

# Schlussbericht vom 18.08.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20797 N

## Thema

Entwicklung und Erprobung einer Auslegungsroutine zur Ertüchtigung von Kunststoffoptiken für Laseranwendungen (KOptLas)

## Berichtszeitraum

01.10.2019 – 28.02.2022

## Forschungsvereinigung

Vereinigung zur Förderung des Instituts für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V. - IKV

## Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:

Instituts für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen (IKV)  
Seffenter Weg 201  
52074 Aachen

Forschungseinrichtung 2:

RWTH Aachen  
Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme (TOS)  
Steinbachstrasse 15  
52074 Aachen

Gefördert durch:



## **KURZZUSAMMENFASSUNG**

In vielen optischen Anwendungen wie Beleuchtungs- oder Kamerasystemen haben sich thermoplastische Kunststoffe gegenüber dem klassischen Werkstoff Glas durchgesetzt. Neben einer deutlichen Gewichtsreduzierung zählen vor allem die große Designfreiheit und die massentaugliche Verarbeitbarkeit mittels Spritzgießen ohne aufwendige Nachbearbeitungsschritte zu den Stärken von Kunststoffoptiken. Laseranwendungen mit mittleren Laserleistungen von 1 bis 100 W, wie das Laserbeschriften, stellen höhere Anforderungen an die optischen Eigenschaften, die von Kunststoffoptiken bisher nicht erfüllt werden.

Mithilfe einer gekoppelten thermomechanischen Auslegung können Kunststoffoptiken für die Verwendung in Laseranwendungen befähigt werden, da die Materialausdehnung und die thermische Brechungsindexänderung der Linsen im Einsatzfall betrachtet werden. Die thermomechanische Auslegung gepaart mit einer optischen Simulation ermöglicht die Berechnung der nötigen Linsengeometrie. Dazu werden die Materialeigenschaften und der Einfluss der Laserleistung auf den Kunststoff untersucht und die Auswirkung auf die optische Leistungsfähigkeit analysiert. Als Qualitätskennwert für den Einfluss der Materialeigenschaften auf die Fokussiereigenschaften der Linse wird die Beugungsmaßzahl  $M^2$  verwendet. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Fokussiereigenschaften der Linse vom Brechungsindex und dem gewählten Laserstrahldurchmesser.

Auf Grundlage der in der optischen Auslegung bestimmten Linsengeometrie wird eine Kompensationsmethode entwickelt und eingesetzt, die auf Basis von vollfaktoriellen simulativen Versuchsplänen die Kavitätsgeometrie im Spritzgießwerkzeug optimiert. Dadurch ist eine mehrfache Werkzeugnachbearbeitung nicht mehr notwendig und es konnten Linsen mit einer mittleren absoluten Differenz von  $1,27\ \mu\text{m}$  zu der Soll-Geometrie in realen Spritzgießversuchen hergestellt werden.

In den Prozessuntersuchungen wird eine große Sensitivität der Qualitätskennwerte Beugungszahl und mittlere absolute Differenz von dem Nachdruck im Spritzgießprozess erkennbar, und durch eine Anpassung der Prozessparameter konnte die Qualität der Linsen in Abformgenauigkeit und optischer Leistung gesteigert werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Zusammenfassung.....	1
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>ZIELE, HERAUSFORDERUNG UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABENS .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND DEFINITION DES DEMONSTRATORS .....</b>	<b>8</b>
4.1	Materialcharakterisierung.....	8
4.2	Definition des Demonstrators.....	12
<b>5</b>	<b>GEKOPPELTE DIGITALE PRODUKTION UND AUSLEGUNG .....</b>	<b>14</b>
5.1	Kopplung von Prozess- und Optikauslegung.....	14
5.2	Entwicklung einer digitalen Auslegung und Produktion sowie praktische Validierung anhand einer bestehenden Linsengeometrie.....	14
5.2.1	Digitale thermo-optische Auslegung.....	15
5.2.2	Digitale Prozessauslegung.....	16
5.2.2.1	Spritzgießprozesssimulation.....	16
5.2.2.2	Iterative Kompensationsmethode .....	19
5.2.3	Simulative Validierung.....	20
5.2.4	Praktische Validierung .....	22
5.3	Optimierung der Linsengeometrie.....	23
<b>6</b>	<b>REALE PRODUKTION.....</b>	<b>26</b>
6.1	Prozessuntersuchungen.....	26
6.2	Validierung der digitalen Auslegung und Produktion anhand des Demonstrators .....	27
6.3	Iterative Optimierung der Linsengeometrie .....	29
<b>7</b>	<b>ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT .....</b>	<b>32</b>
7.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	32
<b>8</b>	<b>WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NÜTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMÜ.....</b>	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN.....</b>	<b>36</b>
9.1	Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal .....	36
9.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	37
<b>10</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK .....</b>	<b>38</b>
<b>11</b>	<b>ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....</b>	<b>40</b>
11.1	Abkürzungen .....	40
11.2	Formelzeichen.....	40
11.3	Indizes.....	41

---

<b>12</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>42</b>
12.1	Liste der Veröffentlichungen.....	42
12.2	Liste der studentischen Arbeiten.....	42
12.3	Prozessparameter der hergestellten plattenförmigen Proben .....	42
<b>13</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>44</b>

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

## 1.1 Zusammenfassung

Deskriptoren: thermomechanische Analysen, Auslegung, FEM, Laser, optische Eigenschaften

Schlagworte: Fokuskompensation, Kopplung von Prozess- und thermomechanischer Auslegung, Spritzgießen

Glas als Standardwerkstoff für optische Anwendungen wird zunehmend durch transparente Kunststoffe ersetzt. Die Vorteile von Kunststoffen sind die große Gestaltungsfreiheit, die mögliche Integration von Funktionselementen und eine gute Urformbarkeit. Für Laseranwendungen mit mittleren Laserleistungen von 1 bis 100 W, wie das Laserbeschriften, wurden die höheren Anforderungen an die optischen Eigenschaften bisher von Kunststoffoptiken nicht erfüllt.

Die Produktion optischer Formteile für Laseranwendungen erfordert aufgrund der hohen Ansprüche an eine konstante Produktqualität auf hohem Niveau nicht nur einen hochgradig reproduzierbaren Spritzgießprozess, sondern auch eine hochgenaue Werkzeugfertigung. Diese muss im jeweiligen Anwendungsfall insbesondere der Auswirkung der eingebrachten Laserleistung in die Kunststofflinse berücksichtigt werden. Bei konventioneller Werkzeugauslegung ist durch resultierende thermo-optische Effekte mit einer Störung der Prozessqualität und -stabilität zu rechnen, die nur durch aufwendige und kostenintensive Nachbearbeitung kompensiert werden kann.

Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsvorhabens wurden zunächst Materialcharakterisierungen und Analysen zum Einfluss der optischen Materialeigenschaften auf die optische Qualität durchgeführt. Anschließend konnte mittels thermomechanischer Simulation am Betriebspunkt der Kunststofflinse in einer Laseranwendung die optimale Linsengeometrie berechnet und darauf aufbauend zurück auf die benötigte Linsengeometrie geschlossen werden. Mithilfe der Prozessoptimierung konnte durch simulative vollfaktorielle Versuchspläne die Werkzeuggeometrie kompensiert und anschließend mittels praktischen Spritzgießversuchen auch validiert werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine gekoppelte prozess- und thermomechanische Auslegung zu sehr guten Ergebnissen führen kann. Sowohl die Abformgenauigkeit als auch die optische Qualität der Linsen in der Laseranwendung kann simulativ bei korrekten Materialkennwerten vorhergesagt und bestimmt werden, wodurch eine iterative mechanische Anpassung der Werkzugauslegung vermieden wird.

## 2 EINLEITUNG

Einen großen Anwendungsbereich für Kunststofflinsen stellen Beleuchtungsanwendungen insbesondere mit LED dar. Als Material für optische Komponenten haben sich thermoplastische Kunststoffe wie Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polycarbonat (PC) durchgesetzt. Neben einer deutlichen Gewichtsreduzierung zählen vor allem die große Designfreiheit, die großserientaugliche Verarbeitbarkeit im Spritzgießen oder -prägen sowie die weitgehend überflüssige Nachbearbeitung zu ihren Stärken [Röb19]. Die zwei wesentlichen Qualitätskriterien von optischen Kunststoffkomponenten sind die geometrische Formgenauigkeit, mit der die optisch wirksamen Flächen durch den Kunststoff abgeformt werden, und die inneren Eigenschaften, wie Molekülorientierungen und Eigenspannungen, die sich im Kunststoff durch den Formgebungsprozess einstellen [Bre16]. Aus den technologischen und ästhetischen Kundenwünschen ergeben sich Anforderungen an die Geometrie, die sich nur mit einer sehr präzisen Abformung erreichen lassen.

Insbesondere in Kombination mit einer LED als Lichtquelle sind Kunststoffoptiken hohen Temperaturen und starken UV- und Blaulichtanteilen ausgesetzt. Der Einfluss dieser Belastungen auf die optischen Eigenschaften wird in zahlreichen Untersuchungen diskutiert. Insbesondere Polycarbonate zeigen eine deutliche Änderung des Transmissionsgrads. Eine Lagerung bei Temperaturen von 140 °C für 1920 h zeigt bspw. eine deutliche Abnahme des Transmissionsgrads insbesondere für den blauen Spektralbereich [YDJ+13]. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch bei einer Umgebungstemperatur von 85 °C für einen Zeitraum von 3000 h [LYD+15]. Dabei wird eine signifikante Verfärbung und Vergilbung der PC-Proben festgestellt, während PMMA-Proben bei einer gleichen Belastung auch in Verbindung mit UV- Licht oder erhöhter Luftfeuchtigkeit keine Veränderung zeigen. Untersuchungen von *Migahed und Zidan* sowie von *Rivaton et al.* zeigen ebenfalls anhand von PC-Folien, dass der Einfluss einer Bestrahlung mit UV-Licht Transmissionsverluste zur Folge hat [MZ06, RMS+02].

Für den Einsatz von Kunststoffoptiken in Lasersystemen muss analog zum Einsatz in LED-Beleuchtungssystemen eine hohe Temperaturbeständigkeit gegeben sein oder der Absorptionsgrad durch die Entwicklung neuer Kunststoffe reduziert werden [Wol17].

Relevante industriell verwendete Laserwellenlängen liegt im Gegensatz zu Beleuchtungsanwendungen primär im mittleren infraroten Bereich von 900 bis 1.100 nm. Langzeituntersuchungen in diesem Spektralbereich wurden noch nicht durchgeführt [RS19]. Die für das thermo-optische Verhalten relevanten Materialdaten sind in Tabelle 2.1 für das Standardglas N-BK7 und die thermoplastischen Kunststoffe PC und PMMA gegenübergestellt. Aufgrund des betragsmäßig großen thermo-optischen Koeffizienten von etwa  $-100 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ,

einem gegenüber Glas ca. 10-fach größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie Absorptionsgrad sind signifikante thermo-optische Effekte bereits bei  $<10$  W zu erwarten.

Material	$n$ (1.064 nm)	$dn/dT$ [ $10^{-6}/K$ ]	$\alpha_{th}$ [ $10^{-6}/K$ ]	$\kappa$ [W/mK]	$\alpha_{abs}$ [%/cm]	Quelle
N-BK7	1,5066	1,1 @ 1064 nm	8,3	1,114	0,12	[NN15a]
PC	1,564	-100 @ 656 nm	65	0,20	1,1*	[NN15b, SKN13]
PMMA	1,481	-128 @ 656 nm	70	0,21	N/A	[SKN13]

Tabelle 2.1: Materialdaten für das Standardglas N-BK7 sowie die Kunststoffe PC (MakrolonLED2245) und PMMA. Volumenabsorptionskoeffizient bei 1.064 nm Wellenlänge. \*Eigene Absorptionsmessungen mittels Spektroskopie

Der Einfluss des temperaturabhängigen Brechungsindexprofils für einen negativen thermo-optischen Koeffizienten  $dn/dT$  sowie der Einfluss thermisch induzierter Oberflächendeformationen ist schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt. Insgesamt überwiegt bei PC und PMMA der Einfluss der Brechungsindexänderung, sodass die Laserstrahlung defokussiert wird.

Thermo-optische Effekte treten auch in Hochleistungslaseroptiken für die Lasermaterialbearbeitung auf und erfordern eine angepasste Optikauslegung. Aufgrund von Volumenabsorption in den optischen Gläsern sowie Absorption in Antireflexbeschichtungen induzieren Laserleistungen im Kilowatt-Bereich erhebliche thermische Lasten in den optischen Komponenten. Als Folge der Erwärmung ändern sich deren optischen Eigenschaften, was die Prozessqualität und -stabilität negativ beeinflusst. Die Auslegung von thermisch stabilen optischen Systemen erfordert eine angepasste Simulationsumgebung. Um beim Optikdesign die Änderung des Brechungsindex mit der lokalen Temperatur sowie thermisch induzierte Oberflächendeformationen berücksichtigen zu können, sind in den letzten Jahren verschiedene Lösungen entwickelt worden. Am geeignetsten erscheint eine Kopplung zwischen thermomechanischer Finite Elemente Analyse (FEA) und Ray-Tracing [DGMB05, Gat14, GWL12, MG13]. Dabei werden die diskreten Temperatur- und Deformationsdaten aus der FEA in eine stetig differenzierbare Funktion für den Brechungsindexverlauf sowie die Oberflächenform übertragen.

Darüber hinaus existieren Ansätze zur passiven Kompensation von thermo-optischen Effekten durch eine geeignete Kombination von Gläsern mit positivem und negativem thermo-optischen

Koeffizienten [GL14, PTV+12]. Aufgrund der im Vergleich zu Gläsern großen thermischen Volumenausdehnung weisen Kunststoffe grundsätzlich einen negativen thermo-optischen Koeffizienten auf [KSN15]. Daher ist eine passive Kompensation beim ausschließlichen Einsatz von Kunststoffen nicht möglich. Für eine homogene Erwärmung des gesamten optischen Systems können thermische Effekte durch eine Kombination von Kunststofflinsen mit einzelnen Glaslinsen kompensiert werden [Str80, YCL17]. Allerdings lässt sich dieser Ansatz nicht auf Optiken für Laseranwendungen übertragen, da sich die Kunststoffkomponenten aufgrund des größeren Absorptionsgrads deutlich stärker erwärmen als die Komponenten aus Glas [Bli10]. Eine Voraussetzung für den Einsatz von Kunststofflinsen in Lasersystem ist daher eine betriebspunktgerechte Auslegung, welche neben thermo-optischen Effekten auch den Einfluss von Fertigungsungenauigkeiten berücksichtigt.

Klassischerweise finden die optische und prozesstechnische Auslegung zeitlich und räumlich getrennt statt, wie das Schema in Abbildung 2.2 zeigt. Auf Basis der optischen Anforderungen, bspw. der Brennweite oder dem Fokusbereich, wird die Linsengeometrie berechnet. Im nächsten Schritt werden im Rahmen der Prozessauslegung die für die Linsengeometrie erforderliche Werkzeugform simulativ bestimmt und Prozessparameter ermittelt. Eine Rückkopplung mit der optischen Auslegung erfolgt in der Regel erst, nachdem das Werkzeug gebaut sowie erste Teile hergestellt und vermessen wurden. Eine kosten- und zeitaufwendige Prozessroutine mit iterativen Anpassungen des Werkzeugs ist die Folge [LW14, Rei16].

In der aktuellen Forschung gibt es Bestrebungen, die Prozesssimulation bereits im Rahmen der optischen Auslegung zu berücksichtigen. So gibt es bspw. vielversprechende Ansätze, Abweichungen der Geometrie aufgrund von Schwindung bei der Herstellung von Kontaktlinsen zu berücksichtigen [CVQ17]. Durch eine simulative Optimierung der Prozessparameter Masstemperatur, Einspritzgeschwindigkeit und Nachdruck konnten Abweichungen in Dickenrichtung in der Simulation bereits um 80 % reduziert werden. In Untersuchungen von *Hsu et al.* wurde nach der optischen Auslegung einer Linse der Verzug dieser simuliert und über Zernike-Polynome eine Verzugskompensation vorgenommen [HCH13]. So konnte der Bauteilverzug zumindest auf simulativer Ebene signifikant reduziert werden. Eine Korrektur des Verzugs konnte auch in Arbeiten von *Li und Wang* nachgewiesen werden [LW14]. Durch eine Simulation des Verzugs und Anpassung der Geometrie konnte der Verzug einer planen Linsenoberfläche von 0,2 mm auf 0,008 mm verbessert werden. In allen bisher vorgestellten Untersuchungen ist noch keine praktische Validierung der Auslegungsroutine durchgeführt worden. Darüber hinaus wurden Prozesseinflüsse nicht oder nur anhand weniger Einstellparameter betrachtet.

Für Mikrolinsen aus PMMA wurde ebenfalls ein kombinierter simulativer Ansatz für die optische und prozesstechnische Auslegung vorgestellt [LRS+14]. Im Rahmen von

prozesstechnischen Simulationen wurden Verzug und Brechungsindexvariation abgebildet und Messwerten aus praktischen Untersuchungen gegenübergestellt. Dabei zeigten sich eine sehr gute Übereinstimmung der Wellenfront und eine tendenzielle Übereinstimmung des Brechungsindex.

Aufgrund der vorhandenen Limitierungen bei der Optik- und Prozessauslegung sowie den Herausforderungen, die mit den Materialeigenschaften von Kunststoffen einhergehen, können nach aktuellem Stand der Technik keine Kunststoffoptiken entwickelt und gefertigt werden, die die Anforderungen für einen Einsatz in Laseranwendungen in ihrer Gesamtheit erfüllen. Hieraus leiten sich die im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Projektziele ab.

### 3 ZIELE, HERAUSFORDERUNG UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABENS

Das Projekt verfolgt zwei wesentliche Zielsetzungen:

1. Auslegung, Produktion und Qualifizierung einer Kunststoffoptik für den Leistungsbereich bis 15 W kontinuierliche Laserleistung
2. Realisierung einer gekoppelten, digitalen Auslegung und Produktion von Kunststoffoptiken sowie deren praktische Validierung

Das erste Projektziel stellt die Schaffung der Grundvoraussetzung für den Einsatz optischer Komponenten aus Kunststoff in Laseranwendungen dar. Zur Kompensation der auftretenden thermo-optischen Effekte wird folgende Arbeitshypothese verfolgt: Wird die Linsenform im thermisch nicht belasteten Zustand geeignet angepasst, erfüllt die Kunststofflinse die optischen Eigenschaften für einen definierten Betriebspunkt und thermisch induzierte Aberrationen werden kompensiert.

Um das erste Ziel effizient zu erreichen, ist die Realisierung einer gekoppelten, digitalen Auslegung und Produktion der Kunststoffoptik das zweite Projektziel. Durch die Kombination der bisher getrennt durchgeführten Optik- und Prozessauslegung sollen kostenintensive iterative Anpassungen des Werkzeugformeinsatzes sowie die Herstellung von Prototypen vermieden werden. Die zentrale Arbeitshypothese ist, dass auf Basis der Geometrie des Formeinsatzes und der gewählten Prozessparameter die Linsengeometrie und damit die optischen Eigenschaften unter Einsatzbedingungen deterministisch ermittelt werden können, ohne Linsen real produzieren zu müssen.

Zum Erreichen der formulierten Projektziele ist folgendes Vorgehen vorgesehen.

Die Qualifizierung einer Kunststoffoptik für Laseranwendungen sowie die praktische Validierung der gekoppelten, digitalen Auslegung und Produktion erfordern einen Demonstrator. Hierzu werden zunächst die Spezifikationen des Demonstrators definiert und potenziell geeignete Kunststoffe identifiziert. Die optischen Anforderungen an die Kunststofflinse sollen dieselben sein wie für eine kommerziell verfügbare Linse aus Glas.

Die Kopplung der Optik- und Prozessauslegung auf digitaler Ebene wird zunächst anhand einer bestehenden Linsengeometrie durchgeführt und anschließend praktisch validiert. Schließlich wird diese Methode zur Auslegung des Demonstrators genutzt. Das Vorgehen zur gekoppelten, digitalen Auslegung und Produktion von Kunststoffoptiken ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt.

Zunächst wird die Kunststoffoptik unter Berücksichtigung der optischen Anforderungen und des verwendeten Materials ausgelegt. Im nächsten Schritt werden die zu erwartenden thermo-optischen Effekte unter den Einsatzbedingungen simuliert. Im thermisch belasteten Zustand wird die Linsenform iterativ optimiert, bis die Brennweite der Linse mit der geforderten Brennweite trotz thermischer Effekte übereinstimmt. Anschließend wird aus der optimierten Linsenform im thermisch belasteten Zustand auf die Linsengeometrie im unbelasteten Zustand geschlossen. Die Geometriedaten der Linse im thermisch unbelasteten Zustand werden über eine zu entwickelnde Schnittstelle an die digitale Prozessauslegung transferiert. Unter Berücksichtigung von Effekten wie Schwindung und Verzug werden die erforderliche Formeinsatzgeometrie optimiert sowie geeignete Prozessparameter für den Spritzgießprozess identifiziert. Die resultierenden digitalen Linsengeometriedaten werden mittels eines geeigneten Formats dargestellt und die zu erwartenden optischen Eigenschaften für den Betriebspunkt simuliert. Die Optik- und Prozessauslegung werden iterativ durchlaufen, bis die Kunststoffoptik die Anforderungen innerhalb der gesetzten Toleranzen erfüllt.

In der zweiten Projektphase wird der Werkzeugformeinsatz gefertigt, und Kunststofflinsen werden auf Basis des zuvor identifizierten Prozessfensters hergestellt. Als Qualitätskriterien werden die Geometrie und die optischen Eigenschaften unter Einsatzbedingungen charakterisiert. Auf diese Weise werden die gekoppelte, digitale Auslegung und die Produktion validiert sowie die Demonstrationsoptik für den Einsatz in Laseranwendungen qualifiziert.

## 4 MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND DEFINITION DES DEMONSTRATORS

### 4.1 Materialcharakterisierung

Als Linsenmaterial wurden zunächst sowohl Polymethylmethacrylat (PMMA) als auch Polycarbonat (PC) erprobt, da beide Kunststoffe vergleichsweise günstig, weit verbreitet und hochtransparent sind.

Für eine erfolgreiche thermo-optische Auslegung ist eine möglichst exakte Kenntnis der Materialparameter (Abbildung 4.1) und des Betriebspunkts (Tabelle 4.3) erforderlich. Um den Einfluss möglicher Abweichungen der realen Versuchs- und Materialparameter von den der Simulation zu Grunde liegenden Werten zu untersuchen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (Abbildung 4.1). Hierdurch kann insbesondere die erforderliche Präzision der zu verwendenden Messmittel abgeschätzt werden. Die Versuchs- und Materialparameter werden in der Simulation um jeweils fünf Prozent vergrößert bzw. verkleinert. Aus Abbildung 4.1 wird ersichtlich, dass Änderungen des Brechungsindex zu einer deutlichen Zunahme der Beugungsmaßzahl um bis zu 94 % führen. Die Ursache hierfür ist, dass die Form der Asphäre nur bei dem für sie ausgelegten Brechungsindex eine beugungsbegrenzte Fokussierung ermöglicht. Neben einer Zunahme der Beugungsmaßzahl führt die beschriebene Änderung des Brechungsindex außerdem zu einer Fokusverschiebung von bis zu 22 mm. Des Weiteren wird deutlich, dass die Optik auf eine Vergrößerung bzw. eine Verkleinerung desselben Parameters unterschiedlich sensitiv reagiert. So führt eine Verkleinerung des Strahlradius um 5 % zu einer Erhöhung der Beugungsmaßzahl um 50,1 %, während eine Vergrößerung zu einer Zunahme der Beugungsmaßzahl um lediglich 14,4 % führt. Robust ist das System hingegen gegen eine Variation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Eine Variation der Laserleistung ist in etwa analog zu einer Variation des Absorptionskoeffizienten. So führt eine Vergrößerung beider Größen jeweils zu mehr Energieeinbringung in das Linsenmaterial und somit zu einer ähnlichen Änderung der Beugungsmaßzahl.

Eine zusätzliche Variation der Umgebungstemperatur um  $\pm 5\%$  hat bei der betrachteten Genauigkeit der durchgeführten wellenoptischen Untersuchungen nahezu keine Auswirkungen auf die Beugungsmaßzahl.

Für die Materialcharakterisierung, d.h. zur Ermittlung von Brechungsindex, thermo-optischem Koeffizienten, Emissionsgrad und Absorptionsgrad wurden beim IKV plattenförmige Probekörper mit den Maßen von  $80 \times 80 \times 2 \text{ mm}^3$  hergestellt (Abbildung 4.2). Das von Covestro Deutschland AG, Leverkusen, Deutschland hergestellte Polycarbonat Makrolon LED 2245 (PC) und das von Röhm GmbH, Darmstadt, Deutschland hergestellte Polymethylmethacrylat PLEXIGLAS 7N (PMMA) wurden für die Herstellung der plattenförmigen Probekörper

verwendet, um die optischen Eigenschaften zu vergleichen. Die Versuche wurden auf einer Spritzgießmaschine vom Typ e-motion 440/160 T/WP der Firma Engel Austria GmbH, Schwertberg, Österreich hergestellt. Die Prozessparameter Einspritzgeschwindigkeit, Nachdruck, Nachdruckzeit, Massetemperatur, Werkzeugtemperatur und Restkühlzeit wurden während der Herstellung variiert, wobei das Prozessfenster an das jeweilige Material angepasst wurde (Anhang 12.3). Die am IKV hergestellten plattenförmigen Proben wurden am TOS hinsichtlich Brechungsindex, Emissionsgrad, thermo-optischen Koeffizienten und Absorptionsverhalten untersucht.

Um die Langzeitstabilität der infrage kommenden Kunststoffe (PMMA, PC) zu untersuchen, wurde ein Aufbau zur Langzeitmessung realisiert (Abbildung 4.3). Hierzu wurden die hergestellten zwei Millimeter dicke Kunststoffproben jeweils 50 Tage mit Laserstrahlung beaufschlagt und die durch die Probe transmittierte Laserleistung währenddessen gemessen. Anhand einer Transmissionsänderung soll auf die Änderung des Absorptionsgrades geschlossen werden. Die aufgezeichneten Messwerte schwanken aufgrund der Messgenauigkeit der verbauten Sensorik um bis zu 0,2 Prozentpunkte. Innerhalb des Rauschens kann keine zeitliche Änderung des Transmissionsgrades und somit auch des Absorptionsgrades festgestellt werden. Die Messgenauigkeit des Aufbaus wird mit der Gesamtabsorption der PMMA-Probe im unbestrahlten Zustand von 0,29 % verglichen. Aus dem Vergleich kann abgeleitet werden, dass der Absorptionsgrad stets kleiner 0,5 % über die gesamte Bestrahlungsdauer ist, was für eine geringe Materialdegradation spricht.

Außerdem wurde der Brechungsindex von spritzgegossenen Linsen und planer Probekörper mittels eines Abbe-Refraktometers untersucht. Hierfür wurde im Rahmen des Forschungsprojekts ein Interferenzfilter mit einer Transmissionswellenlänge von 1.070 nm beschafft. Die Brechungsindexmessungen zeigen in Übereinstimmung mit Literaturwerten, dass PC eine stärkere Doppelbrechung als PMMA aufweist. So wurde für PC im Mittel eine Doppelbrechung von 0,0043 gemessen, während die Doppelbrechung für PMMA kleiner als  $10^{-4}$  bestimmt wurde. Aufgrund der geringeren Doppelbrechung von PMMA im Vergleich zu PC werden die Linsen daher im Folgenden aus PMMA hergestellt. Spritzgießsimulationen von Linsen, hergestellt unter unterschiedlichen Spritzgussparametern, zeigen eine Veränderung der optischen Eigenschaften mit den Herstellungsparametern (Abbildung 4.4). Außerdem wird erwartet, dass ebenfalls die Geometrie des Spritzgussbauteils einen Einfluss beispielsweise auf die Brechungsindexverteilung hat. Daher werden im Folgenden nicht mehr planparallele Platten, sondern Linsen mit der Ausgangsgeometrie des zu optimierenden Demonstrators untersucht. Für die so hergestellten Linsen wurde von Linse zu Linse und an verschiedenen Positionen einer Linse unterschiedliche Brechungsindizes gemessen (Abbildung 4.5).

Um den Einfluss von räumlichen Brechungsindexschwankungen innerhalb einer Linse auf deren Fokussiereigenschaften zu untersuchen, wurden wellenoptische Simulationen mit räumlich unterschiedlichen Brechungsindizes durchgeführt. Hierfür wurde die Software VirtualLab der Firma Lighttrans aus Jena, Deutschland, verwendet. Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, schwanken die Brechungsindizes zwischen 1,4829 und 1,4840. Diese Schwankungen wurden in der Simulation als eine radial angenommene sinusförmige Brechungsindexschwankung mit einer Maximalamplitude  $\Delta n$  angenähert. Anhand der Messwerte wird eine Brechungsindexschwankung mit einer Amplitude von circa 0,006 erwartet. Hierfür ergibt sich die in Abbildung 4.4 klein dargestellte Strahlkaustik mit einem  $M^2$  von circa 1,55. Eine Brechungsindexschwankung führt folglich zu einer geringeren Fokussierbarkeit. Ziel ist daher, die Brechungsindexschwankungen nach Möglichkeit zu reduzieren.

Die zu beobachtenden räumlichen Brechungsindexschwankungen waren bei Linsen, welche mit einem geringeren Nachdruck (40 MPa) hergestellt wurden, größer als bei Linsen, welche mit größerem Nachdruck (100 MPa) hergestellt wurden. Für die Herstellung der Linsen wird daher ein Nachdruck von 100 MPa verwendet. Für die anschließende thermo-optische Optimierung der Linsengeometrie wurde als Brechungsindex der in der Linsenmitte gemessene Brechungsindex verwendet. Vermessen wurden hierzu mehrere bei 100 MPa hergestellte Linsen und anschließend wurde ein Mittelwert von 1,4837 ermittelt.

Der thermo-optische Koeffizient ist eine wesentliche Einflussgröße für die Ausbildung von thermischen Linsen und wurde durch Messungen des Brechungsindex bei unterschiedlichen Temperaturen mittels Abbe-Refraktometer ermittelt. Der thermo-optische Koeffizient wird durch eine Geradenanpassung an die Messwerte ermittelt (Abbildung 4.6). Im Mittel wurde ein thermo-optischer Koeffizient von  $dn/dT = (-157,4 \pm 14,4) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ermittelt. Die angegebene Messunsicherheit folgt aus der Streuung der Einzelmessungen. Für einen Vergleich der gemessenen thermo-optischen Koeffizienten mit denen von industriell hergestellten Kunststofflinsen in Großserie wurden vier verschiedene zugekaufte Kunststofflinsen aus PMMA untersucht. Die Messergebnisse sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Auch hier wird bei verschiedenen Linsen ein unterschiedlicher thermo-optischer Koeffizient beobachtet. Der Einfluss solcher Schwankungen wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse diskutiert (siehe Kapitel 4).

Ob die gemessenen Unterschiede des thermo-optischen Koeffizienten auf Schwankungen bestimmter Prozessparameter zurückgeführt werden können, wurde mithilfe einer Korrelationsanalyse untersucht. Hierzu wurde der thermo-optische Koeffizient bei verschiedenen Einzellinsen vermessen und im Vergleich hierzu die Maschinendaten für die jeweiligen Linsen ausgewertet und in Relation gesetzt. Zur Bewertung wurden der Pearson-

und der Spearmankoeffizient herangezogen (Tabelle 4.1). Da alle Koeffizienten vom Betrag kleiner als 0,5 sind, liegt keine eindeutige Abhängigkeit vor. Möglich wäre hingegen ein Zusammenwirken der unterschiedlichen Faktoren.

	<b>Pearsonkoeffizient</b>	<b>Spearmankoeffizient</b>
Einspritzvolumen	0,142	0,306
Max. spez. Einspritzdruck	-0,384	-0,036
Massepolster	0,266	0,464
Brechungsindex	0,048	-0,150
Nachdruck	-0,045	0,429
Umschaltdruck	0,092	0,429
Produktionszeitpunkt	0,445	0,393

*Tabelle 4.1: Einflussfaktoren auf den thermo-optischen Koeffizienten*

Um die von den Linsen abgestrahlte Energie in Form von Wärmestrahlung während des Optikdesigns berücksichtigen zu können und insbesondere auch eine präzise berührungslose Temperaturmessung möglich zu machen, ist eine Bestimmung des Emissionsgrads von PMMA erforderlich. Zunächst einmal wurden hierzu Auftragsmessungen durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Berlin, Deutschland, durchgeführt (Abbildung 4.8).

Der Emissionsgrad der aus PMMA hergestellten plattenförmigen Probekörper wurde anhand zweier Proben zu  $0,95 \pm 0,05$  ermittelt. Die Messunsicherheit ist auf eine Krümmung der zu vermessenden Proben zurückzuführen. Durch die Krümmung ist der Wärmekontakt zu einer im Aufbau verbauten Heizplatte nicht ausreichend gegeben, wodurch die exakt übertragene Wärmemenge nur ungenau bekannt ist. Da eine solch große Messunsicherheit auf den Emissionsgrad für die weiteren Experimente zur Temperaturbestimmung nicht akzeptabel ist, werden zusätzlich eigene Messungen durchgeführt. Hierfür wurden aufgrund der zwischenzeitlich gewonnenen Erkenntnisse (s.o.) nicht mehr die plattenförmigen Probekörper sondern die zu optimierende Linsengeometrie verwendet. Zum einen wurde der Emissionsgrad durch einen Temperaturabgleich zwischen einer mittels Temperaturfühler (Pt-100) gemessenen Temperatur und einer mittels Thermokamera (ImageIR 8390 der Firma Infratec GmbH, Dresden aus Deutschland) bestimmten Temperatur verglichen. Außerdem wurde eine Linse teilweise mit einem Material bekannten Emissionsgrads lackiert, so dass der Emissionsgrad des unbeschichteten Teils über einen Temperaturabgleich beider Teilflächen bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse beider Messmethoden werden gemittelt und somit ergibt sich der Emissionsgrad zu  $0,946 \pm 0,010$ .

Für die mit unterschiedlichen Prozessparameterkombinationen hergestellten planen Prüfkörper wurde der Absorptionskoeffizient zunächst mittels Photospektrometer (Lambda 1050 der Firma PerkinElmer LAS GmbH aus Rodgau-Jügesheim, Deutschland) gemessen. Im Mittel beträgt der Absorptionskoeffizient für alle untersuchten Proben  $(1,0 \pm 0,4) \text{ %/cm}$ . Thermografiemessungen während der Laserbestrahlung der Proben weisen allerdings nur geringe Temperaturunterschiede zwischen den unterschiedlichen Versuchspunkten auf und deuten somit lediglich auf eine Variation des Absorptionskoeffizienten um maximal 10 % hin. Daher wurde der Absorptionsgrad im Folgenden durch einen Abgleich der experimentell gemessenen Temperaturverteilung mit der unter gleichen Ausgangsbedingungen mittels FEM simulierten Temperaturverteilung bestimmt (Abbildung 4.9). Hierfür wurden aus den genannten Gründen Linsen der zu optimierenden Linsengeometrie verwendet. Aus dem Abgleich wird ein Absorptionsgrad von  $\alpha = (1,463 \pm 0,051) \text{ %/cm}$  ermittelt. Die Messunsicherheit des Absorptionsgrades folgt aus den von Linse zu Linse leicht unterschiedlich gemessenen Temperaturverteilungen.

## 4.2 Definition des Demonstrators

Als Ausgangsgeometrie für den Demonstrator wird eine bereits am IKV vorhandene asphärische Linsengeometrie verwendet (Abbildung 4.10). Diese wird durch die Asphärenformel in Gleichung 1 und die in Tabelle 4.2 zusammengefassten Parameter beschrieben.

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2r^2}} + \alpha_2 r^2 + \alpha_4 r^4 + \alpha_6 r^6 + \alpha_8 r^8 \quad (\text{Gl. 1})$$

$R_1 = 1/c$ [mm]	$\alpha_2$ [mm <sup>-2</sup> ]	$\alpha_4$ [mm <sup>-4</sup> ]	$\alpha_6$ [mm <sup>-6</sup> ]	$\alpha_8$ [mm <sup>-8</sup> ]	$\kappa$ [-]	BFL [mm]
150,00	+1,45E-5	-2,17E-8	-1,50E-13	-5,62E-17	-1,51E-9	304,00

Tabelle 4.2: Geometrische Parameter der Ausgangsgeometrie

Hierbei sind  $\alpha_i$  die Asphärenkoeffizienten unterschiedlicher Ordnung,  $R_1$  der Radius der gekrümmten Linsenvorderseite,  $\kappa$  die konische Konstante,  $c$  der Scheitelradius und BFL die Rückseitige Brennweite der Linse.

Für den Demonstrator wurden in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss die in Tabelle 4.3 aufgeführten Anforderungen festgelegt. Denkbar wäre der Einsatz einer derartigen Linse und dem spezifizierten Betriebszustand beispielsweise in einem Beschriftungslaser als Fokussierlinse. Aufgrund der geringeren Doppelbrechung von PMMA im Vergleich zu PC

während erster Brechungsindexmessungen (s. u.) wird PMMA als Linsenmaterial für die weiteren Untersuchungen und die Linsenherstellung gewählt.

<b>KenngroÙe</b>	<b>Wert</b>
Laserstrahldurchmesser	4,64 mm
Laserwellenlänge	1070 nm
Laserleistung	15 W
Strahlprofil	gaußförmig
Brennweite	304 mm

*Tabelle 4.3: Spezifikation der Linsenbrennweite und des Lasers*

Die in Tabelle 4.3 spezifizierten Größen bilden die Basis für die thermo-optische Auslegung und beeinflussen unmittelbar die thermische Last innerhalb der Linse.

## **5 GEKOPPELTE DIGITALE PRODUKTION UND AUSLEGUNG**

In diesem Arbeitspaket wurde eine gekoppelte, digitale Auslegung und Produktion von Kunststofflinsen realisiert. Berücksichtigt wurden hierbei sowohl auftretende thermo-optische Effekte als auch prozesstechnisch bedingte Effekte wie Verzug und Schwindung. Die Vorgehensweise der gekoppelten, digitalen Auslegung und Produktion ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die einzelnen Teilschritte werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

### **5.1 Kopplung von Prozess- und Optikauslegung**

Für die Entwicklung der gekoppelten digitalen Auslegung und Produktion ist zunächst eine Kopplung der Prozess- und Optikauslegung erforderlich. Für die Optikauslegung bzw. die Prozessauslegung werden Zemax Optic Studio von ANSYS, Inc., Canonsburg, USA, bzw. Moldex3D von Core Tech System in Chupei City, Taiwan, verwendet. Von der Optikauslegung soll die thermo-optisch optimierte Linsengeometrie zur Prozessauslegung übertragen werden können. Hierzu bietet Zemax Optic Studio die Möglichkeit, die erstellte Linsengeometrie als STEP-Datei zu exportieren. Zur Überprüfung der Exportgenauigkeit wurde die exportierte Linsengeometrie erneut in Zemax Optic Studio geladen und die erzielte Brennweite mit der Brennweite ohne zwischenzeitlichen Export verglichen. Hierbei konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Da die Spritzgießsimulationen in Moldex3D auf dreidimensionalen Gittern ausgeführt werden, liegt die simulierte digital produzierte Linsengeometrie als Punktwolke in Form einer STL vor. Um die optischen Eigenschaften der digital produzierten Linse inklusive thermischer Effekte in Zemax Optic Studio simulieren zu können, ist es erforderlich, dass die Linsenoberfläche in Form von kontinuierlich differenzierbaren Funktionen vorliegt. Zur Approximation der simulierten Datenpunkte wird daher die am Lehrstuhl TOS entwickelten Software TOP Simulation verwendet. Mithilfe von benutzerdefinierten DLLs werden die approximierten Daten in Zemax Optic Studio geladen und anschließend die optischen Eigenschaften der Linse im thermisch belasteten Zustand analysiert. Die Kopplung wird im folgenden Arbeitspaket anhand einer bestehenden Linsengeometrie hinsichtlich ihrer Genauigkeit untersucht.

### **5.2 Entwicklung einer digitalen Auslegung und Produktion sowie praktische Validierung anhand einer bestehenden Linsengeometrie**

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die in Abbildung 5.1 dargestellte Auslegungsroutine entwickelt. Diese kombiniert die Optik- und Prozessauslegung. Durch die gleichzeitige Betrachtung beider Aspekte soll ermöglicht werden, kostspielige Iterationsschleifen zwischen

Fertigung der Optiken und deren optischer Bewertung zu reduzieren bzw. diese gänzlich zu vermeiden.

Eingangsgrößen für die thermo-optische Auslegung sind die in Kapitel 4 bestimmten Materialparameter, die Kennzahlen des Betriebszustandes und die Ausgangsgeometrie der zu optimierenden Linse. Diese sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Zeichen	Beschreibung	Einheit	Wert
P	Laserleistung	W	15
D	Laserstrahldurchmesser	mm	4,64
$\alpha_{\text{abs}}$	Absorptionskoeffizient	%/cm	1,463
dn/dT	Thermo-optischer Koeffizient	$10^{-6} \text{ K}^{-1}$	-122
$\alpha_{\text{th}}$	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	$10^{-6} \text{ K}^{-1}$	80 [Röh21]
n(1070nm)	Brechungsindex	-	1,4837
$\kappa$	Thermische Leitfähigkeit	W/mK	0,2 [Ste10]
$\epsilon$	Emissionsgrad	-	0,946

Tabelle 5.1: Materialparameter und Kennzahlen des Betriebszustands

### 5.2.1 Digitale thermo-optische Auslegung

Basierend auf den Materialparametern der Linse und den Kennzahlen des Betriebszustands wird zunächst der Strahlverlauf innerhalb der Linse im Optikdesignprogramm Zemax Optic Studio ohne thermische Effekte simuliert. Anhand des Strahlverlaufs innerhalb der Linse lässt sich die daraus resultierende thermische Last berechnen. Die in Zemax erstellte Linsengeometrie wird anschließend für thermische Simulationen in Ansys von ANSYS, Inc., Canonsburg, USA, als Step Datei exportiert. Mithilfe der thermischen Last werden in der FEM Umgebung Ansys die daraus resultierende Temperatur- und Deformationsverteilung ermittelt. Für die Berücksichtigung der thermischen Effekte im Optikdesign müssen die mittels Ansys erhaltenen Daten in Form einer diskreten Punktwolke durch kontinuierlich differenzierbare Funktionen approximiert werden, so dass diese anschließend in Zemax Optic Studio überführt werden können. Dazu werden die simulierten Datenpunkte aus Ansys, die jeweils als Textdokument vorliegen, mithilfe der Software TOP Simulation approximiert. Die Auflösung der in der Textdatei enthaltenen Werte ist durch die gewählte Gittergröße in Ansys vorgeben. Da innerhalb der Linse keine abrupten Temperatursprünge bzw. Deformationsunterschiede vorhanden sind, erweist sich eine Elementgröße des Gitters von 0,2 mm als ausreichend, um die optischen Eigenschaften des Systems wie die Brennweite der Linse genau zu beschreiben. Zur Approximation der simulierten Datenpunkte wird die Software TOP Simulation verwendet.

Mithilfe von benutzerdefinierten DLL werden die approximierten Daten in Zemax geladen und anschließend die optischen Eigenschaften der Linse im thermisch belasteten Zustand analysiert. Erfüllen die optischen Eigenschaften der Linse die beabsichtigten Spezifikationen, so ist keine Anpassung der Linsengeometrie für den thermischen Belastungszustand nötig. Andernfalls wird die Linsengeometrie angepasst. Hierzu können der Radius, die konische Konstante und die asphärischen Koeffizienten der gekrümmten Linsenseite für eine Optimierung der Linsenform freigegeben werden. Anschließend wird der Zyklus erneut durchlaufen, bis die beabsichtigten Spezifikationen der Linse eingehalten werden.

## **5.2.2 Digitale Prozessauslegung**

### **5.2.2.1 Spritzgießprozesssimulation**

Die Spritzgießprozesssimulation muss bei der Ausführung der digitalen Prozessauslegung verwendet werden, was die Vorbereitung des Simulationsmodells, die Bestimmung der Prozessparameter und Auswahl der Netzdichte umfasst.

#### **5.2.2.1.1 Modellierung des Spritzgießwerkzeugs und der Materialeigenschaften**

Die bestehende und in Abbildung 4.1 beschriebene Linsen- bzw. Werkzeuggeometrie wurde zur Validierung der Auslegungsroutine verwendet. Das entsprechende Simulationsmodell der Demonstratorlinse mit Kühlkanälen ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Das Modell soll zunächst vernetzt werden. Hierfür wurde das Netz mit dem von der Moldex3D-Software bereitgestellten Grenzschnittnetz (BLM) generiert. Zu den unterstützenden Netztypen gehören tetraedrische Elemente und mehrschichtige BLM, um das Strömungs- und Wärmeübergangsverhalten in der Nähe der Oberfläche der Werkzeugkavität zu beobachten [URL21].

Zur Berücksichtigung des  $p_vT$ -Verhaltens und der Viskosität werden das Tait-Gesetz und das Cross-WFL verwendet, das zur Bestimmung des Schwindungs- und Fließverhaltens eingesetzt wird. Die relevanten Parameter für diese Modelle werden von der Moldex3D-Materialdatenbank bereitgestellt. Da die Verformung der Linse im Mittelpunkt der Prozessauslegung steht, wird sie in jeder Phase des Spritzgießprozesses, wie Einspritz-, Pack- und Abkühlphase sowie in der Phase vom Auswerfen bis zum Umgebungszustand, bewertet [URL21].

#### **5.2.2.1.2 Statistische Auswertung der Prozessparameter**

Moldex3D bietet ein Analysemodul zur automatischen Durchführung eines vordefinierten Versuchsplans (DoE) und zur Unterstützung der statistischen Auswertung. In diesem Modul wurde die *Taguchi*-Methode angewandt, die statistische Methoden zur Durchführung von

Experimenten und zur Analyse des Produktionsprozesses verwendet werden kann [KFLB15]. Je nach Zielsetzung der Optimierung müssen zunächst der Qualitätsfaktor und die Prozessparameter bestimmt werden. Der Qualitätsfaktor stellt das Ziel der Optimierung dar, in diesem Fall die Minimierung der volumetrischen Schwindung. Die Prozessparameter sind die zu optimierenden Variablen. Die folgenden fünf Prozessparameter wurden ausgewählt, um ihre Auswirkungen auf die geometrische Genauigkeit und die optische Qualität zu untersuchen: Massetemperatur, maximaler Nachdruck, Restkühlzeit, Nachdruckzeit und Werkzeugtemperatur [JP05]. Nachdem die Prozessparameter festgelegt wurden, wurden ihre geeigneten Prozessfenster auf der Grundlage des Materialdatenblattes und Erfahrungen bestimmt (Tabelle 5.2) [Röh21]. Für die *Taguchi*-Methode wurde ein teilfaktorieller Versuchsplan mit insgesamt 27 Durchläufen gewählt.

Prozessparameter	Einheit	Kennzeichen	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Massetemperatur	°C	A	220	240	260
Werkzeugtemperatur	°C	B	50	60	70
maximaler Nachdruck	MPa	C	10	25	40
Nachdruckzeit	s	D	19	22,5	26
Restkühlzeit	s	E	170	200	230

Tabelle 5.2: Ausgewählte Prozessparameter und ihre entsprechende Prozessfenster (Versuchsplan  $\alpha$ )

Bei der *Taguchi*-Methode werden die Qualitätsreaktion und das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) zur Bewertung der DoE-Ergebnisse herangezogen. Die Qualitätsreaktion ist der Durchschnitt des Qualitätsfaktors aus verschiedenen Versuchspunkte auf jede Stufe jedes Prozessparameters im *Taguchi*-Array. Das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N-Verhältnis) integriert die Auswirkungen der durchschnittlichen Qualitätsreaktionen und ihrer Standardabweichungen. Da das S/N-Verhältnis normalisiert ist, ist ein höheres S/N-Verhältnis immer besser als ein niedriges S/N-Verhältnis, unabhängig von den Eigenschaften des Qualitätsfaktors. Die Steigung des S/N-Verhältnis zeigt, wie dominant dieser Prozessparameter gegenüber dem Qualitätsfaktor zwischen verschiedenen Stufen ist. Wenn die Steigung relativ flach ist, bedeutet dies, dass dieser Maschineneinstellungsparameter weniger Einfluss auf den Qualitätsfaktor hat [KFL+15, URL21].

Abbildung 5.3 zeigt das S/N-Verhältnis der entsprechenden variierten Prozessparameter. Im Vergleich zur Werkzeugtemperatur (B), dem maximalen Nachdruck (C) und der Nachdruckzeit haben die Massetemperatur (A) und die Restkühlzeit (E) einen relativ großen Einfluss auf die volumetrische Schwindung. Die optimale ( $\alpha_1$ ) und schlechteste Stufe ( $\alpha_2$ ) jedes Prozessparameters ist in Tabelle 5.4 nach seinem S/N-Verhältnis zusammengefasst. Die mit der optimalen Prozesskombination  $\alpha_1$  simulierten Linsen werden bezüglich ihrer optischen Eigenschaften weiter simulativ bei Moldex3D überprüft. Messungen im Rahmen der

durchgeführten Materialcharakterisierung zeigten einen Einfluss der Herstellungsparameter während des Spritzgießprozesses auf die Brechungsindexverteilung innerhalb der Linse. Deutlich wird dies ebenfalls bei Auswertung der Prozesssimulationen am Beispiel des Nachdrucks. Wird wie in Abbildung 5.4 die optimale Parameterkombination  $\alpha_1$  mit 40 MPa Nachdruck verwendet, so sind deutliche Brechungsindexunterschiede von circa 0,013 innerhalb der Linse erkennbar. Der vorhandene radiale Brechungsindexgradient führt optisch zu einer unbeabsichtigten Defokussierung der Laserstrahlung.

Da die optischen Eigenschaften der Linse wie die Brechungsindexverteilung und die daraus resultierende Brennweite der Linse zu den wichtigsten Qualitätsmerkmale dieses Projekts gehören, wurden die Prozessparameter und die entsprechende Prozessfenster erneut adaptiert, um die Brechungsindexunterschiede innerhalb der Linse zu reduzieren. Wie in Tabelle 5.4 dargestellt, wurde in dem Versuchsplan  $\beta$  die Massetemperatur und die Restkühlzeit weiter variiert, da diese Parameter im Versuchsplan  $\alpha$  einen signifikanten Einfluss auf die volumetrische Schwindung als andere Prozessparameter zeigen. Der maximale Nachdruck, der laut *Li et al.* einen wesentlichen Einfluss auf der Dichtverteilung bzw. Brechungsindexverteilung hat, wurde von 50 MPa bis 100 MPa in der Versuchsplan  $\beta$  variiert [LRY13]. Der Qualitätsfaktor bleibt die volumetrische Schwindung.

Prozessparameter	Einheit	Kennzeichen	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Massetemperatur	°C	A	230	240	250
Max. Nachdruck	MPa	C	50	75	100
Restkühlzeit [s]	s	E	200	250	300

Tabelle 5.3: Ausgewählte Prozessparameter und ihre entsprechende Prozessfenster (Versuchsplan  $\beta$ )

Die entsprechenden Ergebnisse für den Versuchsplan  $\beta$  sind in Abbildung 5.5 dargestellt, und die neuen optimalen ( $\beta_1$ ) und schlechtesten Parameter ( $\beta_2$ ), die auf diesem Ergebnis basieren, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Versuchspunkt	Einheit	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\beta 1$	$\beta 2$
Linse		Optimale Parameterkombination	Schlechteste Parameterkombination	Neue optimale Parameterkombination	Neue schlechteste Parameterkombination
Einspritzvolumenstrom	cm <sup>3</sup> /s	35,4	35,4	35,4	35,4
Max. Nachdruck	MPa	40	10	100	50
Werkzeugtemperatur	°C	50	70	50	50
Restkühlzeit	s	230	170	300	300
Massetemperatur	°C	220	260	250	230
Nachdruckzeit	s	26	19	70	70

Tabelle 5.4: Optimale und schlechteste Parameterkombinationen

Bei der neuen optimalen Prozesskombination mit einem höheren Nachdruck von 100 MPa verschwinden die Brechungsindexunterschiede nahezu komplett (Abbildung 5.6). Die Dichteverteilung, aus der der Brechungsindex abgeleitet werden kann (Gleichung 2), ist ebenfalls homogener. Der Zusammenhang zwischen Brechungsindex  $n$  und der Dichteverteilung  $\rho$  ist in Gleichung 2 dargestellt und lässt sich aus der Lorentz-Lorenz Gleichung

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = a \cdot \rho \quad (\text{Gl. 2})$$

ableiten.  $a$  ist dabei eine materialabhängige Konstante.

Im weiteren Projektverlauf werden daher alle optisch untersuchten Linsen mit der neuen optimalen Prozesskombination  $\beta 1$  hergestellt. Die Charakterisierung der Materialparameter findet ebenfalls bei der von  $\beta 1$  hergestellten Linsen statt.

### 5.2.2.2 Iterative Kompensationsmethode

Nach der thermo-optischen Optimierung wird die festgelegte Linsengeometrie im thermisch unbelasteten Zustand zur Anpassung der Formeinsatzgeometrie mit Hilfe der digitalen Prozessauslegung an das IKV weitergegeben. Hier wird die Linsengeometrie im thermisch unbelasteten Zustand, die auch Zielgeometrie in der digitalen Prozessauslegung genannt wird, zunächst als Formeinsatzgeometrie in der Spritzgießsimulationssoftware importiert und ihre Verformungen simuliert. Die simulierte Formteilgeometrie wird mit der Zielgeometrie unter Berücksichtigung von Schwindung und Verzug verglichen, um die lokale Abweichung im optisch bedeutsamen Bereich, d. h. dem innerern Bereich der Linse mit einem Durchmesser kleiner 15 mm, zu ermitteln. Hierzu wird der mittlere euklidische Abstand  $D$  (Gl. 3) berechnet,

der aus den Scheitelpunktkoordinaten der Linsengeometrien aus einer STL-Datei berechnet werden kann.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sqrt{(x_{\text{target},i} - x_{\text{deform},i})^2 + (y_{\text{target},i} - y_{\text{deform},i})^2 + (z_{\text{target},i} - z)^2} \quad (\text{Gl. 3})$$

Anschließend wird im Rahmen einer Kompensationsmethode das Werkzeug so ausgelegt, dass die während des Spritzgießprozesses auftretende Schwindung kompensiert wird: Nach der Prozesssimulation wird die Differenz der entsprechenden Scheitelpunkte zwischen der Formeinsatzgeometrie und der entsprechenden Formteilgeometrie erneut berechnet und dann wiederum zu den entsprechenden Scheitelpunkten der Zielgeometrie addiert, um die Formeinsatzgeometrie zu kompensieren (Gl. 4 und 5). Die Bezeichnung  $m$  stellt die Anzahl der Iterationen dar. Wenn  $m$  1 ist, sollte die Zielgeometrie als Formeinsatzgeometrie in die Prozesssimulationssoftware importiert werden. Wenn  $m$  größer als 1 ist, sollte die neu erstellte kompensierte Geometrie als Formeinsatzgeometrie in der Prozesssimulationssoftware importiert werden.

$$(x_i, y_i, z_i)_{\text{compensation},m+1} = (x_i, y_i, z_i)_{\text{target}} * 2 - (x_i, y_i, z_i)_{\text{deform},m} \quad (m = 1) \quad (\text{Gl. 4})$$

$$(x_i, y_i, z_i)_{\text{compensation},m+1} = (x_i, y_i, z_i)_{\text{target}} + (x_i, y_i, z_i)_{\text{compensation},m} - (x_i, y_i, z_i)_{\text{deform},m} \quad (m > 1) \quad (\text{Gl.5})$$

Anschließend wird der oben beschriebene Vorgang mit der neuen kompensierten Formeinsatzgeometrie erneut durchgeführt. Sobald eines der folgenden Kriterien erfüllt ist, ist der Optimierungsvorgang der digitalen Prozessauslegung abgeschlossen.

1. Der D-Wert ist kleiner als die Größenordnung von  $1 \mu\text{m}$ . Es hat sich auch erwiesen, dass mit dieser Größenordnung eine gute Übereinstimmung der gewünschten Brennweite erreicht wird [HLS+21].
2. Maximal werden 10 Optimierungssiterationen durchgeführt. Falls alle D-Werte aller 10 Iterationen größer als  $1 \mu\text{m}$  sind, wird die Optimierung abgebrochen und die Iteration mit dem niedrigsten D-Wert als optimale Lösung verwendet.

Diese Formeinsatzgeometrie wird als optimierte Formeinsatzgeometrie dem Werkzeugbauer im weiteren Verlauf zur Verfügung gestellt.

### 5.2.3 Simulative Validierung

Während der simulativen Validierung der Auslegungsroutine fällt auf, dass bei der Approximation der Gesamtgeometrie der gekrümmte Anteil der Linsenoberflächen zunächst unzureichend beschrieben wird. Selbst bei der exakten Ausgangsgeometrie ohne Schwindung wird bei der optischen Auswertung eine Abweichung von der zu erwartenden Brennweite

festgestellt. Dies liegt an einer unzureichenden Approximation der transferierten Punktwolke. Approximiert wurden zeitgleich der gekrümmte Anteil der Linse im Zentrum als auch der plane Linsenrand. Daher wurde beschlossen, die Approximation auf die optisch relevanten Bereiche zu beschränken und somit die Güte der Oberflächenanpassung zu erhöhen. Hierzu zählt der Bereich der Linse innerhalb eines Durchmessers von 15 mm. Alle äußeren Bereiche, insbesondere der plane Linsenrand befinden sich außerhalb des dreifachen Laserstrahldurchmessers nach  $1/e^2$ -Methode und können daher aus optischer Sicht in guter Näherung vernachlässigt werden. Nun ist eine korrekte Bestimmung der Linsenbrennweite möglich. Im Folgenden wird daher ausschließlich der Bereich innerhalb des dreifachen Strahldurchmessers approximiert.

Außerdem wird die entwickelte Auslegungsroutine für eine Sensitivitätsanalyse eingesetzt. Die Versuchs- und Materialparameter werden um jeweils fünf Prozent vergrößert bzw. verkleinert. Ausgangspunkt für die Sensitivitätsanalyse ist bereits eine für einen anderen Betriebszustand optimierte Asphäre [BBSL15, Bon19]. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss möglicher Abweichungen der realen Versuchs- und Materialparameter von den der Simulation zu Grunde liegenden Werten untersucht werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden bereits bei der teilweise zeitgleich stattfindenden Materialcharakterisierung berücksichtigt. Hierdurch kann insbesondere die erforderliche Präzision der zu verwendenden Messmittel abgeschätzt werden. Parameter, welche sich als unkritisch für die Auslegung erweisen, müssen nicht eigenständig gemessen werden, sondern es kann auf einschlägige Literaturwerte zurückgegriffen werden. Für Details sei auf Kapitel 4 verwiesen.

Die Ergebnisse der Prozesssimulation wie die Schwindung und der Verzug der Linse werden in das Optikdesign zurückgespiegelt. Die Sensitivität der optischen Simulationen auf beispielsweise Formabweichungen aufgrund von Schwindung wird analysiert, indem die prozesstechnisch simulierte Geometrie erneut bezüglich ihrer optischen Eigenschaften simulativ untersucht wird. Die aus der Prozessoptimierung erhaltene Linse weist lediglich eine geringe gemittelte Abweichung von der Sollgeometrie aus von  $0,325 \mu\text{m}$ . Die Brennweite der Linse unterscheidet sich geringfügig zwischen längs in Angussrichtung (303,7 mm) und quer dazu (303,8 mm). Die maximale Abweichung von der Sollbrennweite von 304 mm beträgt somit lediglich 0,2 %. Ohne Kompensation erhielte man eine mittlere Brennweite von circa 302,5 mm. Zunächst wurde in den Spritzgießsimulationen eine Auflösung größer als 0,2 mm gewählt. Optische Simulationen bereits ohne Verzug zeigen hier deutliche Abweichungen beispielsweise in der Brennweite der simulierten Linse. Bei einer Auflösung von 0,2 mm wurde stattdessen keine Abweichung mehr zu der tatsächlichen Brennweite festgestellt. Die gewählte Auflösung ist daher für die gegebene Linsengeometrie ausreichend. Eine noch höhere

Auflösung würde hauptsächlich zu erheblich mehr Rechenaufwand und somit ansteigenden Simulationsdauern bei der Durchführung detaillierter Versuchspläne nach *Taguchi* führen.

#### 5.2.4 Praktische Validierung

Um die gekoppelte thermo-optische Auslegung zu überprüfen, werden die Ergebnisse der Prozesssimulationen in praktischen Versuchen validiert. Zu diesem Zweck wurden am IKV Demonstratorlinsen mit dem vorhandenen Linsenwerkzeug (Abbildung 4.1) hergestellt und untersucht. Die praktischen Versuche wurden auf einer vollelektrischen Spritzgießmaschine vom Typ e-motion 160/440 der ENGEL AUSTRIA GmbH, Schwertberg, Österreich, durchgeführt. Als Kühlsystem kommt das Temperiergerät integrat 40 der gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH, Meinerzhagen, Deutschland, zum Einsatz. Für den Versuchsaufbau werden alle in Tabelle 5.4 zusammengefassten Prozesskombinationen verwendet, die auch in der Prozesssimulation untersucht wurden. In jedem Fall wurden zunächst 10 Prozesszyklen durchgeführt, um eine thermische Stabilität des Prozesses zu erreichen, und dann wurden 10 Probekörper für die Messungen entnommen. Die Oberfläche der Kunststofflinsen wird mit einem chromatischen Weißlichtsensor auf einem Zeiss O-Inspect-442 der Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH, Oberkochen, Deutschland, gemessen. Die Messgenauigkeit des O-Inspect beträgt  $1,6 \mu\text{m} + x/250$ , wobei  $x$  den Messabstand in mm angibt. Hier wurde der Messabstand auf 0,13 mm eingestellt, was ebenfalls eine Messgenauigkeit von  $1,652 \mu\text{m}$  bedeutet. Dazu werden zwei Messungen an den asphärischen und ebenen Flächen durchgeführt: eine in Strömungsrichtung (Längsrichtung) und eine senkrecht zur Strömungsrichtung (Querrichtung) (Abbildung 5.7).

Die mittlere absolute Differenz (MAD) zwischen den Vermessungsergebnissen und Simulationsergebnissen wurde zur Validierung der Simulationsergebnisse ermittelt. Die MAD-Werte für alle Prozesskombinationen in Tabelle 5.4 für asphärische Oberflächen sowie für planare Oberflächen in allen Richtungen sind in Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 zusammengefasst. Für die asphärischen Oberflächen sind die Ergebnisse beider optimalen Prozesskombinationen ( $\alpha 1$  und  $\beta 1$ ) relativ stabil, und die Unterschiede in Fließrichtung und Querrichtung sind nicht signifikant, was für die optischen Eigenschaften der Linse von Vorteil ist. Andererseits weisen die beiden schlechtesten Prozesskombinationen ( $\alpha 2$  und  $\beta 2$ ) relativ große Unterschiede in den verschiedenen Richtungen auf, was auch darauf hinweist, dass die simulierten und tatsächlichen Ergebnisse dieser beiden Prozesskombinationen stärker voneinander abweichen. Darüber hinaus zeigt sich, dass im Vergleich zur der optimalen Prozesskombination  $\alpha 1$  aus Versuchsplan  $\alpha$ , die MAD der neuen optimalen Prozesskombination  $\beta 1$  aus Versuchsplan  $\beta$  kleiner und stabiler in Längs- und Querrichtung ist. Das bedeutet, dass die Simulationsergebnisse von  $\beta 1$  eher der Realität entsprechen. Bei den

planaren Oberflächen sind die Ergebnisse ähnlich wie bei den asphärischen Oberflächen. Die MAD der neuen optimalen Prozesskombination ( $\beta_1$ ) ist stabiler und kleiner als bei den anderen Prozesskombinationen.

Die durch das IKV hergestellten Linsen werden bezüglich ihrer optischen Eigenschaften experimentell am TOS überprüft. Die entsprechende Brechungsindexverteilung der mit  $\alpha_1$  und  $\beta_1$  hergestellte Linsen sind in Abbildung 5.10 zusammengefasst. Der Brechungsindexunterschied der von  $\beta_1$  hergestellte Linse (circa. 0,007) ist kleiner als die von  $\alpha_1$  hergestellte Linse (circa. 0,01), was die Simulationsergebnisse in Abbildung 5.4 und Abbildung 5.6 ebenfalls in gewisser Weise bestätigt.

Ausgehend von den oben genannten praktischen Validierungsergebnissen wurde die neue optimale Prozesskombination  $\beta_1$  für den weiteren Optimierungsprozess ausgewählt.

### 5.3 Optimierung der Linsengeometrie

In diesem Arbeitspaket wird die in Kapitel 5.2 entwickelte Auslegungsroutine zur Optimierung der Linsengeometrie verwendet. Freiheitsgrade während der Optimierung sind der Linsenradius, die konische Konstante und die Asphärenterme der gekrümmten Linsenseite.

Die Ergebnisse der thermo-optischen Optimierung des Demonstrators sind in Tabelle 5.5 dargestellt. Die Linsengeometrien sind vergleichend in Abbildung 5.12 dargestellt.

Iteration	0	1	2	3
$R_1$ [mm]	150,00	4,30	4,29	1,24
$\alpha_2$ [ $\text{mm}^{-2}$ ]	+1,45E-5	-0,11	-0,11	-0,40
$\alpha_4$ [ $\text{mm}^{-4}$ ]	-2,17E-8	-1,57E-3	-1,57E-3	+3,94E-3
$\alpha_6$ [ $\text{mm}^{-6}$ ]	-1,50E-13	-3,30E-5	-3,30E-5	-6,00E-5
$\alpha_8$ [ $\text{mm}^{-8}$ ]	-5,62E-17	+4,61E-7	+4,61E-7	+6,28E-7
$\kappa$ [-]	-1,51E-9	-2,36	-2,36	-1,07
BFL [mm]	Na	316,2	302,9	304,7

Tabelle 5.5: Ergebnisse der thermo-optischen Optimierung

Für die unkompenzierte Geometrie (Iteration 0) sind die Brechkraft der thermischen Linse und die Brechkraft der Linse aufgrund ihrer Geometrie ungefähr gleich groß. Daher lässt sich kein eindeutiger Fokus bestimmen. Die strahlenoptisch simulierte geringste Strahlgröße wird in einem Abstand von 493 mm hinter der Linse beobachtet und diese beträgt 1780,3  $\mu\text{m}$  (Abbildung 5.11). Die Strahlgröße ist somit deutlich größer als der Airy-Radius, welcher in Abbildung 5.11 als schwarzer Kreis dargestellt ist und ein Maß für das physikalische Beugungslimit darstellt. Mit jeder Iteration wird die Abweichung der rückseitigen Brennweite

von der zu erzielenden Brennweite von 304 mm geringer. Nach der Optimierung beträgt die Strahlgröße in der Fokusebene 21,3  $\mu\text{m}$ .

Die Höhenprofile der ursprünglichen Linse (Iteration 0) und der optimierten Linsengeometrie nach Iteration 3 sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Krümmung der kompensierten Geometrie ist stärker als die der unkompensierten Geometrie, da die kompensierte Geometrie die hauptsächlich negative Brechkraft der thermischen Effekten kompensieren muss. Außerdem ist die kompensierte Geometrie mit thermischer Deformation dargestellt. Bei der gegebenen Geometrie wird die maximale thermische Deformation in der Mitte der Linse mit 18  $\mu\text{m}$  beobachtet. Aus fertigungstechnischen Gründen wurde als Randbedingung bei der Optimierung festgelegt, dass die Randdicke der Linse mindestens 6 mm betragen muss. Da die thermischen Effekte mit der Dicke der Linse skalieren, soll auch die maximale Dicke der Linse während der Optimierung unverändert bleiben. Um eine stärkere Krümmung der kompensierten Geometrie bei gleichbleibender Dicke realisieren zu können, wurde daher der Durchmesser der gekrümmten asphärischen Fläche von 45 mm auf 15 mm reduziert. Beide Geometrien sind zum Vergleich in Abbildung 5.12 gegenübergestellt.

Um die durch Raytracing erzielten Optimierungsergebnisse zu verifizieren, werden wellenoptische Simulationen der optimierten Geometrie durchgeführt (Abbildung 5.14). Die erzielte simulierte Strahlkaustik verfügt über einen  $M^2$ -Wert von 1,77, was auf lediglich geringe thermische Aberrationen hindeutet. Im Gegensatz zu den Ergebnissen mittels Raytracing ist eine kleine Fokusverschiebung von 12,8 mm zu erkennen, die auf wellenoptische Effekte zurückzuführen sein könnte, die beim Raytracing vernachlässigt werden.

Da beispielsweise die simulierte Schwindung lokal variiert, auch je nach Flussrichtung der Schmelze, ist eine lokale Anpassung der Geometrie erforderlich. Eine reine Beschreibung mit den in der optischen Optimierung definierten Freiheitsgraden ist daher nicht mehr ausreichend. Aus der radial rotationssymmetrischen Optik wird im unbelasteten Zustand zunächst eine Freiformoptik.

Sobald die Linsengeometrie im unbelasteten Zustand nach drei thermo-optischen Optimierungsiterationen bestimmt wurde, wurde die Werkzeugkavitätsgeometrie auf der Grundlage dieser Geometrie gemäß der oben genannten digitalen Prozessauslegung (Kap.5.2.2) festgelegt. Die entsprechenden Optimierungsergebnisse sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Unabhängig davon, ob es sich um eine asphärische oder eine planare Oberfläche handelt, weisen ihre D-Werte im Optimierungsprozess denselben Veränderungstrend auf. Wenn die Werkzeugkavitätsgeometrie nicht kompensiert wurde, was die Linsengeometrie im unbelasteten Zustand direkt als Werkzeugkavitätsgeometrie verwendete, betragen die D-Werte der asphärischen und der planaren Oberfläche 40  $\mu\text{m}$  bzw. 38  $\mu\text{m}$ , und ihre Abweichung betrug

13  $\mu\text{m}$  bzw. 14  $\mu\text{m}$ . Nach der ersten Kompensation wurden die D-Werte beider Oberflächen und ihre Abweichungen deutlich verringert, und an die Soll-Geometrie signifikant angenähert. Auf dieser Grundlage wurde eine zweite Kompensation durchgeführt. Beide D-Werte sanken weiter, wie bei der iterativen Kompensationsmethode zu erwarten war. Nach drei Kompensationen konvergierten die D-Werte der beiden Oberflächen bei 0,34  $\mu\text{m}$  und 0,31  $\mu\text{m}$ , die entsprechenden Abweichungen betragen 0,11  $\mu\text{m}$  und 0,12  $\mu\text{m}$ . Im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Kompensation der Werkzeugkavitätsgeometrie wurde die volumetrische Schwindung mit drei iterativen Kompensationen stark optimiert. Nach der vierten Kompensation stieg der D-Wert der beiden Oberflächen wieder leicht an, was möglicherweise darauf zurückzuführen sein könnte, dass die Schrittweite der optimalen Prozesskombination nicht gering genug gewählt wurde und somit das globale Minimum verfehlt wurde. Die D-Werte der dritten Kompensation erfüllen jedoch bereits die zuvor festgelegten Kriterien (D-Werte  $< 1 \mu\text{m}$ ), es wurde daher die entsprechende Werkzeugkavitätsgeometrie als optimierte Werkzeugkavitätsgeometrie ausgewählt, die in einem nächsten Schritt vom Werkzeughersteller gefertigt werden sollte. Zuvor müssen die Optimierungsergebnisse noch einmal überprüft werden: Die durch die dritte Kompensation abgemusterte Linsengeometrie, die der Geometrie der Linse im unbelasteten Zustand sehr ähnlich sein sollte, wurde für die weitere thermo-optische Validierung exportiert. Die Entscheidung wurde getroffen, um die beiden Geometrien im unbelasteten Zustand zu vergleichen, denn wenn die optischen Ergebnisse im unbelasteten Zustand gut übereinstimmen, werden sie dies auch während der Laserbestrahlung tun. Der Grund hierfür ist, dass die Linsenoberflächen bis auf geringfügige Fertigungsabweichungen eine asphärische Form aufweisen. Die Oberfläche ist damit glatt, ohne Sprünge und weist keine Welligkeit auf. Ähnliches gilt somit auch für die Linse im thermisch belasteten Zustand. Ein Vergleich der optischen Ergebnisse der kompensierten Geometrie nach dem simulierten Spritzgießprozess mit der ursprünglichen Geometrie der thermisch optimierten Linse zeigt, dass sich die hintere Brennweite nur geringfügig von 183,644 mm auf 183,635 mm ändert. Dies beweist erneut, dass die Kompensation erfolgreich war.

Nach der thermo-optischen Validierung wurde das Werkzeug entsprechend der optimierten Werkzeugkavitätsgeometrie konstruiert und bei der Firma Innolite GmbH in Aachen, Deutschland gefertigt.

## 6 REALE PRODUKTION

Im Rahmen der realen Produktion werden die simulativen Ergebnisse experimentell validiert. Hierzu wurden die extern gefertigten Formeinsätze in ein am IKV bestehendes Werkzeug eingesetzt und Prozessuntersuchungen zur Linsenherstellung durchgeführt. Anschließend wurden die Abformergebnisse und die optischen Eigenschaften der Linsen analysiert.

### 6.1 Prozessuntersuchungen

Wie in Kapitel 4 nachgewiesen, wird die Dichteverteilung und folglich auch die Brechungsindexverteilung im Bauteil durch die Prozessparameter beeinflusst. Daher wurden in diesem Arbeitspaket ausschließlich Linsen untersucht, die mit denselben Parametern hergestellt wurden, wie die Probekörper zur Bestimmung der optischen Materialeigenschaften in Kapitel 4.

Zunächst wurde der Prozessraum aus der ersten simulativen DoE (Tabelle 5.2) untersucht. Dabei wurde kein vollfaktorieller Versuchsplan, wie zuvor in der Simulation, abgefahren, sondern einzelne Versuchspunkte (Tabelle 6.1), die eine Validierung der simulativen Ergebnisse ermöglichen.

VP	Einheit	1.1	1.2	1.3	2.1	3.1	3.2
Einspritzvolumenstrom	cm <sup>3</sup> /s	35,4	35,4	15	35,4	35,4	35,4
Nachdruck	MPa	40	40	40	25	10	10
Werkzeugtemperatur	°C	50	50	50	60	70	70
Restkühlzeit	s	230	230	230	200	170	170
Massetemperatur	°C	220	220	220	240	260	260
Nachdruckzeit	s	26	60	60	22,5	19	44

Tabelle 6.1: Parameterauswahl zur praktischen Validierung der Simulation

Zum thermischen Einschwingen des Werkzeugs wurden zu Beginn der Versuche wurden mindestens 10 Spritzgießzyklen und zwischen den Änderungen der Einstellungen nach Erreichen der neu eingestellten Prozessgröße mindestens 5 weitere Zyklen zum Einschwingen gefahren und die hergestellten Bauteile verworfen. Anschließend wurden für jeden Versuchspunkt 33 Linsen hergestellt, von denen 3 Linsen zur Oberflächenmessung und 30 Linsen zur optischen Eigenschaftsmessung verwendet wurden.

Die Oberflächen der Linsen wurden mittels chromatischer Aberration mithilfe des Microgliders MGL1015 der Firma Fries Research Technology GmbH, Bergisch Gladbach, Deutschland, vermessen und die optischen Eigenschaften untersucht. Ebenso wurde die simulative Prozessuntersuchung mittels DoE im Versuchsplan  $\beta$  (siehe Kap. 5.2.2.1.2) wiederholt und

darauf aufbauend wurde ein Versuchsplan zur genaueren Betrachtung des berechneten Prozessoptimums gewählt und untersucht (Tabelle 6.2).

Faktorstufe	-1	0	+1
Massetemperatur [°C]	230	240	250
Nachdruck [bar]	500	750	1000
Restkühlzeit [s]	200	250	300

Tabelle 6.2: Prozesseinstellungen zur Betrachtung des Prozessoptimums

Es wurde in einem vollfaktoriellen Versuchsplan wie zuvor 33 Linsen pro Versuchspunkt hergestellt und zwischen den Änderungen 5 weitere Linsen verworfen. Im Anschluss wurden diesmal eine Probe von 10 Linsen mittels chromatischer Aberration am IKV vermessen.

## 6.2 Validierung der digitalen Auslegung und Produktion anhand des Demonstrators

Die Linsen werden bezüglich ihrer Strahlkaustik in einem industrienahen Laboraufbau getestet. Ein ähnlicher Aufbau wäre in einer Beschriftieranlage denkbar, wobei im Anwendungsfall in der Fokusebene das zu beschriftende Werkstück mit einer elektrischen Verfahreinheit positioniert wird.

Die an das TOS übergebenen Linsen werden dort bezüglich ihrer Strahlformigenschaften charakterisiert. Hierzu werden mithilfe einer CCD-Kamera Strahlprofilmessungen in verschiedenen Ebenen durchgeführt. Für jede Ebene wird der Strahldurchmesser gemäß DIN11146-1 ermittelt [NN21]. Da diese Methode empfindlich auf Rauschen weit außerhalb des Strahlzentrums reagiert, müssen die gemessenen Intensitätswerte um das Rauschen korrigiert werden. Hierzu wird zunächst eine Intensitätsmessung mit der Kamera ohne Laserstrahl durchgeführt. Mithilfe der dazugehörigen Kamerasoftware wird der vorhandene Untergrund aus Umgebungslicht bereinigt. Da die gemessenen Intensitätswerte danach immer noch in geringem Maße von Null abweichen, wird nun der maximal gemessene Wert ermittelt und alle Intensitäten, welche geringer sind, während der weiteren Auswertung der Messungen mit Laserstrahl ebenfalls als Rauschen gewertet und daher bei der Datenauswertung auf null gesetzt. Ein parabolisches Strahlprofil wird an die Messwerte angepasst, um die Position der Strahltaile und damit die rückseitige Brennweite der Linse zu bestimmen [EDE04].

	Experiment		Simulation	
	Thermisch belastet	Thermisch unbelastet	Thermisch belastet	Thermisch unbelastet
BFL [mm]	221 ± 6	131 ± 6	318	138

Tabelle 6.3: gemessene rückseitige Brennweiten (BFL) aus praktischen und simulativen Untersuchungen

Die gemessenen rückseitigen Brennweiten werden mit den wellenoptischen Simulationen verglichen (vgl. Tabelle 6.3). Im thermisch unbelasteten Zustand wird ein Unterschied in der

hinteren Brennweite von etwa 7 mm beobachtet, der etwas größer ist als die mittlere Messunsicherheit. Im thermisch belasteten Zustand ist die gemessene BFL mit 221 mm deutlich kleiner als simuliert. Ein Beispiel für eine Kaustikmessung im thermisch belasteten Zustand ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Die abgebildete Kaustik zeigt Abweichungen von der Strahlkaustik eines ideal fokussierten Gaußstrahls. Darüber hinaus zeigt der Kaustikfit, dass der ermittelte  $M^2$ -Wert und der Strahldurchmesser größer sind als in den zugrundeliegenden Simulationen. Da im unbelasteten Zustand eine gute Übereinstimmung der rückseitigen Brennweite der Linse mit den Simulationen erreicht wurde, ergibt sich der Ursprung der Differenz aus den zusätzlich auftretenden thermischen Effekten. Dies belegen auch Vermessungsergebnisse der Linsengeometrie mittels Weißlichtinterferometer (Abbildung 6.2).

Dargestellt ist ein Linsenschnitt mit der Durchbiegung der Linse gegenüber der längs- bzw. quer-Richtung der Linse. Außerdem ist die beabsichtigte Geometrie als sogenannte Originalgeometrie dargestellt. Ein Vergleich der gemessenen Werte mit der Soll-Geometrie zeigt eine hohe Übereinstimmung der beiden Geometrien. Die mittlere gemessene Abweichung beträgt in Querrichtung  $1,27 \mu\text{m}$  und in Längsrichtung  $1,11 \mu\text{m}$ . Simuliert wurde lediglich eine Abweichung von  $0,23 \mu\text{m}$  bzw.  $0,24 \mu\text{m}$ .

	<b>Thermisch unbelastete BFL [mm]</b>	<b>Abweichung von BFL der Originalgeometrie [mm]</b>
Originalgeometrie	183,6	0
Gemessen kompensiert	180,8	-2,8
Simuliert kompensiert	183,9	+0,3
Simuliert unkompensiert	185,4	+1,8

*Tabelle 6.4: Validierung der Kompensationsergebnisse anhand der rückseitigen Linsbrennweite (BFL)*

Die vermessenen Linsengeometrien werden in optischen Simulationen hinsichtlich ihrer rückseitigen Brennweite untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.4. zusammengefasst. Die gemessene Geometrie weist im thermisch unbelasteten Zustand eine um 2,8 mm geringere rückseitige Brennweite auf als die Originalgeometrie. Beim Vergleich der Brennweiten der simulierten kompensierten Geometrie aus Moldex3D mit der simulierten, unkompensierten Geometrie aus Moldex3D wird deutlich, dass auf simulativer Ebene mit Kompensation die Abweichung der Brennweite von der Originalgeometrie deutlich reduziert werden konnte.

Eine mögliche Fehlerquelle könnten abweichende Materialdaten zwischen den in den Simulationen angenommenen Werten und den tatsächlichen Materialdaten im Experiment sein. Folglich wäre die Linse nicht für das tatsächlich verwendete Material kompensiert. Beispielsweise könnte eine zu groß angenommene Materialabsorption oder ein zu groß angenommener thermo-optischer Koeffizient die beobachteten Ergebnisse erklären. Um die

vorhandenen Abweichungen zu analysieren, wurden Oberflächentemperaturmessungen mit einer Wärmebildkamera durchgeführt und diese mit den simulierten Oberflächentemperaturen aus Ansys verglichen (Abbildung 6.3). Da die gemessene Temperaturverteilung und die simulierte Temperaturverteilung im Wesentlichen übereinstimmen, wurde der Absorptionskoeffizient in den Simulationen während der Auslegung der Linsengeometrie korrekt angenommen. Daher werden neue Simulationen mit variierendem thermo-optischen Koeffizienten durchgeführt. Mit einem modifizierten thermo-optischen Koeffizienten von  $dn/dT = 112 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  konnten die experimentellen Ergebnisse rekonstruiert werden. Der ursprünglich verwendete thermo-optische Koeffizient wurde in eigenen Messungen mit einem Abbe-Refraktometer gemessen (Kapitel 4). Messprinzipbedingt ist mittels Abbe-Refraktometer eine Brechungsindexmessung und damit auch eine Messung des thermo-optischen Koeffizienten nur an der Probenoberfläche möglich. Folglich würden unterschiedliche Werte des thermo-optischen Koeffizienten in der Linsenmitte und den beobachteten Unterschied zwischen Experimenten und Simulationen erklären.

### 6.3 Iterative Optimierung der Linsengeometrie

Da die experimentellen Ergebnisse aus Kapitel 6.2 von den simulierten Ergebnissen abweichen und die Abweichung auf einen unterschiedlichen thermo-optischen Koeffizienten zwischen den Simulationen und den Ergebnissen hindeutet, findet eine erneute Optimierung mit einem nun angepassten thermo-optischen Koeffizienten statt. Anstatt wie bisher wird nun ein thermo-optischer Koeffizient von  $\frac{dn}{dT} = 112,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  angenommen (s.u.). Die Optimierungsergebnisse der durchgeführten Iteration sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Iteration	0	1	2	3
$R_1$ [mm]	150,00	4,35	2,35	2,30
$\alpha_2$ [ $\text{mm}^{-2}$ ]	+1,45E-5	-0,11	-0,21	-0,21
$\alpha_4$ [ $\text{mm}^{-4}$ ]	-2,17E-8	+1,66E-3	+2,43E-3	+2,52E-3
$\alpha_6$ [ $\text{mm}^{-6}$ ]	-1,50E-13	-3,67E-5	-4,34E-5	-4,57E-5
$\alpha_8$ [ $\text{mm}^{-8}$ ]	-5,62E-17	+5,04E-7	+5,30E-7	+5,51E-7
$\kappa$ [-]	-1,51E-9	-2,38	+1,29	+1,29
BFL* [mm]	na	198,8	304,2	303,9

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Optimierung der Linsengeometrie mit angepassten Materialparametern

Der Vergleich der Brennweite der erneut optimierten Linsengeometrie mit der Brennweite der ursprünglichen Optimierung im nicht belasteten Zustand, zeigt eine Zunahme der Brennweite zu nun 217 mm im Vergleich zu lediglich 138 mm. Die größere Brennweite im kalten Zustand

berücksichtigt die geringere thermische Defokussierung aufgrund des angepassten thermo-optischen Koeffizienten.

Die entsprechende Werkzeuggeometrie wurde anhand der digitalen Prozessauslegung erneut ermittelt und konstruiert sowie bei Innolite weiter angepasst. Anschließend wurden die Linsen mit der angepassten Werkzeugform unter ansonsten identischen Herstellbedingungen gefertigt und bezüglich ihrer Strahlkaustik erneut vermessen.

Die Vermessungsergebnisse sind in Tabelle 6.6. zusammengefasst und wurden analog zu Kapitel 6.2 bestimmt. Die rückseitige Brennweite der Linsen im warmen Zustand wurde zunächst zu 392 mm bestimmt und weicht somit erheblich von der zu erzielenden rückseitigen Brennweite von 304 mm ab. Die Ursache hierfür könnte ein von den Simulationen abweichender thermo-optischer Koeffizient sein. Ein im Experiment größerer thermo-optischer Koeffizient würde, wie beobachtet, zu einer größeren Brennweite im thermisch belasteten Zustand führen. Da die thermo-optischen Koeffizienten der Simulationen aus der Geometrie der ersten Optimierung ermittelt worden sind, die von der Geometrie der zweiten Optimierung abweicht, entstehen auch Unterschiede beispielsweise im Füllverhalten der Form und bei der Aushärtungsvorgang des Polymers, die wiederum eine messbare Auswirkung auf den thermo-optischen Koeffizienten haben könnten. Nachdem sich auch die Brennweiten im kalten Zustand von der ausgelegten Linsengeometrie unterscheiden, liegt nahe, dass die Linsenform ebenfalls geringfügig von der Soll-Geometrie abweicht. Eine Messung der gekrümmten Linsenoberseite mittels Weißlichtinterferometer (Modell NV6k-0135 der Firma ZygoLOT GmbH, Weiterstadt, Deutschland) im Vergleich mit der Form der zu erzielenden Linsenoberseite weist eine Höhendifferenz von circa 20  $\mu\text{m}$  aus (Abbildung 6.4). Außerdem werden unterschiedliche Krümmungen der Oberflächen beobachtet, was zu einer abweichenden Brennweite führt. Zur Bewertung der optischen Eigenschaften der gemessenen Höhenprofile wurden diese mithilfe von TOP-Simulation approximiert und anschließend in Zemax übertragen. Dort wird eine Brennweite von 186 mm ermittelt, welche somit bis auf ungefähr 2 % Abweichung mit der gemessenen Brennweite überein stimmt. Aufgrund der abweichenden Ergebnisse von der Sollgeometrie wurde entschieden ein weiteres Mal Linsen mit dem gleichen Werkzeug herzustellen (siehe Tabelle 6.6 (2. Linsenherstellung)). Die erneut hergestellten Linsen weisen im thermisch belasteten Fall eine rückseitige Brennweite von 423 mm auf. Die Differenz zur Soll-Brennweite ist somit im Vergleich zur ersten Linsenherstellung leicht angestiegen. Im thermisch unbelasteten Zustand wird eine rückseitige Brennweite von 196 mm gemessen, was im Bereich der Messfehlertoleranz liegt. Es konnte mithilfe der erneuten Herstellung der Linsen die bisherigen Messergebnisse im Wesentlichen bestätigt werden. Um die Ursache der

Formabweichung von der Soll-Geometrie zu untersuchen, wurde der Werkzeugeinsatz vermessen. Dabei zeigte sich, dass der Werkzeugbau bei der Überarbeitung der bestehenden Werkzeugeinsätze bezüglich der bestehenden Form und der davon minimal nötigen Nachbearbeitung vor großen Herausforderungen wie geometrische Überschneidungen gestellt wurde und somit die Soll-Geometrie in Querrichtung sehr gut hergestellt werden konnte. In Längsrichtung weisen die Messdaten jedoch eine Abweichung im äußeren Linsenbereich zwischen Soll- und Ist- Geometrie auf (Abbildung 6.5). Die Approximierung der Geometrie und Umwandlung des Dateiformats hatte, wie erwartet, zu keiner Änderung der Oberflächenform geführt. Somit führte die Optimierungsanpassungen in der thermo-mechanischen Auslegung und die Überarbeitung der bestehenden Formeinsätze nicht zu einer weiteren Verbesserung der optischen Leistungsfähigkeit der Linsen, was unter anderem an den sehr sensitiven optischen Materialeigenschaften, wie der Brennweite liegen kann. Abschließend konnte im Vergleich zur Linsengeometrie ohne abgeschlossener Kompensation die Abweichung von der Soll-Brennweite um 45% reduziert werden.

	1. Linsenherstellung		2. Linsenherstellung		Auslegung	
	Thermisch belastet	Thermisch unbelastet	Thermisch belastet	Thermisch unbelastet	Thermisch belastet	Thermisch unbelastet
BFL [mm]	392	189	423	196	304	217

*Tabelle 6.6: gemessene rückseitigen Brennweiten (BFL) der hergestellten Linsen nach der zweiten Iteration*

## 7 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

### 7.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

<b>Maßnahme:</b> <b>Projektbegleitender Ausschuss</b>	<b>Zeitraumen:</b> Quartale 1, 5, 8 der Projektlaufzeit
<p><i>Während der Projektlaufzeit haben vier Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses stattgefunden (06.12.2019 - Teilnehmer: 6, 29.09.2020 - Teilnehmer: 5, 23.09.2021 - Teilnehmer: 7, 10.02.2022 – Teilnehmer 8). Der Dialog mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses auch außerhalb der stattgefundenen Treffen hat entscheidend zum Fortgang und Erfolg des Projektes beigetragen. Darüber hinaus haben Mitglieder das Projekt durch Bereitstellung von Materialien und der Diskussion der Ergebnisse unterstützt, ein optimales Projektergebnis zu erzielen.</i></p>	
<b>Maßnahme:</b> <b>Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft</b>	<b>Zeitraumen:</b> Kontinuierlich während und nach der Projektlaufzeit
<p><i>Innerhalb des Projektzeitraumes und im Nachgang wurden die Ergebnisse auf mehreren Messen (Bauteile, Demonstratoren) präsentiert und im Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft diskutiert. Zu den Messen zählen das 30. und 31. Internationale Kolloquium Kunststofftechnik 2020 bzw. 2022 in Aachen sowie die Aachener Polymer Optics Days 2022. Hierbei konnten die Technologie und die erzielten Ergebnisse vielen Unternehmen vorgestellt werden.</i></p>	
<b>Maßnahme:</b> <b>Hinweise in der Fachpresse</b>	<b>Zeitraumen:</b> Kontinuierlich während der Laufzeit
<p><i>Neueste Erkenntnisse des Projektes sind durch Pressemitteilungen in Fachzeitschriften veröffentlicht worden (u.a.):</i></p> <p>HOPMANN, CH.; LOOSEN, P.; STOLLENWERK, J.; LIU, B.; GERADS, J.; HOFMANN, J.: Kunststofflinsen im Laser sind möglich, <i>Plastverarbeiter</i>, 05/2021</p>	
<b>Maßnahme:</b> <b>Vorträge und Posterpräsentationen</b>	<b>Zeitraumen:</b> Während der Laufzeit / nach Abschluss
<p><i>Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind auf nationalen und internationalen Fachtagungen und Konferenzen vorgestellt worden:</i></p>	

<p>HOLLY, C.; HOPMANN, CH.; STOLLENWERK, J.; HOFMANN, J.; GERADS, J; LIU, B.: Correction of temperature influences on plastic lenses for applications in laser material processing, LANE 22, September 2022</p> <p>HOPMANN, CH.; HOLLY, C.; STOLLENWERK, J.; GERADS, J; LIU, B.; HOFMANN, J.: Development of a coupled thermo optical process optimisation routine for plastic lenses in laser applications. Internationales Kolloquium Kunststofftechnik 2022, September 2022.</p>	
<p>Maßnahme:</p> <p><b>Forschungsbericht</b></p>	<p>Zeitraumen:</p> <p>1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens</p>
<p><i>Die Ergebnisse sind in Zwischenberichten sowie in dem vorliegenden Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben zusammengefasst. Dieser Forschungsbericht steht interessierten Unternehmen zur Verfügung, wodurch die erzielten Ergebnisse für die Öffentlichkeit zugänglich sind.</i></p>	
<p>Maßnahme:</p> <p><b>Beratung von Unternehmen</b></p>	<p>Zeitraumen:</p> <p>Während der Laufzeit / nach Abschluss</p>
<p><i>Während und nach der Projektlaufzeit des Forschungsvorhabens sind drei Unternehmen mit konkreten Fragestellungen zur Technologie auf das Forschungsinstitut zugegangen. Die erzielten Ergebnisse standen als Basis für eine Beratung und Diskussion zur Verfügung.</i></p>	
<p>Maßnahme:</p> <p><b>Durchführung von Testreihen am IKV</b></p>	<p>Zeitraumen:</p> <p>Nach Abschluss</p>
<p><i>Unternehmen, die auf Basis der Ergebnisse das neuentwickelte Verfahren für eigene Anwendungen evaluieren möchten, ohne die komplette Anlagentechnik oder Software zu beschaffen, haben die Möglichkeit, das am IKV und TOS vorhandene Equipment zur Durchführung von Testreihen und einer gekoppelten prozess- und thermo-optischen Auslegung für zu nutzen.</i></p>	
<p>Maßnahme:</p> <p><b>Akademische Lehre / Personaltransfer</b></p>	<p>Zeitraumen:</p> <p>Während der Laufzeit / nach Abschluss</p>
<p><i>Einige der Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurden, sind durch die Unterstützung von Studenten entstanden. So konnten mehrere wissenschaftliche Arbeiten durch Studenten angefertigt werden. Darüber hinaus sind die</i></p>	

*erzielten Ergebnisse in die Ausbildung junger Ingenieure eingeflossen, in dem die Ergebnisse Bestandteil der Lehrveranstaltung „Kunststoffverarbeitung III“ sind.*

Bachelorarbeit

WOLF, F.: Entwicklung einer digitalen Auslegung und Produktion für Lasersysteme anhand einer bestehenden Linsengeometrie

Masterarbeit

GAO, M.: Entwicklung eines Optimierungsansatzes für Linsengeometrie in Lasersystemen auf Basis einer bestehenden Linsengeometrie

Maßnahme:

**Dissertation**

Zeitraumen:

Nach Abschluss des Forschungsvorhabens

Zusätzlich besteht für den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsstelle die Möglichkeit zur Promotion auf dem beantragten Forschungsthema.

*Angestrebte Promotion des Herrn Jörg Hofmann*

## **8 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU**

Kleine und mittelständische Kunststoffverarbeiter können sich durch Anwendung der Forschungsergebnisse in den sich verschärfenden internationalen Märkten behaupten und durch die Gewährleistung einer hohen Qualität und geringere Anzahl von Nachbearbeitungsschritten Optiken aus Kunststoff das neue Anwendungsgebiete der Laseranwendungen erschließen. Die international starke Marktposition der deutschen Kunststoffindustrie kann durch den Einsatz der erarbeiteten Forschungsergebnisse gesichert und weiter ausgebaut werden. Durch die Nutzung der gekoppelten prozess- und thermo-optischen Auslegung wird es den Unternehmen in der Kunststoffverarbeitung und der Optikauslegung ermöglicht, neue Anwendungsgebiete effizient zu bedienen und auf diese Weise auch in Zukunft am Standort Deutschland wirtschaftlich produzieren zu können.

Neben den Kunststoffverarbeitern können kleine und mittelständische Werkzeugbauer die im abgeschlossenen Forschungsvorhaben erarbeiteten Ergebnisse unmittelbar nutzen. Einerseits wurden wichtige Erkenntnisse zur Formkavitätoptimierung erarbeitet. Auf diese Weise können mit weniger Nachbearbeitungsschritten optimale Kunststofflinsen für Laseranwendungen produziert werden. Andererseits können die Ergebnisse genutzt werden, um übergreifend den Werkzeugbau von spritzgegossenen Formteilen zu optimieren und kostengünstiger zu gestalten.

Durch die im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen aus dem Bereich der Rohstoffhersteller, Verarbeiter, Werkzeugbauer, optischen Auslegung und Prozesssimulation können die erarbeiteten Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf einfache Weise in die praktische Anwendung überführt werden.

## 9 ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

### 9.1 Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal

#### *Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal (Einzelansatz A)*

	2019 und 2020	2021	2022
IKV	13,5 PM	4 PM	1,5 PM
TOS	15 PM	9 PM	0 PM

*Tabelle 9.1: Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal*

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter waren erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, die Problemstellungen in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren und Studierende zu betreuen, die im Rahmen des Projekts wissenschaftliche Arbeiten durchführten. Darüber hinaus hat ein Techniker die Forschungsarbeiten bei der Installation und Bedienung der Anlagentechnik unterstützt.

#### *Einsatz von Geräten (Einzeleinsatz B)*

Im Vorhaben wurden folgende Geräte beschafft:

TOS: Interferenzfilter für 1070 nm der Firma Atago CO., LTD.

Der beschaffte Interferenzfilter wird für Brechungsindexmessungen mittels Abbe-Refraktometer eingesetzt. Mithilfe des Interferenzfilters wird aus einer breitbandigen Lichtquelle der spektrale Anteil rund um die Laserwellenlänge extrahiert und damit die Messproben untersucht.

Dieses Gerät war in der Form noch nicht am TOS vorhanden und war für eine erfolgreiche Bearbeitung des Projektes notwendig.

IKV: Optikformeinsatzpaar (Freiform-Freiform) von der Firma Innolite GmbH

Zur praktischen Validierung der Optimierungsmethodik wurden anhand der thermo-optischen Prozessauslegung passende optische Formeinsätze für ein am IKV bestehendes Werkzeug durch einen externen Werkzeugbauer im Dezember 2021 gefertigt. Damit konnten die simulativen Ergebnisse validiert und die Optimierungsgüte analysiert werden.

#### *Einsatz Leistungen Dritter (Einzelansatz C)*

Für dieses Vorhaben wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

## **9.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Wie aus den Kapiteln 4 - 6 hervorgeht, sind im Rahmen des Forschungsprojekts umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Die Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die geleistete Arbeit und der Einsatz der Ressourcen angemessen und notwendig waren. Notwendige Anpassungen in den Arbeitspaketen haben nicht zu einer Reduktion des Arbeitsumfangs geführt, sondern es wurden einzelne Maßnahmen durch geeignetere Maßnahmen ersetzt, weshalb der Umfang der Forschungsarbeiten sich nicht verändert hat.

## 10 FAZIT UND AUSBLICK

Das zentrale Ergebnis des Forschungsvorhabens ist, dass mit Hilfe der entwickelten gekoppelten Prozess- und thermo-optischen Auslegung die Fokusverschiebung einer Demonstatorlinse um 45% reduziert werden konnte im Vergleich zum Fall ohne Optimierung. Die Prozessauslegung ermöglicht eine präzise simulative Auslegung eines Werkzeugs für Kunststoffoptiken für Laseranwendungen, wodurch die zeit- und kostenintensive Werkzeugmodifikationen reduziert oder sogar vermieden werden können. Die Kompensationsergebnisse der Prozessauslegung zeigen, dass eine simulative Optimierung mit einer sehr hohen Genauigkeit mit Abweichungen von  $0,23\ \mu\text{m}$  in Querrichtung und  $0,24\ \mu\text{m}$  in Längsrichtung der optimierten Demonstrationsgeometrie erreicht werden kann, wobei die entsprechende gemessene Abweichungen  $1,27\ \mu\text{m}$  bzw.  $1,11\ \mu\text{m}$  betragen. Die Abweichung zwischen Experiment und Simulation liegt also in der Größenordnung von Mikrometern, und solche Abweichungen sind in der Praxis durchaus akzeptabel, was sich auch in den Ergebnissen der optischen Überprüfung widerspiegelt. Als Grundlage für die thermo-optische Optimierung wurden zunächst die infrage kommenden Polymere bezüglich ihrer optischen Eigenschaften bei der verwendeten Laserwellenlänge charakterisiert. Die erforderliche Genauigkeit der Parameter wurde zuvor simulativ mithilfe einer Sensitivitätsanalyse eingegrenzt und hieraus Anforderungen an die Messgeräte abgeleitet. Durch Prozessschwankungen während der Herstellung der Linsen der zweiten Iteration ist eine abschließende Bewertung der Ergebnisse der thermo-optischen Optimierung nicht möglich. Im Vergleich zur nichtoptimierten Linsengeometrie, mit nahezu keiner Fokussierwirkung, konnten allerdings deutliche Verbesserungen in Form einer geringeren Brennweitenabweichung von nun kleiner  $130\ \text{mm}$  realisiert werden.

Die Ergebnisse in diesem Projekt sind auf bestimmte Betriebspunkte und Geometrien beschränkt, und weitere Validierungen der Zuverlässigkeit in anderen Betriebsfällen sind erforderlich.

Die gekoppelte Routine ist in hohem Maße von der Zuverlässigkeit der eingegebenen Materialeigenschaften abhängig. Für die industrielle Anwendung neuer Materialien ist eine umfassende Materialcharakterisierung erforderlich, selbst für dasselbe Material, aber unterschiedliche Herstellungsschargen. Aus diesem Grund ist es notwendig, die relevante Materialcharakterisierung in industriellen Anwendungen zu standardisieren und, sobald eine gewisse Datenbasis vorhanden ist, diese durch entsprechende intelligente Algorithmen zu ergänzen und verbessern.

Die entwickelte Prozessauslegungsumgebung kann unabhängig von der Bauteilgeometrie für nahezu beliebige Oberflächennetze angewandt werden, wodurch sie auch für die Kompensation

komplexer Strukturen sehr gut geeignet ist. Dadurch ist diese Umgebung nicht nur auf die Auslegung von optischen Elementen für Laseranwendungen beschränkt, sondern kann auf jedes spritzgegossene Bauteil angewendet werden. Die Zuverlässigkeit der Anwendung auf andere Geometrien muss noch validiert werden. Zukünftig wäre darüber hinaus eine Validierung der thermo-optischen Optimierung auch unabhängig vom Spritzgießprozess denkbar. So ließe sich die Linsengeometrie beispielsweise mithilfe von Ultrapräzisionsbearbeitung direkt aus PMMA fertigen und in sich anschließenden Untersuchungen zu den optischen Eigenschaften validieren. Erst in einem weiteren Schritt würde dann der Spritzgießprozess angegangen.

## 11 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

### 11.1 Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
BFL	Back Focal Length
BLM	Boundry Layer Mesh
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CCD	charge-coupled device
DLL	
DoE	Design of experiment
FEA	Finite Elemente Analyse
IGF	Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
LED	Leuchtdiode
MAD	Mittlere absolute Differenz
PC	Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PTB	Physikalische-Technische Bundesanstalt
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
S/N	Signal-Rausch-Verhältnis
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
STL	Standard Triangulation Language
TOP	
TOS	Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme
UV	Ultraviolettstrahlung

### 11.2 Formelzeichen

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$z$	mm	Pfeilhöhe
$c$	$\text{mm}^{-1}$	Scheitelkrümmung
$\kappa$	-	konische Konstante
$r$	mm	Abstand senkrecht zur Achse
$\alpha_2$	$\text{mm}^{-2}$	2te Koeffizienten des Korrekturpolynoms

$\alpha_4$	$\text{mm}^{-4}$	4te Koeffizienten des Korrekturpolynoms
$\alpha_6$	$\text{mm}^{-6}$	6te Koeffizienten des Korrekturpolynoms
$\alpha_8$	$\text{mm}^{-8}$	8te Koeffizienten des Korrekturpolynoms
$n$	-	Brechungsindex
$M^2$	-	Beugungsmaßzahl
$D$	mm	Laserstrahldurchmesse
$\alpha_{\text{th}}$	$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\lambda$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
$dn/dT$	$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Thermo-optischer Koeffizient
$\alpha$	%/cm	Absorptionskoeffizient
$\epsilon$	-	Emissionsgrad
$h$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
$P$	W	Laserleistung
$D$	mm	Mittlere euklidische Abstand
$x$	mm	x-Richtung des Koordinatensystems
$y$	mm	y-Richtung des Koordinatensystems
$z$	mm	z-Richtung des Koordinatensystems

### 11.3 Indizes

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
$m$	Anzahl der Optimierungsiteration
$i$	Scheitelpunkt
$\alpha$	Versuchsplan $\alpha$
$\beta$	Versuchsplan $\beta$

## 12 ANHANG

### 12.1 Liste der Veröffentlichungen

- [HLS+21] HOPMANN, CH.; LOOSEN, P.; STOLLENWERK, J.; LIU, B.; GERADS, J.; HOFMANN, J.: Kunststofflinsen im Laser sind möglich, Plastverarbeiter, 05/2021
- [HHS+22] HOLLY, C.; HOPMANN, CH.; STOLLENWERK, J.; HOFMANN, J.; GERADS, J.; LIU, B.: Correction of temperature influences on plastic lenses for applications in laser material processing, LANE 22, September 2022
- [HSH+22] CH. HOPMANN; A. SCHMIDT; C. HOLLY; J. STOLLENWERK; D. FRITSCHKE; T. HOHLWECK; B. LIU; J. GERADS; J. HOFMANN: Manufacture of high-precision optical lenses. 31. Internationales Kolloquium Kunststofftechnik 2022, September 2022.

### 12.2 Liste der studentischen Arbeiten

- [Gao21] GAO, M.: Entwicklung eines Optimierungsansatzes für Linsengeometrie in Lasersystemen auf Basis einer bestehenden Linsengeometrie
- [Wol22] WOLF, F.: Entwicklung einer digitalen Auslegung und Produktion für Lasersysteme anhand einer bestehenden Linsengeometrie

### 12.3 Prozessparameter der hergestellten plattenförmigen Proben

Platte	Einspritzgesch. [cm <sup>3</sup> /s]	Nachdruck [bar]	Werkzeugtemp. [°C]	Restkühlzeit [s]	Schmelzetemp. [°C]	Nachdruckzeit [s]
1	60	1000	80	32	230	3
2	60	400	80	32	230	3
3	20	700	80	32	230	3
4	20	700	80	11	230	3
5	60	1000	80	32	230	9
6	60	400	80	32	230	9
7	20	700	80	32	230	9
8	20	700	80	11	230	9

1.2P	35,40	400	50	14	220	4
3.2p	35,40	100	70	11	260	3
1.3P	15,00	400	50	14	220	4

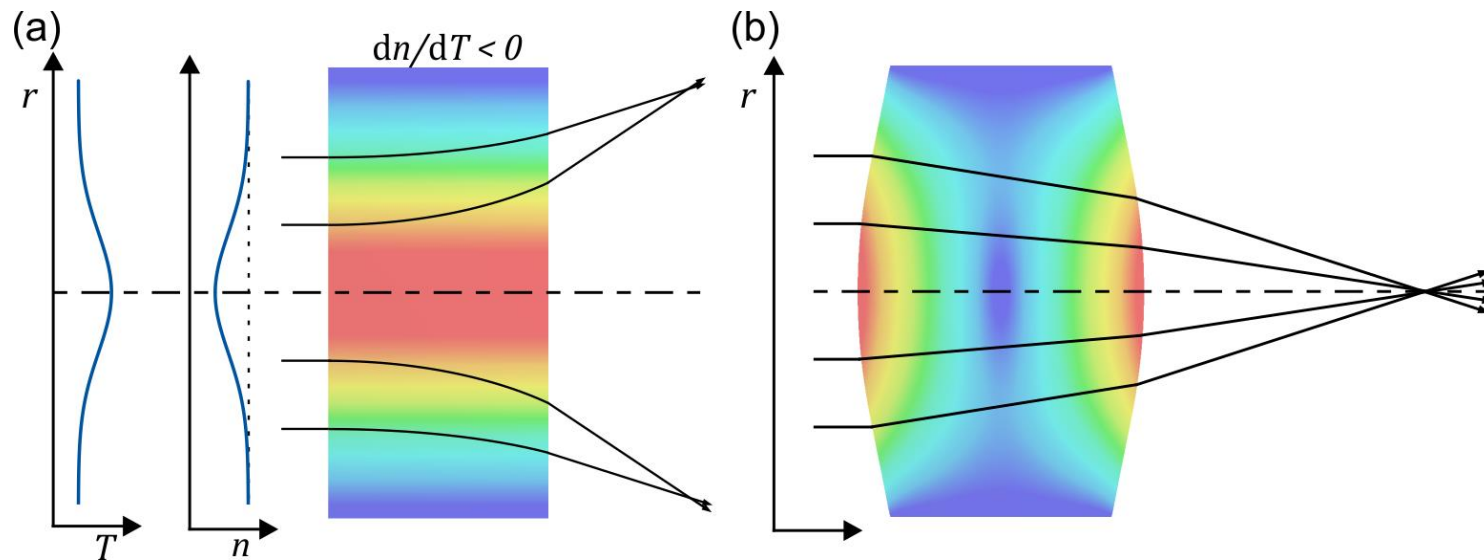
### 13 LITERATURVERZEICHNIS

- [BBSL15] BONHOFF, T.; BÜSING, L.; STOLLENWERK, J.; LOOSEN, P.: Modeling of optical aberrations due to thermal deformation using finite element analysis and ray-tracing. In: Mazuray, L.; Wartmann, R.; Wood, A. P. (Hrsg.): *Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI*, SPIE, 2015, 96261V
- [Bli10] BLIEDTNER, J.: *Optiktechnologie - Grundlagen – Verfahren – Anwendungen – Beispiele*. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2010
- [Bon19] BONHOFF T.; Multiphysikalische Simulation und Kompensation thermooptischer Effekte in Optiken für Laseranwendungen. *Dissertation* (2019)
- [Bre16] BRECHER, C.: *Kunststoffkomponenten Für LED-Beleuchtungsanwendungen - Werkzeugtechnik, Replikation und Metrologie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016
- [DGMB05] DOYLE, K. B.; GENBERG, V. L.; MICHELS, G. J.; BISSON, G. R.: Optical modeling of finite element surface displacements using commercial software. In: Kahan, M. A. (Hrsg.): *Optical modeling and performance predictions II*. August 2005, San Diego, California, USA; Second Optical Modeling and Performance Predictions Conference. Bellingham, Wash., SPIE, 2005, 01-12
- [EDE04] EICHLER, J.; DÜNKEL, L.; EPPICH, B.: Die Strahlqualität von Lasern – Wie bestimmt man Beugungsmaßzahl und Strahldurchmesser in der Praxis? *Laser Technik Journal* 1 (2004) 2, S. 63–66
- [Gat14] GATEJ, A.: *Modeling and compensation of thermally induced optical effects in highly loaded optical systems*. RWTH Aachen University, 2014. - Betreuer:
- [GL14] GATEJ, A.; LOOSEN, P.: Methods for compensation of thermal lensing based on thermo-optical (TOP) analysis. In: Wyrowski, F. et al. (Hrsg.): *Optical Modelling and Design III*, SPIE, 2014, 91310F
- [GWL12] GATEJ, A.; WASSELOWSKI, J.; LOOSEN, P.: Using adaptive weighted least squares approximation for coupling thermal and optical simulation. *Applied optics* 51 (2012) 28, S. 6718–6725
- [HLS+21] HOPMANN, C.; LOOSEN, P.; STOLLENWERK, J.; LIU, B.; GERADS, J.; HOFMANN, J.: Gekoppelte Prozess- und thermooptische Auslegung - Kunststofflinsen im Laser sind möglich. *plastverarbeiter* 2021 (2021)

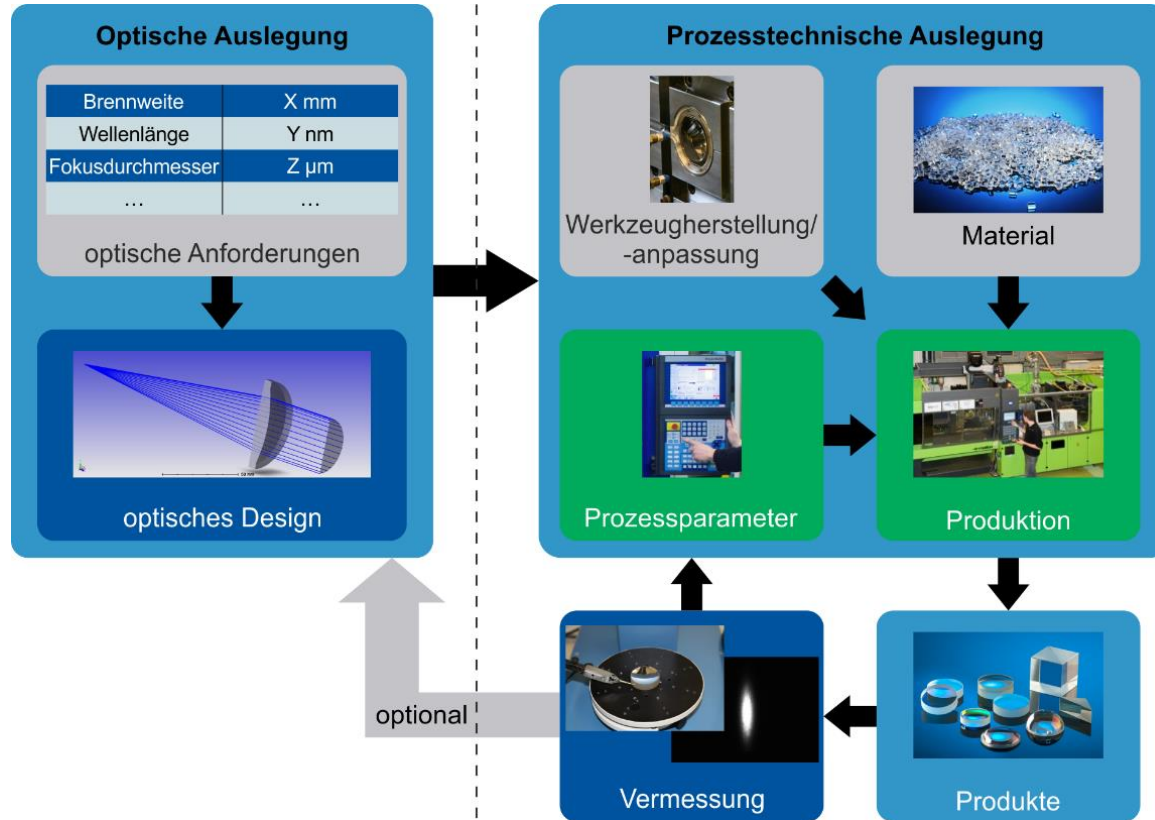
- [JP05] JIALING, W.; PENGFEI, W.: The simulation and optimization of aspheric plastic lens injection molding. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 20 (2005) 2, S. 86–89
- [KFLB15] KEMMLER, S.; FUCHS, A.; LEOPOLD, T.; BERTSCHE, B.: *Comparison of Taguchi Method and Robust Design Optimization (RDO)*, 2015
- [KSN15] KASAROVA, S. N.; SULTANOVA, N. G.; NIKOLOV, I. D.: Polymers in lens design for laser applications. In: Dreischuh, T. et al. (Hrsg.): *18th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, SPIE, 2015, 94471J
- [LRY13] LI, L.; RAASCH, T. W.; YI, A. Y.: Simulation and measurement of optical aberrations of injection molded progressive addition lenses. *Applied optics* 52 (2013) 24, S. 6022–6029
- [LYD+15] LU, G.; YAZDAN MEHR, M.; DRIEL, W. v. D.; FAN, X.; FAN, J.; JANSEN, K.; ZHANG, G. Q.: Color Shift Investigations for LED Secondary Optical Designs: Comparison between BPA-PC and PMMA. *Optical Materials* 45 (2015) 258, S. 37–41
- [MG13] MICHELS, G. J.; GENBERG, V. L.: Analysis of thermally loaded transmissive optical elements. In: Kahan, M. A.; Levine, M. B. (Hrsg.): *Optical Modeling and Performance Predictions VI*, SPIE, 2013, 88400C
- [MZ06] MIGAHEH, M. D.; ZIDAN, H. M.: Influence of UV-irradiation on the structure and optical properties of polycarbonate films. *Current Applied Physics* 6 (2006) 1, S. 91–96
- [NN15a] NN Optical Glass. *Schott AG Mainz* (2015)
- [NN15b] NN Makrolon® LED2245, Datenblatt. *Covestro AG Leverkusen* (2015)
- [NN21] *DIN EN ISO 11146-1: Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen - Teil 1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021
- [PTV+12] PIEHLER, S.; THIEL, C.; VOSS, A.; ABDU AHMED, M.; GRAF, T.: Self-compensation of thermal lensing in optics for high-brightness solid-state lasers. In: Beyer, E.; Morris, T. (Hrsg.): *High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications*, SPIE, 2012, 82390Z
- [RMS+02] RIVATON, A.; MAILHOT, B.; SOULESTIN, J.; VARGHESE, H.; GARDETTE, J. L.: Comparison of the photochemical and thermal degradation of bisphenol-A

- polycarbonate and trimethylcyclohexane–polycarbonate. *Polymer Degradation and Stability* 75 (2002) 1, S. 17–33
- [Röb19] RÖBIG, M.: Multilayer-Spritzgießen für eine hochpräzise und wirtschaftliche Fertigung dickwandiger Kunststofflinsen - Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation 2019
- [Röh21] Röhm GmbH Datenblatt Plexiglas 7N (10.11.2021)
- [RS19] ROTH, S.; STAHL, A.: *Optik - Experimentalphysik – anschaulich erklärt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019
- [SKN13] SULTANOVA, N. G.; KASAROVA, S. N.; NIKOLOV, I. D.: Characterization of optical properties of optical polymers. *Optical and Quantum Electronics* 45 (2013) 3, S. 221–232
- [Ste10] STEFAN B.: *Handbook of Plastic Optics*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010
- [Str80] STRAW, K.: Control of Thermal Focus Shift in Plastic-Glass Lenses 1980 *International Lens Design Conference*, SPIE, 1980, S. 386
- [URL21] Moldex3D - Moldex3D Help. <http://support.moldex3d.com/2021/en/>, 25.06.2021
- [Wol17] WOLF, A.: *Laserscheinwerfer für Kraftfahrzeuge*. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017
- [YCL17] YANG, J.; CEN, z.; LI, x.: Athermal design and analysis of glass-plastic hybrid lens. In: Dong, L. et al. (Hrsg.): *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments*, SPIE, 28.10.2017 - 30.10.2017, S. 11
- [YDJ+13] YAZDAN MEHR, M.; DRIEL, W. D. v.; JANSEN, K.; DEEBEN, P.; BOUTELJE, M.; ZHANG, G. Q.: Photodegradation of bisphenol A polycarbonate under blue light radiation and its effect on optical properties. *Optical Materials* 35 (2013) 3, S. 504–508

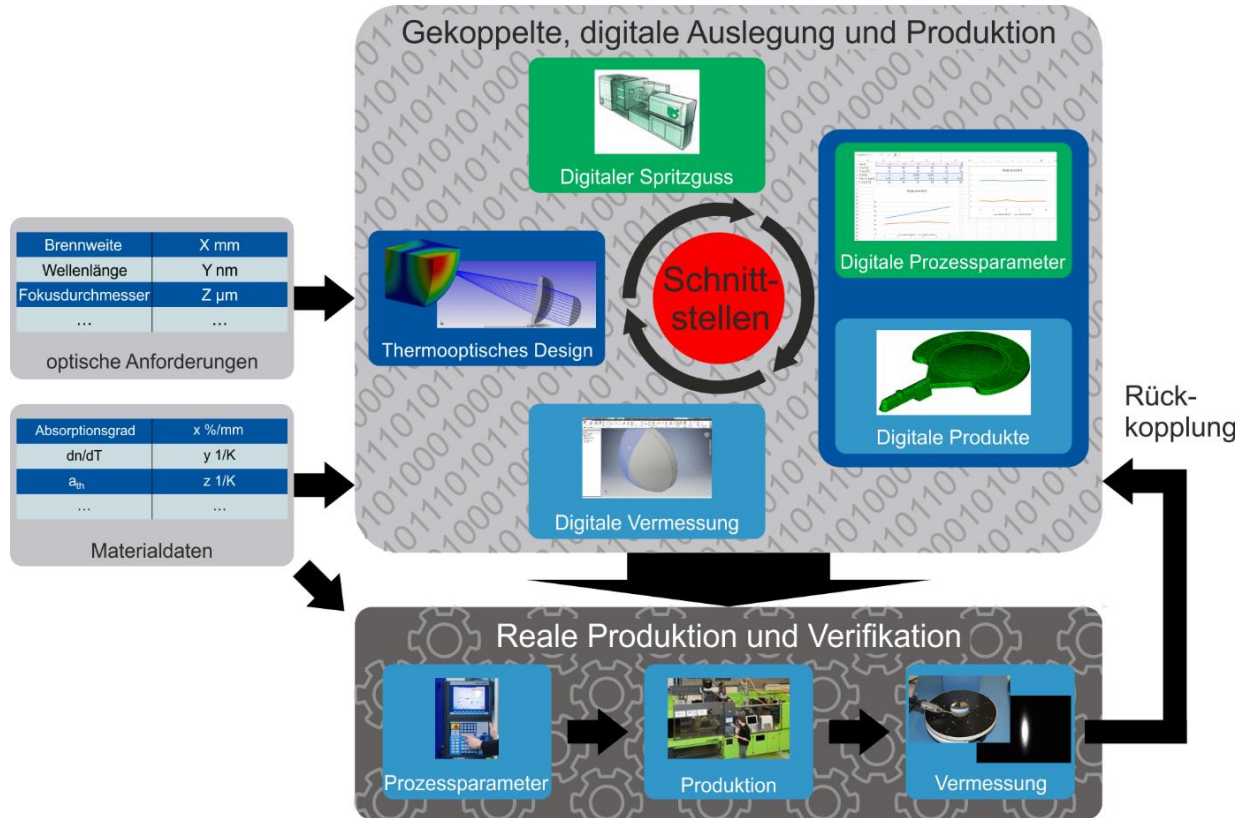
# Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der auftretenden thermooptischen Effekte. (a) temperaturabhängiges Brechungsindexprofil, (b) Oberflächendeformation



# Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der nach aktuellem Stand der Technik getrennten optischen und prozesstechnischen Auslegung einer Kunststoffoptik



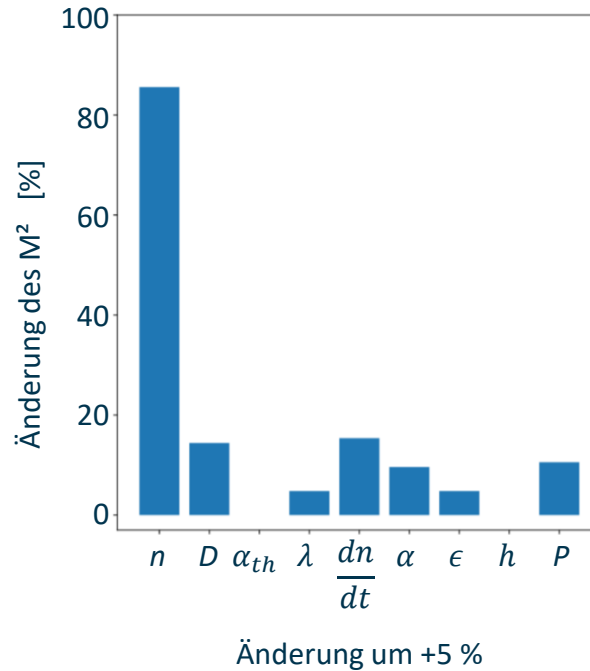
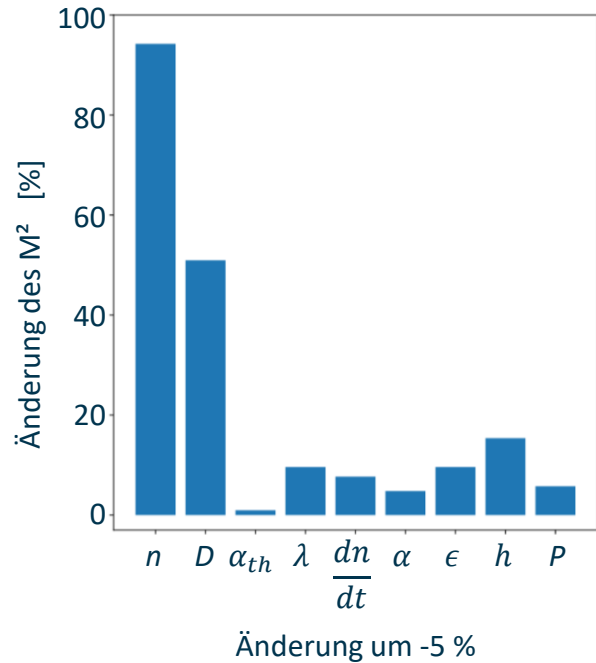
# Abbildung 3.1: Schema der angestrebten gekoppelten, digitalen Auslegung und Produktion, welche die anschließende reale Produktion erheblich vereinfacht



# Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Optimierung der Linsenform

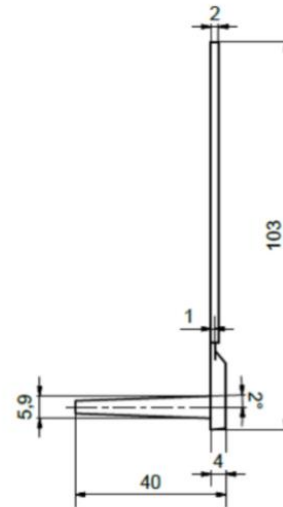
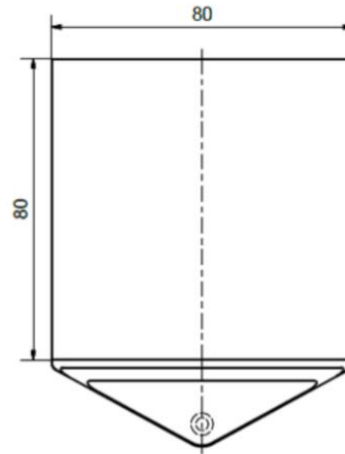
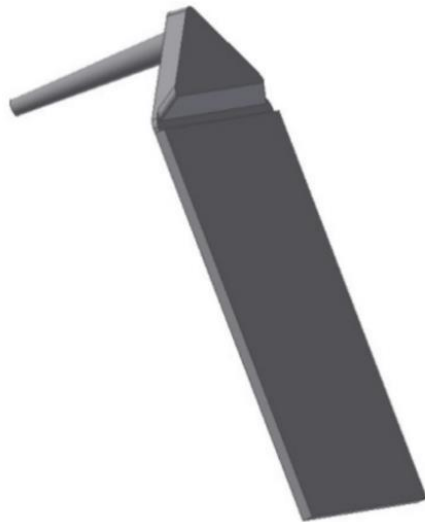


# Abbildung 4.1: Sensitivitätsanalyse mit thermo-optischen Eigenschaften

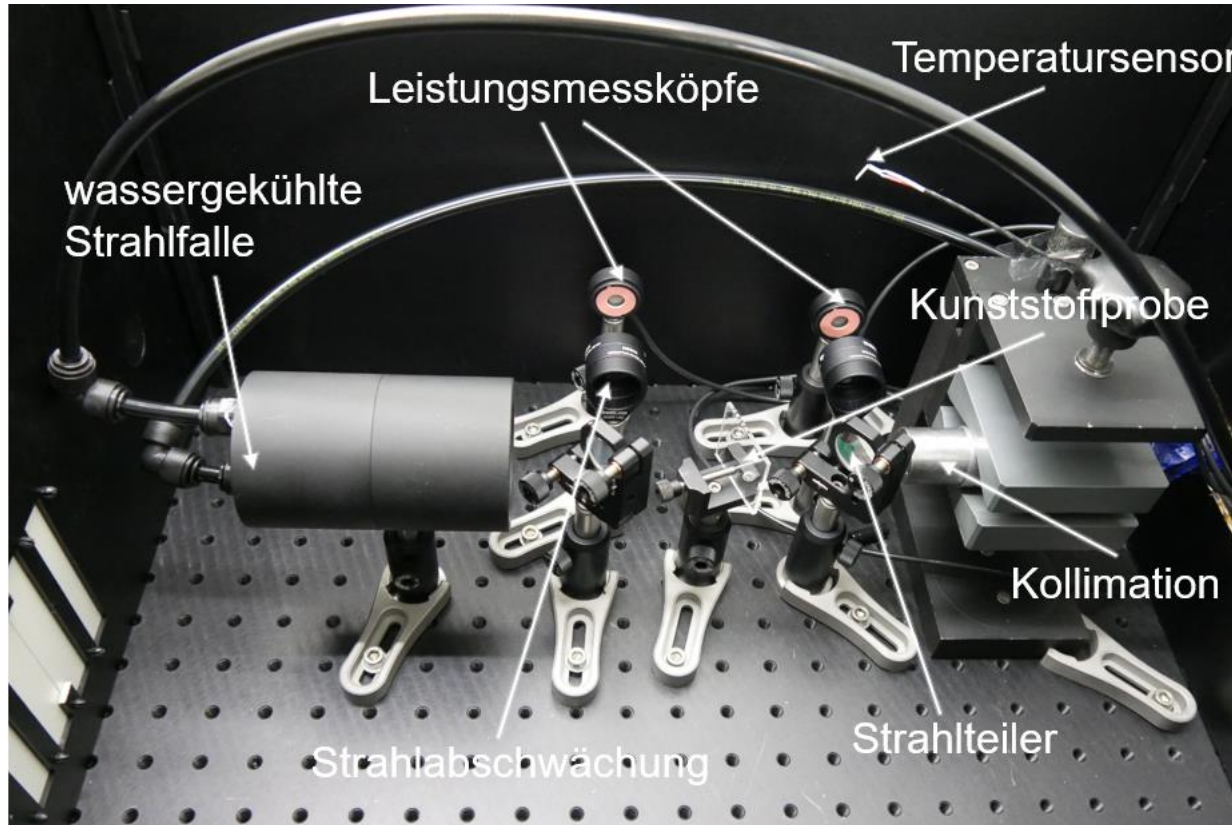


- $M^2$ : Beugungsmaßzahl
- $n$ : Brechungsindex
- $D$ : Strahldurchmesser
- $\alpha_{th}$ : thermischer Ausdehnungskoeffizient
- $\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit
- $\frac{dn}{dT}$ : thermooptischer Koeffizient
- $\alpha$ : Absorptionskoeffizient
- $\epsilon$ : Emissionsgrad
- $h$ : Wärmeübergangskoeffizient
- $P$ : Laserleistung

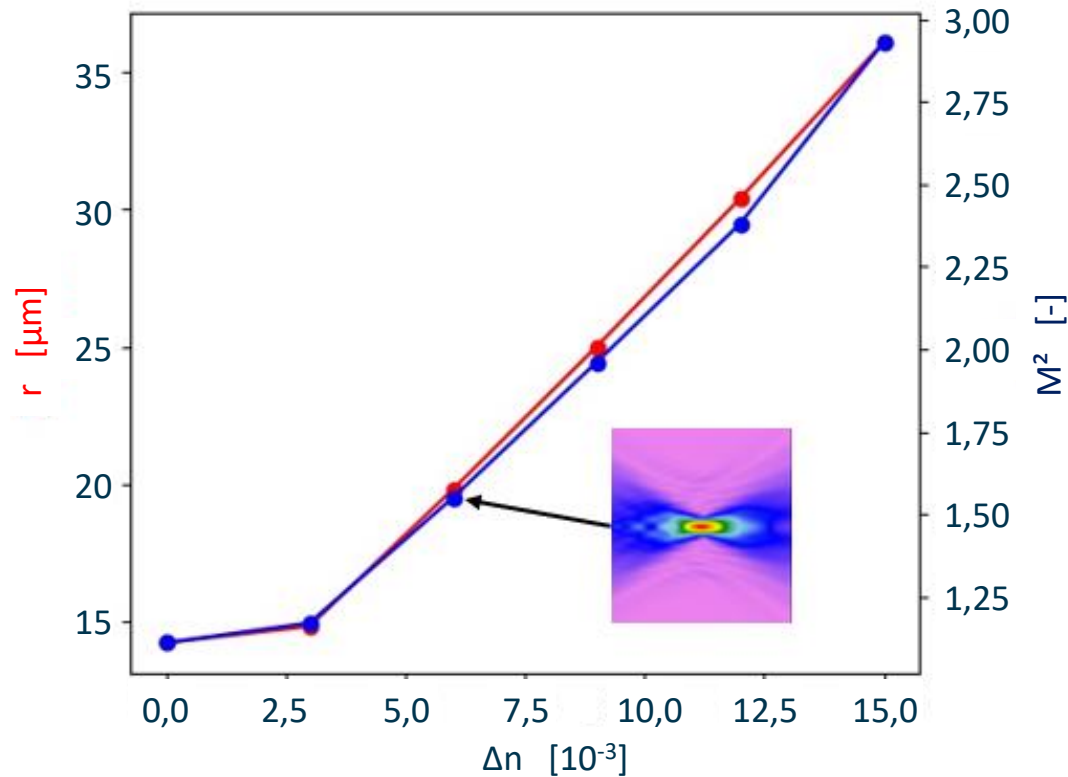
# Abbildung 4.2: plattenförmige Probekörper



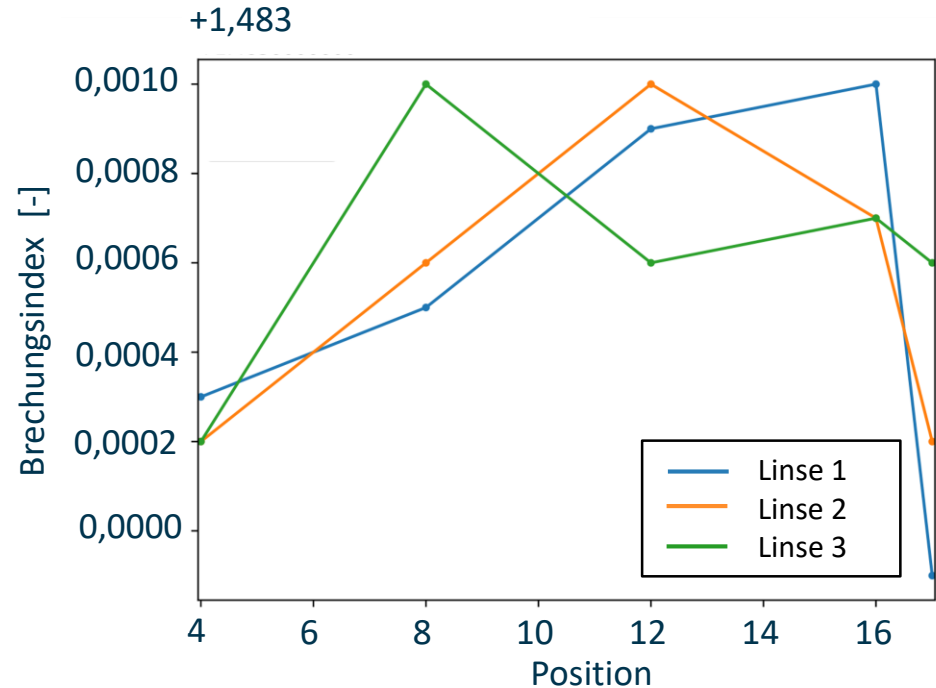
## Abbildung 4.3: Messaufbau für Langzeittests



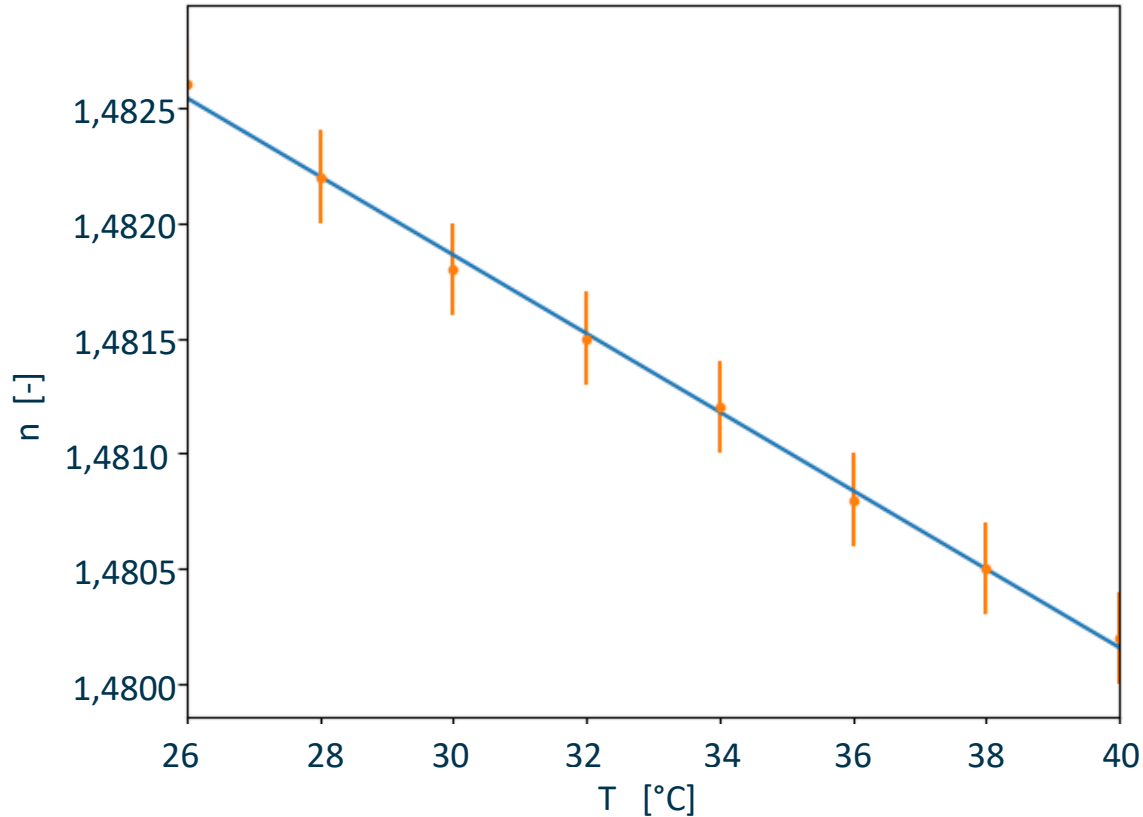
# Abbildung 4.4: Einfluss von Brechungsindexschwankungen auf die Strahlkaustik



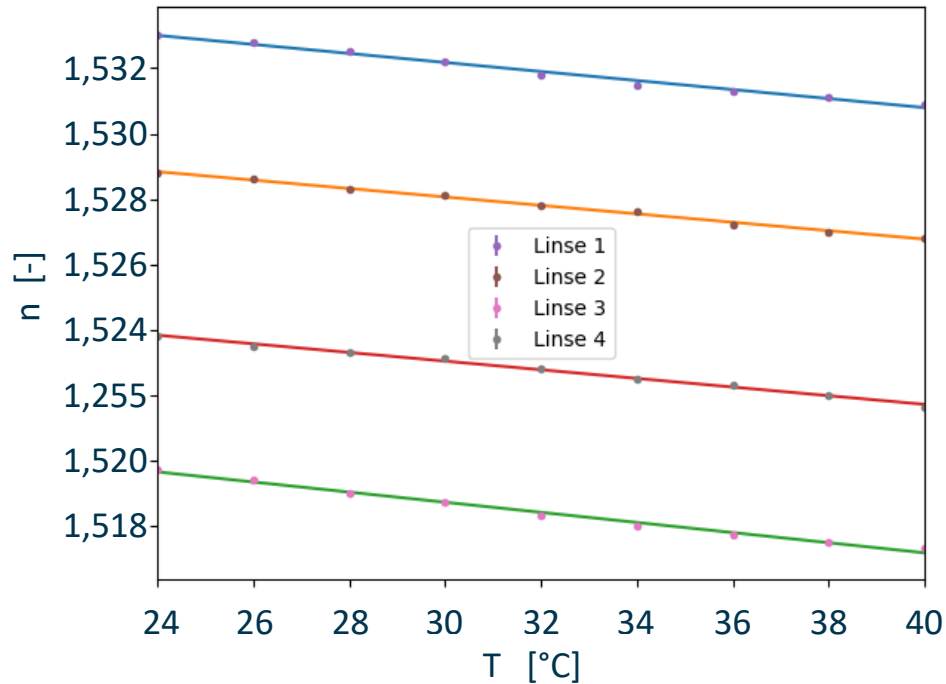
# Abbildung 4.5: Räumliche Brechungsindexmessungen bei von Prozesskombination $\beta 1$ (Tabelle 5.4) hergestellten Linsen



# Abbildung 4.6: Messung des thermo-optischen Koeffizienten von PMMA

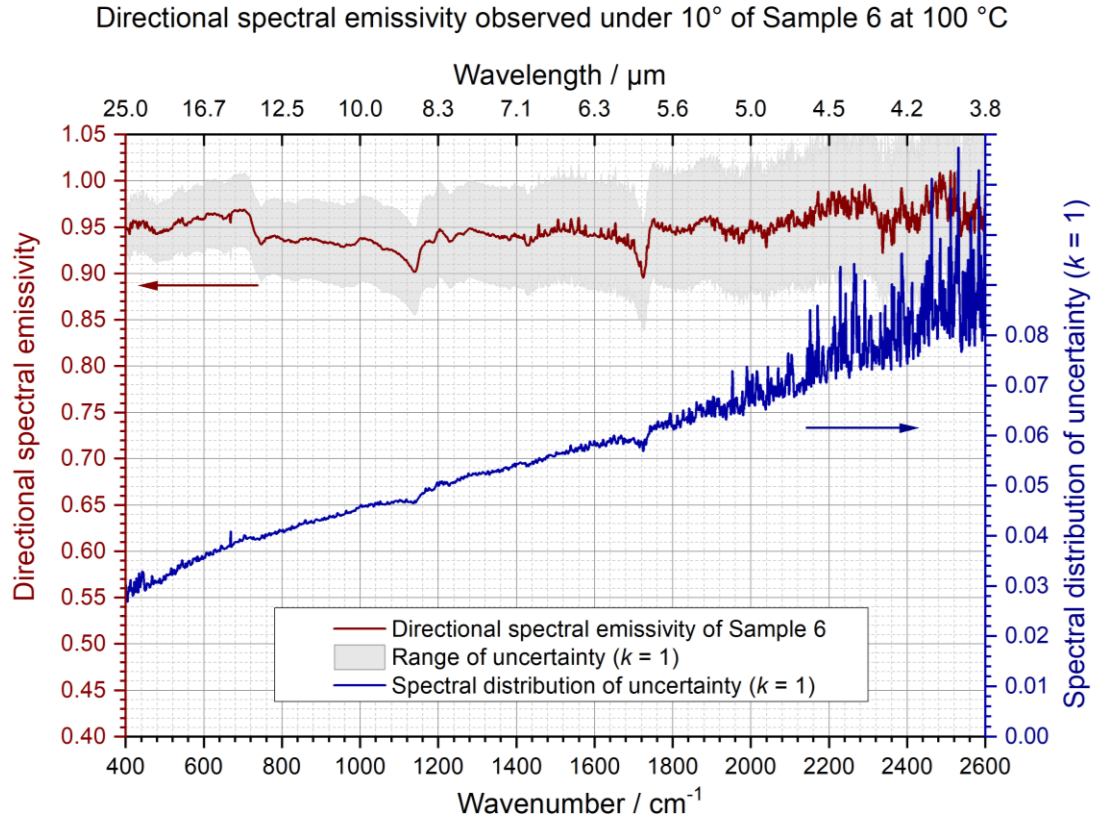


# Abbildung 4.7: Thermooptischer Koeffizient von industriell gefertigten Vergleichslinsen

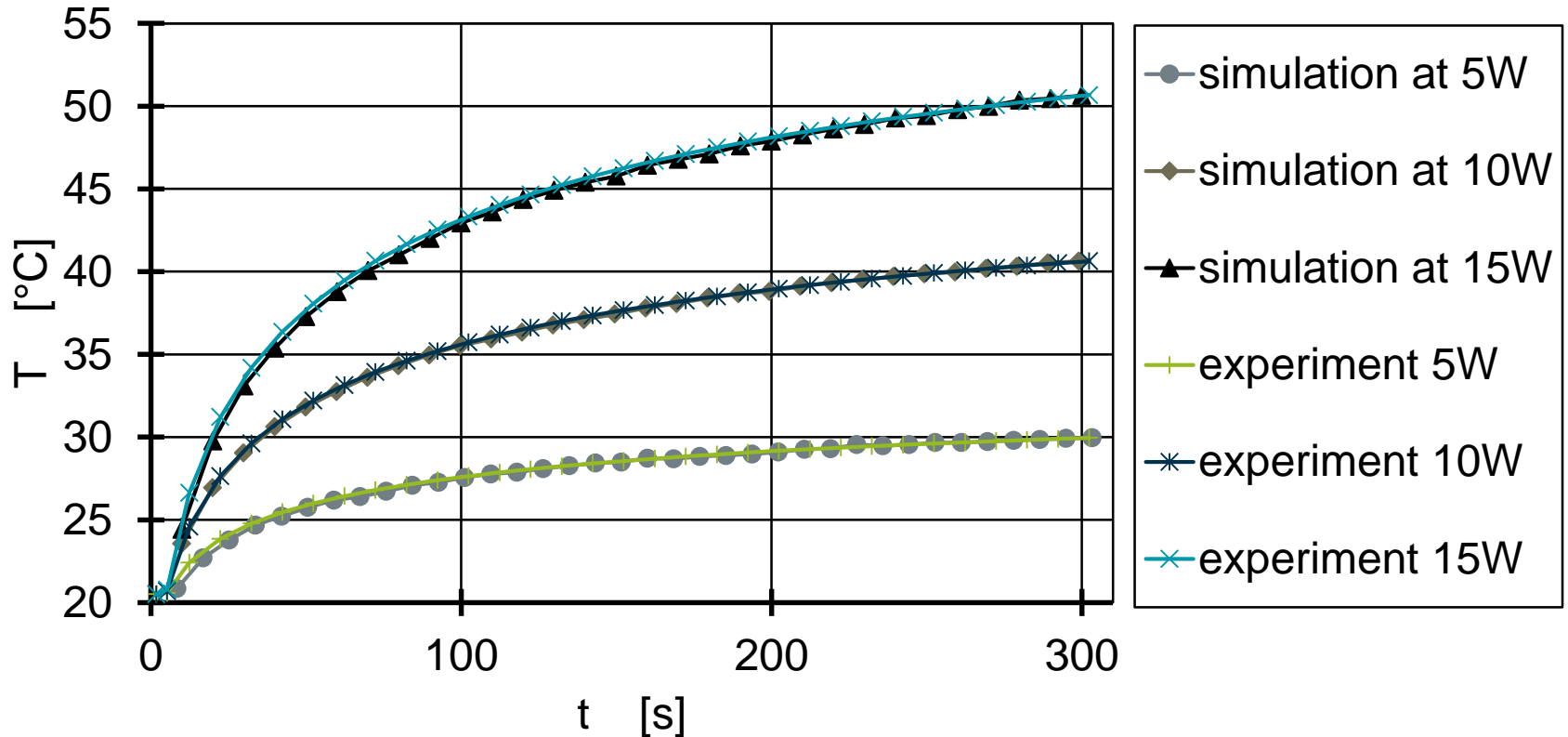


Linse	Thermo-optischer Koeffizient $dn/dt$ [ $10^{-4}\text{K}^{-1}$ ]
Linse 1	138,3
Linse 2	129,2
Linse 3	155,0
Linse 4	132,5
Mittelwert	$138,8 \pm 9,9$

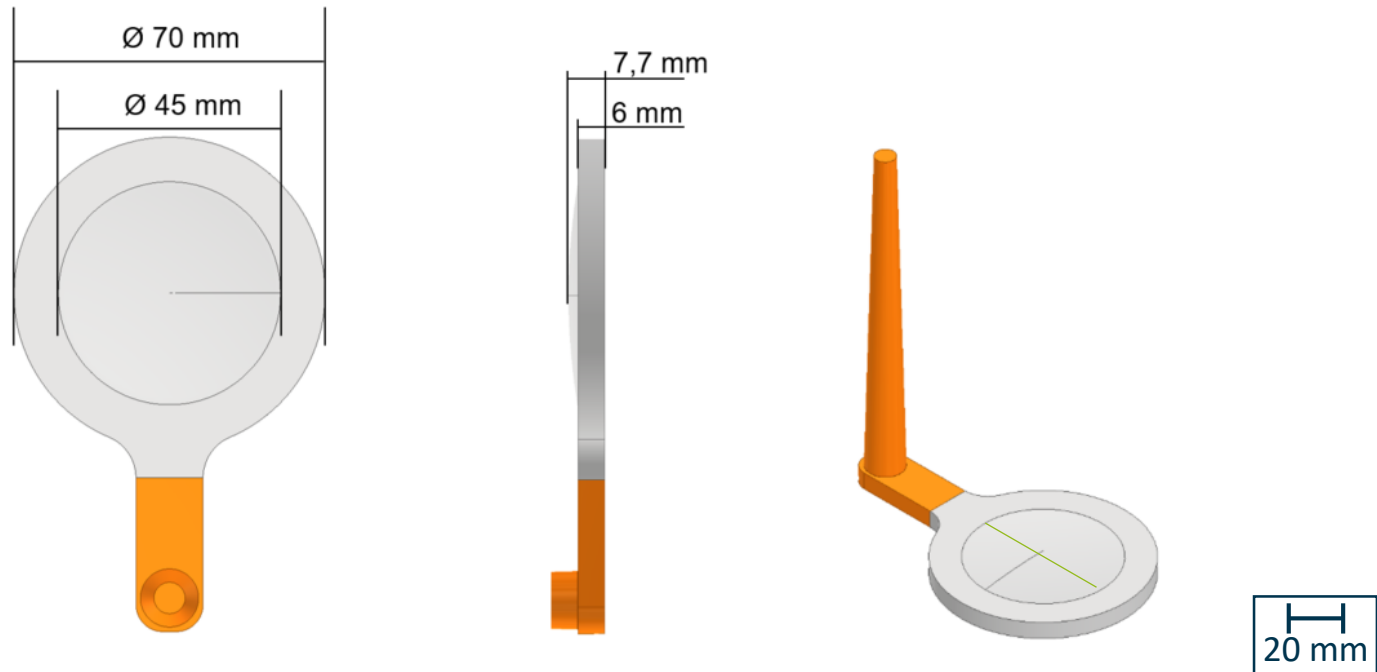
# Abbildung 4.8: Auftragsmessungen Emissionsgrad



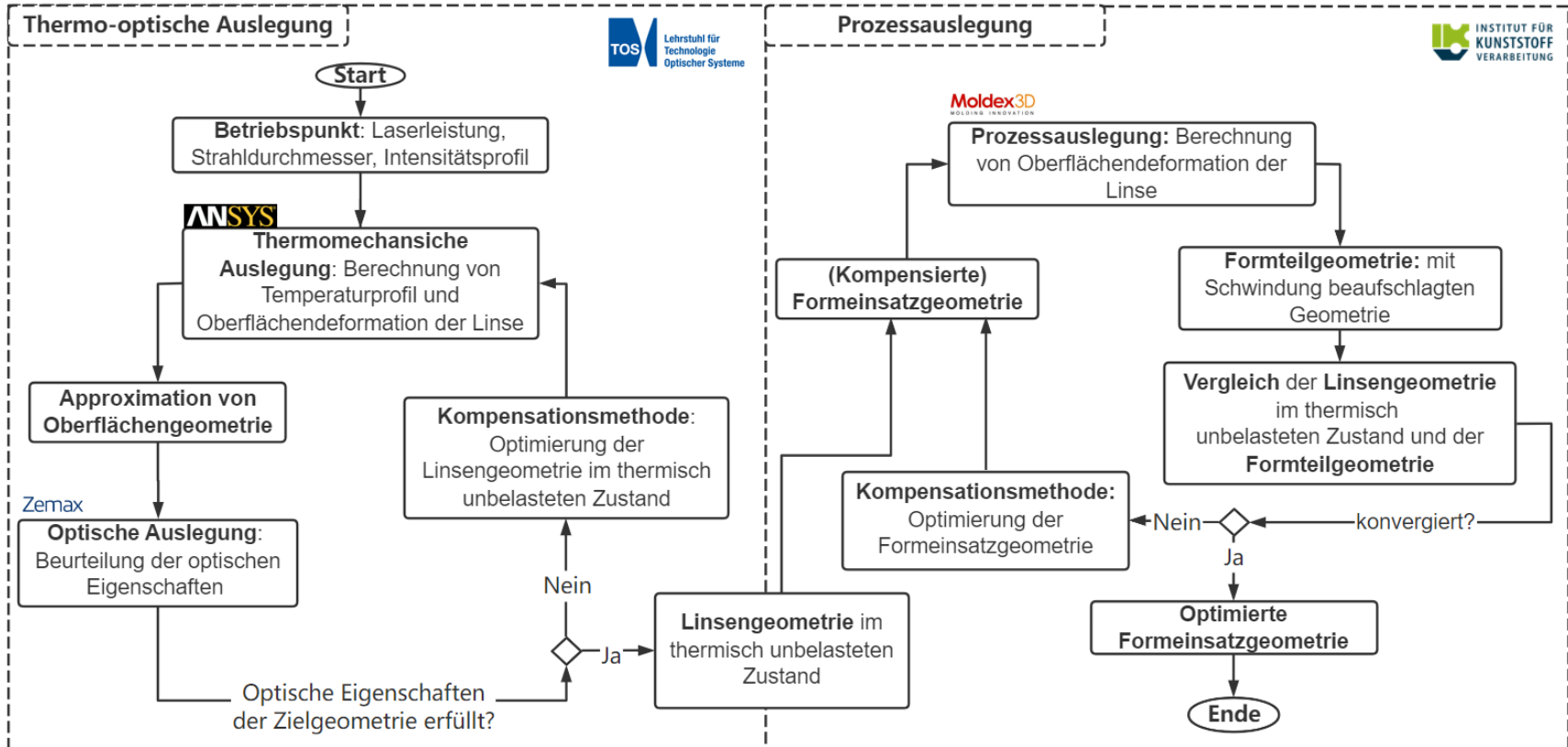
## Abbildung 4.9: Zeitlicher Temperaturverlauf einer Linse bei unterschiedlichen Laserleistungen



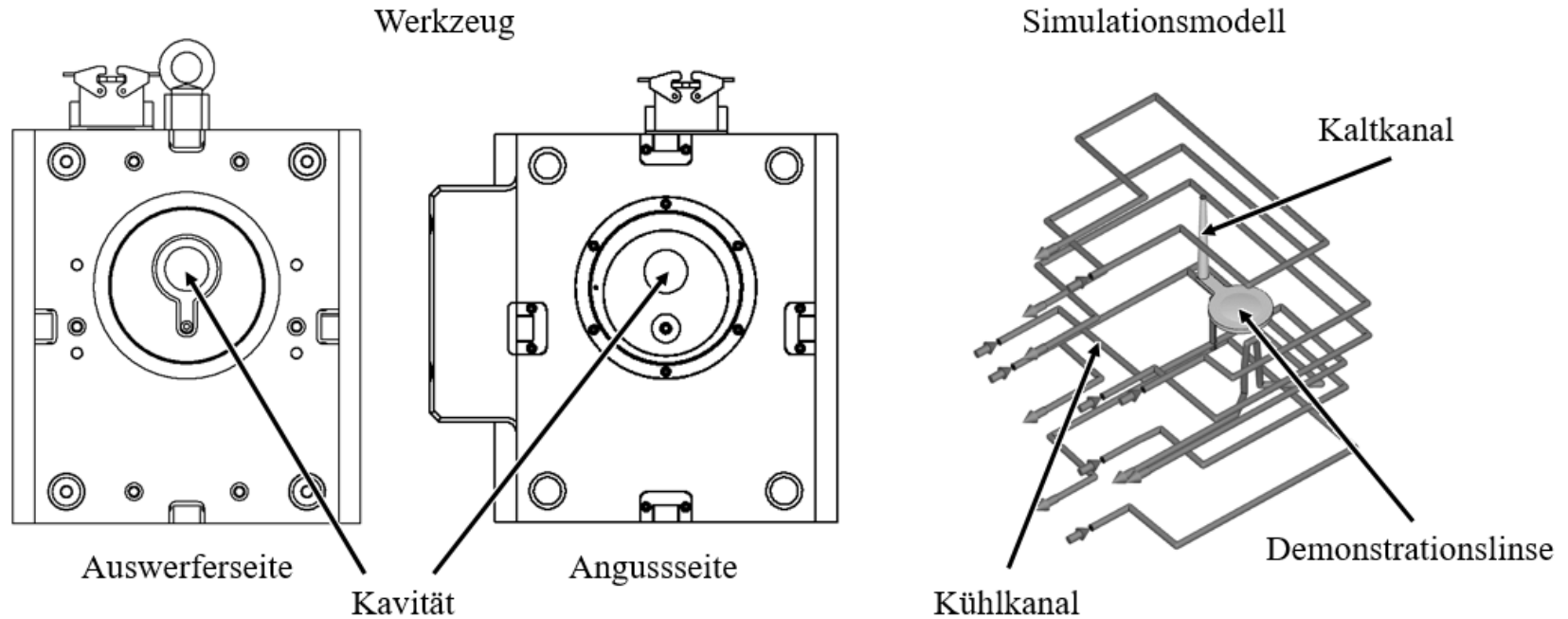
# Abbildung 4.10: Ausgangsgeometrie des Demonstrators



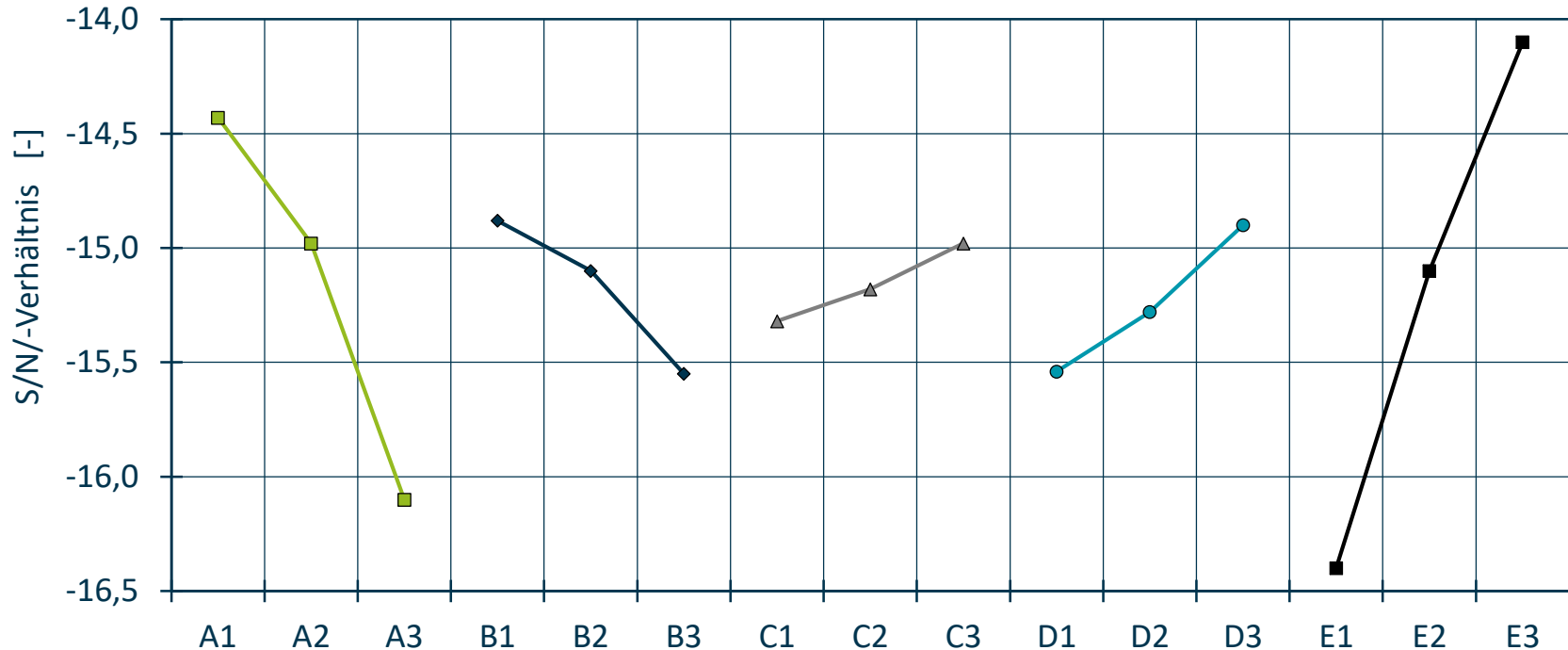
# Abbildung 5.1: Gekoppelte, digitale Auslegung und Produktion



# Abbildung 5.2: Werkzeug und Simulationsmodell der Demonstrationslinse mit Kühlkanälen

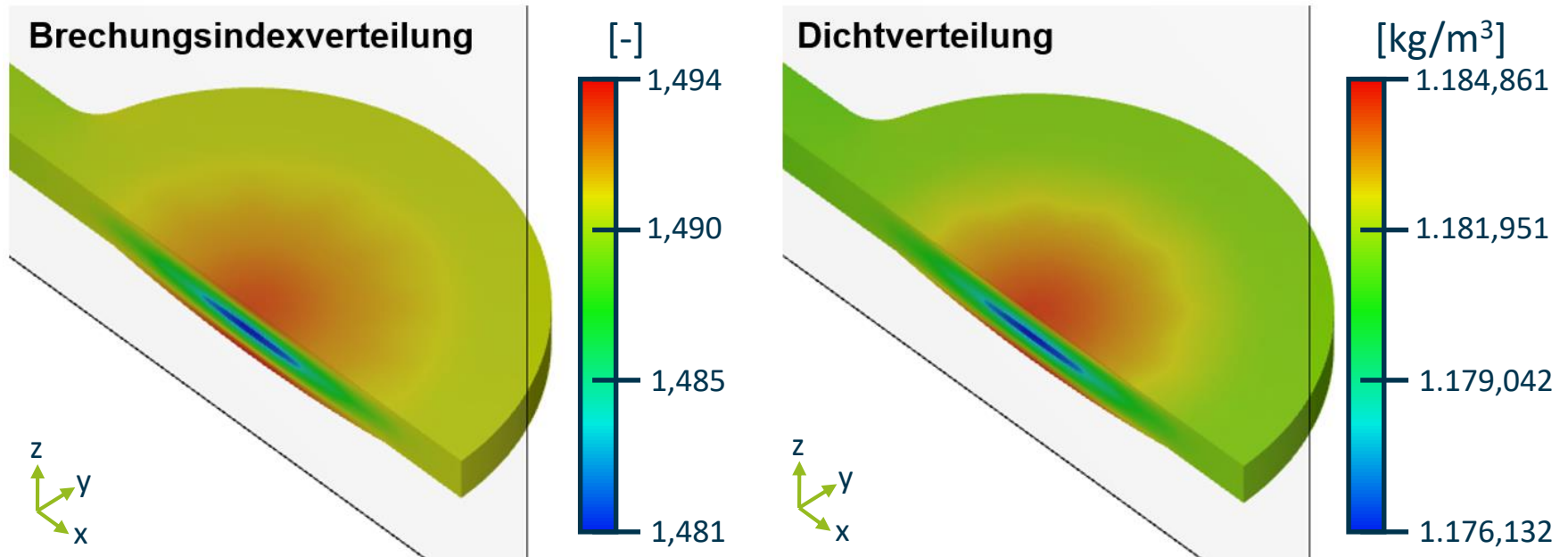


# Abbildung 5.3: S/N-Verhältnis der entsprechenden variierten Prozessparameter von Versuchsplan $\alpha$

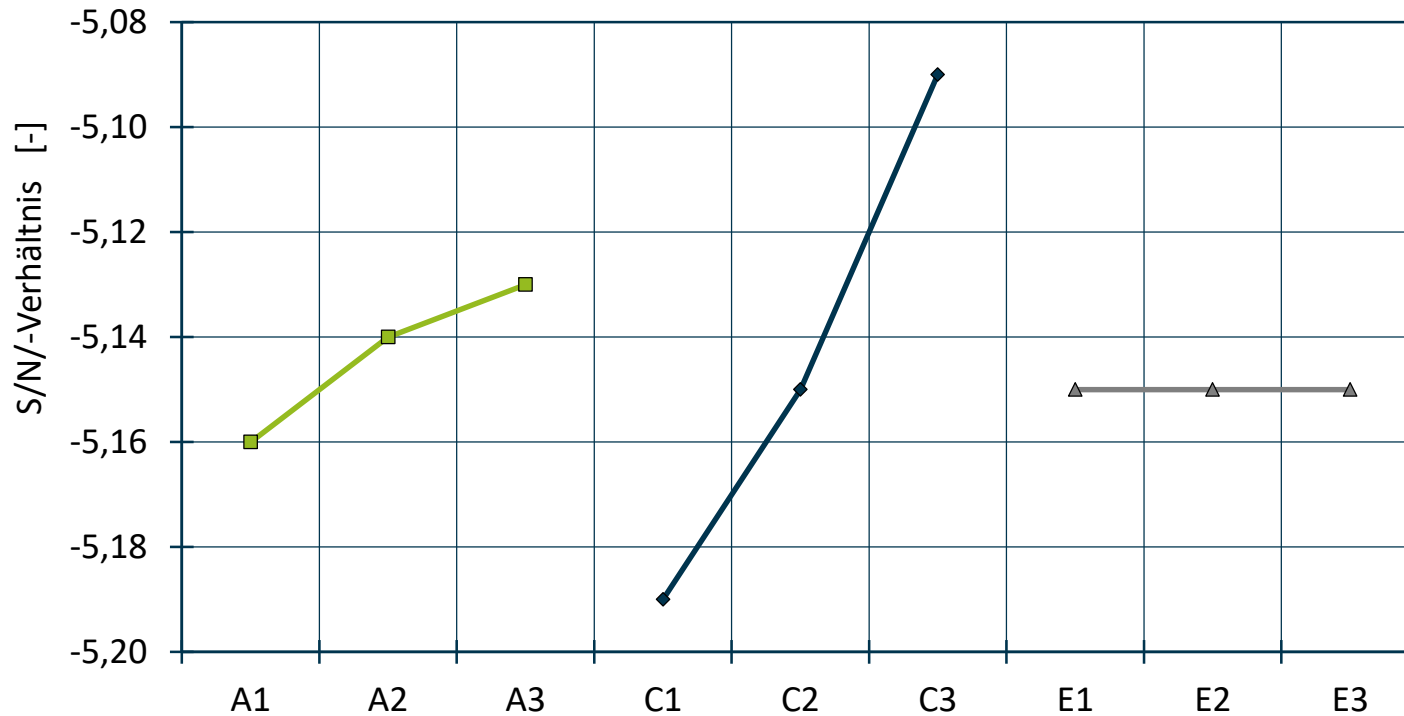


A: Massetemperatur; B: Werkzeugtemperatur; C: Max. Nachdruck; D: Nachdruckzeit; E: Restkühlzeit

# Abbildung 5.4: Brechungsindex- und Dichteverteilung der mit Versuchspunkt $\alpha 1$ simulierte Linse

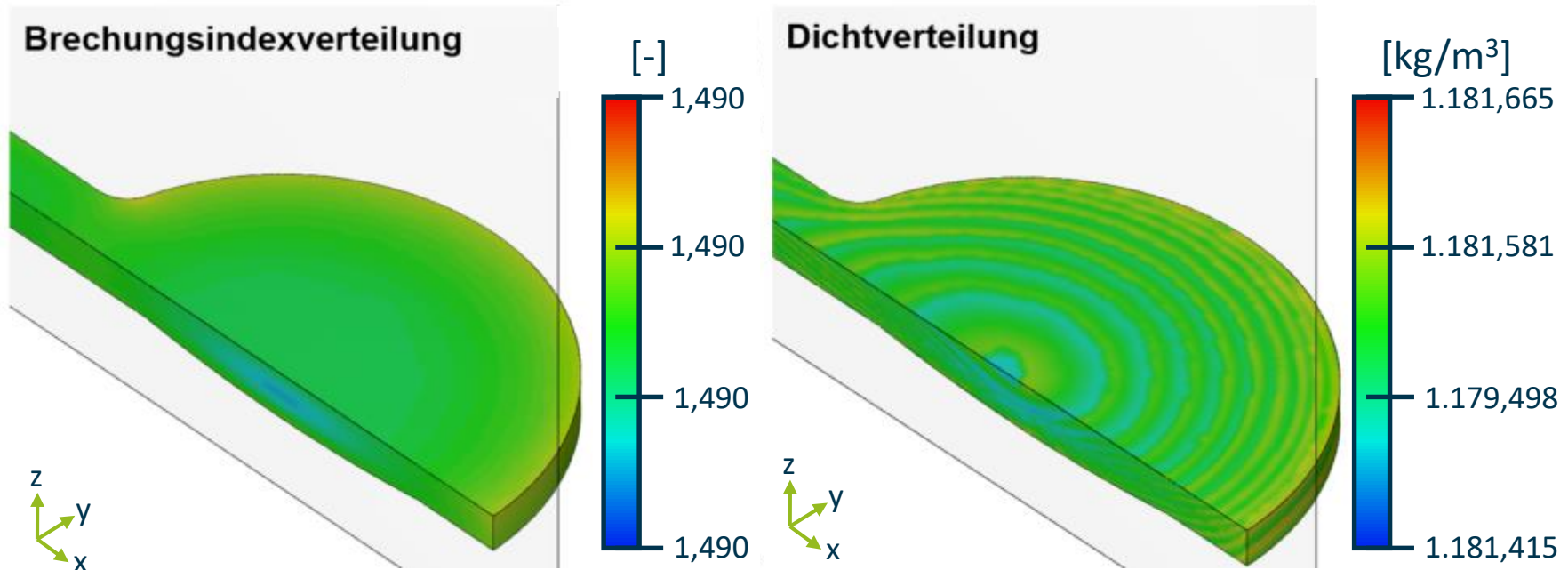


# Abbildung 5.5: S/N-Verhältnis der entsprechenden variierten Prozessparameter von Versuchsplan $\beta$

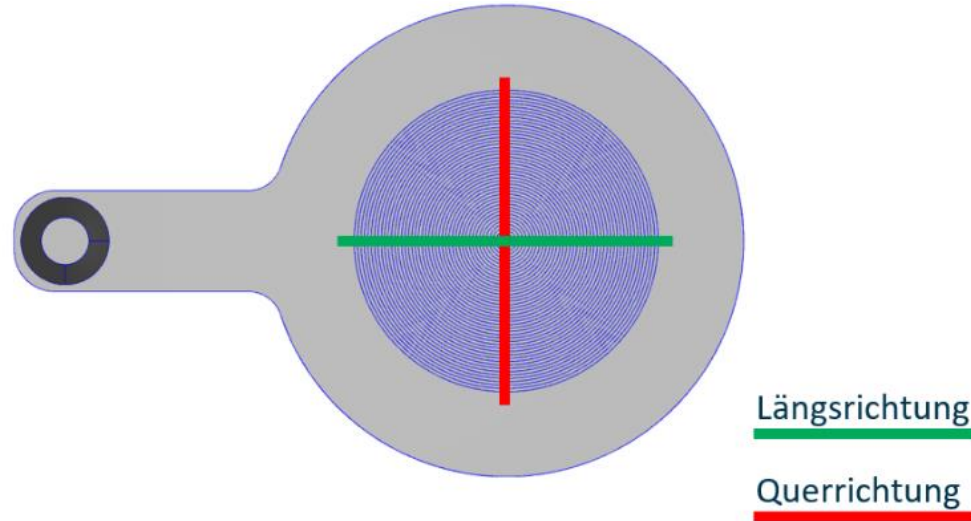


A: Schmelztemperatur; C: Max. Nachdruck; E: Restkühlzeit

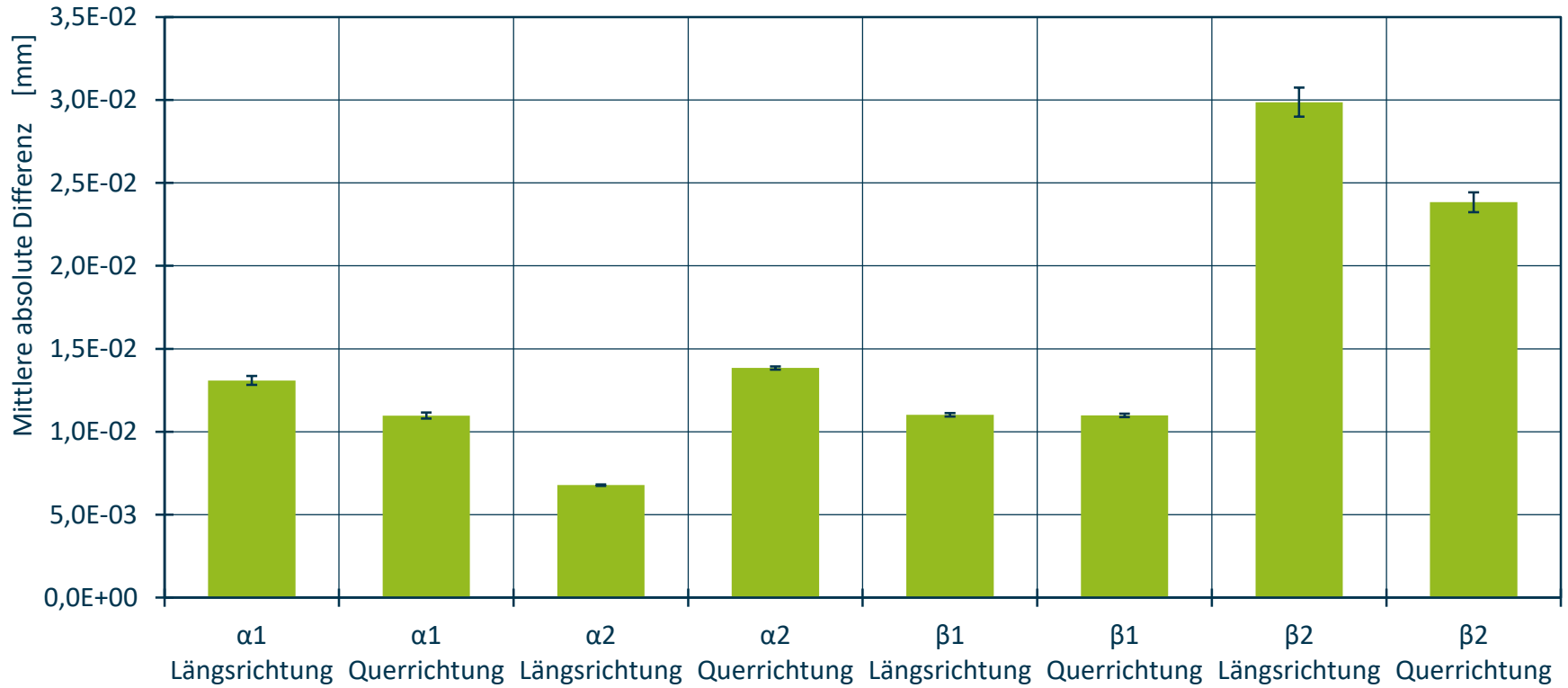
# Abbildung 5.6: Brechungsindex- und Dichteverteilung der mit Versuchspunkt $\beta_1$ simulierte Linse



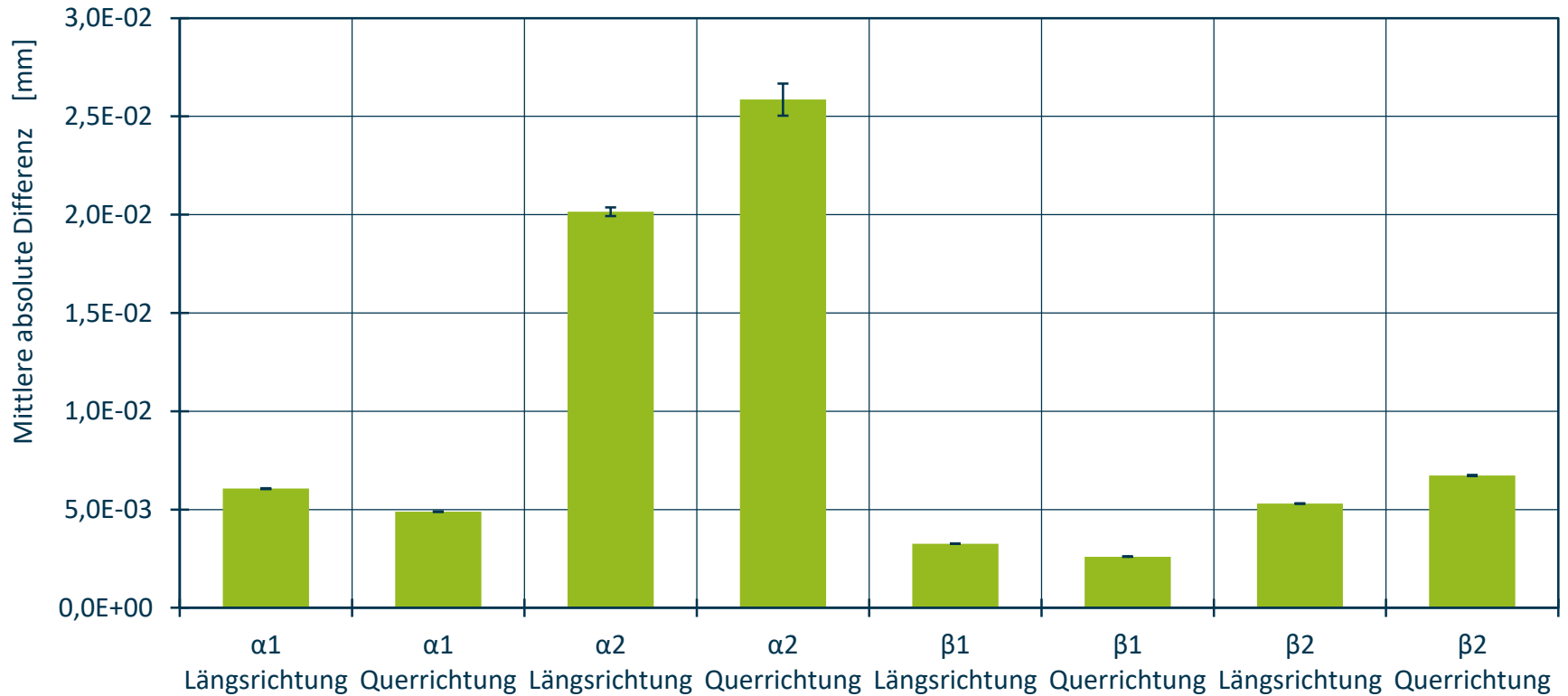
# Abbildung 5.7: Messposition auf der Linsenoberfläche



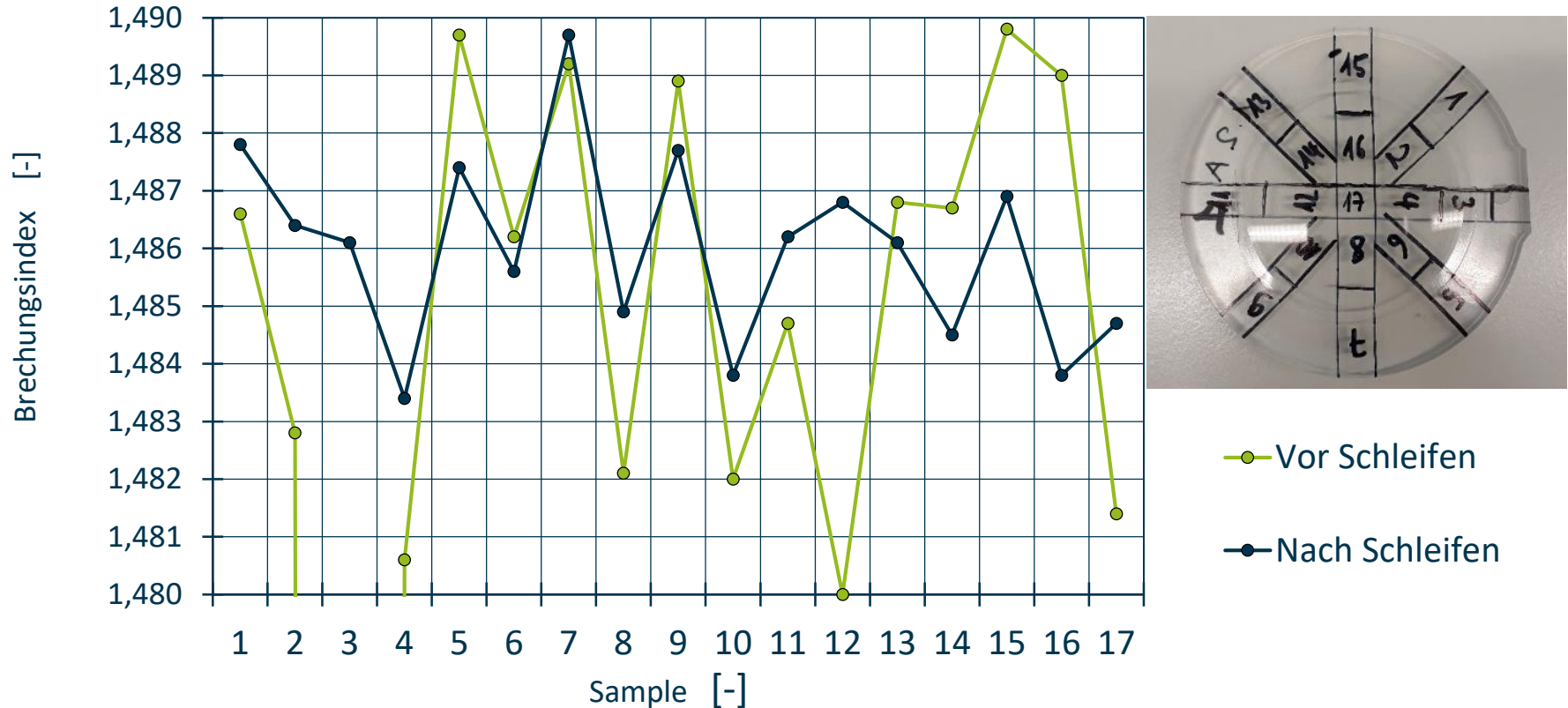
# Abbildung 5.8: Mittlere absolute Differenz zwischen Exp. und Sim. (Asphäre)



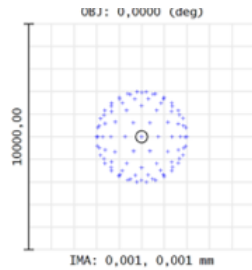
# Abbildung 5.9: Mittlere absolute Differenz zwischen Exp. und Sim. (Plane)



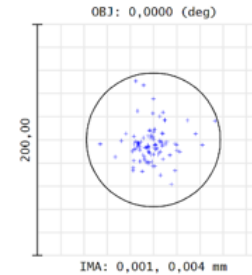
# Abbildung 5.10: Brechungsindexverteilung der mit Prozesskombination $\alpha 1$ und $\beta 1$ hergestellte Linsen



# Abbildung 5.11: Optische Bewertung der thermooptischen Optimierung

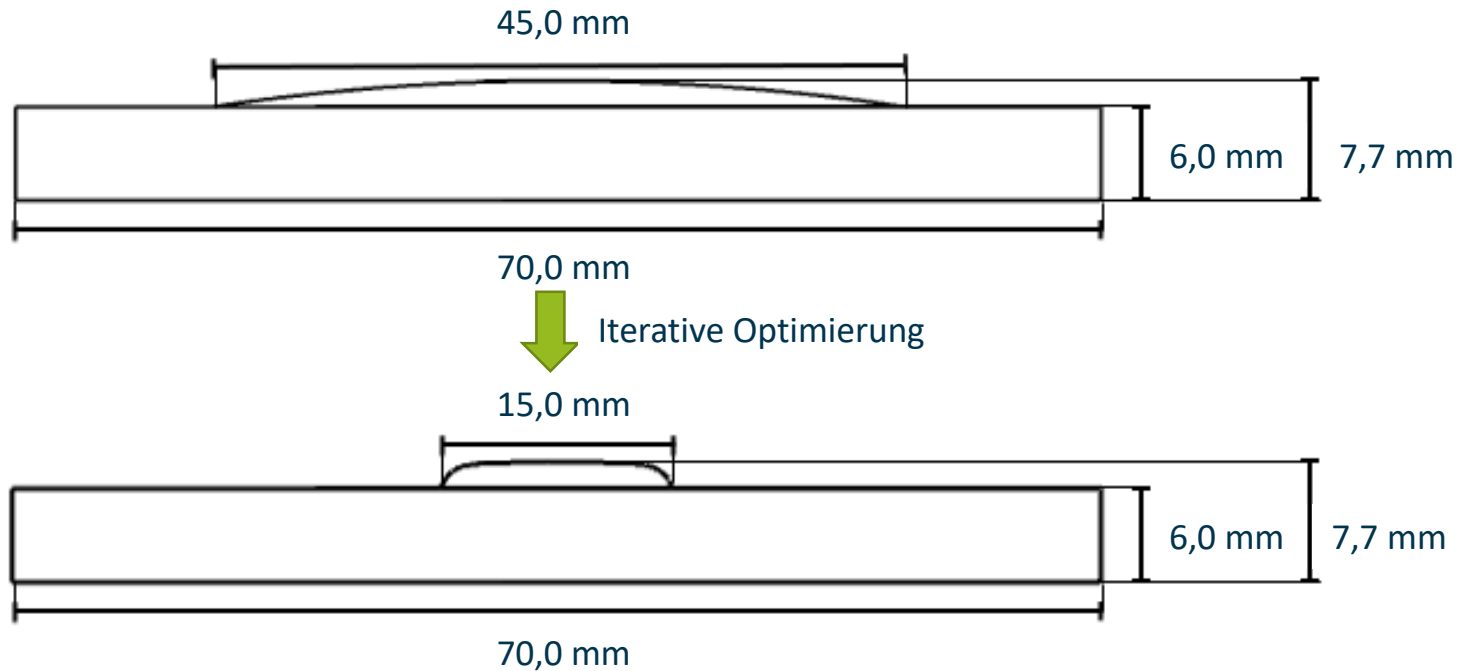


BFL: 493,0 mm  
Airy Radius: 260,9  $\mu\text{m}$   
RMS Radius 1.780,3  $\mu\text{m}$

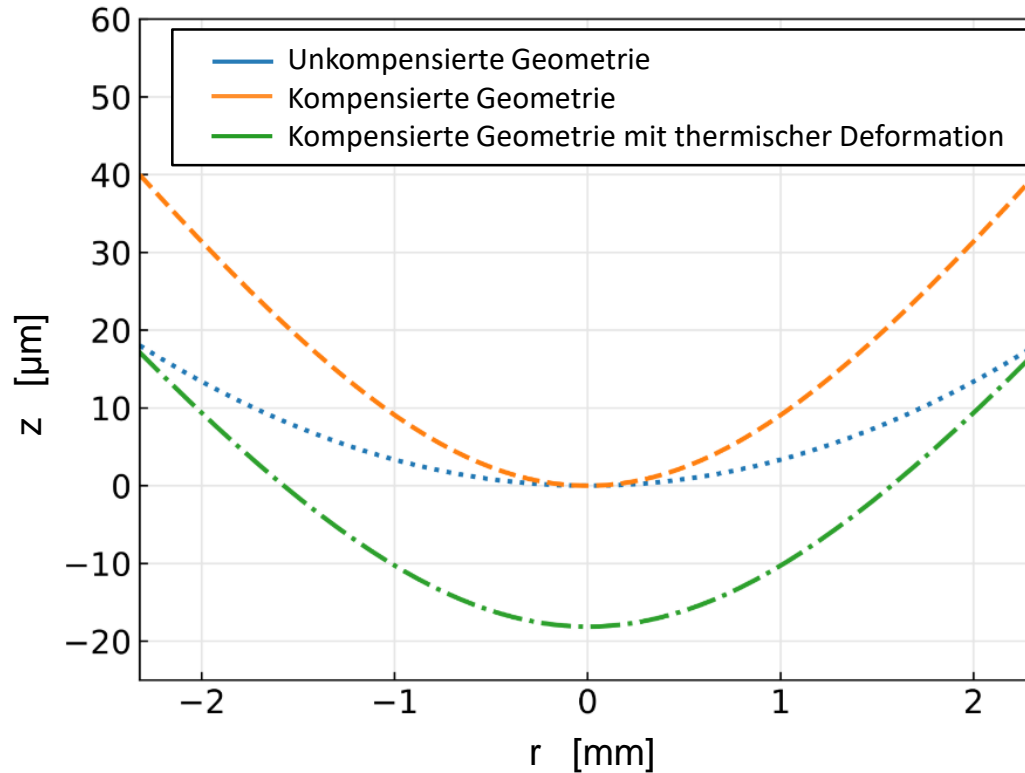


BFL: 304,0 mm  
Airy Radius: 57,8  $\mu\text{m}$   
RMS Radius 21,3  $\mu\text{m}$

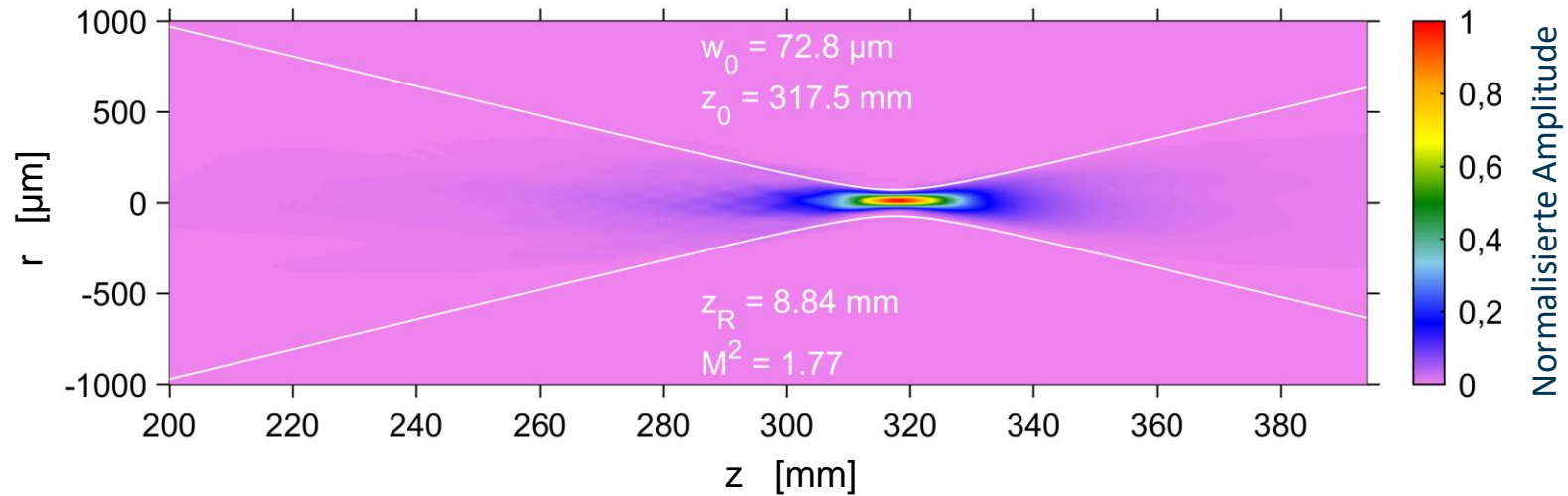
# Abbildung 5.12: Vergleich der Ausgangsgeometrie mit der für den Betriebszustand thermisch optimierten Geometrie



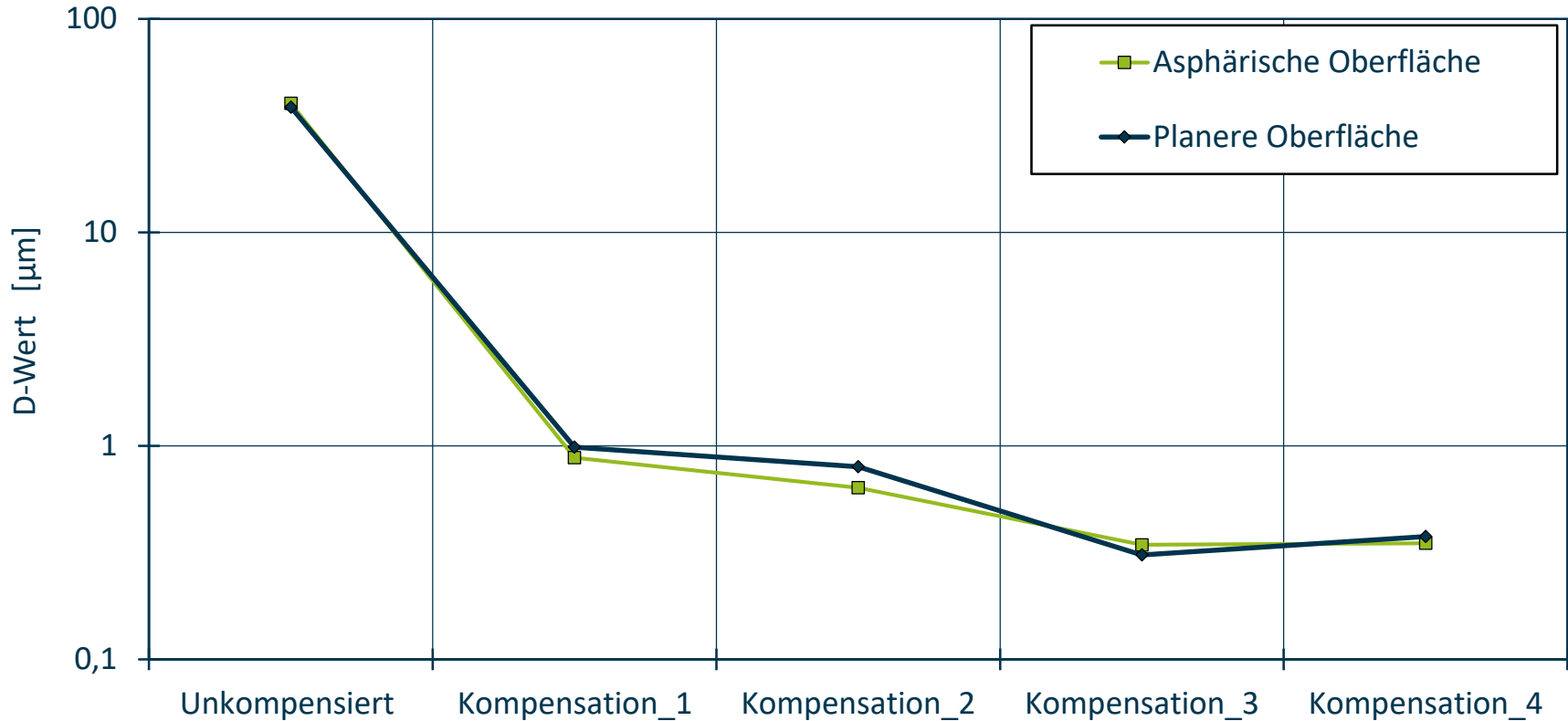
# Abbildung 5.13: Höhenprofil der kompensierten und unkompensierten Geometrie



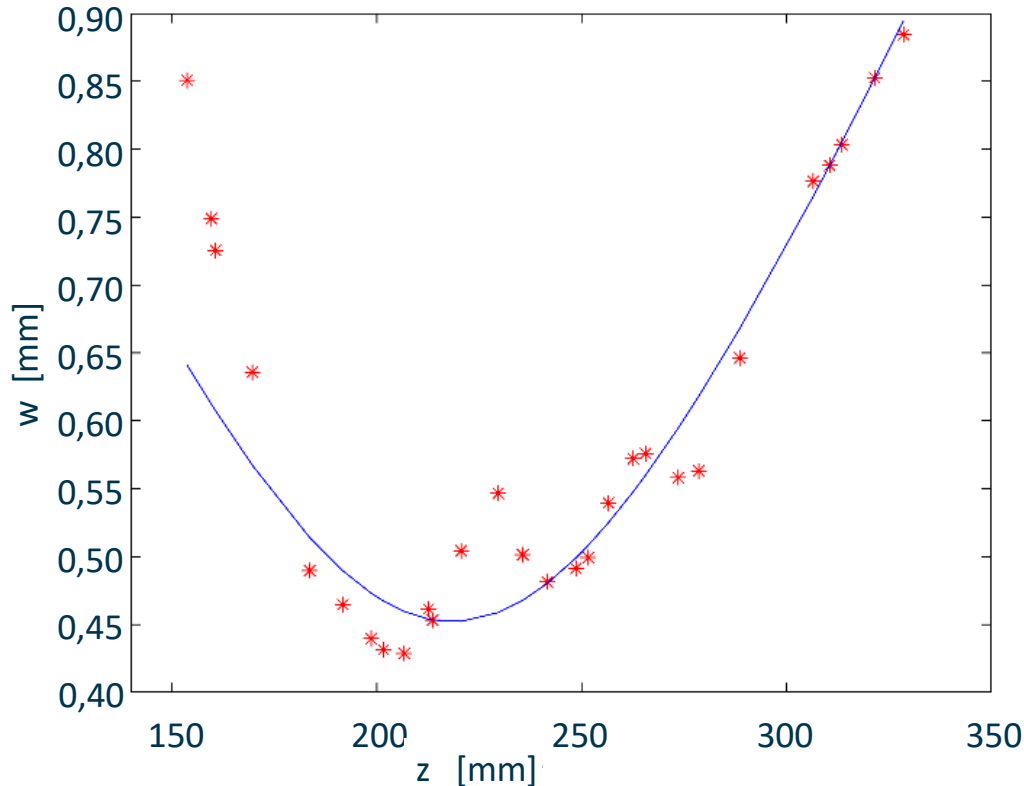
# Abbildung 5.14: Wellenoptisch simulierte Strahlkaustik der optimierten Linsengeometrie im thermisch belasteten Zustand



# Abbildung 5.15: Ergebnisse (D-Wert) der iterativen Kompensationsmethode

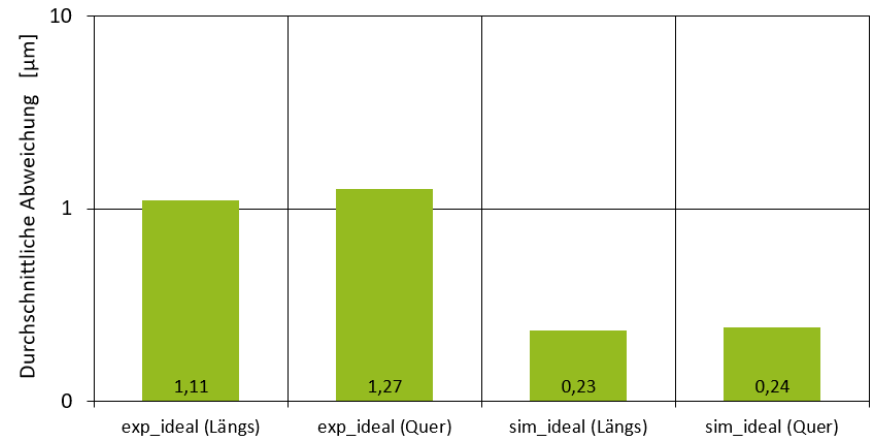
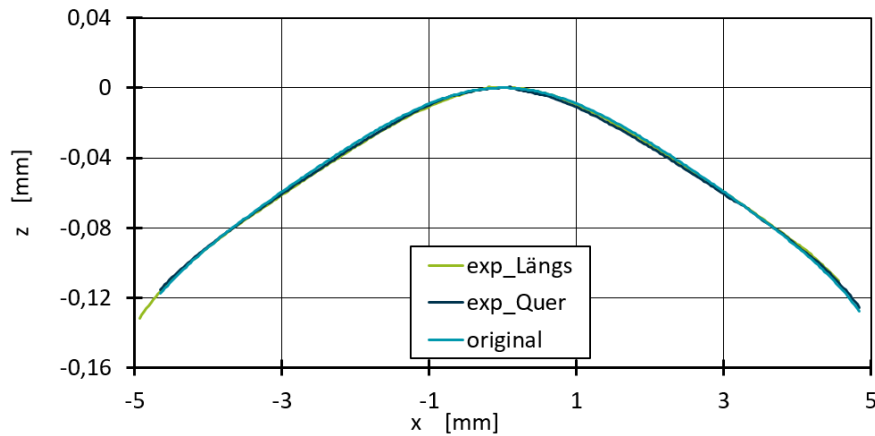


# Abbildung 6.1: Strahlkaustik der thermisch optimierten Linsengeometrie

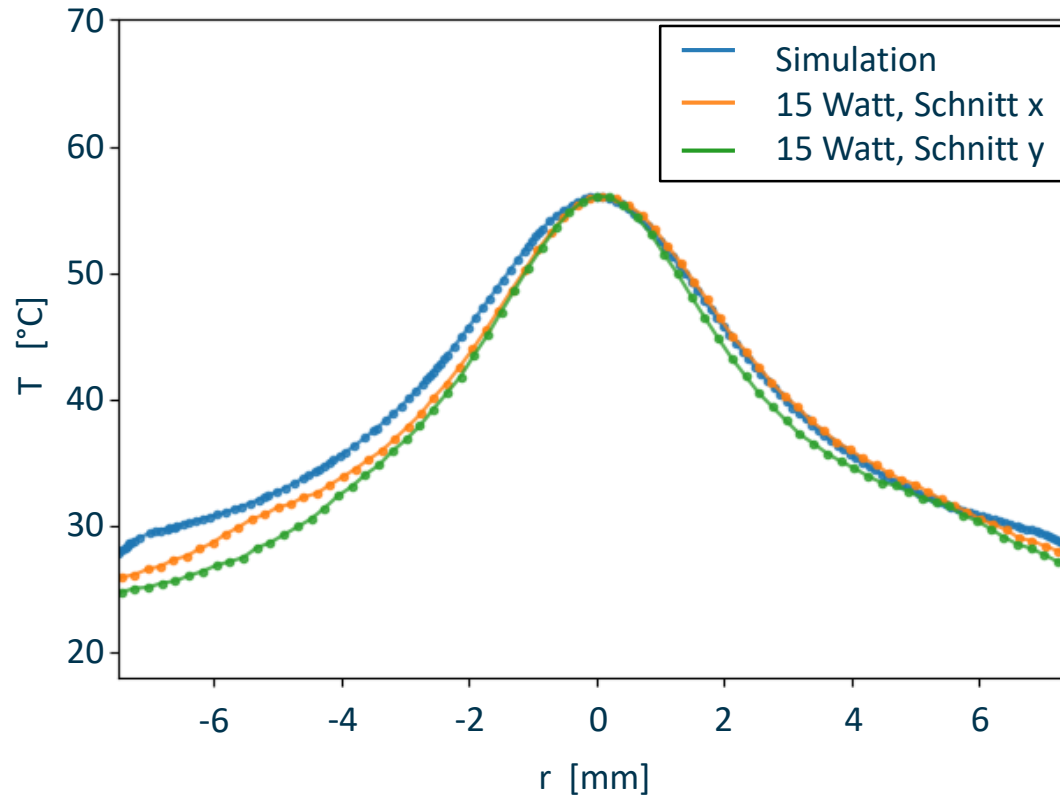


$w_0 = 0,50$  mm  
 $z_0 = 218,51$  mm  
 $z_R = 64,5$  mm  
 $M^2 = 9,30$

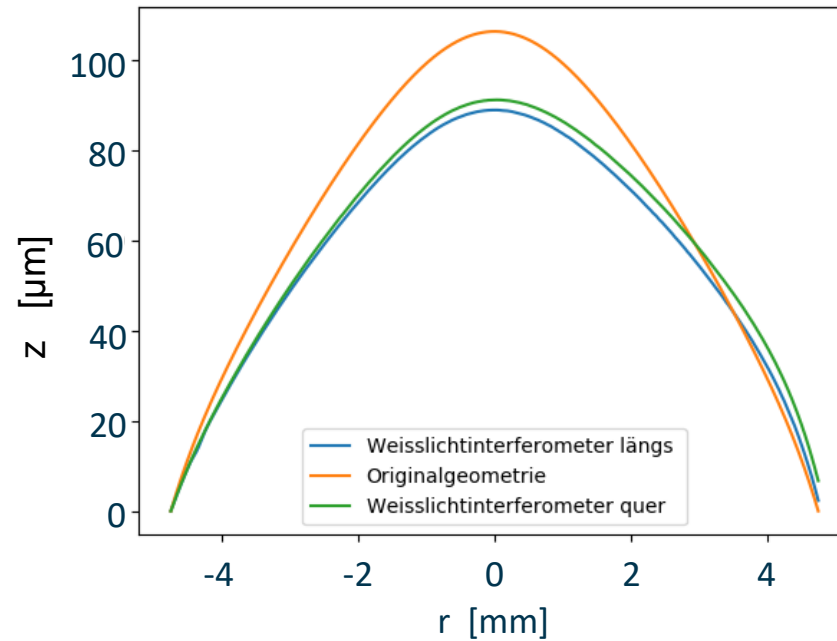
# Abbildung 6.2: Vermessungsergebnisse der Linsengeometrie mittels Weißlichtinterferometer



## Abbildung 6.3: Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturverteilung der Linse



# Abbildung 6.4: Vergleich der gekrümmten, gemessenen Linsenoberfläche mit der Originalgeometrie



# Abbildung 6.5: Vergleich der Kavitätsgeometrien

