

Bachelorarbeit des Studiengangs Augenoptik / Augenoptik Hörakustik

Temperaturverhalten von Brillenfassungen aus Kunststoff und Horn: Analyse und Vergleich

Zugelassene Abschlussarbeit des Studiengangs Augenoptik und Hörakustik zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

vorgelegt von Polina, Ottenwälder

Tag der Einreichung:

19.09.18

Erstbetreuer: Prof. Dr. Ulrike Paffrath

Zweitbetreuer: Thomas Hauber



Bachelorarbeit des Studiengangs Augenoptik / Augenoptik Hörakustik

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorthesis / Masterthesis selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine andere als die angegebene Literatur benutzt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Westhausen, 19.09.18

Ort, Datum

Unterschrift

L

Abstract

Das Ziel dieser Bachelorthesis ist es, mit verschiedenen Messmethoden das Verhalten von Kunststoffen und Horn bei Wärmezufuhr zu untersuchen und zu analysieren. Die Ergebnisse sollen die Verarbeitung von diesen Werkstoffen im augenoptischen Fachgeschäft erleichtern.

Es wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Im ersten Versuchsteil wurde untersucht, wie ein Material sich bei einer konstanten Wärmezufuhr in Abhängigkeit von der Zeit verhält. In der zweiten Messreihe wurde das Abkühlverhalten von Werkstoffen dokumentiert. Im letzten Versuchsteil wurde untersucht, ob sich das Material auch gleichmäßig erwärmen lässt. Des Weiteren wurde das thermische Verhalten von Zelluloseacetat in zwei verschiedenen Farben miteinander verglichen und analysiert. Das Verhalten von Horn bei Wärmezufuhr und sein Abkühlverhalten wurden bei 120 °C und 160 °C untersucht.

Die Untersuchungen zeigen, dass vor allem Kunststoffe und Horn sich in ihrem thermischen Verhalten voneinander unterscheiden. Bei Kunststoffen gab es nur kleinere Abweichungen voneinander. PA wird schneller warm und CA lässt sich gleichmäßiger erwärmen. Sowohl PA als auch CA Fassungen konnten die vorgegebene Temperatur innerhalb von 25 min nicht erreichen. Die Hornfassung erwärmte sich schneller und erreichte sowohl bei 120 °C, als auch bei 160 °C die Temperatur in vorgegebener Zeit. Die Umgebungstemperatur beim Abkühlen wurde von beiden Kunststoffen nicht erreicht. Horn erreichte die Umgebungstemperatur.

Vorwort

Ich möchte mich an dieser Stelle recht herzlich bei Frau Prof. Dr. Ulrike Paffrath für die Betreuung meiner Abschlussarbeit bedanken, bei der sie mir mit Rat und Tat zur Seite stand. Ebenso möchte ich mich bei meinem Zweitprüfer Herrn Thomas Hauber bedanken.

Herrn Prof. Dr. Jürgen Nolting danke ich für die Bereitstellung seiner Thermographiekamera und der dazugehörigen Software, sowie Informationsmaterial.

Zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, die mich während meines Studiums jederzeit moralisch unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Er	klärung		I
Ab	ostract		
Vo	orwort		
Inl	haltsverze	eichnis	IV
Fo	rmelzeich	nen	VI
Ab	okürzunge	۶n	VII
1	Einleitun	g	1
2	Grundlag	gen	3
	2.1 Kunst	stoffe	3
	2.1.1	Fassungswerkstoffe auf Zellulosebasis	3
	2.1.2	Fassungswerkstoffe ohne Zellulosebasis	4
	2.2 Horn.		6
	2.3 Therr	nisches Verhalten von Stoffen	7
	2.3.1	Spezifische Wärmekapazität	7
	2.3.2	Wärmeleitfähigkeit	8
	2.3.3	Wärmeeindringzahl	9
	2.3.4	Temperaturleitfähigkeit	10
	2.3.5	Thermisches Verhalten von Kunststoffen	11
	2.3.6	Emissionsgrad	12
3	Material	und Methoden	14
	3.1 Vorge	ehen	14
	3.2 Verw	endete Fassungen	15
	3.3 Verw	endete Messgeräte und Vorrichtungen	17
	3.3.1	Wärmeschrank Heraeus T 5028	17
	3.3.2	Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB	18
	3.3.3	Wärmebildkamera MobIR® M8	19
	3.3.4	Haltervorrichtung	20

	3.3.5	Sonstige Materialien	.21		
	3.4 Vers	uchsaufbau	.22		
	3.4.1	Emissionsgradbestimmung des Fassungswerkstoffs	.23		
	3.4.2	Verhalten von Werkstoffen bei Erwärmung und Abkühlung in			
		Abhängigkeit von der Zeit	.24		
	3.4.3	Verhalten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Die	cke		
		des Materials	.25		
4	Messung	gen und Auswertung	. 27		
	4.1 Emis	sionsgradbestimmung des Fassungswerkstoffs	.27		
	4.2 Verh	alten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Zeit	.28		
	4.3 Verh	alten von Werkstoffen bei Abkühlung in Abhängigkeit von der Zeit	. 38		
	4.4 Verh	alten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Dicke	des		
	Materi	als	.48		
	4.4.1	Zelluloseacetat	.48		
	4.4.2	Polyamid	.50		
	4.4.3	B Horn	.52		
5	Ergebnis	sse	. 56		
	5.1 Verh	alten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Zeit	.56		
	5.2 Verh	alten von Werkstoffen bei Abkühlung in Abhängigkeit von der Zeit	.58		
	5.3 Verh	alten von Fassungswerkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von	der		
	Dicke	des Materials	.59		
6	Diskuss	ion	. 60		
7	Schluss	folgerung und Ausblick	. 62		
Lit	eraturve	rzeichnis	. 63		
Ab	bildungs	sverzeichnis	. 64		
Ta	- Tabellenverzeichnis				
۰u					
An	nang		0/		

VI

_

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
а	m²/s	Temperaturleitfähigkeit
b	$J/(K^*m^{2*}\sqrt{s})$	Wärmeeindringzahl
С	0	Celsius
С	kJ/kg	spezifische Wärmekapazität
K	К	Kelvin
λ (lamda)	W/m*K	Wärmeleitfähigkeit
Μ	kg	Masse
ρ (rho)	kg*m ⁻³	Dichte
S	m	Dicke
$\Delta T (= \Delta \vartheta)$	К	Temperaturänderung
Q	J	Wärmemenge

Formelzeichen

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
CA	Zelluloseacetat
CAB Zelluloseacetobutyrat	
CN	Zellulosenitrat
СР	Zellulosepropionat
EP	Epoxidharz
m	Meter
min	Minuten
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid
ROI	Region of Interest
S	Sekunden
SIR	Silikon

1 Einleitung

Kunststoffe gehören zu den beliebtesten Fassungsmaterialien in der Augenoptik. Sie sind einfach in der Herstellung, und lassen sich gut anatomisch anpassen. Fassungen aus Naturstoffen sind seltener am Markt anzutreffen. Sie sind in der Produktion aufwändiger, haben einen höheren Preis, sind aber hautfreundlicher und verursachen keine Allergien.

Es gibt bereits zahlreiche Untersuchungen von Kunststoffen. Bei diesen Untersuchungen wurde bereits das Verhalten von verschiedenen Kunststoffen bei Verglasung, Anpassung und auf grundsätzliche Alterungserscheinungen untersucht.

Die Korrosion von Kunststoffen zeigt sich an weißlich-gelben Ablagerungen. Diese befinden sich meistens an Bügelenden. UV-Licht, Sauerstoff, Temperatur und vor allem Hautkontakt sind wichtige Faktoren, die die Korrosion von Kunststoffen beeinflussen. Vor allem die Fette der Talgdrüsen können in das Material eindringen. Das kann unter anderem zur Quellung und Verlust von Weichmachern führen. Verliert eine Fassung aus Kunststoff die Weichmacher, wird sie spröde (Bohn, 2002).

Untersuchungen zum Schrumpfverhalten und Formänderung beim Erwärmen von Kunststoffen haben gezeigt, dass Zelluloseacetat bereits ab 80 °C anfängt zu schrumpfen, Polyamid hingegen erst ab 160 °C. Ab 170 °C fangen die Kunststoffwerkstoffe an sich zu zersetzten (Mayer, 2012).

Ideale Umformtemperatur für Zelluloseacetat liegt zwischen 80 °C und 100 °C. Epoxidharze können zwischen 110 °C und 130 °C gebogen werden. Die Umformtemperatur für Polyamid liegt bei 100-110 °C (Bohn, 2002).

Die Alterungsprozesse von Horn sieht man vor allem am Schrumpfverhalten. Aus diesem Grund sollten die Gläser etwas kleiner geschliffen werden, da das Material mit der Zeit schrumpft. Werden die Gläser passend eingeschliffen, kann es mit der Zeit zur Überdehnung des Materials kommen. Der Hautschweiß kann auch Hornfassungen angreifen. Das Material kann rau und matt werden (Figura-Milde, 2016). Für Naturstoffe gibt es vergleichsweise wenig Versuche, die das thermische Verhalten untersuchen. Bei Hornfassungen sollte die Heißluftquelle auf 200 °C, also etwas höher wie vergleichsweise bei Kunststoffen, eingestellt werden. Das Material sollte aber bei der Anpassung oder Verglasung nur in kurzen, etwa 15 Sekunden langen, Zeitabständen der Heißluft ausgesetzt werden (Figura-Milde, 2016). Grundsätzlich wird eine Anpass- und Verglasungstemperatur von 80 °C empfohlen (Kommnick et.al 2014). Ob es Unterschiede zwischen dem thermischen Verhalten von Massivhorn, Vasenhorn und dem geschichteten Material aus Holz und Horn gibt, ist nicht bekannt.

In dieser Bachelorarbeit wird das Verhalten von Zelluloseacetat, Polyamid und Horn beim Erwärmen und Abkühlen miteinander verglichen. Die Motivation liegt darin, weitere Informationen zum thermischen Verhalten von Kunststoffen und Horn zu sammeln.

2 Grundlagen

2.1 Kunststoffe

In der Augenoptik kommen zahlreiche Kunststoffe zum Einsatz. Die Verformbarkeit der Kunststoffe ist die Ursache hierfür, weil das eine optimale Anpassung und Verglasung erlaubt.

Kunststoffe werden in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere eingeteilt. Duroplaste lassen sich Aufgrund der starken Vernetzung von Makromolekülen nicht schmelzen. Sie sind daher nicht für die Fassungsherstellung geeignet, sind aber in der Augenoptik als organische Brillengläser zu finden. Elastomere haben eine lose vernetzte Struktur und sind gummielastisch. Sie können nicht plastisch verformt oder gekittet werden. Elastomere können unter anderem als Werkstoff für Kontaktlinsen eingesetzt werden. Für die Fassungsherstellung werden Thermoplaste verwendet, weil diese sich aufgrund ihrer unvernetzten Struktur bei Wärmezufuhr plastisch verformen lassen und bei Abkühlung wird wieder ein formstabiler Zustand eingenommen (Kommnick et. al 2014).

Es wird außerdem zwischen Fassungswerkstoffen auf Zellulosebasis und Fassungswerkstoffen ohne Zellulosebasis unterschieden.

2.1.1 Fassungswerkstoffe auf Zellulosebasis

Zellulosenitrat, Zelluloseacetat, Zelluloseacetobutyrat und Zellulosepropionat sind Kunststoffe auf Zellulosebasis.

Zellulosenitrat wurde seit 1874 für Brillenfassungen verwendet und gehört zu den ältesten Kunststoffen. Heute findet das leicht entzündliche Zellulosenitrat in der Augenoptik kaum noch Verwendung (Bohn, 2002).

Zelluloseacetat besteht aus Zellulose, Essigsäure, Weichmachern und Additiven und wurde um 1930 als Fassungsmaterial verwendet. Dieses Material gehört heute noch zu dem beliebtesten in der Augenoptik. Die Biegetemperatur von Zelluloseacetat liegt bei 80 – 100 °C (Bohn, 2002).

Zellulosepropionat wird aus Zellulose, Propionsäureester, Weichmachern und Additiven hergestellt und gehört zu den moderneren Kunstoffen auf dem augenoptischen Markt. Die ersten Fassungen aus Zellulosepropionat erschienen 1976 auf dem Markt (Bohn, 2002).

Zelluloseacetobutyrat besteht aus Zellulose mit Buttersäure und Additiven. Dieser Kunststoff wird z.B. für Bügelenden verwendet und besitzt ähnliche Eigenschaften wie Zellulosepropionat (Bohn, 2002).

2.1.2 Fassungswerkstoffe ohne Zellulosebasis

Zu den Fassungswerkstoffen ohne Zellulosebasis gehören Epoxidharz, Polyamid, Polyvinylchlorid und Silikon.

Epoxidharz besteht aus Harz und Härter und ist 1969 auf dem Markt erstmals unter dem Markennamen Optyl erschienen. Bis heute wird Optyl für die Fassungsherstellung verwendet. Epoxidharze enthalten keine Weichmacher, sind leicht und haben eine hohe Warmformbeständigkeit. Aufgrund der chemischen Struktur von Epoxidharz, besitzt die Fassung aus Optyl einen sogenannten "memory effect", nimmt also beim wiedererwärmen ihre ursprüngliche Form wieder an. Die Oberflächenbehandlung ist nicht möglich, weil die Oberfläche lackiert und beschichtet ist (Bohn, 2002).

Polyamid wird in der Augenoptik häufig für Sportfassungen und Arbeitsschutzbrillen verwendet, weil das Material bruchsicher ist. Die Anpassung hingegen ist schwierig, weil das Material sehr schnell weich wird. Die Umformtemperatur liegt bei 100-110 °C. Eine besondere Form von Polyamid ist ein amorphes, also hochtransparentes Co-Polyamid und ist 1982 unter dem Namen SPX auf dem Markt erschienen. Dieses Material wurde speziell für Brillenfassungen entwickelt und zeichnet sich durch sehr geringe Dichte und einer Resistenz gegenüber Schweiß und Kosmetika aus (Bohn, 2002). PVC wird für die Herstellung von harten und weichen Nasenstegen verwendet. Diese werden im Spritzgussverfahren hergestellt (Kommnick et. al 2014).

Silikone sind hydrophob, sauerstoffdurchlässig und wärmeresistent und eignen sich daher für die Herstellung von Nasenstegen und Umlaufstegen (Kommnick et. al 2014).

2.2 Horn

Für die Fassungsherstellung können nicht nur Metalle und Kunststoffe verwendet werden, sondern auch zahlreiche Naturwerkstoffe. Einige Naturwerkstoffe dürfen nicht mehr für die Fassungsherstellung verwendet werden. Das sind unter anderem Elfenbein, Schildpatt oder das Perlmutt bestimmter Muschelarten. Holz und Horn hingegen sind immer noch ein fester Bestandteil der Fassungsherstellung (Kommnick et. al 2014).

Für die Fassungsherstellung werden die Hörner des afrikanischen Wasserbüffels des indischen Siamhorns und des irischen Rindes verwendet. Der Großteil stammt aber vom vielfach für die Fleischproduktion gezüchteten südamerikanischen Longhornrinds ab und ist daher ein Abfallprodukt der Fleischproduktion (Bohn, 2002).

Hornfassungen bestehen zu 70% aus reinem Eiweiß. Sie sind leicht, sauerstoffdurchlässig, atmungsaktiv und hautfreundlich. Um eine Fassung aus massivem Horn herzustellen wird das Horn zu Platten zersägt, in Fassungsform gefräst, gefeilt und poliert. Für die Fassungsherstellung wird auch das hohle "Vasenhorn" verwendet. Um das Vasenhorn zu verarbeiten wird dieses zuerst mehrere Wochen im kalten Wasser eingelegt, damit es sich vom Knochengerüst lösen kann, wonach im Anschluss die Hörner aufgesägt und unter Druck und Wärmeeinwirkung zu platten gepresst werden können. Danach werden die Platten wie massives Horn weiterverarbeitet. Da Vasenhorn dazu neigt sich in die ursprüngliche Form zurückzudrehen, werden die Platten sehr dünn geschnitten, kreuzweise übereinandergelegt und verklebt (Bohn, 2002).

Der Augenoptiker muss vor allem beachten, dass Hornfassungen nicht im Ultraschallbad gereinigt werden dürfen. Im Laufe der Zeit schrumpft Horn, daher dürfen die Gläser etwas kleiner geschliffen werden. Die Spitzfacette sollte allerdings gebrochen werden, um zu verhindern, dass sich die schichtartig aufgebauten Lagen des Materials durch die entstandene Keilwirkung voneinander lösen. Die ideale Biegetemperatur von Horn liegt bei 80 °C (Kommnick et. al 2014).

2.3 Thermisches Verhalten von Stoffen

Das thermische Verhalten von Stoffen ist maßgebend für das Verständnis, wie sich verschiedene Stoffe bei Erwärmung und Abkühlung verhalten. Es gibt eine Mehrzahl an Faktoren, die die Aufwärmung und Abkühlung von Stoffen beeinflussen.

2.3.1 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität *c* ist eine Stoffkonstante. Sie gibt Aufschluss darüber, wieviel Wärmemenge Q benötigt wird, um 1 kg Masse eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Die Formel 1) lautet:

1)

$$\Delta Q = m * c * \Delta T$$

Die Formel 2) kann nach c umgestellt werden:

2)

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta T * m}$$

Es wird besonders bei Gasen zwischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_V und bei konstantem Druck c_ρ unterschieden (Oberbach et. al 2004).

Die spezifische Wärmekapazität gibt Aufschluss darüber, wieviel Wärmemenge benötigt wird, um verschiedenen Stoffe auf die gleiche Temperatur zu erwärmen. So brauchen Metalle vergleichsweise weniger Wärmeenergie, um auf die gleiche Temperatur erwärmt zu werden. Das bedeutet in der Praxis, dass Metallfassungen schneller warm werden, wie vergleichsweise Holzfassungen. So wäre eine Holzfassung bei hohen Temperaturen angenehmer, da diese nicht so schnell warm wird.

Eine Auflistung von ausgewählten Metallen und Nichtmetallen, mit der dazugehörigen spezifischen Wärmekapazität ist in Kapitel 2.3.5 zu finden. Die spezifische Wärmekapazität ist auch für die weitere Berechnung der Temperaturleitfähigkeit maßgebend.

2.3.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine weitere Kennzahl, die Aufschluss über das thermische Verhalten von Stoffen gibt. Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt die Wärmemenge Q, die in 1 s durch eine Fläche von A=1 m³ und mit einer Dicke von s=1 m transportiert wird, wenn gleichzeitig die Differenz der beiden Oberflächen $\Delta \vartheta = 1$ K beträgt.

Für die Temperaturdifferenz kann sowohl $\Delta \vartheta$ als auch ΔT verwendet werden. Die Formel 3) lautet:

3)

$$\Delta \vartheta = \Delta T$$

Die Formel 4) für die Wärmeleitfähigkeit lautet:

4)

$$Q = \lambda * A * (\frac{\Delta \vartheta}{S})$$

Die Wärmeleitfähigkeit gibt Aufschluss darüber, ob sich ein Stoff für Dämmung eignet. Je niedriger die Wärmeleitfähigkeit ist, desto besser sind die Dämmeigenschaften des Stoffes. Kunststoffe haben z.B eine geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Metallen (Oberbach et. al 2004). Die Wärmeleitfähigkeit sagt viel über das thermische Verhalten von Werkstoffen aus. Die Wärme fließt durch Kunststoffe langsamer, wie durch die Metalle. Daher erwärmen sich die Fassungen aus Kunststoff nicht so schnell wie Metallfassungen. Das ist ein wichtiger Punkt, der bei der Kundenberatung berücksichtigt werden sollte. Wird die Fassung öfters hohen Temperaturen ausgesetzt, so wäre eine Fassung aus Kunststoff angenehmer, da diese länger braucht um die warme Umgebungstemperatur zu erreichen.

Eine genaue Auflistung von Metallen und Nichtmetallen mit der dazugehörigen Wärmeleitfähigkeit, ist in Kapitel 2.3.5 zu finden.

2.3.3 Wärmeeindringzahl

Mit der spezifischen Wärmekapazität c und der Wärmeleitfähigkeit λ lässt sich nun mit der folgenden Formel 5) die Wärmeeindringzahl b berechnen:

5)

$$b = \sqrt{\lambda * c * \rho}$$

Die Wärmeeindringzahl ist ein Maß dafür, wie schnell die Wärme in einen bestimmten Stoff eindringt (Oberbach et. al 2004).

Die Wärmeeindringzahl ist dafür maßgebend, wie ein Stoff bei gleicher Temperatur empfunden wird. Metalle haben eine höhere Wärmeeindringzahl, werden also bei Raumtemperatur kälter empfunden, wie vergleichsweise Holz. In einer kalten Umgebung ist also eine Fassung aus Holz angenehmer auf der Haut, wie eine Metallfassung.

Eine Auflistung der ausgewählten Stoffe und der dazugehörigen Wärmeeindringzahl *b* ist in der folgenden Tabelle 1 zu sehen.

Stoff	$b\left(\operatorname{in} \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}\mathrm{m}^2\sqrt{\mathrm{s}}} ight)$
Dämmstoff (Mineralfasern)	0,06
Kork	0,1
Holz	0,4 0,5
Gummi	0,6
menschliche Haut	1,0 1,3
Glas	1,3 1,5
Wasser	1,6
Beton	1,82,2
Stahl	14
Kupfer	36

Tabelle 1 ausgewählte Stoffe und die dazugehörige Wärmeeindringzahl b

2.3.4 Temperaturleitfähigkeit

Anschließend beschreibt die Temperaturleitfähigkeit *a* den Wärmetransport bei Aufheiz-/ und Abkühlvorgängen. Die Wärmeleitfähigkeit λ wird durch die spezifische Wärmekapazität c geteilt. Die Formel 6) lautet:

6)

$$a = \frac{\lambda}{c}$$

Je höher die Temperaturleitfähigkeit ist, desto schneller dringt die Wärme durch den Stoff durch. Metallfassungen, die eine höhere Temperaturleitfähigkeit besitzen, brauchen also weniger Zeit, um eine höhere Temperatur zu erreichen. Kunststofffassungen und Holzfassungen sind daher angenehmer bei höheren Temperaturen.

Eine genaue Auflistung von ausgewählten Stoffen mit der dazugehörigen Temperaturleifähigkeit ist im Kapitel 2.3.5 zu finden.

2.3.5 Thermisches Verhalten von Kunststoffen

Kunststoffe haben im Vergleich zu Metallen geringere Wärmeleitfähigkeit, deshalb fließt die Wärme langsamer in Kunststoffe wie in Metalle. Die Folge ist, dass Kunststoffe mehr Zeit brauchen, um eine bestimmte Temperatur zu erreichen.

Die Wärmekapazität von Kunststoffen ist höher wie bei Metallen. Das bedeutet, dass Kunststoffe im Vergleich zu Metallen die Wärme besser speichern.

Je größer die Wärmekapazität, desto geringer ist Wärmeleitfähigkeit.

Die Wärmeeindringzahl von Kunststoffen ist niedriger als bei Metallen. Deswegen werden Kunststofffassungen im Winter als wärmer und angenehmer empfunden, als Metallfassungen. Kunststoffe erreichen nie die kalte Umgebungstemperatur.

In der folgenden Tabelle 2 werden ausgewählte Stoffe und die dazugehörigen thermischen Kennzahlen aufgelistet. Die Temperaturleitfähigkeit ist von der Temperatur abhängig. Alle Angaben gelten für 20 °C.

	Dichte p	spezifische Wärmekapazität c	Wärmeleitfähigkeit λ	Temperaturleitfähigkeit a	
	[10 ³ kg⋅m ⁻³]	[kJ/(kg·K)]	[W/(m·K)]	[10 ⁻⁶ m ² /s]	
Quarzglas	2,21	0,73	1,40	0,87	
Aluminium	2,70	0,89	237,00	98,80	
Eisen	7,86	0,45	81,00	22,80	
Kupfer	8,93	0,38	399,00	117,00	
Magnesium	1,74	1,02	156,00	87,90	
Nickel	8,85	0,45	91,00	23,00	
Titan	4,50	0,52	22,00	9,40	
Polyethylen	0,92	2,30	0,35	0,17	
Polytetrafluorethylen	2,20	1,04	0,23	0,10	
Polyvinylchlorid	1,38	0,96	0,15	0,11	

Tabelle 2Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und die Temperatur-
leitfähigkeit von ausgewählten Metallen und Nichtmetallen bei 20°C

In der folgenden Tabelle 3 sind die thermischen Daten für die in der Versuchsreihe verwendeten Kunststoffe dargestellt.

	Dichte p	spezifische Wärmekapazität c	Wärmeleitfähigkeit λ	
	[10 ³ kg⋅m ⁻³]	[kJ/(kg·K)]	[W/(m·K)]	
СА	1,3	1,6	0,22	
PA 12	1,02	1,26	0,23	

Tabelle 3 Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit von CA und PA 12

Für Horn existieren weinige Daten, da das thermische Verhalten von Horn wenig erforscht wurde. Es ist allerdings bekannt, dass Horn ein schlechter Wärmeleiter ist. In einer tiermedizinischen Doktorarbeit untersuchte die Frau Fruck Melanie 2007 die Wärmeleitfähigkeit von Horn. Es wurden Hornproben aus einem Huf verwendet. Die gemessene Wärmeleitfähigkeit von Horn beträgt laut der Messung im Durchschnitt 0,20 W/ m*K (Fruck, 2007).

Des Weiteren wurde in der Dissertation von Köhler aus dem Jahr 1939 ein Versuch von Zeilinger erwähnt, bei dem die Wärmeleitfähigkeit von Horn gemessen wurde. Nach der Umrechnung in die richtige Einheit (W/m*K) belief sich der von Zeilinger gemessene Wert der Wärmeleitfähigkeit auf 0,34 W/m*K (Fruck, 2007).

In allen weiteren Analysen wird 0,34 W/m*K als Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Horns verwendet. Die damit verbundene Problematik wird im Kapitel 6 genau erläutert und diskutiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es eine Vielzahl von Faktoren gibt, die auf das Wärmeverhalten von Stoffen Einfluss haben. Die Wärmeverteilung ist vom Material, der Dicke des Materials, der Umgebungstemperatur, der Dauer der Erwärmung und dem thermischen Verhalten des Werkstoffs abhängig.

2.3.6 Emissionsgrad

Durch den Emissionsgrad ε , wird das Vermögen die Strahlung zu emittieren, also abzugeben, beschrieben. Der Emissionsgrad ist von der Beschaffenheit und der Temperatur abhängig. Raue und dunkle Materialien nehmen viel Wärmestrahlung auf, glatte und heller Materialien vergleichsweise wenig. Der Emissionsgrad kann sehr stark schwanken, da es viele Variationen von Materialien gibt. Beispielsweise kann der Emissionsgrad von Eisen von 0,04 bis 0,85 schwanken, je nachdem ob das Material oxidiert, verrostet oder poliert ist und bei welcher Temperatur die Messung stattfand.

Die Ermittlung vom Emissionsgrad ist für die richtige Temperaturangabe von größter Bedeutung. Ohne die Angabe des richtigen Emissionsgrades, ist die in der Software Pyrosoft Professional angezeigte Temperatur nicht korrekt. Der genaue Versuchsaufbau bei der Ermittlung des Emissionsgrades ist in Kapitel 3.4.1 und die Ergebnisse der Messung in Kapitel 4.1 zu sehen.

3 Material und Methoden

3.1 Vorgehen

In dieser Bachelorthesis wurde das Verhalten von Kunststoffen und Horn bei Erwärmung untersucht. Als erstes musste eine Vormessung getätigt werden, um die Temperatur der Materialien bestimmen zu können. Dazu wurde der Emissionsgrad für jedes verwendete Material bestimmt. Im zweiten Teil der Untersuchungen wurde das Verhalten des Materials auf Erwärmung in Abhängigkeit von der Zeit untersucht. Dazu wurden Fassungsmittelteile bei konstanter Temperatur unterschiedlich lang erwärmt. Im Anschluss wurde für jedes Material die Abkühlung analysiert. Es wurden Bilder mit der Wärmebildkamera in kurzen Zeitintervallen gemacht, bis die Temperatur der Fassung sich nicht mehr verändert hat. Anschließend wurde untersucht, ob sich die Fassungen aus verschiedenen Werkstoffen sich gleichmäßig erwärmen lassen und inwieweit es von der Dicke des Materials abhängt. Hierfür wurde von jedem Werkstoff ein Fassungsmittelteil bei gleicher Temperatur erwärmt und anschließend wurden an verschieden Stellen des Mittelteiles die Temperatur gemessen und miteinander verglichen. Im Anschluss wurden noch 2 Zelluloseacetat Fassungen unterschiedlicher Farben miteinander verglichen, um zu untersuchen, ob die Farbe einen Einfluss auf das Verhalten des Materials bei Wärmezufuhr hat.

3.2 Verwendete Fassungen

Für die Messungen wurden Fassungsteile aus verschiedenen Werkstoffen verwendet. Es wurden Kunststofffassungen der Firma Eschenbach Optik GmbH verwendet (siehe Abbildung 1; Abbildung 2). Für die Versuche wurden nur Fassungsmittelteile verwendet. Für die Messung der Erwärmung und Abkühlung von Horn wurden Bügel aus Horn verwendet.



Abbildung 1 blaue CA Fassung der Firma Eschenbach Optik GmbH

Für die Untersuchung der Wärmeverteilung wurde zusätzlich die gleiche CA Fassung in braun verwendet, um das Wärmeverhalten des gleichen Werkstoffs aber verschiedenen Farben zu untersuchen.



Abbildung 2 amorphe PA Fassung der Firma Eschenbach Optik GmbH

Für die Messungen wurde ein Fassungsmittelteil und Bügel aus Horn verwendet (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3 Fassungsmittelteil aus Horn

3.3 Verwendete Messgeräte und Vorrichtungen

3.3.1 Wärmeschrank Heraeus T 5028

Der Wärmeschrank Heraeus T 5028 wird bei allen Messungen verwendet, um die Fassungsteile auf eine bestimmte Temperatur zu erwärmen. Die Temperatur wird über einen Drehregler eingestellt und an einem Quecksilberthermometer an der linken Seite des Wärmeschranks abgelesen (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4 Wärmeschrank Heraeus T 5028

Für eine genaue Bestimmung der Temperatur wurde zusätzlich das Thermometer Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB durch die Öffnung im Wärmeschrankeingelassen (Wächtler, 2017). Das ist in der Abbildung 5 zu sehen.



Abbildung 5 Wärmeschrank Heraeus T 5028 und der zusätzlich durch die Öffnung eingeführte Thermometer Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB

3.3.2 Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB

Das Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB wurde bei jeder Messung verwendet, um die aktuelle Temperatur im Wärmeschrank zu kontrollieren (siehe Abbildung 6). Dafür wurde das Thermometer über eine Öffnung im Wärmeschrank eingelassen. Die Messbereichsauswahl ist auf °C eingestellt und das Thermoelement ist an den unteren rechten Anschlüssen befestigt (Wächtler, 2017).



Abbildung 6 Thermometer Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB

3.3.3 Wärmebildkamera MobIR® M8

Um die Temperatur der Fassungsteile zu messen wurde die Wärmebildkamera MobIR® M8 verwendet (siehe Abbildung 7 Wärmebildkamera MobIR® M8 auf einem Stativ). Die Wärmebildkamera wurde auf einem Stativ befestigt. Für die Auswertung der Bilder wurde die dazugehörige Software Pyrosoft Professional verwendet.



Abbildung 7 Wärmebildkamera MobIR® M8 auf einem Stativ

Mit der Software Pyrosoft Professional sind zahlreiche Darstellungen und Ansichten möglich. Eine Wärmeskalierung gibt Aufschluss darüber, welche Farbe einen bestimmten Temperaturbereich darstellt. So sind die Farben Schwarz und Blau für die Bereiche bis 50 °C. Lila und Magenta stellen die Temperaturen um die 60 °C dar. Temperaturen von etwa 70 °C können an einer roten Farbe erkannt werden und Temperaturen um 80 °C sind orange. Wenn die Temperaturen über 90 °C steigen, kann es an einer gelben Farbe erkannt werde. Übersteigen die Temperaturen 100 °C, ist die Farbe Weiß. Auch die ROI (Region of Interest) können auf verschiedenen Wegen ermittelt werden. Neben der einfachen Auswahl eines einzelnen Punktes können auch bestimmte Bereiche ausgewählt werden. In diesem Bereich wird dann die minimale, maximale und die durchschnittliche Temperatur ermittelt. Es kann aber auch ein Polygon an Punkten gemessen werden. Dazu werden verschiedene Punkte markiert, und die Software rechnet die durchschnittliche Temperatur aus.

3.3.4 Haltervorrichtung

Um die Fassungsteile für die Bildaufnahme zu befestigen wurde eine Haltevorrichtung verwendet, die üblicherweise für die Lötung verwendet wird (siehe Abbildung 8). Damit konnte das Fassungsteil in einer Position stabilisiert werden.



Abbildung 8 Haltevorrichtung mit einem befestigtem Fassungsmittelteil

3.3.5 Sonstige Materialien

Außerdem wurden bei den Messungen Sicherheitshandschuhe verwendet, um die heißen Fassungsteile sicher anzufassen und in der Haltevorrichtung zu befestigen.

Um den Umfang an verschiedenen Stellen einer Fassung zu ermitteln wurde ein Messband verwendet.

3.4 Versuchsaufbau

Für die Bildaufnahme wurden die Fassungsmittelteile in der Haltevorrichtung befestigt. Die Wärmebildkamera wurde auf einem Stativ platziert. Nach dem Erwärmen wurden die Fassungsteile nur mit wärmeisolierenden Handschuhen angefasst, da es sonst zu Verbrennungen kommen kann.

Bei allen Messreihen ist besonders darauf zu achten, dass der Wärmeschrank so kurz wie möglich offenbleibt, um das Abkühlen zu verhindern. Außerdem ist es wichtig, dass die Aufnahme sehr schnell erfolgt, um das Abkühlen der Fassung zu minimieren. Bei allen Messungen erfolgte die Aufnahme nach etwa 5 Sekunden. Der genaue Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dokumentiert.



Abbildung 9 Versuchsaufbau: Wärmebildkamera MobIR® M8 auf einem Stativ. In 35cm Abstand ist ein Fassungsmittelteil auf einer Haltevorrichtung befestigt.

3.4.1 Emissionsgradbestimmung des Fassungswerkstoffs

Um die Temperatur des Fassungsmaterials bestimmen zu können, wurde zuerst eine Messung durchgeführt, um den Emissionsgrad des Materials zu bestimmen. Dazu wird ein Fassungsteil aus dem gleichen Werkstoff mit gleichen oder sehr ähnlichen Beschaffenheiten genommen und es wird ein weißes Stück Papier darauf geklebt (siehe Abbildung 10). Anschließend wird das Fassungsteil im Wärmeschrank bei 120 °C für 30 min erwärmt. Im Anschluss wurde ein Bild mit der Wärmebildkamera aufgenommen. Die Aufnahme erfolgte für diese Messung in einem Abstand von 35 cm. Die Zeitspanne zwischen dem Herausnehmen der Fassung aus dem Wärmeschrank und der Bildaufnahme betrug bei allen Messungen etwa 5 Sekunden. Diese Methode der Emissionsgradbestimmung wurde bereits von Herrn Wächtler in seiner Bachelorthesis verwendet (Wächtler, 2017). Bei diesen Messungen wurde allerdings eine andere Temperatur und Zeit im Wärmeschrank gewählt.



Abbildung 10 Braune CA Fassung. Auf der Brückenmitte ist ein weißes Stück Papier befestigt.

Anschließend konnten die Bilder mit der Software Pyrosoft Professional ausgewertet werden. Damit können an jeder Stelle der Fassung bestimmte Punkte ausgewählt werden. In der Software Pyrosoft Professional werden diese Punkte als ROI bezeichnet. An diesen Punkten können die Messdaten verändert und analysier werden. Es wurde ein ROI an eine Stelle mit dem weißen Papier markiert, und da es bekannt ist das der Emissionsgrad des weißen Papiers $\varepsilon_{Papier}=0.90$ beträgt, wurde der Emissionsgrad in der Software angepasst. Nun konnte die richtige Temperatur an dieser Stelle der Fassung abgelesen werden. Um anschließend den Emissionsgrad des Materials zu bestimmen, wurde ein Punkt direkt neben dem Papier markiert, und der Emissionsgrad solange verändert, bis die Temperatur an dieser Stelle, mit der auf dem weißen Papier übereingestimmt hat. Diese Messung wurde für jedes Material durchgeführt.

3.4.2 Verhalten von Werkstoffen bei Erwärmung und Abkühlung in Abhängigkeit von der Zeit

In diesem Versuchsteil wurden verschiedene Fassungswerkstoffe auf das Verhalten bei Erwärmung untersucht. Als erstes wurde die Temperatur des Fassungsmittelteils bei Raumtemperatur gemessen. Dazu wurde der Mittelteil in der Haltevorrichtung befestigt und es erfolgte eine Aufnahme mit der Wärmebildkamera. Anschließend wurden 5 Fassungsmittelteile aus dem gleichen Werkstoff im Wärmeschrank platziert. Dieser wurde bereits auf 120 °C erwärmt. Im Anschluss wurde alle 5 Minuten ein Fassungsmittelteil aus dem Wärmeschrank herausgenommen, in der Haltevorrichtung befestigt und es wurde ein Bild mit der Wärmebildkamera gemacht.

Direkt im Anschluss konnte nun das Abkühlverhalten untersucht werden. Dazu wurde von dem Fassungsmittelteil, das 25 min im Wärmeschrank erwärmt wurde eine Reihe von Bildern gemacht. Die Aufnahmen erfolgten alle 10 s, bis die Temperatur des Materials sich nicht mehr verändert hat.

Die Messungen erfolgten für alle Fassungswerkstoffe.

Alle Messungen wurden in einem Abstand von 35 cm gemacht.

Im Anschluss konnte die Temperatur mit der Software Pyrosoft Professional bestimmt und ausgewertet werden.

3.4.3 Verhalten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Dicke des Materials

Anschließend wurde untersucht, ob sich die Fassungen aus verschiedenen Werkstoffen gleichmäßig erwärmen lassen und inwieweit es von der Dicke der Fassung abhängt.

Zuerst wurden die Fassungsmittelteile an ausgewählten Punkten vermessen. Dazu wurde mit einem Messband der Umfang an der gewünschten Stelle ermittelt.

Anschließend wurde von jedem Werkstoff ein Fassungsmittelteil bei 120 °C für genau 20 min erwärmt. Jede Fassung wurde einzeln im Wärmeschrank erwärmt, um eine identische Zeit der Erwärmung zu sichern. Nach 20 min erfolgte eine Aufnahme mit der Wärmebildkamera. Die Auswertung wurde auch bei diesen Versuchen mit der Software Pyrosoft Professional gemacht.

Bei der Auswahl der zu vermessenden Punkte wurde darauf geachtet, dass sich an dieser Stelle der Fassung kein Metall befindet (siehe Abbildung 11; Abbildung 12). An diesen Stellen wäre die Temperatur dadurch verfälscht, da Metalle ein anderes Wärmeverhalten aufweisen.



Abbildung 11 Backenbereich von Vorne



Abbildung 12 Backenbereich von Hinten

4 Messungen und Auswertung

4.1 Emissionsgradbestimmung des Fassungswerkstoffs

Tabelle 4 Emissionsgrad der verwendeten Materialien bei einem auf 120 °C eingestelltem Wärmeschrank.

Material	Zeit im Wärmeschrank [min]	Temperatur Wärmeschrank [°]	Erreichte Temperatur Fassung [°]	Emissionsgrad
PA	30	120	100,30	0,96
Horn	30	120	114,30	0,71
CA braun	30	120	98,60	0,87
CA blau	30	120	100,00	0,98

In Tabelle 4 sind die ermittelten Emissionsgrade von Polyamid, Horn, Zelluloseacetat braun und Zelluloseacetat blau, aufgelistet. Alle Fassungsteile wurden einzeln für jeweils 30 min in einem auf 120 °C vorgewärmten Wärmeschrank platziert. Im Anschluss wurde ein Bild mit der Wärmebildkamera erfasst und die erreichte Temperatur der Fassung notiert.
4.2 Verhalten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Zeit



Abbildung 13 Temperaturveränderung von einer Fassung aus Polyamid in Abhängigkeit von der Zeit

In Abbildung 13 ist die Temperaturveränderung von PA in 5 min Abständen dargestellt. Bei x=0 beträgt die Temperatur 27,8 °C und entspricht der Temperatur der Fassung bei Raumtemperatur. Der Wärmeschrank wurde auf 120 °C eingestellt. Die Temperatur der Fassung nach 5 min betrug 82,5 °C, nach 10 min 93 °C, nach 15 min 96,6 °C, nach 20 min 96,9 °C und nach 25 min 98,1 °C. In den ersten 5 min war die Temperatursteigerung am größten. Die Fassung hat innerhalb der 25 min nicht die eingestellte Temperatur des Wärmeschranks von 120 °C erreicht. Die logarithmische Skalierung verdeutlicht den starken Temperaturanstieg in den ersten 5 min und einen sehr schwachen Temperaturanstieg zwischen 10 min und 25 min. Die Regressionsfunktion des Temperaturverlaufes von PA (y=9,1668ln(x)+69,91) ergibt, dass nach einer Minute, ln (1) = 0, die Temperatur von 69,91 °C erreicht wurde.

Vergleicht man nun die erreichten Temperaturen nach 1 min, so erkennt man sehr deutlich das unterschiedliche Verhalten von Kunststoffen und Horn.



Abbildung 14 Temperaturveränderung einer blauen Zelluloseacetat Fassung in Abhängigkeit von der Zeit

In Abbildung 14 ist die Temperaturveränderung von CA blau in 5 min Abständen dargestellt. Die Materialtemperatur bei Raumtemperatur betrug 30,9 °C. Der Wärmeschrank wurde auf 120 °C eingestellt. Die Temperatur der Fassung nach 5 min betrug 74,4 °C, nach 10 min 81 °C, nach 15 min 87,7 °C, nach 20 min 90,6 °C und nach 25 min 93,3 °C. Auch bei diesem Material war in den ersten 5 min die Temperatursteigerung am größten. Die Fassung hat innerhalb der 25 min nicht die eingestellte Temperatur des Wärmeschranks von 120 °C erreicht.

Die Regressionsfunktion des Temperaturverlaufes von CA blau (y=5,8844ln(x)+70,504) ergibt, dass nach einer Minute die Temperatur von 70,504 °C erreicht wurde.



Abbildung 15 Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Zeit. Vergleich zwischen Polyamid und Zelluloseacetat (blau)

In Abbildung 15 ist grafisch der Vergleich der Temperaturveränderung zwischen PA und CA blau dargestellt. Schon nach der ersten Messung bei 5 min kann man sehen, dass die Temperatur von PA um 8,1 °C größer ist, wie von CA. Zum Schluss beträgt die Differenz zwischen den Materialien 4,8 °C.

Vergleicht man nun die Regressionsfunktionen der beiden Materialien, so sind keine großen Unterschiede festzustellen. Die Temperaturdifferenz nach der ersten Minute beträgt 0,594 °C.



Abbildung 16 Temperaturveränderung einer braunen Zelluloseacetat Fassung in Abhängigkeit von der Zeit

In Abbildung 16 ist die Temperaturveränderung von CA braun in 5 min Abständen dargestellt. Die Temperatur bei x=0 entspricht der Temperatur des Materials bei Raumtemperatur. Der Wärmeschrank wurde auf 120 °C eingestellt. Die Temperatur der Fassung nach 5 min betrug 82,5 °C, nach 10 min 95,1 °C, nach 15 min 96,3 °C, nach 20 min 94,1 °C und nach 25 min 97,8 °C.

Die Regressionsfunktion des Temperaturverlaufes von CA braun $(y=7,054\ln(x)+75,099)$ ergibt, dass nach einer Minute die Temperatur von 75,099°C erreicht wurde.

Die Messung für CA in einer anderen Farbe wurde durchgeführt, um das Verhalten des gleichen Materials in zwei verschiedenen Farben bei Erwärmung miteinander zu vergleichen.



Abbildung 17 Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Zeit. Vergleich zwischen Zelluloseacetat braun und Zelluloseacetat blau

In Abbildung 17 wird die Temperaturveränderung von CA Fassungen in braun und blau miteinander verglichen. Die beiden Materialien weisen ein sehr ähnliches thermisches Verhalten auf. Die Temperatur am Ende unterscheidet sich um 4,5 °C. Der Temperaturanstieg der braunen Fassung war nach 10 min größer wie bei der braunen Fassung. Die Differenz nach 10 min betrug 14,1 °C.

Werden nun die Regressionsformeln miteinander verglichen, ist auffällig, dass das braune Material sich etwas schneller erwärmt, wie das blaue CA Material. CA braun erreichte nach der ersten Minute die Temperatur von 75,099 °C, wobei das blaue CA Material nach der ersten Minute eine Temperatur von 75,504 °C erreichte.

Der Vergleich zwischen CA in braun und blau wurde durchgeführt, um festzustellen welchen Einfluss Farbe auf das thermische Verhalten des Materials bei Erwärmung hat.



Abbildung 18 Temperaturveränderung von Horn bei einem auf 120 °C eingestelltem Wärmeschrank in Abhängigkeit von der Zeit

In Abbildung 18 ist die Temperaturveränderung von Horn in 5 min Abständen dargestellt. Die Temperatur des Materials bei Raumtemperatur betrug 28,2 °C. Der Wärmeschrank wurde auf 120 °C eingestellt. Die Temperatur der Fassung nach 5 min betrug 99,7 °C, nach 10 min 101,7 °C, nach 15 min 112 °C, nach 20 min 113,1 °C und nach 25 min 119,9 °C. In den ersten 5 min war die Temperatursteigerung am größten. Der Temperaturanstieg von Horn verlief schneller und das Material hat nach 25 min die Temperatur vom Wärmeschrank erreicht. Die fehlenden 0,01 °C können auf die Zeitspanne zwischen Herausnehmen der Fassung aus dem Wärmeschrank und der Bildaufnahme erfolgen.

Die Regressionsfunktion des Temperaturverlaufes von Horn bei einer Erwärmung auf 120 °C lautet y=8,6399ln(x)+87,232 und ergibt, dass nach einer Minute die Temperatur von 87,232 °C erreicht wurde. Diese Temperatur ist deutlich höher, als die von den gemessenen Kunststoffen.



Abbildung 19 Temperaturveränderung von Horn bei einem auf 160 °C eingestelltem Wärmeschrank in Abhängigkeit von der Zeit

In Abbildung 19 ist die Temperaturveränderung von Horn in 5 min Abständen dargestellt. Die Temperatur des Materials bei Raumtemperatur ist bei x=0 und betrug 28,2 °C. Der Wärmeschrank wurde auf 160 °C eingestellt. Die Temperatur der Fassung nach 5 min betrug 132,3 °C, nach 10 min 134,3 °C, nach 15 min 143,4 °C, nach 20 min 146,5 °C und nach 25 min 159,9 °C. In den ersten 5 min war die Temperatursteigerung am größten. Auch bei dieser Messung hat das Material nach 25 min die Temperatur vom Wärmeschrank erreicht.

Die Regressionsfunktion des Temperaturverlaufes von Horn bei einer Erwärmung auf 160 °C (y=12,218ln(x)+112,03) ergibt, dass nach einer Minute die Temperatur von 112,03 °C erreicht wurde.



Abbildung 20 Temperaturveränderung von Horn im Vergleich bei einem auf 120 °C und 160 °C eingestelltem Wärmeschrank

In Abbildung 20 wurde die Temperaturveränderung von Horn bei 120 °C und 160 °C in Abhängigkeit von der Zeit verglichen. Beide Kurven verlaufen sehr ähnlich mit einer fast gleichbleibenden Differenz. Die Temperaturdifferenz nach 5 min betrug 32,6 °C, nach 10 min 32,6 °C, nach 15 min 31,4 °C, nach 20 min 33,4 °C und nach 25 min 40 °C.

Vergleicht man nun die Regressionsformeln, so ist deutlich, dass bereits nach der ersten Minute die Temperatur von Horn (160 °C) deutlich höher war mit 112,03 °C, wie die von Horn (120 °C). Horn das auf 120 °C erwärmt wurde erreichte nach der ersten Minute 87,232 °C.



Abbildung 21 Erwärmung von CA blau, PA und Horn im Vergleich, bei einem auf 120 °C eingestelltem Wärmeschrank

In Abbildung 21 ist die Erwärmung von allen 3 Materialien dargestellt. Alle Messungen wurden bei einem auf 120 °C eingestelltem Wärmeschrank durchgeführt. Es ist deutlich, dass nur die Hornfassung die 120 °C erreicht hat. Die Endtemperatur von PA und CA nach 25 min betrug fast 100 °C. CA erreichte 93,3 °C und PA erreichte 98,1 °C. CA weist die niedrigste Endtemperatur auf. Trotz der Temperaturunterschiede zwischen den Materialien verlaufen die Kurven ähnlich zueinander.

Um die unterschiedlichen Verhalten der Materialien beim Erwärmen zu vergleichen, wurde anschließend ein Balkendiagramm erstellt. In der folgenden Abbildung 22 werden die erreichten Temperaturen nach der ersten Minute miteinander verglichen.



Abbildung 22 Die mit der Regressionsformel mathematisch errechneten Temperaturen von CA, PA und Horn nach 1 min im Vergleich.

Diese graphische Darstellung verdeutlicht, wie sich die unterschiedlichen Materialien beim Erwärmen verhalten. Nach einer Minute ist der Temperaturunterschied von CA blau und PA sehr gering und beträgt weniger wie 1 °C. PA erreichte nach einer Minute 69,91 °C und CA 70,504 °C. Horn hingegen erwärmte sich am schnellsten und erreichte bei der gleichen Wärmezufuhr 87,232 °C nach einer Minute.





Abbildung 23 Abkühlkurve Polyamid

In Abbildung 23 ist die Abkühlkurve von PA dargestellt. Der Wärmeschrank wurde auf 120 °C eingestellt, allerdings betrug die Temperatur der Fassung nach 25 min 98,1 °C. Für die grafische Darstellung der Abkühlkurve wurde alle 10 s die Temperatur der Fassung erfasst, bis das Material seine Endtemperatur erreichte und nicht mehr weiter seine Temperatur veränderte. Nach 9,08 min erreichte das PA Material seine Endtemperatur von 31,1 °C.

Die polynomische Regressionsformel lautet ($y=0,0003x^2-0,2659x+97,353$) und der lineare Anteil der Formel (ax) zeigt die unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeit an. Je kleiner a ist, desto schneller kühlt ein Material ab. Bei PA liegt der lineare Anteil bei -0,2659x.



Abbildung 24 Abkühlkurve Zelluloseacetat blau

In Abbildung 24 ist die Abkühlkurve von blauem CA dargestellt. Auch hier hat das Material nicht die Temperatur vom Wärmeschrank erreicht. Die Ausgangstemperatur für die Abkühlkurve beträgt 93,3 °C. Nach 8,25 min erreichte das blaue CA Material 30,9 °C und kühlte nicht mehr weiter ab.

Die polynomische Regressionsformel für CA blau lautet ($y=0,0003x^2-0,2721x+91,652$) und der lineare Anteil beträgt -0,2721x. Im Vergleich zu PA kühlt CA blau etwas schneller ab. Die Differenz ist allerdings sehr gering.



Abbildung 25 Abkühlkurve von CA blau und PA im Vergleich

In der Abbildung 25 werden die Abkühlkurven von CA blau und PA miteinander verglichen. Die Abkühlung verläuft sehr ähnlich und es gibt keine großen Schwankungen. CA blau kühlt etwas schneller ab. Vergleicht man nun den linearen Anteil der polynomischen Regressionsformel, wird es deutlicher. Der lineare Anteil von CA blau ist mit -0,2721x kleiner als -0,2659 (PA), was eine sehr kleine schnellere Abkühlung darstellt.



Abbildung 26 Abkühlkurve Zelluloseacetat braun

In Abbildung 26 ist die Abkühlkurve von braunem CA dargestellt. Die Ausgangstemperatur für die Abkühlkurve beträgt 97,8 °C. Nach 7,42 min erreichte das braune CA Material 26,6 °C und kühlte nicht mehr weiter ab.

Die polynomische Regressionsformel von CA braun lautet ($y=0,0004x^2-0,3389x+98,786$) und der lineare Anteil der Formel beträgt -0,3389x.



Abbildung 27 Abkühlkurven von Zelluloseacetat braun und Zelluloseacetat blau im Vergleich

In Abbildung 27 sind die Abkühlkurven von blauem und braunem CA dargestellt. Die beiden Kurven verlaufen ähnlich zueinander. Das braune Material weist am Anfang eine höhere Temperatur auf. Nach 55 s treffen sich die beiden Kurven. Die beiden Materialien weisen eine fast gleiche Temperatur auf. Ab der 4. min trennen sich die Kurven. Das braune Material hat eine niedrigere Temperatur.

Vergleicht man nun den linearen Anteil, so wird deutlich, dass CA braun mit -0,3389x einen geringeren linearen Anteil hat, was für eine insgesamt schnellere Abkühlung spricht.



Abbildung 28 Abkühlkurve Horn von ursprünglich aus 120 °C erwärmten Fassung

In Abbildung 28 ist eine grafische Darstellung des Abkühlverhaltens von Horn zu sehen. In dieser Darstellung wurde der Wärmeschrank auf 120 °C erhitzt. Das Material hat die Temperatur des Wärmeschranks erreicht. Das Material erreichte nach 7,45 min die Endtemperatur von 28,2 °C.

Die Regressionsformel von Horn lautet (y=0,0007x²-0,5049x+119,15). Der lineare Anteil beträgt -0,5049x. Im Vergleich zu den bereits gemessenen Kunststoffen ist der lineare Anteil von Horn wesentlich geringer, was die schnellere Abkühlung erklärt.



Abbildung 29 Abkühlkurve Horn von ursprünglich aus 160 °C erwärmten Fassung

In Abbildung 29 ist die Abkühlkurve von Horn dargestellt. Die Ausgangstemperatur der Abkühlkurve beträgt 160 °C. Die Endtemperatur liegt nach 7,42 min 28,2 °C.

Die polynomische Regressionsformel lautet (y=0,0009x²-0,6768x+148,77). Der lineare Anteil beträgt -0,6768x.



Abbildung 30 Abkühlkurven Horn von ursprünglich aus 120 °C und 160 °C erwärmten Fassungen im Vergleich

In Abbildung 30 sind beide Abkühlkurven von Horn im Vergleich dargestellt. Die Ausgangstemperaturen haben eine Differenz von 40 °C. Die Hornfassung mit einer Ausgangstemperatur von 160 °C weist ein stärkeres Abkühlverhalten auf. Nach etwa 4,58 min zeigen beide Abkühlkurven eine gleiche Temperatur auf und verlaufen gleich.

Wird nun der lineare Anteil der Regressionsformel miteinander verglichen, so spricht der geringere lineare Anteil von auf 160 °C erwärmten Horn, für die schnellere Abkühlung. Dieser beträgt -0,6768x und der lineare Anteil von dem auf 120 °C erwärmten Horn beträgt -0,5049x.



Abbildung 31 Abkühlkurven von CA blau, PA und Horn im Vergleich

In Abbildung 31 sind die Abkühlkurven von allen 3 Materialien grafisch dargestellt. Alle Abkühlkurven beziehen sich auf das davor erwärmte Material in einem auf 120 °C eingestelltem Wärmeschrank. Horn, als einziges Material das die gewünschte Temperatur von 120 °C erreicht hatte, hatte die größte Ausgangstemperatur für die Abkühlung. Nach etwa 100 s erreichte Horn die Temperatur von CA.

PA brauchte am längsten um die Endtemperatur zu erreichen. Nach 9,08 min, was 545 s entsprich, zeigte PA kein Abkühlverhakten mehr. Horn hingegen erreichte seine Endtemperatur nach bereits 7,42 min, was 445 s entspricht. CA brauchte 8,25 min, also 495 s um die Endtemperatur zu erreichen.

Vergleicht man nun die polynomischen Regressionsformeln miteinander, so sind viele Verhaltensmuster von den Werkstoffen beim Abkühlen bereits deutlich zu sehen. Horn hat sowohl die größte Anfangstemperatur, als auch das schnellste Abkühlverhalten. Der lineare Anteil von Horn ist deutlich geringer mit -0,5049x,

wie vergleichsweise der lineare Anteil der beiden Kunststoffe. Zwischen der Abkühlgeschwindigkeit der beiden Kunststoffe gibt es keine große Differenz. CA kühlt allerdings etwas schneller ab mit einem linearen Anteil von -0,2721x, wie PA. Der lineare Anteil von PA beträgt -0,2659x.

4.4 Verhalten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Dicke des Materials

4.4.1 Zelluloseacetat



Abbildung 32 Fassungsmittelteil aus Zelluloseacetat und 11 ausgewählte Punkte mit den dazugehörigen Temperaturen

In der Abbildung 32 ist ein Fassungsmittelteil aus Zelluloseacetat dargestellt. Die Aufnahme erfolgte mit einer Wärmebildkamera nach 20 min im Wärmeschrank. Dieser wurde auf 120 °C eingestellt. Die Temperatur wird jeweils an der Stelle, wo sich Kreuze befinden, ermittelt. Insgesamt wurden Temperaturen von 11 verschiedenen Punkten ermittelt. Die ROI 004 und 009 sind beide im Backenbereich und werden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da sich an diesen Stellen auch Metall befindet. Um allerdings zu zeigen, dass die Temperatur dadurch höher ist, sind die Stellen in der Abbildung zu sehen.

In der folgenden Tabelle 5 sind die ROI mit den dazu gehörigen Temperaturen und dem Umfang des Fassungsrandes an diesen Stellen, dargestellt.

ROI	Temperatur CA [C°]	Umfang [mm]
1	100	25
2	69,7	13
3	95,2	16
4	105,1	
5	95,3	18
6	78,3	13
7	61,5	13
8	87,4	16
9	102,5	
10	91,7	18
11	75,3	13

Tabelle 5 ROI einer	CA Fassung,	dazugehörige	Temperaturen	und der	Umfang an	diesen
Stellen						

Die Temperatur steigt mit dem größeren Durchmesser. Die Temperaturen an den Stellen mit dem gleichen Durchmesser unterscheiden sich voneinander. ROI 4 und befinden sich im Backenbereich. Die Angabe des Umfangs fehlt, da dieser Wert bei der Auswertung nicht berücksichtigt wird und die Messung teilweise nicht möglich war. Die Standartabweichung im Bereich von 13 mm beträgt 6,4 °C, im Bereich von 16 mm 3,9 °C und im Bereich von 18 mm 1,8 °C.





In der Abbildung 33 wurde die gemessene Temperatur in Abhängigkeit vom Umfang der Fassung graphisch dargestellt. Es sind deutliche Schwankungen festzustellen. Im Bereich von 13 mm sind Temperaturschwankungen von bis zu 20 °C festzustellen. Beim Vergleich von der Temperatur bei 16 mm und 18 mm ist deutlich, dass die beiden gemessenen Temperaturen bei 16mm stärker voneinander abweichen, wie die Temperaturen bei 18 mm.

4.4.2 Polyamid



Abbildung 34 Fassungsmittelteil aus Polyamid und 11 ausgewählte Punkte mit den dazugehörigen Temperaturen

In der Abbildung 34 ist ein Fassungsmittelteil aus Polyamid dargestellt. Die Aufnahme erfolgte mit einer Wärmebildkamera nach 20 min im Wärmeschrank. Dieser wurde auf 120 °C eingestellt. Die Temperatur wird jeweils an der Stelle, wo sich Kreuze befinden, ermittelt. Insgesamt wurden Temperaturen von 11 verschiedenen Punkten ermittelt. Auch hier sind die ROI 004 und 009 im Backenbereich und werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

In der folgenden Tabelle 6 sind die ROI mit den dazu gehörigen Temperaturen und dem Umfang des Fassungsrandes an diesen Stellen, dargestellt.

ROI	Temperatur PA [C°]	Umfang [mm]
1	100,9	23
2	67,6	12
3	96,7	14
4	105,8	
5	93,3	16
6	82,5	12
7	58	12
8	79,3	14
9	103,4	
10	89	16
11	76,1	12

Tabelle 6 ROI einer PA Fassung und die dazugehörigen Temperaturen und der Umfang anausgemessenen Stellen

Die Standardabweichung im Bereich der 12 mm beträgt 9,2 °C, bei 14 mm 8,7 °C und im Bereich von 16 mmm ist die Standartabweichung 2,15 °C. Bei PA sind die Abweichungen größer und die Wärmeverteilung nicht gleichmäßig.





In der Abbildung 35 wurde die gemessene Temperatur in Abhängigkeit vom Umfang der Fassung graphisch dargestellt. Auch hier sind Abweichungen in der Temperatur festzustellen. Bei 12 mm sind die Abweichungen in der Temperatur am größten. Mit dem steigenden Durchmesser wird die Differenz zwischen den gemessenen Temperaturen geringer.

4.4.3 Horn



Abbildung 36 Fassungsmittelteil aus Horn und 9 ausgewählte Punkte mit den dazugehörigen Temperaturen

Abbildung 36 zeigt ein Fassungsmittelteil aus Horn. Die Aufnahme erfolgte mit einer Wärmebildkamera nach 20 min im Wärmeschrank. Dieser wurde auf 120 °C eingestellt. Die Temperatur wird jeweils an der Stelle, wo sich Kreuze befinden, ermittelt. Insgesamt wurden Temperaturen von 9 verschiedenen Punkten ermittelt. Die ROI 004 und 008 sind beide im Backenbereich und werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

In der folgenden Tabelle 7 sind die ROI mit den dazu gehörigen Temperaturen und dem Umfang des Fassungsrandes an diesen Stellen, dargestellt.

ROI	Temperatur Horn [C°]	Umfang [mm]
1	106	19
2	74,6	12
3	82,2	12
4	131,2	
5	94	14
6	68,5	12
7	68,4	12
8	126,7	
9	79,6	14

Tabelle 7 Die ROI einer Hornfassung, in den ROI gemessene Temperaturen und der Umfangdes Fassungsrandes an dieser Stelle

Die Hornfassung weist auch deutliche Abweichungen in den Temperaturen. Im Bereich der 12 mm beträgt die Standartabweichung 5,65 °C. Auch hier wurden die ROI im Backenbereich in der Auswertung nicht berücksichtigt.



Abbildung 37 Temperatur von einer Fassung aus Horn in Abhängigkeit vom Umfang [mm]

In der Abbildung 37 werden die gemessenen Temperaturen einer Fassung aus Horn in Abhängigkeit vom Umfang der Fassung graphisch dargestellt.

Auch hier sind Abweichungen festzustellen. Was in der Abbildung nicht zusehen ist, ist das es bei 12 mm insgesamt 4 Punkte gibt. Bei 12 mm gibt es 2 Temperaturen, die nur 0,01 °C voneinander abweichen. Diese Temperaturen sind 68,4 °C und 68,5 °C. Das spricht für eine gleichmäßigere Erwärmung wie bei gemessenen Kunststoffen, da bei Kunststoffen keine gleichen Temperaturen beim gleichen Umfang erfasst werden konnten.



Abbildung 38 Temperaturen von CA, PA und Horn in Abhängigkeit vom Umfang [mm]

Die Abbildung 38 verdeutlich graphisch den Unterschied in den gemessenen Temperaturen aller 3 Materialien. Horn weist die geringsten Abweichungen in den Temperaturen insgesamt auf. Diese liegen bei maximal13,8 °C bei 12 mm. PA hingegen schwankt am meisten, besonders bei einem Umfang von 12 mm beträgt die größte Differenz 24,5 °C. Bei 16 mm ist die Differenz zwischen den beiden gemessenen Temperaturen bei CA und PA sehr ähnlich. CA hat allerdings stärkere Abweichungen in den gemessenen Temperaturen. Die Differenz bei CA beträgt 7,8 °C und bei PA 4,93 °C.

5 Ergebnisse

5.1 Verhalten von Werkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Zeit

Mittels der ermittelten Daten aus 4.2 lassen sich folgende Ergebnisse feststellen. Eine Fassung aus PA erreichte schneller höhere Temperaturen, wie vergleichsweise eine Fassung aus CA. PA Fassung erreichte auch schneller eine höhere Temperatur innerhalb der vorgegebenen Zeit von 25 min. Die Differenz zwischen der Endtemperatur der beiden Materialien betrug allerdings nur 4,8 °C. Beide Materialien konnten die gewünschte Temperatur, also die Temperatur vom Wärmeschrank, in der vorgegebenen Zeit nicht erreichen.

Durch die zusätzliche Messung der braunen CA Fassung lässt sich belegen, dass beide Materialien nach 25 min im Wärmeschrank eine unterschiedliche Temperatur aufweisen. Die Differenz betrug nur 4,5 °C. Allerdings wiesen die Wärmekurven deutliche Unterschiede auf. Eine Fassung aus braunem und etwas hellerem CA erwärmte sich zwischen der 5. Minute und der 15. Minute deutlich schneller und ab der 20. Minute nur noch sehr langsam. Eine Fassung aus blauem CA erwärmte sich hingegen mit einer Stetigkeit. Die Unterschiede in der Erwärmung können auch andere Ursachen haben, und werden im Kapitel 6 genau erläutert.

Horn hat als einziger Werkstoff die erwünschte Temperatur erreicht. Dadurch lässt sich belegen, dass Fassungen aus Horn weniger Zeit brauchen um die warme Umgebungstemperatur zu erreichen. Sowohl bei der Erwärmung auf 120 °C, als auch auf 160 °C haben die Fassungen aus Horn ein gleiches Wärmeverhalten gezeigt. Die Temperatur steigt innerhalb der ersten 5 min sehr rasch an, und ab der 5 min gibt es nur noch eine langsame Steigung der Temperatur.

Für den Augenoptiker bedeutet das, dass bei der Kundenberatung darauf geachtet werden muss, welchen thermischen Einflüssen eine Fassung ausgesetzt sein wird. So sind Hornfassungen für Arbeiten bei starker Hitze weniger empfehlenswert, da diese sehr schnell heiß werden würden. PA Fassungen wurden auch weicher im Vergleich zu CA und verziehen sich schneller.

Beide Kunststoffe besitzen eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit von PA ist 0,23 W/m*K und von CA 0,22 W/m*K. Da allerdings die spezifische Wärmekapazität von CA mit 1,6 kJ/kg*K höher ist wie die von PA mit 1,26 kJ/kg*K, brauchen Fassungen aus CA mehr Wärmemenge um die gleiche Temperatur zu erreichen wie Fassungen aus PA. Fassungen aus CA können also länger höheren Temperaturen standhalten.

Horn besitzt auch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Diese ist aber im Vergleich zu Kunststoffen mit 0,34 W/m*K höher. Dadurch neigen Fassungen aus Horn sich schneller zu erwärmen und in einer vergleichsweise kurzen Zeit höhere Temperaturen zu erreichen.

5.2 Verhalten von Werkstoffen bei Abkühlung in Abhängigkeit von der Zeit

Die Ergebnisse der Messungen aus 4.3 belegen, dass sich das Abkühlverhalten von verschiedenen Materialien nicht stark voneinander unterscheidet. Beim Vergleich von CA blau und PA lässt sich sagen, dass PA auch länger braucht um seine Endtemperatur zu erreichen, wie vergleichsweise CA. Sonst kühlen beide Materialien gleich ab. PA bleibt immer etwas wärmer, was auf die ursprünglich höhere Temperatur zurückzuführen ist.

Beim Vergleich von CA Fassungen lässt sich sagen, dass das braune Material trotz der anfänglich höheren Temperatur, am Ende schneller seine niedrigere Endtemperatur erreicht.

Sowohl für CA als auch PA Fassungen gilt, dass die Materialien aufgrund der Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen, die Raumtemperatur von ca. 28 °C nicht erreichen.

Hornfassungen, trotz der starken Temperaturdifferenz am Anfang der Messung von 120 °C und 160 °C, hat gleich schnell die Raumtemperatur erreicht.

Für den Augenoptiker bedeutet das, dass Hornfassungen stärker erhitzt werden müssen, da diese bei der Anpassung sonst schnell wieder abkühlen. Kunststoffe hingegen erreichen nie die kalten Umgebungstemperaturen und sind daher angenehmer für den Träger.

5.3 Verhalten von Fassungswerkstoffen bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Dicke des Materials

Mittels der Ergebnisse aus 4.3 lässt sich sagen, dass alle 3 Materialien sich nicht gleichmäßig erwärmen lassen. Zwar steigt die Temperatur mit dem steigenden Durchmesser, aber es gibt viele Schwankungen auch an Stellen die einen identischen Umfang aufweisen. Horn im Vergleich zu den Kunststoffen weist am wenigsten Differenzen in den gemessenen Temperaturen beim gleichen Umfang auf. PA hatte besonders bei niedrigen Umfängen die größten Schwankungen in der Temperatur im Vergleich zu den beiden anderen Werkstoffen. Bei allen 3 Materialien sind die Abweichungen in den gemessenen Temperaturbereichen mit dem steigenden Durchmesser gesunken. Die möglichen Ursachen für diese Verhalten und Fehlerquellen werden im folgenden Kapitel 6 genau diskutiert. CA Fassung weist am meisten Gleichmäßigkeit in der Temperaturverteilung auf. Bei PA gab es die größten Schwankungen.

6 Diskussion

Das folgende Kapitel beinhaltet eine kritische Analyse der ermittelten Ergebnisse.

Bei der Messung vom thermischen Verhalten von CA Fassung in unterschiedlichen Farben wurden niedrige Differenzen festgestellt. Um genau festzustellen, ob diese Differenzen an unterschiedlichen Farben liegen, ist eine Folgearbeit notwendig. Dabei sollten mehrere Kunststoffmaterialien in unterschiedlichen Farben untersucht werden.

Bei der Messung und Analyse von Horn wurde ein Wert für die Wärmeleitfähigkeit von 0,34 W/m*K verwendet. Dieser Wert wurde an einem Huf gemessen. Es sind zahlreiche Untersuchungen des thermischen Verhaltes von Horn notwendig. Dabei müssen speziell Fassungen aus Horn und die in der Augenoptik üblichen Mischformen von Horn untersucht werden. Ohne die Werte der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmezahl und der Temperaturleitfähigkeit sind alle Analysen des thermischen Verhaltens von Horn ungenau. Mit den genauen thermischen Kennzahlen können bessere Aussagen über das Verhalten von Horn bei Wärmezufuhr getroffen werden.

Es wurde festgestellt, dass Horn gleichschnell, trotz unterschiedlicher Anfangstemperaturen, die Raumtemperatur erreicht hatte. Es kann nur eine Aussage darüber getroffen werde, wie Horn sich bei der Wiederherstellung der ursprünglichen Temperatur verhält. Es wären weitere Untersuchungen unter Einfluss von Kälte notwendig, um genaue Aussagen über die Isolationseigenschaften von Horn treffen zu können.

Bei der Untersuchung des Verhaltens bei Erwärmung in Abhängigkeit von der Dicke wurden beim größeren Durchmesser Höhere Temperaturen festgestellt. Das kann mehrere Ursachen zu Folge haben. Wenn das Verhalten der Materialien bei den bereits durchgeführten Versuchen verglichen wird, dann wird deutlich, dass die untersuchten Stoffe viel mehr Zeit brauchen um auf eine bestimmte Temperatur erwärmt zu werden, sowie auf die ursprüngliche Temperatur abgekühlt zu werden. Es würde bedeuten, dass wenn eine Fassung aus dem Wärmeschrank entnommen wird, sich die gleichmäßige Anfangstemperatur rasch verändert. Dabei würden die dünnsten Stellen am schnellsten Abkühlen und die dickeren Stellen würden am längsten warm bleiben.

Die Masse und die interne Wärmeleitfähigkeit eines Materials beeinflussen auch das Abkühlverhalten an unterschiedlichen Stellen. Alle Fassungen haben unterschiedliche Formen. Die dünneren Stellen kühlen zwar schneller ab, die umliegenden dickeren Stellen geben allerdings immer noch Aufgrund der internen Wärmeleitfähigkeit der Materialien Wärme an die dünneren Stellen ab. Das kann die Temperatur beeinflussen und zur Folge haben, dass an Stellen mit dem gleichen Umfang unterschiedliche Temperaturen herrschen, je nach Form der Fassung. Für eine genaue Untersuchung der Werkstoffe wäre eine Messung notwendig, bei der die Werkstoffe identische Form und Masse besitzen.

Außerdem bei der Messung der Temperatur mit der Software wird der ermittelte und stoffspezifische Emissionsgrad eingegeben. Da an manchen Stellen der Fassung sich auch Metall befindet, sind die angegebenen Temperaturen an diesen Stellen verfälscht. Zusätzlich besitzt Metall auch andere thermische Eigenschaften und verhält sich bei der Abkühlung dementsprechend anders wie Kunststoffe.

Bei allen Messungen müssen solche Fehlerquellen in Betracht gezogen werden, wie unterschiedliche Umgebungstemperatur und kleine Unterschiede in der Zeitspanne bis zu der Bildaufnahme.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Schlussfolgerung dieser Messreihe ist, dass sich besonders Horn und Kunststoffe in ihrem thermischen Verhalten unterschieden. Das kann für den Augenoptiker bei der Kundenberatung eine wichtige Rolle spielen, da Fassungen vielen verschiedenen Umgebungstemperaturen ausgesetzt werden können.

Für weitere Untersuchungen wäre die Messung der Materialien bei sehr niedrigen Temperaturen Interessant, da es zahlreiche Brillenträger gibt, die in Berufen tätig sind, wo sehr niedrige Temperaturen herrschen. Eine Untersuchung über die Größe der Schwankungsbreite, sowie eine genaue Untersuchung des thermischen Verhaltens und der thermischen Kennzahlen von Horn wären auch sehr aufschlussreich und könnten in weiteren Arbeiten untersucht werden. Auch ein Vergleich von Materialien in unterschiedlichen Farben und eine Untersuchung inwieweit Farben das Verhalten von Stoffen unter Wärmeeinfluss beeinflussen, kann genauer untersucht werden.

Alle diese Untersuchungen würden das Verstehen von in der Augenoptik verwendeten Materialien verbessern und die kundenspezifische Fassungsberatung erheblich verbessern.

Literaturverzeichnis

Abts, G. (2010): Kunststoff-Wissen für Einsteiger, Carl Hanser Verlag Bohn, H. (2002): Technologie für Augenoptiker, DOZ, 2. überarbeitete Auflage

Bretz, M. (2018): Verhalten bei Erwärmung von 3D Laser gesinterten Brillenfassungen, Bachelorthesis, Hochschule Aalen

Fluke Corporation (2018): Internetlink: http://www.ress.de/images/prod_info_pdf/Infobl%C3%A4tter/Emissionsgradtabell e.pdf (letzter Zugriff am 08.08.2018)

Fruck, M. (2007): Einfluss der Sohlendicke auf die Thermoisolation der Hornkapsel beim Equiden, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München

Kommnick J., Schal S., Fricke V., Thape T., Fischer H., (2014): Augenoptik in Lernfeldern, Verlag Handwerk und Technik, 2. durchgesehene Auflage

Mayer, S. (2012): Schrumpfverhalten und Formveränderung von Kunststoffbrillenfassungen nach Temperatureinwirkung, Bachelorthesis, Hochschule Aalen

Oberbach K., Bauer E., Brinkmann S., Schmachtenberg E., (2004): Saechtling Kunststoff Taschenbuch, Carl Heinz Verlag, 29. überarbeitete Auflage

Wächtler, Ulrich (2017): Untersuchung der Wärmeverteilungen von Heißluftgeräten in Bezug auf die Erwärmbarkeit von Hornfassungen, Bachelorthesis, Hochschule Aalen

Wikipedia (2018) Internetlink:

https://de.wikipedia.org/wiki/Temperaturleitf%C3%A4higkeit (letzter Zugriff am 03.08.2018)

Wikipedia (2018) Internetlink:

https://de.m.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit (letzter Zugriff am 03.09.2018)
Abbildungsverzeichnis

Abbildung	1 blaue CA Fassung der Firma Eschenbach Optik GmbH15
Abbildung	2 amorphe PA Fassung der Firma Eschenbach Optik GmbH15
Abbildung	3 Fassungsmittelteil aus Horn16
Abbildung	4 Wärmeschrank Heraeus T 502817
Abbildung	5 Wärmeschrank Heraeus T 5028 und der zusätzlich durch die Öffnung eingeführte Thermometer Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB18
Abbildung	6 Thermometer Digital Multimeter Peak Tech® 3315 USB19
Abbildung	7 Wärmebildkamera MobIR® M8 auf einem Stativ
Abbildung	8 Haltevorrichtung mit einem befestigtem Fassungsmittelteil21
Abbildung	9 Versuchsaufbau: Wärmebildkamera MobIR® M8 auf einem Stativ. In 35cm Abstand ist ein Fassungsmittelteil auf einer Haltevorrichtung befestigt22
Abbildung	10 Braune CA Fassung. Auf der Brückenmitte ist ein weißes Stück Papier befestigt23
Abbildung	11 Backenbereich von Vorne25
Abbildung	12 Backenbereich von Hinten26
Abbildung	13 Temperaturveränderung von einer Fassung aus Polyamid in Abhängigkeit von der Zeit
Abbildung	14 Temperaturveränderung einer blauen Zelluloseacetat Fassung in Abhängigkeit von der Zeit29
Abbildung	15 Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Zeit. Vergleich zwischen Polyamid und Zelluloseacetat (blau)
Abbildung	16 Temperaturveränderung einer braunen Zelluloseacetat Fassung in Abhängigkeit von der Zeit
Abbildung	17 Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Zeit. Vergleich zwischen Zelluloseacetat braun und Zelluloseacetat blau
Abbildung	18 Temperaturveränderung von Horn bei einem auf 120°C eingestelltem Wärmeschrank in Abhängigkeit von der Zeit
Abbildung	19 Temperaturveränderung von Horn bei einem auf 160°C eingestelltem Wärmeschrank in Abhängigkeit von der Zeit
Abbildung	20 Temperaturveränderung von Horn im Vergleich bei einem auf 120°C und 160°C eingestelltem Wärmeschrank
Abbildung	21 Erwärmung von CA blau, PA und Horn im Vergleich, bei einem auf 120°C eingestelltem Wärmeschrank
Abbildung	22 Die mit der Regressionsformel mathematisch errechneten Temperaturen von CA, PA und Horn nach 1 min im Vergleich
Abbildung	23 Abkühlkurve Polyamid
Abbildung	24 Abkühlkurve Zelluloseacetat blau
Abbildung	25 Abkühlkurve von CA blau und PA im Vergleich
Abbildung	26 Abkühlkurve Zelluloseacetat braun41

Abbildung	27 Abkühlkurven von Zelluloseacetat braun und Zelluloseacetat blau im Vergleich
Abbildung	28 Abkühlkurve Horn von ursprünglich aus 120°C erwärmten Fassung43
Abbildung	29 Abkühlkurve Horn von ursprünglich aus 160°C erwärmten Fassung44
Abbildung	30 Abkühlkurven Horn von ursprünglich aus 120°C und 160°C erwärmten Fassungen im Vergleich45
Abbildung	31 Abkühlkurven von CA blau, PA und Horn im Vergleich46
Abbildung	32 Fassungsmittelteil aus Zelluloseacetat und 11 ausgewählte Punkte mit den dazugehörigen Temperaturen48
Abbildung	33 Temperatur von einer CA Fassung in Abhängigkeit vom Umfang [mm]49
Abbildung	34 Fassungsmittelteil aus Polyamid und 11 ausgewählte Punkte mit den dazugehörigen Temperaturen50
Abbildung	35 Temperatur von einer PA Fassung in Abhängigkeit vom Umfang [mm]51
Abbildung	36 Fassungsmittelteil aus Horn und 9 ausgewählte Punkte mit den dazugehörigen Temperaturen52
Abbildung	37 Temperatur von einer Fassung aus Horn in Abhängigkeit vom Umfang [mm] 53
Abbildung	38 Temperaturen von CA, PA und Horn in Abhängigkeit vom Umfang [mm]54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 ausgewählte Stoffe und die dazugehörige Wärmeeindringzahl b10
Tabelle 2 Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturleitfähigkeit von ausgewählten Metallen und Nichtmetallen bei 20°C11
Tabelle 3 Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit von CA und PA 1212
Tabelle 4 Emissionsgrad der verwendeten Materialien bei einem auf 120°C eingestelltemWärmeschrank.27
Tabelle 5 ROI einer CA Fassung, dazugehörige Temperaturen und der Umfang an diesenStellen
Tabelle 6 ROI einer PA Fassung und die dazugehörigen Temperaturen und der Umfang an ausgemessenen Stellen
Tabelle 7 Die ROI einer Hornfassung, in den ROI gemessene Temperaturen und derUmfang des Fassungsrandes an dieser Stelle53

Anhang

- 1. tabellarischer Auswertung der Messergebnisse in Microsoft Excel
- 2. Bachelorthesis im PDF-Format