

Sebastian Gehwolf

Herstellung und Charakterisierung von Phantomen zur Kalibrierung optischer Tomographen

Diplomarbeit



Institut für Medizintechnik

Technische Universität Graz

Kronesgasse 5 A-8010 Graz

Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Stollberger

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Manuel Freiberger

Begutachter: Ao.Univ. -Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Scharfetter

Graz, Juni 2011

Danksagung

Ich möchte mich bei all denjenigen bedanken, die mir bei der Erstellung meiner Diplomarbeit geholfen haben.

Großer Dank gebührt auch meinen Betreuern Hermann Scharfetter und Manuel Freiberger, für die hervorragende Unterstützung bei meiner Diplomarbeit. Sie sind mir bei auftretenden Problemen stets mit guten Lösungsvorschlägen zur Seite gestanden. Besonders möchte ich mich auch für das Korrekturlesen bei Thomas Kirchner und Wolfgang Jäger bedanken.

Ich möchte mich noch bei meinen Freunden, und Studienkollegen bedanken, ohne die meine Studienzeit nicht so angenehm gewesen wäre. Vor allem möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir diese Ausbildung erst ermöglicht haben.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, _____

Ort, Datum

Unterschrift

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, _____

Place, Date

Signature

Herstellung und Charakterisierung von Phantomen zur Kalibrierung optischer Tomographen

Zusammenfassung

Das Ziel der Diplomarbeit ist die Fertigung von festen, reproduzierbaren Kunststoffphantomen mit eingeschlossenen fluoreszierenden, absorbierenden oder streuenden Materialien. Die Phantome simulieren die optischen Eigenschaften (Absorptionskoeffizient μ_a und reduzierter Streukoeffizient μ'_s) des Gewebes einer Labormaus bei einer Wellenlänge von 650 nm. Als Grundmaterial wird Epoxidharz verwendet. Durch die Zugabe der richtigen Menge von absorbierenden und streuenden Partikeln können die optischen Eigenschaften imitiert werden. Die Phantome dienen zur Kalibrierung von optischen Tomographen.

Schlüsselwörter

optische Tomographie, Phantom, Absorption, Streuung

Preparation and characterization of phantoms for the calibration of optical tomographs

Abstract

The aim of this diploma thesis is the production of solid, reproducible phantoms with embedded fluorescent, absorbing or scattering materials. The phantoms simulate the optical properties (absorption coefficient μ_a and reduced scattering coefficient μ'_s) of tissue of a laboratory mouse at a wavelength of 650 *nm*. The basic material of the phantoms is epoxyresin. The optical parameters are modified by adding absorbing and scattering particles. The phantoms are used to calibrate an optical tomography system.

Key words

optical tomography, phantom, absorption, scattering

Sybmole, Abkürzungen

μ_t	Totaler Schwächungskoeffizient	in mm^{-1}
μ_a	Absorptionskoeffizient	in mm^{-1}
μ_s	Streukoeffizient	in mm^{-1}
μ'_s	Reduzierter Streukoeffizient	in mm^{-1}
g	Streuanisotropiefaktor	in 1
d	Dicke der Probe	in mm
n	Brechzahl, Brechungsindex	in 1
Θ_B	Brechungswinkel	in $^\circ$
R	Fresnelkoeffizient (Reflexion)	in 1
T_c	Kollimierte Transmission	in 1
$I_{0,l}$	Nicht korrigierte kollimierte Lichtintensität des Lasers	in $\frac{mW}{cm^2}$
I_0	Korrigierte kollimierte Lichtintensität des Lasers	in $\frac{mW}{cm^2}$
I_s	Kollimierte Lichtintensität mit Probe	in $\frac{mW}{cm^2}$
\bar{I}_s	Kollimierte Lichtintensität mit Probe (Mittelwert)	in $\frac{mW}{cm^2}$
$U_{0,l}$	Nicht korrigierte Spannung ohne Probe	in mV
U_0	Korrigierte Spannung ohne Probe	in mV
U_s	Spannung mit Probe	in mV
\bar{U}_s	Spannung mit Probe (Mittelwert)	in mV

Stammlösungen

900NPSL	Absorberstammlösung 1	200 g Harz + 0.01 g Projet 900NP
900NPSL1	Absorberstammlösung 2	200 g Harz + 0.02 g Projet 900NP
SWSL	Streustammlösung	200 g Harz + 0.05 g Superwhite

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen	1
1.2	Grundmaterial	5
1.3	Schwarzpigmente	5
1.3.1	Pigmentruße	5
1.3.1.1	Eisenoxidschwarz-Pigmente	6
1.3.1.2	Oxidische Mischpigmente	6
1.4	Weißpigmente	6
1.4.0.3	Titandioxid-Pigmente	6
2	Methoden	7
2.1	Gussform	8
2.1.1	Gussform aus Formaform	9
2.1.2	Gussform aus Silikon-Kautschuk-Abformmasse	10
2.1.3	100 ml-Katheterspritze als Gussform	11
2.2	Materialien für das Phantom	12
2.2.1	Grundmaterial	12
2.2.2	Absorptionspigmente	15
2.2.3	Streupigment	16
2.3	Erstellung der Glasküvetten	18
2.3.1	Glasküvetten mit Absorberpigmenten	18
2.3.2	Glasküvetten mit Streupigmenten	21
2.4	Kontrolle der Glasküvetten (Absorberpigmenten)	22
2.5	Bestimmung der Brechzahl	23
2.5.1	Erstellung der Probe zur Messung des Brewsterwinkels	24
2.6	Vergleich der Brechzahlen	25
2.7	Messung der kollimierten Transmission	26
2.7.1	Messaufbau	29

2.8	Produktion der Phantome	32
2.9	Einschlüsse	35
2.9.1	Einschlüsse für die optische Tomographie	35
2.9.2	Einschlüsse für die optische Fluoreszenztomographie	37
3	Ergebnisse	38
3.1	Gussformen	38
3.2	Brechungsindex	38
3.3	Kollimierte Transmission der Glasküvetten	39
3.3.1	Glasprobe mit klarem Epoxidharz	39
3.3.2	Beziehung des Absorptionskoeffizienten und der Dicke	40
3.3.2.1	Absorberfarbe: Superblack	40
3.3.2.2	Absorberfarbe: Projet 900NP	43
3.3.3	Beziehung des Absorptionskoeffizienten und der Konzentration	46
3.3.4	Beziehung des Streukoeffizienten und der Konzentration	48
3.4	Hergestellte Phantome	50
4	Diskussion	51
4.1	Gussformen	51
4.2	Glasküvetten	53
4.3	Bestimmung des Brechungsindex	53
4.4	Kollimierte Transmission	54
4.4.1	Glasküvetten mit Absorberpigmenten (Superblack)	54
4.4.2	Glasküvetten mit Absorberpigmenten (Projet 900NP)	54
4.4.3	Glasküvetten mit Streupigmenten (Superwhite)	55
4.5	Produktion der Phantome	56
5	Schlussfolgerung und Ausblick	57
A	Anhang	60
A.1	Messtabellen	60
A.2	Bestellliste	65

1 Einleitung

1.1 Grundlagen

Heutzutage gibt es in der Medizintechnik viele unterschiedliche nicht-invasive, bildgebende Verfahren, die zur Untersuchung von biologischem Gewebe verwendet werden. Darunter sind unter anderem die Computer-Tomographie (CT), die Magnetresonanz-Tomographie (MRT) die Positronenemissions-Tomographie (PET), die Fluoreszenztomographie oder die diffuse optische Tomographie zu nennen. Die diffuse optische Tomographie ist eines der jüngsten nicht-invasiven Verfahren [3, Seite 1]. Sie arbeitet mit einer Laserstrahlung im Nah-Infrarot Bereich, da hier die Absorption von menschlichem beziehungsweise tierischem Gewebe niedrig ist und so Gewebe mit einer Dicke von einigen Zentimetern durchleuchtet werden kann. Die optische Tomographie wird zum Beispiel zur Detektion von Brustkrebs (Mammographie) oder zur Detektion der Sauerstoffversorgung des Gehirns von Neugeborenen eingesetzt [4, Seite 1934]. Vorteile dieses Verfahrens sind die geringen Kosten und eine geringe Belastung durch Strahlung [9, Seite 1].

Damit mit Hilfe der optischen Tomographie reproduzierbare Messungen gemacht werden können, sollen mehrere zylindrische Messkörper mit definierten Störeinschlüssen angefertigt werden. Solche Messkörper werden als Phantome bezeichnet.

Zusätzlich sollen weitere Phantome für die Kalibrierung eines Fluoreszenztomographen hergestellt werden. Damit die Fluorophorverteilung gemessen werden kann, müssen die Phantome Einschlüsse aus fluoreszierenden Materialien haben. Bis jetzt wurde die Messung der Fluoreszenzverteilung nur von einer Software simuliert. Mit Hilfe der Phantome können diese Simulationen überprüft werden.

Die Anforderungen an die Phantome sind lange Haltbarkeit, eine feste Form, Reproduzierbarkeit und stabile optische Eigenschaften. Optische Eigenschaften sind die Absorption und die Streuung. In Abbildung 1 sind die verschiedenen Formen von Absorption und Streuung dargestellt.

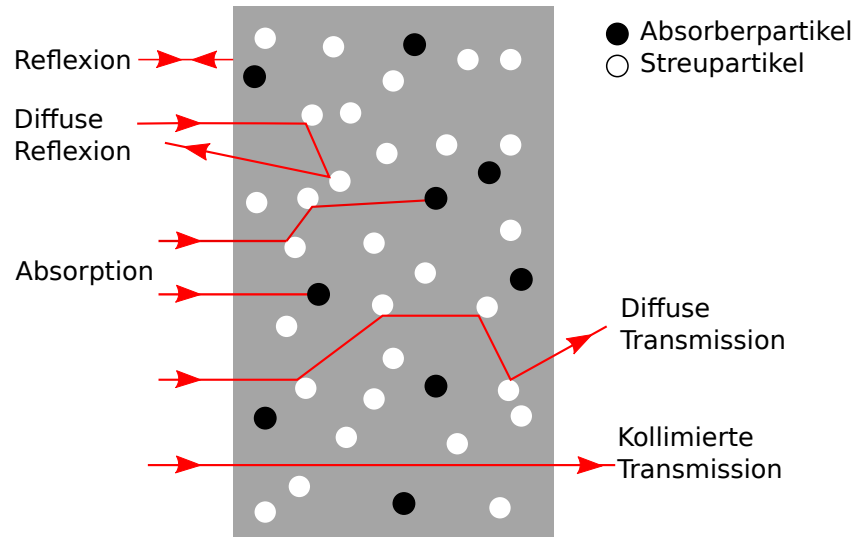


Abbildung 1: Lichtausbreitung in einem Medium mit Absorptionspartikel und Streupartikel.

Bei der Absorption wird ein Photon in Wärme umgewandelt. Es können aber auch Molekülschwingungen oder Quantenübergänge entstehen.

Bei der Streuung wird das einfallende Photon in eine andere Richtung weitergeleitet. Es gibt mehrere Arten von Streuung. Zwei davon sind die Raylight-Streuung und die Mie-Streuung.

Streuung wird als Raylight-Streuung bezeichnet, wenn der Partikelradius sehr klein gegenüber der Wellenlänge ist. Streuung wird als Mie-Streuung bezeichnet, wenn der Partikelradius in der gleichen Größenordnung, oder auch größer als die Wellenlänge ist [16, Seite 95-101]. Da die Größenordnung von Zellen eines Gewebes im μm Bereich ist, handelt es sich bei der Streuung in einem Gewebe nur um die Mie-Streuung. Streuung passiert aber auch im Inneren einer Zelle. Bei den Zellorganellen kommt es zur Raylight-Streuung.

Damit die Absorption und die Streuung bestimmt werden können, wird zunächst die kollimierte Transmission beschrieben. Die kollimierte Transmission hängt vom totalen Schwächungskoeffizienten μ_t und der Dicke eines Mediums ab. Dieser Koeffizient gibt an, wie sich das Licht über einen Weg durch ein Medium verhält. Mit dem Lambert-Beer-

Gesetz (Gleichungen 1) kann gezeigt werden, dass die Intensität mit steigendem μ_t und steigender Eindringtiefe d exponentiell abnimmt [16, Seite 200].

$$I_a = I_e e^{-\mu_t d} \quad (1)$$

Der totale Schwächungskoeffizient ist die Summe aus dem Absorptionskoeffizienten und dem Streukoeffizienten. (Gleichung (2)) [16, Seite 200].

$$\mu_t = \mu_a + \mu_s \quad (2)$$

Die Absorption von einem Medium mit ausschließlich Absorberpartikeln wird mit dem Absorptionskoeffizienten μ_a beschrieben. Die Intensität nimmt mit steigendem μ_a und steigender Eindringtiefe d exponentiell ab.

$$I_a = I_e e^{-\mu_a d} \quad (3)$$

Die Streuung von einem Medium mit ausschließlich Streupartikeln kann mit Hilfe des Streukoeffizienten μ_s beschrieben werden. Die Streuung kann Analog zum Lambert-Beer-Gesetz, mit der Gleichung 4, beschrieben werden.

$$I_a = I_e e^{-\mu_s d} \quad (4)$$

Oft wird auch statt des Streukoeffizienten μ_s der reduzierte Streukoeffizient μ'_s angegeben. Dieser Koeffizient gibt die effektive Anzahl von isotropen Streuereignissen an [17].

Der Streuanisotropiefaktor g ist ein Maß für die Verteilung der Streuungsrichtung. Er stellt den Mittelwert des Kosinus des Streuwinkels dar ($\cos(\theta)$). Der Streuanisotropiefaktor kann zwischen $g = 1$ (totale Vorwärtsstreuung) und $g = -1$ (totale Rückwärtsstreuung) liegen. Wenn der Körper in alle Richtungen gleich streut (isotrope Streuung) ist der Streuanisotropiefaktor gleich Null [1, Seite 49].

Der Streuanisotropiefaktor liegt bei menschlichem und tierischem Gewebe zwischen 0.7 bis 0.99 daher ist die Strahlung stark vorwärts gestreut [12, Seite 1-2] [18, Seite 2172].

Die Gleichung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem reduzierten Streukoeffizienten μ'_s , dem Streukoeffizienten μ_s und dem Streuanisotropiefaktor g .

$$\mu'_s = \mu_s(1 - g) \quad (5)$$

Die optischen Eigenschaften der Phantome sollten bei einer Wellenlänge von 650 *nm* dem Gewebe einer Labormaus entsprechen. Bei biologischem Gewebe wirken die verschiedenen Gewebezellen als Absorber beziehungsweise Streukörper. Das Gewebe besteht aus vielen verschiedenen und unterschiedlich großen Zellen. Bei den Phantomen werden als Absorber- und Streupigmente Materialien mit homogenen optischen Eigenschaften verwendet. So kann ein biologisches Gewebe nur näherungsweise nachgebildet werden.

Biologisches Gewebe hat bei einer Wellenlänge von 600 *nm* bis 1500 *nm* einen geringen Absorptionskoeffizienten. Der Streukoeffizient kann ein Vielfaches betragen [12].

Die Phantome sollen ein Gewebe mit einem Absorptionskoeffizienten $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$ und einem reduzierten Streukoeffizient $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$ simulieren.

1.2 Grundmaterial

Um eine lange Haltbarkeit, eine feste Form, Reproduzierbarkeit und stabile optische Eigenschaften erfüllen zu können, eignen sich als Grundmaterial Polyesterharze oder auch Epoxidharze. Diese Harze sind flüssig und werden normalerweise als Gießharze, beziehungsweise zum Isolieren von elektrischen Bauteilen eingesetzt. Durch Zugabe eines Härterers entsteht ein fester und chemisch robuster Kunststoff. Damit die Phantome ihre optischen Eigenschaften erhalten, wird dem Harz eine geeignete Menge von schwarzen und weißen Farbpartikeln hinzugefügt. Die schwarzen Farbpigmente werden für die Absorption benötigt, die Weißen dienen als Streumedium. Die Farbpigmente müssen sich gut mit dem Harz vermischen lassen und temperaturstabil sein. Als Farbpigmente können verschiedene Stoffe verwendet werden.

1.3 Schwarzpigmente

Die wichtigsten Schwarzpigmente sind Pigmentruße, Eisenoxidschwarz und verschiedene oxidische Mischpigmente. Die bedeutendsten Parameter für die Farbstärke und das Deckvermögen sind der Absorptionskoeffizient und die Teilchengröße [2, Seite 130].

1.3.1 Pigmentruße

Pigmentruße sind die am häufigsten eingesetzten Schwarzpigmente. Ruß ist ein teilmikrokristalliner Kohlenstoff. Pigmentrußpartikel sind zwischen 10 *nm* und 100 *nm* groß und nahezu kugelförmig. Neben der chemischen Beständigkeit haben Pigmentruße eine gute Licht- und Wetterstabilität. Es gibt drei verschiedene Arten von Rußpartikeln. Es wird zwischen Flammrußen, Furnacerrußen und Gasrußen unterschieden. Diese Partikel haben eine unterschiedliche Teilchengröße, Struktur und Oberflächeneigenschaften.

Gasruße und Furnacerruße sind feinteilige Pigmente mit einer Partikelgröße von 10 bis 30 *nm*. Flammruße sind größer als 30 *nm*. Pigmentruße haben auch im Ultraviolett- und Infrarot-Bereich eine Lichtabsorption von bis zu 99,8 % [2, Seite 131-134].

Eisenoxidschwarz-Pigmente

Die Summenformel von Eisenoxidschwarz-Pigmenten entspricht in etwa der von Magnetit, (Fe_3O_4) und ist daher ferromagnetisch. Diese Schwarzpigmente erreichen nicht die Farbtiefe von Pigmentruß, lassen sich aber leichter mischen [2, Seite 137].

Oxidische Mischpigmente

Oxidische Mischpigmente setzen sich aus farbigen Oxidpigmenten zusammen. Die Art und die Menge der verschiedenen Pigmente bestimmen die Farbe. Die bedeutendsten oxidischen Mischpigmente sind Rutil- und Spinell-Mischphasenpigmente. Das Farbverhalten von Spindelschwarz-Pigmenten entspricht etwa dem der Eisenoxid-Schwarz-Pigmente [2, Seite 139].

1.4 Weißpigmente

Unter den Weißpigmenten hat das Titandioxid (TiO_2) wegen seines hohen Brechungsindex ($n = 2.75$) [2, Seite 368] und der guten chemischen Beständigkeit von allen Streupigmenten den größten Marktanteil. Die gängigste Kristallmodifikation ist Rutil. Rutil wird aus Ilmenit (Eisennitrat) nach dem Sulfatverfahren oder aus natürlichem Rutil nach dem Chlorverfahren gewonnen [8, Seite 146]. Andere Weißpigmente wie zum Beispiel Zinkoxidpigmente oder Zinksulfidpigmente haben keine so große Bedeutung [2, Seite 130].

Titandioxid-Pigmente

Titandioxidpigmente werden im Sulfat- oder Chlorid-Verfahren hergestellt. Im Handel gibt es etwa 400 verschiedene TiO_2 -Pigmenttypen. Die Pigmente kann man in Pulverform oder auch in einer wässrigen Suspension kaufen [2, Seite 129]. Das Streuvermögen steigt mit zunehmender Teilchengröße. Es existiert jedoch eine spezifische Maximalgröße. Oberhalb dieser Größe werden die Partikel im Inneren optisch inaktiv. Dadurch treten Interferenzen auf und das Streuvermögen nimmt wieder ab. Die optimale Partikelgröße ist etwa $0.25 \mu m$ [8, Seite 205].

2 Methoden

In diesem Kapitel wird die Herstellung von 13 reproduzierbaren Phantomen mit definierten optischen Eigenschaften beschrieben.

Zu Beginn musste eine geeignete Gussform gefunden werden. Es wurden mehrere verschiedene Gussformen getestet, jedoch erfüllen nur wenige die gewünschten Anforderungen.

Nach dem eine geeignete Gussform gefunden wurde, wurden verschiedene Epoxidharzproben hergestellt und vermessen. Da keine gleichmäßig polierten Messproben mit konstanter Dicke aus dem eingefärbten Epoxidharz hergestellt werden konnten, wurden die Epoxidharzmischungen in speziell angefertigte Küvetten aus Glas gegossen und vermessen. Beim optischen Übergang zwischen Glas und Epoxidharz könnte es zu Verlusten durch Reflexion kommen. Aus diesem Grund musste die Brechzahl vom Epoxidharz durch die Bestimmung des Brewsterwinkels bestimmt werden.

Es wird angenommen, dass der Absorptionskoeffizient μ_a und der Streukoeffizient μ_s eine lineare Beziehung zur Konzentrationsänderung der Absorberfarbe beziehungsweise der Streufarbe haben. Weiters wird angenommen, dass sich keine Streupartikel in der Absorberfarbe befinden und auch keine Absorberpartikel in der Steufarbe sind. Dadurch konnten der Absorptionskoeffizient und der Streukoeffizient getrennt gemessen werden. Diese Hypothesen wurden überprüft. Mit Hilfe dieser Messwerte konnte ein Rezept zur Herstellung der optischen Phantome mit definierten optischen Eigenschaften erzeugt werden. In den folgenden Unterkapiteln wird die genaue Vorgehensweise beschrieben.

2.1 Gussform

Damit mehrere optische Phantome erstellt werden können, muss zu Beginn eine passende Gussform gefunden werden. Die Gussform soll wiederverwendbar sein. Es wurden mehrere Gussformen aus verschiedenen Materialien erstellt und getestet. In Abbildung 2 ist die Zeichnung einer wiederverwendbaren Gussform dargestellt.

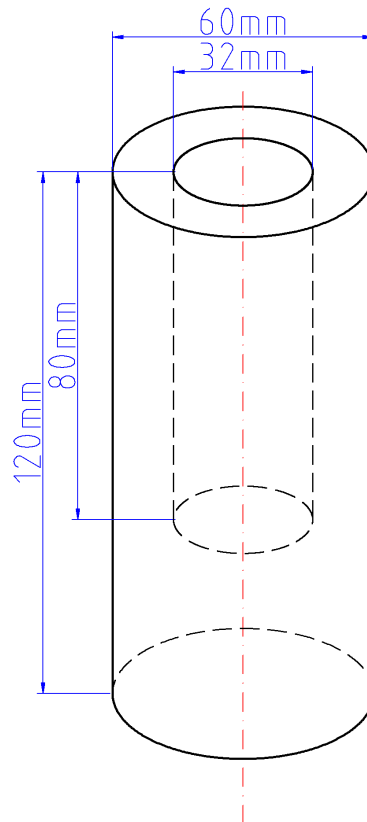


Abbildung 2: Zeichnung einer wiederverwendbaren Gussform

Die Gussform ist das Negativ eines Zylinders. Die innere Wand der Gussform muss glatt und gerade sein. Daher wurde als Negativform ein Reagenzglas mit einer Länge von 120 mm und einem Durchmesser von 32 mm verwendet. Das Reagenzglas wurde mit einem Klebstoff (UHU plus sofortfest 2-K-Epoxydharzkleber) in die Mitte einer oben aufgeschnittenen Getränkedose geklebt. Der Durchmesser der Dose sollte mindestens 60 mm sein, da das Material mit dem die Form ausgegossen wird, eine Wandstärke von mindestens 8 mm haben muss.

2.1.1 Gussform aus Formaform

Die synthetische, gummielastische Formbaumasse Formaform (sculptare Boesner GmbH, A) besteht aus den drei Komponenten: Formaform, Formaform-Liquid und Formaform-Thermolan. Die Formbaumasse ist im Handel als Set erhältlich. Die Abformmasse wurde nach der mitgelieferten Verarbeitungsanleitung verarbeitet. Es konnten wiedereinschmelzbare Formen, die jedoch nicht mehr als 35°C aushalten, gegossen werden. Durch die Zugabe des Formaform-Thermolan konnten auch bis zu 95°C hitzebeständige Formen erzeugt werden, welche jedoch nicht wieder eingeschmolzen werden können. In Abbildung 3 ist die Gussform dargestellt.



Abbildung 3: Gussform aus Formaform

Die Oberfläche des Reagenzglas und der Getränkedose mussten vor dem Abformen mit einem Formentrennmittel benetzt werden. Das Trennmittel musste etwa 20 Minuten trocknen bevor die Formbaumasse hineingegossen werden konnte. Durch das Trennmittel lässt sich die hart gewordene Formbaumasse ohne Schaden vom Reagenzglas und der Dose abziehen. Als Formentrennmittel wurde ein Formen-Trennspray mit Teflon (sculptare, Boesner GmbH, A) und das Formen-Trennmittel (Hellrose sculptare, Boesner GmbH, A) verwendet.

2.1.2 Gussform aus Silikon-Kautschuk-Abformmasse

Zur Erstellung einer weiteren Gussform wurde Silikon-Kautschuk-Abformmasse verwendet. Silcotin HB (Artidee, D) ist eine hitzebeständige, gießfähige Silikon-Formbaumasse mit mittlerer Elastizität. Die Abformmasse wurde genau nach der mitgelieferten Verarbeitungsanleitung verarbeitet. Nach dem Vermischen des Silcotin HP mit dem in der Verpackung enthaltenen Silikon-Vernetzer bleiben weniger als 60 Sekunden um das Gemisch in die Gussform zu gießen. Das Silikon vulkanisiert bei Raumtemperatur (kondensationsvernetzende Aushärtung) und das Aushärten dauert etwa 24 Stunden.

Eine weniger zähflüssige Silikon-Kautschuk-Abformmasse ist das Silcolan HV (Artidee, D). Dieses Silikon wird gleich wie das zuvor genannte Silicotin HB verarbeitet. Nach Zugabe des in der Verpackung enthaltenen Vernetzers blieb weniger als eine Minute zur Verarbeitung. Das Silikon vulkanisiert bei Raumtemperatur (kondensationsvernetzende Aushärtung). Dies dauert etwa 24 Stunden. In Abbildung 4 ist die Gussform dargestellt.



Abbildung 4: Gussform aus Silikon (Silcolan HV)

Die Oberfläche des Negativs (Reagenzglas und Getränkedose) muss vor dem Gebrauch mit einem Trennmittel benetzt werden, da die Silikon-Kautschuk-Abformmasse sonst auch

nicht ohne Schaden von dem Reagenzglas und der Dose getrennt werden kann. Als Formentrennmittel wurde wieder der Formen-Trennspray mit Teflon und das Formen-Trennmittel Hellrose verwendet.

2.1.3 100 ml-Katheterspritze als Gussform

Als alternative zylindrische Gussform wurde eine an ihrer Spitze abgedichtete 100ml-Katheterspritze (Omnifix B.Braun) als Gussform verwendet. Die 100 ml Spritze ist temperaturstabil, hat einen Innendurchmesser von 35 mm und eine Länge von 120 mm. In Abbildung 5 ist die Katheterspritze dargestellt.



Abbildung 5: 100 ml-Katheterspritze als Gussform

Durch die Wärmeentwicklung beim Aushärten des Epoxidharzes entstehen Oberflächenschäden. Aus diesem Grund konnte keine Gussform gefunden werden, bei der die Phantome nicht mit einer Drehbank nachbearbeitet werden mussten.

Die 100 ml-Katheterspritze eignet sich am besten als Gussform für die Phantome. Da die Spritze aus Polypropylen (PP) besteht, haftet das ausgehärtete Epoxydharz nicht an dieser Gussform. Dadurch kann auf ein Formtrennmittel verzichtet werden. Die Gussform ist temperaturstabil, steif, wiederverwendbar und preiswerter als alle anderen Gussformen. Die Herstellung von Gussformen aus der Formbaumasse Formaform war nicht zufriedenstellend. Die Herstellung von Gussformen aus der Silikon-Kautschuk-Abformmasse war ebenfalls nicht zufriedenstellend.

2.2 Materialien für das Phantom

Als Grundlage zur Erstellung der Phantome wurde die Information von der Webpage "*How to make solid Phantoms*" [17] verwendet. Auf dieser Internetseite wird gezeigt, wie optische Phantome erstellt, beziehungsweise welche Komponenten verwendet werden.

2.2.1 Grundmaterial

Als Grundmaterial wurde auf der Internetseite [17] das Epoxydharz Araldite MY753 und der Härter XD716 verwendet. Diese Komponenten konnten jedoch nicht mehr käuflich erworben werden. Laut einer Anfrage bei der Firma "*Haas Group International SCM Limited*" werden das Harz und der Härter nicht mehr produziert. Die von dieser Firma empfohlene Alternative sind das Epoxydharz Araldite DBF (Huntsman Advanced Materials GmbH) und der Härter Aradur HY951 (Huntsman Advanced Materials GmbH).

Die Grundformen der Phantome sind Zylinder mit 70 mm Länge und einem Durchmesser von 30 mm . Als Grundmaterial wurde das zuvor erwähnte Epoxydharz Araldite DBF und der zugehörige Härter Aradur HY591 verwendet. Das ausgehärtete Harz-Härter-Gemisch hat eine hohe mechanische Festigkeit, ist lange haltbar und chemisch robust [10, Seite 1]. Die Abbildung 6 zeigt die verschiedenen erzeugten Phantome.

Die Bohrungen der Phantome haben einen Durchmesser von 5 mm und sind 50 mm tief. In die Bohrungen wurde später ein Epoxidharz mit doppeltem Streu- beziehungsweise Absorptionskoeffizienten gegossen. Weiters wurden mehrere Phantome erzeugt, deren Bohrungen nicht befüllt wurden. Diese Phantome können später mit fluoreszierenden Materialien befüllt werden. Das Phantom in Abbildung 6 (a) wurde zwei mal erzeugt. Das Phantom in Abbildung 6 (b) wurde vier mal hergestellt. Das Phantome in Abbildung 7 (a) wurde drei mal hergestellt. Das Phantome in Abbildung 7 (b) wurde vier mal hergestellt

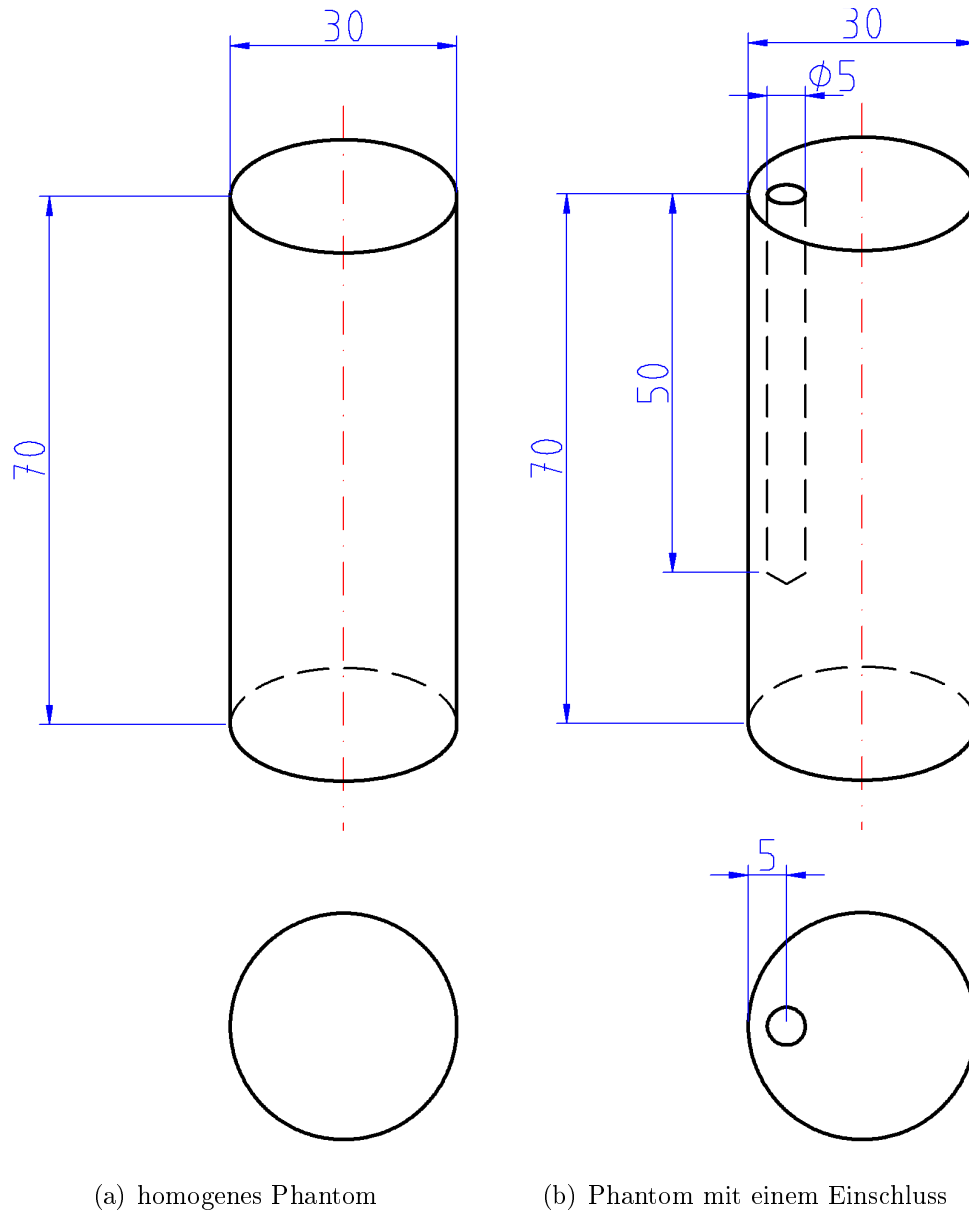


Abbildung 6: Phantome mit Bohrungen

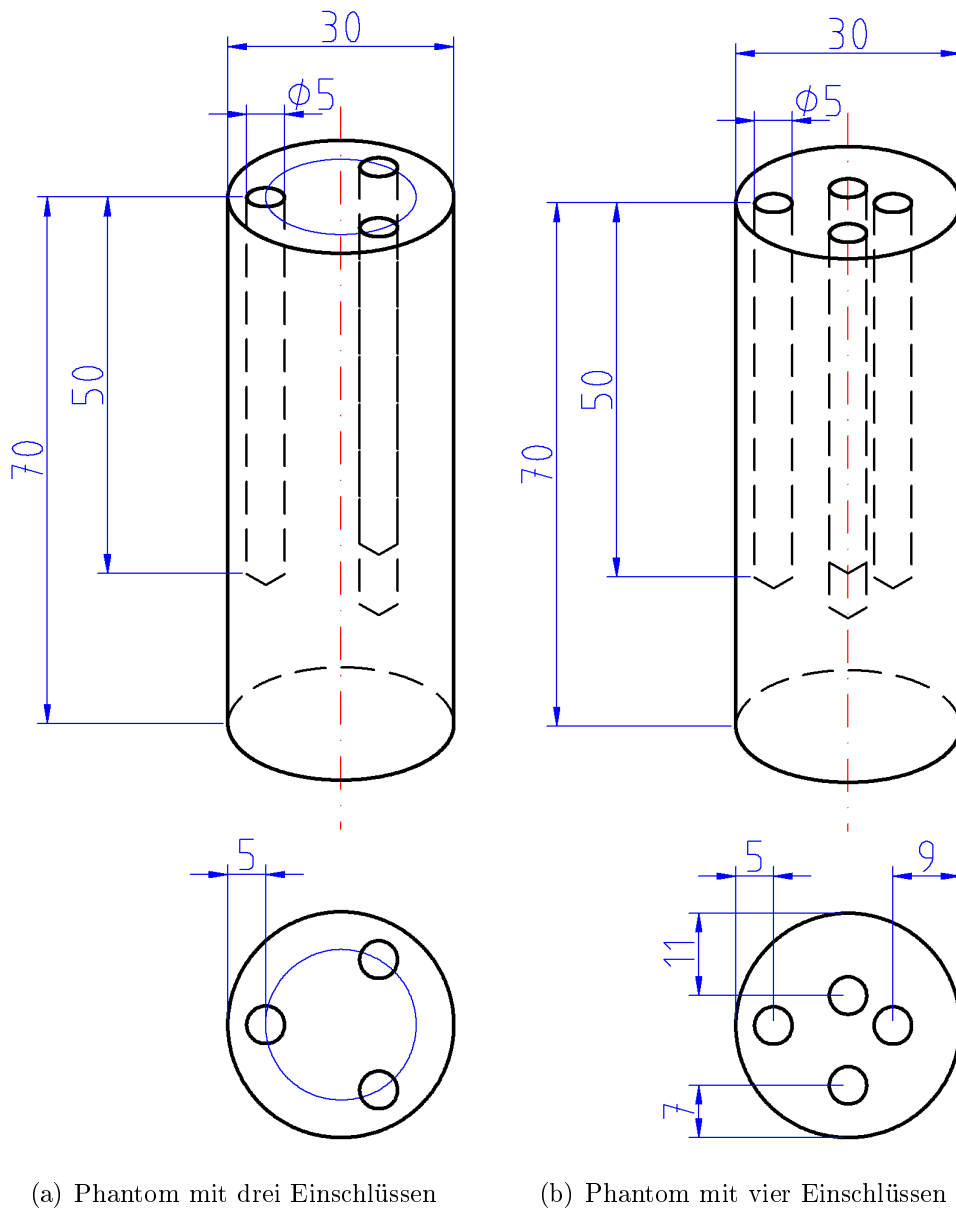


Abbildung 7: Phantome mit Bohrungen

2.2.2 Absorptionspigmente

Es gibt eine Vielzahl von anderen Farbpigmenten die verwendet werden können. Grundsätzlich können alle Farben, die in Styrol löslich sind, mit dem Epoxidharz kombiniert werden. Die Absorptionsmaxima der meisten Farben befinden sich nicht im infraroten Bereich, sondern im sichtbaren Bereich [5, Seite 848]. Als Absorberpigmente wurden zwei unterschiedliche Farbpigmente verwendet. Die Absorberfarbe (Superblack Pigment, Tiranti Ltd, London, UK) und der Infrarotabsorber Projet 900NP (Fujifilm Imaging Colorants Ltd, Hexagon Tower, Blackley, Manchester, UK).

Die Absorberfarbe Superblack ist zähflüssig und eignet sich sehr gut zur Färbung von Epoxidharzen. Über die Inhaltsstoffe, deren Partikelgröße und deren Form konnten jedoch keine Informationen beschafft werden.

Projet 900NP ist ein auf Phthalocyanin basierender Infrarotabsorber und hat sein Absorptionsmaximum bei etwa 860 nm [7]. Das Absorptionsspektrum der Absorberfarbe ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier kann man erkennen, dass der Absorptionskoeffizient bei 800 nm um den Faktor drei größer ist als bei 650 nm.

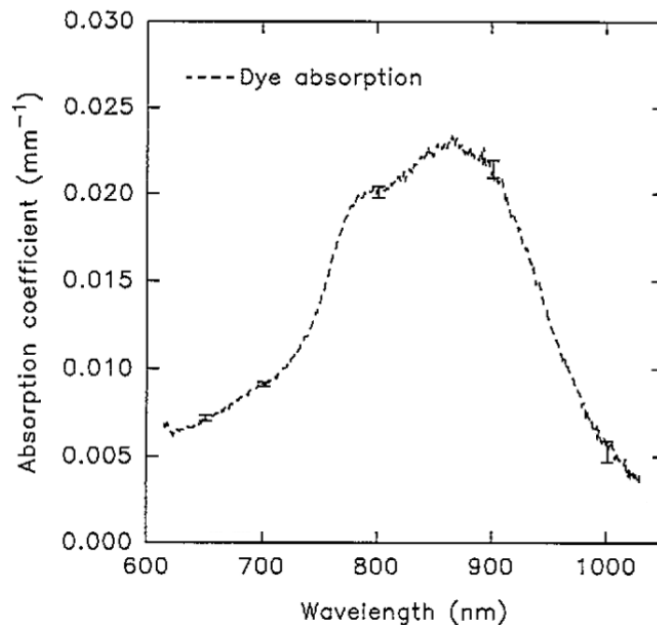


Abbildung 8: Absorptionskoeffizient als Funktion der Wellenlänge einer Probe, Projet 900NP [6, Seite 959]

Die Absorberfarbe Projet 900NP wird in Pulverform geliefert. Das Pulver ist dunkelgrün bis schwarz. Der Absorber ist chemisch robust, temperaturstabil und lässt sich mit dem Epoxidharz mischen [7]. Der Mischvorgang mit Projet 900NP dauert wesentlich länger als das Vermischen von der Absorberfarbe Superblack mit dem Epoxidharz.

2.2.3 Streupigment

Als Streupigment wurde eine konzentrierte Suspension von Titandioxid-Partikel Superwhite Polyester Pigment (Tiranti Ltd, London, UK) verwendet. Mit Hilfe eines Elektronenmikroskops wurde in [5] eine Probe mit 300 zufällig ausgewählten Partikeln untersucht und so die Größe und Form der Pigmente bestimmt. Die Durchmesser der TiO_2 -Pigmente betragen $0.27 \mu m \pm 0.07 \mu m$ und sind nahezu kugelförmig. Die innere Absorption der Streupartikel ist sehr klein. Sie beträgt im Nah-Infrarotbereich etwa $0.005 mm^{-1}$ bei $875 nm$ [5, Seite 848]. In Abbildung 9 ist der Streukoeffizient als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Der Streukoeffizient ist bei $800 nm$ um den Faktor 1.3 kleiner als der Streukoeffizient bei der Wellenlänge von $650 nm$.

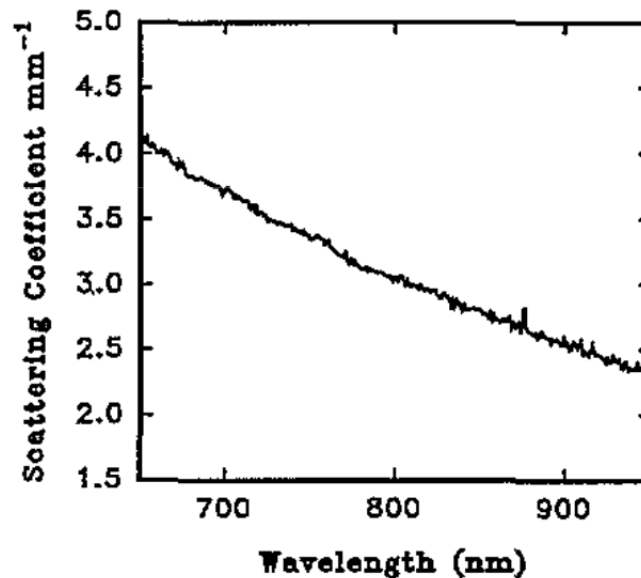


Abbildung 9: Streukoeffizient als Funktion der Wellenlänge einer Probe, Superwhite [5, Seite 850]

Für die verwendeten Partikel aus Titandioxid (TiO_2) beträgt der Wert für den Streuanisotropiefaktor g bei einer Wellenlänge von 650 nm etwa $g = 0.5$ [5, Seite 848 -849].

Abbildung 10 zeigt den Anisotropiefaktor als Funktion der Wellenlänge einer Probe.

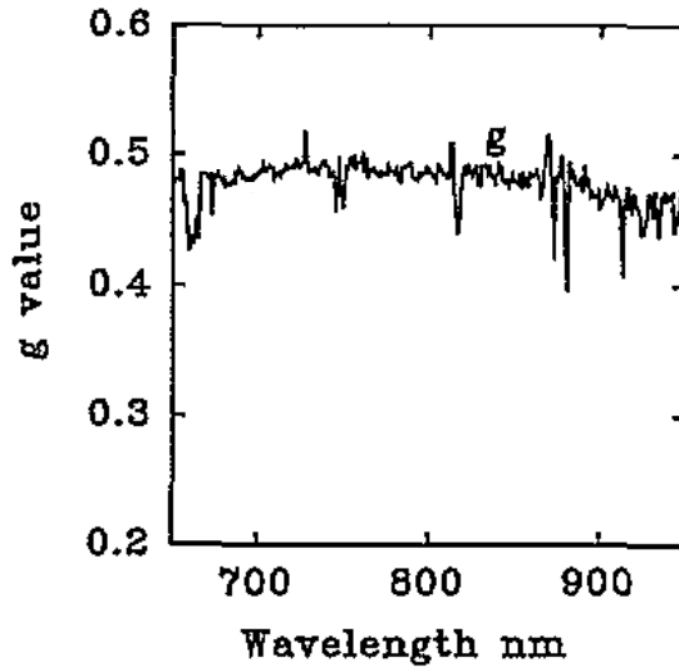


Abbildung 10: Anisotropiefaktor als Funktion der Wellenlänge einer Probe, Superwhite[5, Seite 850]

Der Wert für g ist kleiner als der, der meisten biologischen Geweben (0.7 bis 0.99). Der maximal mögliche Wert, mit Epoxidharz + Streupartikel (TiO_2) mit einer Partikelgröße von $0.7\ \mu m$, ist $g = 0.7$. Soll der Streuanisotropiefaktor größer sein, müssen andere Streupigmente wie zum Beispiel Aluminiumoxid (Al_2O_3) mit einer Partikelgröße von $1\ \mu m$ verwendet werden. Dadurch kann ein Streuanisotropiefaktor $g = 0.97$ erreicht werden [5, Seite 849].

2.3 Erstellung der Glasküvetten

Der Absorptionskoeffizient und der Streukoeffizient könnten mit Hilfe von eigens angefertigten Glasküvetten gemessen werden. Als Material für die Glasküvetten wurden Mikroskop-Objektträger (76 x 26 x 1 mm) verwendet. Die Küvetten wurden mit einem Glaskleber (Loctite Superkleber Glaskleber 3 g) zusammengeklebt. In Abbildung 11 ist eine der Glasküvetten dargestellt.

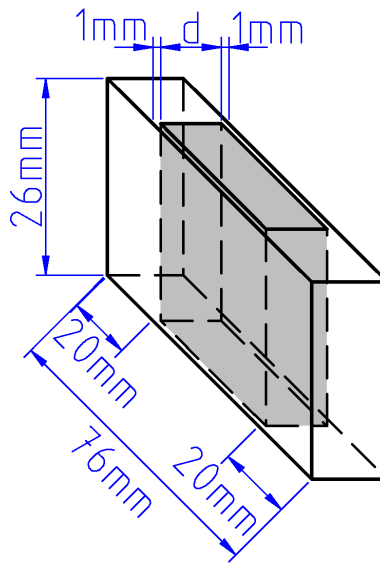


Abbildung 11: Küvette aus Objektträgerglas, d = Dicke des Epoxidharzes in der Küvette

2.3.1 Glasküvetten mit Absorberpigmenten

Damit das Verhalten des Absorptionskoeffizienten über die sich ändernde Dicke bestimmt werden konnte, wurden 24 Glasküvetten erstellt und mit Epoxidharz befüllt.

Die Glasküvetten haben verschiedene Dicken d , zwei verschiedene Farbkonzentrationen und zwei verschiedene Absorberfarben (Superblack und Projet 900NP). Die Dicken reichen, von $d= 1 \text{ mm}$ bis $d= 6 \text{ mm}$. Da Objektträger eine Stärke von 1 mm haben, wurden diese in entsprechenden Paketen als Seitenteile der Glasküvette verwendet. Die Konzentration wurde durch das Harz-Härter-Absorberfarbengemisch bestimmt.

Da die Absorberfarbe Projet 900NP in Pulverform geliefert wird und die Farbe sehr stark verdünnt werden muss, wurde zu Beginn eine Stammlösung bestehend aus 200 g Harz + 0.01 g Projet 900NP erstellt. Das entspricht 50 μg Absorberpigmenten pro 1 g Harz. Die Stammlösung wurde mit 900NPSL1 bezeichnet. Die Absorberfarbe löst sich nur sehr langsam im Harz. Aus diesem Grund müssen die Komponenten etwa sechs Stunden langsam miteinander vermischt werden. Da am Institut keine geeignete Mischmaschine zur Verfügung stand, wurde eine 0.5 Liter PVC Flasche mit großer Öffnung bis zur Hälfte mit Glaskugeln gefüllt. Als Glaskugeln wurden handelsübliche, am besten unterschiedlich große Murmeln verwendet. Als nächstes wurde die PVC-Flasche in eine Drehbank eingespannt und mit der kleinsten Drehzahl etwa drei Stunden lang gedreht. Nach diesen drei Stunden wurde die Flasche über Nacht ruhig stehen gelassen. Am nächsten Morgen wurde erneut etwa drei Stunden lang gemischt. Durch das Mischen mit den Kugeln entstanden viele Luftblasen. Um diese wieder aus dem Harz zu bekommen, musste das Gemisch wieder ein paar Stunden ruhig stehen, danach wurde die Stammlösung zur weiteren Verarbeitung verwendet. In Tabelle 1 sind die Glasküvetten mit den verschiedenen Dicken und den zwei unterschiedlichen Rezepten für die Absorberpigmentkonzentrationen aufgelistet.

Messreihe	Dicke in <i>mm</i>	Konzentration in $\frac{\mu\text{g}}{\text{g}}$	Harz + Härter + Pigment
1	1 bis 6	101	90 g Harz + 0.01 g Superblack + 9 g Härter
2	1 bis 6	202	90 g Harz + 0.02 g Superblack + 9 g Härter
3	1 bis 6	9.09	80 g Harz + 20 g 900PNSL1 + 10 g Härter
4	1 bis 6	18.18	70 g Harz + 40 g 900NPSL1 + 10 g Härter

Tabelle 1: Glasküvetten mit verschiedenen Dicken und Konzentrationen von der Absorberfarbe Superblack Polyester Pigment und der Absorberfarbe Projet 900NP.

Da sich die Absorberfarbe Superblack gut mit dem Eopxidharz mischen lässt, konnten diese Glasküvetten ohne eine eigene Stammlösung hergestellt werden. Die in Tabelle 1 dargestellten Gemische wurden etwa 10 Minuten per Hand miteinander langsam vermischt und in die Glasküvetten gegossen.

Damit die Beziehung zwischen der Konzentration der Absorberfarbe und dem Absorptionskoeffizienten gemessen werden konnte, wurde die Stammlösung 900NPSL1 verwendet. Für diese Messung sind weitere fünf Glasküvetten angefertigt worden. Diese Küvetten haben eine Dicke von 4.11 *mm*.

Als Küvettenseitenwände wurden hier Glasrohre mit 4.11 *mm* Außendurchmesser verwendet. Die zuvor verwendeten Seitenwände bestehen aus zusammengeklebten Gläsern. Die Produktion dieser Seitenwände ist sehr zeitaufwändig und durch das Verkleben der einzelnen Gläser kann die Dicke variieren. Durch die Verwendung der Glasrohre konnte eine konstante Dicke und zwei parallele Seitenwände der Küvetten garantiert werden. Tabelle 2 zeigt Glasküvetten mit gleich bleibenden Dicken und verschiedenen Absorberpigmentkonzentrationen. Die hier dargestellten Gemische wurden wieder etwa 10 Minuten per Hand miteinander langsam vermischt und in die Küvetten gegossen.

Glasküvette	Dicke in <i>mm</i>	Konzentration in $\frac{\mu g}{g}$	Harz + Härter + Pigmente
1	4.11	0	10 <i>g</i> Harz + 0 <i>g</i> 900NPSL1 + 1 <i>g</i> Härter
2	4.11	9.091	8 <i>g</i> Harz + 2 <i>g</i> 900NPSL1 + 1 <i>g</i> Härter
3	4.11	13.63	7 <i>g</i> Harz + 3 <i>g</i> 900NPSL1 + 1 <i>g</i> Härter
4	4.11	18.18	6 <i>g</i> Harz + 4 <i>g</i> 900NPSL1 + 1 <i>g</i> Härter
5	4.11	22.72	5 <i>g</i> Harz + 5 <i>g</i> 900NPSL1 + 1 <i>g</i> Härter

Tabelle 2: Glasküvetten mit verschiedenen Konzentrationen der Absorberfarbe Projekt 900NP und einer Dicke $d = 4.11$ *mm*

2.3.2 Glasküvetten mit Streupigmenten

Damit die Beziehung zwischen der Konzentration der Streufarbe und dem Streukoeffizienten gemessen werden konnte, wurde eine weitere Stammlösung, bestehend aus 200 g Harz + 0.05 g Superwhite Polyester Pigment, erstellt. Das entspricht 250 μg Streupigmente pro 1 g Harz. Diese Stammlösung wurde mit SWPSL bezeichnet. Die Farbe Superwhite ist flüssig und lässt sich gut mit dem Harz mischen. Zum Mischen wurde wieder eine PVC-Flasche mit Glaskugeln (Murmeln) verwendet, jedoch wurde das Gemisch per Hand nur etwa 15 Minuten lang langsam geschüttelt. Um die bei diesem Mischvorgang entstandenen Luftblasen wieder aus der Stammlösung zu bekommen, musste die PVC Flasche wieder ein paar Stunden lang ruhig stehen.

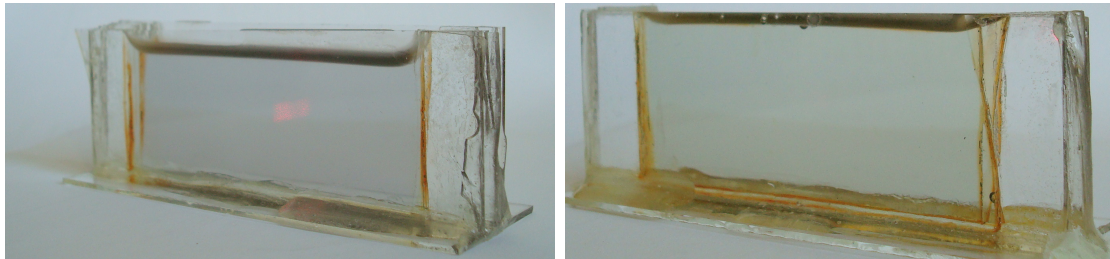
Für diese Messung wurden erneut fünf Glasküvetten angefertigt. Diese Küvetten haben eine Dicke von 4.11 mm. Als Küvetten-Seitenwände wurden wie zuvor, Glasrohre mit 4.11 mm Außendurchmesser verwendet. Tabelle 3 zeigt Glasküvetten mit einer gleich bleibenden Dicke und einer sich ändernden Streupigmentkonzentration. Die hier dargestellten Gemische wurden wieder etwa 10 Minuten per Hand miteinander langsam vermischt und in die Küvetten gegossen.

Glasküvette	Dicke in mm	Konzentration in $\frac{\mu\text{g}}{\text{g}}$	Harz + Härter + Pigmente
1	4.11	0	10 g Harz + 0 g SWSL + 1 g Härter
2	4.11	11.36	9.5 g Harz + 0.5 g SWSL + 1 g Härter
3	4.11	22.72	9 g Harz + 1 g SWSL + 1 g Härter
4	4.11	45.45	8 g Harz + 2 g SWSL + 1 g Härter
5	4.11	68.18	7 g Harz + 3 g SWSL + 1 g Härter

Tabelle 3: Glasküvetten mit verschiedenen Konzentrationen der Streufarbe Superwhite Polyester Pigment und einer Dicke $d = 4.11 \text{ mm}$

2.4 Kontrolle der Glasküvetten (Absorberpigmenten)

Da keine Informationen über die Inhaltsstoffe der Farbe Superblack Poyester Pigment beschafft werden konnten, war nicht sichergestellt ob eventuell auch Streupigmente in der Absorberfarbe enthalten sind. Aus diesem Grund wurde ein Laserstrahl von einem Lasermodul LP -705 ($<5\text{ mW}$, 630 nm bis 680 nm) senkrecht auf eine Glasküvette mit einer Dicke von 5 mm mit der Absorbermischung Superblack gerichtet. Danach wurde dieser Vorgang bei einer gleich dicken Glasküvette mit der Absorberfarbe Projet 900NP wiederholt. Die Abbildung 12 zeigt die zwei Glasküvetten.



(a) Superblack

(b) Projet 900NP

Abbildung 12: Glasküvetten mit Absorberpigmenten

Aufgrund von Streueignissen in Abbildung 12(a) kann davon ausgegangen werden, dass die Absorberfarbe Superblack nicht nur aus absorbierenden Pigmenten besteht, sondern auch noch weitere andere streuende Teilchen enthält. Aus diesem Grund wurde diese Farbe nicht zur Herstellung der Phantome verwendet.

2.5 Bestimmung der Brechzahl

Um sicher zu gehen, dass es beim optischen Übergang von Glas zu Epoxidharz zu keinen größeren Verlusten kommt, musste der Brechungsindex n des Epoxidharzes bestimmt werden. Dies wurde mit Hilfe der Messung des Brewsterwinkels Θ_B gemacht. Die Gleichung (6) zeigt den Zusammenhang von dem Brewsterwinkel und der Brechzahl. Für die Brechzahl von Luft wurde $n_1 = 1$ angenommen.

$$\Theta_B = \arctan \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

Die Abbildung 13 zeigt den Messaufbau zur Messung des Brewsterwinkels.

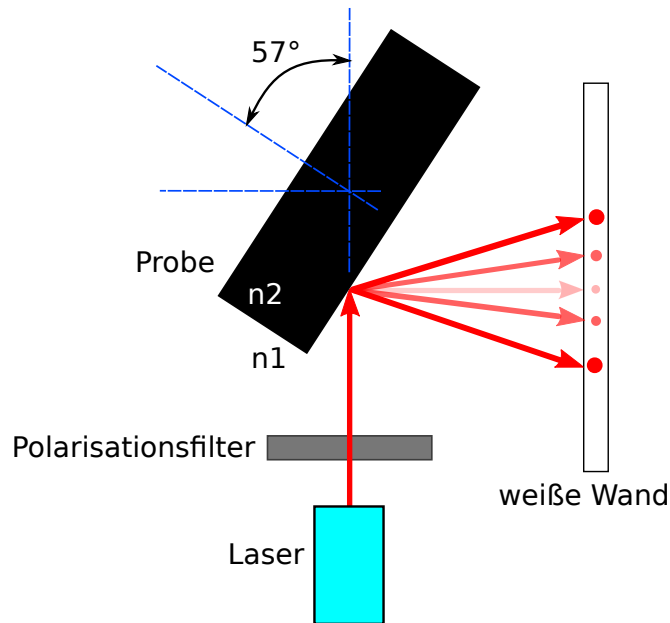


Abbildung 13: Messaufbau zur Messung des Brewsterwinkels.

Der Messaufbau besteht aus einem Lasermodul LP-705 ($< 5 \text{ mW}$, 630 nm bis 680 nm), einem Polarisationsfilter, einer drehbaren Einspannvorrichtung für die Messprobe und einer weißen Wand aus Papier. Das Lasermodul strahlt den Laserstrahl über ein Polarisationsfilter auf die Epoxidharzprobe. Die Epoxidharzprobe wurde schwarz eingefärbt, da es sonst zu Reflexionen von einem von hinten einfallenden Licht kommen könnte. Die Erstellung der Epoxidharzprobe ist in Kapitel 2.5.1 beschrieben.

Der Winkel der Probe wird so lange verändert bis nahezu keine Reflexion mehr von der Probe auf die weiße Wand (Papier) abstrahlt. Hat man die minimale Reflexion gefunden, so ist dies der Brewsterwinkel. Mit diesem Messaufbau konnte auf ein Grad genau gemessen werden.

Mit dem gleichen Messaufbau wurde auch ein Schweißerschutzfilter (ATHERMAL N=7 Schott AG) und ein Mikroskop Objektträgerglas gemessen. Das Objektträgerglas wurde an der Rückseite geschwärzt.

Es stellte sich heraus, dass die Epoxidharzprobe und die beiden Gläser etwa den selben Brewsterwinkel von $\Theta_B = 57^\circ$ haben und somit die gleiche Brechzahl von $n = 1.54$ haben.

2.5.1 Erstellung der Probe zur Messung des Brewsterwinkels

Zu Beginn wurde ein Epoxidharz aus 10 g Epoxidharz und 0.5 g Absorberfarbe Superblack und 1 g Härter hergestellt. Das Gemisch wurde etwa fünf Minuten lang verrührt. Das Mischverhältnis von Harz und Härter beträgt zehn Gewichtsteile Harz und einen Gewichtsteil Härter. Dieses Verhältnis muss exakt eingehalten werden. Das Gemisch wurde in eine Einmal-Makro-Küvette (4.5 ml, 10 x 35 mm) gegossen und zum Aushärten 24 Stunden bei Raumtemperatur zur Seite gestellt [10].

Die Einmal-Makro-Küvette besteht aus Polystyrol (PS). Dieses Material eignet sich sehr gut, da das ausgehärtete Harz-Härter Gemisch auf diesem Kunststoff nicht kleben bleibt. Aus diesem Grund kann das ausgehärtete Material aus der Küvette heraus gebrochen und als Probenmaterial verwendet werden.

2.6 Vergleich der Brechzahlen

Um sicher zu gehen, dass das Epoxidharz annähernd die gleiche Brechzahl wie Glas besitzt, wurde ein zweiter Messaufbau verwendet. Dieser Messaufbau ist in Abbildung 14 dargestellt.

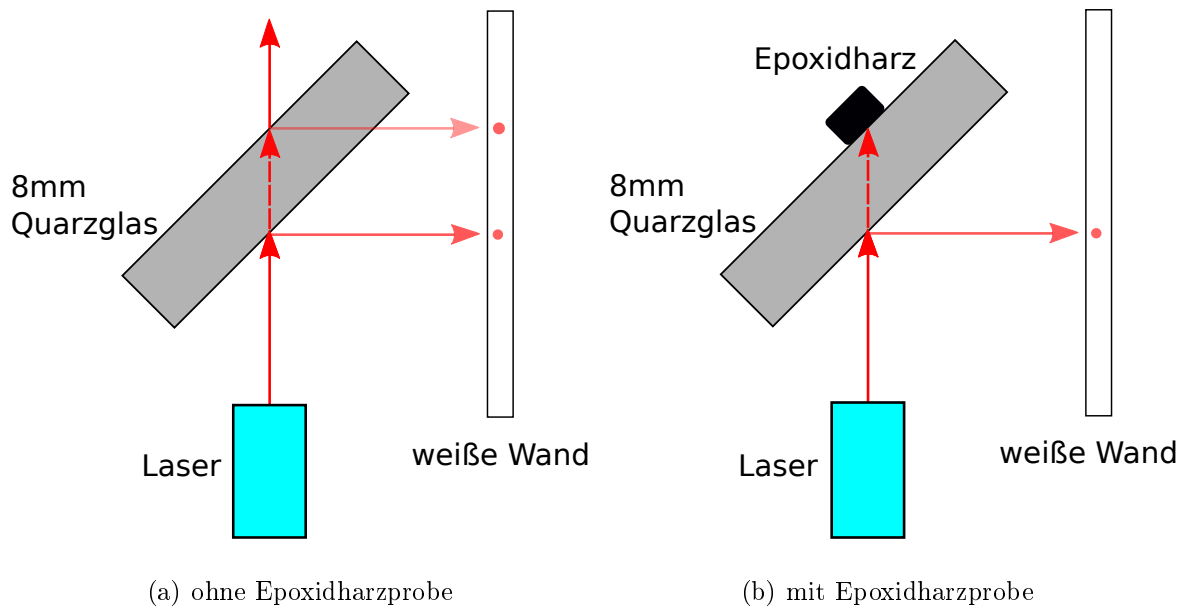


Abbildung 14: Brechzahlvergleich mit einer 8 mm dicken Glasplatte

Der Messaufbau besteht aus einer Laserquelle (Helium-Neon-Laser, 632.8 nm, max 10 mW, linear polarisiert, Modell: 3225H-PC, einer 8 mm Dicken Quarzglasplatte und einer weißen Wand aus Papier. Der Laser hat einen dünnen Laserstrahl. Dieser Strahl wurde auf die Quarzglasplatte, die in einem Winkel von 45° zum Laser steht, gerichtet. Der Laserstrahl wurde wie in Abbildung 14 a) dargestellt, wegen dem unterschiedlichen Brechungsindex von Luft $n_1 = 1$ und dem Glas $n_2 = 1.5$ an der Glas Vorderseite und an der Glas Rückseite reflektiert.

Die Abbildung 14 b) zeigt die Glasplatte mit einer Probe des zuvor gemischten Harz-Härter-Absorberfarbe-Gemisches an der Rückseite des Glases. Da es hier zu keiner sichtbaren Reflexion an der Glas Rückseite kommt wird davon ausgegangen, dass das Glas und die Epoxidharzprobe in etwa die gleiche Brechzahl haben.

2.7 Messung der kollimierten Transmission

Die zuvor erzeugten Küvetten bestehen aus Glas. Glas hat einen Brechungsindex $n_2 = 1.5$ und Luft $n_1 = 1$, dadurch werden beim Übergang von Luft zu Glas $R_{l,g} = 4\%$ des senkrecht einfallenden Lichtes reflektiert. Das Gleiche gilt auch für den Übergang von Glas zu Luft $R_{g,l}$ [14, Seite 72]. Mit Hilfe der Fresnelformel (Gleichung (7)) kann dieser Reflexionsverlust berechnet werden.

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (7)$$

Das Epoxidharz zwischen den Objektträgern hat einen Brechungsindex von $n = 1.54$, dadurch beträgt der Verlust beim Übergang von Glas zu Epoxidharz und von Epoxidharz zu Glas je $1,7 \cdot 10^{-4}$. Dieser sehr kleine Wert wurde bei der Berechnung der korrigierten Lichtintensität (Gleichung (8)) vernachlässigt. Die korrigierte kollimierte Lichtintensität wurde mit I_0 bezeichnet. Die nicht korrigierte kollimierte Lichtintensität wurde mit $I_{0,l}$ bezeichnet. Der ideale Reflexionsverlust beträgt 7.87% . Dieser Reflexionsverlust wurde mit Hilfe einer, 4.11 mm dicken und mit klarem Epoxidharz befüllten Glasküvette nachgemessen. Dieser Wert beträgt 8.87% . Bei der Berechnung der Korrektur wurde der gemessene Reflexionsverlust verwendet.

$$I_0 = I_{0,l} \cdot (1 - R_{l,g}) \cdot (1 - R_{g,l}) \quad (8)$$

Die kollimierte Transmission T_c wurde mit Hilfe der Formel (9) berechnet. $\overline{I_s}$ ist der Mittelwert von immer fünf gemessenen Werten von der kollimierten Lichtintensität mit Probe (I_s).

$$T_c = \frac{\overline{I_s}}{I_0} \quad (9)$$

Zur Berechnung der Lichtintensität nach der Glasküvette wurde das Lambert-Beersche Gesetz (Gleichung (10)) verwendet [16, Seite 200].

$$\bar{I}_s = I_0 e^{-\mu_t d} \quad (10)$$

Aus dem Lambert-Beerschen Gesetz und der kollimierten Transmission T_c (Gleichung (9)) konnte der totale Schwächungskoeffizient (Gleichung (11)) bestimmt werden [16, Seite 200].

$$\mu_t = -\frac{\ln(T_c)}{d} = \mu_a + \mu_s \quad (11)$$

Mit Hilfe der Gleichung (12) wurde der erwartete absolute Fehler von μ_t berechnet. Die Messtoleranz der Epoxidharzdicke d beträgt 0.05 mm . Die Spannungsmessung mit dem Lock-in Verstärker (NF Electronic Instruments, 5610B, two phase Lock-in Amplifier, NF Corporation Japan) weist eine maximale Messabweichung von 0.5% bei 1 kHz und einem Signalpegel von über 1 mV auf [13].

$$\Delta\mu_t = \left| \frac{\partial\mu_t}{\partial d} \cdot \Delta d \right| + \left| \frac{\partial\mu_t}{\partial I_0} \cdot \Delta I_0 \right| + \left| \frac{\partial\mu_t}{\partial I_s} \cdot \Delta I_s \right| = \left| -\frac{1}{d^2} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_s}\right) \cdot 0.05 \right| + 2 \cdot \left| \frac{0.005}{d} \right| \quad (12)$$

Aus der Gleichung (11) und der Gleichung (12) konnte der relative Fehler in % (Gleichung (13)) berechnet werden. Dies ist die maximale mögliche Abweichung (worst-case).

$$\mu_{t,real} = \frac{\Delta\mu_t}{\mu_t} \cdot 100\% \quad (13)$$

Der maximale und der minimale Wert für die Koeffizienten wurde mit der Gleichung (14) und Gleichung (15) bestimmt.

$$\mu_{t,max} = \mu_t + \Delta\mu_t \quad (14)$$

$$\mu_{t,min} = \mu_t - \Delta\mu_t \quad (15)$$

Da in den Glasküvetten entweder nur Absorberpigmente oder nur Streupigmente enthalten waren, konnte so für den Absorptionskoeffizienten μ_a Gleichung (16) und für den Streukoeffizienten μ_s Gleichung (17), angenommen werden.

$$\mu_a = -\frac{\ln(T_c)}{d} \quad (16)$$

$$\mu_s = -\frac{\ln(T_c)}{d} \quad (17)$$

Mit Hilfe dieser Berechnungen konnten die Epoxidharzkonzentrationen bestimmt werden, die den vorgegebenen optischen Eigenschaften entsprechen. Diese Mischung wurde als Grundmaterial für die optischen Phantome verwendet. Die genaue Zusammensetzung der Mischung ist in Kapitel 2.8 Produktion der Phantome dargestellt.

2.7.1 Messaufbau

Der Messaufbau zur Bestimmung der kollimierten Transmission T_c wurde aus der am Institut für Medizintechnik erstellten Bachelorarbeit [11] übernommen. Mit diesem Messaufbau wurde das Verhältnis zwischen der korrigierten kollimierten Lichtintensität ohne Glasküvette I_0 und der Lichtintensität mit Glasküvette I_s gemacht. In Abbildung 15 ist der schematische Aufbau dieser Messung dargestellt.

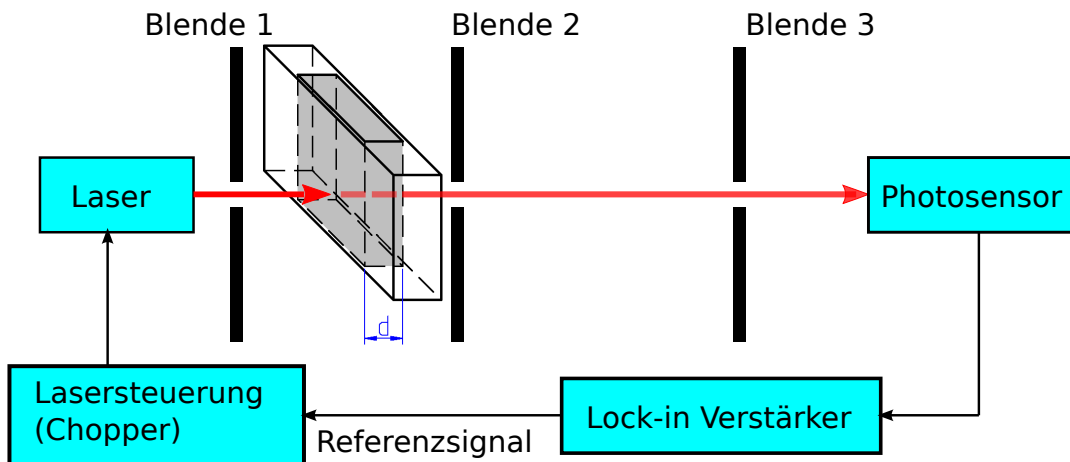


Abbildung 15: Schematischer Aufbau zur Messung der kollimierten Transmission

Der Messaufbau besteht aus einem Laser mit etwa 100 mW und einer Wellenlänge von 650 nm , drei Irisblenden, einer Chopperelektronik, einem Lock-in Verstärker und einem Lichtsensor (Photodiode BPW34) [11, Seite 5]. Die Chopperelektronik moduliert den Laser mit einer Frequenz von 391 Hz . Als Referenzeingangssignal des Lock-in Verstärkers wurde die modulierte Spannung an der Laserquelle verwendet, so können Störungen, wie zum Beispiel Fremdlicht, sehr gut unterdrückt werden [11, Seite 3]. Der Lock-in Verstärker misst die Spannung der Photodiode. Diese Spannungen U_0 und U_s sind proportional zu den kollimierten Lichtintensitäten I_0 und I_s .

Damit die kollimierte Transmission T_c gemessen werden kann, wurden die Glasküvetten zwischen Blende 1 und Blende 2 gegeben. Der Laserstrahl muss möglichst im rechten Winkel durch die Glasküvette gehen, daher befindet sich zwischen den Blenden eine eigene Einspannvorrichtung. Die Irisblende 1 muss so eingestellt werden, dass der Lock-in Verstärker nicht übersteuert. Durch die Blende 2 und 3 wird verhindert, dass gestreute Lichtanteile die Photodiode erreichen. Je kleiner der Durchmesser der Blenden gewählt wird, desto besser funktioniert diese Streulichtunterdrückung. Um einen möglichst kleinen Wert für die numerische Apertur zu erreichen, muss der Abstand zwischen Blende 2 und 3 möglichst groß gewählt werden. In der Abbildung 16 ist der Messaufbau zur Messung der kollimierten Transmission dargestellt.

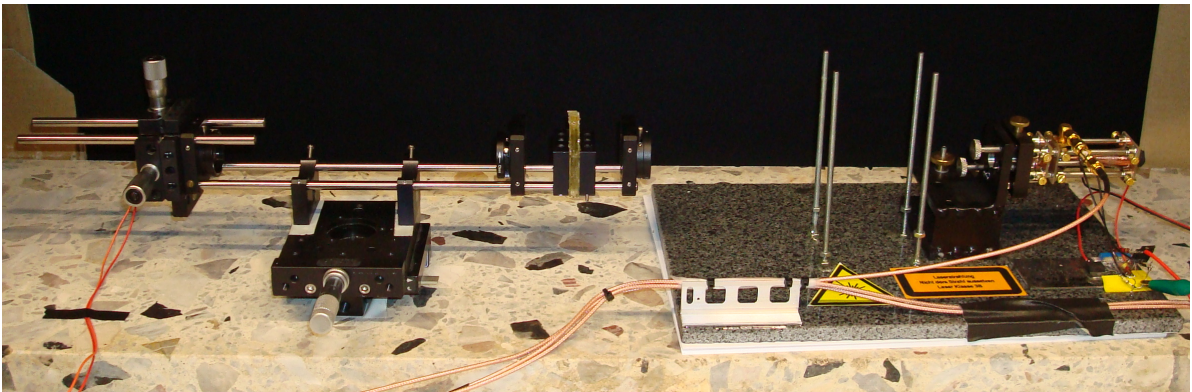


Abbildung 16: Realer Aufbau zur Messung der kollimierten Transmission

Zur Beginn wurde eine Kalibrierungsmessung ohne Glasküvette durchgeführt, so konnte die nicht korrigierte kollimierte Lichtintensität des Lasers $I_{0,l}$ gemessen werden [11, Seite 6]. Die erste Kalibrierung sollte erst einige Minuten nach Einschalten des Lasers erfolgen, um Fehler, wie zum Beispiel den Temperaturdrift der Laserdiode, zu vermeiden. Mit Hilfe der zuvor gemachten Korrektur konnte die korrigierte kollimierte Lichtintensität I_0 bestimmt werden.

Nach dieser Messung wurden die zu messenden Glasküvetten zwischen der Blende 1 und der Blende 2 platziert und so die kollimierte Transmission jeder Glasküvette I_s bestimmt. Es wurden je fünf Messwerte aufgenommen und daraus der Mittelwert der kollimierten Transmission mit Glasküvette \bar{I}_s gebildet. Beim jedem Wechsel der Glasküvetten wurde wieder eine erneute Kalibriermessung durchgeführt.

2.8 Produktion der Phantome

Die Messung der kollimierten Transmission zeigt das der Absorptionskoeffizient und der Streukoeffizient linear von den Konzentrationen der Absorberpigmente und Streupigmente abhängt.

Durch diesen linearen Zusammenhang, der in Kapitel 3.3.3 (Abbildung 19) und in Kapitel 3.3.4 (Abbildung 20) dargestellt ist, konnte ein Rezept zur Herstellung von optischen Phantomen mit einem Absorptionskoeffizienten von μ_a 0.01 mm^{-1} , einem reduzierten Streukoeffizienten von $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$ und einem Anisotropiefaktor von $g = 0.5$, bei einer Wellenlänge von 650 nm , erstellt werden. Dieses Rezept ist in Tabelle 4 dargestellt.

Epoxidharz	Araldite DBF	120 g
Streufarbe	Superwhite	0.118 g
Absorberfarbe	Projet 900NP	600 μg
Härter	Araldite HY591	12 g

Tabelle 4: Rezept zur Herstellung der optischen Phantome

120 g des Epoxidharzgemisches sind nötig um die 100 ml-Katheterspritze, die als Gussform verwendet wurde, zu füllen.

Da 600 μg mit der am Institut vorhandenen Waage (Atilon Acculab, Genauigkeit $d=0.001\text{g}$) nicht messbar waren, wurde wieder eine Stammlösung erstellt.

Die Stammlösung besteht aus 200 g Epoxidharz und 0.02 g Projet 900NP, das entspricht 100 μg Absorberpigmenten pro 1 g Harz. Diese Lösung wird mit 900NPSL2 bezeichnet. Die Stammlösung wurde gleich wie die Stammlösung 900NPSL1 in Kapitel 3.3.3 erstellt. Das Rezept mit der Stammlösung 900NPSL2 ist in Tabelle 5 dargestellt.

Epoxidharz	Araldite DBF	114 g
Streufarbe	Superwhite	0.118 g
Absorberpigmentstammlösung	Projet 900NPSL2	6 g
Härter	Araldite HY591	12 g

Tabelle 5: Rezept zur Herstellung der optischen Phantome mit der Absorberpigmentstammlösung 900NPSL2

Da insgesamt 13 Phantome zu erstellen waren, wurde eine dementsprechende Gesamtmenge hergestellt. Solch eine Menge konnte nicht auf einmal vermischt werden, daher wurden fünf Mischungen zu je 360 g erzeugt.

Zu Beginn wurden jeweils 342 g Harz, und 18 g der Stammlösung 900NPSL2 0.354 g Superwhite Polyester Pigment in eine PVC-Flasche gefüllt und gleich wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, mit Hilfe von Murmeln und der Drehbank etwa 15 Minuten lang langsam gemischt. Nach diesem Mischvorgang wurden die PVC-Flaschen über Nacht zur Seite gestellt. Dadurch können die durch den Mischvorgang entstanden Luftblasen wieder aus dem Harz entweichen.

Nach dem erfolgreichen Mischen der luftblasenfreien Harzlösung, wurden 120 g in einen Plastikbecher gegeben und 12 g Härter hinzugefügt. Diese Mischung wurde etwa fünf Minuten lang langsam mit einem Stab verrührt. Danach wurde das Epoxidharz in die Gussform gegossen.

Um die durch das erneute Mischen beziehungsweise durch das Gießen in die Gussform eventuell entstandenen Luftblasen wieder aus dem Harz zu bekommen, wurde die Gussform für zehn Minuten in eine Vakuumkammer gestellt und evakuiert. Anschließend wurde die Gussform bei Raumtemperatur zum endgültigen Aushärten für etwa 24 Stunden zur Seite gestellt. Als Vakuumkammer diente ein Gurkenglas, das mit einem Kompressor von

einem Kühlschranks verbunden war.

Nach 24 Stunden wurde das ausgehärtete Harz von der Gussform getrennt. Dieser Prozess wurde für jedes Phantom wiederholt.

Die erstellten Phantom-Rohlinge wurden mit einer Drehbank auf ihr endgültiges Maß von 70 *mm* Länge und 30 *mm* Durchmesser gedreht. Das Phantom wurde mit einer Drehzahl von etwa 500 Umdrehungen pro Minute gedreht. Anschließend wurde die Drehzahl auf etwa 700 Umdrehungen pro Minute erhöht und mit einem Schleifpapier (Körnung: 600) fein geschliffen. Zum Schluss wurden die verschiedenen Bohrungen für die Einschlüsse, wie zuvor in Abbildung 6, dargestellt gebohrt.

2.9 Einschlüsse

2.9.1 Einschlüsse für die optische Tomographie

Die zuvor erstellten Phantome haben einen definierten optischen Hintergrund $\mu_{a0} = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_{s0} = 1 \text{ mm}^{-1}$ ($\mu_{s0} = 2 \text{ mm}^{-1}$) und $g = 0.5$. In die zuvor gebohrten Bohrungen wurde ein Epoxidharz mit doppelter bzw. halber Konzentration der Absorberpigmente oder doppelter bzw. halber Konzentration der Streupigmente, mit Hilfe einer 2 ml Spritze gefüllt. Um Lufteinschlüsse aus der Bohrung zu bekommen, wurden die Phantome erneut in die Vakuumkammer gegeben und evakuiert. Tabelle 6 zeigt die Phantome mit den unterschiedlichen Epoxidharzeinschlüssen.

Damit in Zukunft Referenzmessungen der verschiedenen Einschlüsse gemacht werden können, wurden von jeder Einschluss-Epoxidharzmischung zwei Messkörper hergestellt. Als Gussform wurde eine 2 ml Spritze verwendet.

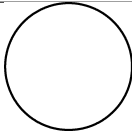
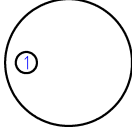
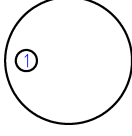
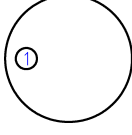
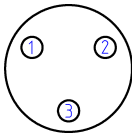
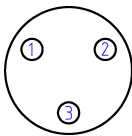
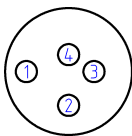
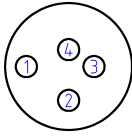
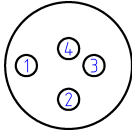
Nummer	Phantom	Einschluss
P1		homogen
P2		1: $2\mu_{a0} + 1\mu_{s0}$
P3		1: $1\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$
P4		1: $2\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$
P5		1: $2\mu_{a0} + 1\mu_{s0}$ 2: $1\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$ 3: $2\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$
P6		1: $1/2\mu_{a0} + 1\mu_{s0}$ 2: $1\mu_{a0} + 1/2\mu_{s0}$ 3: $1/2\mu_{a0} + 1/2\mu_{s0}$
P7		1: $2\mu_{a0} + 1\mu_{s0}$ 2: $2\mu_{a0} + 1\mu_{s0}$ 3: $2\mu_{a0} + 1\mu_{s0}$ 4: $2\mu_{a0} + 1\mu_{s0}$
P8		1: $1\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$ 2: $1\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$ 3: $1\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$ 4: $1\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$
P9		1: $2\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$ 2: $2\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$ 3: $2\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$ 4: $2\mu_{a0} + 2\mu_{s0}$

Tabelle 6: Phantome mit verschiedenen Einschlüssen, Hintergrund: $\mu_{a0} = 0.01 \text{ mm}^{-1}$,

$$\mu'_{s0} = 1 \text{ mm}^{-1} (\mu_{s0} = 2 \text{ mm}^{-1}) \quad g = 0.5$$

2.9.2 Einschlüsse für die optische Fluoreszenztomographie

Diese Phantome haben ebenfalls einen definierten optischen Hintergrund von $\mu_{a0} = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_{s0} = 1 \text{ mm}^{-1}$ ($\mu_{s0} = 2 \text{ mm}^{-1}$) und $g = 0.5$. Die Bohrungen wurden nicht befüllt, sie können später mit einem beliebigen fluoreszierenden Material befüllt werden. Tabelle 7 zeigt die Phantome mit den unterschiedlichen Einschlüssen für ein fluoreszierendes Material.

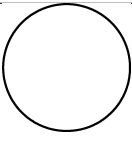
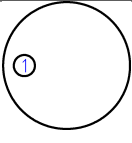
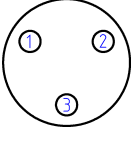
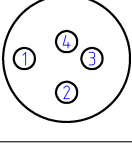
Nummer	Phantom	Einschluss
P10		homogen
P11		-
P12		-
P13		-

Tabelle 7: Phantome mit verschiedenen Öffnungen für Fluorophore, Hintergrund: $\mu_{a0} = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_{s0} = 1 \text{ mm}^{-1}$ ($\mu_{s0} = 2 \text{ mm}^{-1}$), $g = 0.5$

3 Ergebnisse

3.1 Gussformen

Durch die Versuche mit den verschiedenen Gussformen hat sich die 100 *ml*-Katheterspritze am Besten bewährt und wurde schlussendlich verwendet. Die Herstellung von Gussformen aus der Formbaumasse Formaform und aus der Silikon-Kautschuk-Abformmasse waren nicht zufriedenstellend. Die Gussformen müssen vor jedem Guss mit einem Formentrennmittel behandelt werden. Im Kapitel 4.1 werden die Gründe näher erläutert.

3.2 Brechungsindex

Tabelle 8 zeigt, dass die gemessenen und berechneten Brewsterwinkel Θ_B nahezu identisch sind. Das in [17] verwendete Eopxidharz MY753 +XD716 hat eine Brechzahl $n = 1.54$ [5, Seite 848]. Der Schweißerschutzfilter, Schott AG (ATHERMAL N=7) hat eine Brechzahl $n = 1.53$ [15, Seite 5]. Der gemessene Brewsterwinkel vom Epoxydharz Araldite DBF + Aradur HY951 ist $\Theta_B = 57^\circ$. Das entspricht einer Brechzahl von $n = 1.54$.

Material	Θ_B gemessen	Θ_B berechnet	n
Araldite MY753 + XD716	-	57°	1.54 [5, Seite 848]
Araldite DBF + Aradur HY951	57°	-	1.54
Schweißerschutzfilter (Schott AG)	57°	-	1.53 [15, Seite 5]
schwarzer Objektträger	57°	-	1,54

Tabelle 8: Ergebnisse des Brewsterwinkelmessung

Der Messaufbau mit der 8 *mm* dicken Glasplatte bestätigt die Messung des Brewsterwinkels. Bei der Glasplatte mit der schwarzen Epoxidharzprobe wurde der Laserstrahl nur von der Glasvorderseite reflektiert. An der Rückseite des Glases wurde der Laserstrahl vollständig absorbiert. Daher haben das Glas und das Epoxidharz eine nahezu gleiche Brechzahl.

3.3 Kollimierte Transmission der Glasküvetten

Zur Messung der kollimierten Transmission wird nicht die Lichtintensität gemessen, sondern die der Lichtintensitäten I_0 , I_s und \bar{I}_s proportionalen Spannungen U_0 , U_s und \bar{U}_s . Die gemessenen Größen U_s und $U_{0,l}$ wurden mit dem Lock-in Verstärker (NF Electronic Instruments, 5610B, two phase Lock-in Amplifier, NF Corporation Japan) gemessen. Die Integrationszeit betrug eine Sekunde.

3.3.1 Glasprobe mit klarem Epoxidharz

Da die zu messenden Küvetten aus Glas bestehen, wurde zu Beginn der Reflexionsverlust bestimmt. Der ideale Reflexionsverlust beträgt 7.87 %. Dieser Reflexionsverlust wurde mit Hilfe einer, 4.11 *mm* dicken und mit klarem Epoxidharz befüllten Glasküvette überprüft. Tabelle 9 zeigt das Messergebnis. $U_{0,l}$ ist die nicht korrigierte Spannung des Lasers. Sie ist proportional zur nicht korrigierten Lichtintensität des Lasers $I_{0,l}$. Der gemessene Reflexionsverlust beträgt 8.87 %. Eine detaillierte Auflistung der gemessenen Spannungen ist im Anhang (Tabelle 21) zu finden.

Dicke in <i>mm</i>	Konzentration in <i>mg/g</i>	\bar{U}_s in <i>mV</i>	$U_{0,l}$ in <i>mV</i>
4.11	0	1007	1105

Tabelle 9: Ergebnis für die Reflexionsverluste einer Glasküvette mit klarem Epoxidharz.

3.3.2 Beziehung des Absorptionskoeffizienten und der Dicke

Absorberfarbe: Superblack

Die Absorberfarbe Projet 900NP konnte zu Beginn der Diplomarbeit nicht beschafft werden. Daher wurde als alternative Absorberfarbe die Farbe Superblack Polyester Pigment verwendet und vermessen. In Tabelle 10 sind die gemessenen Spannungswerte von Glasküvetten mit variierenden Dicken und zwei unterschiedlichen Absorberfarbkonzentrationen, dargestellt. Eine detaillierte Auflistung der gemessenen Spannungen ist im Anhang (Tabelle 21) zu finden.

Dicke in <i>mm</i>	Konzentration in $\mu g/g$	\overline{U}_s in <i>mV</i>	$U_{0,l}$ in <i>mV</i>	U_0 in <i>mV</i>
1	101	801.6	965	880.1
2	101	716.4	980	893.76
3	101	651.8	1000	912
4	101	539	950	866.4
5	101	433.8	900	820.8
6	101	385.8	900	820.8
1	202	779.8	1058	964.9
2	202	665.4	1088	992.3
3	202	522.6	1085	989.5
4	202	451.8	1160	1057.9
5	202	329.6	1085	989.5
6	202	252.4	1058	964.9

Tabelle 10: Messwerte der Absorberfarbe Superblack mit unterschiedlichen Dicken und zwei verschiedenen Konzentrationen.

Mit den gemessenen Spannungen konnte der Absorptionskoeffizient μ_a berechnet werden. Tabelle 11 zeigt die berechneten Werte für eine Absorberfarbkonzentration von $101 \mu\text{g/g}$ Superblack. Tabelle 12 zeigt die berechneten Werte für die doppelte Absorberfarbkonzentration ($202 \mu\text{g/g}$) Superblack.

Dicke in mm	μ_a in mm^{-1}	abs. Fehler in mm^{-1}	rel. Fehler in %	$\mu_{a,min}$ in mm^{-1}	$\mu_{a,max}$ in mm^{-1}
1	0.093	0.015	15.706	0.079	0.108
2	0.111	0.008	7.021	0.113	0.118
3	0.112	0.008	7.021	0.123	0.117
4	0.119	0.004	3.357	0.117	0.123
5	0.123	0.003	2.626	0.120	0.126
6	0.126	0.003	2.158	0.132	0.129

Tabelle 11: Berechnete Absorptionskoeffizienten mit verschiedenen Dicken für die Absorberfarbe Superblack mit einer Konzentration von $101 \mu\text{g/g}$.

Dicke in mm	μ_a in mm^{-1}	abs. Fehler in mm^{-1}	rel. Fehler in %	$\mu_{a,min}$ in mm^{-1}	$\mu_{a,max}$ in mm^{-1}
1	0.213	0.021	9.695	0.192	0.234
2	0.200	0.010	5.003	0.190	0.210
3	0.213	0.010	5.003	0.206	0.220
4	0.213	0.005	2.425	0.208	0.218
5	0.220	0.004	1.910	0.216	0.224
6	0.224	0.004	1.579	0.220	0.227

Tabelle 12: Berechnete Absorptionskoeffizienten mit verschiedenen Dicken für die Absorberfarbe Superblack mit einer Konzentration von $202 \mu\text{g/g}$.

Abbildung 17 zeigt, dass sich der Absorptionskoeffizient in etwa verdoppelt, wenn sich die Konzentration verdoppelt. Der Absorptionskoeffizient steigt leicht mit der sich ändernden Dicke. Im Kapitel 4.4.1 wird darauf näher eingegangen.

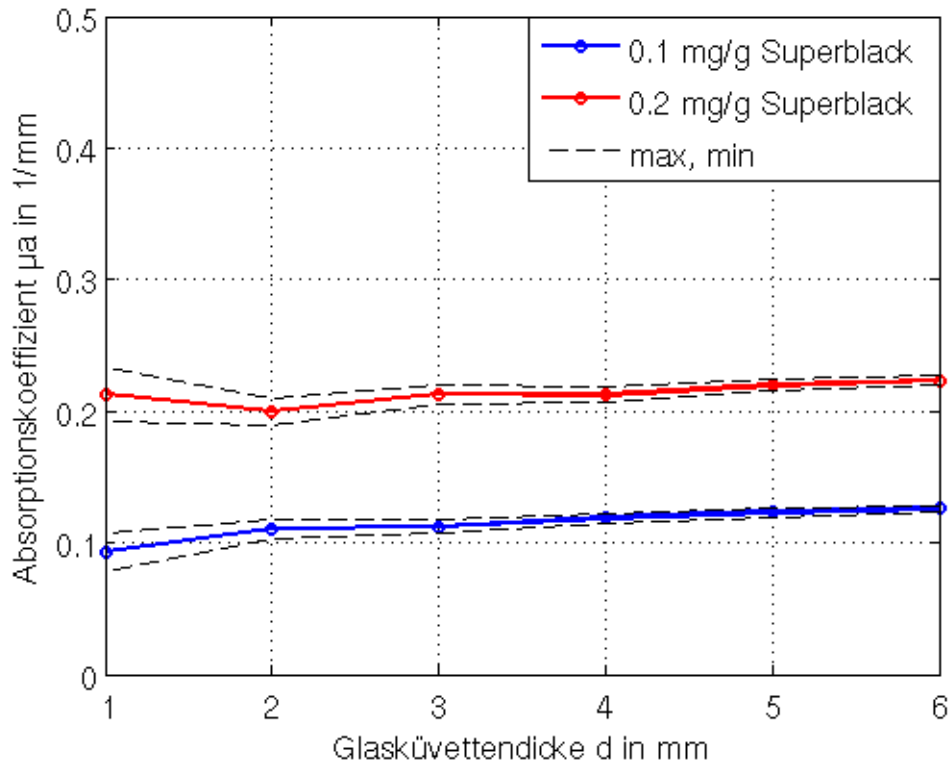


Abbildung 17: Beziehung zwischen der Dicke und dem Absorptionskoeffizienten bei zwei verschiedenen Konzentrationen von der Absorberfarbe Superblack.

Absorberfarbe: Projet 900NP

In Tabelle 13 sind die gemessenen Spannungen von Glasküvetten mit variierenden Dicken und zwei unterschiedlichen Absorberfarbkonzentrationen dargestellt. Eine detaillierte Auflistung der gemessenen Spannungen ist im Anhang (Tabelle 21) zu finden.

Dicke in mm	Konzentration in $\mu g/g$	\bar{U}_s in mV	$U_{0,l}$ in mV	U_0 in mV
1	9.09	1024.2	1149	1074.8
2	9.09	832	960	875.5
3	9.09	785.8	930	848.2
4	9.09	797.6	955	870.9
5	9.09	772	866.4	950
6	9.09	767.2	955	870.6
1	18.18	833.6	955	870.9
2	18.18	767	930	848.2
3	18.18	723	930	848.2
4	18.18	732.6	975	872.7
5	18.18	674	930	848.2
6	18.18	643.6	935	852.7

Tabelle 13: Messwerte der Absorberfarbe Projet 900NP mit unterschiedlichen Dicken und zwei verschiedenen Konzentrationen.

Mit den gemessenen Spannungen konnte der Absorptionskoeffizient μ_a berechnet werden. Tabelle 14 zeigt die berechneten Werte für eine Absorberfarbkonzentration von $9.09 \mu\text{g/g}$ Projet 900NP. Tabelle 15 zeigt die berechneten Werte für eine Absorberfarbkonzentration von $18.182 \mu\text{g/g}$ Projet 900NP.

Dicke in mm	μ_a in mm^{-1}	abs. Fehler in mm^{-1}	rel. Fehler in %	$\mu_{a,min}$ in mm^{-1}	$\mu_{a,max}$ in mm^{-1}
1	0.023	0.011	48.735	0.012	0.034
2	0.025	0.006	22.113	0.020	0.031
3	0.025	0.003	22.113	0.022	0.029
4.11	0.021	0.002	12.582	0.019	0.024
5	0.023	0.002	9.668	0.021	0.025
6	0.021	0.002	8.717	0.019	0.023

Tabelle 14: Berechnete Absorptionskoeffizienten mit verschiedenen Dicken für die Absorberfarbe Projet 900NP mit einer Konzentration von $9.09 \mu\text{g/g}$.

Dicke in mm	μ_a in mm^{-1}	abs. Fehler in mm^{-1}	rel. Fehler in %	$\mu_{a,min}$ in mm^{-1}	$\mu_{a,max}$ in mm^{-1}
1	0.044	0.012	27.809	0.032	0.056
2	0.050	0.006	12.442	0.044	0.057
3	0.053	0.006	12.442	0.049	0.057
4.11	0.043	0.003	6.928	0.040	0.046
5	0.046	0.002	5.351	0.044	0.015
6	0.047	0.002	4.388	0.045	0.049

Tabelle 15: Berechnete Absorptionskoeffizienten mit verschiedenen Dicken für die Absorberfarbe Projet 900NP mit einer Konzentration von $18.18 \mu\text{g/g}$.

Abbildung 18 zeigt, dass sich der Absorptionskoeffizient in etwa verdoppelt, wenn sich die Absorberfarbenkonzentration verdoppelt. Der Absorptionskoeffizient bleibt mit der sich ändernden Dicke in etwa konstant.

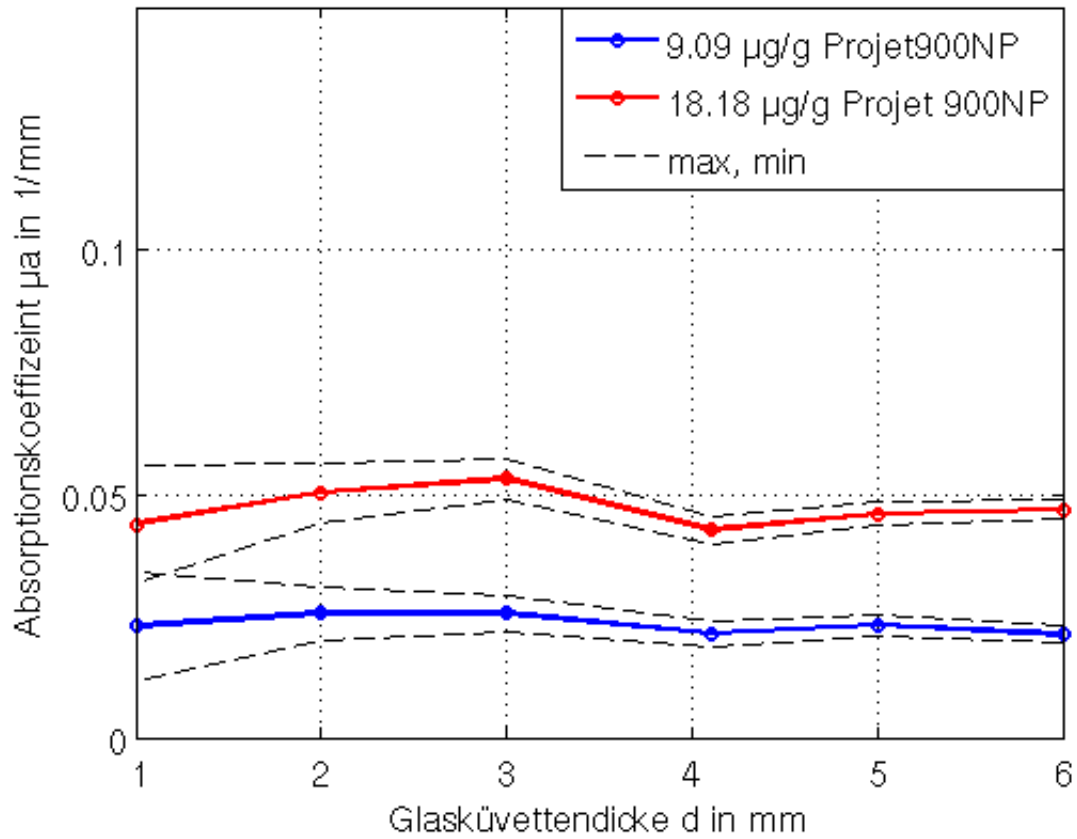


Abbildung 18: Beziehung zwischen der Dicke und dem Absorptionskoeffizienten bei 2 unterschiedlichen Konzentrationen von der Absorberfarbe Project 900NP.

3.3.3 Beziehung des Absorptionskoeffizienten und der Konzentration

Tabelle 16 zeigt die gemessenen Spannungen bei konstant gehalten Glasküvettdicken (4.11 mm) und sich ändernden Konzentrationen der Absorberfarbe. Eine detaillierte Auflistung der gemessenen Spannungen ist im Anhang (Tabelle 21) zu finden.

Dicke in mm	Konzentration in $\mu g/g$	\bar{U}_s in mV	$U_{0,l}$ in mV	U_0 in mV
4.11	0	1007	1105	1007
4.11	9.09	797.8	950	866.4
4.11	13.63	767.4	950	866.4
4.11	18.18	732.6	955	870.9
4.11	22.73	703	950	866.4

Tabelle 16: Messwerte der Absorberfarbe Projet 900NP mit konstanter Dicke und variierender Konzentration.

Mit den gemessenen Spannungen konnte der Absorptionskoeffizient μ_a berechnet werden. Tabelle 17 zeigt die berechneten Werte.

Konzentration in $\mu g/g$	μ_a in mm^{-1}	abs. Fehler in mm^{-1}	rel. Fehler in %	$\mu_{a,min}$ in mm^{-1}	$\mu_{a,max}$ in mm^{-1}
0	0	0	0	0.000	0
9.09	0.020	0.003	13.339	0.017	0.023
13.63	0.030	0.003	9.458	0.027	0.032
18.18	0.042	0.003	6.997	0.039	0.045
22.73	0.051	0.003	6.001	0.048	0.054

Tabelle 17: Berechnete Absorptionskoeffizienten der Absorberfarbe Projet 900NP bei einer konstanten Dicke und variierender Konzentration.

Abbildung 19 zeigt, dass sich der Absorptionskoeffizient und die Konzentration wie zuvor angenommen linear, verhalten. Wird die Konzentration verdoppelt, so verdoppelt sich auch der Absorptionskoeffizient.

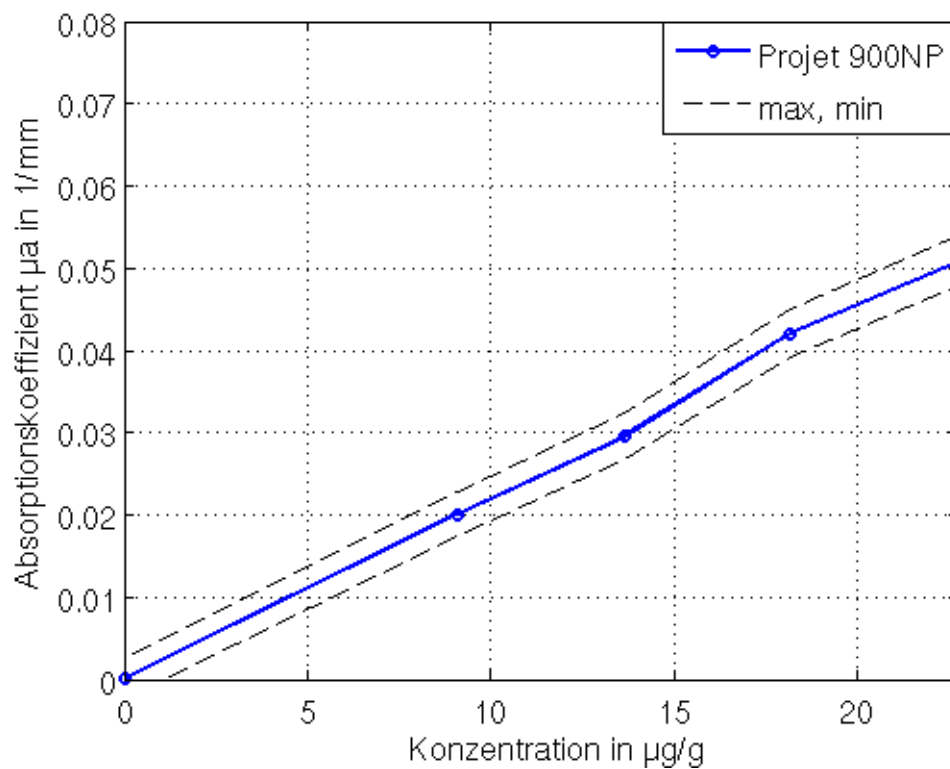


Abbildung 19: Beziehung zwischen der Konzentration der Absorberpigmente und dem Absorptionskoeffizienten in einer 4.11 mm dicken Glasküvette. Als Absorberfarbepigmente wurde Projet 900NP verwendet.

3.3.4 Beziehung des Streukoeffizienten und der Konzentration

Tabelle 18 zeigt die gemessenen Spannungen bei konstant gehalten Glasküvettdicken von 4.11 mm und sich ändernden Konzentrationen der Streufarbe. Eine detaillierte Auflistung der gemessenen Spannungen ist im Anhang (Tabelle 21) zu finden.

Dicke in mm	Konzentration in $\mu g/g$	\bar{U}_s in mV	$U_{0,l}$ in mV	U_0 in mV
4.11	0	1007	1105	1007
4.11	11.36	786.6	950	866.4
4.11	22.73	713.4	966	880.9
4.11	45.45	592.8	975	889.2
4.11	68.18	465	966	880.9

Tabelle 18: Messwerte der Streufarbe Superwhite mit konstanter Dicke und variierende Konzentration.

Mit den gemessenen Werten konnte der Streukoeffizient μ_s berechnet werden. Tabelle 19 zeigt die berechneten Werte.

Konzentration in $\mu g/g$	μ_a in mm^{-1}	abs. Fehler in mm^{-1}	rel. Fehler in %	$\mu_{a,min}$ in mm^{-1}	$\mu_{a,max}$ in mm^{-1}
0	0.000	0.000	0	0.000	0
11.364	0.024	0.003	11.566	0.021	0.026
22.727	0.051	0.003	5.956	0.048	0.054
48.455	0.099	0.004	3.683	0.095	0.102
68.182	0.155	0.004	2.781	0.151	0.160

Tabelle 19: Berechnete Absorptionskoeffizienten der Streufarbe Superwhite bei einer konstanten Dicke und variierende Konzentration.

Abbildung 20 zeigt, dass sich der Streukoeffizient und die Konzentration wie zuvor angenommen linear, verhalten. Wird die Konzentration verdoppelt, so verdoppelt sich auch der Streukoeffizient.

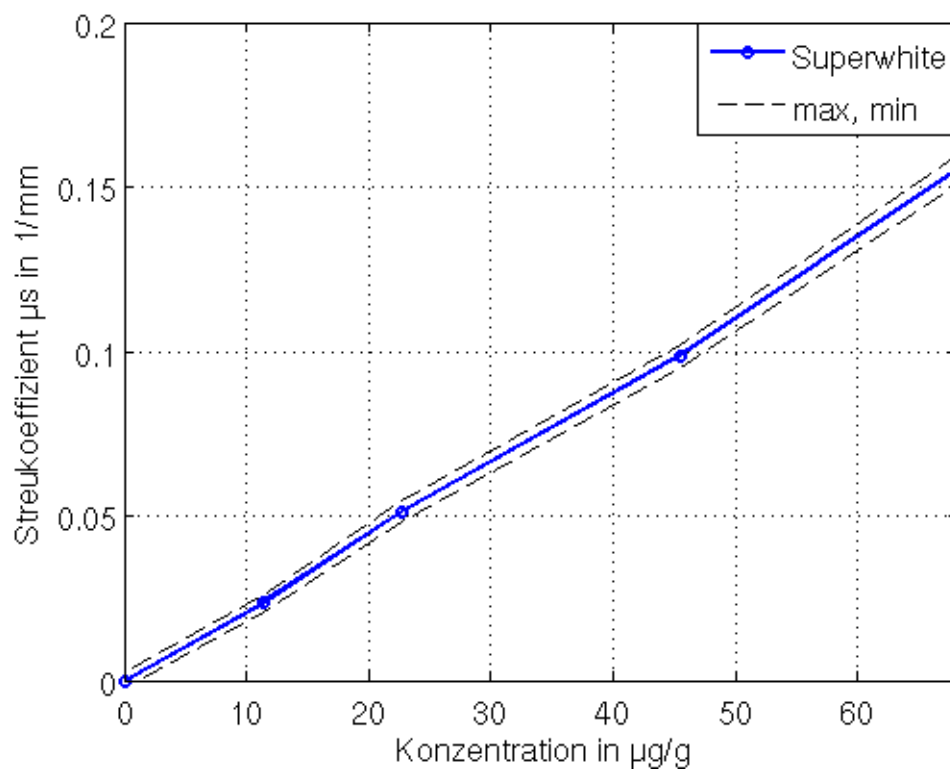


Abbildung 20: Beziehung zwischen der Konzentration der Streupigmente und dem Streukoeffizienten in einer 4.11 mm dicken Glasküvette. Als Streufarbe wurde Superwhite verwendet.

3.4 Hergestellte Phantome

Abbildung 21 (a) zeigt die neun hergestellten optischen Phantome für die optische Tomographie. Abbildung 21 (b) zeigt die vier hergestellten optischen Phantome für die Fluoreszenztomographie.



(a) Phantome für die optische Tomographie



(b) für die Fluoreszenztomographie

Abbildung 21: Phantome Hergestellte Phantome

4 Diskussion

4.1 Gussformen

Es konnte keine Gussform gefunden werden bei der die Phantome nicht nachbearbeitet werden mussten.

Bei allen Phantomen, die mit den verschiedenen Gussformen produziert worden waren, wurden Oberflächenschäden wie zum Beispiel Unebenheiten verursacht durch das Formtrennmittel oder Unebenheiten durch die Form selbst festgestellt. Auch bei der Verwendung der 100 ml-Katheterspritze als Gussform traten bei dem ausgehärteten Phantom Oberflächendefekte auf.

Auf die Verwendung der Gussform aus Formaform beziehungsweise Formaform-Thermolan wurde verzichtet.

Die Abgussmasse Formaform eignet sich nur für ein Gussmaterial das Maximaltemperatur 35°C hat. Wird das noch flüssige Epoxidharz in die Gussform gegossen, entsteht durch das Harz-Härter-Gemisch eine exotherme Reaktion. Die so entstehende Wärme kann zu Temperaturen bis zu 90°C führen. Dadurch wird die Gussform zerstört.

Durch die Zugabe von Formaform-Thermolan wird die Gussform hitzebeständig (bis 95°C). Die Gussform ist zwar temperaturstabil eignet sich aber ebenfalls nicht, da das ausgehärtete Material sehr weich ist. So kann kein exakt zylindrischer Abguss erzeugt werden. Selbst bei Wanddicken von mehreren Zentimetern ist das Material nicht steif genug. Ein weiterer Nachteil des Formaform und Formaform-Thermolan ist, dass die Gussform mit der Zeit austrocknet und dadurch spröde wird.

Die Silikongussformen Silcotin HP und Silcolan HV eignen sich zwar besser als die Gussform, jedoch sind die beiden Silikone sehr zähflüssig. Sie lassen sich nach Zugabe des Vernetzers nur etwa 60 Sekunden lang verarbeiten. Die beiden Silikon-Gussformen sind viel steifer als die Gussform aus Formaform. Die Oberfläche der Gussform war deutlich besser als die der Gussform aus Formaform, jedoch ist vor jedem Guss eine Vorbehand-

lung mit einem Formentrennmittel nötig. Aus diesem Grund wurde auf Silikongussformen verzichtet.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Phantomen mit einer Gussform waren zylindrische Reagenzgläser mit einem Innendurchmesser von 30 *mm*. Ohne ein Formentrennmittel kann man das ausgehärtete Epoxidharz nicht vom Glas trennen.

Durch die Vorbehandlung mit einem Formentrennmittel kann das ausgehärtete Epoxidharz, durch Brechen und anschließendem Abschälen des Glases, vom Reagenzglas getrennt werden. Diese Methode ist sehr zeitaufwendig und gefährlich, da man sich leicht verletzen kann.

Wird das Reagenzglas zuvor mit einer Autofrontscheibenversiegelung (Rainex) behandelt, lässt sich das Epoxidharz auch wieder nur durch Brechen und anschließendes Abschälen vom Glas trennen. Diese Gussform kann nur einmal verwendet werden, aus diesem Grund wurde dieser Ansatz auch nicht weiter verfolgt.

4.2 Glasküvetten

Einmal-Makro-Küvetten (4.5 ml, 10 x 10 x 35 mm) konnten nicht für die Messung der kollimierten Transmission verwendet werden, da es auf Grund ihrer geringen Breite bei Küvetten mit Streupigmenten, zu Reflexionen an den Seitenwänden kommt und so das Messergebnis verfälscht wird.

Die Makro-Küvetten haben keine parallelen Seitenwände, dadurch wird der Laserstrahl abgelenkt und es kann keine Messung gemacht werden. Aus diesen Gründen wurden eigene Glasküvetten aus Objektträgerglas angefertigt. Diese Küvetten haben eine größere Fläche und die beiden Seiten sind parallel zueinander. Die Erstellung solcher Glasküvetten ist sehr zeitaufwändig. Da die Glasküvetten eine Eigenproduktion sind, kann nicht garantiert werden, dass die Seiten exakt parallel zueinander sind. Dadurch können Messabweichungen auftreten. Die Glasküvetten wurden bis zu einer Dicke von 10 mm angefertigt. Jedoch gab es bei den Küvetten über 6 mm teilweise große Messabweichungen, durch die nicht exakt parallelen Seiten. Aus diesem Grund wurden die Messungen auf eine Dicke von 6 mm beschränkt.

Damit eventuelle Reflexionen an den Seitenrändern vermieden werden können, ist es vorteilhaft, statt der durchsichtigen Glaspakete ein schwarzes Material zu verwenden.

4.3 Bestimmung des Brechungsindex

Dadurch, dass das Objektträgerglas und das Epoxidharz (Araldite DBF + Aradur HY951) annähernd den gleichen Brechungsindex haben, kommt es an deren Grenzflächen nur zu minimalen Reflexionsverlusten. Diese Verluste sind so klein, dass sie vernachlässigt werden können.

Der Messaufbau mit der 8 mm dicken Glasplatte bestätigt die in Kapitel 2.5 durchgeführte Messung. Hier wurde der Laserstrahl nur von der Glasvorderseite reflektiert. An der Rückseite des Glases wurde der Laserstrahl vollständig absorbiert. Dadurch kann bestätigt werden, dass das Glas und das Epoxidharz die selbe Brechzahl haben.

4.4 Kollimierte Transmission

4.4.1 Glasküvetten mit Absorberpigmenten (Superblack)

Da die Absorberfarbe Projet 900NP zu Beginn der Diplomarbeit nicht beschafft werden konnte, wurde eine alternative Absorberfarbe getestet.

Die weiße Farbe (Superwhite Polyester Pigment) der Firma Tiranti ließ sich gut mit dem Epoxidharz mischen, daher war es vorteilhaft eine schwarze Farbe von der gleichen Firma als Absorberfarbe zu verwenden. Leider konnte keine Information über die Inhaltsstoffe der Farbe beschafft werden.

Wird ein Laserstrahl senkrecht auf eine Glasküvette mit der Farbe Superblack gerichtet, entstehen gut sichtbare Streumuster. Aufgrund dieser Streueignisse kann davon ausgegangen werden, dass die Absorberfarbe nicht nur aus absorbierenden Pigmenten besteht, sondern auch noch weitere streuende Teilchen enthält. Aus diesem Grund wurde diese Farbe nicht als Absorberfarbe zur Erstellung der Phantome verwendet.

Theoretisch müsste sich der Absorptionskoeffizient verdoppeln wenn die Farbkonzentration verdoppelt wird. Dies war auch der Fall. Im Kapitel 3.3.2 zeigt die Abbildung 17, dass der Absorptionskoeffizient bei variierender Dicke leicht ansteigt. Es wird vermutet, dass die Farbe und das Epoxidharz nicht lange genug miteinander vermischt worden sind. Weiters könnten durch Komplexbildungen der Farbpigmenten nichtlineare Effekte auftreten.

4.4.2 Glasküvetten mit Absorberpigmenten (Projet 900NP)

Der Absorptionskoeffizient der Absorberfarbe Projet 900NP ändert sich nur wenig mit steigender Dicke. Bei Verdoppelung der Konzentration steigt der Absorptionskoeffizient um etwa den Faktor 2.

Die Glasküvetten mit der Absorberfarbe Projet 900NP wurden senkrecht mit einem Laserstrahl bestrahlt. Hier konnten keine Streuungen erkannt werden. Aus diesem Grund wurde diese Absorberfarbe zur Erstellung der Phantome verwendet.

Im Kapitel 3.3.3 zeigt Abbildung 19, dass sich der Absorptionskoeffizient linear zur Konzentration verhält. So kann die Konzentration über den Absorptionskoeffizienten bestimmt werden. Bei einem Absorptionskoeffizienten von $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$ bei 650 nm wurde eine Konzentration von $5 \text{ }\mu\text{g/g}$ gemessen. Das optische Phantom in [5] hat bei 800 nm einen Absorptionskoeffizienten von $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$. Hier wurde eine Konzentration von $1.82 \text{ }\mu\text{g/g}$ verwendet. Mit Hilfe des Spektrums im Kapitel 2.2.2 Abbildung 8 kann gezeigt werden, dass der Absorptionskoeffizient bei 650 nm das Dreifache betragen soll [6, Seite 960]. Der gemessene Absorptionskoeffizient ist um den Faktor 2.75 größer. Da sich die Farbkonzentrationen im μg -Bereich befinden, ist es sehr schwierig, exakte Konzentrationen zu erzeugen.

4.4.3 Glasküvetten mit Streupigmenten (Superwhite)

Bei einem reduzierten Streukoeffizienten von $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$ ($\mu_s = 2 \text{ mm}^{-1}$), bei 650 nm , wurde mit den Glasküvetten eine Konzentration von $0.9 \text{ }\mu\text{g/g}$ bestimmt. Das optische Phantom in [5] hat bei 800 nm einen reduzierten Streukoeffizienten von $\mu'_s = 0.8 \text{ mm}^{-1}$. Hier beträgt die Konzentration 0.1 mg/g [17]. Bei einem reduzierten Streukoeffizienten von $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$ ist die Streupigmentkonzentration 1.25 mg/g . Mit Hilfe des Spektrums im Kapitel Einleitung (Abbildung 9) kann abgeschätzt werden, dass der Streukoeffizient bei 650 nm das 0.77-fache beträgt.

Die Koeffizienten μ_a und μ_s wurden nur durch Glasküvetten mit rein Absorberpigmenten beziehungsweise mit rein Streupigmenten bestimmt. Durch Hilfe der verwendeten Kubelka-Munk Theorie kombiniert mit der Diffusionstheorie können Proben mit einem Gemisch aus Absorberpigmenten und Streupigmenten vermessen werden. Der Messaufbau zur Messung der Diffusionstheorie wurde in der Bachelorarbeit [11] aufgebaut. Hier wird die diffuse Reflexion und die diffuse Transmission gemessen. Mit diesem Messaufbau wurden 0.2 mm dicke Scheiben des hergestellten Phantoms vermessen. Es konnten keine verwendbaren Messergebnisse produziert werden, da der Aufbau zu unpräzise war.

4.5 Produktion der Phantome

Da sich der Absorptionskoeffizient beziehungsweise der Streukoeffizient wie erwartet linear zur Konzentration verhalten haben, konnten die Phantome hergestellt werden.

Zur Erzeugung der Stammlösungen 900NPS1 und 900NPSL2 stand keine geeignete Mischmaschine zur Verfügung. Die Mischungen wurden mit Hilfe der Drehbank, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, gemischt. Das Gemisch hat bei 25°C eine Viskosität von 1350-2000 *mPas* und ist zähflüssig [10]. Da die kleinste Drehzahl der Drehbank zu schnell für eine effektive Vermischung vom Harz und der Absorberfarbe ist, dauerte der Mischvorgang viel länger als der Mischvorgang der in [6] beschrieben ist. Hier wurde die Harz-Absorberpigmentmischung etwa sechs Stunden lang mit einer speziellen Mischmaschine (Kugelmühle) gemischt [6, Seite 956].

Das Mischverhältnis von Harz und Härter kann über das Gewicht (100:10) oder das Volumen (100:12) erzeugt werden. Alle Berechnungen wurden über das Gewicht gemacht. Wichtig ist, dass das Mischverhältnis genau eingehalten wird. Wird zu viel Härter verwendet, so bleibt das Epoxidharz klebrig. Wird zu wenig Härter verwendet, wird das Material spröde. Werden Harz und Härter vermischt, hat das beim Aushärten eine exotherme Reaktion zur Folge. Die durch diese Reaktion entstehende Wärme ist von der Größe und der Form der Gussteile abhängig. Bei der Größe der zu erstellenden Phantome liegt die erreichte Temperatur in etwa bei 90°C.

Nach dem Hinzufügen des Härters müssen die Komponenten gut vermischt werden, da ansonsten Schlieren entstehen. Diese Schlieren sind im ausgehärteten Epoxidharz sichtbar und beeinflussen die optischen Eigenschaften des Phantoms. Der Mischvorgang sollte etwa 5 Minuten dauern. So kann sichergestellt werden, dass es zu keiner Schlierenbildung kommt. Der Nachteil ist, dass durch das Vermischen erneut Luftblasen entstehen. Eine professionelle Dosier- und Mischanlage wäre der effektivste Weg um luftblasenfreie Gemische zu erzeugen [10].

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die 100 ml-Katheterspritze eignet sich gut als Gussform zur Erstellung von Epoxidharzkörpern. Die Gussformen aus Formaform beziehungsweise Silikon konnten nicht überzeugen.

Zur Messung der kollimierten Transmission wurden selbst hergestellte Glasküvetten mit Epoxidharz befüllt. Mit Hilfe der Messung des Brewsterwinkels konnte gezeigt werden, dass die Brechzahl vom Objektträgerglas und vom Epoxidharz annähernd gleich ist. Daher traten nahezu keine Reflexionsverluste beim Übergang von Glas zu Epoxidharz auf.

Mit der Messung der kollimierten Transmission der Glasküvetten konnte der zuvor angenommene lineare Zusammenhang zwischen dem Absorptionskoeffizienten und der Absorberpartikelkonzentration bewiesen werden. Das Gleiche gilt für den Streukoeffizienten und der Streupartikelkonzentration. Mit Hilfe dieser Messergebnisse konnte ein einfaches Rezept für die Herstellung eines beliebigen Phantoms bestimmt werden.

Das erstellte Phantom hat einen Streuanisotropiefaktor von $g = 0.5$. Um ein Phantom mit einem Streuanisotropiefaktor zu erzeugen, der dem von biologischen Gewebe entspricht, muss statt den Streupartikel aus Titandioxid, Streupartikel aus einem anderen Material wie zum Beispiel Aluminiumoxid, verwendet werden.

In Zukunft könnten die optischen Parameter der Phantome mit Hilfe der inversen Monte-Carlo-Methode bestimmt werden. Da die Eingangsgrößen und die Ausgangsgrößen der zu messenden Phantome bekannt sind, könnte die Photonenausbreitung in dem Phantom durch einen zufälligen Weg der Photonen beschrieben werden. Dieser zufällige Weg kann mit der Monte-Carlo-Methode simuliert werden. Photonen werden entweder im Phantom absorbiert oder gelangen über Streuprozesse durch das Phantom hindurch. Mit Hilfe dieser Daten können die optischen Parameter des Phantoms bestimmt werden.

Literatur

- [1] ASHLY, J ; JC, Martin: *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue*. Bd. 2. Springer, 2011. – ISBN 978-90-481-8830-7
- [2] BROCK, T ; GROTEKAES, M ; MISCHKE, P: *Lehrbuch der Lacktechnologie*. Bd. 2. Vincentz Verlag, 1998. – ISBN 3-87870-569-7
- [3] CARSTENS, J ; SIEMENS u. a.: Optische Tomographie. In: *IP 8* (2008), April, Nr. 4B, S. 4. – <http://priorartdatabase.com/IPCOM/000169181> [Onlinezugriff 30.05.2011]
- [4] EGGER, H ; SCHLOTTBOM, M: Analysis and regularization of problems in diffuse optical tomography. In: *Society for Industrial and Applied Mathematics* 42 (2010), Nr. 5, S. 1934-1948
- [5] FIRBANK, M ; DT, Delpy: A design for a stable and reproducible phantom for use in near-infrared imaging and spectroscopy. *Physics in Medicine and Biology*. In: *Physics in medicine and biology* 40 (1993), S. 847-853. – http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/bor1/pdf/firbank_pmb_1993.pdf [Onlinezugriff 14.03.2011]
- [6] FIRBANK, M ; DT, Delpy u. a.: An improved design for a stable and reproducible phantom material for use in near-infrared spectroscopy and imaging. In: *Physics in medicine and biology* 40 (1995), S. 955-961. – http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/bor1/pdf/firbank_pmb_1995.pdf [Onlinezugriff 16.03.2011]
- [7] FUJIFILM (Hrsg.): *Projet 900NP*. fujifilm, März 2011. – ffic.fujifilm.co.uk/othr_img/900NP.pdf [onlinezugriff 14.04.2011]
- [8] GOLDSCHMIDT, A ; HJ, Streitberger: *Lackiertechnik*. Vincenz Verlag, 2002. – ISBN 3-87870-324-4
- [9] HABERLAND, U ; BLAZEK, V u. a.: Optische Tomographie: Neue bildgebende Verfahren in der Medizintechnik / RWTH ACHEN. RWTH Aachen, November 1996. – Forschungsbericht. – http://ftp.informatik.rwth-aachen.de/Publications/CEUR-WS/Vol-6/WG_016.ps [Onlinezugriff 20.05.2011]

- [10] HUNTSMAN (Hrsg.): *Araldite Casting System*. Huntsman, Februar 2005.
– http://www.astorit.ch/fileadmin/publikationen_f/elektroisolierharze_kalthaertend/DBF_HY951_E_1_.pdf [onlinezugriff 14.03.2011]
- [11] LESCH, A: *Bestimmung optischer Parameter*. Juli 2010. – Bachelorarbeit, TU Graz, Institut für Medizintechnik
- [12] MARTIN J., C ; GEMERT, M. J. C. u. a.: Lichtausbreitung und Streuung in trüben Medien. In: *Angewandte Lasermedizin: Lehr- und Handbuch fuer Praxis und Klinik*. ecomed verlagsgesellschaft mbH, 1989, S. 1–10. – <http://www.bme.ogi.edu/~prahl/pubs/pdf/vangemert89a.pdf> [onlinezugriff 20.04.2011]
- [13] NF ELECTRONIC INSTRUMENTS (Hrsg.): *Two Phase Lock-in amplifier*. NF Electronic instruments, 1987
- [14] REINER, J: *Grundlagen der Ophthalmologischen Optik*. Books on Demand, 2002. – ISBN 3–8311–2767–0
- [15] SCHOTT AG (Hrsg.): *Spezifikation Physikalische und chemische Eigenschaften*. schott AG, Februar 2008
- [16] SPLINTER, R ; HOPPER, B: *An Introduction to Biomedical Optics (Series in Optics and Optoelectronics)*. Bd. 1. Taylor & Francis Verlag, 2007. – ISBN 0750309385
- [17] UNIVERSITY COLLEGE LONDON (Hrsg.): *How to make solid Phantoms*. University College London, 1999-2005. – http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/bor1/research/NIR_topics/phantom_recipe.htm [Online Zugriff am 09.03.2011]
- [18] WF, Cheong ; SA, Prah1 u. a.: A Review of the Optical Properties of Biological Tissues. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 26 (1990), November, Nr. 12, S. 2166–2185

A Anhang

A.1 Messtabellen

Dicke in <i>mm</i>	Konzentration in <i>mg/g</i>	U_s in <i>mV</i>	\bar{U}_s in <i>mV</i>	$U_{0,t}$ in <i>mV</i>
4.11	0	1007	1007	1105
		1000		
		1007		
		1010		
		1012		

Tabelle 20: Detaillierte Messwerte der Glasküvette mit klarem Epoxidharz.

Dicke d in mm	101 $\mu\text{g/g}$ Superblack				202 $\mu\text{g/g}$ Superblack			
	U_s in mV	\bar{U}_s in mV	$U_{0,l}$ in mV	U_0 in mV	U_s in mV	\bar{U}_s in mV	$U_{0,l}$ in mV	U_0 in mV
1	798	801.6	965	880.08	825	779.8	1058	964.9
	802				802			
	902				710			
	778				780			
	728				782			
2	715	716.4	980	893.8	626	665.4	1088	992.3
	752				701			
	729				565			
	701				630			
	685				805			
3	662	651.8	1000	912	535	522.6	1085	989.5
	641				542			
	621				526			
	685				515			
	650				495			
4	561	539	950	866.4	452	451.8	1160	1057.9
	561				455			
	541				431			
	547				436			
	485				485			
5	460	433.8	900	820.8	321	329.6	1085	989.5
	475				324			
	436				330			
	450				332			
	398				341			
6	365	385.8	900	820.8	238	252.4	1058	964.9
	373				253			
	401				317			
	395				226			
	395				228			

Tabelle 21: Detaillierte Messwerte der Glasküvetten mit variierenden Dicken und zwei unterschiedlichen Konzentrationen von der Absorberfarbe Superblack.

Dicke d in mm	9.09 $\mu\text{g/g}$ Projet 900NP				18.182 $\mu\text{g/g}$ Projet 900NP			
	U_s in mV	\bar{U}_s in mV	$U_{0,l}$ in mV	U_0 in mV	U_s in mV	\bar{U}_s in mV	$U_{0,l}$ in mV	U_0 in mV
1	1033	1024.2	1149	1074.8	821	833.6	955	870.9
	1020				835			
	1001				856			
	1037				825			
	1030				831			
2	827	832	960	875.5	785	767	930	848.2
	810				771			
	822				765			
	830				763			
	871				751			
3	800	785.8	930	848.2	632	723	930	848.2
	719				628			
	781				570			
	777				578			
	780				621			
4,11	802	797.6	955	870.9	706	732.6	957	872.7
	787				732			
	796				737			
	810				752			
	794				736			
5	795	772	866.4	950	689	674	930	848.2
	790				701			
	720				630			
	803				677			
	752				673			
6	771	767.2	955	870.6	669	643.6	935	852.7
	755				621			
	795				625			
	763				671			
	752				632			

Tabelle 22: Detaillierte Messwerte der Glasküvetten mit variierenden Dicken und zwei unterschiedlichen Konzentrationen von der Absorberfarbe Projet 900NP.

Dicke in <i>mm</i>	Konzentration in $\mu\text{g/g}$	U_s in <i>mV</i>	\overline{U}_s in <i>mV</i>	$U_{0,l}$ in <i>mV</i>	U_0 in <i>mV</i>
4.11	0	1007	1007	1105	1007
		1000			
		1007			
		1010			
		1012			
4.11	9.09	802	797.8	950	866.4
		812			
		790			
		801			
		784			
4.11	13.63	788	767.4	950	866.4
		777			
		754			
		765			
		753			
4.11	18.18	706	732.6	955	870.9
		732			
		737			
		752			
		736			
4.11	22.73	685	703	950	866.4
		687			
		700			
		728			
		715			

Tabelle 23: Detaillierte Messwerte der Glasküvetten mit gleichbleibender Dicke und variierender Konzentrationen von der Absorberfarbe Projet 900NP.

Dicke in <i>mm</i>	Konzentration in $\mu g/g$	U_s in <i>mV</i>	\overline{U}_s in <i>mV</i>	$U_{0,l}$ in <i>mV</i>	$U_{0,l}$ in <i>mV</i>
4.11	0	1007	1007	1105	1007
		1000			
		1007			
		1010			
		1012			
4.11	11.36	806	786.6	950	866.4
		756			
		826			
		772			
		762			
4.11	22.72	737	713.4	966	880.9
		692			
		713			
		705			
		720			
4.11	45.45	572	592.8	975	886.2
		602			
		610			
		602			
		572			
4.11	465	477	465	966	880.9
		450			
		478			
		448			
		477			

Tabelle 24: Detaillierte Messwerte der Glasküvetten mit gleichbleibender Dicke und variierender Konzentrationen von der Streufarbe Superwhite.

A.2 Bestellliste

Material	Bezeichnung	Hersteller	Vertrieb	Bestellnummer
Reagenzglas	110 x 30mm	-	Boesner GmbH, Alte Poststraße 171, A- 8020 Graz	-
Synthetische gummielastische Formbaumasse	Formaform	sculptare	Boesner GmbH, Alte Poststraße 171, A- 8020 Graz	CT60181(na)
Formtrennmittel	Formen-Trennmittel Hellrose	sculptare	Boesner GmbH, Alte Poststraße 171, A- 8020 Graz	CT51101
Formtrennmittel	Formen-Trennspray mit Teflon	sculptare	Boesner GmbH, Alte Poststraße 171, A- 8020 Graz	CT60616
Silicon-Kautschuk-Abformmasse	Silcotin HB	Artidee	Johannes Gerstäcker Verlag GmbH Postfach 1165, D-53774 Eitorf,	49136
Silicon-Kautschuk-Abformmasse	Silcolan NV	Artidee	Johannes Gerstäcker Verlag GmbH Postfach 1165, D-53774 Eitorf,	49134
Harz	Araldite DBF	Araldite	I and Peter Gonano Franzensdorferstr. 40 A 2285 Breitstetten	-
Härter	Aradur HY951	Aradur	I and Peter Gonano Franzensdorferstr. 40 A 2285 Breitstetten	-
Absorberfarbe	Superblack polyester pigment	Tiranti	Tiranti, 27 Warren Street, UK-London	407-190
Streufarbe	Superwhite polyester pigment	Tiranti	Tiranti, 27 Warren Street, UK-London	407-220
Objektträger	Mikroskop Objektträger	Assistent	Grall Medizintechnik, Hans-Sachsgasse 1, A-8010 Graz	2401
Katheterspritze	Einmal Katheterspritze, 3-teilig, 100 ml, Länge 110mm, Innendurchmesser 35mm	Omnifix B.Braun	Apotheke zur heiligen Elisabeth Mag. pharm. Schramm KG, Plüddemangasse A- 8010 Graz	-

Tabelle 25: Bestellliste

Abbildungsverzeichnis

1	Lichtausbreitung in einem Medium	2
2	Gussform	8
3	Gussform aus Formaform	9
4	Gussform aus Silikon (Silcolan HV)	10
5	100 ml-Katheterspritze als Gussform	11
6	Phantome mit Bohrungen	13
7	Phantome mit Bohrungen	14
8	Spektrum: Absorptionskoeffizient	15
9	Spektrum: Streukoeffizient	16
10	Spektrum: Anisotropiefaktor	17
11	Glasküvette	18
12	Glasküvetten mit Absorberpigmenten	22
13	Messaufbau zur Messung des Brewsterwinkels.	23
14	Brechzahlvergleich mit einer Glasplatte	25
15	Schematischer Aufbau zur Messung der kollimierten Transmission	29
16	Realer Aufbau zur Messung der kollimierten Transmission	30
17	Diagramm, variierende Dicke; Superblack	42
18	Diagramm, variierende Dicke; Projet 900NP	45
19	Beziehung Absorptionskoeffizient und Konzentration; Projet 900NP	47
20	Beziehung Streukoeffizient und Konzentration; Projet 900NP	49
21	Phantome Hergestellte Phantome	50

Tabellenverzeichnis

1	Glasküvetten mit verschiedenen Dicken und Konzentrationen	19
2	Glasküvetten mit verschiedenen Konzentrationen (Projet 900NP)	20
3	Glasküvetten mit verschiedenen Konzentrationen (Superwhite)	21
4	Rezept zur Herstellung der optischen Phantome	32
5	Rezept zur Herstellung der optischen Phantome 900NPSL2	33
6	Phantome mit verschiedenen Einschlüssen	36
7	Phantome mit verschiedenen Einschlüssen für Fluorophore	37
8	Ergebnisse des Brewsterwinkelmessung	38
9	Reflexionsverluste einer klaren Glasküvette	39
10	Messwerte unterschiedliche Dicken, Superblack	40
11	Berechnete Absorptionskoeff., verschiedene Dicken, 101 $\mu\text{g/g}$ Superblack .	41
12	Berechnete Absorptionskoeff., verschiedene Dicken, 202 $\mu\text{g/g}$ Superblack .	41
13	Messwerte unterschiedliche Dicken, Projet 900NP	43
14	Berechnete Absorptionskoeff., verschiedene Dicken, 9.09 $\mu\text{g/g}$ Projet900NP	44
15	Berechnete Absorptionskoeff., verschiedene Dicken, 18.18 $\mu\text{g/g}$ Projet900NP	44
16	Messwerte mit konst. Dicke und variierende Konzentration, Projet 900NP .	46
17	Berechneter Absorptionskoeff., konst. Dicke, variierende Konzentration, Projet 900NP	46
18	Messwerte mit konst. Dicke, variierende Konzentration, Superwhite	48
19	Berechnete Streukoeff., konst. Dicke, variierende Konzentration, Superwhite	48
20	Detaillierte Messwerte der Glasküvette mit klarem Epoxidharz.	60
21	Detaillierte Messwerte, variierenden Dicken, Superblack	61
22	Detaillierte Messwerte, variierenden Dicken, Projet900NP	62
23	Detaillierte Messwerte, variierende Konzentration, Projet 900NP	63
24	Detaillierte Messwerte, variierende Konzentration, Superwhite	64
25	Bestellliste	65