

Projektplan

MacroGlass: Kombinationsprozess zur laserbasierten Herstellung von makroskopischen 3D-Glasbauteilen mit mikroskopischen Strukturgrößen (22034 N)

Im IGF-Vorhaben Nr. 22034 N der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik soll ein laserbasierter Prozess zur Herstellung makroskopischer, dreidimensionaler Glasbauteile mit beliebiger Geometrie entwickelt werden. Hierzu soll der sogenannte „Selektives Laserinduziertes Ätzen“ (SLE) Prozess auf langbrennweitige Optiken erweitert werden. Durch einen Kombinationsprozess soll die Bauteilgenerierung auf makroskopischer Skala mit mikroskopischen Details realisiert werden.

Forschungsziel

Das Selektive Laserinduzierte Ätzen (SLE) ist ein zweistufiges Verfahren zur Generierung dreidimensionaler Glasbauteile mit nahezu beliebiger Geometrie. Initial wird die Kontur des Bauteilmodells in Scanvektoren zerlegt. Im ersten Schritt wird die Kontur des Bauteils dann mittels ultrakurz gepulster (UKP) Laserstrahlung und einem Mikroscanner in das Volumen des Glaskörpers fokussiert. Aufgrund der hohen Intensitäten ($\sim 10^{13}$ W/cm²) wird die Energie der Laserstrahlung über nicht-lineare Absorptionsmechanismen im Glas deponiert. Durch die eingebrachten Modifikationen steigt die Ätzbarkeit lokal gegenüber den unmodifizierten Bereichen. In einem nachgelagerten, nasschemischen Ätzschritt wird das belichtete Material entfernt und die Bauteilgeometrie freigelegt.

Das SLE-Verfahren wird bisher vor allem in Bereichen wie Medizintechnik, Halbleitertechnik oder Quantentechnologie eingesetzt und zeichnet sich vor allem durch eine hohe Präzision einen hohen Flexibilisierungsgrad aus. Bisherige Nachteile liegen in der geringen Produktivität, da bisher ein Mikroscanner mit Mikroskopobjektiv mit kleinen Fokusdurchmessern verwendet wird (Mikro-SLE). Mittlerweile treten allerdings verstärkt Anwendungsfälle wie beispielsweise innenliegende Kühlkanäle in Optiken auf, welche die Präzision des Mikro-SLE nicht zwingend erfordern, da verstärkt die Produktivität im Vordergrund steht. Ziel dieses Vorhabens ist daher die Realisierung des SLE-Prozesses mit langbrennweitigen ($f > 80$ mm) Fokussieroptiken mit einem herkömmlichen Galvanometerscanner. Hierzu wird eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit um Faktor 10 angestrebt (Ziel 1). Zudem soll die maximale Bauteildicke des

SLE-Prozesses auf ≥ 50 mm gesteigert werden (Ziel 2). Final wird die Entwicklung eines Kombinationsprozesses von Mikro- und Makro-SLE vorangetrieben, um die hohe Produktivität von Makro-SLE mit der hohen Präzision von Mikro-SLE zu vereinen (Ziel 3).

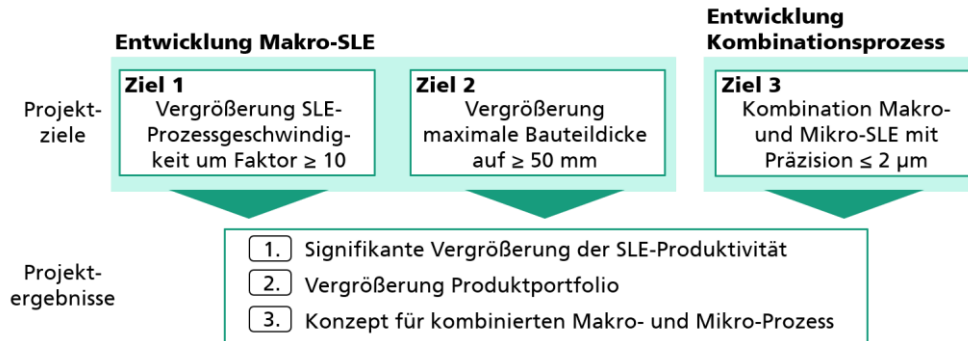


Abbildung 1: Projektziele und angestrebte Projektergebnisse im Vorhaben MacroGlass.

Arbeitsdiagramm

Arbeitspaket	Zeitraum																							
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
AP 1: Projekt- und Risikomanagement	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
AP 2: Grundlagenentwicklung Makro-SLE	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
AP 3: 3D-Fähigkeit Makro-SLE																								
AP 4: Kombinationsprozess																								

Abbildung 2: Arbeitsplan zum Vorhaben MacroGlass

Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Zur Erreichung des Forschungsziels ist das Vorhaben in drei Arbeitspakete zur Prozessierung unterteilt. Zudem wird das Vorhaben über die gesamte Laufzeit im Projekt- und Risikomanagement analysiert.

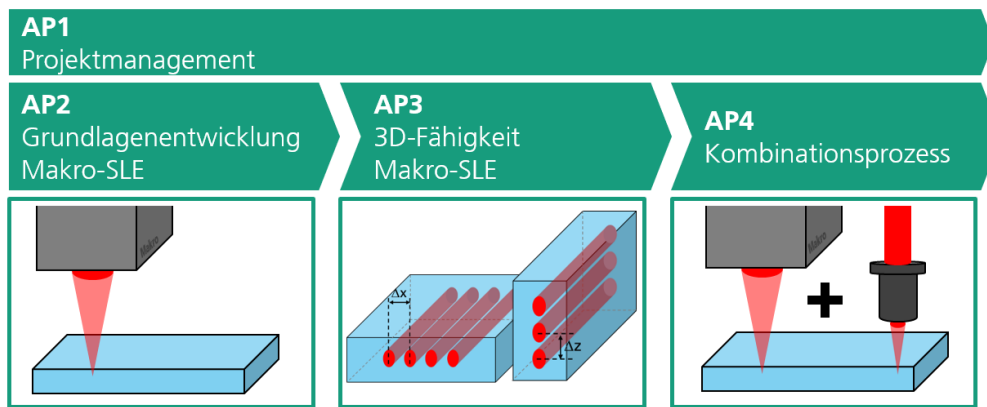


Abbildung 3: Visualisierung der Arbeitspakete im Vorhaben MacroGlass

Zunächst wird eine Prozesslandkarte zur Bestimmung der maximalen Ätzraten in Quarzglas erstellt. Diese werden anhand linear strukturierter Ätzkanäle gemessen. Hierzu werden die Parameter Pulsdauer, Pulsenergie, Fokusbereich, Repetitionsrate, Vorschub, Pulsüberlapp und Polarisation variiert. Aufgrund der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Prozessparameter wird dieser Ansatz genutzt, um potenzielle Prozessfenster und insbesondere Prozessgrenzen zu identifizieren. Die Prozessparameter der Vorarbeiten und die bekannten Prozesslandkarten zum Mikro-SLE dienen hier als Startpunkte für eine systematische Variation der Prozessparameter. Anschließend wird für den Parametersatz der maximierten Selektivität innerhalb der erarbeiteten Prozessgrenzen eine Optimierung der Prozessparameter hinsichtlich einer maximalen Bearbeitungsgeschwindigkeit erarbeitet. Insbesondere erfolgt die Feinabstimmung über die Parameter wie Vorschub, Repetitionsrate und Puls- sowie Bahnüberlapp. Die SCANLAB GmbH wird einen „excelliScan“-Scanner der neuesten Generation zur Verfügung stellen, mit dem durch verbesserte Spiegelbewegungen eine weitere Vergrößerung der Prozessgeschwindigkeit erzielt werden kann. Darauf aufbauend wird die Strukturierung für unterschiedliche Tiefen unter der Werkstückoberfläche optimiert. Für unterschiedliche Tiefen kommt es aufgrund von Aberrationen zur Verzeichnung des Strahlprofils. Die damit verbundene Reduktion der Intensität wird durch eine Anpassung der Pulsenergie kompensiert. Die maximal mögliche Strukturierungstiefe sollte durch die Verwendung der F-Theta Optik signifikant gesteigert werden können. Aufgrund der Komplexität der Prozessentwicklung wird dies zunächst für Quarzglas durchgeführt. Je nach Projektfortschritt wird die Entwicklung auf Borosilikatglas ausgedehnt werden, das von der SCHOTT AG in entsprechenden Mengen zur Verfügung gestellt wird.

Für die Herstellung von 3D-Glaskomponenten müssen insbesondere akkumulative Effekte untersucht werden, die auftreten, wenn Scanbahnen aneinandergelagert werden, um Flächen zu strukturieren oder Ebenen in unterschiedlichen Tiefen zu vertikalen Strukturen zu kombinieren. Dadurch können Spannungen bis hin zu Rissen entstehen oder durch gesteigerte Wärmeakkumulation bereits modifizierte Bereiche wieder relaxieren. Es wird die Herstellung von 2D-Strukturen untersucht, indem Modifikationslinien lateral nebeneinander angeordnet werden. Hierzu wird der laterale Bahnabstand systematisch variiert werden, um Prozessfenster für die 2D-Strukturierung zu ermitteln, für die ein defektfreies flächiges Ätzen ermöglicht wird. Dazu werden vor und nach dem Ätzprozess die Strukturen hinsichtlich Selektivität, Ätzrate, Defekten, Formabweichung und Rauheit untersucht. Anschließend werden Linien in vertikaler Richtung angeordnet und geeignete Prozessfenster für die Strukturierung und das anschließende Ätzen ohne Defekte ermittelt. Durch die Anisotropie des Fokusbereichs sind die Lasermodifikationen in Strahlpropagationsrichtung länger ausgedehnt als in transversaler Richtung. Darüber hinaus treten unterschiedliche Modifikationsbereiche auf. Aufgrund dessen können die Prozessfenster für die vertikale Anordnung von Linien deutlich von den horizontalen Linien unterschieden und entsprechender Aufwand muss in den Arbeitspaketen betrieben werden. Die Bauteilqualität wird quantifiziert, indem die hergestellten Bauteile hinsichtlich Mikrorauheit, Welligkeit, Homogenität, Transparenz und Defektkonzentration charakterisiert werden. Dies ermöglicht eine Beurteilung der möglichen Anwendungsbereiche.

Nach der Entwicklung der 3D-Fähigkeit soll der Makro-SLE-Prozess mit dem bereits genutzten Mikro-SLE kombiniert werden, sodass große Bauteile mit bis zu 100 mm Kantenlänge und einer Dicke ≥ 50 mm hergestellt und mit mikroskopischen Features versehen werden können. Hierzu wird in der Bearbeitungsanlage eine Abbildungsoptik integriert, um eine Positionierungsgenauigkeit der zu bearbeitenden Glasbauteile von $< 2 \mu\text{m}$ zu ermöglichen. Im nächsten Schritt wird eine Justage anhand von Markern entwickelt, die eine präzise ($< 2 \mu\text{m}$) Ausrichtung der Glassubstrate bis Abmessungen $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ermöglicht. Für einen Transfer der bearbeiteten Glasproben zwischen Makro- und Mikro-SLE-Maschine, werden auf den Proben Markierungen mit einer Positionsgenauigkeit von mindestens $1 \mu\text{m}$ mittels Laserabtrag erzeugt, die an der Mikro-SLE-Anlage mit vorhandener Sensorik identifiziert werden können.

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas

Die Anbieter von Systemtechnik, die zur Realisierung des SLE-Verfahrens eingesetzt werden kann, sind insbesondere KMUs. Da für das SLE-Verfahren uneingeschränkte Nutzungsrechte bestehen, ist eine verstärkte Marktdurchdringung bzw. Erschließung neuer Märkte möglich, was den Absatz von SLE-tauglichen Maschinen signifikant steigern würde. Davon werden die Systemtechnikanbieter profitieren, da in MacroGlass kommerziell verfügbarer Systemtechnik der KMU eingesetzt werden soll. Zusätzlich wird den Systemtechnikanbietern der Zugang zum bisher sehr spezialisierten SLE-Verfahren signifikant vereinfacht. Dadurch erhalten die Unternehmen die Möglichkeit, im Markt der 3D-Glasbauteile als Lohnfertiger tätig zu sein. Deutsche klein- und mittelständische Laser-Strahlquellenhersteller, wie z. B. EdgeWave GmbH, können durch die Etablierung der SLE-Technologie für weitere Anwendungen und Branchen ihren Absatz von Hochleistungsstrahlquellen mit mittlerer Leistung im Bereich > 100 W steigern. Eine zentrale Systemkomponente neben der Strahlquelle ist die Strahlablenkung mithilfe von Galvanometerscannern. Die SCANLAB GmbH wird während des Projektes einen Galvanometerscanner der neusten Entwicklungsstufe zur Verfügung stellen, mit dem die Prozessgeschwindigkeiten durch eine verbesserte Scantechnik noch weiter gesteigert werden können. Die SCANLAB GmbH wird dann einen fundierten technologischen Vergleich durchführen und Anforderungsprofile für die Glasbearbeitung mit hoher Laserleistung definieren bzw. anpassen. Durch die Demonstration einer synchronisierten Scanner-Achs-Anlage werden geeignete Halterungs- und Positionierungstechniken für die Lasermaterialbearbeitung mit einer Genauigkeit von $1 \mu\text{m}$ entwickelt. Das Wissen schafft einen Mehrwert für Präzisionsanwendungen in stark wachsenden Bereichen der Halbleitertechnik, wovon die Systemtechnikanbieter (wie z. B. die im PA vertretenden Unternehmen MDI Advanced Processing GmbH, Physik Instrumente GmbH & Co. KG (PI) oder Pulsar Photonics GmbH) direkt profitieren. Neben den Einblicken in die SLE-Technologie erhalten Unternehmen Informationen über Anforderungen an einen laserbasierten Kombinationsprozess für die mikroskopische Bearbeitung großflächiger Bauteile. Mit dem Wissen können bestehende Produkte von Unternehmen verbessert und neue Produkte entwickelt werden. Die Unternehmen ASML Berlin GmbH und FISBA AG setzen die Technologie zum Teil bereits als Fertigungsverfahren für Spezialbauteile ein und möchten mit Ihrer Expertise das Projektvorhaben unterstützen.

Neben der Eröffnung weiterer vielversprechender Anwendungsfelder sollen die Prozessgeschwindigkeiten und die damit verbundenen Kosten für SLE-Bauteile durch MacroGlass um eine Größenordnung reduziert werden. Darüber hinaus werden Endverwender in der Glasbranche, wie Optik- (z. B. Carl Zeiss AG) und Glashersteller (z. B. SCHOTT AG), profitieren, da individualisierte Glasbauteile wirtschaftlich gefertigt werden können. Somit können für die Unternehmen weitere Bereiche, wie z. B. individualisierte Optikkomponenten für Beleuchtungsanwendungen, erschlossen werden.

Projektbegleitender Ausschuss

Unternehmen
Amplitude Systèmes ^{KMU}
ASML Berlin GmbH
Carl Zeiss Jena GmbH
Carl Zeiss SMT GmbH
EdgeWave GmbH ^{KMU}
FISBA GmbH ^{KMU}
MDI Advanced Processing GmbH ^{KMU}
Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG
Pulsar Photonics GmbH ^{KMU}
SCANLAB GmbH
SCHOTT AG

Das IGF-Vorhaben Nr. 22034 N der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.