

Gemeinsame Freihandveröffentlichung

Veröffentlichungsdatum

30. Oktober 2020

Verbundprojekt

„Entwicklung einer modular strukturierten Anlagentechnik für das Glasätzen auf der Basis reduzierender Salzschnmelzen (SaltEtch)“

Förderkennzeichen

02P16K540 und 02P16K541

Laufzeit

01.05.2017 - 31.03.2020 (34 Monate)

Programm

KMU-innovativ: Produktionsforschung

Einreichungsrunde: 15.10.2016

Projektträger

Projektträger Karlsruhe

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1

76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Partner

Stühff GmbH

Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und
Mikrointegration IZM

Mercatorstraße 53
21502 Geesthacht (Schleswig-Holstein)

Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin



Projektkoordinator

Holger H. Stühff

Stühff GmbH

Tel.: +49 4152 8855-950

Mail: info@stuehff-gmbh.de

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	II
1. Aufgabenstellung	3
1.1. Kurzbeschreibung Verbundprojekt	3
1.1.1. Problemlage	3
1.1.2. Verbundprojektpotenzial	3
1.1.3. Vorgehensweise	3
1.1.4. Ergebnisverwertung	4
2. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens	5
2.1. Stand der Wissenschaft und Technik – alternative Lösungen und Informationsrecherchen zu Beginn des Vorhabens	5
2.2. Stand der Wissenschaft und Technik – alternative Lösungen und Informationsrecherchen zu Ende des Vorhabens	7
3. Erzielte Ergebnisse	9
3.1. Erzielte gemeinsame Ergebnisse zu Projektbeginn	9
3.1.1. Anforderungsspezifikation und Entwicklungsschwerpunkte	9
3.1.2. Erarbeitung des konstruktiven Anlagenkonzepts	10
3.1.3. Verfahrenstechnologisches Anlagenkonzept	10
3.2. Ergebnisse des Projektpartners Stühff GmbH	11
3.2.1. Materialuntersuchungen und Materialauswahl	11
3.2.2. Ergebnisse der konstruktiven Arbeiten	11
3.3. Ergebnisse des Projektpartners Fraunhofer IZM	12
3.3.1. Realisierung einer Laborätzanlage und Sicherheitstechnik für das Ätzen von LWL-Glasfasern	12
3.3.2. Prozessentwicklung zur Herstellung von LWL-Glasfasertapern in Salzschmelzen	13
4. Nutzen für die Projektpartner	15
4.1. Stühff GmbH	15
4.2. Fraunhofer IZM	15
5. Literaturverzeichnis	16

Abkürzungsverzeichnis

LWL	Lichtwellenleiter
PTKA	Projektträger Karlsruhe
HF	Chemische Summenformel für Flusssäure/Fluorwasserstoffsäure
Fraunhofer IZM	Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Projekts ist gleichzeitig der Arbeitstitel des Vorhabens „Entwicklung einer modular strukturierten Anlagentechnik für das Glasätzen auf der Basis reduzierender Salzschnmelzen“ unter dem Projekttitel „SaltEtch“. Derzeit gibt es keine kommerziellen Anlagen dieser Art zur Entwicklung glasbasierter Bauteile.

Zwecks Erläuterung dieses durchgeführten Vorhabens stellen die Projektpartner im Folgenden nochmals kurz das Verbundprojekt vor und gehen danach auf die ursprüngliche Problemlage, das Potenzial, die Vorgehensweise sowie die ursprünglich angestrebte Ergebniswertung ein.

1.1. Kurzbeschreibung Verbundprojekt

Das KMU-innovativ Verbundprojekt: „Entwicklung einer modular strukturierten Anlagentechnik für das Glasätzen auf der Basis reduzierender Salzschnmelzen (SaltEtch)“ ist ein gemeinsames Projekt der Verbundpartner Stühff GmbH, Geesthacht und Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin (kurz Fraunhofer IZM). Die Stühff GmbH als KMU hat die Koordination des Projekts übernommen.

1.1.1. Problemlage

Die optische Fasertechnik ist von stetig wachsender Bedeutung für Kommunikation und Sensorik. Eine wichtige Teiltechnologie zur Herstellung von faseroptischen Komponenten ist derzeit das Ätzen von Glasfasern mittels Flusssäure, welche allerdings die Strukturierung im Mikrometerbereich und die Zuverlässigkeit begrenzt und deren Einsatz zudem hohe und damit teure Sicherheitsmaßnahmen erfordert. Ein Qualitätssprung könnte durch den Übergang zu, mit Salzschnmelzen geätzten Glasfasern erzeugt werden, für deren Produktionsprozess derzeit keine Anlagentechnik verfügbar ist.

1.1.2. Verbundprojektpotenzial

Das Ziel des KMU-Projekts SaltEtch ist daher die Entwicklung einer Anlagentechnik für das Glasätzen mit Salzschnmelzen. Der Fokus liegt auf der Flexibilität in der Prozessführung und der damit einhergehenden geforderten Genauigkeit für die zu ätzenden Bauteile. Dadurch soll das bisher nicht erschlossene Potenzial geätzter Glasbauteile nutzbar gemacht werden. Die mechanische und optische Qualität der strukturierten Gläser wird um ein Vielfaches höher erwartet als bei herkömmlich geätzten Komponenten.

1.1.3. Vorgehensweise

Zunächst sind die Anforderungen an die Anlagentechnik zu erarbeiten. Hierbei ist von den Projektpartnern auf die verfahrenstechnischen und konstruktiven Rahmenbedingungen einzugehen. Davon ausgehend werden die Komponenten für die Anlagentechnik entwickelt, die in einem Labormuster zur Validierung des Ätzprozesses sowie des Potenzials zur industriellen Fertigung und Steuerung münden. Dabei sind u. a. die verfahrenstechnische Umsetzung und die konstruktiven Ansätze zu testen. Dazu wird auch auf eine computergestützte Umsetzung und Simulation, u. a. zur Festigkeitsberechnung, zurückgegriffen. Anhand dieser Ergebnisse erfolgt der Aufbau einer Demonstratoranlage, die die technische Umsetzbarkeit des Prozesses zeigen soll. Dazu wird das Verfahren gegebenenfalls angepasst und das Fertigungskonzept überprüft. Dies ermöglicht eine Kombination der Anlagenperipherie mit verschiedenen Ätzkammerkonfigurationen, sodass kundenspezifische Anforderungen modular umgesetzt werden können.

1.1.4. Ergebnisverwertung

Der modulare Ansatz bildet die Basis für die überdurchschnittlichen Erfolgsaussichten. Zielklientel bilden zunächst Faserhersteller und Hersteller von Komponenten für die Fasertechnik. Es können auch Anforderungen erfüllt werden, die weit über die glasfasergebundene Datenkommunikation hinausgehen. So besteht ein Bedarf an industrietauglichen Anlagen zum Ätzen und Verfestigen von Gläsern, die auch für mittelständische Unternehmen einsetzbar sind. Die Nutzung von ätzenden Salzschmelzen wird zu einer signifikanten Erhöhung der Qualität und durch die Substitution von Flußsäure auch zur Verringerung des sicherheitstechnischen Aufwandes führen.

Wichtige Begriffe

Für die gesamte vorliegende gemeinsame Vorhabenbeschreibung gilt, dass der verwendete Sprachgebrauch „Glasätz-Anlage“ oder „Anlage“ stets eine Kurzform von „Demonstrator-Glasätz-Anlage“ darstellt.

Unter einem sogenanntem Taper versteht man ein konisch verjüngtes Faser-Bauteil, das andere Bauteile unterschiedlicher Durchmesser miteinander verbindet. Äquivalent hierzu ist der Prozess zu verstehen, bei dem eine Durchmesserreduzierung an einem optischen Bauteil durchgeführt wird (Tapern).

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

Dieses Kapitel stellt den wissenschaftlichen Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens gegenüber. Zunächst wird der Stand vor Beginn des Vorhabens erläutert. Im anschließenden Abschnitt werden die aktuellen Erkenntnisse vorgestellt und mit der ursprünglichen Ausgangslage verglichen.

2.1. Stand der Wissenschaft und Technik – alternative Lösungen und Informationsrecherchen zu Beginn des Vorhabens

Ein Charakteristikum von unbehandelten Gläsern besteht in deren geringen effektiven Festigkeit und Elastizität. Ursächlich hierfür ist die Anwesenheit von zahllosen mikroskopisch kleinen Rissen in der Glasoberfläche. Diese können als Bruchinitial dienen, was zur technisch problematischen Sprödigkeit des Glases führt. Hinzu kommt, dass diese Risse, sofern die Gläser unbehandelt bleiben, größer werden können und damit das Zerstörungsrisiko wächst. Bleiben die Risse geschlossen oder werden diese beseitigt, findet eine signifikante Erhöhung der effektiven vorgenannten Eigenschaften statt. (Vogel, 1992)

In der Vergangenheit wurden verschiedene technologische Verfahren zum Schließen der Risse entwickelt, um in der Glasoberfläche eine homogene Druckspannungsschicht zu erzeugen, die auch bei einer Biegebeanspruchung erhalten bleibt. Bereits vorhandene Mikrorisse werden dabei geschlossen, die Einleitung des Bruchvorganges wird verhindert. Häufig verwendete Verfahren zur Druckvorspannung der Glasoberfläche sind das thermische Vorspannen, das für sehr kleine Bauteile jedoch nicht angewendet werden kann und das chemische Vorspannen mittels Alkali-Ionenaustausch bei alkalihaltigen Gläsern, welches zur Erhöhung des molaren Volumens in der Glasoberfläche führt. (Scholze, 1988)

Für viele Bauteile aus Glas und im Besonderen auch für Glasfasern sind Ätzprozesse zur Strukturierung, hier insbesondere zur Durchmesserreduzierung, für viele Anwendungen notwendig. Bislang werden solche Ätzprozesse üblicherweise auf Basis von wässrigen Flußsäure-Lösungen und mit manuellen Prozeduren realisiert. Gravierende Probleme dieses Verfahrens bestehen im Kontext der oben beschriebenen Zuverlässigkeitsproblematik in der fortschreitenden Schädigung der Fasern nach Beendigung des Prozesses durch äußere Umwelteinflüsse. Zum anderen kommen eine hohe Umweltbelastung sowie ein sehr hoher arbeitsschutztechnischer Aufwand hinzu.

Auch die Möglichkeit, die Mikrorisse mittels Politurätzen in wässrigen Ätzlösungen zu beseitigen, ist nicht zielführend. Dort werden als Ätzmittel für Silikatgläser gegenwärtig Flußsäure (HF), Phosphorsäure (H_3PO_4) und Schwefelsäure (H_2SO_4) genutzt. Das Glas ist jedoch nach dem Ätzen in diesem Zustand bei der Handhabung oder beim Aussetzen gegenüber Luftfeuchtigkeit, höheren Temperaturen und Abrieb weiterhin sehr empfindlich und die Festigkeit geht rasch auf den ursprünglichen geringen Wert zurück. Ursache dafür sind die Hydrate der Ätzmittel, welche sich beim Ätzprozess auf der Oberfläche bilden und erneut eingebrachte Mikrorisse. Eine Lösung für die Erhöhung und den Erhalt der Festigkeit von Gläsern nach dem Politurätzvorgang wird durch das Ätzen und den Ionenaustausch in Salzschmelzen erreicht. (Ray & Stacey, 1969)

Im geplanten KMU-innovativ Projekt besteht der Ansatz darin, auch das Ätzen für die Durchmesserreduzierung von Glasfasern in wasserfreien Salzschmelzen umzusetzen und schließt damit die oben genannte Problematik von vornherein aus. Bei diesem neuartigen

Verfahren zum Volumenabtrag bei Glas kommt es parallel zu einer Oberflächenhärtung, welche auch bei höheren Temperaturen und für lange Zeit erhalten bleibt. Aus gegenwärtiger Sicht ist vorgesehen, das Ätzen mit Salzschnmelzkombinationen aus verschiedenen Träger- und Ätzsätzen durchzuführen.

Durch das Ätzen mit Salzschnmelzen wird die Handhabbarkeit von feinst strukturierten Halbzeugen in der Glasfaser- und optischen Schaltelementtechnik ermöglicht. Ergebnisse vorangegangener Grundlagenforschung am Fraunhofer IZM mit durch Salzschnmelzen geätzten Fasern zeigen sehr gering einstellbare Biegeradien im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren des HF-Ätzens. Durch die sehr feinen Strukturen ist auch die Anwendung für bisher nicht herstellbare Strukturen wie z. B. Multi-Core-Schnmelzkoppler denkbar (Zamora, et al., 2017). Mit dem Verfahren des Ätzens in Salzschnmelzen können Faserdurchmesser von ca. 10 µm und kleiner zuverlässig erreicht werden. Im Vergleich dazu ist man beim HF-Ätzen von Glasfasern auf einen zuverlässig erzielbaren Durchmesser von ca. 60 µm beschränkt. Grund dafür ist die geringe Ausbeute bei noch dünner geätzten Fasern, die dort wegen der unzureichenden Festigkeit oft zerstört werden.

Die technologischen Herausforderungen bei der Entwicklung einer Ätzkammer für das Ätzen von Glasfasern in Salzschnmelzen bestehen darin, sehr kleine und filigrane Fasern in guter Qualität (Reproduzierbarkeit, Formtreue, etc.) mit hohem Durchsatz und Flexibilität (verschiedene Faserdicken und Ätzlängen) prozessierbar zu machen, die sehr heißen Ätzmedien schnell zum empfindlichen Ätzgut zu transportieren und wieder abzuführen. Hinzu kommt das Temperatur- und Druckmanagement. Des Weiteren muss die Ätzkammer gegen die zu verwendenden Salzschnmelzen korrosionsbeständig sein. Hier gilt es, eine hohe Standzeit zu erreichen, um die Eignung für eine industrietaugliche Fertigung zu gewährleisten. Hierzu sind Materialuntersuchungen für verschiedene Varianten erforderlich. (Sohal, Ebner, Sabharwall, & Sharpe, 2010)

Tabelle 1 greift die in diesem Abschnitt gemachten Aussagen auf und fasst diese in Spalte 2 für den Stand der Technik zusammen. Spalte 3 stellt das angestrebte Ergebnis des Verbundprojekts dar (Stand 2017) und stellt diese dem Stand der Technik gegenüber. Die Tabelle ermöglicht so einen übersichtlichen Vergleich zwischen dem Stand der Technik und dem KMU-innovativ Verbundprojekt SaltEtch. (Baudis & Kreutz, 2001)

Tabelle 1: Vergleich zwischen dem Stand der Technik und dem anvisierten Entwicklungsziel (Stand 2017)

	Stand der Technik	Ziele SaltEtch
Anzahl an Ätzkammern	Multiple (Salzbadstraßen)	eine Ätzkammer (kleines Bauvolumen), austauschbar + anpassbar
Anzahl möglicher Salzzusammensetzungen je Ätzkammer	eine Salzzusammensetzung je salzführender Kammer	multiple/sequenziell Salzzusammensetzung je salzführendem Behälter
Automatisierung	Vollautomatisierte Salzbadstraßen	Teilautomatisierte Ätzkammer
Anlagensicherheit	<ul style="list-style-type: none"> - Faser: HF - Logistik für Ver- und Entsorgung finanziell und sicherheitstechnisch aufwändig - Hohes Badvolumen 	<ul style="list-style-type: none"> - Faser: keine fluoriden Gase, in Größenordnung geringer als bei konventionellem Prozess - Logistik für Edukte sicher, Reaktionsprodukte wesentlich ungefährlicher als HF - Geringeres Badvolumen: <ul style="list-style-type: none"> • Prozessführung im Vakuum möglich • Kontrolle und Ableitung entstehender Prozessgase
Ätzende Salze	Nicht vorhanden	Vorhanden
Materialbeständigkeit der Anlage	Nicht vorhanden	Vorhanden
Befüllung und Entleerung der Behälter	Lange Zyklen, manuell gesteuert	Kurze Zyklen, je nach Notwendigkeit, Reinigung als Zwischenschritt automatisiert möglich, keine mechanische manuelle Reinigung
Prozessvolumen	Mehrere Tonnen	Wenige zig Kilo
Modularität des Anlagenkonzepts für verschiedene Prozesse	Keine, Individualentwicklung (für kleine Badmengen)	Individuell konfigurierbar
Rüstzeit für neue Prozessfolge	Lang	Kurz
Reinraumtauglichkeit	Nein	Ja (Grau-/Weißraumtrennung)
Kosten (Prozess + Invest)	Hoch	Gering

2.2. Stand der Wissenschaft und Technik – alternative Lösungen und Informationsrecherchen zu Ende des Vorhabens

Die später dargestellten Ergebnisse des Verbundprojektes zeigen eindeutig, dass die untersuchte Technologie des Ätzens mit Salzschmelzens auf eine industriefähige Ebene gehoben werden kann. Die entwickelte Demonstrationsanlage stellt sicher, dass die gewonnenen Erkenntnisse auf Seiten der Forschung vertieft und in die industrielle Praxis im Rahmen von Weiterentwicklungen überführt werden kann.

Die erreichten Spezifikationen der untersuchten LWL-Glasfasern erreichen durch die ermittelte Prozessvorbereitung und Prozessführung die erforderlichen Spezifikationen, die nun mit der Demonstrationsanlage näher untersucht und skaliert werden können. Ein Vergleich der ursprünglichen Einschätzung zum bisherigen Stand der Technik und den Projektergebnissen zeigt, dass lediglich an einer Stelle, der der Kosten, eine Anpassung vorgenommen ist (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Vergleich zwischen dem Stand der Technik und dem anvisierten Entwicklungsziel (Stand 2020)
 Änderungen sind fett und kursiv hervorgehoben

	Stand der Technik	SaltEtch
Anzahl an Ätzkammern	Multiple (Salzbadstraßen)	eine Ätzkammer (kleines Bauvolumen), austauschbar + anpassbar
Anzahl möglicher Salzzusammensetzungen je Ätzkammer	eine Salzzusammensetzung je salzführender Kammer	multiple/sequenziell Salzzusammensetzung je salzführendem Behälter
Automatisierung	Vollautomatisierte Salzbadstraßen	Teilautomatisierte Ätzkammer
Anlagensicherheit	<ul style="list-style-type: none"> - Faser: HF - Logistik für Ver- und Entsorgung finanziell und sicherheitstechnisch aufwändig - Hohes Badvolumen 	<ul style="list-style-type: none"> - Faser: keine fluoriden Gase, in Größenordnung geringer als bei konventionellem Prozess - Logistik für Edukte sicher, Reaktionsprodukte wesentlich ungefährlicher als HF - Geringeres Badvolumen: <ul style="list-style-type: none"> • Prozessführung im Vakuum möglich • Kontrolle und Ableitung entstehender Prozessgase
Ätzende Salze	Nicht vorhanden	Vorhanden
Materialbeständigkeit der Anlage	Nicht vorhanden	Vorhanden
Befüllung und Entleerung der Behälter	Lange Zyklen, manuell gesteuert	Kurze Zyklen, je nach Notwendigkeit, Reinigung als Zwischenschritt automatisiert möglich, keine mechanische manuelle Reinigung
Prozessvolumen	Mehrere Tonnen	Wenige zig Kilo
Modularität des Anlagenkonzepts für verschiedene Prozesse	Keine, Individualentwicklung (für kleine Badmengen)	Individuell konfigurierbar
Rüstzeit für neue Prozessfolge	Lang	Kurz
Reinraumtauglichkeit	Nein	Ja (Grau-/Weißraumtrennung)
Kosten (Prozess + Invest)	Hoch	<i>Mittel</i>

3. Erzielte Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die inhaltlich erarbeiteten Ergebnisse und sind zum Teil explizit nicht nach Teilvorhaben getrennt. Dies unterstreicht die enge Zusammenarbeit der Projektpartner. So ist zu Beginn des Projekts eine gemeinsame Basis geschaffen worden, mit der in die einzelnen Teilvorhaben gegangen werden konnte. Vor dem Hintergrund der aufgetretenen Herausforderungen mussten die Projektpartner gemeinsam reagieren und ihr Vorgehen teilweise anpassen, um einen Projekterfolg sicher zu stellen. Die erzielten Ergebnisse wurden immer wieder zusammengeführt und somit zwischen den Projektpartnern geteilt.

3.1. Erzielte gemeinsame Ergebnisse zu Projektbeginn

3.1.1. Anforderungsspezifikation und Entwicklungsschwerpunkte

Anforderungsspezifikation

Zu Beginn des Projekts haben die Projektpartner gemeinsam Anforderungen ermittelt und ausführlich dokumentiert. Hierzu wurden die verschiedenen Lebensphasen der zu entwickelnden Demonstrationsanlage als Leitfaden herangezogen. In diesen Rahmen wurden entsprechend die Anforderungen an die potenziell herzustellenden Halbzeuge eingebettet. So haben insbesondere geätzte bikonische Glasfasertaper eine große kommerzielle Bedeutung für die Nutzung in der optischen Nachrichtentechnik. Diese geätzten bikonischen Glasfasertaper werden inmitten einer Glasfaser geätzt werden (siehe Abbildung 1). Sie stellen nach dem Ätzen eine Verjüngung dar. Die Festlegung der Zielparame-ter des Ätzens der Glasfasertaper in Salzschmelzen erfolgte in Anlehnung an das konventionelle Ätzen in HF. Als Referenz wurden innerhalb des Projektes spezifische Zielparame-ter mit den dazugehörigen Toleranzbereichen von zu ätzenden Glasfasertapern für die Herstellung von faseroptischen Komponenten genutzt.

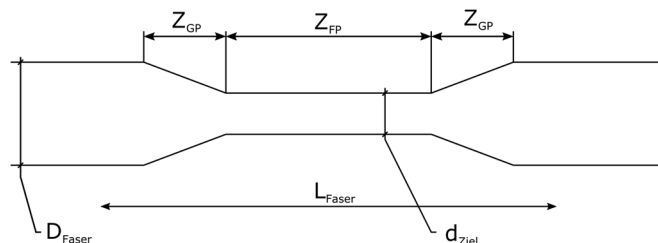


Abbildung 1: Allgemeine Zielgeometrien eines strukturierten bikonischen Glasfasertapers, welcher mittels Ätzen in Salzschmelzen hergestellt werden soll

Die Herausforderung neben der Entwicklung des chemisch reaktiven Ätzprozesses innerhalb des freien Glasfaserbereiches war des Weiteren auch die Gewährleistung der thermochemischen Zerstörungsfreiheit des Glasfaseracrylates außerhalb des freien Glasfaserbereiches. Diese muss gewährleistet sein, da eine Zerstörung des Glasfaseracrylates die weitere Verwendung zur Herstellung von faseroptischen Komponenten verhindert.

Als Ergebnis der Entwicklung der Anforderungsspezifikationen für die Anlagen- und Prozessentwicklung ist es den Projektpartnern gelungen Parameter zu spezifizieren, mit welchen es im Verlauf des weiteren Projektes ermöglicht wurde, sowohl die Prozessentwicklung als auch die Anlagenentwicklung für die Demonstrationsanlage zu gewährleisten.

Entwicklungsschwerpunkte festgelegt

Um die vorhandenen Kapazitäten möglichst optimal einsetzen zu können, haben sich die Projektpartner gemeinsam mit der Schwerpunktsetzung während der Demonstratorentwicklung auseinandergesetzt und sich dabei des Houses of Quality bedient. Dabei stellte sich heraus, dass von den voraussichtlich 15 Demonstratormerkmalen fünf als Entwicklungsschwerpunkte zu betrachten und diese vorzugweise zu bearbeiten sind.

3.1.2. Erarbeitung des konstruktiven Anlagenkonzepts

Demonstratorfunktionen festgelegt

Für eine zielgerichtete Entwicklung der Demonstratoranlage zum Ätzen auf der Basis von Salzschmelzen sind sowohl die Funktionen an sich, als auch deren Reihenfolge festzulegen. Hierzu sind verschiedenste Varianten betrachtet und gegenübergestellt worden. Die Umsetzung der letztendlich erarbeiteten Funktionsstruktur erfolgte schrittweise, um zunächst die Kernelemente um den Prozess an sich zu realisieren und anschließend auf die angestrebte Demonstratoranlagenperipherie einzugehen.

Teillösungen und prinzipielle Gesamtlösung ermittelt

Für die zuvor in der Funktionsstruktur festgelegten Funktionen wurden verschiedene Teillösungen ermittelt und zur Auswahl der prinzipiellen Gesamtlösung zusammengestellt. Hierbei waren verschiedene Methoden und Techniken anzuwenden, um aus der Gesamtmenge der über 50 Billionen Varianten die zu verfolgende Variante begründet auszuwählen.

Durch Verfahren zur Beherrschung der Variantenflut wurden sieben Varianten ausgewählt und anschließend bewertet. Hierzu wurden die Eigenschaften der einzelnen Varianten näher betrachtet und sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Wertigkeit untersucht. Die letztlich ausgewählte Variante stellt einen Kompromiss aus wirtschaftlicher und technischer Wertigkeit dar. Die Demonstrationsanlage soll sowohl die Machbarkeit als oberstes Ziel erfüllen als auch den gesetzten Kostenrahmen einhalten.

Das vor Projektbeginn angestrebte konstruktive Anlagenkonzept ist im Verlauf des Vorhabens mehrfach durch die Stühff GmbH überarbeitet und angepasst worden. Aufgrund der Kombination an Anforderungen an Material, Temperaturbeständigkeit, Druckbereich und Dichtungstechnik sind Lieferanten nicht in der Lage gewesen, notwendige Zulieferteile bereit zu stellen. Durch Anpassungen ist es der Stühff GmbH gelungen, ein Anlagenkonzept anzugehen und umzusetzen.

Letztendlich umgesetzt wurde ein konstruktives Anlagenkonzept, das eine Trennung verschiedener Funktionen vorsieht. So ist die Konditionierung der Trockensalze und die Homogenisierung in einem Teil der Anlage angesiedelt, während der Ätzprozess an sich in einem anderen Teil der Anlage durchgeführt wird. Zudem gibt es Speicher, die die Salzschmelze im Falle einer Prozessunterbrechung oder nach Prozessabschluss aufnehmen. Dies dient der Sicherheit des Anwenders, da ein direkter Kontakt mit der Salzschmelze somit verhindert wird.

3.1.3. Verfahrenstechnologisches Anlagenkonzept

Auf Basis der erarbeiteten Anforderungsspezifikationen sind in Zusammenarbeit verfahrenstechnologische Konzepte für die Prozess- und Anlagenentwicklung erarbeitet worden. Hierbei wurden Varianten der geregelten Prozessfolge, Prozessflussdiagramme bzw. Ablaufschemata, Randbedingungen der Arbeitsökonomie und Arbeitssicherheit und die Mensch-Maschine-Schnittstelle entwickelt.

Als Ergebnis der Entwicklung von Varianten der geregelten Prozessfolge sind fünf Konzepte von technologischen Varianten des Ätzens zur Herstellung bikonischer Glasfasertaper in Salzschnmelzen erarbeitet worden. Für die Bewertung und Auswahl der optimalen Konfiguration der technologischen Varianten wurde eine morphologische Analyse durchgeführt. Dabei wurden 12 Auswahlkriterien als Parameter für die Variantenbewertung erarbeitet, welche zusätzlich ihrer Bedeutung gemäß gewichtet wurden. Als höchstbewertete Favoriten für die weitere technologische Entwicklung im Projekt haben sich zwei Varianten ergeben, die für die weitere Erarbeitung ausgewählt wurden. Für die beiden ausgewählten Varianten sind dann erweiterte lösungsnahе technologische Konzepte erarbeitet worden, um eine finale Entscheidung für die weitere Entwicklung des Faserätzprozesses in der Demonstrationsanlage zu treffen.

Als Ergebnis der Entwicklung der Randbedingungen von Arbeitsökonomie und Arbeitssicherheit sind eine chemisch reaktive Abschätzung der möglichen austretenden Abgase während des Ätzprozesses von LWL-Glasfasern mittels Salzschnmelzen gemacht und darauffolgend sind Abgasmessungen von fluorhaltigen Gasen mittels manueller Gasprüfung an Salzschnmelzen durchgeführt worden. Mit den gewonnenen Ergebnissen wurde dann ein Sicherheitskonzept zum Schutz des Operanden und der Umwelt, für den Fall, dass die Arbeitsplatzgrenzwerte der Abgase überschritten werden, erstellt. Bei der Entwicklung des Sicherheitskonzeptes für Nutzung von Salzschnmelzanlagen im Fraunhofer IZM sind die Anforderungen der Haustechnik und der Berufsgenossenschaft berücksichtigt worden. Für die Demonstrationsanlage ist ein arbeitsökonomisches Konzept zum Verfahrensablauf zur Herstellung von geätzten Fasertapern in Salzschnmelzen entwickelt worden.

Als Ergebnis der Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle sind ein softwareseitiges Bedienkonzept der Programminteraktion des Operanden mit der Demonstrationsanlage für Prozessentwickler und Technologen (Anlagenbediener), ein Software-Mockup (Modellbildschirm-Interface) der Anlagenbedienung und ein Hardware Bedienkonzept der Glasprobenzuführung, -entnahme und -qualifizierung im Verfahrensablauf konzipiert worden.

3.2. Ergebnisse des Projektpartners Stühff GmbH

3.2.1. Materialuntersuchungen und Materialauswahl

Im Rahmen des Projekts erfolgten ausführliche Materialuntersuchungen. Insgesamt wurden nach Vorversuchen mehrere Korrosionsversuche durchgeführt und die zu untersuchenden Parameter stetig angepasst und ergänzt. Hier sind bereits vorhandene Kenntnisse auf Seiten des IZMs in die Recherche und Durchführung der Stühff GmbH mit eingeflossen und konnten somit zur erfolgreichen Materialauswahl beitragen.

Neben den Materialuntersuchungen wurden ergänzend dazu Glasätzversuche anhand von Glasfasern und zwei verschiedene Flachglastypen durchgeführt. Diese dienten dazu, verschiedene Salzgemische und deren Einfluss auf den Prozess und die Produktqualität hin zu untersuchen. Die Proben wurden sowohl zuvor als auch nach dem Ätzen mit den vorhandenen Messmitteln vermessen, um einen ersten Eindruck gewinnen zu können. Dadurch konnte die Auswahl potentieller Salzschnmelzen eingeschränkt und optimiert werden.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse konnte die Stühff GmbH die erfolgreiche Umsetzung der Demonstrationsanlage weiterverfolgen und schlussendlich umsetzen.

3.2.2. Ergebnisse der konstruktiven Arbeiten

Die Stühff GmbH hat intensiv an konstruktiven Lösungen zur Umsetzung der Demonstrationsanlage gearbeitet und kann eine Vielzahl von Erfolgen verzeichnen. Klassischerweise ist

eine Vielzahl an iterativen Änderungsschleifen durchlaufen worden, um zur letztendlichen Konstruktion der Demonstrationsanlage zu gelangen. Insbesondere die Ventil- und Förder-technik erforderte tiefgehende Untersuchungen. Aber auch die Temperaturmesstechnik und die zugehörige Anlagensteuerung samt Sicherheitstechnik hat die Stühff GmbH vor Herausforderungen gestellt, die sie schlussendlich lösen konnte. Darüber hinaus sind die Verbindungstechnik, das Gasmanagement und die für die prozessrelevante Relativbewegung zwischen zu bearbeitenden Werkstück und Salzschmelze sowie die Werkstückaufnahme erarbeitet worden. Einen ersten Eindruck der entwickelten Demonstrationsanlage zeigt Abbildung 2.

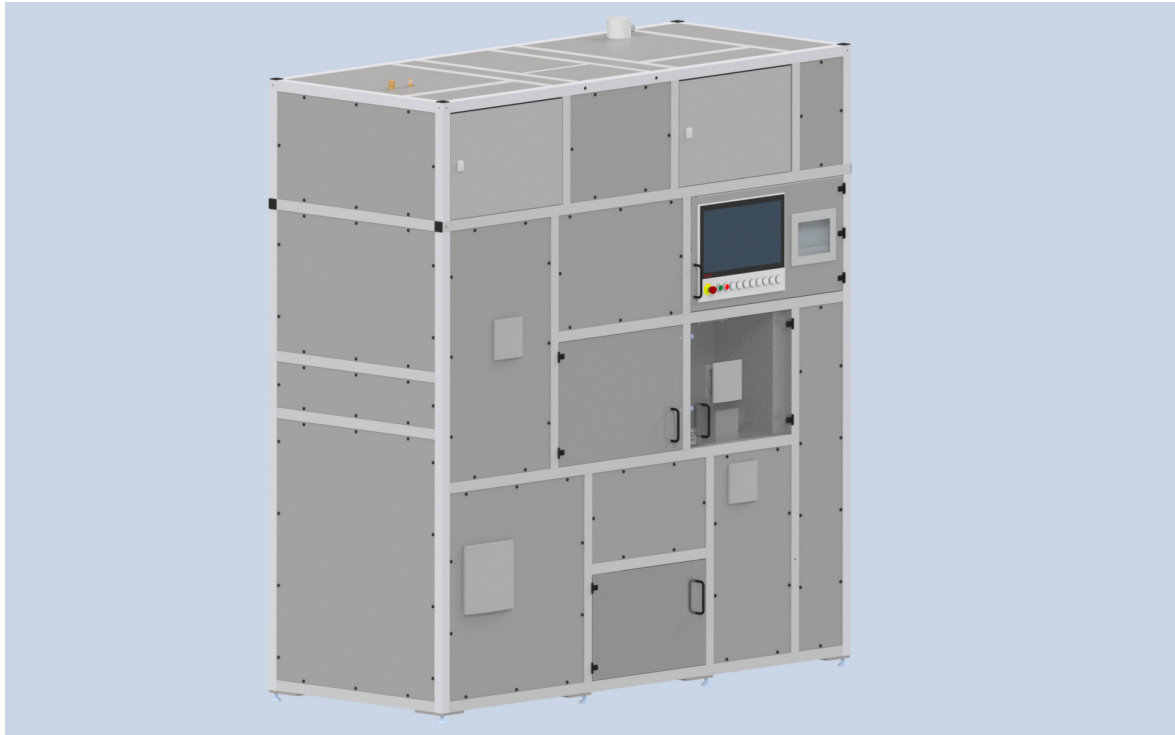


Abbildung 2: CAD-Modell der entwickelten Demonstrationsanlage

3.3. Ergebnisse des Projektpartners Fraunhofer IZM

3.3.1. Realisierung einer Laborätzanlage und Sicherheitstechnik für das Ätzen von LWL-Glasfasern

Erste Untersuchungen zur Machbarkeit des Ätzens von Glasfasern in Salzschmelzen sind vor Projektstart erfolgreich getestet worden. Dies geschah anfänglich in einem Ofenprozess und im Weiteren in einer Salzbadheizung

Für die Geräteentwicklung beim Projektpartner Stühff GmbH war es innerhalb des Projektes nötig, den Ätzprozess im Labormaßstab so weit zu entwickeln, dass für den Bau der Demonstrationsanlage die Gerätespezifikationen und Prozessabläufe zum erfolgreichen Ätzen von LWL-Glasfasertapern vorgegeben werden konnten. Zu diesem Zweck wurden für eine bereits vorhandene Salzbadheizung technische Erweiterungen entwickelt und gefertigt, um somit das Ätzen von LWL-Glasfasertapern in einer Laborätzanlage zu ermöglichen.

Die Entwicklung einer Werkstückaufnahme geschah in mehreren Entwicklungsstufen. Mit dem dabei gewonnenen Wissen konnte abschließend von dem Projektpartner Stühff GmbH eine erste Version eines für die Fertigung angepassten Werkstückhalters gefertigt werden, der universell sowohl für die Laborätzanlage als auch für die Demonstrationsanlage nutzbar ist. Für eine definierte und für den Bediener sichere Zustellung des Werkstückhalters wurde

eine automatisierte motorisierte Werkstückhalteraufnahme entwickelt. Bevor mit der Entwicklung der Prozesstechnik begonnen werden konnte, musste jedoch zuerst der Arbeitsschutz bei der Anlagenbedienung gewährleistet sein. Die Sicherheitstechnik der Laborätzanlage entwickelte sich in mehreren Schritten und überwacht mehrere Parameter, wie die Temperatur, bestimmte Gase, usw.

3.3.2. Prozessentwicklung zur Herstellung von LWL-Glasfasertapern in Salzschmelzen

Aus den erarbeiteten Anforderungsspezifikationen ist zur Erreichung von diesen im Laufe des Projektes ein Prozess zur Herstellung von LWL-Glasfasertapern im Labormaßstab entwickelt worden, welcher es gestattete, mehrere LWL-Glasfasern gleichzeitig in einem Prozessrun in Salzschmelzen zu ätzen. Dazu sind die folgenden Arbeiten erfolgreich durchgeführt worden:

- Auswahl von Ätzsalmgemischen
- Entwicklung eines Ätzmodells für den definierten Ätzabtrag
- Entwicklung eines universellen Werkstückhalters von mehreren LWL-Glasfasern in einem Prozessrun
- Entwicklung der Prozessfolge zur Fertigung von LWL-Glasfasertapern

Bei der Entwicklung der Prozessfolge zur Fertigung von LWL-Glasfasertapern wurde im Fraunhofer IZM ein standardisierter Prozess entwickelt. Probleme, die es bei der Entwicklung des Prozesses gab, wurden systematisch gelöst, so dass zum Ende des Projektes eine optimierte Fertigung durchgeführt werden konnte.

Das Resultat eines Fertigungsvorganges war ein in die LWL-Glasfaser bikonisch geätzter Fasertaper. In Abbildung 3 ist ein mittels zweiachsigem Lasermesssystem gemessenes Profil des Faserdurchmessers einer Multi-Mode-Faser nach dem Ätzen mit der Bezeichnung der entsprechenden Zielparameter A, B, C und D dargestellt. Links und rechts neben dem freien Ätzbereich A ist der Durchmesser des Faseracrylates nach dem Ätzen zu sehen. Der Bereich A (Soll 26 mm) ist der mit dem Absetzwerkzeug erzeugte ätzbare Bereich durch das Absetzen des Mantelacrylates der LWL-Faser. Der Bereich B ($\leq 20 \text{ mm} > D$) ist der gesamte Bereich, in welchem der Ätzangriff durch die Salzschmelze effektiv stattgefunden hat. Der C-Wert (Sollbereich 62...67 μm , Durchmesser-toleranz 2 μm) ist der Tailendurchmesser des Fasertapers im Bereich D und ist deshalb auch der Minimaldurchmesser. Der Bereich D ($\geq 10 \text{ mm} \leq B$) ist der Taperzonenbereich innerhalb welchem die faserspezifischen Toleranzen erfüllt sein mussten.

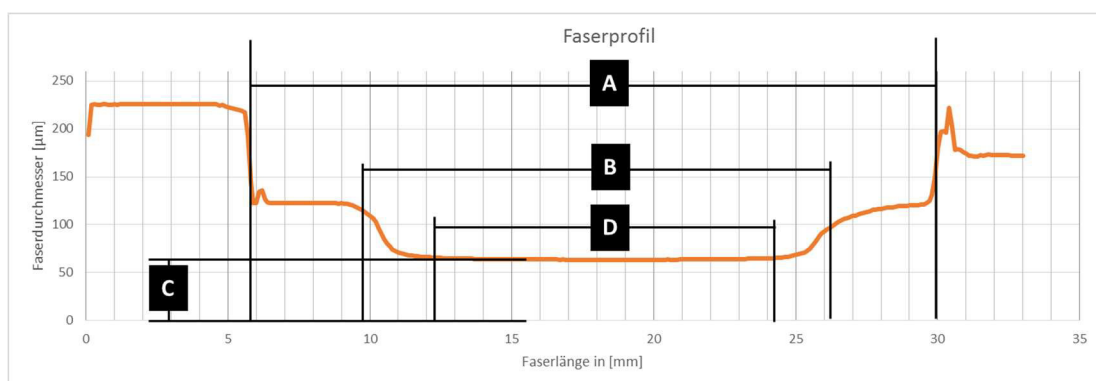


Abbildung 3: Beispiel von Messwerten des Durchmesserprofils der Probe einer in der Salzschmelze geätzten Multimode-Gradientenindexfaser; A, B, C und D sind die spezifischen Zielparameter aus Abschnitt 3.1.1. Die gemessenen Werte für eine Faser-Probe sind A = 24,0 mm; B = 16,7 mm; C = 63,5 μm ; D = 12,2 mm;

In Abbildung 4 ist noch einmal ein Zoom in den für die spätere Faserkomponentenfertigung relevanten Bereich D dargestellt. Dort konnte genau gemessen werden, ob die geätzte LWL-Faser die Zielspezifikationen für die weitere Fertigung erreicht hatte oder nicht. In dem konkreten, in Abbildung 4 dargestellten Fall wurden die Zielspezifikationen erreicht.

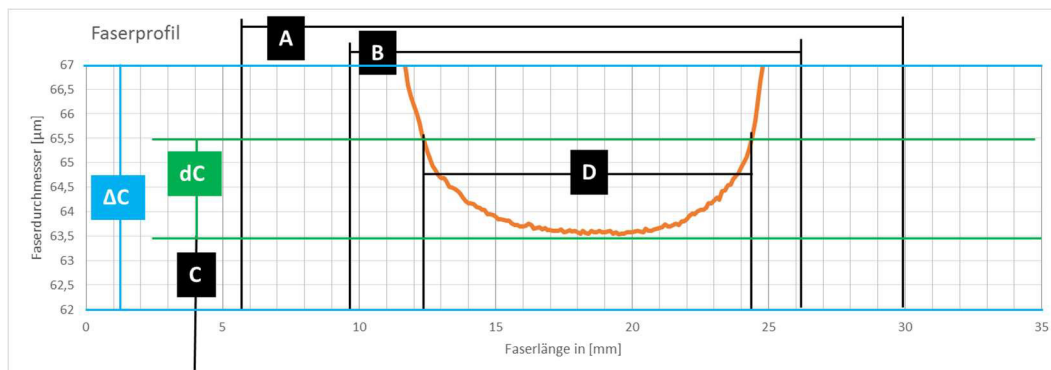


Abbildung 4: Zoom des Durchmesserprofils aus Abbildung 3 in den spezifizierten Zielwertbereich ΔC von 62...67 µm des Faserdurchmessers hinein; dC ist der spezifizierte absolute Toleranzbereich von 2 µm additiv zum realen Durchmesserminimum C; aus dC resultiert die gemessene nutzbare Länge D = 12,2 mm zur Herstellung bikonische profilierte Faserkomponenten

Entwicklung der Kleinserienfertigung von LWL-Glasfasertapern in Salzschnmelzen

Nachdem die Entwicklung des Prozessablaufes zur Herstellung von LWL-Glasfasertapern in seinen Grundzügen abgeschlossen war, fanden erste Tests zur Kleinserienfertigung statt. Dabei wurden Fasertaper aus Multimode- und Singlemodfasern hergestellt. Dies geschah mit dem im Projekt von den Projektpartnern gemeinsam entwickelten neuen Werkstückhalter. Dieser zeigte in der Bearbeitung der Glasfasern eine deutliche Verbesserung. Zum einen gilt dies in der Arbeitsergonomie und zum anderen in der Zuverlässigkeit hinsichtlich Zielparametererreichung der geätzten LWL-Glasfasertaper.

In Abbildung 5 sind die statistischen Auswertungen der erzeugten Fasertaperdurchmesser als Ergebnis der Entwicklung einer Kleinserienfertigung in mehreren Versuchsdurchgängen (Run`s) dargestellt. Dabei ist mit der Fertigung von Multimodefaser tapern begonnen worden und es wurden sukzessive die Prozessparameter so angepasst, dass der geforderte enge Zieldurchmesserbereich von 55 -58 µm für die Fertigung von bikonisch profilierten Faserkomponenten erreicht wurde. Für diesen Zweck mussten des Weiteren bei der Herstellung aus Multimodefasern immer Faserpaare im Zieldurchmesserbereich ausgewählt werden, welche eine Durchmesserabweichung von maximal 2 µm haben dürfen. Bei der Herstellung aus Singlemodfasern durfte die Durchmesserabweichung der Faserpaare im Zieldurchmesserbereich nur 0,1 – 0,2 µm betragen. Dafür war allerdings im Vergleich zu den Multimodefaser tapern der Zieldurchmesserbereich von 100 – 120 µm wesentlich größer.

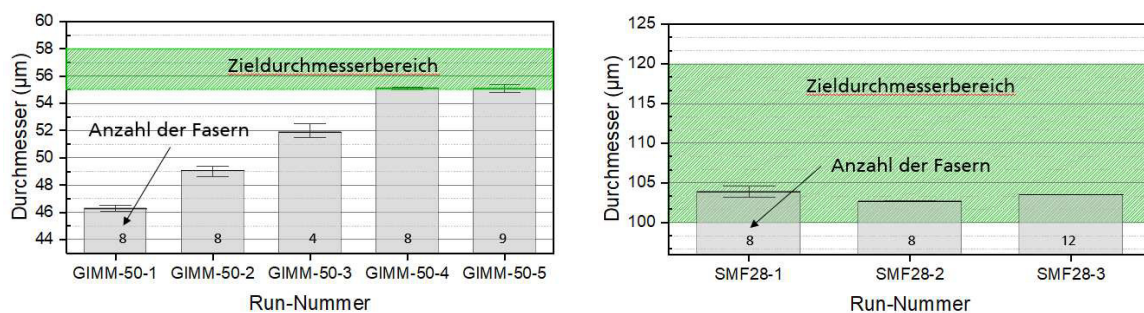


Abbildung 5: Statistische Auswertung der Versuchsdurchgänge (RUN`s) prozessierter Fasertaper aus Multimode- und Singlemodfasern

4. Nutzen für die Projektpartner

4.1. Stühff GmbH

Die Stühff GmbH betrachtet die erarbeiteten Ergebnisse als außerordentlich vielversprechend und zukunftsorientiert. Ein Bestandteil der Bekanntmachungsstrategie ist ein Messestand auf einer internationalen Fachmesse mit potenziellen Kunden auf Aussteller- wie auch Besucherseite. Als geeignete Messe ist die Optatec identifiziert worden. Die Stühff GmbH hat sich als Aussteller angemeldet und wird die Demonstrationsanlage als das zentrale Ausstellungsstück des Messestandes präsentieren.

Der vor Projektbeginn angestrebte Nutzen aus unternehmerischer Sicht hat sich damit als realisierbar erwiesen und wird daher weiterverfolgt. Zur Streuung des Risikos und Sicherung der vorhandenen Arbeitsplätze in der Stühff GmbH hat sich die Geschäftsführung zu einer Ausgründung entschieden und die Aufgabe der Verwertung der Ergebnisse an die neugegründete AMSTOG GmbH übertragen.

Die AMSTOG GmbH hat somit das Ziel potenzielle Kunden, wie die FOC-fibre optical components GmbH, die Fiberware GmbH, die Oberon GmbH, die Schröder Spezialglas GmbH sowie die LightFab GmbH von einem Technologiewechsel basierend auf den wesentlichen Prozessvorteilen auf den gesteigerten Qualitätsmerkmalen der Produkte zu überzeugen. Zur umfassenden Markterschließung strebt die AMSTOG GmbH den Aufbau mehrerer Standbeine an. So soll neben einem Anlagenvertrieb auch die Dienstleistung der Glasbearbeitung angeboten werden. Ergänzend hierzu sind der Vertrieb der zugehörigen Betriebsstoffe sowie der entsprechenden Service-, Wartungs- und Schulungsdienstleistungen vorgesehen.

Über die oben genannten Tätigkeitsfelder hinaus soll weiter an der Technologie des Ätzens mit Salzschnmelzen geforscht werden. Eine fortlaufende Forschung soll zudem weitere Anwendungsgebiete erschließen. Damit soll das Unternehmen gefestigt und zukunftsorientiert aufgestellt werden. Entsprechend ist geplant bereits vorhandene Kontakte auszubauen und weitere Kooperationen zu ermöglichen.

4.2. Fraunhofer IZM

Das Fraunhofer IZM hat durch die in dem Projekt erzielten Ergebnisse einen neuen innovativen Stand der Forschung und Technik erreicht, welcher nun dazu genutzt werden kann, inhaltlich relevanten Unternehmen bei der Entwicklung und dem Transfer der Technologie an diese zu unterstützen. Firmen, welche bisher konventionell mit Flusssäure oder anderen in Frage kommenden wässrigen Ätzmedien Gläser geätzt haben, können nun in Kooperation mit dem Fraunhofer IZM die Prozessalternative mit ätzenden Salzschnmelzen an der entwickelten Demonstrationsanlage testen und die daraus entwickelten und angepassten Prozessabläufe in ihre Fertigung integrieren. Bei dem Transfer der Technologie ist es nun möglich auf die Stühff GmbH bzw. AMSTOG GmbH als fähigen Gerätehersteller für diese Technologie zu verweisen, was die Voraussetzung für die Markteinführung ist. Lizenzentnahmen, Erträge aus Forschung und Entwicklung als auch nachhaltige Vernetzung bei der Entwicklung des zukünftigen Marktes sind der fortlaufende Nutzen für das Fraunhofer IZM. Des Weiteren ist es jetzt möglich, den neu gewonnenen Stand der Forschung anderen öffentlichen Institutionen und Bildungseinrichtungen zur wissenschaftlichen Nutzung zugänglich zu machen.

5. Literaturverzeichnis

- Baudis, U., & Kreutz, M. (2001). *Technologie der Salzschnmelzen*. Moderne Industrie.
- Ray, N., & Stacey, M. (1969). Increasing the strength of glass by etching and ion-exchange. *Journal of Materials Science* 4(1), S. 73-79.
- Scholze, H. (1988). *Glas - Natur, Struktur und Eigenschaften*. Berlin: Springer.
- Sohal, M. S., Ebner, M. A., Sabharwall, P., & Sharpe, P. (2010). *Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties*. Idaho Falls: Idaho National Laboratory.
- Vogel, W. (1992). *Glaschemie*. Berlin: Springer.
- Zamora, V., Hofmann, J., Marx, S., Herter, J., Nguyen, D., Arndt-Staufenbiel, N., & Schröder, H. (20. 02 2017). Fiber bundle probes for interconnecting miniaturized medical imaging devices. *Proc. SPIE 10109, Optical Interconnects XVII, 101090R*. doi:10.1117/12.2251904