Verifizierung der Annahme spiegelnder Reflexion gemäß Fresnel durch das Bulk–Material wurde ein Test mit Einstrahlungswinkel 70° durchgeführt, wo gemäß Fresnel ein Reflexionsgrad von etwa 20% zu erwarten ist. Dieser „Glanzeffekt", bezogen auf den Primärstrahl, führt tatsächlich zu einer Flussanhebung in Richtung des reflektierten Strahls (70° ~ 80°) um grob 15% der Primärintensität (Primärfluss = 1 x cos(70°) = 0,342, Flussanhebung bei Polarwinkel 70° im Mittel 0,05 = 15% von 0,342, siehe Abbildung 233. Die Absenkung der Strahlungsflüsse in Richtung 20° und 45° ist durch die um cos(70°)/cos(20°)=0,36 grob auf ein Drittel reduzierte Einstrahlungsleistung zurückzuführen – vergleiche dazu Diagramm der spektralen Emission in Tabelle 78. Im Rahmen der vereinfachenden Näherungen dieses Modells darf dies als hinreichende Bestätigung der annähernd korrekten Wiedergabe der Grenzschichtphänomene, insbesondere Reflexion, angesehen werden, insbesondere weil die Verteilung der Streukörper mit Füllgraden im Prozentbereich kein kontinuierliches Medium konstanter Brechzahl darstellt.

404 Vgl. Zege (1991).

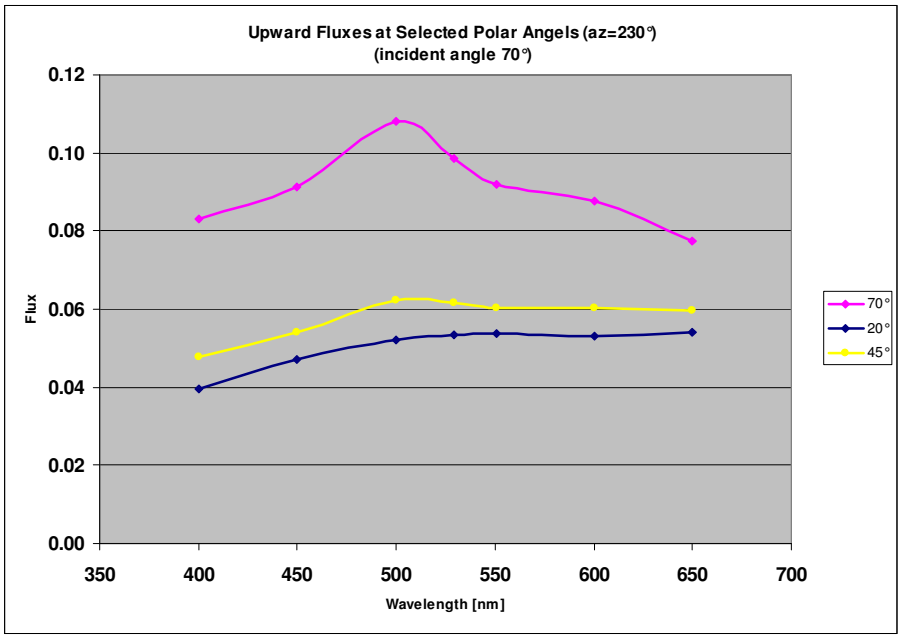


Abbildung 233: Emission für m3sim3x bei 70° Lichteinfall

7.5 Abschätzung der Messunsicherheiten

Zu den Messunsicherheiten, die für die Experimente mit dem Spektrophotometer abgeschätzt wurden (siehe Abschnitt 6.6) kommen noch diejenigen für die Messungen der Eingangsparameter der Modellierung.

Die Brechzahlmessung bei der Firma Mettler und die Dichtemessung sind mit statistischen Fehlern behaftet (siehe Abschnitt 7.2.6 und Abschnitt 7.2.7). Die nicht statistischen Fehler für die Brechzahlmessung tragen mit $1 \cdot 10^{-4}$ zur Messunsicherheit dieser Messungen bei.[405] Die Dichtemessung ist auf Grund von Temperaturschwankungen und dem unbekannten Wassergehalt von Glycerin mit ~ 20 % Messunsicherheit behaftet.

Für die Ermittlung des Absorptionskoeffizienten mit der integrierenden Platte wird in der Literatur in Bezug auf die Kalibrierung im Vergleich mit anderen Messmethoden ein Fehler von ± 20 % angegeben.[406]

Die Extinktionsmessung mit dem Langwegphotometer ist mit ~ 20 % Messunsicherheit behaftet (Streulicht, Filter, CCD, Messaufbau, Photomultiplier).

Die Zählung und Zuordnung der Partikel für die Volumenstreu– und Phasenfunktion aus den Elektronenmikroskopaufnahmen ist mit einer Unsicherheit von ~ 5 % behaftet (Zuordnung der Partikel in eine falsche Größenklasse).

Bei der Ermittlung der Phasenfunktion resultierten Messunsicherheiten aus dem Integrationsalgorithmus bei stark ausgeprägter Vorwärtsstreuung (diese wurden durch ein Intervall von 0,1° Winkelauflösung reduziert). Bei der Ermittlung der Koeffizienten der Legendrepolynome wurden Schwankungen durch Einsatz des Gaußschen Integrationsalgorithmus und Durchfüh-

[405] Quelle: Datenblatt Mettler Toledo RE40.
[406] Vgl. Horvath (1997).

rung der Reihenentwicklung bis zu 200 Gliedern gering gehalten, sodass insgesamt die Ungenauigkeit mit < 1% abgeschätzt werden kann. Für DISORT wird im Report eine Grundgenauigkeit von zumindest 2 – 3 signifikanten Stellen angegeben, was ebenfalls eine Unschärfe von etwa 1% nahelegt.[407]

Die Messunsicherheit, die dadurch auftritt, dass für die Vergleiche der Strahldichteoptikmessungen mit den Modellergebnissen die spektrale Strahldichte für sieben Messstützpunkte gemittelt werden musste, beträgt etwa ± 10 %.

Für die Modellierung sind keine fundierten Abschätzungen der Messunsicherheit möglich. Die Rechenergebnisse der verwendeten Programme waren stabil und die Unsicherheiten geringfügig, wie oben dargelegt. Der Einfluss von nicht im Modell erfassten Parametern lässt sich nach dem derzeitigen Wissensstand nicht abschätzen.

An dieser Stelle sei angemerkt dass das Ziel dieser Arbeit nicht primär in der Verfeinerung der spezifischen Messmethodik lag, sondern dass vielmehr ein interdisziplinärer Ansatz verfolgt wurde - inklusive theoretischer Modellierung - auf dessen Basis die prinzipielle Machbarkeit der gewählten Lösungsstrategie gezeigt werden konnte. Wenn manche der Messunsicherheiten hoch erscheinen hat dies mehrere Ursachen:

- Manche experimentelle Einrichtungen gehören zum Altbestand des Instituts für Experimentalphysik und repräsentieren nicht mehr den Stand der Technik hinsichtlich Genauigkeit und Präzision (z.B. Langwegphotometer)

- Manche Messmethoden beinhalten eine lange Kette von Abhängigkeiten im Rahmen der Rückführung auf ein Referenznormal, die in Summe zu hohen absoluten Messunsicherheiten führen, obwohl die relativen Messunsicherheiten beim Vergleich einzelner Messungen zueinander deutlich geringer sind (z.B. spektrophotometrische Messungen)

- Manche theoretischen Ansätze stellen bewusste Vereinfachungen in der Modellbildung dar, um dem Ansatz einer „einfachen Modellierung“ gerecht zu werden, wobei der prinzipiellen Tauglichkeit vor der numerischen Exaktheit Vorrang eingeräumt wird. Eine Empfindlichkeitsanalyse der Modellierung hinsichtlich der getroffenen Annahmen (und insbesondere der nicht inkludierten Parameter, z.B. unterschiedliches Partikelstreuvermögen charakterisiert durch die Volumenstreufunktion) wurde nicht durchgeführt da es den Rahmen der Arbeit gesprengt hätte.

Trotzdem konnte nicht nur qualitativ die Tauglichkeit des gewählten Modells nachgewiesen werden, die quantitative Übereinstimmung der Modellierung mit den experimentellen Daten war deutlich besser als die Abschätzung der Messunsicherheiten hätte erwarten lassen.

[407] Vgl. Stamnes (2000), S. 92.

8 Schlussfolgerungen

Diese Arbeit sollte zeigen, dass es möglich ist über etwas so alltägliches wie Make Up, physikalische Betrachtungen anzustellen und es mit einem einfachen physikalischen Modell zu beschreiben.

Um das in die Realität umzusetzen, war es nötig, sich die theoretischen Grundlagen zu erarbeiten, die die physikalischen Eigenschaften von Make Up beschreiben, wie auch die Eindrücke, die beim Betrachter entstehen. Dazu gehören:

- physikalische Grundlagen, wie Gesetze der Reflexion, Streuung, Intensitätsabnahme, und andere
- Messgrößen, für die radiometrischen und photometrischen Betrachtungen
- Farbmetrik, zum korrekten Beschreiben von Farbwahrnehmungen und Messen von Farbabständen
- Menschliche Wahrnehmung, ihr Zustandekommen und wovon sie beeinflusst wird
- Aufbau und optische Eigenschaften der Haut, um zu verstehen, was Verbesserungen bewirken sollen und wie sie möglich sind
- Make Up, sein Aufbau, die Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften, um Aufschluss über die Eingabeparameter für eine Modellierung und Simulation zu erhalten
- Grundlagen der Modellierung, um die Basis für die Erstellung eines Modells zu legen, die nötigen Eingabeparameter und möglichen Ausgabeparameter kennenzulernen und Einblicke in eine mögliche Simulation zu erhalten

Für die Bestimmung der für eine Modellierung des Make Up nötigen physikalischen Eigenschaften und die zur Verfügung Stellung von Messwerten für die Vergleiche mussten geeignete Messapparaturen gefunden werden.

Für die von Make Up zurückgestrahlten Intensitäten und die Farbbetrachtungen kam ein Spektrophotometer zum Einsatz. Eine Camera half dessen Messwerte zu verdichten und zusätzliche Aussagen über die Farbwert– und Helligkeitsänderungen bei verschiedenen Beleuchtungs– und Beobachtungswinkeln zu erhalten. Die Farbmetrik machte es möglich, die Experimente hinsichtlich Helligkeit und Farbabstand objektiv zu bewerten.

Analysen mittels Langwegphotometer und integrierender Platte lieferten die verschiedenen Koeffizienten zu Extinktion und Absorption und damit zur Single Scattering Albedo, die in das Modell (realisiert über das Simulationsprogramm DISORT) einfließt. Die Messungen mittels Elektronenmikroskop machten es möglich, die Partikeldichte– und Größenverteilung zu ermitteln. Diese dienten als Grundlage, für das FORTRAN–Programm wb4.exe, das über ein Mie–Streuungs Modell für homogene, runde Partikeln die Volumenstreufunktion, Asymmetrieparameter, Streukoeffizienten und Phasenfunktionen für die Simulation mit DISORT ermittelte.

Mittels DISORT konnte über die Wechselwirkung von Licht mit einem plan–parallelen Medium Make Up erfolgreich modelliert werden. Durch Veränderung der Parameter wurde gezeigt, dass gezielte Verbesserungen hinsichtlich der Helligkeit und eines gleichmäßigeren Farbeindrucks möglich sind.

Durch entsprechend exaktere Modellierung könnten detailliertere Vorhersagen über Make Up und den Eindruck, den es bei einem Betrachter hervorruft, getroffen werden.

Abschließend betrachtet, haben verschiedenste physikalische Gebiete die Grundlagen für diese Arbeit geliefert. Mit ihrer Hilfe konnte gezeigt werden, dass ein einfaches Modell für den optischen Eindruck von Make Up aufgestellt werden kann und dass es die realen Gegebenheiten nachbildet. Durch entsprechend geeignete Wahl neuer Parameter wurde gezeigt, dass am „Reißbrett“ Verbesserungen an Make Up angebracht werden können.

Einfachere und verbesserte Ergebnisse wären durch Verwendung eines Hautphantoms, durch Einsatz einer über Computer gesteuerten Camera, die auch Daten im Raw-Format liefert, durch gesteigerten experimentellen Aufwand und durch eine verbesserte, detailliertere Modellierung zu erreichen gewesen.

9 Software

9.1 Motoransteuerungsprogramm

Das Programm MOTOR.EXE dient zur Ansteuerung des Experimentieraufbaus für die CANON A520 Camera. Kernstück des Aufbaus ist ein Präzisionsdrehtisch M-038.DG1 von PI (Physik Instrumente GmbH) mit einer Wiederholgenauigkeit von 200 µrad (ca. 0,01°), angesteuert über einen Mercury C862 Controller mit RS–232 Schnittstelle. Die Ansteuerungsbibliotheken (DLL) lassen bevorzugt ein Interfacing über C bzw. C++ Routinen zu, daher wurde das Programm in C erstellt. Das Programm übernimmt weiters die Fernkontrolle der A520 Camera, die Festlegung der Einstellungen wie Empfindlichkeit und Belichtungszeit und die Abspeicherung der durchgeführten Aufnahmen.

Entsprechend den gewählten Versuchsbedingungen werden feste Positionen und Winkelbereiche ins Programm übernommen. Zwei prinzipiell unterschiedliche Versuchsabläufe sind möglich:

- Der bewegliche PET wird auf einen fixen Winkel (aL) zur Lampe voreingestellt und verbleibt während des Versuchs in dieser Position, der Beobachtungswinkel (aC) variiert gemäß den gewählten Parametern.
- Der bewegliche PET–Block wird am Dreharm arretiert, sodass der Beobachtungswinkel (aC) stets 0° beträgt – er weist direkt zur Kamera und dreht sich mit dem Kameraarm mit, wobei unterschiedliche Beleuchtungswinkel (aL) durchlaufen werden.

Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 89 und Abbildung 90 (auf Seite 123) wiedergegeben.

Für einen Versuchsdurchgang werden Startwinkel, Winkelschrittweite und Endwinkel eingegeben, wobei ein Bereich von ± 60° überstrichen werden kann. Vor und nach jedem Versuchsdurchgang erfolgt eine Justierung der Nullposition anhand eines eingebauten Nulldetektors. Nach Eingabe der Daten fährt der Dreharm in die gewählte Startposition, die Camera wird mit den Aufnahmedaten programmiert und ausgelöst. Während der Dreharm die nächste Position anfährt werden die Bilddaten übertragen und eine Infodatei erstellt, die insbesondere die Beleuchtungs– und Beobachtungswinkel für den beweglichen PET enthält. Das Auswerteprogramm MAKEUP.EXE verwendet diese Informationen und legt weitere Bildberechnungen in der Datei ab.

9.2 Bildauswerteprogramm für Regions of Interest

Das Programm MAKEUP.EXE dient zur Auswertung der mit der CANON A520 aufgenommenen Bilder, insbesondere zur Extraktion der sRGB Information aus verschiedenen Bildbereichen. Das Programm selbst ist in Visual Basic geschrieben.

Eingelesene Bilder werden im mittleren Fenster detailliert dargestellt. Helligkeits– und Farbverläufe können in waagrechten und senkrechten Bildachsen analysiert werden, vorrangig ergibt sich jedoch folgender Ablauf der Auswertung:

- Einlesen der Infodatei und Darstellung bereits ausgewerteter Informationen.

- Falls noch nicht vorhanden, Ermittlung der Eckpunkte der PET–Blöcke und der OPDIMA–Referenz durch Berechnung aus Winkeldaten und perspektivischer Verzerrung mit anschließender Bildverarbeitung mittels Kantenfilter; die ermittelten Eckpunkte werden zur grafischen Kontrolle am Bildschirm angezeigt und können korrigiert werden (siehe Abbildung 234). Die bestätigten (oder korrigierten) Werte werden in der Infodatei abgelegt.

- Bestimmung der mittleren Helligkeits– und Farbwerte (sRGB) in vorab definierten Regions of Interest (ROI); die ROI–Koordinaten können bei kleinen Objekten (z.B. roter Fleck) individuell an das jeweilige Bild angepasst werden, derart korrigierte ROI–Koordinaten werden ebenfalls in der Infodatei abgelegt (siehe Abbildung 235).

- Die ermittelten Helligkeits– und Farbwerte (Bildnummer, Beleuchtungs– und Beobachtungswinkel, Mittelwerte, Streuungen) werden mit Bezug auf die Originalbilddatei zur späteren Nachbearbeitung bzw. Auswertung in Excel in einem File abgelegt.

Nach der Korrektur der Referenzpunkte und der Koordinaten der ROIs kann die Bildverarbeitung durch das Programm für eine große Auswahl an Bildern automatisiert durchgeführt werden (batch–mode). Die Auswertung eines Bildes bedarf etwa 5 Sekunden auf einem 2.4 GHz Intel Dual Core System. Im Rahmen dieser Auswertung werden auch geringfügige Korrekturen vorgenommen, z.B. für den Helligkeitsverlauf im Bild bei größeren Beleuchtungswinkeln. Bei einem Beleuchtungsabstand von knapp 60 cm, einer horizontalen Abmessung des drehbaren Blocks von 6 cm und einem Beleuchtungswinkel von 45° befinden sich die senkrechten Kanten um ± 3 cm unterschiedlicher Distanz zur Lichtquelle. Eine Abstandsänderung von 5 % bewirkt gemäß dem quadratischen Abstandsgesetz eine Helligkeitsänderung um etwa 10 %, ein durchaus merkbarer Effekt wie am horizontalen Helligkeitsprofil deutlich erkennbar ist (siehe Abbildung 235, Profilbalken direkt unter Hauptfenster). Diese aus der Winkelstellung ableitbare scheinbare Helligkeitsschwankung wird automatisch korrigiert, sodass die Standardabweichung bei der Ermittlung z.B. der Kontrollfläche im linken Teil des drehbaren PET (siehe Abbildung 235, ROI 2 = m-left) nur noch das intrinsische Pixelrauschen umfasst. Weiters werden vom Programm zahlreiche Konsistenzprüfungen durchgeführt und entsprechende Warnungen generiert, falls im batch–mode die Daten der ROIs nicht eindeutig ermittelt werden können. Obwohl in der vorliegenden Arbeit nur wenige Bilder tatsächlich beschrieben wurden, waren insgesamt mehr als 300 Bilder unter verschiedenen Beleuchtungs– und Beobachtungswinkeln erstellt und ausgewertet worden. Dafür war eine automatisierte Unterstützung zwingend erforderlich.

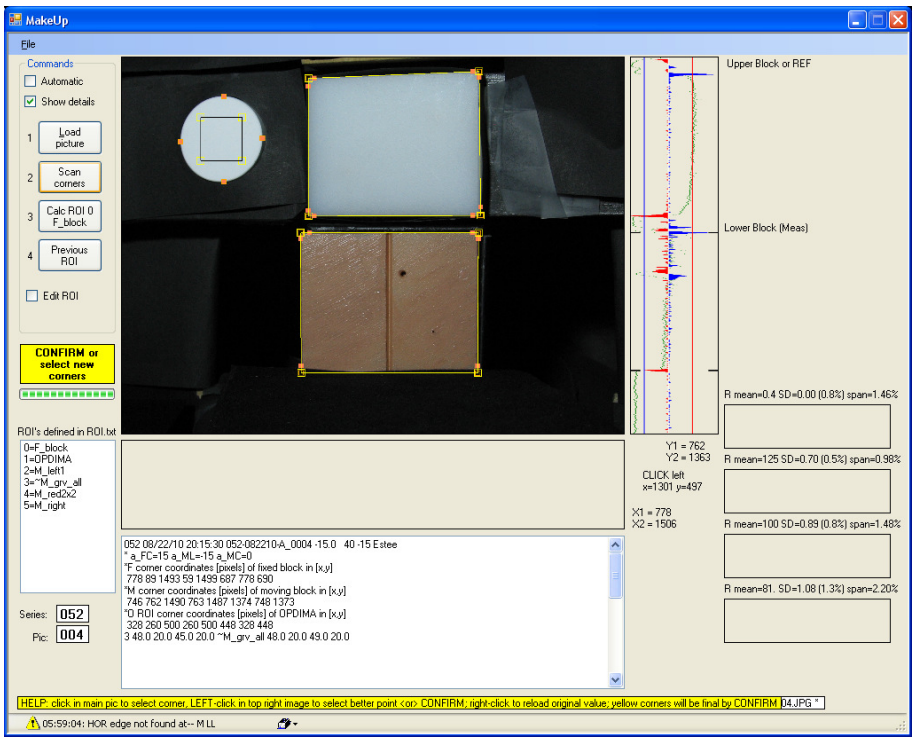


Abbildung 234: Screenshot MakeUp.exe

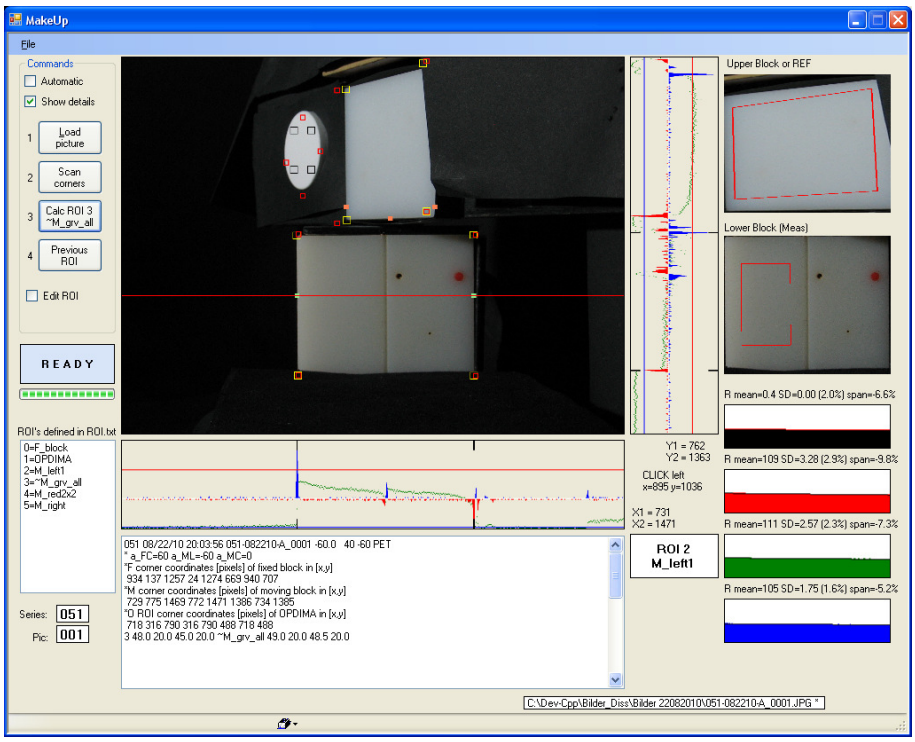


Abbildung 235: Screenshot MakeUp.exe, Helligkeits- und Farbprofile

9.3 Bildauswerteprogramm zum Auslesen der sRGB–Farbkoordinaten in jpg-Bilddateien

Das Programm PictureAverage.exe wurde von Matthias Schmitzer BSc(WU) programmiert. Es wurde mit .net Framework 3.5 von Microsoft.net© 3.5 unter Verwendung von Microsoft Visual Basic 2008 Express erstellt.

In das Programm wird eine Bilddatei eingelesen, in welcher der Benutzer einen bestimmten Bereich markieren kann, aus dem der minimale, der maximale und der durchschnittliche Rot-, Grün-, bzw. Blauanteil ermittelt wird. Diese Anteile werden als RGB Dezimalcode und als Farbfeld am Bildschirm ausgegeben (siehe Abbildung 236).

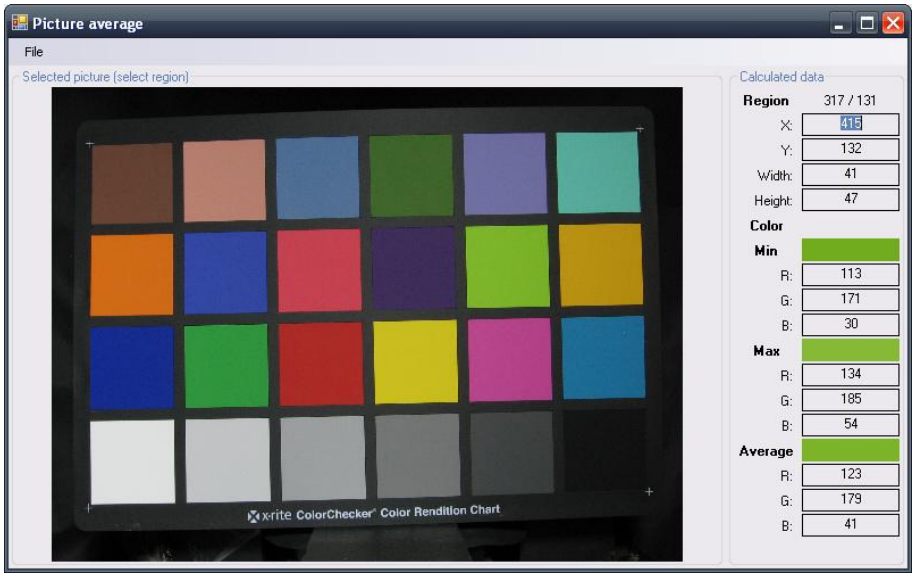


Abbildung 236: Screenshot PictureAverage

Dazu wird die originale Bilddatei in einer Variable gespeichert und die ausgewählten Koordinaten auf die originalen Dimensionen umgelegt, da das angezeigte Bild nicht der Originalgröße entspricht.

Die Funktionen zum Ermitteln der Farbwerte wurden dem System.Drawing Namespace entnommen.

Das Programm wurde verwendet, um Bilder der Digitalcamera auf Helligkeit zu untersuchen, sRGB–Farbkoordinaten zu bestimmen und um Kameraeinstellungen auf Korrektheit zu überprüfen.

9.4 Programm zur Übernahme von Spektraldaten in Excel

Das Programm DissMerger.exe wurde ebenfalls von Matthias Schmitzer BSc(WU) und mit .net Framework 3.5 von Microsoft.net© 3.5 erstellt. Wie bei PictureAverage.exe wurde Microsoft Visual Basic 2008 Express verwendet.

Der DissMerger entnimmt den einzelnen Tabellenblättern der Excel–Dateien der Messungen mit der Ulbrichtkugel die Wellenlänge und die Signalstärke, bildet daraus den Mittelwert und die Standardabweichung und schreibt sie in eine neue Excel–Datei. Dabei werden sämtliche Dateien berücksichtigt, die vom User gewählt wurden.

Für die Interaktion mit Excel wurden die COM–Objekte von Microsoft Office 11.0 Object Library und Microsoft Excel 11.0 Object Library verwendet. Damit das Programm nicht während der Konvertierung einfriert, wird die Bearbeitung in einem separaten Thread durchgeführt.

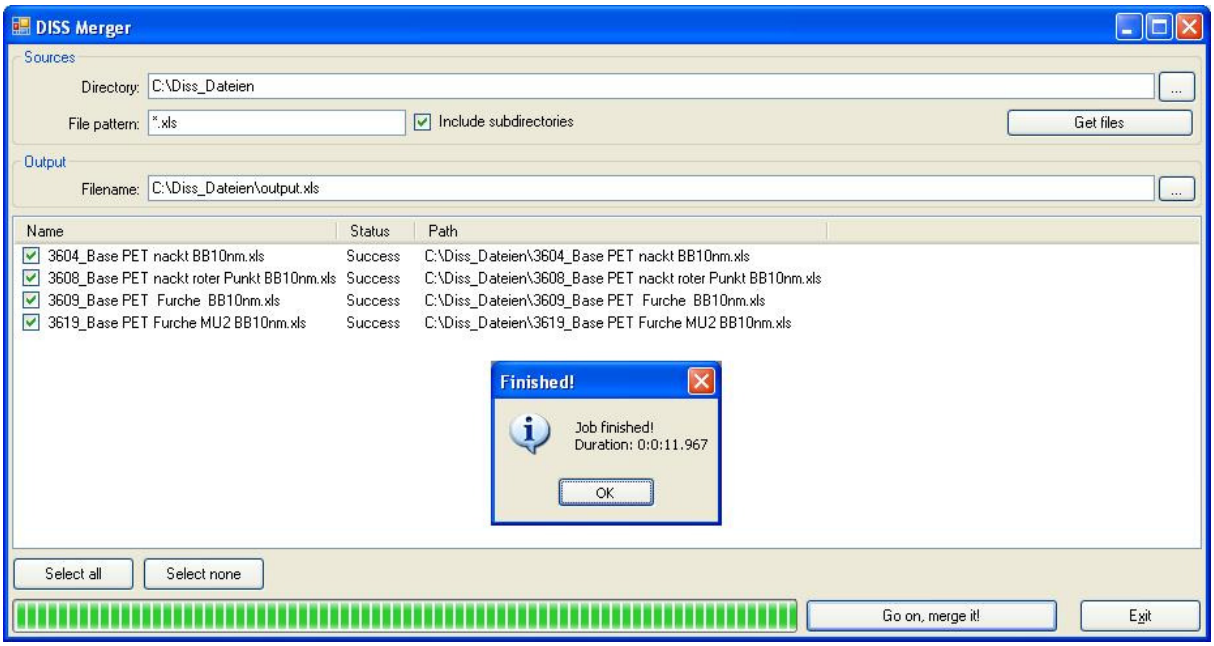


Abbildung 237: ScreenShot DISS Merger

9.5 Verschiedene benutzerdefinierte Funktionen in Excel

Um die Umrechnungen von z.B. XYZ, Lab, sRGB etc. zu automatisieren wurden verschiedene Makros in Excel erstellt.

9.6 Fortran Programm wb4.exe

Das Programm wb4.exe beruht auf einer FORTRAN–Subroutine in einem Programm in Bohren und Huffman, S. 479, zur Ermittlung der Volumenstreufunktion für homogene Kugeln.[408] Es wurde so erweitert, dass die Phasenfunktion, der Streukoeffizient und der Asymmetriefaktor ausgegeben werden.

Die Eingabeparameter werden über ein Textfile übergeben. Sie sind in Abschnitt 9.7 mit den DISORT Eingabeparametern gemeinsam beschrieben, da wb4.exe ein Ausgabefile erstellt, das die Eingabeparameter für DISORT enthält. Insbesondere werden die Legendrekoeffizienten übergeben, die DISORT verwendet, um die Phasenfunktion zu modellieren.

9.7 DISORT

DISORT[409] (discrete-ordinate-method radiative transfer program, V2.0) ist ein in Fortran geschriebenes Programm, das zum freien Download unter dem in der Fußnote angegebenen Link zur Verfügung steht.

[408] Vgl. Bohren (2004), S. 479.
[409] Vgl. URL ftp://climate1.gsfc.nasa.gov/wiscombe/Multiple_Scatt/ [1.9.2010]

DISORT behandelt den Strahlungstransfer in einem plan–parallelen Medium, in dem Streuung, Absorption und Emission für eine Wellenlänge stattfinden. Das Medium ist inhomogen in verschiedenen Schichten. Am Grund des Mediums kann eine bidirektionale Reflektivität vorgegeben werden oder – im einfachsten Fall – eine Lambert'sche Oberfläche bestimmter Reflektivität. An jeder Grenze der einzelnen Schichten kann Strahlung diffus oder parallel auftreffen oder Planck'sche Strahlungsemission auftreten. Ausgegeben werden die winkelabhängigen Intensitäten und Flüsse bei den vom User ausgewählten Winkeln bzw. Schichttiefen, siehe Report zum Projekt DISORT.[410]

DISORT wird für verschiedenste Anwendungsgebiete eingesetzt. Beispiele dafür sind Fluenz in nicht homogenem geschichtetem Gewebe, Sichtweitenänderungen auf Grund von Luftverschmutzung und Streuung in Malfarben, denen TiO_2 beigefügt ist.[411]

9.7.1 DISORT zugrundeliegende Gleichungen

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Gleichungen gegeben, die für die Berechungen in DISORT verwendet werden.

Strahlungstransportgleichung

Beschreibung des Transportes von monochromatischer Strahlung bei einer gegebenen Wellenlänge λ durch ein plan–paralleles Medium:

$$\mu \frac{dI^{tot}(\tau_\lambda, \mu, \phi)}{d\tau_\lambda} = I_\lambda^{tot}(\tau_\lambda, \mu, \phi) - S_\lambda(\tau_\lambda, \mu, \phi)$$

Formel 40: Strahlungstransportgleichung[412]

I_λ^{tot} ist die Intensität in der vertikalen optischen Tiefe τ_λ (von der Obergrenze weg gemessen). μ ist der Cosinus des Polarwinkels (positive Winkel liegen oben) und Φ der Azimutalwinkel. S ist die Source Funktion, die unten beschrieben wird.

„Source Funktion" S

Sie enthält die interne Quelle Q und die Streuung in Richtung μ, Φ aus allen anderen Richtungen. Da im vorliegenden Modell Planck'sche Strahler keine Bedeutung haben (obwohl bei 300 K auch Make Up Strahlung im IR–Bereich aussendet) werden sie nicht berücksichtigt (die Strahlung der Quelle Q fällt bei den Berechnungen weg).

$$S(\tau, \mu, \phi) = Q(\tau, \mu, \phi) + \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-1}^{1} d\mu' P(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') I^{tot}(\tau, \mu', \phi')$$

Formel 41: Source Funktion[413]

P ist die Phasenfunktion, die unten beschrieben wird. ω ist die „Single Scattering Albedo".

410 Vgl. Stamnes (2000), S. 12.
411 Vgl. ebenda.
412 Vgl. ebenda, S. 15.
413 Vgl. ebenda.

Phasenfunktion

Die Phasenfunktion wurde mittels des Programms wb4.exe aus der Partikelgrößenverteilung der Mikroskopaufnahmen ermittelt. In DISORT wurde die Annahme getroffen, dass die Phasenfunktion der Streuung nur vom Winkel des einfallenden mit dem gestreuten Strahl abhängt. Die Phasenfunktion wird über die Legendre–Polynome P_l (siehe Formel 42) in DISORT berücksichtigt.

$$P(\tau,\cos\Theta)=\sum_{l=0}^{2M-1}(2l+1)g_l(\tau)P_l(\cos\Theta)$$

Formel 42: 2M Legendre Polynome[414]

Die Legendre Koeffizienten $g_l(\tau)$ werden wie folgt ermittelt:

$$g_l(\tau)=\frac{1}{2}\int_{-1}^{+1}P_l(\cos\Theta)P(\tau,\cos\Theta)d(\cos\Theta)$$

Formel 43: Legendre Koeffizienten[415]

Um die Phasenfunktion von Make Up 1 durch Legendre–Polynome zu approximieren war die Verwendung von 200 Legendre Koeffizienten nötig (siehe Abschnitt 7.3.2)

9.7.2 Übersicht über die durchgeführten Berechnungen (Programmdurchläufe) mit DISORT

Die mit Hilfe von wb4.exe ermittelten Daten (Phasenfunktion, Streukoeffizient, Asymmetriefaktor, Legendre-Polynome) wurden in DISORT weiterverarbeitet. Die Berechnungen wurden bei drei Einfallswinkeln für sieben Wellenlängen durchgeführt. Dabei war es möglich zwischen verschiedenen Varianten und fünf runoptions zu wählen.

Jeweils 3 Einfallswinkel x 7 Wellenlängen (301, 338, 376, 398, 414, 451 ,489 nm) x 5 runoptions = 105 Durchläufe

Allgemeine Parameter: (Azimut 50°, sigma Gauss'sche Spiegelverteilung 15°, für alle)

```
&expdat Uumu0=0.999 phi0=50.0
Unstr=200 bdsigma=15.0
Untau=-5
ALBEDO=0.8 /
```

M1std – Berechnung mit experimentell ermittelter Verteilung

```
xx.xx xx.xx refractive index real im
 1.2  0.075
xxx.x area counted in µm2
4938.3
xx number of classes (max 30)
6
x.xx xxxxx class medium diameter µm, frequency of occurrence
0.37 15860
1.0   8
3.0   6
5.0   6
6.5   2
9.0   1
```

414 Vgl. Stamnes (2000), S. 17.
415 Vgl. ebenda.

```
xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x optical depth for wavelen (DISORT)
74.3 72.7 71.1 69.5 67.9 61.6 56.6
0.25  0.5  1.0  1.5
x.xx x.xx x.xx x.xx x.xx x.xx x.xx single scatt Albedo (DISORT only)
0.94 0.96 0.97 0.98 0.98 0.98 0.99
```

M2std – Berechnung mit experimenteller Verteilung, neue single scattering albedo

```
xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x optical depth for wavelen (DISORT)
74.3 72.7 71.1 69.5 67.9 61.6 56.6
0.25  0.5  1.0  1.5
x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx SSA new
0.9637   0.9680   0.9719   0.9738   0.9749   0.9763   0.9779
```

M2sim1 – Berechnung mit virtueller Verteilung (SIM1, sonst gleiche Parameter)

```
x.xx xxxxx class medium diameter µm, frequency of occurrence
0.37  1000
0.60  5000
xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x optical depth for wavelen (DISORT)
51.4 45.7 41.1 38.8 37.4 34.3 31.6
0.25  0.5  1.0  1.5
x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx SSA
0.9637   0.9680   0.9719   0.9738   0.9749   0.9763   0.9779
```

M2sim2 – Berechnung mit virtueller Verteilung (SIM2, sonst gleiche Parameter)

```
x.xx xxxxx class medium diameter µm, frequency of occurrence
0.37 10000
0.60  1000
xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x optical depth for wavelen (DISORT)
53.2 47.3 42.5 40.1 38.7 35.4 32.7
0.25  0.5  1.0  1.5
x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx SSA
0.9637   0.9680   0.9719   0.9738   0.9749   0.9763   0.9779
```

M3sim3 – Berechnung mit virtueller Verteilung, BZ(2,0/0,1)

```
x.xx xxxxx class medium diameter µm, frequency of occurrence
0.30 1000
0.34 1000
0.38 1000
0.40 1000
0.42 1000
0.45 1000
0.49 1000
xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x xx.x optical depth for wavelen (DISORT)
74.3 72.7 71.1 69.5 67.9 61.6 56.6
0.25  0.5  1.0  1.5
x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx x.xxxxxx SSA new
0.9637   0.9680   0.9719   0.9738   0.9749   0.9763   0.9779
```

Jeder Durchlauf mit Polarwinkel je 2 / 20 / 45 deg ➔ Uumu0 = 0.999 / 0.09397 / 0.707 (cos Θ),
alle Berechnungen M2 jeweils mit Brechzahl (1,2/0.075) und (2,0/0,1), M3 nur mit (2,0/0,1).

Runoptions 1 – 5

runoption1: bottom layer ground reflectance mit Albedo = 0.8
runoption2: erste Spiegellage in OD = 0.25
runoption3: zweite Spiegellage in OD = 0.5
runoption4: dritte Spiegellage in OD = 1.0
runoption5: vierte Spiegellage in OD = 1.5

10 Literaturverzeichnis

Anderson (1981): Anderson, R. /Parrish, J.: The Optics of Human Skin, in: The Journal of Investigative Dermatology, 77:13 – 19, 1981.

Baranoski (2004): Baranoski, G. /Krishnaswamy, A., An Introduction to Light Interaction with Human Skin, in Revista de Informatica Teorica e Aplicada, Volume 11, Number 1, 2004, S. 33 – 62.

Barel (2001): Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001.

Blakely (2001): Blakely, J. M.: Silicones: A Key Ingredient in Cosmetic and Toiletry Formulations, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 389 – 397.

Bongartz (2002): Bongartz, J.: Dissertation: Hochauflösende dreidimensionale Gesichtsprofilvermessung mit kurzgepulster Holographie, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, 2002.

Bohren (2004): Bohren C. F., Huffman D. R.: Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1983/2004.

Brainard (2003): Brainard, D. H.: Color Appearance and Color Difference Specification, in Shevell, S. K. (Hrsg.): The Science of Color, Second Edition, Optical Society of America, Oxford, Elsevier, Zweite Auflage der ersten Edition von 1953, 2003, S. 191 – 216.

Buchmann (2001): Buchmann, St.: Main Cosmetic Vehicles, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 145 – 169.

CIE (2004): Alessi P.J., et. al. : CIE Commission Internationale de l' Eclairage Technical Report Colorimetry, 15:2004 3rd Edition, Bureau Central de la CIE, 2004.

Colantoni (2002): Colantoni, P.: Color Space, Quelle: URL http://www.uni-koblenz.de/~lb/lb_activities/ipcv02/LIGIV/colorspace.pdf [30.3.2010].

Cunningham (2001): Cunningham, W. J.: Antiwrinkle Products, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 543 – 549.

Doi (2003): Doi, M. /Tominaga, S.: Spectral estimation of human skin color using the Kubelka–Munk theory, in: SPIE/IS&T Electronic Imaging, S. 221 – 228. SPIE, vol. 5008, 2003.

Dumont (2010): Dumont, M., et. al.: High-accuracy measurements of snow Bidirectional Reflectance Distribution Function in visible and NIR wavelengths – comparison with modelling results, in: Atmospheric Chemistry and Physics, 10, S. 2507 – 2520, 2010, veröffentlicht auf http://www.atmos-chem-phys.net/10/2507/2010/acp-10-2507-2010.pdf [15.11.2010].

Ekong (2001): Ekong, E. A. /Melbouci, M. /Lusvardi, K. /Erazo-Majewicz, P. E.: Rheological Additives and Stabilizers, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 377 – 387.

Flewelling (1981): Flewelling, R.: Noninvasive optical monitoring, in: Bronzino, J. (Hrsg.): The Biomedical Engineering Handbook, S. 1 – 11, Boca Raton, FL, USA, 1981. IEEE Press. Section 86.

Frings (2003): Frings, St.: „Sehen: Das Auge“ in der Zyklusvorlesung „Sinnesphysiologie – vom Ionenkanal zum Verhalten“, Zoologisches Institut Uni Heidelberg, Juni 2003, veröffentlicht auf http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/hvsensin.htm [19.1.2010].

Frings (2005): Frings, St.: „Sehen: Bilder im Gehirn“ in der Zyklusvorlesung „Sinnesphysiologie – vom Ionenkanal zum Verhalten“, Zoologisches Institut Uni Heidelberg, Jänner 2005, veröffentlicht auf http://www.sinnesphysiologie.de/hvsinne/hvsensin.htm [19.1.2010].

Fritsch (2004): Fritsch, P.: Dermatologie Venerologie, 2. Aufl., Berlin, Springer, 2004.

Gauckler (2009): Gauckler, L. J.: Einführung in die Materialwissenschaften, 11. Optische Eigenschaften, veröffentlicht auf http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Einfuehrung_Materialwissenschaft [6.3.2010], ETH Zürich, Department of Materials, 2009.

Gerny (1996): Gerny, H.: Kosmetik + Dermatologie, Purkersdorf/Wien, Krause & Pachernegg GmbH, 1996.

Grundmann (2005): Grundmann, A.: Dissertation: Untersuchung zur Gestaltung intelligenter Systeme für die schmerzarme Blutentnahme an der Fingerbeere, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, 3.3.2005.

Hardy (1956): Hardy, J. /Hammell, H. / Murgatroyd, D.: Spectral transmittance and reflectance of excised human skin, J Appl Physiol 9: S. 257 – 264.

Henderson (1998): Henderson, R. /Schulmeister, K.: Laser Safety, Bristol, Institute of Physics Publishing, 1998.

Hoffmann (2006): Hoffmann, G.: CIE Color Space, veröffentlicht auf http://www.fho-emden.de/~hoffmann/howww41a.html [28.2.2010].

Horvath (1997): Horvath, H: Experimental calibration of aerosol light absorption measurements using the integrating plate method - Summary of the data, J. Aerosol Sci., 28, S. 1149 – 1161, 1997.

Jacques (1996): Jacques, C.: Origins of tissue optical properties in the UVA visible and NIR regions. OSA TOPS on Advances in Optical Imaging and Photon Migration, 2: S. 364 – 369, 1996.

Jahns (2001): Jahns, J.: Photonik: Grundlagen, Komponenten und Systeme, München, Wien, Oldenburg, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2001.

Jonasz (2007): Jonasz, M. /Fournier, G. R.: Light Scattering by Particles in Water, Theoretical and Experimental Foundations, Oxford u. a., Elsevier Inc., 2007.

Kitaoka (2003): Kitaoka, A. /Ashida, H.: Phenomenal Characteristics of the Peripheral Drift Illusion, in: Vision Vol 15, No. 4, S. 261-262, 2003, veröffentlicht auf: http://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/index-e.html [19.1.2010].

Kohlrausch (1968): Kohlrausch, F.: Praktische Physik zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik, Band 1, Stuttgart, B. G. Teubner, 1968.

Küppers (1987): Küppers, H.: Farbe – Ursprung, Systematik, Anwendung, Einführung in die Farbenlehre, München, Callway Verlag, 1987.

Lin (1973): Lin, C. /Baker M. /Charlson, R.: Absorption Coefficient in Atmospheric Aerosol: a Method for Measurement, Applied Optics, Vol. 12, No. 6, S. 1356 – 1363, Juni 1973.

Lodén (2001): Lodén, M.: Hydrating Substances, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 347 – 359.

MacAdam (1985): MacAdam, D. L.: Color Measurement Theme and Variations, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1985.

Martin (2004): Martin, K.: Infrared and Raman Studies of Skin and Hair/ A review of cosmetic spectroscopy, in: The internet journal of vibrational spectroscopy, Volume 3, Edition 2, 2004, Quelle: http://www.ijvs.com/volume3/edition2/index.html [23.8.07].

Milstein (2001): Milstein, S. /Bailey, J. /Halper, A.: Definition of Cosmetics, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 5 – 18.

Nassau (1983): Nassau, K.: The physics and chemistry of color, New York / Chichester / Brisbane / Toronto / Singapore, John Wiley & Sons, 1983.

Neumüller (1985): Neumüller, O.: Römpps Chemie-Lexikon, Stuttgart, Franck'sche Verlagshandlung, 1985.

Nolting (2005a): Nolting, J.: „Was ist eigentlich Farbe? Teil 1: Farbmetrik", in DOZ 8-2005, DOZ-Verlag, Optische Fachveröffentlichungen GmbH, Heidelberg, 2005.

Nolting (2005b): Nolting, J.: „Was ist eigentlich Farbe? Teil 2: Farbmessung", in DOZ 10-2005, DOZ-Verlag, Optische Fachveröffentlichungen GmbH, Heidelberg, 2005.

Nolting (2005c): Nolting, J.: „How does it work? Teil 13: Radiometrische Grundbegriffe", in DOZ 9-2005, DOZ-Verlag, Optische Fachveröffentlichungen GmbH, Heidelberg, 2005.

o.V. (2004): Das Make Up zur Tunika/Gesichtscreme altrömischer Damen entdeckt, in: Berliner Zeitung vom 4.11.2004, S. 15.

Ohno (1999): Ohno, Y.: OSA Handbook of Optics, Volume III Visual Optics and Vision, Chapter for Photometry and Radiometry, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland USA, 1999,
Quelle: http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/More-re prints/1999 Ohno (OSA handbook of optics) Photometry and radiometry.pdf .

Ottenstätter (2001): Ottenstätter, G.: Colorants, in: Definition of Cosmetics, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 317 – 330.

Purgathofer(2008a): Purgathofer, W.: „Human Perception“ in „Einführung in die Farbwissenschaften“, Quelle:
http://www.cg.tuwien.ac.at/courses/ColourInComputerGraphics/VO.html [3.2.2010].

Purgathofer(2008b): Purgathofer, W.: „Colorimetrie“ in in „Einführung in die Farbwissenschaften“, Quelle: http://www.cg.tuwien.ac.at/courses/ColourInComputerGraphics/VO.html [3.2.2010].

Pointer (2005): Pointer, S.: The Artifice of Beauty, Thrupp, Stroud, Gloucestershire, Sutton Publishing Limited, 2005.

Raulin (2001): Raulin, C. /Greve, B.: Laser und IPL–Technologie in der Dermatologie und Ästhetischen Medizin, Schattauer Verlag, 2001, Kapitel 1.

Roggan (1997): Roggan, A.: Dosimetrie thermischer Laseranwendungen in der Medizin – Untersuchung der optischen Gewebeeigenschaften und physikalisch – mathematische Modellentwicklung, Fortschritte in der Lasermedizin 16, ecomed Verlag, 1997.

Schlossmann (2001): Schlossmann, M. L.: Decorative Products, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 645 – 683.

Serup (2001): Serup, J.: Cosmetics and Interactions with Superficial Epidermis, in: Barel, A./ Paye, M./ Maibach, H. (Hrsg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology, Basel, Marcel Dekker AG, 2001, S. 479 – 484.

Shepperd (1968): Shepperd, J. J.: Human Color Perception, New York u. a., American Elsevier Publishing Company, Inc., 1968.

Shevell (2003): Shevell, S. K.: The Science of Color, Second Edition, Optical Society of America, Oxford, Elsevier, Zweite Auflage der ersten Edition von 1953, 2003.

Sexl (2007): Sexl, R., et. al.: Physik 7, öbvhpt VerlagsgmbH & CoKG, Wien, 2006, 1. Auflage, Nachdruck 2007, Grundlage des Werkes “Physik 3” und “Physik 4”, 1991 und 1992.

Sliney (1980): Sliney, D. H. / Wolbarsht, M.: Safety with Lasers and other Optical Sources, New York, Plenum Pub Corp, 1980.

Stamnes (2000): Stamnes, K. / Tsay, S. /Wiscombe, W. /Laszlo, I.: DISORT, a General-Purpose Fortran Program for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Scattering and

Emitting Layered Media: Documentation of Methodology (version 1.1, Mar 2000) Quelle ftp://climate1.gsfc.nasa.gov/wiscombe/Multiple_Scatt/DISORTReport1.1.pdf [1.9.2010].

Tipler (2000): Tipler, Paul A.: Physik, aus dem amerik. übersetzt von Baumgartner M., Hrsg. der deutschen Ausgabe: Gerlich D. /Jerke G., Heidelberg, Berlin, Oxford, Spektrum Akad. Verlag, 1994, dritter korrigierter Nachdruck der 1. Auflage 1994, 2000.

Tregear (1966): Tregear, R.T.: Physical Functions of Skin, Academic Press, London, 1966.

Tschachler (2005): Tschachler, E. / Petzelbauer, P. /Bösmüller, S. /Strasser, I. /Wündsch, L. /Maurer, D. /Hafner, C.: Haut, in: Hörhan, J. (Hrsg.): Haut und Sinnesorgane, Wien u. a., Verlag Wilhelm Maudrich, 2005, S. 120 – 168.

Yamada (2005): Yamada, J. /Kawamura, A. /Miura, Y. /Takata, S. /Ogawa, K.: Study on radiation transfer in human skin for cosmetics, in: Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Volume 93, Issues 1-3, 2005, S. 219 – 230.

Zege (1991): Zege, A. P. / Ivanov, A., P. / Katsev, I. L.: Image Transfer Through a Scattering Medium, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1991.

Zeiss: Abbe-Refraktometer B, Gebrauchsanleitung, Carl Zeiss, D-7082 Oberkochen.

War ein Literaturhinweis die Grundlage für einen ganzen Abschnitt, wurde darauf in der Überschrift verwiesen.

11 Anhang

Zusätzliche Quellenhinweise zu den Abbildungen:

Abbildung 13 bis Abbildung 17 auf Seite 26:

Hennastrauch
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Hennastrauch [11.1.2010], User: Atamari, Lizenz: Creative Commons-Lizenz Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Unported.

Hennapulver
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Hennastrauch [11.1.2010], Photographer: Andrey "A.I." Sitnik, das Bild wurde durch den Autor gemeinfrei gestellt.

Hennabemalung
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Hennastrauch [11.1.2010], Autor: Wolfgang Sauber, GNU–Lizenz für freie Dokumentation.

Indigopflanze
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Indigopflanze [11.1.2010], Urheber: Kurt Stüber, Gnu, Lizenz: Creative Commons-Lizenz Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Unported.

Indigo Färbemittel
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Indigopflanze [11.1.2010], Urheber: Evan Izer, Creative Commons-Lizenz Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 2.5 US-amerikanisch (nicht portiert).

Abbildung 30: Entstehung optischer Eindrücke

Nervenzelle
Quelle: adaptiert nach: http://de.wikipedia.org/wiki/Nervenzelle erstellt von H. Hoffmeister, Gnu Lizenz für freie Dokumentation, [12.2.2010]

Gehirn
http://de.wikipedia.org/wiki/Gehirn Quelle: US National Institutes of Health, Public Domain, [9.2.2010]

Auge
http://de.wikipedia.org/wiki/Auge erstellt von Petr Novák, Creative Commons Lizenz/Namensnennung, [9.2.2010]

Spektrale Reflexionskurve
Quelle: adaptiert nach
http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_reflectance_curve#The_measurement_devices_-_in_depth erstellt von Dkroll2, Gnu Licence for free Documentation, [14.1.2010]

Tabelle 9: In Ägypten verwendete Pigmente

Abbildung 53: Lapis Lazuli
http://de.wikipedia.org/wiki/Lapislazuli
uploaded by User Luna04, GNU-Lizenz für freie Dokumentation, [3.1.2011]

Abbildung 54: Azurit
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Azurite_from_China.jpg
User Eric Hunt, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic, [3.1.2011]

Abbildung 55: Malachit
http://de.wikipedia.org/wiki/Malachit
User Parent Géry, eigenes Werk - gemeinfrei, [3.1.2011]

Abbildung 56: Talk
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Talc_block.jpg
Work of the U.S.federal government, public domain, [3.1.2011]

Abbildung 57: Azurit Pigment
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Azuritepigment.jpg
Author Palladian at Wikipedia Project, public domain, [3.1.2011]

Abbildung 58: Brauner Ocker
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pigment_goethite_iconofile.jpg
Iconofile, Inc., www.iconofile.com, Copyright holder, use permitted, [3.1.2011]

Anmerkung zu den Quellenangaben der verwendeten Abbildungen:

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Lebenslauf

Persönliche Daten:		Dipl.-Ing. Mag. Ursula Schmitzer geb. 2. November 1959 in Wiener Neustadt österr. Staatsbürgerin, verheiratet, 2 Kinder
Anschrift:		2345 Brunn am Gebirge Leopold Gattringerstr. 95
Schulbildung:	1966 – 1970	Volksschule Baumkirchnerring, Wiener Neustadt
	1970 – 1974	Hauptschule Süd in Wiener Neustadt
	1974 – 1979	Handelsakademie in Wiener Neustadt, mit ausgezeichnetem Erfolg abgeschlossen
	8.6.1979	Matura mit ausgezeichnetem Erfolg bestanden
	Okt. 1980 – Jun. 1984	Informatikstudium an der TU Wien Diplomprüfung am 7.6.1984 Diplomarbeit: „Der Computer als Lehr- und Lernbehelf und das Grafiksystem CHILD“
	Sep. 2000 – Apr. 2004	Lehramtsstudium der Fächer Informatik und Informatikmanagement / Physik an der Universität Wien mit Auszeichnung bestanden
	Okt. 2004 – Jun. 2011	Physik – Doktoratsstudium an der Universität Wien „Die Physik des Make Up“
Berufliche Tätigkeit:		
	Aug. 1979 – Sept. 1980	Berufsanwärter für Steuerberater in der Wirtschaftstreuhandkanzlei Dkfm. Scheicher, Wiener Neustadt
	Okt. 1984 – Feb. 1985	Kfm. Angestellte bei der Firma Peter Sattler, Wien
	Dez. 1989 – Jun. 1990	Technische Angestellte bei Dr. Christian Schmitzer, Brunn am Gebirge
	Sep. 1991 – Jun. 2006	Lehrtätigkeit an der PA Baden, Informatik
	Sep. 2004 - dato	Lehrtätigkeit am BG/BRG Perchtoldsdorf Physik/Informatik
Persönlicher Werdegang:		
	Mai 1981	Verehelichung mit Dipl.-Ing. Christian Schmitzer
	25.12.1981	Geburt der Tochter Karin Elisabeth
	29.12.1985	Geburt des Sohnes Matthias Alexander

Brunn am Gebirge, am 15. April 2011