

Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University
Hochschule für Telekommunikation Leipzig
Perlon – Monofil GmbH

**Entwicklung eines neuartigen energieeffizienten Herstell-
ungsverfahrens umweltverträglicher, optischer
Polymerfasern für Datenübertragung,
Beleuchtung und Sensorik**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter
dem Az: 32003 / 01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Markus Beckers
Prof. Dr.-Ing. Christian-Alex. Bunge
Dipl. Ing. (TU) Jürgen Büdenbender

Aachen/Leipzig/Dormagen, November 2018

Projektkennblatt

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	8
1 Einleitung	10
1.1 Bisher verwendete Materialien	11
1.2 Bekannte Fertigungsverfahren	12
1.3 Überblick zu Arbeitspaketen und zu erreichenden Zielen	13
2 Hauptteil	15
2.1 AP 1 – Definition von Anforderungen und Materialauswahl	15
2.1.1 Umwelteinfluss	15
2.1.2 Anforderungen an die Verarbeitbarkeit	16
2.1.3 Anforderungen an die Beständigkeit	18
2.1.4 Anforderungen an die optischen Eigenschaften.....	18
2.1.5 Kosteneffizienz	19
2.2 AP 2 – Modellierung des Zusammenhangs zwischen optischen/mechanischen Eigenschaften und der Fertigung	21
2.2.1 Theoretische Abschätzung der Abkühlrate über den Filamentradius	21
2.2.2 Beziehung zwischen Dichte und Brechzahl	24
2.2.3 Einfluss der Abkühlrate auf die Dichte	25
2.3 AP 3 – Prozessentwicklung	29
2.3.1 Filamentherstellung im Pilotmaßstab und Charakterisierung	30
2.3.2 Ökologische Bewertung des kontinuierlichen GI-POF- Fertigungsverfahrens.....	31
2.4 AP 4 – Produktanalyse	33
2.4.1 Optische Charakterisierung der hergestellten Filamente	33
2.4.2 Mechanische Fasercharakterisierung	40
2.4.3 Alters- und Umweltbeständigkeit	43
2.5 AP 5 – Ökobewertung	51
2.5.1 Marktanalyse	51
2.5.2 Materialbewertung	53
2.5.3 Prozessbewertung	54
2.5.4 Produktbewertung	55
3 Fazit	59
4 Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Überblick über die inhaltlichen Zusammenhänge der Arbeitspakete.....	14
Abbildung 2.1: Links: Temperaturverlauf über dem Filamentradius nach Abkühlung ($TU = 80\text{ °C}$) der Außenbereiche auf $TG = 117\text{ °C}$ bei verschiedenen TU ; rechts: Abkühlungszeit der Außenbereiche bis $TG = 117\text{ °C}$ bei verschiedenen TU	22
Abbildung 2.2: Links: Abkühlzeit auf $TG = 117\text{ °C}$ über dem Radius r bei verschiedenen TU ; rechts: mittlere Abkühlrate auf $TG = 117\text{ °C}$ über dem Radius r bei verschiedenen TU	23
Abbildung 2.3: Mittlere Dichten der bei unterschiedlichen Wasserbadtemperaturen ausgesponnenen Filamente.....	24
Abbildung 2.4: Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung [Dem05].....	27
Abbildung 2.5: Ausdehnung bei gleicher Ausgangslage bei unterschiedlichen Ausgangstemperaturen, darunter die zugehörigen Histogramme der Geschwindigkeiten, verteilt nach Maxwell-Boltzmann, $N = 3000$, $n = 300$, $T = 100$	28
Abbildung 2.6: Ausdehnung mit und ohne Cutoff-Radius a	28
Abbildung 2.7: Simulierter Einfluss der Abkühlrate auf die Dichte.....	29
Abbildung 2.8: Gemessener Brechungsindexverlauf der verwendeten Faser bei einer Wasserbadtemperatur von 35 °C . Referenzbrechungsindex bei $n_{\text{ref}} = 1,51$ [BBG14].....	37
Abbildung 2.9: Gemessener Verlauf des maximalen Einkoppelwinkels θ_{max} an elf Messpunkten der Faser bei einer Wasserbadtemperatur von 5 °C	38
Abbildung 2.10: Verlauf des Gangunterschieds zur Bestimmung von Eigenspannungen in einer bei 5 °C gekühlten GI-POF.....	39
Abbildung 2.11: Messaufbau zur Bestimmung des Klimaeinflusses auf die Faser.....	45
Abbildung 2.12: Verlauf der transmittierten Leistung von zehn Fasern in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Vorversuch).....	46
Abbildung 2.13: Verlauf der transmittierten Leistung in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit bei einer konstanten Temperatur von 20 °C . Es ist zu beachten, dass der Verlauf nicht über die Zeit, sondern die einzelnen Stufen des Klimazyklus dargestellt ist.....	47
Abbildung 2.14: Verlauf der transmittierten Leistung von zehn Fasern in Abhängigkeit der Temperatur.....	48
Abbildung 2.15: Verlauf der transmittierten Leistung von zehn Fasern für den Prozess des Spannungsarmglühens.....	50
Abbildung 2.16: Prognostizierte Entwicklung des weltweiten POF-Marktes [IG14].....	51
Abbildung 2.17: Entwicklungs- und Marktpotential optischer Fasern laut Befragung.....	53
Abbildung 2.18: Qualitativer Vergleich des CO_2 -Fußabdrucks von GI-POF nach dem neuartigen Fertigungsprozess und aus diskontinuierlichen Verfahren (vgl. [www15a]).....	55

Abbildung 2.19: Qualitativer Vergleich des CO₂-Fußabdrucks von GI-POF
aus verschiedenen kontinuierlichen Verfahren (vgl. [www15a]).....55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Liste der untersuchten Polymere mit Eignungsbewertung für den Einsatz in POF durch den Hersteller.	17
Tabelle 2.2: Zielkostenlücken im Pilot- und Technikumsmaßstab in [€/m].	20
Tabelle 2.3: Vergleich der Kettenmodelle bzgl. der Modellierbarkeit des Glasübergangs.....	25
Tabelle 2.4: Konstante und variierte Parameter während der Spinnversuche im Pilotmaßstab.	30
Tabelle 2.5: CO ₂ -Fußabdruck und Aufschlüsselung der einzelnen Emissionsquellen in der GI-POF Produktion.	32
Tabelle 2.6: CO ₂ -Fußabdruck und Aufschlüsselung der einzelnen Emissionsquellen der GI-POF Ummantelung mit Polyethylen.	32
Tabelle 2.7: Übersicht der Prozessparameter des Faktorenversuchsplans an der Pilot-anlage am ITA.....	33
Tabelle 2.8: Per Cut-Back-Verfahren gemessene Dämpfungswerte in dB/m aus dem 2 ⁴ -Faktorenversuchsplan im Pilotmaßstab.....	34
Tabelle 2.9: Effekte und statistische Signifikanzen der Einflussfaktoren auf die Dämpfung im Pilotmaßstab.	35
Tabelle 2.10: Effekte und statistische Signifikanzen der Wechselwirkungen im Pilotmaßstab.	36
Tabelle 2.11: Gewichte typischer Kommunikationskabel im Vergleich mit der Polymerfaser.....	56
Tabelle 2.12: Querschnitte typischer Kommunikationskabel im Vergleich zur Polymerfaser.....	56
Tabelle 2.13: Anteile einzelner Materialien in verschiedenen Typen gängiger Kommunikationskabel.	57

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

b	Breite
HSV	High Speed Video Kamera
PET	Polyethylenterephthalat
α	Winkel zwischen x und y
γ	Winkel zwischen a und b

Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht stellt eine Aufstellung der erarbeiteten Ergebnisse in Zusammenhang mit den in der Projektbeschreibung definierten Arbeitspaketen dar.

Seit dem letzten Zwischenbericht wurde mit dem Auftreten von Lufteinschlüssen die Ursache der erhöhten Dämpfung innerhalb der Faser eruiert. Mithilfe einer Entgassungsschnecke sollten die Lufteinschlüsse verringert werden. Leider konnte der Entgassungsextruder wegen technischer Probleme nicht innerhalb des Projektzeitraumes in Betrieb genommen werden. Zudem führt Lunkerbildung durch starke Kontraktion während des Abkühlvorgangs zuerst zum Aufreißen des Materials im Zentrum der Faser und mit der Zeit zu zusätzlichen Lufteinschlüssen. Zur Verringerung der Lunkerbildung wurde eine 8-Schritt-Methodik entworfen und durchgeführt. Die Methodik besteht aus folgenden Schritten:

1. Identifikation und Analyse der qualitätskritischen Prozessstufe
2. Analyse der Prozessempfindlichkeit
3. Anwenden der Bilanzhüllentechnik für Kräfte, Momente, Stoff- und Energieströme
4. Abschätzen relevanter Messgrößen
5. Auswahl der Messtechnik
6. Durchlaufen der experimentellen Phase
7. Erstellen einer Bewertungsmatrix
8. Festlegen einer Überwachungsstrategie

Es wurden mehrere Maßnahmen ermittelt, mit denen die Lunkerbildung verringert werden kann. So führt ein geringerer Faserradius zu weniger Lunkerbildung, da das Aufreißen der Faser mit dem Volumen der Faser zunimmt. Zudem lassen die inneren Kräfte, die zur Lunkerbildung führen, bei moderaterer (also langsamerer bzw. geringerer) Abkühlung der Faser nach. Da eine geringere Abkühlung jedoch teilweise dem Ansatz widerspricht, durch definierte Abkühlraten ein bestimmtes Brechzahlprofil zu erhalten, muss im weiteren Verlauf des Vorhabens mithilfe einer Optimierung ein Kompromiss zwischen Lunkerbildung und Brechzahlprofil ermittelt werden. Zuletzt wirkt sich die Materialwahl ebenfalls entscheidend auf die Lunkerbildung aus. Das Material sollte eine geringe thermische Ausdehnung und eine hohe mechanische Robustheit aufweisen.

Zur Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle wurde eine Online-Messtechnik entwickelt, mit der Filamentdurchmesser, Filamentzugkraft und Brechzahlprofil während der Produktion bestimmt werden können. Dazu werden verschiedene berührungslose, optische oder kapazitive Sensoren verwendet.

Insgesamt wird die vorgesehene Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung eingehalten. Durch die bis Dezember 2017 verzögerte Beschaffung des bestellten Entgasungsextruders der Perlon-Monofil GmbH kann es allerdings im weiteren Verlauf zu einer kostenneutralen Verlängerung des Zeitplans kommen. Die Erreichung der Ziele des Vorhabens sind hierdurch nicht weitergehend beeinträchtigt.

1 Einleitung

Erdöl-basierte Produkte oder erdölintensive Produktionen werden wirtschaftlich immer riskanter in Zeiten knapper werdender Ölreserven, steigender Rohölpreise, politischer Instabilität und der Verbrauchernachfrage nach Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen. Als Alternative soll in diesem Vorhaben ein neuartiges Herstellungsverfahren von optischen Gradientenindex-Polymerfasern entwickelt werden, das ohne Zusatzstoffe für die Dotierung auskommt. Dieses Verfahren hat zudem den Vorteil, die relativ komplexe Struktur von Gradientenindex-Fasern, die man für hohe Bandbreiten benötigt, in einem einzigen Schritt ohne eine Vorform erzeugen. Hierzu wird die Faser im letzten Schritt der Herstellung schnell abgekühlt, so dass sich entlang des Kernradius' ein Dichte- und Brechzahlgradient ergibt. Die Adaption dieses Verfahrens auf neuartige, ökologisch nachhaltige Polymere ermöglicht dabei eine Umweltentlastung, die durch den speziellen Herstellungsprozess noch verstärkt wird. Dieser Schritt unterstützt die Suche nach alternativen Rohstoffen für die POF. Zudem ermöglicht schon der Einsatz von optischen Polymerfasern für die Kurzstreckenkommunikation selbst eine Umweltentlastung im Vergleich zur herkömmlichen Kommunikation über Kupferkabel, die auf Grund ihrer Masse einen deutlich höheren Ressourceneinsatz erfordern.

POFs werden nach zwei verschiedenen Grundtypen unterschieden: die Stufenindexfaser (SI-POF) und die Gradientenindexfaser (GI-POF). Die Stufenindexfaser ist weit verbreitet. Sie weist eine Kern-Mantel-Struktur mit kreisförmigem Querschnitt auf. Die Lichtleitung erfolgt im Kern durch Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel [Dem08]. Aus diesem Grund ist ein Lichtstrahl für die Lichtleitung verloren, wenn er den Kern verlässt. Für eine gute Lichtleitung muss deshalb der Einfallswinkel des Strahls auf die Grenzfläche kleiner als der Grenzwinkel sein, damit es zu einer Totalreflexion kommt. Bei lichtleitenden Fasern ist der Begriff Moden von großer Bedeutung. Mit Moden werden Strahlen bezeichnet, die unter verschiedenen Winkeln in die Faser eintreten. Aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz folgt, dass sich aus den unterschiedlichen Einfallswinkeln auch andere Strahlengänge durch die Faser ergeben. Die unterschiedlichen Strahlengänge führen zu einer Streuung der Strahlenweglängen. Dies wird auch als Modendispersion bezeichnet. Aus ihr resultiert, dass kurze Eingangspulse innerhalb der Faser verbreitert werden und somit die maximal erreichbare Datenrate reduziert wird. Die Modendispersion kann u.a. durch den Einsatz von Gradientenprofilfasern verringert bzw. minimiert werden. Erreichen lässt sich dies durch ein spezielles Brechungsindexprofil als Funktion des Radius'. Nimmt der Brechungsindex $n(r)$ mit steigendem Radius r ab, so wird das einfallende Licht zum Zentrum der Faser hin gebrochen [Bey74]. Diese Tatsache folgt direkt aus dem Prinzip von Fermat [Dem08]. In erster Näherung können die Modenlaufzeiten mit einem Parabelprofil angeglichen und die Bandbreite der Faser optimiert werden. Bei einem parabolischen Brechzahlprofil breiten sich die Lichtstrahlen, im Gegensatz zum Zickzack-

Verlauf durch die Totalreflexion am Mantel der Stufenindexfaser, auf geschwungenen Bahnen aus. Dadurch kommt es auch zu unterschiedlichen Weglängen. Diese werden aber zu Teilen durch die geringeren Brechzahlen abseits der Mittelachse kompensiert, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts hier höher ist. Die Modendispersion kann auf diese Weise im Vergleich zur Stufenindexfaser um drei Zehnerpotenzen gesenkt werden.

1.1 Bisher verwendete Materialien

Das am häufigsten verwendete Material für polymeroptische Fasern ist der Thermoplast PMMA (Polymethylmethacrylat, Plexiglas®). Das aus Äthylen, Blausäure und Methylalkohol hergestellte PMMA ist beständig gegen Wasser, Laugen, verdünnte Säuren, Benzin und Mineralöl. Entscheidend für die optische Transparenz des Materials ist die amorphe Struktur des polymerisierten Materials. PMMA besitzt einen Brechungsindex von 1,492 und eine Glasübergangstemperatur T_g im Bereich von +95 °C bis +125 °C. Um die Temperaturbeständigkeit zu erhöhen, können durch chemische Einwirkungen oder UV-Bestrahlung Vernetzungen zwischen den Polymerketten erzeugt werden. Dabei steigen jedoch Streuung und Dämpfung an und die mechanischen Eigenschaften verschlechtern sich. Das Material kann bei Zimmertemperatur und 50 % Luftfeuchte bis zu 1,5 % Wasser aufnehmen, wodurch die Dämpfungseigenschaften zusätzlich beeinflusst werden. Die acht in jedem MMA-Monomer vorhandenen C-H-Bindungen verursachen durch ihre Oberschwingungen die hauptsächlichen Dämpfungsverluste in PMMA-POFs [Gra99].

Zur Verringerung der Dämpfung entstand schon frühzeitig die Idee, Materialien zu verwenden, die weniger oder gar keine C-H-Bindungen aufweisen, bzw. die Wasserstoffatome durch andere Atome der 7. Hauptgruppe auszutauschen (z. B. Deuterium, Fluor oder Chlor). Da schwerere Kerne niedrigere Schwingungsfrequenzen besitzen, lassen sich so die Dämpfungsbanden zu größeren Wellenlängen hin verschieben.

Neben den oben beschriebenen, erdölbasierten Polymeren können auch Biopolymere als Grundmaterial für optische Fasern dienen. Grundsätzlich lassen sich diese in verschiedene Kategorien einteilen. Nicht alle dieser Polymere haben gute optische Eigenschaften oder lassen sich einfach verarbeiten. Einige der Materialien lassen sich ggf. nicht direkt als Fasermaterial nutzen, können aber in der Kabelkonstruktion konventionelle Polymere ersetzen, wie z.B. Polyurethan. Von den vielen möglichen Biopolymeren zeigen vor allem Biopolyamid (BioPA), Biopolyethylen (BioPE) und Biopolyethylenterephthalat (Bio-PET) gute Eigenschaften, um als Ausgangspunkt der Untersuchungen zu dienen.

Polyamide sind Kunststoffe, die sich sehr gut für Fasern und technische Anwendungen eignen. Polyamide werden heute für anspruchsvolle Spritzgussanwendungen, extrudierte Produkte, Hohlkörper, Bekleidungs-, Dekor- und technische Textilien eingesetzt. Polyamide werden in der Regel aus Dicarbonsäuren und Diaminen hergestellt. Biopolyamide sind ganz oder teilweise biobasiert, je nachdem, ob die Dicarbonsäure, das Diamin, oder beide aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Eine wirtschaftlich bedeutende Dicarbonsäure zur Herstellung von Bio-Polyamiden ist die Sebacinsäure, die beispielsweise aus Rizinusöl hergestellt werden kann.

Biobasiertes Polyethylen ist ein thermoplastisches Harz produziert aus Ethylen, das aus aus Zuckerrohr gewonnenem Ethanol hergestellt wird. Es ist ein zu 100% nachwachsender Rohstoff, der zur Reduzierung der Treibhausgasemission beiträgt. Es können verschiedene Polymertypen auf Basis von Dichte und Verzweigung erzeugt werden. Das Monomer Ethylen aus Zuckerrohr ist durch unterschiedliche chemische Verfahren herstellbar. Das Harz, dessen Eigenschaften identisch mit denen von herkömmlichem Polyethylen sind, ist somit für optische Fasern anwendbar und ist außerdem recycelbar.

PET besteht aus einer Terephthalat- und einer Diol-Komponente. In einem BioPET ist mindestens der Terephthalat und/oder Diol-Komponente aus einem biologisch basierten Material abgeleitet. Diese biobasierten PET haben fast gleichbedeutende Eigenschaften mit petrobasierten PET unter Laborbedingungen.

1.2 Bekannte Fertigungsverfahren

Vorhandene Herstellungsverfahren für POFs lassen sich grundsätzlich in kontinuierliche bzw. diskontinuierliche klassifizieren. Gemeinsam sind für beide die durchzuführenden Grundschritte: So müssen zuerst die Ausgangswerkstoffe gründlich gereinigt werden, bevor die Polymerisation mit anschließender Fasergeometrieformung erfolgen kann.

Das Gradientenindexprofil für GI-POFs wird dabei auf herkömmliche Weise durch die Erzeugung eines Mischverhältnisprofils von zwei Komponenten mit unterschiedlichen Brechungsindizes erreicht. Dies können z. B. ein reines Monomer und ein mit Dotanden versetztes Monomer sein. Eine kontinuierliche Herstellungsvariante ist eine Co-Extrusion mit Diffusion. Bei diesem Schmelzspinnverfahren werden die Granulate für Kern (1. Komponente) und Mantel (2. Komponente) aufgeschmolzen und mit Hilfe einer Spinnpumpe durch Sand- und Vliesfilter in eine Düse gepresst. In einer nachfolgenden Diffusionsstrecke diffundieren die beiden Komponenten ineinander. Durch die Diffusion kann die Konzentrationsverteilung des Dotanden so eingestellt werden, dass sich ein Gradientenindexprofil ergibt [Sch99]. Die Diffusion wird durch eine Fixierung der beiden Komponenten gestoppt, bevor es zu einer gleichmäßigen Verteilung

kommt. Die Fixierung kann z. B. durch eine UV-Licht-induzierte Polymerisation erfolgen. Die Aufwicklung der Faser erfolgt wie beim Ziehen der Faser aus dem Preform [Sch99]. Bei einer solchen Anlage liegen die Abzugsgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 18 m/min und 60 m/min [Sch99]. Statt einer kontinuierlichen Extrusion kann auch eine diskontinuierliche Schubextrusion verwendet werden, die jedoch i.A. weniger kosteneffizient ist. Wird die Gradientenindexprofil-Faser durch das beschriebene diskontinuierliche Preform-Ziehverfahren hergestellt, muss bereits der Preform ein Gradientenindexprofil aufweisen. Dies kann z. B. durch einen chemischen Gasabscheidungsprozess erfolgen. Dabei wird ein Gemisch aus zwei Komponenten mit unterschiedlichen Brechungsindizes in ein perforiertes Innenrohr geleitet. Durch Wärmeeinwirkung polymerisieren die Komponenten auf der Innenseite eines Außenrohres. Während des Prozesses wird das Mischungsverhältnis der beiden Komponenten stetig oder stufenweise geändert. Auf diese Weise lässt sich ein Preform aus Schichten mit verschiedenen Mischungsverhältnissen und somit Brechungseigenschaften herstellen.

Die Herstellung von GI-Fasern nach den herkömmlichen Prinzipien ist mit einem höheren Aufwand verbunden. Zudem werden Additive benötigt. Für die Herstellung von Bikomponenten-Fasern ist zusätzlich ein aufwendigerer Düsenaufbau erforderlich. In der Gesamtsicht weist das Schmelzspinnverfahren die meisten Vorteile in Bezug auf die Herstellung einer Gradientenindexprofilfaser auf, da hierbei die Prozessparameter und somit auch die Fasereigenschaften in einem kurzen Zeitraum schnell verändert werden können. Die verfahrensbedingt geringere Reinheit des Ausgangsmaterials kann hier vernachlässigt werden. Eine verbesserte GI-POF Herstellung sollte deshalb möglichst auf einem Schmelzspinnverfahren beruhen.

1.3 Überblick zu Arbeitspaketen und zu erreichenden Zielen

Im Rahmen des Vorhabens sollte ein innovativer Fertigungsprozess für Gradientenindex-Polymerfasern im industriellen Maßstab entwickelt werden, der in dieser Form zu Projektbeginn noch nicht existierte und durch vollständigen Verzicht auf zusätzliche Chemikalien zur Dotierung des Fasermaterials eine Umweltentlastung erreicht. Die Prozessqualität wird vor allem anhand der Faserqualität in Form von Dämpfung und Bandbreite bestimmt. Für die zu entwickelnde Faser sollten folgende Zielspezifikation erreicht werden:

- Dämpfung unter 500 dB/km
- Bandbreiten-Längen-Produkt von mindestens 200 MHz*km

Neben den Zielspezifikationen der zu entwickelnden Faser soll die Fertigung so effizient ausgelegt werden, dass

- der Energie- und Wasserverbrauch im Vergleich zu derzeitigen Fertigungsprozessen für derzeitige Telekommunikationskabel um 50 % gesenkt werden
- die Recyclbarkeit des Produkts auf über 90 % gehoben werden kann.

Über den gesamten Lebenszyklus des Produkts soll die Umweltbelastung im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen um 70 % reduziert werden.

Zur Lösung der Fragestellung müssen zuerst die infrage kommenden Materialien eruiert und hinsichtlich ihrer optischen, mechanischen und fertigungstechnischen Eigenschaften hin untersucht werden. Dies soll in AP 1 zum Beginn des Vorhabens geschehen. Gerade der Zusammenhang zwischen den Materialeigenschaften und den Auswirkungen auf den Fertigungsprozess muss systematisch analysiert und modelliert werden. Da die Faser für die Lichtleitung ausgelegt sein soll, sind auch die optischen Eigenschaften des Materials und der später gefertigten Faser vorherzusagen, sodass auch hierfür eine Modellierung der optischen Eigenschaften notwendig ist (AP 2). Die Hauptaufgabe im Rahmen des Projekts ist die Entwicklung eines Herstellungsprozesses für die Faser. Daher steht die Prozessentwicklung im Großen wie im Kleinen sowie Maßnahmen der Qualitätssicherung im Mittelpunkt des beantragten Vorhabens (AP 3). Schließlich müssen in AP 4 die gefertigten Produkte charakterisiert werden, um aus diesen Erkenntnissen Rückschlüsse auf evtl. Anpassungen im Produktionsprozess zu gewinnen. In allen Arbeitspaketen wird der Umwelteinfluss auf der jeweiligen Abstraktionsebene bzw. Anwendungsgebiet im Einzelnen betrachtet und bewertet. Parallel dazu erfolgt eine Bewertung der Materialien, Prozesse und des Endproduktes hinsichtlich seiner Umweltbelastung, des Energieverbrauchs und der gesamten Ökobilanz (AP 5). Die inhaltlichen Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** veranschaulicht.

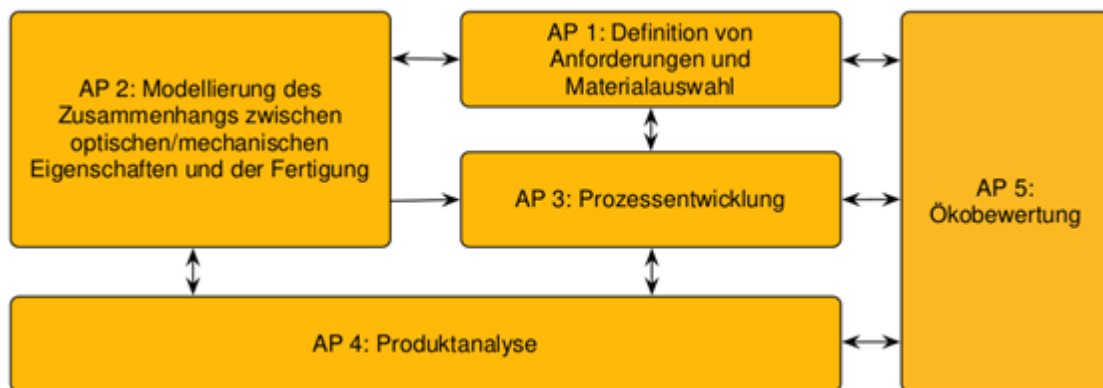


Abbildung 1.1: Überblick über die inhaltlichen Zusammenhänge der Arbeitspakete.

2 Hauptteil

Im Hauptteil des Berichts sollen die wichtigsten Arbeiten und Ergebnisse aller Arbeitspakete beschrieben werden. Die Struktur lehnt sich daher direkt an die Arbeitspakete an.

2.1 AP 1 – Definition von Anforderungen und Materialauswahl

Das erste Arbeitspaket diente der Vorbereitung der Arbeiten, indem die grundlegenden Anforderungen definiert und daraus ableitend Materialien und Vorgehensweisen ausgewählt werden konnten.

2.1.1 Umwelteinfluss

Die Anforderungen an den Umwelteinfluss sind größtenteils schon in den Zielen des Projekts wiedergegeben. Allerdings ist im Rahmen des Vorhabens eine Methodik für die Bewertung des Umwelteinflusses entwickelt worden, die einen verlässlichen Vergleich zu bekannten alternativen Kommunikationslösungen erlaubt. Da die im Rahmen des Projekts zu entwickelnden Gradientenindex-Polymerfasern einen Dämpfungsbelag von maximal 500 dB/km und ein minimales Bandbreiten-Längen-Produkt von 200 MHz*km aufweisen sollen, ergeben sich damit Anwendungsszenarien im Bereich der Inhausnetze und anderer Kurzstreckenverbindungen von ca. 100 m, die also max. 50 dB Dämpfung tolerieren und eine Bandbreite von ca. 2 GHz fordern. Unter diesen Bedingungen sind Datenraten im Bereich von 1 Gbit/s bis 10 Gbit/s möglich, für die sonst aufwändig elektrisch geschirmte Ethernetkabel der Kategorie 6 und höher, sowie Glasfasertechnologie eingesetzt würden. Hierbei muss beachtet werden, dass es sich um Kabel als Endprodukt handelt, sodass die eigentliche signalführende Ader noch um die Komponenten ergänzt werden, die die mechanische Stabilität, die Handhabbarkeit, Feuersicherheit und ggf. elektrische Stromversorgung sicherstellen. All diese Faktoren sind insbesondere bei elektrischen Kabellösungen wie Ethernetkabeln von großer Bedeutung, können aber bei Polymerfaserlösungen entfallen. Dort bestehen die Kabel fast ausschließlich aus dem optischen Teil – also Kern und Mantel – sowie einem dünnen Schutzmantel aus einem einfachen, lichtundurchlässigen Polymer. Während die optischen Anforderungen an die inneren Bereiche Kern und teilweise auch an den Mantel sehr hoch sind und die entsprechende Materialauswahl sehr einschränken, sind für den Schutzmantel auch einfachere Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen problemlos verwendbar. Für die Wahl des Polymers im optischen Kern stellte sich leider früh heraus, dass die sich auf dem Markt befindlichen Polymere derzeit nicht über die optische Qualität mit gleichzeitiger Verarbeitbarkeit und den geforderten mechanischen Eigenschaften verfügen. Das ist kein grundsätzliches Problem, sondern eher der

Marktsituation geschuldet, die eine Entwicklung solcher optischer Polymere derzeit als nicht rentabel erscheinen lässt. Allerdings zeigen sich schon erste Beleuchtungsanwendungen im Automobilbereich, die nach Biopolymeren verlangen und teilweise auch schon in der Erprobung haben. Wenn auch die geforderte optische Qualität für Beleuchtungsanwendungen geringer ist als für die optische Datenkommunikation, muss davon ausgegangen werden, dass bald auch dafür Biopolymere zur Verfügung stehen werden.

Die im beschriebenen Vorhaben durchgeführten Arbeiten und insbesondere die Entwicklung des neuartigen, kontinuierlichen Fertigungsprozesses für Gradientenindex-Polymerfasern erhöht die Umweltverträglichkeit in zwei Arten:

1. Auch wenn die Arbeiten sich auf die Weiterentwicklung des Prozesses für PMMA konzentriert haben, so sind viele der Auslegungen des Prozesses und der gelösten Probleme direkt auf andere Polymere, die aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, übertragbar.
2. Zudem ist durch den weiterentwickelten Prozess eine Gradientenindexfaser realisierbar, die vollständig auf umweltschädigende und im Fertigungsprozess problematische und sogar gefährliche Dotierstoffe wie Fluor verzichten kann. Allein dieser Aspekt erhöht die Umweltverträglichkeit enorm.

Zudem erlauben die Gradientenindexfasern den Einsatz sehr viel einfacherer und energiesparender aktiver Technik im Vergleich zu rein elektrischen Lösungen. Der Vorteil ergibt sich in zwei Aspekten:

1. Optische Polymerfasern sind viel kompakter und einfacher im Aufbau. Sie verzichten komplett auf metallische Werkstoffe und haben ein deutlich geringeres Volumen. Das wird im abschließenden Abschnitt der ökologischen Produktbewertung noch einmal detailliert beschrieben.
2. Zudem können in Gradientenindex-Polymerfasern sehr einfache Übertragungsverfahren verwendet werden, die deutlich geringere elektrische Leistungen benötigen als bei elektrischen Lösungen, die auf Parallelisierung setzen und somit eigentlich mehrere elektrische Leistungen neben einander repräsentieren. Wegen der höheren zur Verfügung stehenden Bandbreite sind zudem einfachere Modulationsverfahren einsetzbar, die vollständig auf Signalverarbeitung und komplexe Demodulationsschritte verzichten. Dadurch wird im Betrieb zu jeder Zeit Energie eingespart, was sich bei den potentiell sehr vielen Übertragungstrecken in Haushalten schnell zu großen Einsparungen aufaddiert.

2.1.2 Anforderungen an die Verarbeitbarkeit

Neben den Umwelanforderungen müssen vor allem die Eigenschaften hinsichtlich der Produktion und Verarbeitbarkeit betrachtet werden, um abschätzen zu können, ob das

vorliegende Material für die Herstellung von optischen Fasern geeignet ist. Der Aspekt der Verarbeitbarkeit sollte in diesem Arbeitspaket betrachtet werden.

Es wurden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Eigenschaften von POF und Polymeren ausgearbeitet und auf Basis dessen Anforderungen erarbeitet. Betrachtet wurden die Eigenschaften Dämpfung bzw. Transparenz, Haze (Lichtstreuung in Polymeren), Brechungsindex, Betriebstemperatur, Produktionsverfahren und Fließverhalten, Alterung und Wasseraufnahme sowie Preis. Auf Basis der genannten Eigenschaften können Polymere einer ersten Einschätzung für ihre Eignung in POF unterzogen werden.

Tabelle 2.1: Liste der untersuchten Polymere mit Eignungsbewertung für den Einsatz in POF durch den Hersteller.

Material	Handelsname	Hersteller	Eignungsbewertung
PMMA	Plexiglas® POQ64	Evonik Industries	geeignet
	Plexiglas® 8N	Evonik Industries	geeignet
	Plexiglas® 7H	Evonik Industries	geeignet
PS	Polystyrol 168 N	BASF	geeignet
SMMA	NAS30	Styrolution	geeignet
COC / COP	TOPAS 5013	Ticona	geeignet
	Arton F4520	JSR	geeignet
	ZeonEx 330R	Zeon	unsicher
	ZeonEx E48R	Zeon	unsicher
PC	Makrolon 2405	Bayer	geeignet
	Panlite AD5503	Teijin Chem.	unsicher
	Panlite L-1250Y	Teijin Chem.	unsicher
PA	Trogamid CX7323	Evonik Industries	unsicher
SAN	Luran 338L	Styrolution	unsicher
PMP	TPX DX845	Mitsui Chemicals	unsicher
TPU	Texin 3080D	Bayer	unsicher

Innerhalb dieses Abschnitts werden die Ergebnisse der Untersuchung von 16 unterschiedlichen Polymeren vorgestellt. Diese Materialien lassen sich in neun Materialgruppen einteilen. Neben der Materialgruppe werden in Tabelle 2.1 zudem der Han-

delsname, der Hersteller und eine Eignungsbewertung des Polymers für den Einsatz in POF durch den Hersteller angegeben. Die Eignungsbewertung durch den Hersteller des jeweiligen Polymers kann „geeignet“ oder „unsicher“ ausfallen.

Des Weiteren wurden zwei bio-basierte, aromatische und polyesterbasierte TPU mit hohem Weichanteil (Estane® ECO 62A NAT 021 TPU und Pearlthane® ECO D12T80) untersucht, welche von den Firmen Lubrizol Advanced Materials BVBA, Westerloo-Oevel, Belgien und Lubrizol Advanced Materials Manufacturing Spain, S.L., Barcelona, Spanien in Form von Granulat zur Verfügung gestellt wurden. Gewählt wurden diese Polymere aufgrund ihrer geringen Kristallinität, welche für geringe Streuung und hohe Transparenz erforderlich ist, der zu erwartenden Elastizität und Festigkeit sowie nach ökologischen Gesichtspunkten.

2.1.3 Anforderungen an die Beständigkeit

Die Anforderungen an die Beständigkeit wurden zur Projektbeginn relativ offen gelassen. Sie unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Anwendungsszenarien sehr. Allerdings konnten allgemeine Anforderungen für optische Kommunikationssysteme formuliert werden, die die optischen Fasern als Mindestanforderung erreichen müssen. Diese sind bspw. Im Telcordia-Standard GR-409 für Kabel in Innenbereichen beschrieben¹:

- Betriebstemperatur: -20 °C - +70 °C
- Lagertemperatur: -40 °C - +70 °C
- Thermische Zyklen von -20 °C bis +65 °C

Neben diesen Temperaturanforderungen gibt es noch u.a. Anforderungen hinsichtlich der Entflammbarkeit sowie gegenüber chemischen Substanzen. Die meisten dieser Anforderungen kann man allerdings durch den eigentlichen Kabelaufbau erfüllen, ohne dass die eigentliche Faser dadurch besondere Einschränkungen erleidet. Dieses würde durch eine einfache Substituierung der aktuell verfügbaren Polymerfasern durch neuartige Gradientenindexfasern in Kabeln mit demselben Aufbau keinen Unterschied ergeben, weshalb im Rahmen des Projekts vornehmlich die geforderten Temperaturbereiche betrachtet wurden und durch Alterungs- und Temperaturtests untersucht.

2.1.4 Anforderungen an die optischen Eigenschaften

Die Anforderungen an die optischen Eigenschaften sind grundlegend schon in den Projektzielen definiert. Der maximale Dämpfungsbelag beschreibt die optische Qualität hinsichtlich Reinheit gegenüber zusätzlichen Stoffen wie OH-Bindungen oder anderen

¹ Telcordia GR-409, *Generic Requirements for Indoor Fiber Optic Cable*.

Materialen, die zu Absorption im Wellenlängenbereich der Datenverbindung führen, sowie gegenüber Fremdkörpern, zu denen auch Lufteinschlüsse gehören, die durch Streuung erhöhte Verluste verursachen. Im Rahmen des Vorhabens ergab sich bei der Marktstudie zu den Biopolymeren, dass die optische Reinheit in den meisten Fällen nicht ausreihend für die geforderten Dämpfungsbeläge war. Bei der Entwicklung des Fertigungsprozesses für PMMA zeigte sich, dass insbesondere Lunker – Lufteinschlüsse, die durch relativ große und schnelle Dichteveränderung entstehen – zu erhöhter Streuung führte, wobei auch Staub ein weiterer Aspekt war, der schnell klar machte, dass die Fertigung höchstwahrscheinlich mindestens in einem Grauraum mit einer Reinheit von unter 1000 Staubpartikeln pro Kubikfuß eingerichtet werden muss.

2.1.5 Kosteneffizienz

Für den wirtschaftlichen Erfolg eines technischen Konzeptes sind unter anderem die Konkurrenz- und die Kostensituation von großer Bedeutung. Deshalb erfolgte zu Beginn der Arbeit ein technologisches Benchmarking zur Ermittlung von Konkurrenzprozessen, worin ein *Target Costing* integriert ist. Anschließend erfolgte die Bewertung der mit dem neuen Herstellungsverfahren produzierten Fasern im Zuge der Fortführung des *Target Costing*.

2.1.5.1 Bestimmung der Zielkosten

Als Referenz wird die Faser der Benchmarking-Partner aus einem kontinuierlichen Co-Extrusionsprozess gewählt, die die geringsten *Allowable Costs* aufweist. Das trifft für die Fasern Giga-POF von Chromis Fiberoptics, Inc., Warren, NY, USA, und GINOVER von Sekisui Chemicals Co., Ltd., Osaka, Japan, mit einem Kerndurchmesser von 62 μm und Manteldurchmesser von 750 μm zu. Ihre *Allowable Costs* betragen bei Abnahme der größten möglichen Bestellmenge 0,14 €/m. Sie weisen eine Dämpfung von max. 0,06 dB/m auf.

2.1.5.2 Prozesskostenrechnung im Pilotmaßstab

Für die Durchführung der Prozesskostenrechnung wird der komplette Schmelzspinnprozess zur Herstellung von lichtleitenden Fasern aus PMMA in einzelne Aktivitäten unterteilt, die benötigten Zeiten für die Teilprozesse und die entsprechenden Kostentreiber (Einzel- und Gemeinkosten) ermittelt. Grundlage dafür ist die in Pilotversuchen hergestellte Menge von 21.000 m optische Polymerfasern aus PMMA mit einem Kerndurchmesser von 500 μm und einer Dämpfung von 1,03 dB/m.

Der Schmelzspinnprozess wird prozessbezogen betrachtet. Mit einbezogen werden diesbezüglich sowohl die Personal-, Energie-, Anlagenkosten und die Abschreibung

(linear) als auch die Flächenmiete und Rohstoffkosten. Nicht detailliert berücksichtigt werden Investitions-, Qualitätskontroll-, Reparatur- und Wartungskosten. Allerdings erfolgt eine Zurechnung sonstiger Aufwendungen in Höhe von 25 % auf die Fertigungseinzelkosten.

Der Prozess wird in drei Hauptprozesse aufgespalten: die Vorbereitung der Anlage, das Ausspinnen und die Nachbereitung. Nun werden den einzelnen Prozessen die jeweiligen Kostentreiber zugeordnet, d.h. diejenigen Faktoren, die für die Höhe der Kosten des jeweiligen Prozesses verantwortlich sind.

Allen Kosten, die im Zusammenhang mit Maschinennutzung und Personal stehen, wird ein Fertigungsgemeinkostenzuschlag in Höhe von 25 % angerechnet. Entsprechend sind für alle Materialien, wie PMMA und sonstige Teile oder Rohstoffe, 5 % Materialkostenzuschlag (Verschnitt, Materialrückstände) einzukalkulieren. Die Gesamtprozesskosten werden nachfolgend aus der Summe aller Einzelbeträge zu folgendem Betrag addiert:

$$\begin{aligned} \text{Gesamtkosten} &= \text{Vorbereitungskosten} + \text{Spinnkosten} + \text{Nachbereitungskosten} \\ &= 0,0163 \text{ €/m} + 0,0327 \text{ €/m} + 0,0052 \text{ €/m} \\ &= 0,0543 \text{ €/m} \end{aligned}$$

2.1.5.3 Herstellungskostenrechnung im Technikumsmaßstab

Ein Ausblick auf die Herstellungskosten der entwickelten Polymerfaser im Technikumsmaßstab soll anhand der folgenden Berechnung gegeben werden. Die Basis dafür bildet eine Anlage bei der Perlon Monofil GmbH, Dormagen, Deutschland.

Unter Annahme des beschriebenen 2-Schicht-Regimes und der Hochskalierung des Prozesses auf den Technikumsmaßstab können die Faserkosten auf insgesamt 0,00114 €/m gesenkt werden. Im 3- und 4-Schichtmodell ergeben sich weiterhin Faserkosten in Höhe von 0,00104 €/m und 0,001 €/m.

2.1.5.4 Bestimmung der Zielkostenlücke

In den Versuchen konnten POF aus schmelzgesponnenem PMMA kontinuierlich produziert werden. Im Pilotmaßstab liegen die Herstellungskosten bei 0,0543 €/m und bei der Hochskalierung in den Technikumsmaßstab bei 0,00114 €/m.

Tabelle 2.2: Zielkostenlücken im Pilot- und Technikumsmaßstab in [€/m].

	Pilot		Technikum	
		2-Schichten	3-Schichten	4-Schichten
Allowable Costs			0,14	
– Drifting Costs	0,0543	0,00114	0,00104	0,00100
= Zielkostenlücke	0,0857	0,13886	0,13896	0,13900

Die Differenzen können zum einen auf die Verwendung eines Zwei-Materialsystems bei Giga-POF und GINOVER und den höheren Materialverbrauch wegen des größeren Gesamtdurchmessers der Faser zurückgeführt werden. Zum anderen sind durch die an die Co-Extrusion angegliederte Diffusionszone längere Prozesszeiten notwendig, um das Gradientenindexprofil zu erreichen. Demzufolge ist eine Zielkostenlücke in positiver Ausprägung vorhanden. Die Fasern können mit dem neuen Herstellungsverfahren sogar im Pilotmaßstab wesentlich günstiger hergestellt werden als bei der Konkurrenz. Auch die Hochskalierung auf den Technikumsmaßstab verdeutlicht zusätzlich das wirtschaftliche Potential des neuen Herstellungsverfahrens.

2.2 AP 2 – Modellierung des Zusammenhangs zwischen optischen/mechanischen Eigenschaften und der Fertigung

2.2.1 Theoretische Abschätzung der Abkühlrate über den Filamentradius

Modelliert wurde das Abkühlungsverhalten eines PMMA-Monofilaments, nachdem dieses aus der Spinnöse ausgetreten ist und direkt in ein Wasserbad geführt und bis auf die Glasübergangstemperatur T_G abgeschreckt wird. Bei den Berechnungen wurde von einer eindimensionalen, nichtstationären Abkühlung durch Konvektion und Wärmeleitung ausgegangen.

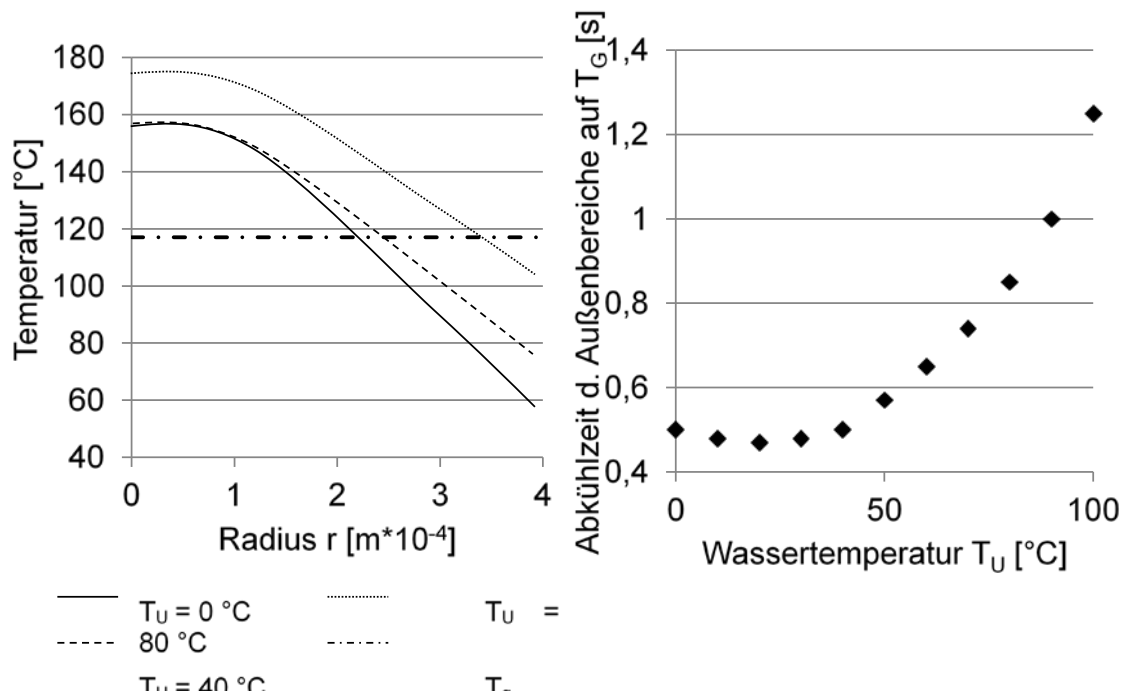


Abbildung 2.1: Links: Temperaturverlauf über dem Filamentradius nach Abkühlung ($T_U = 80^{\circ}\text{C}$) der Außenbereiche auf $T_G = 117^{\circ}\text{C}$ bei verschiedenen T_U ; rechts: Abkühlzeit der Außenbereiche bis $T_G = 117^{\circ}\text{C}$ bei verschiedenen T_U .

Abbildung 2.1 zeigt die gesamte Abkühlung des Filaments bei unterschiedlichen Temperaturen T_U des Kühlwassers. Die Abkühlung wird bis zu dem Zeitpunkt berechnet, an dem die Außenbereiche des Filaments bei $T_U = 80^{\circ}\text{C}$ auf die Glasübergangstemperatur T_G abgekühlt sind. Bei geringeren Wassertemperaturen T_U ist die Abkühlung zu diesem Zeitpunkt bereits weiter fortgeschritten. Entsprechend ist der Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur T_U und der Abkühlzeit der Außenbereiche auf T_G in Abbildung 2.1 rechts aufgetragen. Interessant ist bei der Betrachtung der Abkühlzeiten, dass die Abkühlung der Außenbereiche bei kleinen T_U länger dauert als bei höheren T_U . Der Grund für das unintuitive Ergebnis ist der gegenläufige Verlauf von Wärmeübergangskoeffizienten α und Temperaturdifferenz ($T_W - T_U$) bei verschiedenen T_U .

Abbildung 2.2 zeigt die Abkühlzeit und die mittlere Abkühlrate auf T_G über dem Radius bei verschiedenen Wassertemperaturen T_U .

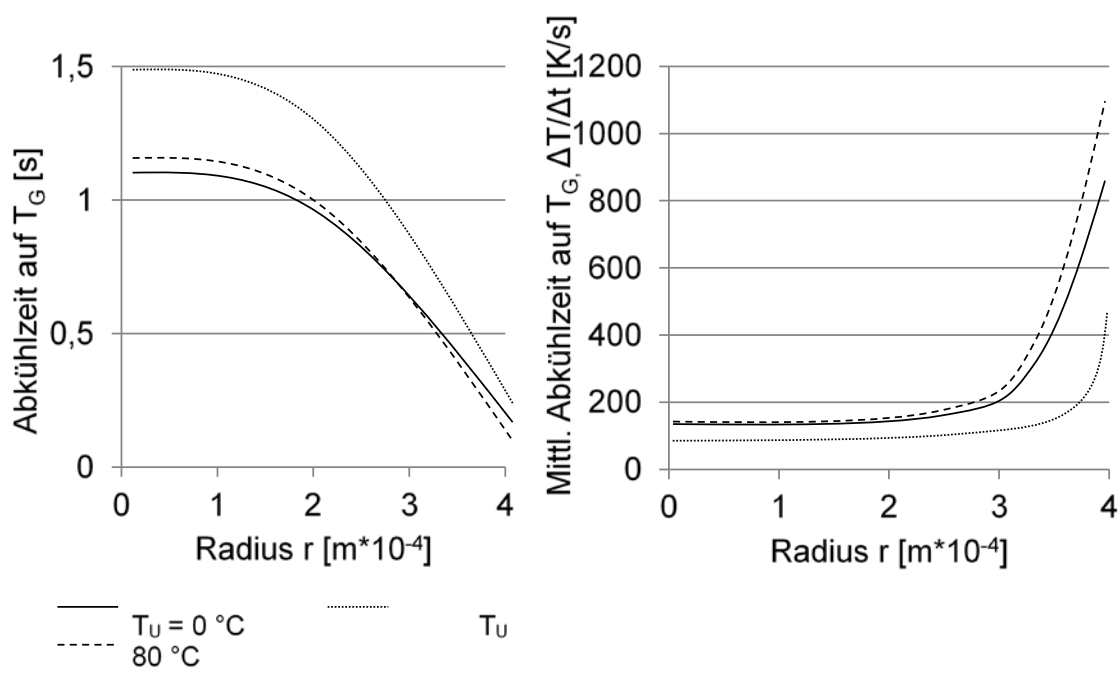


Abbildung 2.2: Links: Abkühlzeit auf $T_G = 117^\circ\text{C}$ über dem Radius r bei verschiedenen T_U ; rechts: mittlere Abkühlrate auf $T_G = 117^\circ\text{C}$ über dem Radius r bei verschiedenen T_U .

Die mittlere Abkühlrate wird aus $(T_0 - T_G)/\Delta t$ berechnet. Die Abkühlung findet vom Randbereich bis in die Filamentmitte statt. Daher sind die Randbereiche schneller auf die Glasübergangstemperatur T_G abgekühlt als die Filamentmitte. Äquivalent dazu ist die mittlere Abkühlrate im Randbereich höher als in der Mitte des Filaments. Es ist zu sehen, dass die Abkühlung bei $T_U = 0^\circ\text{C}$ in den Randbereichen länger dauert als die Abkühlung bei $T_U = 40^\circ\text{C}$. Wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist dies auf die höheren Wärmeübergangskoeffizienten bei höheren Wassertemperaturen zurückzuführen. Die Abkühlung des Filaments und Erstarrung des Polymers breitet sich mit der Zeit von den Randbereichen in die Mitte des Filaments aus. Entsprechend ist für die Polymerketten mehr Zeit für Umorientierungsvorgänge vorhanden, je weiter sie im Inneren des Filaments liegen.

Der in Abbildung 2.2 rechts dargestellte zentrale Zusammenhang zwischen Abkühlrate und Radius lässt sich numerisch anhand realer Stoffwerte für ein PMMA-Filament modellieren. Die Voraussetzung für einen Dichtegradienten über dem Radius wurde anhand eines vereinfachten Abkühlungsvorganges berechnet und stimmt mit den Überlegungen der zentralen Hypothese der Brechzahlprofilentstehung überein.

Im weiteren Verlauf wurden die theoretischen Überlegungen über den Zusammenhang zwischen der Abkühlrate und der Dichte des GI-Filaments durch Messungen überprüft und validiert. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

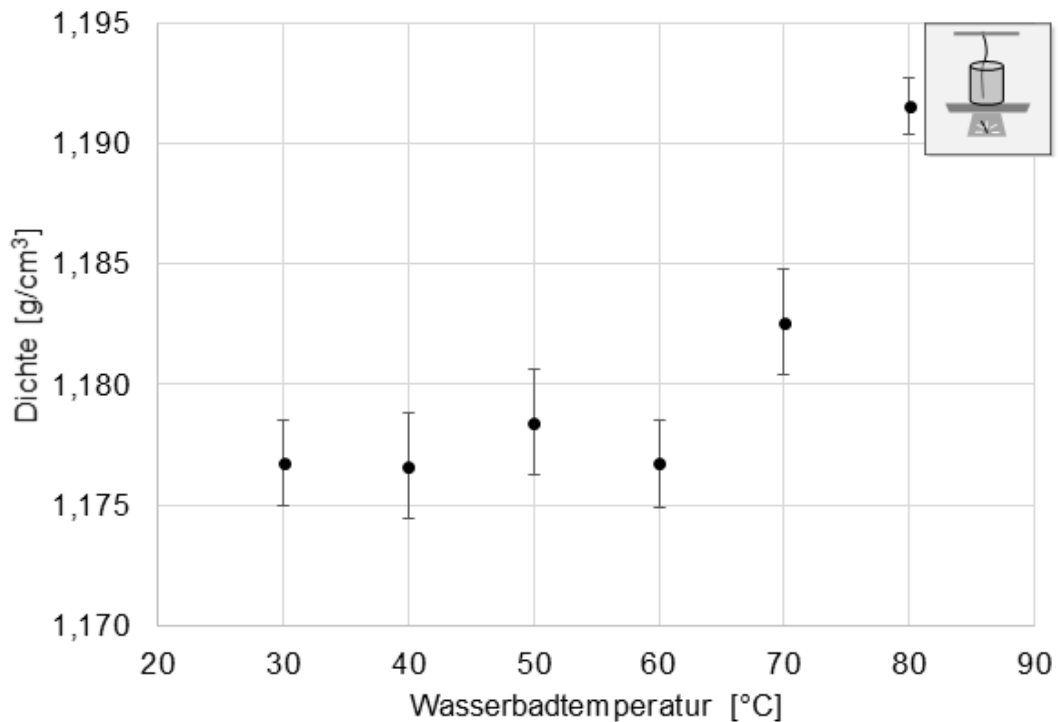


Abbildung 2.3: Mittlere Dichten der bei unterschiedlichen Wasserbadtemperaturen ausgesponnenen Filamente.

Es ist zu erkennen, dass die gemittelte Dichte zu höheren Wasserbadtemperaturen hin ebenfalls ansteigt. Dieser gemessene Zusammenhang stützt die Überlegung, dass eine langsamere Abkühlung höhere Packungsdichten zur Folge hat.

2.2.2 Beziehung zwischen Dichte und Brechzahl

Die Erzeugung des Gradientenindexprofils soll während eines beschleunigten Kühlvorgangs in einem Wasserbecken stattfinden. Dieser Prozessschritt ist unmittelbar angegliedert an den Austritt des heißen und weichen Polymers aus der Spindüse und der anschließenden Überbrückung einer kurzen Luftkühlung. Allgemein konnte gezeigt werden, dass die Dichte eines Polymers unmittelbar von dessen Kühlrate abhängt. Durch eine langsame Kühlung können sich die Ketten innerhalb des Polymers energieeffizient ausrichten, was zu einer höheren Dichte führt. Zwischen der Dichte und dem Brechungsindex besteht mittels der Clausius-Mossotti-Beziehung ein direkter Zusammenhang. Das Gesetz von Clausius und Mossotti stellt einen Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstante ϵ_r und der Dichte in einem Festkörper für hohe Frequenzen her. Die Herleitung erfolgt analog zu [Mar11].

2.2.3 Einfluss der Abkühlrate auf die Dichte

Zur Simulation des Einflusses der Abkühlrate auf die Dichte wurden zunächst verschiedene Polymermodelle bzgl. ihres temperaturabhängigen Verhaltens miteinander verglichen. Es ist erarbeitet worden, warum das RIS-Modell für die Simulation des Abkühlverhaltens amorpher Polymere gewählt wird und einige Modifizierungen vorgenommen werden. Darauf folgend werden das Simulationsprogramm mit seinen Funktionen vorgestellt und die Resultate der Simulation analysiert.

2.2.3.1 Modellauswahl und Anpassung

Die Herausforderungen bei der Auswahl eines geeigneten Modells sind die folgenden Kriterien:

- Realitätsnahe Abbildung der molekularen Gegebenheiten eines amorphen Polymers
- Abschätzungen makroskopischer Kenngrößen (z.B. Dichte) realisierbar
- Geringe Rechenzeit

Einer der Haupteffekte, die zum Erstarren einer Polymerschmelze führen, ist die Abnahme der Flexibilität der Ketten. Damit scheiden ideale Ketten als Grundlage für die Beschreibung dieses Prozesses aus. Tabelle 2.3 fasst die Anwendbarkeit der Polymermodelle für die Simulation des Abkühlverhaltens anschaulich zusammen.

Tabelle 2.3: Vergleich der Kettenmodelle bzgl. der Modellierbarkeit des Glasübergangs.

Modell	Flexibilität	Rechenzeit
FJC	konst./ sehr hoch	sehr kurz
MFJC	konst./ sehr hoch	sehr kurz
FRC	konst./ hoch	kurz
WLC	sehr gering	kurz
RIS	PD($\Phi(T)$)/ diskret	mittel
HR	PD(U($\Phi(T)$))/ unbekannt	lang

Dynamikmodelle kommen zur Simulation nicht zum Einsatz, da der Einfluss der Änderung der Segmentlänge für makroskopische Größen wie die Dichte vernachlässigbar scheint. Auch Modelle, mit denen sich *Entanglements* beschreiben lassen, werden nicht genutzt, da sie zwar gute Näherungen für das Verhalten einer Kette in einem

Konglomerat vieler Polymerketten darstellen, jedoch zur Simulation von Wechselwirkungen vieler Ketten untereinander ungeeignet sind. Ansätze dieser Modelle können jedoch in der Simulation zum Einsatz kommen. So stellt etwa das Kriechverhalten eine Möglichkeit dar, die Dynamik der Polymerketten innerhalb des RIS-Modells zu beschreiben. Die Bewegung der Kette ist hier jedoch nicht auf einen Tubus beschränkt. Es wird lediglich eine effektive Dicke a eingeführt, welche größer als der Van-der-Waals-Radius der Polymerkette ist. Zwei Polymerketten treten nur dann in Wechselwirkung, wenn diese virtuelle Grenze unterschritten wird.

Innerhalb der *supramolekularen Modelle* entspricht dieser Ansatz dem *Random-Coil-Modell*. Dieser Ansatz wird als erste Näherung verfolgt, da die Modellierung von Polymerketten einfacher umsetzbar ist, als die von dynamischen Meanderwürfeln. Insbesondere ist die Art der Wechselwirkungen zwischen den Meanderwürfeln nicht eindeutig festgelegt.

Der gewählte Ansatz ermöglicht eine ausreichend gute Modellierung des Abkühlverhaltens. Die Geschwindigkeitsverteilung gibt dabei zu jedem Zeitpunkt ein zuverlässiges Maß für die Temperatur des Systems und damit die kinetische Energie der Polymermoleküle. Insgesamt beeinflussen die Faktoren Temperatur, Position entlang der Kette und Parallelität der End-Konfiguration die Wahrscheinlichkeit einer Änderung der Torsionswinkel beim Zusammentreffen zweier Polymerketten. Der Glasübergang kann dann mit einem Äquivalent zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten α gefunden werden. Dafür ist die temperaturabhängige Dichte des Systems zu betrachten. Da der thermische Ausdehnungskoeffizient bei T_G einen Sprung macht, muss die Ableitung der Dichte nach der Temperatur ebenfalls eine Änderung durchlaufen.

2.2.3.2 Ergebnisse der Simulation des Einflusses verschiedener Abkühlraten auf die Materialdichte

Im Folgenden werden die Ergebnisse bezogen auf die Implementierung der Simulation aufgezeigt. Gezeigt werden die Ergebnisse der Simulation des Abkühlvorgangs und die dabei aufgetretenen Probleme.

2.2.3.2.1 Ausdehnung bei verschiedenen Ausgangstemperaturen

Der Einfluss der Ausgangstemperatur der Polymerketten auf die Ausgangsgeschwindigkeiten kann über die Maxwell-Boltzmann-Verteilung beschrieben werden. Für kleine Geschwindigkeiten dominiert hier der Geschwindigkeits-Anteil, für große der exponentielle Abfall. Diese Aufteilung verdeutlicht Abbildung 2.4. Zu beachten ist, dass durch den exponentiellen Abfall eine endliche Wahrscheinlichkeit von sehr großen Geschwindigkeiten besteht.

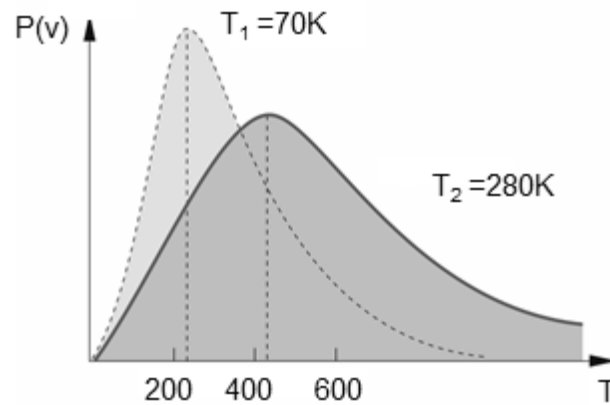


Abbildung 2.4: Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung [Dem05].

Eine höhere Ausgangstemperatur sollte entsprechend für höhere Ausgangsgeschwindigkeiten und damit auch für höhere Ausdehnungen des Systemvolumens sorgen. Um diesen Effekt zu verifizieren, werden drei verschiedene Simulationen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 2.5 dargestellt sind. Die Simulation berechnet 3000 Polymerketten mit jeweils 300 Elementen für 100 Zeitschritte. Die Ausgangskonfiguration ist mit Ausnahme der Ausgangstemperatur bei jeder der drei Simulationen dieselbe. Die Ausgangstemperaturen variieren von 10 K, 390 K und 533 K. In Abbildung 2.5 ist oben die Ausgangskonfiguration dargestellt, darunter die Polymerketten am Ende der Simulation. Die Geschwindigkeitsverteilungen der Polymerketten sind unter den jeweiligen Systemplots dargestellt.

Wie vermutet, expandiert das System mit der höheren Ausgangstemperatur deutlich stärker, als die Systeme geringerer Ausgangstemperatur. Dabei wird die Geschwindigkeitsverteilung nach Maxwell-Boltzmann eingehalten.

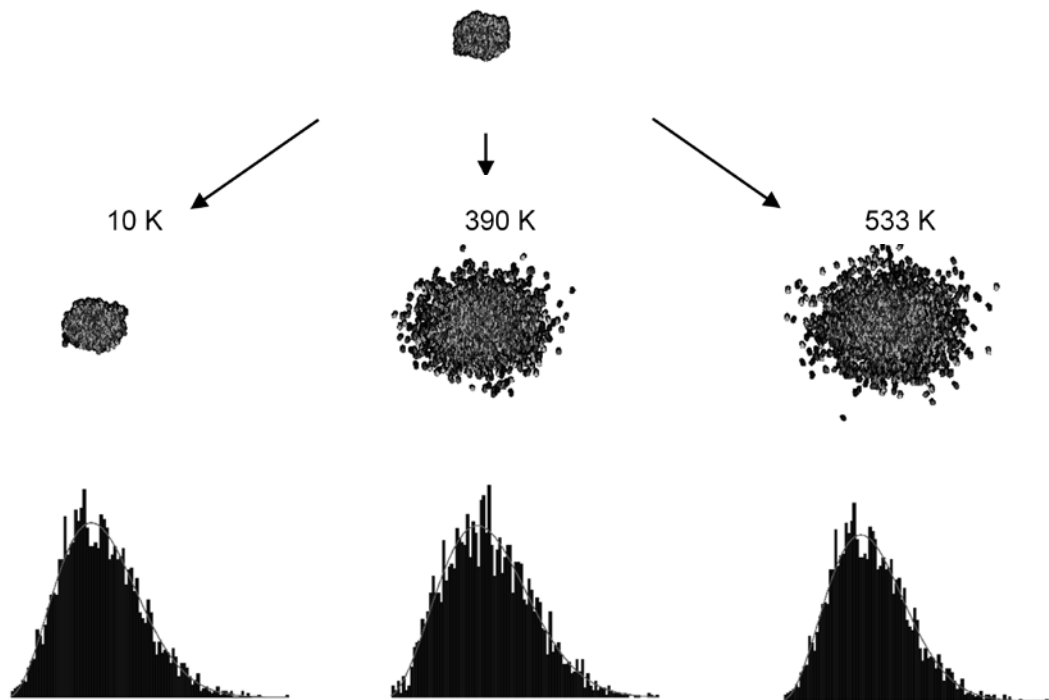


Abbildung 2.5: Ausdehnung bei gleicher Ausgangslage bei unterschiedlichen Ausgangstemperaturen, darunter die zugehörigen Histogramme der Geschwindigkeiten, verteilt nach Maxwell-Boltzmann, $N = 3000$, $n = 300$, $T = 100$.

2.2.3.2.2 Ausdehnung mit und ohne Cutoff-Radius

Nur Kettenelemente innerhalb des Cutoff-Radius interagieren miteinander. Durch weitere Entfernungen sinkt die Kraft, die zwischen den Elementen wirkt, auf ein vernachlässigbares Niveau. Die Berücksichtigung eines Cutoff-Radius soll bei gleichbleibender Genauigkeit die Rechenzeit verringern. Abbildung 2.6 zeigt den Unterschied zwischen einer Simulation mit und einer Simulation ohne Cutoff-Radius.



Abbildung 2.6: Ausdehnung mit und ohne Cutoff-Radius a .

In beiden Fällen ist die Ausdehnung des Systems vergleichbar. Ein Unterschied in der Dichte lässt sich nicht messen. Die Berechnungen ohne Berücksichtigung eines Cutoff-Radius dauerten jedoch deutlich länger. So wurde in jedem Schritt jede Wechselwirkung zwischen jedem Kettenelement berechnet.

2.2.3.2.3 Simulativ ermittelte Dichte bei verschiedenen Abkühlraten

Abbildung 2.7 zeigt die zu verschiedenen Abkühlraten berechneten Dichten über ihren jeweiligen Abkühlraten. In mehreren Simulationsdurchläufen werden jeweils andere Abkühlraten vorgegeben.

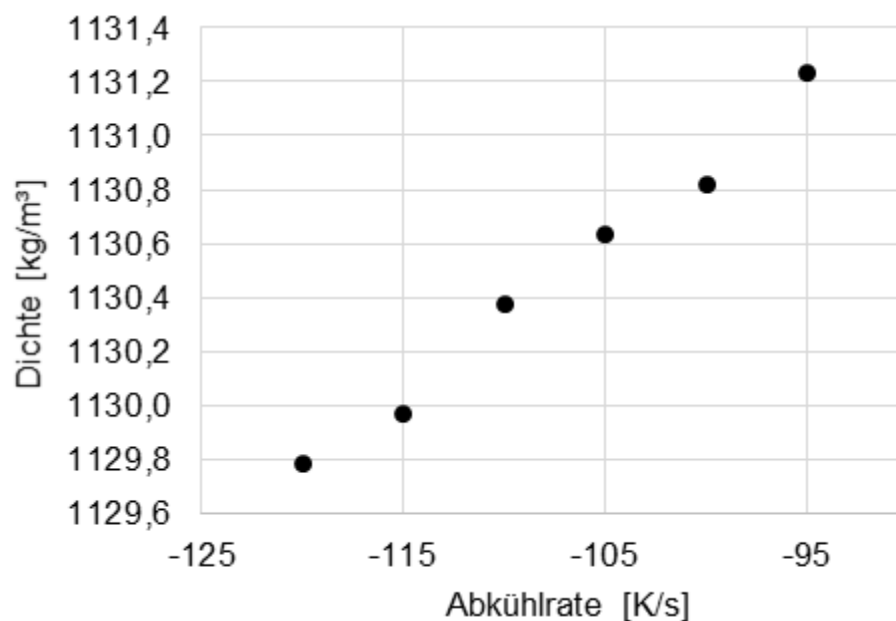


Abbildung 2.7: Simulierter Einfluss der Abkühlrate auf die Dichte.

Es ist ein Trend zu beobachten. Bei höheren (negativen) Abkühlraten ergeben sich simulativ geringere Dichten der Polymerketten. Der Unterschied zu den oben beschriebenen Messungen, die für niedrigere Wasserbadtemperaturen (also betragsmäßig hohen Abkühlraten) ähnliche Dichten zeigen, ist der Geometrie und dem Wärmetransport innerhalb der Faser geschuldet. In den Simulationen wurde von einer konstanten Abkühlraten ausgegangen, die selbst bei konstanten Wasserbadtemperaturen nicht über den gesamten Filamentquerschnitt vorliegen.

2.3 AP 3 – Prozessentwicklung

Nach den vorbereitenden Untersuchungen und den theoretischen Abschätzungen bzw. Simulationen, die eine Grobauslegung des Fertigungsprozesses erlaubten, soll nun der endgültige Fertigungsprozess entwickelt werden.

2.3.1 Filamentherstellung im Pilotmaßstab und Charakterisierung

Im folgenden Kapitel werden die Filamentherstellung und die Ergebnisse der Charakterisierung im Hinblick auf die zuvor eingeführten Qualitätskriterien an einer optischen Polymerfaser erläutert.

Tabelle 2.4: Konstante und variierte Parameter während der Spinnversuche im Pilotmaßstab.

		Pilotanlage
Variablen	Kapillardurchmesser	0,7 und 0,9 mm
	Dauer der Kühlung	1,5 s und 2,5 s
	Wasserbadtemperatur	25 °C, 70 °C
	Abzugsgeschwindigkeit	10 m/min, 26,25 m/min
Konstanten	<u>Granulat</u>	
	Polymer	PMMA POQ 66
	Trocknung	5 h; 85 °C; 11 mbar
	<u>Extruder</u>	
	Heizzone 1	190 °C
	Heizzone 2	230 °C
	Heizzone 3	250 °C
	Kapillartemperatur	255 °C
	Kapillarlänge	3 mm
	Druck	50 bar
	<u>Spinnpumpe</u>	
	Volumenförderung	0,16 cm ³ /U
	Drehzahl	14 - 40 U/min
	Massedurchsatz	2,5 - 6,2 g/min
	<u>Länge des Luftspalts</u>	35 mm
<u>Filamentdurchmesser</u>	0,5 mm	
<u>Kühlmedium</u>	frisch destilliertes Wasser	

Die relevanten Faktoren sind der Kapillardurchmesser, die Wasserbandtemperatur, die Dauer der Kühlung und die Abzugsgeschwindigkeit. Die Dämpfung stellt neben der Bandbreite, die vor allem durch das Brechzahlprofil beeinflusst wird, das wichtigste Qualitätsmerkmal einer POF dar. Ohne eine akzeptable Dämpfung sind die meisten Anwendungen unmöglich. Die Dämpfung ist darüber hinaus mit Hilfe der Cutback-Methode leicht und relativ genau zu messen, sodass der Fokus darauf liegen soll.

Die Anlagen- und Prozessparameter der Spinnversuche zur Herstellung von Monofilamenten im Pilotmaßstab am Kleinextruder der Firma Fourné Polymertechnik GmbH, Alfter-Impekoven, Deutschland, sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst. Die Parameter zu Granulat, Extruder und Spinnpumpe werden mit Rücksicht auf die Spinnbarkeit durch die Polymereigenschaften festgelegt. Der minimale Filamentdurchmesser in Höhe von 0,5 mm determiniert die Prozessfenster für den erforderlichen Kapillardurchmesser, die Dauer der Kühlung, die Wasserbadtemperatur und Abzugsgeschwindigkeit.

2.3.2 Ökologische Bewertung des kontinuierlichen GI-POF-Fertigungsverfahrens

In den folgenden beiden Unterabschnitten wird der CO₂-Fußabdruck der GI-POF aus dem neuartigen Schmelzspinnverfahren bestimmt und die Ergebnisse dargestellt und mit alternativen Polymerfasern verglichen

2.3.2.1 Modell

Es wird der CO₂-Fußabdruck von der Wiege bis zum Fabriktor („from cradle to factory gate“) bestimmt. Bei der vorliegenden ökologischen Analyse werden alle Treibhausgase gemäß ihres GWPs berücksichtigt und das Ergebnis in Form eines CO₂-Äquivalents angegeben. Diese Untersuchung berücksichtigt die Herstellung des Werkstoffs in Form von PMMA-Granulat, einen Transport von 100 km zur Produktionsstätte und schließlich die Produktion durch das neuartige Schmelzspinnverfahren. Die Werte für den Mix elektrischer Energie werden spezifisch für Deutschland angenommen. Für den Transport wird von Diesel betriebenen Lastkraftwagen der Euro 3 Norm und einer Ladekapazität von 17,3 Tonnen ausgegangen. Beiträge des Menschen, der Anlagenbau und die Entsorgung bzw. das Recycling werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Die in der GI-POF Produktion notwendigen Massen- sowie Energieströme sind bekannt. Die aggregierten CO₂-Emissionen für die Teil- und Hauptprozesse sowie für die Rohstoffe werden mithilfe der CO₂-Fußabdrücke der entsprechenden Produktionsfaktoren berechnet [Wil13]. Als Referenzmaß für die einzelnen Ströme dient ein Meter produzierte GI-POF. Auf diese Weise wird auch der final aggregierte CO₂-Fußabdruck auf einen Meter des Endprodukts, der PMMA GI-POF, bezogen.

2.3.2.2 Ergebnis

Für die reine GI-POF aus dem neuartigen Herstellungsverfahren ergibt sich in Folge der Annahmen und des Modells ein CO₂-Fußabdruck – „from cradle to factory gate“ - von **0,0012 kg CO₂-eq** für einen Meter produzierte GI-POF ohne Schutzmantel. Für die

Emissionen lassen sich zwei haupttreibende Faktoren identifizieren. Der mit Abstand größte Anteil der Treibhausgasemissionen ist mit 88 % in der Aufbereitung des Rohstoffs in Form von PMMA-Granulat begründet. Der zweitgrößte Anteil ist mit 10,79 % in dem Verzehr elektrischer Energie begründet. Der verhältnismäßige Konsum an VE-Wasser und der relative Verbrauch elektrischer Energie durch die Beleuchtungsanlagen sind an dieser Stelle die einzigen Faktoren, die sich in Abhängigkeit von einem gewählten Schicht-Regime ändern. Durch die gemittelte Nutzung von $2,97 \cdot 10^{-5}$ Litern VE-Wasser werden lediglich 1,07 % der Treibhausgasemissionen verursacht.

Tabelle 2.5: CO₂-Fußabdruck und Aufschlüsselung der einzelnen Emissionsquellen in der GI-POF Produktion.

Emissionsquelle	g CO ₂ -eq	Anteil an den Gesamtemissionen
Kraftstoff aus der Raffinerie	0,000228	0,02 %
elektrischer Energiemix	0,13	10,79 %
VE-Wasser	0,0129	1,07 %
Transport	0,00141	0,12 %
Polymethylmethacrylat	1,06	88,00 %
Σ	1,204538	100 %

2.3.2.3 CO₂-Fußabdruck eines optionalen PE-Schutzmantels

An dieser Stelle wird der CO₂-Fußabdruck einer optionalen Schutzummantelung ermittelt. Auch bei der Berechnung der ökologischen Auswirkungen wird für den PE-Mantel von den Ergebnissen aus der GI-POF Berechnung abstrahiert. Der CO₂-Fußabdruck „from cradle to factory gate“ und die Aufschlüsselung der einzelnen Emissionsquellen der GI-POF Ummantelung sind in Tabelle 2.6 dargestellt:

Tabelle 2.6: CO₂-Fußabdruck und Aufschlüsselung der einzelnen Emissionsquellen der GI-POF Ummantelung mit Polyethylen.

Emissionsquelle	g CO ₂ -eq	Anteil an den Gesamtemissionen
Kraftstoff aus der Raffinerie	0,000887	0,04 %
elektrischer Energiemix	0,13	6,28 %
VE-Wasser	0,0129	0,62 %
Transport	0,00548	0,26 %
LD Polyethylen	1,92126	92,80 %
Σ	2,070527	100 %

2.4 AP 4 – Produktanalyse

2.4.1 Optische Charakterisierung der hergestellten Filamente

Die Dämpfungswerte der hergestellten Filamente wurden mittels des Cutback-Verfahrens im optischen Labor der Hochschule für Telekommunikation Leipzig gemessen und sind in einem 2^4 -Faktorenversuchsplan hinsichtlich der Effekte und Wechselwirkungen der Einflussfaktoren auf die Dämpfung statistisch ausgewertet worden. Neben den Faktoren Temperatur im Wasserbad in Grad Celsius, Zeit im Wasserbad in Sekunden und Kapillardurchmesser in Millimeter wurde bei der Herstellung der Proben ein weiterer Faktor, die Abzugsgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde, variiert.

Tabelle 2.7: Übersicht der Prozessparameter des Faktorenvorsuchsplans an der Pilotanlage am ITA.

Versuch	Einflüsse			
	A: Temperatur Wasserbad [°C]	B: Zeit im Wasserbad [s]	C: Kapillar- durchmesser [mm]	D: Abzugsge- schwindigkeit [m/s]
1	25 (-)	1,5 (-)	0,7 (-)	10 (-)
2	70 (+)	1,5 (-)	0,7 (-)	10 (-)
3	25 (-)	2,5 (+)	0,7 (-)	10 (-)
4	70 (+)	2,5 (+)	0,7 (-)	10 (-)
5	25 (-)	1,5 (-)	0,7 (-)	26,25 (+)
6	70 (+)	1,5 (-)	0,7 (-)	26,25 (+)
7	25 (-)	2,5 (+)	0,7 (-)	26,25 (+)
8	70 (+)	2,5 (+)	0,7 (-)	26,25 (+)
9	25 (-)	1,5 (-)	0,9 (+)	10 (-)
10	70 (+)	1,5 (-)	0,9 (+)	10 (-)
11	25 (-)	2,5 (+)	0,9 (+)	10 (-)
12	70 (+)	2,5 (+)	0,9 (+)	10 (-)
13	25 (-)	1,5 (-)	0,9 (+)	26,25 (+)
14	70 (+)	1,5 (-)	0,9 (+)	26,25 (+)
15	25 (-)	2,5 (+)	0,9 (+)	26,25 (+)
16	70 (+)	2,5 (+)	0,9 (+)	26,25 (+)

Tabelle 2.7 ist zu entnehmen, dass die Wasserbadtemperatur zwischen 70 °C (+) und 25 °C (-), die Zeit im Wasserbad zwischen 2,5 s (+) und 1,5 s (-), der Kapillardurchmesser zwischen 0,9 mm (+) und 0,7 mm (-) sowie die Abzugsgeschwindigkeit zwischen 26,25 m/s (+) und 10 m/s (-) variiert werden. Analog zum Faktorenvorsuchsplan aus Kapitel 2.4.1 werden je Versuchskörper vier Dämpfungen in dB/m mit jeweils unterschiedlichen Faserstücken gemessen. Aus Tabelle 2.8 können die ermittelten Dämpfungswerte, deren Mittelwerte \bar{x} , die Varianz σ^2 sowie die Standardabweichung σ entnommen werden.





Tabelle 2.8: Per Cut-Back-Verfahren gemessene Dämpfungswerte in dB/m aus dem 2^4 -Faktorenversuchsplan im Pilotmaßstab.

Versuch	Einzelwerte der Zielgröße				\bar{x}	σ^2	σ
1	24,22	28,73	22,05	23,50	24,63	8,3	2,9
2	8,67	7,13	9,00	8,30	8,28	0,7	0,8
3	16,98	19,88	14,12	17,34	17,08	5,6	2,4
4	6,28	5,05	8,09	4,26	5,92	2,8	1,7
5	24,78	29,84	25,53	20,45	25,15	14,8	3,8
6	8,29	6,04	12,77	13,15	10,06	12,1	3,5
7	13,00	17,28	16,29	11,26	14,46	7,9	2,8
8	6,65	7,96	11,35	14,41	10,09	12,2	3,5
9	14,25	18,63	10,20	9,11	13,05	18,7	4,3
10	8,72	10,80	10,11	13,26	10,72	3,6	1,9
11	18,19	14,98	8,96	12,27	13,60	15,4	3,9
12	1,14	1,03	3,53	3,89	2,40	2,3	1,5
13	17,05	18,93	17,72	12,15	16,46	8,9	3,0
14	10,93	8,27	13,36	8,23	10,20	6,0	2,5
15	12,54	19,33	7,80	12,98	13,16	22,4	4,7
16	8,09	18,51	7,16	6,88	10,16	31,3	5,6
	Mittelwert				12,84	10,8	3,3

Der zusätzliche Faktor der Abzugsgeschwindigkeit führt zu einer doppelten Anzahl von Versuchen. Dabei liegen die durchschnittlichen Dämpfungswerte in einem Intervall zwischen dem durchschnittlichen Maximalwert von 25,15 dB/m und dem durchschnittlichen Minimalwert von 2,4 dB/m mit einem gesamten Mittelwert der Messungen von 12,84 dB/m. Auffällig sind die Werte bei Versuch 12, die mit einem Messerwert von 1,03 dB/m die geringste Dämpfung aufweisen.

Die in Tabelle 2.9 dargestellten Werte geben einen detaillierten Überblick über die jeweiligen Wirkungen der untersuchten Einflussfaktoren auf die Dämpfung. Diese liefern anhand ihres Vorzeichens und ihres absoluten Betrages Informationen darüber, wie sich die zu erwartende Dämpfung bei einer Veränderung des Einflussfaktors verhält. Dabei bedeutet ein negatives Vorzeichen eines Effektwertes, dass bei einer Erhöhung des Einflussfaktors die Zielgröße sinkt und analog bei einer Senkung des Einflussfaktors die Zielgröße steigt. Der absolute Betrag des Effektwertes gibt dahingegen seine Entfernung zum gesamten Mittelwert aller Messungen und somit seinen Einfluss auf die Zielgröße an. Hier gilt, je größer der Betrag des Effektwertes, desto weiter liegt dieser vom gesamten Mittelwert entfernt und desto größer ist letztendlich sein Einfluss auf die Zielgröße.

Tabelle 2.9: Effekte und statistische Signifikanzen der Einflussfaktoren auf die Dämpfung im Pilotmaßstab.

Versuch	A: Temperatur Wasserbad [°C] 	B: Zeit im Wasserbad [s] 	C: Kapillar- durchmesser [mm] 	Abzugsgeschwindigkeit [m/s] 
Effekte / WW 2 * Effekt	-4,36 8,72	-1,98 3,96	-1,62 3,24	0,88 1,76
Signifikanz 90,0 %	Ja	Ja	Ja	Nein
Signifikanz 95,0 %	Ja	Ja	Nein	Nein
Signifikanz 99,0 %	Ja	Nein	Nein	Nein
Signifikanz 99,9 %	Ja	Nein	Nein	Nein

Auffällig an den in Tabelle 2.9 vorgestellten Effekten und statistischen Signifikanzen ist vor allem, dass eine Erhöhung bei allen Einflussfaktoren, ausgenommen dem der Abzugsgeschwindigkeit, zu einer Verringerung der Dämpfung führt. Hierbei übt der Effekt der Temperatur im Wasserbad den stärksten Einfluss auf die Dämpfung aus. Mit einem negativen Effektwert von 4,36 bewirkt eine Erhöhung der Wasserbadtemperatur von ihrem mittleren Niveau auf ihr hohes Niveau eine Senkung der zu erwartenden Dämpfung um 4,36 dB/m, ausgehend vom gesamten Mittelwert aller Messungen von 12,84 dB/m. Darüber hinaus ist der Einfluss der Wasserbadtemperatur auf die Dämpfung in diesem Faktorenversuchsplan der einzige zu 99,9 % statistisch signifikante Effekt eines Faktors auf die Zielgröße. Der Einfluss der Verweilzeit des ausgesponnenen Filaments im Wasserbad ist mit einem Effektwert von -1,98 weniger als halb so stark wie der Einfluss der Wasserbadtemperatur. Eine Erhöhung dieses Effektes führt ebenfalls zu einer Verringerung der zu erwartenden Dämpfung. Dasselbe gilt für den Einfluss des Kapillardurchmessers auf die Dämpfung, wobei dieser mit -1,62 als drittstärkster Effekt in Erscheinung tritt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Einfluss der Zeit im Wasserbad auf die Dämpfung nur mit einer statistischen Signifikanz von 95 % und der Einfluss des Kapillardurchmessers auf die Dämpfung sogar nur mit einer statistischen Signifikanz von 90 % entscheidenden Einfluss auf die Dämpfung haben. Der Effekt der Abzugsgeschwindigkeit führt mit einem Effektwert von 0,88 – anders als die anderen Einflussfaktoren – bei einer Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der Dämpfung. Jedoch ist der Einfluss dieses Effekts auf die Dämpfung nicht statistisch signifikant und wird daher vernachlässigt.

Im Zuge der Auswertung eines Faktorenversuchsplans mit vier Einflussfaktoren entsteht zu den bereits erläuterten Effekten eine große Anzahl an Wechselwirkungen zwi-

schen den Einflussfaktoren, die ebenfalls eine Auswirkung auf die Zielgröße haben. Diese Wechselwirkungen treten zusätzlich zu den obigen Effekten auf. Sie beschreiben das Phänomen, dass der Effekt eines Faktors auf die Zielgröße durch die Wahl der Einstellparameter eines oder mehrerer anderer Einflussfaktoren bedingt wird. Tabelle 2.10 stellt die Wechselwirkungen zwischen jeweils zwei, drei und allen Einflussfaktoren auf die Dämpfung sowie deren statistische Signifikanzen dar.

Tabelle 2.10: Effekte und statistische Signifikanzen der Wechselwirkungen im Pilotmaßstab.

	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
Wechselwirkungen	0,64	1,51	0,77	0,59	0,23	0,40	-1,35	1,10	-0,24	0,32	0,41
2 * Effekt	1,29	3,02	1,54	1,18	0,46	0,79	2,69	2,21	0,47	0,65	0,83
Signifikanz 90,0 %	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Signifikanz 95,0 %	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Signifikanz 99,0 %	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Signifikanz 99,9 %	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein

Die Wechselwirkung AC zwischen dem Einflussfaktor A, der Temperatur im Wasserbad, und C, dem Kapillardurchmesser, hat einen statistisch zu 90 % signifikanten und somit belegbaren Einfluss auf die Dämpfung. Der Effektwert der Wechselwirkung AC zeigt, dass eine gleichzeitige Erhöhung der Wasserbadtemperatur und des Kapillardurchmessers um die Hälfte der Differenz zwischen hohem und niedrigem Niveau zu einer Steigerung der Dämpfung um 1,51 dB/m über den gesamten Mittelwert der Messungen führt. Analog führt eine derartige Verringerung der beiden Faktoren A und C zu einer Senkung der Dämpfung um den gleichen Wert unter den gesamten Mittelwert von 12,84 dB/m (vgl. Tabelle 2.8). Diese Aussage steht im Widerspruch zur bereits zuvor anhand von

Tabelle 2.9: Effekte und statistische Signifikanzen der Einflussfaktoren auf die Dämpfung im Pilotmaßstab.

getroffenen Aussage, dass der negative Effektwert des Faktors Temperatur im Wasserbad zu einer Verringerung der Dämpfung führt, sobald die Wasserbadtemperatur erhöht wird.

Des Weiteren zeigt Tabelle 2.10, dass höhere Wechselwirkungen, also Wechselwirkungen zwischen drei oder mehr Faktoren, einen geringeren Einfluss auf die Zielgröße vorweisen als einfache Effekte. Dies spiegelt sich in der Tatsache wider, dass, außer

der erläuterten Wechselwirkung AC, keine weitere Wechselwirkung einen statistisch signifikanten und damit belegbaren Einfluss auf die Dämpfung hat.

2.4.1.1 Messung des Brechungsindexverlaufs

Das Brechungsindexprofil einer Faser des neuen Herstellungsverfahrens wird an der Hochschule für Telekommunikation Leipzig mit der *Refractive-Nearfield-Methode* [GR86] und parallel dazu zur Verifikation im Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien an der Leibniz Universität Hannover, Deutschland vermessen. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen der *Transmitted-Nearfield-Methode*. Der kommerziell erhältliche Messaufbau (RI-Profilometer, RINCK Elektronik GmbH, Jena, Deutschland) nutzt ein Referenzmaterial mit dem Brechungsindex $n_{\text{ref}} = 1,51$. Abbildung 2.8 zeigt das Brechungsindexprofil einer Faser mit 1 mm Durchmesser, die bei einer Wasserbadtemperatur von 35 °C gekühlt wurde. Zwar unterscheiden sich die Ergebnisse für die Messrichtungen (horizontal und vertikal zur Faserachse), allerdings ist ein Trend mit einer numerischen Apertur zwischen 0,2 und 0,4 klar sichtbar. Die Stärke des Profils hängt stark von Prozessparametern ab, wie Wasserbad- und Prozessstemperatur, Verweildauer im Wasserbad und Faserdurchmesser. Das Profil in Abbildung 2.8 zeigt den Profilverlauf der linken horizontalen Seite derjenigen Faser (siehe rechtes Bild) mit der stärksten Ausprägung des Profils. [BBG14]

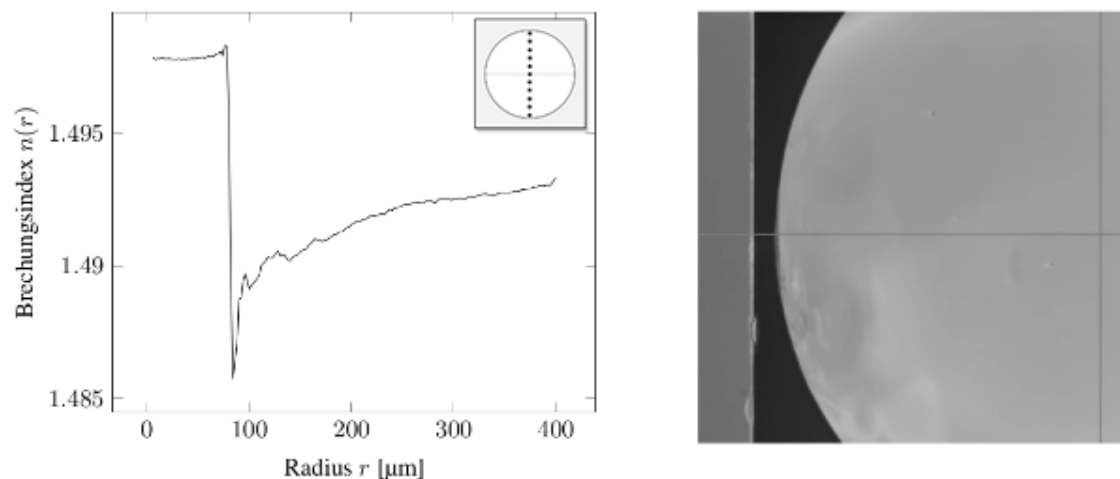


Abbildung 2.8: Gemessener Brechungsindexverlauf der verwendeten Faser bei einer Wasserbadtemperatur von 35 °C. Referenzbrechungsindex bei $n_{\text{ref}} = 1,51$ [BBG14].

Bei einer weiteren Faser, die mit 5 °C Wasserbadtemperatur gekühlt wurde, konnte an der HfT Leipzig ein GI-Profil mit der *Transmitted-Nearfield-Methode* gemessen werden. Dies zeigt Abbildung 2.9.

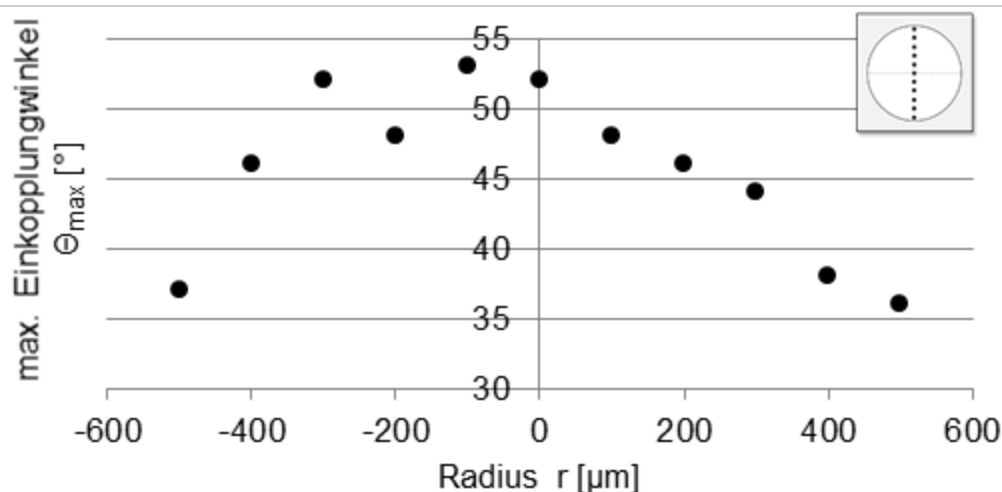


Abbildung 2.9: Gemessener Verlauf des maximalen Einkoppelwinkels θ_{max} an elf Messpunkten der Faser bei einer Wasserbadtemperatur von 5 °C.

Prinzipiell kühlten kältere Wassertemperaturen die Faser allerdings zu schnell und wärmere Temperaturen zu langsam, sodass die Profilentstehung bei den anderen Fasern verhindert wurde. Zur Entstehung eines Gradientenindexprofils besteht nur ein kleines Prozessfenster für PMMA. Allerdings zeigen weitergehende Arbeiten, dass bei anderen Polymeren dieses Prozessfenster deutlich größer ist. Hier ist ein Kompromiss zwischen optischen Eigenschaften, Verarbeitbarkeit und der Entstehung eines GI-Profiles einzugehen.

2.4.1.2 Messung von Spannungen

Nachdem nachgewiesen werden konnte, dass das Wasserbad tatsächlich zu einer abrupten Abkühlung der Außenbereiche der Faser führt und diese sich dann zur Faserachse hin fortsetzt, werden die dadurch erzeugten mechanischen Spannungen betrachtet. Zur Beurteilung der in der Faser vorhandenen Spannungen wird der Doppelbrechungseffekt mittels polarisationsoptischer Aufnahmen herangezogen. Die Messungen werden bei der Firma ilis GmbH, Erlangen, Deutschland durchgeführt. Dazu wird die Faser in sehr dünne Scheiben geschnitten und die Doppelbrechung des Materials parallel zur Faserachse gemessen. Die Doppelbrechung wird über den Gangunterschied, d.h. über die Wegdifferenz zweier polarisierter Strahlen bestimmt. Abbildung 2.10 zeigt eine exemplarische Messung an einer Faser in Form des optischen Gangunterschieds zwischen beiden Polarisationen. Dabei ist von der Mantelfläche in Richtung Mittelpunkt der Stirnfläche zunächst ein Anstieg des optischen Gangunterschieds zu verzeichnen. Nach Abfahren von 0,25 mm der Messlinie wird ein Maximum erreicht. Die Werte der Maxima variieren zwischen 100 und 140 nm. Dies beweist, dass das Material in den Außenbereichen eine stärkere Doppelbrechung aufweist als an der Faserachse und somit darauf zu schließen ist, dass die Außenbereiche bei der abrupt-

ten Abkühlung stärkere mechanische Spannungen aufbauen, die sich in einem optischen Gangunterschied zwischen den beiden Polarisationen niederschlagen.

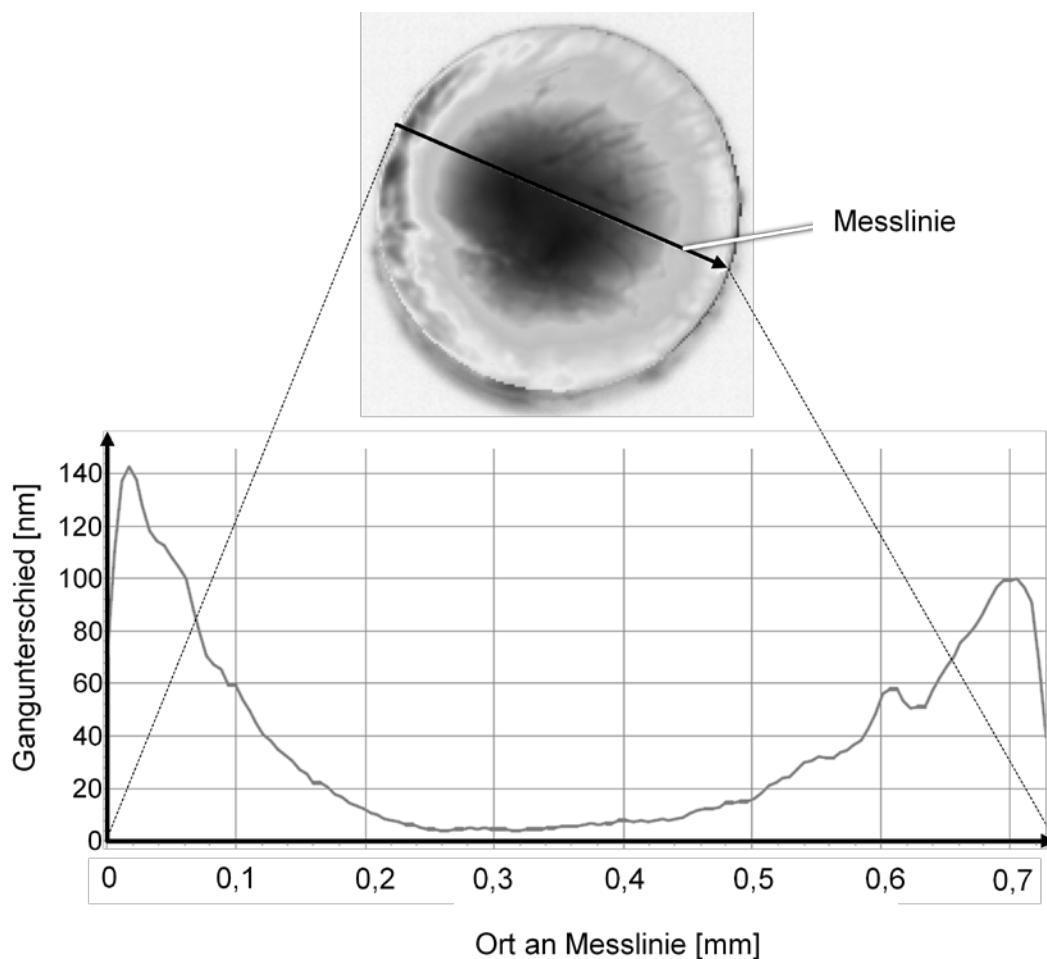


Abbildung 2.10: Verlauf des Gangunterschieds zur Bestimmung von Eigenspannungen in einer bei 5 °C gekühlten GI-POF.

2.4.1.3 Prüfungen der im Labormaßstab ausgespinnenen POF aus biobasierten Werkstoffen

Im Anschluss an die Spinnversuche erfolgen die Prüfungen der Monofilamente bezüglich der Zielgrößen Durchmesser, Lichtleitung sowie Zugfestigkeit. Die Bestimmung des Durchmessers erfolgte selbstständig, die Prüfungen bezüglich Lichtleitung und Zugfestigkeit wurden hingegen extern oder im ITA-internen Prüflabor durchgeführt.

Für die Bestimmung des Durchmessers von Monofilamenten gibt es bisher keine Normung. In dieser Arbeit wird der Monofilamentdurchmesser optisch mittels eines Lichtmikroskops bestimmt.

Die Prüfungen der Lichtleitung werden an der Universität für Telekommunikation, Leipzig durchgeführt. Es wird eine Rückschneide-Messung verwendet. Da die Messungen der Lichtleitung sehr aufwendig sind, konnten je Material und Wasserbadtemperatur nur zwei Prüfungen erfolgen. Der statistische Fehler kann somit nicht abgeschätzt werden. Die Ergebnisse dienen daher nur der ersten Einschätzung des Materials bezüglich seiner Lichtleitungscharakteristik.

Die Bestimmung der Zugfestigkeit erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 2062 mittels der Zugprüfmaschine Zmart.Pro der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm. Aufgrund der hohen Elastizität der Monofilamente sowie der geringen Probenanzahl werden bezüglich des Versuchsaufbaus einige Änderungen im Vergleich zu den Vorgaben in der Norm vorgenommen. Die Prüfung wurde im Prüflabor des ITA durchgeführt.

2.4.1.4 Auswertung

Mittels der Durchmesserbestimmung konnten die erstellten Prozessfenster weiter eingegrenzt werden. Die Ergebnisse wiesen zum Teil sehr starke Durchmesserschwan- kungen auf, welche höchstwahrscheinlich auf den Versuchsaufbau zurückzuführen sind. Aufgrund der geringen Probenanzahl konnte dies allerdings nicht endgültig statis- tisch nachgewiesen werden. Der erforderliche Mindestdurchmesser von $d = 0,5$ mm für kommerziell erhältliche Steckverbindungen zur Lichteinkopplung konnte mit Ausnahme von zwei Versuchsreihen bei allen Monofilamenten erreicht werden.

Im Vergleich zu bisher verwendeten Materialien zur GI-POF-Herstellung ergab die Be- stimmung der optischen Dämpfung der hergestellten Pearlthane-Monofilamente sehr hohe Dämpfungsbeläge. Hierdurch bedingt beträgt die Lichtintensität nach einer Mono- filamentlänge von 10 cm nur noch 18 % der eingekoppelten Intensität. Im gegenwärtigen Zustand ist das Material daher lediglich zur Lichtleitung über sehr kurze Distanzen (wenige Zentimeter) geeignet. Da nur ein Monofilament vollständig untersucht wurde, sind die ermittelten Werte statistisch nicht aussagekräftig.

2.4.2 Mechanische Fasercharakterisierung

Die Prüfung der Zugfestigkeit erfolgte bei Monofilamenten ohne ausgeprägte Durch- messerschwan- kungen. Die querschnittsbezogene Bruchkraft liegt mit $87,52$ N/mm² unterhalb der Bruchkraft gängiger Faserstoffe, allerdings höher als bei üblichen PMMA- Fasern, für die i.A. 74 N/mm² angegeben werden [Sch90]. Die Bruchdehnung fällt hin- gegen mit 334,71 % deutlich höher aus als die 165 %, die normalerweise angegeben werden. Nur Elastan weist noch höhere Bruchdehnungen von bis zu 700 % auf. Auf- grund der geringen Bruchkraft von Pearlthane muss die nachfolgende Herstellung ei- nes Demonstrators vorsichtig erfolgen.

2.4.2.1 Einfluss von mechanischer Belastung auf optische Eigenschaften

Der Einfluss von prozess- und gebrauchsbedingten Parametern auf die lichtleitenden Eigenschaften optischer Polymerfasern wurden untersucht. Diese Auswahl der Parameter wurde in [Hol13] ausführlich beschrieben. Es wurden für die Versuche zuvor am ITA hergestellte Fasern verwendet.

Im Folgenden wird für die Fasern ein Nummerncode verwendet bestehend aus zwei oder drei Nummern, die durch Punkte getrennt sind. Die erste Nummer steht für den Düsendurchmesser in μm . Die zweite Nummer steht für die Wasserbadtemperatur in Grad Celsius. Die dritte Nummer ist optional und steht für den Verstreckfaktor. Wenn die dritte Nummer entfällt, ist die Faser nicht verstreckt worden.

Da der Messstand völlig neu aufgebaut wurde und die Eigenschaften der Fasern noch nicht bekannt sind, wurden vor Beginn der Messungen mit einzelnen Fasern Vorversuche durchgeführt. Dabei wurden die Belastungsarten „Querdruck“, „Biegung“ und „Zug“ einzeln auf die Durchführbarkeit der Messungen untersucht.

Die Vorversuche zu den Komponenten „Querdruck“ und „Biegung“ wurden nicht quantifiziert. Erste Messungen zur „Querdruckbelastung“ zeigten eine sichtbare Senkung der Gesamtintensität verglichen mit der Faser ohne Druckbelastung. Bei der Komponente „Biegung“ kamen Bedenken auf, ob die Durchführung speziell für die dicken Fasern (2mm Spindüse, keine Verstreckung) möglich ist, da die Fasern beim Legen in die Biegung sehr schnell gerissen sind. Diese Befürchtung erwies sich bei der späteren Durchführung allerdings als unbegründet. Allgemein ist aufgefallen, dass die Biegung der Faser einen starken Einfluss auf das Messergebnis hat. Deswegen wurde bei allen nachfolgenden Versuchen auf eine möglichst gerade, biegungsfreie Führung der Faser im Messstand geachtet.

Da der Einfluss der Zugbelastung bei den ersten Vorversuchen als deutlich schwächer verglichen mit der Querdruckbelastung eingeschätzt wurde, ist auf eine Berücksichtigung dieses Faktors in einer ersten Messreihe verzichtet worden.

Die Messergebnisse werden relativ zur Faser 8.40 ohne Querdruckbelastung, Biegebelastung und Verstreckung angeben. Für diese Faser wurde ein durchschnittlicher Wert von $5.950.000 \text{ Counts}/(100 \text{ ms mm}^2)$ gemessen. Wie zu erwarten war, ist die Querschnittsfläche der verstreckten Fasern im Vergleich zu den unverstreckten Fasern kleiner. Einzig die Faser 20.40 bietet hier mit einem gleichen Querschnittfläche bei verstreckter und unverstreckter Faser eine Ausnahme. Dies ist entweder auf einen Messfehler oder eine Faser mit nicht konstanten Eigenschaften zurückzuführen.

Allgemein ist festzustellen, dass die Streuung der Messwerte sehr hoch ist. Insbesondere der durchschnittliche Variationskoeffizient von 0,51 spiegelt dies wieder. Für die-

sen hohen Durchschnittswert sind insbesondere die Messwerte in der Größenordnung des Rauschens verantwortlich.

Die besten lichtleitenden Eigenschaften haben die Fasern 8.40 und 20.40 mit knapp 6.000.000 Counts/(100 ms mm²). Damit haben diese Fasern fast doppelt so gute lichtleitende Eigenschaften wie die zweitbesten Fasern (20.50/20.40.2) mit ca. 3.200.000 Counts/(100 ms mm²) oder 54 relativ zur Referenzfaser. Die schlechtesten Eigenschaften wurden bei der Faser 8.50 beobachtet (36.000 Counts/(100 ms mm²) oder 0,07 relativ zum Referenzwert). Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Messungen ohne Querdruck- und Biegebelastung.

Bei allen Fasern konnte beobachtet werden, dass die lichtleitenden Eigenschaften durch das Aufbringen der Biegebelastung deutlich sinken. Dieser deutliche Effekt (-18,2) ist hoch signifikant (Vertrauensniveau: 99,9%). Einzig zwei Einzelmessungen der Faser 20.50.2 und eine Einzelmessung der Faser 8.50.2 haben eine andere Tendenz. Vor allem bei den Fasern, die mit der 20 µm Düse gesponnen wurden, konnte eine irreversible Verformung der Faser nach Lösen der Biegebelastung beobachtet werden. Vor dem Hintergrund dieses erheblichen Effektes durch Biegung der Fasern muss angemerkt werden, dass gerade bei dickeren Fasern eine Verformung durch das Aufrollen auf Spulen festgestellt werden konnte. Beim Abrollen und Einspannen in den Versuchsstand konnte deswegen eine Biegung der Fasern nicht immer verhindert werden.

Auch der Einfluss der Abkühltemperatur bei der Herstellung der Fasern ist signifikant (Vertrauensniveau: 99%). Durch eine Erhöhung der Wasserbadtemperatur von 40°C auf 50°C konnte ein Effekt von -12,2 beobachtet werden. Auch konnte eine starke Wechselwirkung zwischen der Biegebelastung und der Temperatur festgestellt werden (Vertrauensniveau: 99%). Einer Veränderung beider Faktoren vom niedrigen zum höheren Niveau zeigt eine positive Wechselwirkung auf die lichtleitenden Eigenschaften der Fasern.

Begrenzte Aussagekraft (Vertrauensniveau: 95%) hat der Haupteffekt durch Verstreckung (-11,3) und die Wechselwirkung Biegebelastung-Temperatur. Genauso ist die Signifikanz für den Haupteffekt durch einen Düsendurchmesser von 20 µm statt 8 µm niedrig (Vertrauensniveau: 90%). Alle anderen Effekte und Wechselwirkungen haben eine noch niedrigere Signifikanz.

Während der Versuchsreihe konnte außerdem bei allen Fasern beobachtet werden, dass sich die Farbe, der von der Faser radialemitierte Strahlung im sichtbaren Spektrum, über die Länge der Faser von weiß-gelblich zu rötlicheren Farbtönen geändert hat. Dieser Effekt war bei Fasern unter Biegebelastung ausgeprägter.

2.4.2.2 Interpretation der Messergebnisse

Die Verschlechterung der lichtleitenden Eigenschaften durch *Biegebelastung* kann durch zwei Phänomene erklärt werden. Zum einen führt die Biegung der Faser dazu, dass die Lichtstrahlen in einem anderen Winkel auf die Grenzflächen treffen. Hierdurch kann es zu einem Überschreiten des kritischen Grenzwinkels kommen, sodass es zu einer Auskopplung von Licht kommt und dieses verloren geht. Der zweite beobachtete Haupteffekt war eine Minderung der transmittierten Intensität bei *Wasserbadtemperatur*. Eine höhere Wasserbadtemperatur führt zu einer langsameren Abkühlrate der Faser. Gerade die Abkühlrate ist ein bestimmender Faktor für die Ausbildung des Gradientenindexprofils. Eine langsamere Abkühlrate legt die Vermutung nahe, dass das Gradientenindexprofil weniger stark ausgeprägt ist. Das wiederum erschwert die Einkopplung des Lichtes in die Faser, womit auch die transmittierte Intensität am Faserende sinkt.

2.4.3 Alters- und Umweltbeständigkeit

Auch die klimatischen Umgebungsbedingungen in Form von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (rh) haben einen Einfluss auf die Faserdämpfung [ZKZ+07,BBG16]. Sie wirken direkt auf das verwendete Fasermaterial (hier: PMMA) und sind entsprechend den extrinsischen Dämpfungsmechanismen zuzuordnen. So ist PMMA in der Lage, durch Diffusion Wasser aufzunehmen, sodass sich mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit zunehmend Wasser in der Faser anlagert. Diese zusätzlichen Moleküle im Polymerverbund führen zu einem Anstieg der Absorption und damit auch der Faserdämpfung.

Mit steigender Temperatur verringert sich die innere Spannung der Faser [ZKZ+07]. Ab der sog. Glasübergangstemperatur beginnen das zuvor glasartig spröde Polymer und dessen amorphe Struktur sich zu erweichen und eine zähe Konsistenz anzunehmen [Bon09]. Ist die Glasübergangstemperatur überschritten, verändert sich mit der Struktur des Polymers auch die Fasergeometrie, wodurch die Faser irreversibel geschädigt wird. Die Glasübergangstemperatur von PMMA liegt im Bereich von 95°C bis 120°C [ZKZ+07,Bon09].

Um den Einfluss der Temperatur sowie der relativen Luftfeuchte auf die Faserdämpfung zu bestimmen, wurde die Transmissionsänderung der Polymerfasern in Abhängigkeit verschiedener definierter Klimazyklen gemessen. Das Ziel dieser Untersuchung war zum einen, klimatische Grenzwerte, zwischen denen die Faser uneingeschränkt funktioniert und Licht transmittiert, zu definieren. Zum anderen sollte evaluiert werden, in welchem Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereich eine tolerierbare Dämpfungsänderung stattfindet.

Für die Messung wurde ein System entwickelt, welches es ermöglicht, die Transmission von zehn Fasern quasikontinuierlich zu messen. Die parallele Messung mehrerer Fasern erhöhte einerseits die statistische Sicherheit der Messergebnisse und reduzierte andererseits den Aufwand. Abbildung 2.11 zeigt den Aufbau dieses Messsystems.

Als Sender fanden LEDs (HP 9947 T-1527) mit einer Emissionswellenlänge von 650 nm Anwendung [HP05]. Diese verfügen über eine V-Pin-Buchse und ermöglichen mit den zugehörigen Steckern an den zu testenden Fasern eine stabile Einkopplung sowie eine einfache Bestückung des Messsystems. Die einzelnen Fasern wurden auf einen gemeinsamen Fotodetektor (Newport 1918-R) geführt, auf dem eine spezielle Blende zur Faserführung und Abschirmung von Umgebungslicht montiert war. Um die transmittierte Leistung jeder Faser trotzdem einzeln messen zu können, wurden die LEDs durch einen Mikrocontroller gesteuert, der sie einzeln nacheinander durchschaltete. Das gesamte Messsystem wiederum steuerte ein PC mittels eines Python-Skriptes. Dieses sendete den Schaltbefehl für die jeweilige LED an den Mikrocontroller, las den gemessenen Leistungswert aus dem Powermeter aus und speicherte die Messergebnisse mit einem Zeitstempel in einer Datei ab. Zur Erzeugung der klimatischen Prüfbedingungen wurde ein Klimaprüfschrank (Mettler CTC 256) eingesetzt, welcher Temperaturen von -42°C bis $+190^{\circ}\text{C}$ sowie eine Luftfeuchtigkeit von 10% rH bis 98% rH realisieren kann [Me16]. Über eine seitliche Öffnung konnten die Fasern in die Prüfkammer ein- und ausgeführt werden, sodass das gesamte Messsystem nicht im Klimaschrank platziert werden musste. Der abzufahrende Klimazyklus musste extern programmiert werden und konnte nicht über das Messsystem gesteuert werden. Jedoch misst die Regelung des Prüfschranks alle 60 s die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit sowie die Drehzahl des Lüfters und protokolliert diese Werte ebenfalls mit einem Zeitstempel. Damit war es möglich, den zeitlichen Verlauf der transmittierten Leistung einer jeden Faser mit dem Verlauf des Klimas im Nachhinein zu synchronisieren, obwohl beide Systeme unabhängig voneinander arbeiteten. Da die benötigte Zeit für die Messung der transmittierten Leistung der zehn Fasern mit 52 s im Verhältnis zur Dauer eines Klimazyklus mit >8 h vernachlässigbar gering ist, kann insgesamt von einer quasi-kontinuierlichen Messung der Transmission gesprochen werden.

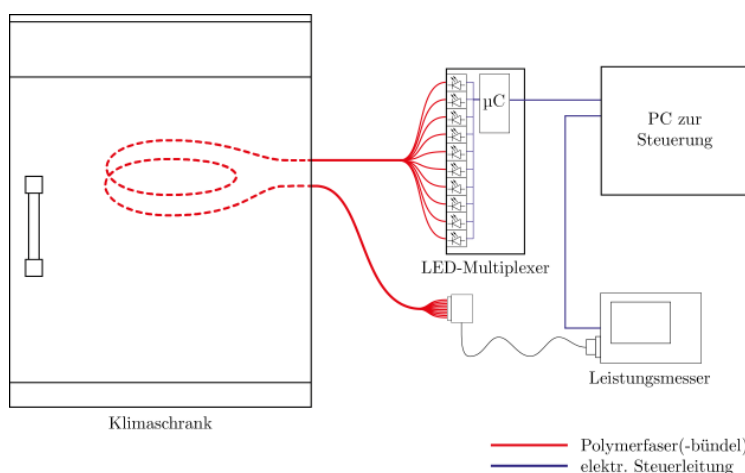


Abbildung 2.11: Messaufbau zur Bestimmung des Klimaeinflusses auf die Faser.

2.4.3.1 Vorversuch

Die die betrachteten Polymerfasern nicht nur für optische Kommunikation, sondern auch im Bereich der Sensorik eingesetzt werden sollen, wurden keine speziellen Normen betrachtet, die Prüfzyklen mit definierten klimatischen Bedingungen vorschlagen. Es wurden diverse Normen aus dem optischen und militärischen Bereich konsultiert, die Prüfbedingungen zur Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse enthalten und einen möglichst weiten Anwendungsbereich abdecken können.

Weiterhin lieferte die *DIN 60068* zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegen Umgebungseinflüsse von (elektrischen) Geräten eine Orientierung für Prüfbedingungen sowohl bei Kälte (-65 °C bis 5 °C) als auch bei trockener Wärme (30 °C bis 155 °C) [DIN07]. Ausgehend von den angegebenen Prüfbedingungen der verschiedenen Standards wurde zunächst ein Vorversuch durchgeführt (siehe Abbildung 2.12), um einerseits die Funktionsfähigkeit des Messsystems zu überprüfen und andererseits die Auswirkung des Klimas auf die Faser einschätzen zu können.

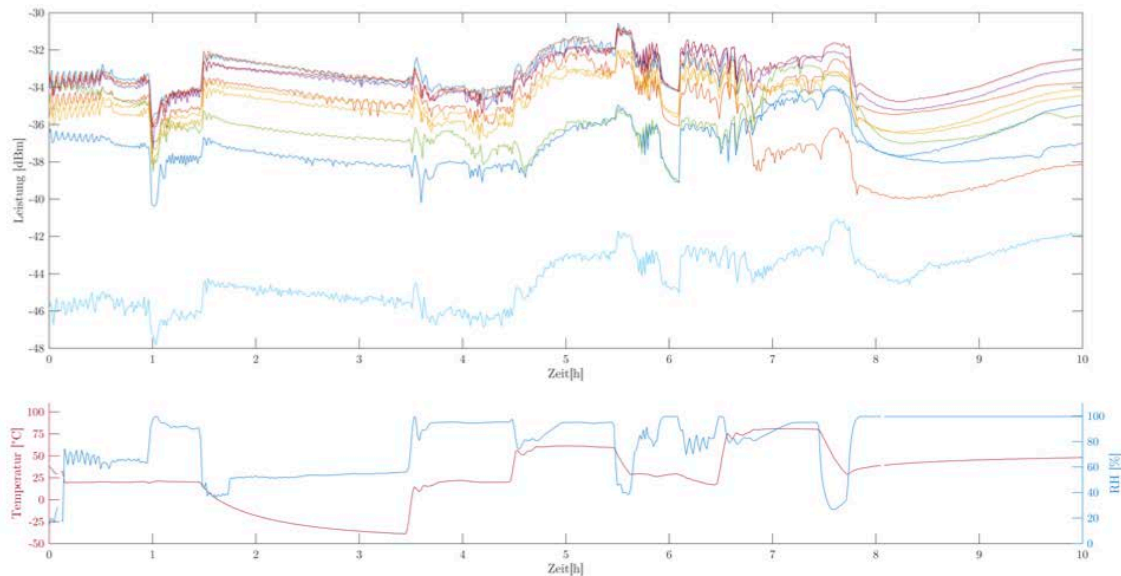


Abbildung 2.12: Verlauf der transmittierten Leistung von zehn Fasern in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Vorversuch).

In Anbetracht des nahezu parallelen Verlaufs der transmittierten Leistung aller zehn Fasern in Abhängigkeit des umgebenden Klimas ist die Funktionsfähigkeit des Messsystems gegeben. Zudem lassen sich die Veränderungen im Leistungsverlauf eindeutig auf die einzelnen Stufen der umgebenden Temperatur sowie Luftfeuchtigkeit zurückführen. Insbesondere die Phasen, in denen sich die Luftfeuchtigkeit infolge der Regelung des Klimaschranks einschwingt (bspw. zwischen 0,2 h bis 0,5 h oder 6,1 h bis 6,3 h), finden sich deutlich im Verlaufe der Leistung wieder. Es entsteht tendenziell der Eindruck, dass die Veränderung der Luftfeuchtigkeit einen stärkeren Einfluss auf die Faserdämpfung hat als die Temperatur. Die Begutachtung der Fasern nach dem Vorversuch widerlegte diese Vermutung zunächst, da sich durch den teilweise sprunghaften Anstieg der relativen Luftfeuchte Kondenswasser in der Klimakammer und auf den Fasern gebildet hatte. Dieses beeinflusst zwar die Dämpfung, ist aber kein direkter Einfluss des Klimas auf die optischen Eigenschaften des PMMA und verfälscht in diesem Sinne die Messergebnisse. Daher wurde die Kondenswasserbildung in allen nachfolgenden Versuchsreihen durch einen deutlich langsameren Anstieg der Luftfeuchtigkeit, sofern eine Veränderung dieser vorgesehen war, verhindert.

Wie bereits angedeutet, benötigt der Klimaschrank eine gewisse Zeit, um die programmierten klimatischen Bedingungen herzustellen. Da sich durch die Regelung zwischen zwei Klimastufen sowohl die Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit unvorhersehbar verändert, können keine Rückschlüsse auf den Dämpfungseinfluss gezogen werden. Dementsprechend werden diese Phasen in den nachfolgend ausgewählten Versuchsreihen ausgeblendet, indem der über einen Zeitraum von 30 min gemittelte Leistungswert aus dem stabilen Bereich (bis 10 min vor dem Ende) einer Klimastufe dargestellt wird.

Von Standard-POFs ist bekannt, dass die Faserdämpfung infolge klimatischer Veränderungen bei geraden sowie gebogenen Faserabschnitten unterschiedlich stark ansteigt [ZKZ+07]. Deshalb wurden die Versuchsreihen mit fünf gebogenen Fasern, die jeweils in einem Radius von 20 mm um 360 ° gebogen waren, und fünf geraden Fasern durchgeführt. Die einzelnen Fasern hatten eine Länge von 2 m, wovon effektiv 1,4 m innerhalb des Klimaschranks kreisförmig mit einem Radius von >200 mm ausgelegt werden konnten. Auch wenn die Fasern im geometrischen Sinne nicht gerade verlegt wurden, ist der Verlegeradius ausreichend groß und die Biegeverluste entsprechend vernachlässigbar, sodass von geraden Fasern auszugehen war.

2.4.3.2 Einfluss der Luftfeuchte

In einer ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss der Luftfeuchtigkeit mit konstanter Temperatur von 20 °C auf die Faser untersucht. Dazu wurde die Faser zu Beginn der Messung auf das Referenzklima von 20 °C mit einer Luftfeuchtigkeit von 65 %rh temperiert, welches dem durchschnittlichen Raumklima in Mitteleuropa entspricht. Anschließend wurde die Luftfeuchtigkeit, wie Abbildung 2.13 zeigt, stufenweise verändert und am Ende der Messreihe erneut das Referenzklima eingestellt, um die Reversibilität eines möglichen Einflusses zu kontrollieren.

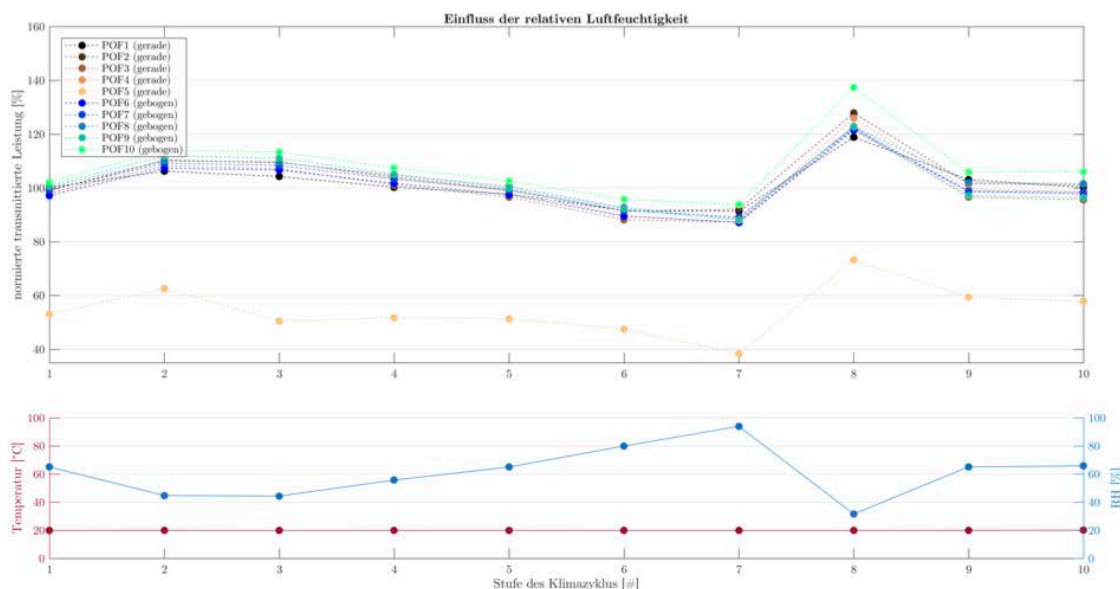


Abbildung 2.13: Verlauf der transmittierten Leistung in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit bei einer konstanten Temperatur von 20 °C. Es ist zu beachten, dass der Verlauf nicht über die Zeit, sondern die einzelnen Stufen des Klimazyklus dargestellt ist.

Mit steigender Luftfeuchtigkeit nimmt die auf das Referenzklima normierte Transmission ab und somit die Faserdämpfung zu. Die Trocknung der Faser durch die Reduzierung der relativen Luftfeuchte von 95 %rh auf 30 %rh (Stufe 7 sowie 8) bewirkt eine Abnahme der Faserdämpfung, sodass diese geringer ist als bei Referenzklima. Zudem ist kein Unterschied zwischen geraden und gebogenen Fasern festzustellen. Insgesamt bestätigt sich damit die zunehmende Wasseraufnahme in das Polymer mit steigender Luftfeuchtigkeit, infolgedessen die Dämpfung ansteigt. Weiterhin ist dieser Prozess bei einer konstanten Temperatur von 20 °C vollständig reversibel und führt zu keiner dauerhaften Faserschädigung.

2.4.3.3 Temperatureinfluss

Neben dem Einfluss der Luftfeuchtigkeit wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt, um den Temperatureinfluss auf die Faser bei einer geringen Luftfeuchte von 10 %rh zu ermitteln (Abbildung 2.14). Ausgehend von 10 °C und 30 %rh wurde die Temperatur zunächst auf -40 °C reduziert und daraufhin stufenweise bis auf 100 °C erhöht. Mit dem Absenken der Temperatur steigt die Dämpfung der Fasern an, tendenziell mehr bei gebogenen Fasern als bei geraden. Jedoch erhöht sich auch die Luftfeuchtigkeit. Der Dämpfungsanstieg kann damit einerseits eine Folge der ansteigenden Materialspannung durch den Temperaturabfall sein, was für den starken Einfluss auf die gebogenen Fasern spricht, andererseits aber auch durch die erhöhte relative Luftfeuchtigkeit hervorgerufen werden. In Stufe 10 erreichten sowohl Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit ungefähr ihr Ausgangsniveau, wodurch ebenfalls die transmittierte Leistung aller Fasern auf ihren Ausgangswert anstieg.

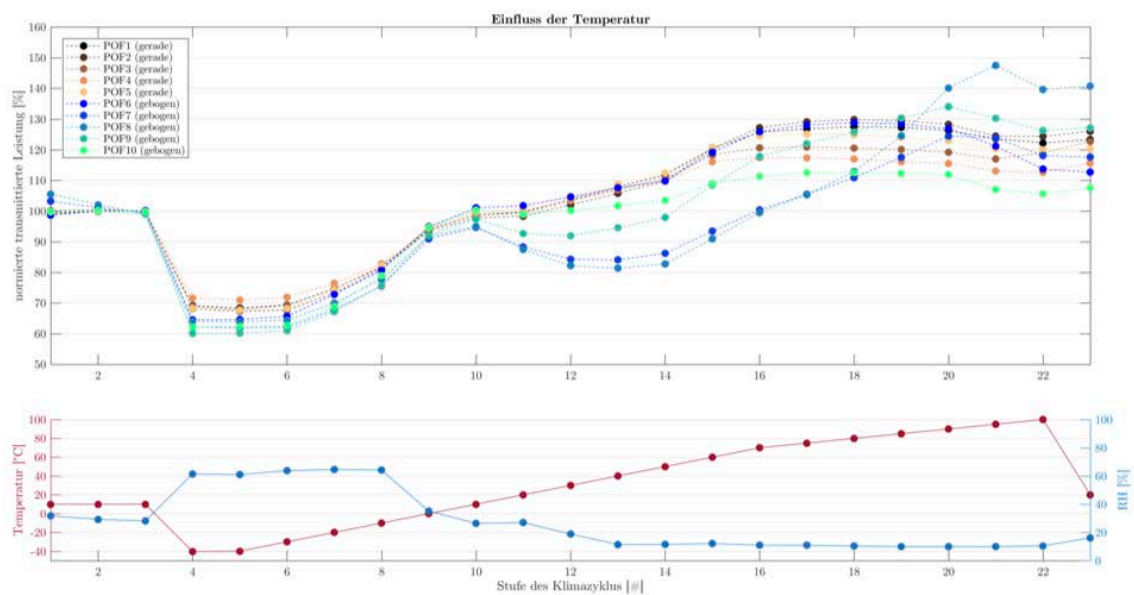


Abbildung 2.14: Verlauf der transmittierten Leistung von zehn Fasern in Abhängigkeit der Temperatur.

Auffällig ist, dass mit dem fortlaufenden Temperaturanstieg auf 30 °C und einer weiteren Abnahme der relativen Luftfeuchte auf 20 %rh die Dämpfung der gebogenen Fasern 7 bis 10 ansteigt, während bei allen anderen Fasern eine Dämpfungsabnahme zu verzeichnen ist. Auch hier kann nicht eindeutig zwischen dem Einfluss der Temperatur und Luftfeuchtigkeit differenziert werden. Erst ab Stufe 13 (40 °C, 10 %rh) ist die relative Luftfeuchtigkeit nahezu konstant und der ausschließliche Temperatureinfluss auf die Faser wird sichtbar: Bis zu einer Temperatur von 80 °C nimmt die Faserdämpfung ab, steigt bis 100 °C aber wieder leicht an. Die Dämpfungsabnahme bis 80 °C ist auf die Verringerung der inneren Spannung des PMMAs zurückzuführen. Dies zeigt auch die unterschiedlich starke Dämpfungsabnahme der einzelnen Fasern infolge des Temperaturanstiegs: Die vorherrschende Materialspannung ist durch das Herstellungsverfahren der Fasern bedingt, jedoch weisen alle Fasern zusätzlich verschiedene Störstellen auf, die ebenso unterschiedlich auf die Temperaturänderung reagieren.

Im Gegensatz zur Versuchsreihe der Luftfeuchtigkeit ist die Veränderung der Faserdämpfung hier nicht reversibel, was einerseits auf eine einsetzende Zerstörung der Polymerstruktur ab 95 °C deuten oder andererseits in der Entspannung der Faser begründet sein kann. Insgesamt beeinflusst damit nicht nur die Luftfeuchtigkeit, sondern auch die Temperatur die Faserdämpfung deutlich, wobei der Temperatureinfluss nur bis 60 °C reversibel ist.

2.4.3.4 Spannungsarmglühen

Die irreversible Abnahme der Dämpfung, wenn die Faser über mehrere Stunden Temperaturen zwischen 60 °C und 80 °C ausgesetzt wird, stellt eine einfache Möglichkeit dar, den Dämpfungsbelag nach der Faserherstellung zu reduzieren. Dazu müsste der Herstellungsprozess selbst nicht einmal verändert werden. Dieser als *Tempern* oder *Spannungsarmglühen* bezeichnete Vorgang wurde daher in einer weiteren Versuchsreihe untersucht. Dafür wurden die Fasern zu Beginn einer Temperatur von 20 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von 65 %rh ausgesetzt, anschließend über 20 h auf 80 °C und 80 %rh temperiert und daraufhin erneut auf das Referenzklima abgekühlt. Bereits zu Beginn des Temperns stellt sich die erwartete Verringerung der Dämpfung ein, wobei sie bei den geraden Fasern stärker ist als bei den gebogenen Fasern, wie in Abbildung 2.15 zu sehen ist. Während des Temperns verringert sich die Dämpfung tendenziell nur sehr gering weiter. Mit der Einstellung des Klimas auf die Ausgangsbedingungen erhöht sich die Transmission noch einmal für gebogene wie auch gerade Fasern gleichermaßen. Die Ursache für die erneute Transmissionserhöhung ist die um 15 %rh geringere Luftfeuchtigkeit des Referenzklimas im Vergleich zum Tempervorgang, die eine verminderte Absorption des PMMAs bedingt. Dementsprechend beeinflussen Temperatur sowie Luftfeuchtigkeit gegenläufig die Transmission beim Tempern. Wäh-

rend die erhöhte Temperatur das Material entspannt und die Transmission erhöht, verursacht die Luftfeuchtigkeit den Anstieg der Faserdämpfung.

Das Spannungsarmglühen bzw. Tempern ist letztendlich eine Möglichkeit, den Dämpfungsbelag der Polymerfasern im Nachhinein zu verringern.

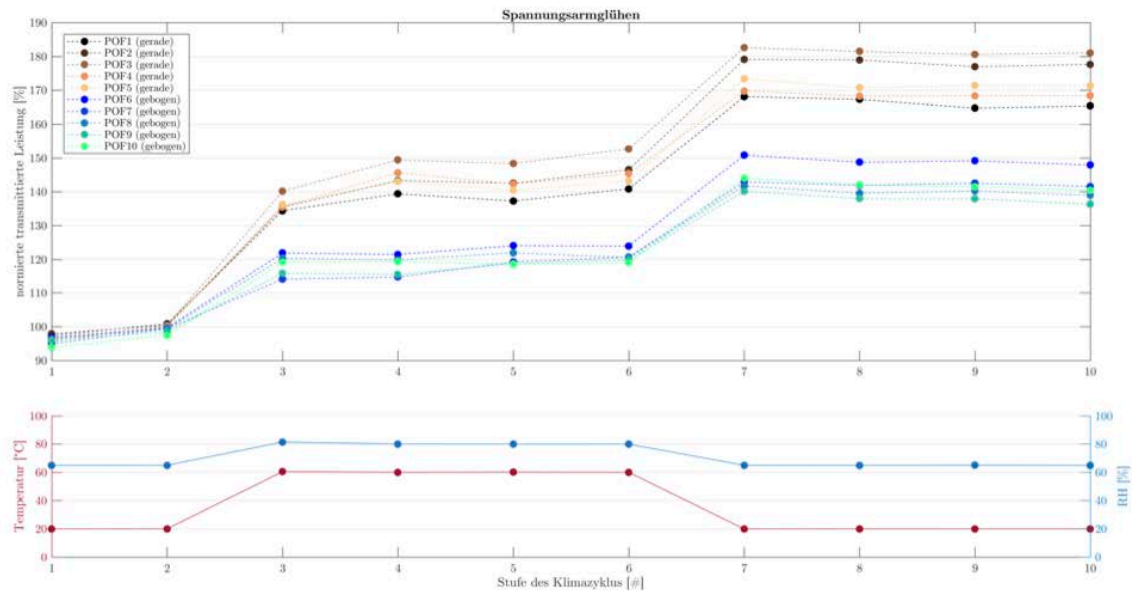


Abbildung 2.15: Verlauf der transmittierten Leistung von zehn Fasern für den Prozess des Spannungsarmglühens.

2.4.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Anhand aller durchgeführten Versuchsreihen konnten die klimatischen Grenzen für den Gebrauch der Polymerfasern spezifiziert werden. Zwischen -40 °C bei 60 \%rh und 60 °C bei 80 \%rh sind auftretende Dämpfungsänderungen bezogen auf das Ausgangsklima von 20 °C und 65 \%rh reversibel. Auch in [Bon09] wird die maximale Dauergebrauchstemperatur von PMMA mit 65 °C angegeben. Die Gebrauchstemperatur kann auch auf 80 °C (bei 80 \%rh) erweitert werden, jedoch verringert sich die Faserdämpfung in diesem Bereich irreversibel und eine beschleunigte Alterung der Faser, die mit den durchgeführten Klimatests nicht untersucht wurde, kann die Folge sein. Weiterhin traten irreversible Faserschädigungen und Verformungen, die zu einem signifikanten Anstieg der Faserdämpfung führen, ab einer Temperatur von 95 °C auf, die der Glasübergangstemperatur von PMMA aus der Literatur [ZKZ+07,BGB16] bzw. [Bon09] entspricht.

Ebenso konnte ein starker Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Faserdämpfung nachgewiesen werden. Dieser Einfluss ist zwar grundsätzlich reversibel, aber bereits kleinste Änderungen der vorherrschenden Luftfeuchte resultieren in einer veränderten Absorption.

2.5 AP 5 – Ökobewertung

2.5.1 Marktanalyse

Den breit gefächerten Einsatzmöglichkeiten von POF entsprechend existiert eine Vielzahl verschiedener Märkte. Die technologischen Vorteile der POF gegenüber Konkurrenzprodukten, wie Glas- und Kupferfasern, aber auch herkömmlichen Sensorik- und Beleuchtungslösungen, sind ausschlaggebend für ihren zukünftigen Markterfolg. Diese sind:

- Geringes Gewicht
- Großer Faserdurchmesser und dadurch günstige Verbindungstechnik
- Störunempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern
- Hohe Datenübertragungsraten im Vergleich zu Kupferkabeln
- Korrosionsbeständigkeit
- Trennung von Lichtquelle und Ort der Beleuchtung [Wei98, ZKZ+07]

Ein Überblick über die rasante Entwicklung des weltweiten POF-Marktes in den letzten Jahren sowie die prognostizierte Entwicklung für die nächsten Jahre ist in Abbildung 2.16 gegeben.

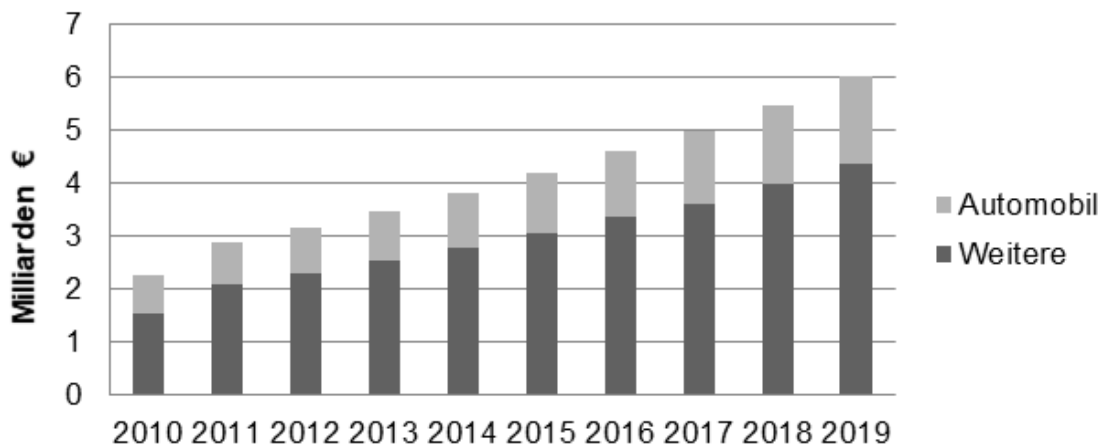


Abbildung 2.16: Prognostizierte Entwicklung des weltweiten POF-Marktes [IGI14].

Abbildung 2.16 ist zu entnehmen, dass sich der POF-Markt von 2010 bis 2019 voraussichtlich mehr als verdoppeln wird. Zu den Hauptwachstumsmärkten von POF zählen der Automobilbereich (z.B. Infotainment-Kommunikationssysteme), häusliche Anwendungen (z.B. Heimnetzwerke), Unterhaltungselektronik sowie industrielle Anwendungen (z.B. Sensorsysteme) [IGI14].

Allgemeine Treiber für fortgeschrittene Datenübertragungslösungen sind die Nachfrage nach „Low-Cost“-Lösungen für Übertragungssysteme und der Trend zu immer größeren Datenraten [IGI14]. Laut [IGI14] erzielte der Automobilsektor 2015 einen Anteil in Höhe von 1,135 Mrd. € am gesamten Marktvolumen. Peter Kroepflin von Sojitz Europe plc, Düsseldorf, Deutschland, schätzt den derzeitigen Bedarf von POF im Automobil in Europa auf 40.000 km. Bislang wurden hauptsächlich Premiumfahrzeuge mit Media-Oriented-Systems-Transport-Bussen (MOST-Bussen) aus POF zur synchronen Übertragung von Audio- und Videodaten ausgestattet. Mit dem erstmaligen Einsatz der Technologie im VW Golf gelang der Einstieg von POF in die Kategorie der Mittelklassewagen [MOS15]. Da ein erhöhter Vernetzungsgrad und viele Neuerungen in den Bereichen Fahrerassistenz, elektrisches Fahren und autonomes Fahren in naher Zukunft zu erwarten sind, wird die Anzahl von POF im Automobil tendenziell weiter steigen [Ric09].

Eine weitere Einsatzmöglichkeit für POF sind Sensoriksysteme. Hierbei kann eine Einteilung in drei grundsätzliche Bereiche vorgenommen werden: Zunächst kann eine POF zur Verbindung eines konventionellen elektrischen Sensors mit einer Messeinrichtung dienen. Dadurch kann auf einfache Weise eine elektrische Isolation erfolgen. Des Weiteren ist der Einsatz von POF als Sende- und Empfängerfaser möglich. Das einfachste Prinzip ist eine Lichtschranke [Löf12]. Außerdem kann eine optische Faser selbst als sensitives Element fungieren, indem z.B. die Transmission durch Biegung oder Dehnung beeinflusst wird. In der Faser werden in diesem Fall Datenleitung und Sensorfunktion kombiniert. Die steigende Nachfrage nach Medizinprodukten, aufgrund des gesellschaftlichen demografischen Wandels, verschiebt das Interesse hin zu altersunterstützenden Lösungsansätzen. POF-Sensoren haben das Potential, durch Ansätze wie das Vitalfunktions-Monitoring, den Aufenthalt von Senioren im eigenen Heim ohne zeit- und kostenintensive Betreuung durch Pflegepersonal zu verlängern [KLL08].

Im Bereich der Beleuchtungstechnik werden Polymerfasern bereits vermehrt eingesetzt. Zum einen werden sie als Lichtleiter verwendet, wodurch eine räumliche Trennung von Lichtquelle und Beleuchtungsort erfolgen kann. Als Lichtleiter in Fahrzeugen werden POF bereits seit über 30 Jahren verwendet [IGI14]. Exemplarisch seien folgende Anwendungsgebiete aufgeführt [ZKZ+07]:

- Beleuchtung von explosionsgefährdeten Räumen
- Notbeleuchtung
- Detailbeleuchtung im Fahrzeug

Zum anderen können optische Polymerfasern auch selbst als Leuchtmittel eingesetzt werden. Dabei wird zwischen der Punktlicht- und Linienbeleuchtung unterschieden. Bei der Punktlichtbeleuchtung tritt das Licht erst am Ende der Faser aus, sodass ein Lichtpunkt entsteht. Bei der Linienbeleuchtung erfolgt eine radiale Abstrahlung des in die Faser eingekoppelten Lichts. Die radiale Lichtabstrahlung wird durch Asymmetrien in

der Faserstruktur erreicht. Dazu können entweder spezielle Streu- oder Leuchtadditive während der Faserherstellung zugefügt werden oder die Faseroberfläche wird nachträglich mechanisch bearbeitet.

Zur Verifizierung des Marktpotentials von POF wurde eine Befragung unter elf Vertretern der Herstellung, Weiterverarbeitung, Anwendung sowie des Vertriebs durchgeführt, die alle am Markt für optische Fasern, sowohl Polymer- als auch Glasfasern, tätig sind. Die Berücksichtigung aller Marktebenen ermöglicht einen breiten Überblick über aktuelle Trends. Die Teilnehmer wurden hinsichtlich ihrer Meinung bez. des größten technologischen Entwicklungs- und Marktpotentials der drei Hauptanwendungsgebiete Datenübertragung, Sensorik und Beleuchtung befragt. Zentrale Ergebnisse sind in Abbildung 2.17 dargestellt.

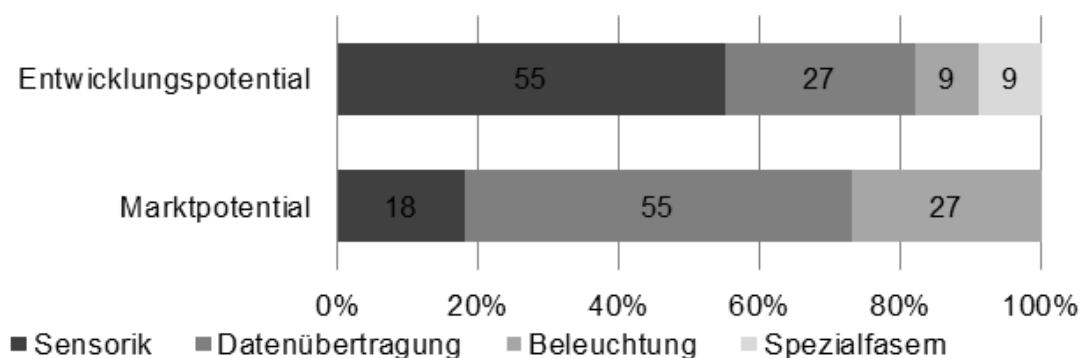


Abbildung 2.17: Entwicklungs- und Marktpotential optischer Fasern laut Befragung.

Das höchste technologische Entwicklungspotenzial wird laut Abbildung 2.17 bei 55 % der Befragungsteilnehmer in der Sensorik gesehen. Das größte Marktpotenzial von 55 % liegt nach Ansicht der Mehrheit dagegen in der Datenübertragung.

2.5.2 Materialbewertung

Die Analyse der zurzeit verfügbaren Biopolymere ergab, dass keine kommerziell erhältlichen Biopolymere die Anforderungen an die optischen und teilweise auch nicht die mechanischen Eigenschaften erreichen. Die beiden aussichtsreichsten Kandidaten sind Estane ECO 62A NAT 021 TPU sowie Pearlthane ECO D12T80, die ggf. in den kommenden Jahren als Substitut für das im Rahmen des Vorhabens verwendete PMMA eingesetzt werden könnten.

Das neuartige Schmelzspinnverfahren verwertet als Rohstoff das Polymer Polymethylmethacrylat und benötigt zur GI-POF-Produktion, anders als die meisten alternativen Herstellungsverfahren, notwendigerweise keine zusätzlichen Additive.

PMMA findet in zahlreichen Anwendungsgebieten Verwendung. Während der Nutzphase von PMMA und PMMA-basierten Produkten treten in der Regel keine umweltbe-

lastenden Emissionen auf. Die hauptsächliche Umweltbelastung entsteht durch PMMA bei nicht umweltgerechter Entsorgung. In Folge der Entsorgung von PMMA oder auch anderer Kunststoffe in die natürliche Umwelt beginnen diese Stoffe sich langsam zu zersetzen und bedeuten so eine Bedrohung für Lebewesen und Organismen verschiedener Ökosphären. Hergestellt wird PMMA aus fossilen Brennstoffen und Mineralölprodukten, die im Zuge der Zersetzung von PMMA als umweltbelastende Stoffe mit ihrer Umwelt in Wechselwirkung treten.

Umweltgerecht werden Kunststoffe grundsätzlich mithilfe von thermischen, mechanischen oder chemischen Recycling-Prozessen entsorgt. Beim thermischen Recycling werden die Kunststoffe verbrannt, um so die darin gespeicherte Energie freizusetzen. Durch die Verbrennung von PMMA entsteht kaum Qualm, es werden vorwiegend Kohlenstoffdioxid und Wasser freigesetzt. Die Entstehung akut toxisch wirksamer Substanzen ist aufgrund der chemischen Zusammensetzung von PMMA nicht möglich. Durch die Verbrennung von reinem PMMA können keine toxisch-problematischen Dioxine entstehen. Ökologisch ist das thermische Recycling wenig problematisch. Das mechanische Recycling ist zwar ebenfalls als umweltfreundlich einzustufen, durch die geometrischen Maße der GI-POF mit ca. einem Millimeter Durchmesser ist es für dieses aber nur bedingt geeignet [www15b; www15c]. PMMA kann beim chemischen Recycling mithilfe thermischer Krackverfahren nahezu 100 % zurück in sein Ausgangsmonomer MMA (Methylmethacrylat) gespalten werden [Bou15]. Das resultierende Monomer lässt sich in seiner Qualität nur geringfügig von neuem Material unterscheiden [Bou15].

Mit der zusätzlichen Möglichkeit des chemischen Recyclings ist PMMA bei umweltgerechter Entsorgung grundsätzlich als ökologisch wertvolles Material für optische Polymerfasern zu bewerten. In Bezug auf das neuartige Schmelzspinnverfahren ist im Vergleich zu alternativen Herstellungsverfahren insbesondere die Verarbeitung reinen PMMA und der Verzicht auf Additive und Dotanden positiv hervorzuheben. Chemisches sowie thermisches Recycling werden in ihrer Komplexität, dem verfahrenstechnisch aufwendigen Separieren der einzelnen Ausgangsstoffe, weiter vereinfacht und ermöglichen so auch qualitativ höherwertiges Recycling.

2.5.3 Prozessbewertung

An dieser Stelle folgt eine qualitative Abschätzung zum Vergleich der Umweltauswirkungen des neuartigen Herstellungsverfahrens zu alternativen Produktionsmöglichkeiten.

Wie schon in der Einleitung beschrieben werden konventionelle Herstellungsverfahren differenziert zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren. Sämtliche diskontinuierliche Verfahren haben gemeinsam, das zunächst eine Preform hergestellt und daraus später durch heißziehen die Polymerfaser gewünschten Durchmessers

erzeugt wird. Energetisch anspruchsvolle Prozesse sowie geringe Produktionsraten führen dazu, dass diskontinuierliche Herstellungsverfahren für GI-POF sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch dem neuartigen Herstellungsverfahren gegenüber als schwächer zu bewerten sind.



Abbildung 2.18: Qualitativer Vergleich des CO₂-Fußabdrucks von GI-POF nach dem neuartigen Fertigungsprozess und aus diskontinuierlichen Verfahren (vgl. [www15a]).

Neben diskontinuierlichen Herstellungsverfahren existieren auch die kontinuierlichen Verfahren, die wie das behandelte neuartige Verfahren grundlegend auf Schmelzspinnprozessen beruhen. Die Ähnlichkeit der Verfahren lässt ein eindeutiges Ranking ihrer ökologischen Verträglichkeit ohne spezifische Daten aus der Produktion nicht zu. Die Abwägung der unterschiedlichen Faktoren gegeneinander ist im Zuge dieser Arbeit nicht eindeutig möglich, es wird an dieser Stelle in Bezug auf die Treibhausgasemissionen von ähnlichen ökologischen Auswirkungen ausgegangen.



Abbildung 2.19: Qualitativer Vergleich des CO₂-Fußabdrucks von GI-POF aus verschiedenen kontinuierlichen Verfahren (vgl. [www15a]).

2.5.4 Produktbewertung

Die Produktbewertung soll nicht nur die Faser an sich, sondern das gesamte Kabel zur Datenübertragung bewerten. Daher werden verschiedene, gängige Technologien im Vergleich betrachtet. Als Basis für die grundsätzliche Produktbewertung dienen jeweils Musterstücke von 1,0 m Länge. Als Muster wurden Kabeltypen verwendet, die in Gebäudenetzen, heute oder zukünftig, die Basisdienste TV, Internet, Datendienste und

IP-Telefonie übernehmen können. Bei der Betrachtung hinsichtlich der Auswirkungen auf Umwelteinflüsse wurden besonders auf die Fertigung von Komponenten, den Transport und die Installation geachtet. Als grundsätzlicher Bewertungsfaktor für die Umwelteinflüsse kann das Gewicht der Kabel herangezogen werden. Dieses wird durch eine Vielzahl von Komponenten erzeugt die alle für sich den Prozess der:

- Rohstoffgewinnung
- Rohstoffverarbeitung
- Materialveredelung
- Transport der verschiedenen Komponenten
- Produkterstellung
- Entsorgung

durchlaufen müssen.

2.5.4.1 Gesamtgewicht und Volumen

Bei der Analyse des Gesamtgewichts gibt es ein eindeutiges Ergebnis. Die optische Polymerfaser mit 2 Fasern von jeweils 1,5 mm Außendurchmesser hat ein Gesamtgewicht, das um den Faktor 12- bis 19-mal kleiner ist als das der anderen Kabel (siehe Tabelle 2.11)

Tabelle 2.11: Gewichte typischer Kommunikationskabel im Vergleich mit der Polymerfaser.

Netzwerk-kabel	Koaxialkabel	Kat.5 Kabel	Kat.6 Kabel	POF
Gesamtgewicht	49,7 g	31,0 g	33,7 g	2,6 g
Faktor	19	12	13	1

Das Gewicht hat einen positiven Einfluss bei der Montage sowie dem Transport. Die POF wird auf Spulen von 500 m Länge geliefert. Diese Spulen sind leicht von den Montagekräften zu tragen. Vergleichbar muss für eine Spule mit Koax- oder Kat.-Kabel ein Transporthilfsmittel eingesetzt werden. Das Volumen ist neben dem Gewicht ein wichtiger Faktor für den Transport solcher Spulen. Wegen der höheren Ladungskapazität (Länge Kabel) ergeben sich erste positive Auswirkungen auf die Umwelteinflüsse.

Tabelle 2.12: Querschnitte typischer Kommunikationskabel im Vergleich zur Polymerfaser.

Netzwerk-kabel	Koaxialkabel	Kat.5 Kabel	Kat.6 Kabel	POF
Querschnitt	38 mm ²	28 mm ²	38 mm ²	4 mm ²
Faktor	10	7	10	1

Das Volumen hat aber auch bei der Installation im Baubestand große Auswirkungen. So kann die POF auf Grund der geringen Abmessungen durchaus in Schutzrohre mit

vorhandenen Kabeln eingezogen werden. Hierbei ist die Art des vorhandenen Kabels nicht von Bedeutung. Es können Stromkabel, Koaxialkabel und Kupferkabel jeglicher Art sein. Die Einsparungen an neuen Rohrsystemen und deren Montage kommt den Kosten aber auch der Umwelt, durch die nicht erforderliche Fertigung und den Transport von Rohren, entgegen.

2.5.4.2 Kunststoffanteil

Alle Kabel haben einen Mantel aus Kunststoff. Bei den Koaxial- und Kat.-Kabeln ist dieser grundsätzlich aus PVC, bei der POF aus Polyethylen.

PVC ist hinsichtlich der Entsorgung das kritischere Produkt. Wird PVC verbrannt, bildet sich ätzender, gasförmiger Chlorwasserstoff, der mit Wasser oder Luftfeuchtigkeit Salzsäure bildet. Bei der Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen muss diese mit Kalk in den Ablüftungsanlagen neutralisiert werden.

Bei diesen hohen Temperaturen entstehen durch die verbrannten Kunststoffe allerdings hochgiftige Dioxine. Die Verbrennung erfolgt unvollständig und rußend. Der entstehende Rauch und Ruß enthält kondensierte Aromaten, wie Benzopyren, Pyren und Chrysen, die hochgiftig und karzinogen wirken. Zudem stellen schwermetallhaltige Stabilisatoren wie etwa Bleidistearat weitere Gefahren dar.

Die im Verhältnis geringere Masse an Kunststoff der POF und der Art des Kunststoffes (Kern aus PMMA sowie Mantel aus PE) machen die POF zu einem unkritischen Produkt hinsichtlich der Handhabung und Entsorgung. Bei der energetischen Verwertung treten keine Problemsituationen auf.

2.5.4.3 Metalle und Bestandteile

Metalle benötigen einen energiereichen Prozess der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung. Die Komponenten Aluminiumfolie, verzinnertes Eisendrahtgeflecht und Kupferleitungen benötigen jede für sich aufwendige Herstellungsprozesse. Diese sind durch Maschineneinsatz mit hohem Energieverbrauch gekoppelt.

Folgende Tabelle ergibt einen Überblick über die Komponenten der verschiedenen Netzkabel. Bei allen in der Tabelle 2.13 beschriebenen Komponenten und deren Eigenschaften ist die POF im Vergleich zu den anderen aufgelisteten Kabeln in Bezug auf die wirtschaftlichen und ökologischen Effekte klar im Vorteil.

Tabelle 2.13: Anteile einzelner Materialien in verschiedenen Typen gängiger Kommunikationskabel.

Netzkabel	Material	Koaxialkabel	Kat.5 Kabel	Kat.6 Kabel	POF
Außenmantel	PVC	24,1 g	12,5 g	14,9 g	

	PE				1,7 g
Schirmfolie	Alu	2,5 g	0	0	0
Schirmgeflecht	Eisendraht	7,1 g	0	2,6 g	0
Schirmfolie	Aluminium	5 g	0	2,6 g	0
Schaum-PE	PE	3,9 g	0	0	0
Aderisolation	PE	0	3,7 g	3,4 g	0
Innenleiter	Kupfer	7,2 g	14,8 g	10,3 g	0
	PMMA				1 g

Direkte Auswirkungen auf die Umwelt sind alle die Vorgänge bei denen die Umwelt durch Abgase entweder in der Energieerzeugung, des Transports durch LKW und anderen Fahrzeugen oder der Entsorgung entstehen.

Indirekte Auswirkungen entstehen durch die Einsparung von Kunststoffprodukten wie Rohre und Kanäle, da die POF in vorhandene eingezogen werden kann. Zur Herstellung der eingesparten Rohre, etc. wäre Energie und Transport erforderlich geworden. Diese Auswirkungen können zum jetzigen Zeitpunkt nur schlecht in realen Zahlen dargestellt werden.

3 Fazit

Abschließend kann das neuartige Schmelzspinnverfahren hinsichtlich aller oben beschriebenen Aspekte bewertet werden. Es zeigt sich, dass die Faser in verschiedenen Marktsegmenten Einsatz finden kann. Diese Märkte entwickeln sich gerade. Neben dem offensichtlichen Einsatz in der Telekommunikation sind insbesondere Beleuchtung und Sensorik aufstrebende Märkte, die u.a. von der Automobilindustrie aufgegriffen werden. Da die Qualitätskriterien für optische Kommunikationsfasern aus verschiedenen technischen Gründen nicht vollständig erreicht werden konnten, sind diese Anwendungen gute Türöffner in bestehende Märkte, weil diese geringe Anforderungen an die Fasern stellen, die diese auch erfüllen.

Die Materialbewertung zeigt, dass zwar (noch) keine Biopolymere für die Faser selbst verwendet werden können, wenn diese in der Telekommunikation eingesetzt werden soll. Allerdings sind insbesondere für Beleuchtungsanwendungen Biopolymere einsetzbar, was auch in den letzten Monaten in Industriekooperationen weiterverfolgt wird. Zudem sind nicht optische Teile des Kabels mit Biopolymeren realisierbar, was jedoch nicht Teil dieses Vorhabens war.

Das Fertigungsverfahren kommt vollständig ohne Dotierstoffe und giftige Zusätze aus, die ökonomisch und ökologisch bedenklich sein könnten. Das reine PMMA, das im Prozess verwendet wird, ist weniger umweltbelastend als konkurrierende Technologien, wie klassische Stufenindex-Polymerfasern, aber auch elektrische Kabel. Da zudem auch noch weitere Anwendungsmöglichkeiten jenseits der reinen Datenübertragung möglich sind, ist die Faser in mehrerlei Hinsicht interessant.

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Faser ist von mehreren Industriepartnern im Test für kommerzielle Anwendungen, die von Beleuchtung bis Sensorik reichen. Die ersten Ergebnisse sind so vielversprechend, dass die Markteinführung sehr wahrscheinlich ist.

4 Literaturverzeichnis

- [BBG14] Bunge, C.-A.; Beckers, M.; Gries, T.: Simple and Adjustable Fabrication Process for Graded-Index Polymer Optical Fibers with Tailored Properties for Sensing, Proc. of IEEE Sensors, 2014, S. 1527-1530, Valencia, doi:10.1109/ICSENS.2014.6985306
- [Bey74] Beyer, H.: Theorie und Praxis der Interferenzmikroskopie Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Porting K.G., Leipzig (1974).
- [Bon09] M. Bonnet. Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung: verstehen und zuverlässig auswählen, Vieweg Studium, Vieweg+Teubner-Verlag, 2009, ISBN: 9783834893031.
- [BBG16] C.-A. Bunge, M. Beckers, T. Gries (Hrsg.), Polymer optical fibres: fibre types, materials, fabrication, characterisation and applications, Woodhead Publishing Ltd., ISBN 9780081000397, Sept. 2016.
- [Bou15] Boustead, I.: Eco-profiles of the European Plastics Industry, 2015.
- [Dem05] Wolfgang, Demtröder: Kern-, Teilchen- und Astrophysik: mit 62 Tabellen, zahlreichen durchgerechneten Beispielen und 104 Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen; Berlin [u.a], Springer-Verlag, 2005.
- [Dem08] Wolfgang Demtröder: Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik 5.Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (2009).
- [DIN07] DIN EN 60068-2: Umgebungseinflüsse. Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung, Apr. 2007.
- [Gra99] Graf, J.: Dissertation – Entwicklung und Untersuchungen zur Herstellung verlustarmer passiver Wellenleiter und verstärkender Wellenleiter. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 1999.
- [GR86] Göring, R.; Rothhardt, M.: Application of the Refracted Near-Field Technique to Multimode Planar and Channel Waveguides in Glass Journal of Optical Communications 7 (1986), H. 6, S. 82-85.
- [Hol13] Holt, N.: Entwicklung eines Sensor-überwachten ballistischen Faserverbund-Schutzaufbaus mit schmelzgesponnenen optischen Polymerfasern als Sensorsystem Aachen, RWTH Aachen University, Diplomarbeit, 10.2013.
- [HP05] 125 Megabaud Versatile Link Fiber Optic Connection Technical Data. HFBR-1527. Hewlett Packard Inc. Jan. 2005.

- [IGI14] Information Gatekeepers Inc. (IGI) (Ed.): Plastic Optical Fiber Market & Technology Assessment Study 2014
Boston, MA: IGI, 2014.
- [KLL08] Krebber, K.; Lenke, P.; Liehr, S.; Witt, J.; Schukar, M.: Smart technical textiles with integrated POF sensors
Proceedings of SPIE Vol. 6933 (2008).
- [Löf12] Löffler-Mang, M.: Optische Sensorik - Lasertechnik, Experimente, Light Barriers
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, 2012.
- [Mar11] Marti, O.: Grundlagen der Physik IIIb Elektrizitätslehre
Ulm: Institut für Experimentelle Physik, Universität Ulm, 2011, URL: <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/gk3b-2003-2004/node21.html>
(Zugriff: 03.06.2015).
- [Me16] Operating Manual Climatic test chamber CTC 256. CTC 256. Memmert GmbH + Co. KG. Nov. 2016.
- [MOS15] MOST Cooperation: MOST Informative, April 2015, Issue 11, URL: <http://www.mostcooperation.com/publications/most-brochures-newsletters/most-brochures-newsletters/download/most-informative-april-2015-with-most-forum-papers/>
- [Ric09] Richter, H.: Elektronik und Datenkommunikation im Automobil
Clausthal-Zellerfeld: Institut für Informatik, Technische Universität Clausthal, 2009, URL: <https://www.in.tu-clausthal.de/fileadmin/homes/techreports/ifi0905richter.pdf>
- [Sch90] F. R. Schwarzl. Polymermechanik. Erste Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1990).
- [Sch99] Schrader, S.; Faserherstellung In Schlachetzkie, A.; Dorenwendt, K. (Hrsg.): Polymeroptische Fasern: Herstellung und Anwendung PTB-Bericht, Externes Seminar, Goslar, 16. – 18. März 1999.
- [Wei98] Weinert, A.: Kunststofflichtwellenleiter: Grundlagen, Komponenten, Installation
Erlangen ; München: Publicis-MCD-Verl., 1998.
- [Wil13] Wilms, Christian:
Kosteneffizientes Produktionsverfahren zur Herstellung von Carbonfaser-Precursoren.
Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2013.
- [www15a] https://openclipart.org/image/300px/svg_to_png/170434/eco-green-carbon-print-icon.png, Zugriff am 18.02.2015.

- [www15b] http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/ueber/faq/Pages/brandverhalten.aspx#faq_0_3, Zugriff am 05.03.2015.
- [www15c] <http://www.plexiglas-and-energy.com/de/umweltschutz/recycling/>, Zugriff am 04.03.2015.
- [ZKZ+07] Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P. E.; Daum, W.: POF-Handbuch. Band. Aufl. 2., bearb. und erg. Aufl Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.