

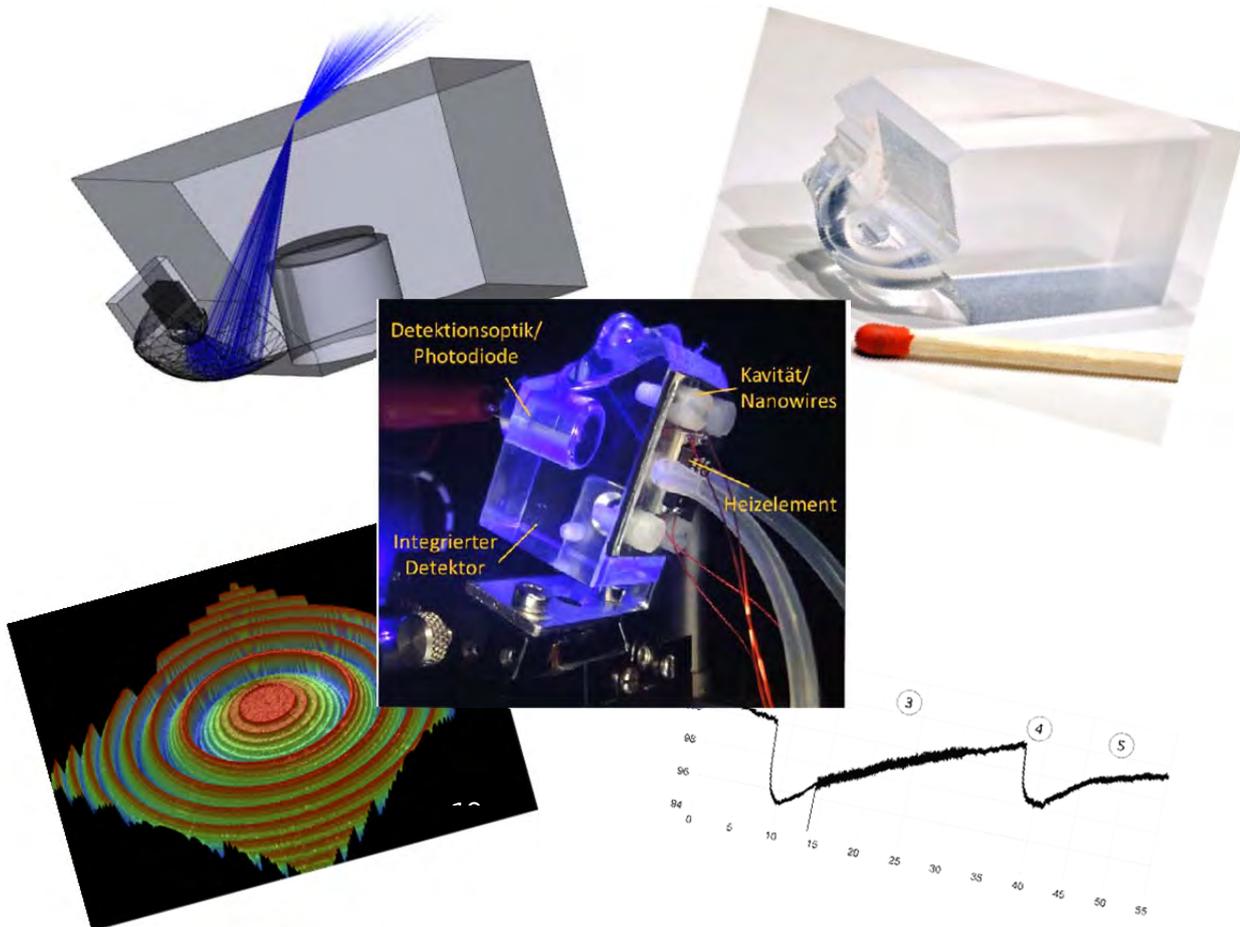
Abschlussbericht zum Verbundprojekt

Skalenübergreifende Integration von Nanodraht- Heterostrukturen mit Optischen Mikrosystemen für Innovative Chemische Sensoren

– SINOMICS –

im Teilprojekt

Freiraumoptische Systemintegration zur Gestaltung des Mikro-Nano-Interfaces für chemische Sensoren auf der Basis von Nanodraht-Heterostrukturen (FOSMNI)



Zuwendungsempfänger: Technische Universität Ilmenau
Institut für Mikro- und Nanotechnologien IMN-MacroNano
Fachgebiet Technische Optik
Postfach 100565
98693 Ilmenau

Projektleiter: Prof. Dr. Stefan Sinzinger
Fachgebiet Technische Optik

Tel.: 03677 69-2490

E-Mail: stefan.sinzinger@tu-ilmenau.de

Förderkennzeichen: 16SV5384

Verbundprojekt: Skalenübergreifende Integration von Nanodraht-
Heterostrukturen mit Optischen Mikrosystemen für
Innovative Chemische Sensoren -SINOMICS –

Teilvorhaben: Freiraumoptische Systemintegration zur Gestaltung des Mikro-Nano-
Interfaces für chemische Sensoren auf der Basis von Nanodraht-
Heterostrukturen (FOSMNI)

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2011 – 28.02.2014



Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung zum Projektablauf	4
I.1. Aufgabenstellung.....	4
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
II.1. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse:	6
II.1.1. Arbeitspaket K2	6
II.1.2. Arbeitspaket K2.1	7
II.1.3. Arbeitspaket K2.2	11
II.1.4. Arbeitspaket K2.3	13
Projektbereich I1	24
II.1.5. Arbeitspaket I1.1	24
II.1.6. Arbeitspaket I1.2	27
II.1.7. Arbeitspaket I1.3	31
Projektbereich I3	34
II.1.7. Arbeitspaket I3.2	34
II.1.8. Arbeitspaket I3.4	39
II.1.9. Im Bericht zitierte Quellen	43
II.2. Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit für KMU.....	44
II.3. Veröffentlichung der Ergebnisse	44
II.4. Vollständige Liste der eigenen Veröffentlichungen	44

I. Kurzdarstellung zum Projektablauf

I.1. Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt SINOMICS wurde im Rahmen der Ausschreibung „Mikro-Nano-Integration als Schlüsseltechnologie für die nächste Generation von Sensoren und Aktoren“ im Förderprogramm „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ des BMBF gefördert. Im zentralen Fokus der Arbeiten im Ilmenauer Teilprojekt stand die Erforschung von Möglichkeiten zur Integration eines hochkompakten Gassensors auf der Basis des Photolumineszenzverhaltens von (Al,In)GaN Nanodrahtheterostrukturen. Die wichtigste Aufgabe war es ein hochintegriertes optisches Modul zu realisieren, welches als Integrationsplattform für die Mikro-Nano-Integration dienen sollte. Auf diesem optischen Modul sollten gemeinsam mit den Projektpartnern, die an der Justus-Liebig Universität Giessen realisierten und charakterisierten Nanodrähte sowie geeignete optoelektronische Bauelementen, wie z.B. die von der Universität Freiburg und dem Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF) erforschten Laserdioden integriert werden.

Neben dem Design und Layout des integrierten optischen Moduls bestand die Aufgabenstellung für das Fachgebiet Technische Optik der TU Ilmenau auch an der Erforschung geeigneter Herstellungs- und Charakterisierungsmöglichkeiten für hochkompakte funktionsintegrierte optische Bauelemente und Subsysteme. Zu diesem Zweck wurden die Herstellungsmöglichkeiten des Ultrapräzisionsfräsens und der Kurzpulslaser-Mikrostrukturierung am „Institut für Mikro- und Nanotechnologien – MacroNano“ der TU Ilmenau erforscht und erfolgreich optimiert. Materialtechnische Fragestellungen, wie der Einsatz, an die Fertigungsmöglichkeiten angepasster geeigneter UV transparenter Kunststoffmaterialien oder die Umsetzung der Teilkomponenten und Systeme in Glas unter Verwendung geeigneter Abformprozesse auf der Basis sog. SolGel Materialsystem mussten dabei ebenfalls adressiert werden.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Arbeiten an dem Projekt konnten sich auf intensives Expertenwissen im Bereich des Optik Designs und der mikrooptischen Systemintegration stützen. In zahlreichen wissenschaftlichen Projekten der vergangenen 5-10 Jahre hat sich das Fachgebiet Technische Optik im Institut für Mikro- und Nanotechnologien MacroNanoTM der TU Ilmenau zu einem weltweit anerkannten Zentrum für Freiformoptik und optische Mikrosysteme entwickelt. Insbesondere die Forschungsarbeiten im PROSIN Projekt „Optische Mikrosysteme“ haben dazu geführt, dass auch die Fertigungs- und Messtechnischen Möglichkeiten für die Umsetzung innovativer optischer Mikrosysteme für verschiedenste Anwendungen etabliert werden konnten. Von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Bearbeitung des Projektes waren in Ilmenau hervorragend ausgebildeten Strukturen für eine interdisziplinäre Ausbildung und Zusammenarbeit.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Forschungsarbeiten im Rahmen des Verbundprojektes konnten sich an dem im Projektantrag sorgfältig ausgearbeiteten Projektplan orientieren. Wesentliche Abweichungen von diesem Plan haben sich nicht ergeben. Von entscheidender Bedeutung waren regelmäßige 1/4 - 1/2 jährliche Treffen der Verbundpartner und die insbesondere in der zweiten Hälfte des Projektes immer enger werdende Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern. Des Weiteren fanden insbesondere als sich die Forschungsarbeiten auf die Systemintegration konzentrierten mehrere mehrtägige Aufenthalte der Projektmitarbeiter an den jeweiligen Partnerinstituten statt.

Herausforderungen hinsichtlich des Erreichens der Projektziele ergaben sich insbesondere bei der Auswertung des Messsignals. Die gewünschte Gassensitive Änderung des Photolumineszenz-Signals wird überlagert von Störsignalen (z.B. abhängig von Temperatur und Luftfeuchtigkeit), die für die zuverlässige Messung unterdrückt werden müssen. Mit Hilfe geeigneter Sensorschaltungen und optimierter Nanostrukturen sowie optischer Systeme konnte schließlich dennoch ein reproduzierbares Gassensitives Messsignal nachgewiesen werden. Somit konnte die avisierte Funktionalität überzeugend demonstriert werden.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

In dem Verbundprojekt SINOMICS wurde ein vollständig neuartiges Sensorprinzip für Nanostrukturbasierte Gassensorik verfolgt. Insbesondere die Kombination integrierter optischer Mikrosysteme mit Nanostrukturen stellt eine wichtige Innovation mit erheblichem wissenschaftlichem und wirtschaftlichem Potential dar. Die Erfolge, die bei der Präsentation des Konzeptes und der ersten Ergebnisse auf internationalen Wissenschaftskonferenzen erzielt wurden (best student paper award auf dem Annual Meeting der European Optical Society, Aberdeen, 2012 und der SPIE Photonics West, San Francisco, 2013) dokumentieren die wissenschaftliche Anerkennung, die dem Projektansatz und den erzielten Resultaten entgegengebracht werden. Mit den Projektergebnissen wurde somit der internationale Stand der Wissenschaft zur Mikro-Nano-Integration auf der Basis optischer Mikrosystems wesentlich mit geprägt. Die Liste wissenschaftlicher Veröffentlichungen und Vorträge, die aus den Arbeiten am Projekt SINOMICS resultierten, dokumentiert dies überzeugend (siehe Anhang).

Im Zuge der Arbeiten an dem Projekt wurde der Stand der Technik in guter wissenschaftlicher Praxis regelmäßig und intensiv verfolgt und in die Forschungsarbeiten einbezogen.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund der sorgfältig ausgewählten interdisziplinären Projektgruppe war für den Erfolg der Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes keine weitere von extern hinzu zu ziehende Expertise nötig. Die Forschungsarbeiten wurden jedoch zur weiteren Vertiefung der Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern und zur verbesserten Etablierung der Forschergruppen in der jeweiligen Community genutzt.

II.1. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse:

II.1.1. Arbeitspaket K2

Während die Integrationsstufen 1 und 2 in Form freiraumoptischer und wellenleiterbasierter Systeme durch das Fraunhofer IAF und die JLU aufgebaut und getestet wurden [1][1], erfolgte die Umsetzung der in Abb. K2-1 schematisch dargestellten Integrationsstufen 3 bis 6 an der TUI.

Ziel der optischen Integrationsplattformen ist, eine möglichst hohe Anregungsenergiedichte (blauer Strahlengang) an den gassensitiven Nanodrahtheterostrukturen (NDHS) bereitzustellen und ein ausreichend hohes Photolumineszenzsignal (PL-Signal) (roter Strahlengang) zu detektieren.

Wie in Abb. K2-1 dargestellt, wird die von der Laserdiode (LD) emittierte Anregungsstrahlung an der linken Seite der Integrationsplattform eingekoppelt und mit Hilfe einer internen Reflexion auf die gassensitiven Nanodrähte (AlGaIn-NDHS) fokussiert. Das PL-Signal wird anschließend von einer Photodiode (PD) in Kombination mit einem Filter direkt unterhalb der NDHS detektiert.

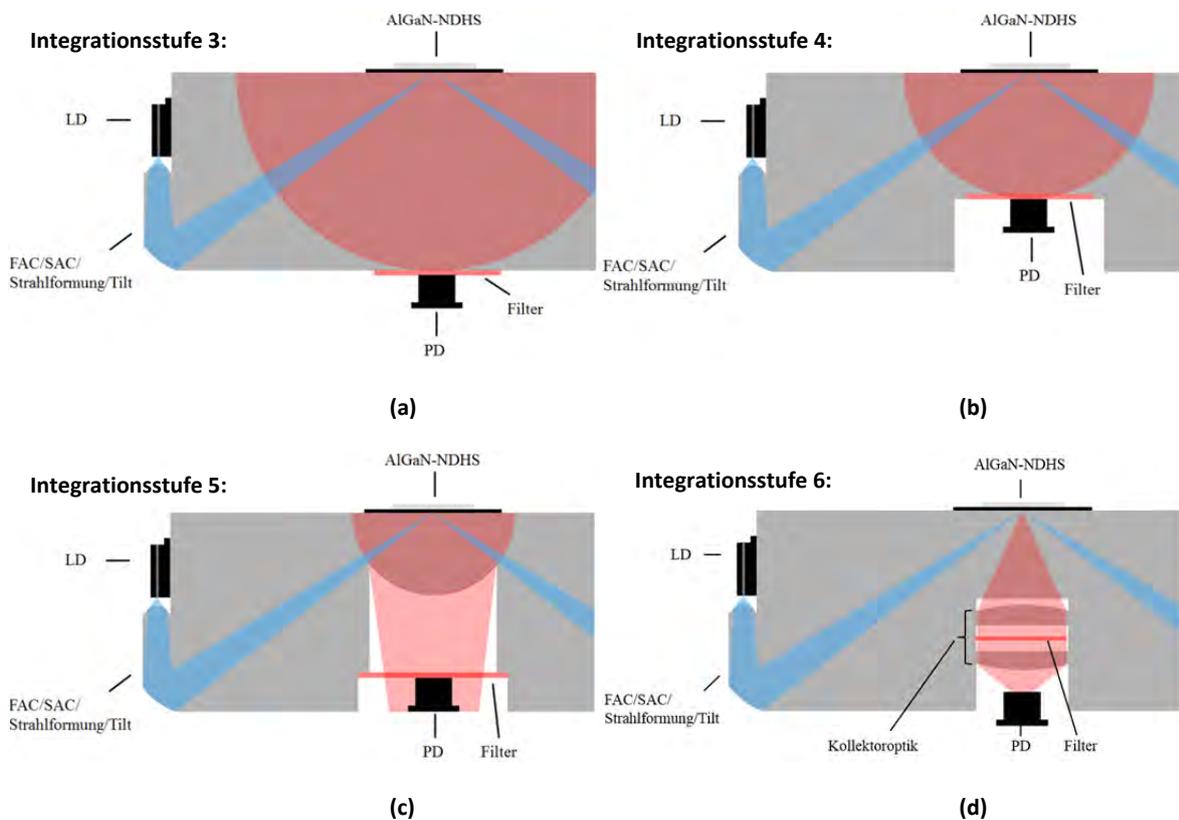


Abb. K2-1: Integrationsstufen 3 – 6 mit optimierter Detektoroptik

Um das Signal-Rausch-Verhältnis der Detektion zu erhöhen, wurden Anregungs- und PL-Strahlengang nicht nur spektral durch geeignete Filter sondern auch räumlich am Detektor separiert. Des Weiteren kann mit den in Abb. K2-1 dargestellten optischen Mikrosystemen die Detektorperipherie bestehend aus LD und PD von der untersuchten Umgebung isoliert werden, wodurch eine erhöhte Messsicherheit und -stabilität erreicht wird.

Prinzipiell basieren die dargestellten Integrationsstufen aufeinander. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in der Menge des auf den Detektor konzentrierten Photolumineszenzsignals (PL-Signal) und demzufolge in der Komplexität der Kollektoroptik für das PL-Signal. Die Messungen in Abb. K2-2 zeigen, dass eine erhebliche Erhöhung des PL-Signals durch Konzentration der PL-Strahlung mit Hilfe einer einfachen Linse erreicht werden kann. Es tritt demnach keine Sättigung auf. Aus diesem Grund wurden die Integrationsstufe 3 und 4 (siehe Abb. K2-1 (a) und (b)) um eine Kollektoroptik zur Konzentration der von den NDHS emittierten Strahlung auf die Photodiode erweitert. Im Folgenden gehen wir im Wesentlichen auf die Integrationsstufe 4 und 6 (Abb. K2-1 (b) und (d)) ein, da alle anderen Integrationsstufen lediglich Zwischenschritte darstellen. Die Strahlformung für den Anregungsstrahlung (Beleuchtungsstrahlengang) ist für alle Ausbaustufen identisch.

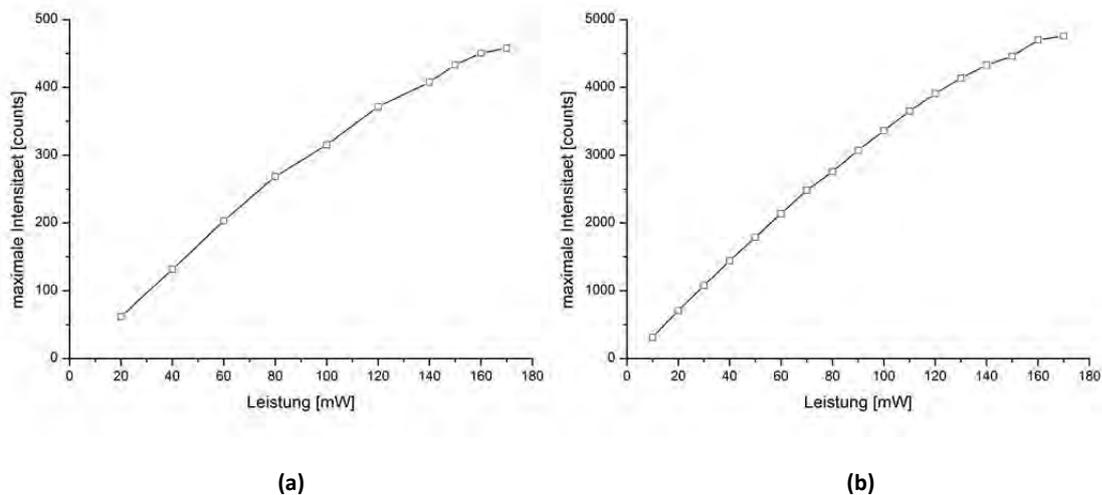


Abb. K2-2: Integriertes PL-Signal ohne (a) und mit (b) Linse zur Konzentration der PL-Strahlung

II.1.2. Arbeitspaket K2.1

Erstellung eines Lichtquellenmodells des Anregungsdiodenlasers:

Aus der vom IAF vorgegebenen Abstrahlcharakteristik der Laserdiode wurde ein Lichtquellenmodell erstellt, welches als Grundlage für die Berechnung, Simulation und Toleranzanalyse der Beleuchtungseinheit des optischen Mikrosystems der Integrationsstufen 3 bis 6 dient. Die von diesem Modell erzeugte Fernfeldverteilung ist in Abb. K2.1-1 dargestellt.

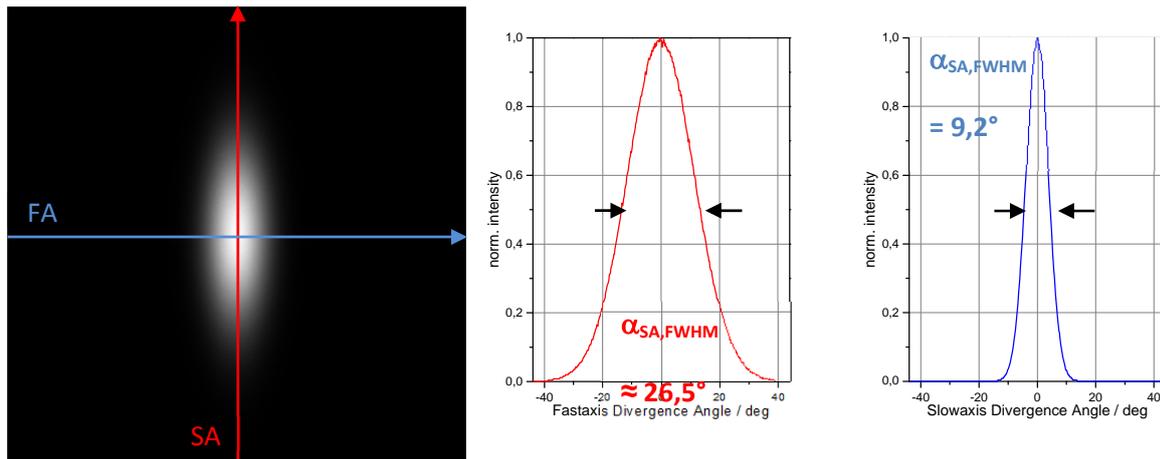


Abb. K2.1-1: Fernfeldintensitätsverteilung des Lichtquellenmodells der Laserdiode

Untersuchungen zur Maximierung des PL-Signals:

Um zu untersuchen, ob mit Hilfe einer gezielten Formung (bspw. Gauß-zu-Tophat) der an den NDHS anliegenden Anregungsintensitätsverteilung ein höheres PL-Signal erzeugt werden kann, wurde ein modularer Aufbau bestehend aus Laserdiode, Fokussierlinse, NDHS und Spektrometer aufgebaut. Anschließend wurden auf den NDHS unterschiedliche Leistungsdichten durch Defokussierung der Anregungsstrahlung erzeugt. Auf diese Weise kann untersucht werden, ob durch Ausleuchtung einer höheren Anzahl von Nanodrähten ein höheres PL-Signal erzeugt werden kann. In Abb. K2.1-2 ist das maximale Signal des Spektrums in Abhängigkeit des Abstandes vom Fokus (bei $z = 0$ mm) dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass das Maximum des PL-Signals im Fokus erreicht wird. Demnach wird auch im integrierten System die Anregungsstrahlung ohne weitere Strahlformung auf die NDHS zur Erzeugung einer maximalen Energiedichte fokussiert. Dennoch wurden im Projekt Strahlformungsalgorithmen untersucht und entwickelt, um in zukünftigen Ausbaustufen beispielsweise eine selektive Beleuchtung unterschiedlicher NDHS zu ermöglichen. Eine Zusammenfassung zu den im Rahmen dieses Projektes entwickelten Optikdesignmethoden, zur Fertigung sowie zu profilometrischen und optischen Charakterisierungen solcher komplexen Strahlformungskomponenten erfolgt in den entsprechenden Abschnitten in I1 bis I3. Details hierzu wurden in [2], [3] und [4] veröffentlicht.

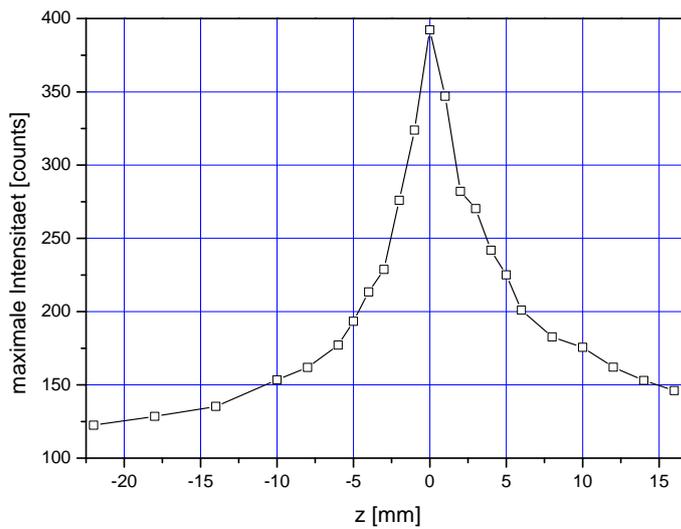


Abb. K2.1-2: Maximum des Spektrometersignals in Abhängigkeit des Abstandes vom Fokus der Anregungsstrahlung

Degradations-/Zerstörschwellentests an den NDHS:

Mit dem gleichen Aufbau, mit dem auch die zuvor vorgestellten Untersuchungen zur Maximierung des PL-Signals durchgeführt wurden, wurde untersucht, ob es infolge einer zu hohen Leistungsdichte zu einer Degradation bzw. Zerstörung der NDHS kommt. Wie die spektral aufgelösten PL-Signale in Abb. K2.1-3 zeigen, tritt infolge einer Energieerhöhung der Anregungsstrahlung keine Degradation oder Verformung des PL-Signalspektrums bis hin zu 170 mW bei vergleichbaren numerischen Aperturen im modularen Aufbau und im integrierten System auf.

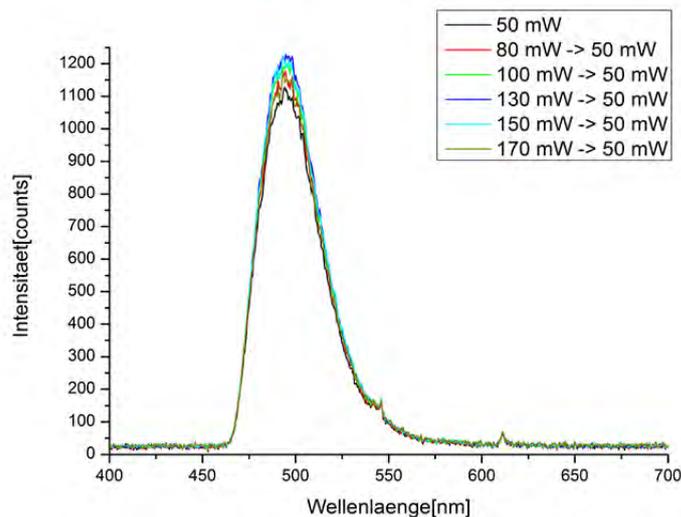


Abb. K2.1-3: Spektral aufgelöste PL-Signale nach erhöhter Anregungsleistung (80/100/130/150/170 mW)

Berechnung der Strahlformungsoptik für die Anregungsstrahlung:

Ziel des Optikdesigns zur Formung der Anregungsstrahlung war, eine beugungsbegrenzte Fokussierung auf die gassensitiven NDHS an der Oberfläche des Sensors zu realisieren, um dort eine möglichst hohe Energiedichte zu erreichen. Hierfür sollten nur hocheffiziente Strahlformungstechniken eingesetzt und eine möglichst hohe Transmissionseffizienz ohne Verwendung von Antireflexionsbeschichtungen erzielt werden. Zudem sollte im Vergleich zum Laboraufbau ein erheblich miniaturisiertes System ($< 30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$) realisiert werden, welches vollständig durch analytische Oberflächenbeschreibungen spezifiziert ist. Wie in Abschnitt K2.3 erläutert, ist auf diese Weise mit Hilfe des Ultrapräzisionsfräsens eine sehr präzise Fertigung optischer Oberflächen niedriger Rauheit möglich [4].

Um die Konzeptrandbedingungen (Separation von Anregungs- und PL-Strahlung, Isolation der Detektionsperipherie vom untersuchten Medium) und Designziele unter Berücksichtigung der Spezifikationen der Anregungsquelle einzuhalten, wurden an der TUI ein neuartiger in [5] näher erläuteter Designansatz entwickelt.

Abb. K2.1-4 zeigt eine schematische Darstellung des optischen Anregungssystems mit dem Anregungsdiodenlaser, den refraktiven und reflektierenden optischen Oberflächen (rot markierte Flächen), den NDHS an Pos. 3 und allen Designfreiheitsgraden auf Basis eines Ellipsoids.

Mit dem entwickelten Designansatz konnte ein komplett analytisch spezifiziertes und miniaturisiertes optisches System mit einer Größe von nur $23 \times 20 \times 21 \text{ mm}^2$ berechnet werden. Zudem liefert die Integrationsplattform durch Ausnutzung geringer Reflexion im Bereich des Brewsterwinkels eine sehr hohe Transmissionseffizienz ohne Antireflexbeschichtung sowie beugungsbegrenzte Abbildungseigenschaften unter Einhaltung der Konzeptrandbedingungen.

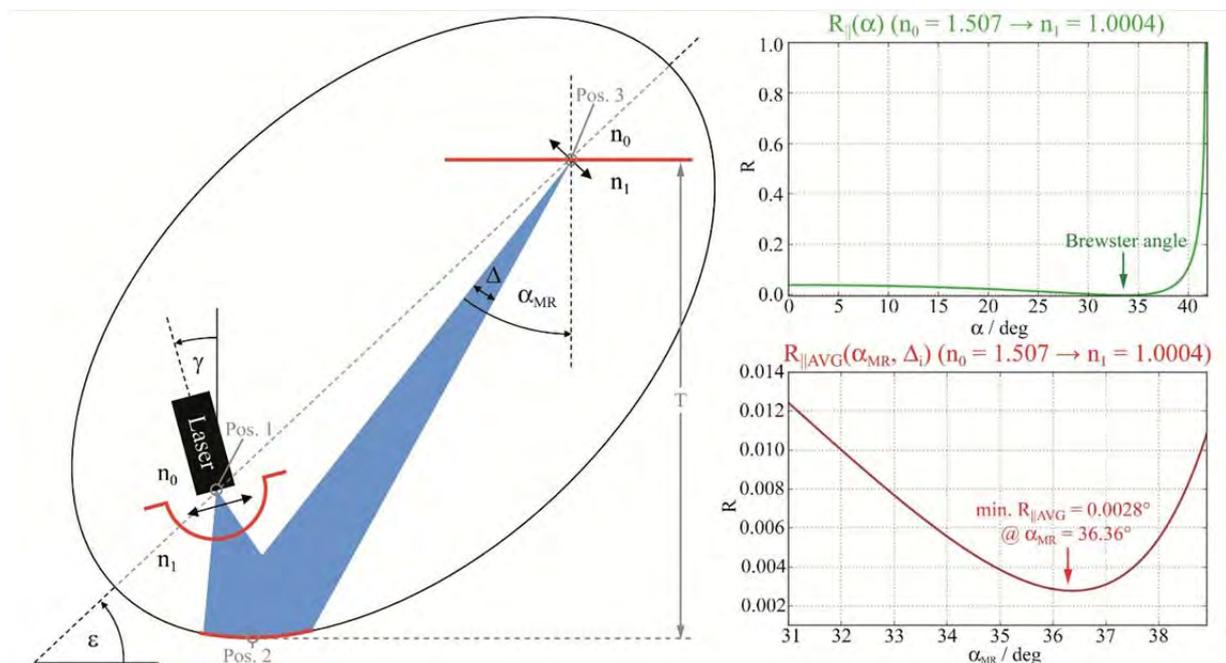


Abb. K2.1-4: Designansatz (Anregungsstrahlengang) für ein transmissionsoptimiertes optisches System

II.1.3. Arbeitspaket K2.2

Die Abstrahlcharakteristik der angeregten NDHS des opto-chemischen Detektors wurde von der JLU als Lambertsche Verteilung spezifiziert. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden unterschiedliche Anordnungen entwickelt und untersucht, um ein möglichst hohes PL-Signal mit der PD zu detektieren.

Bereits beim Übergang von der Ausbaustufe 3 zu 4 konnte ein ausreichend hohes PL-Signal lediglich durch Reduktion des Abstandes der PD von den NDHS auf < 20 mm detektiert werden. Eine weitere Erhöhung des PL-Signals sowie eine zusätzliche Streulichtunterdrückung kann durch den Einsatz einer einfachen Linse erreicht werden. In Abb. K2.2-1 (a) ist die kompakteste Anordnung dargestellt, bei der die Halbkugellinsen, ein dielektrischer Filter sowie ein Farbfilter zur Unterdrückung der gestreuten Anregungsstrahlung und die Photodiode direkt in minimalen Abstand zueinander angeordnet sind. Dabei geht Leistung sowohl durch Totalreflexion an der konvexen Flächen der Linse als auch durch Überstrahlen der aktiven Fläche der Photodiode verloren. Dennoch kann mit diesem Aufbau theoretisch eine Erhöhung der Effizienz von 10,5 % auf 48,5 % erreicht werden. Die simulierte Ausleuchtung der Detektorfläche ist im unteren Bereich der Abb. K2.2-1 (a) dargestellt. Die Überstrahlung der Photodiode kann reduziert werden, indem die Photodiode an den Ort des kleinsten Zerstreukreises positioniert wird (Abb. K2.2-1 (b)), was jedoch eine Vergrößerung des erforderlichen Bauraumes zur Folge hat. Abb. K2.2-1 (b) zeigt im unteren Bereich die entsprechende simulierte Intensitätsverteilung am Ort der Photodiode. Die mit diesem Aufbau theoretisch erreichbare Effizienz liegt bei ca. 59 %.

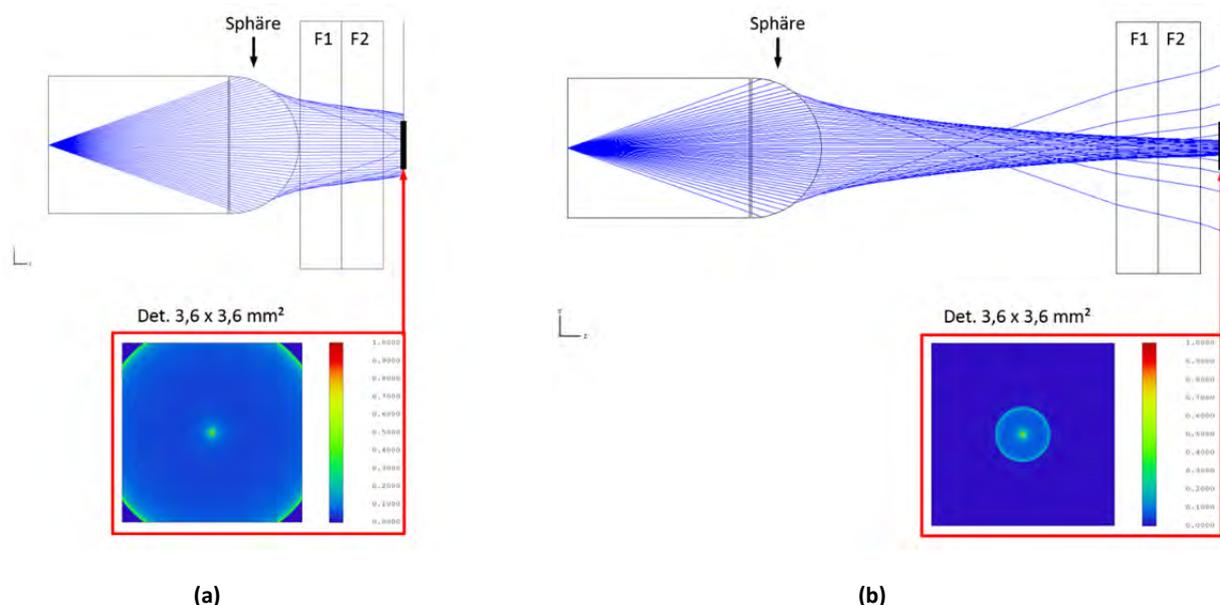


Abb. K2.2-1: kompakteste (a) und effizienteste (b) Anordnung der refraktiven Kollektoroptik bestehend aus nur einer Linse mit simulierten Intensitätsverteilungen auf der Photodiode

Eine Verkürzung des Abstandes des Detektors vom System bei gleichbleibend kleinen Zerstreukreis auf dem Detektor kann bei Verwendung einer Halbkugellinse nur mit Hilfe eines höher brechenden Materials der Linse erreicht werden, was jedoch mit steigenden Leistungsverlusten infolge der Totalreflexion verbunden ist. Die Erzeugung eines möglichst kleinen Zerstreukreises auf dem Detektor bei gleichzeitiger Minimierung der Totalreflexion kann durch die Aufteilung der strahlformenden Funktion auf mehrere optische Oberflächen realisiert werden. Die zunächst

geplante Realisierung einer hybriden Optik bestehend aus einer diffraktiven und einer refraktiven Linse, wurde aufgrund zu kleiner Beugungsstrukturen am Rand der diffraktiven Linse aufgeschoben, bis eine Realisierung der Beugungsstrukturen am Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien möglich ist. Nähere Erläuterungen zum Stand der photolithographischen Fertigung sind in Abschnitt I1.2 zu finden.

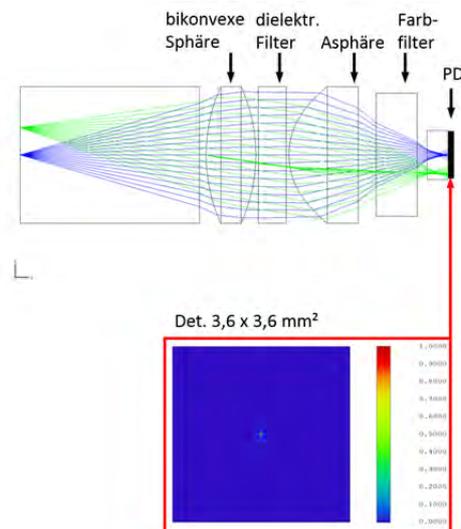


Abb. K2.2-2: refraktiven Kollektroptik mit simulierten Intensitätsverteilungen auf der Photodiode

Anstelle dieser Optik wurde vorerst die in Abb. K2.2-2 dargestellte refraktive Kollektroptik realisiert. Diese fokussiert das PL-Signal auf einen Zerstreukreis mit einem Durchmesser von nur $60\ \mu\text{m}$ auf den Detektor mit einer Fläche von $3,6 \times 3,6\ \text{mm}^2$. Die mit diesem System erreichbare Effizienz liegt leicht über der des zuvor vorgestellten Systems, bestehend aus nur einer Linse. Jedoch wurde die Baugröße erheblich reduziert, so dass die Kollektroptik inkl. PD nahezu in der Integrationsplattform verschwindet. Neben der Photolumineszenz eines Punktes auf der optischen Achse (blauer Strahlengang) zeigt Abb. 2.2-2 das Verhalten bei einer Verschiebung des Punktes um $2\ \text{mm}$ (grüner Strahlengang). Es ist gut zu erkennen, dass selbst bei einer solch starken Dejustage der Anregungsstrahlung ein Großteil des PL-Signals auf den Detektor fokussiert wird.

Bei der refraktiven Kollektroptik bestehend aus einer bikonvexen Sphäre und einer Asphäre wurde die erforderliche Brechkraft auf mehrere optische Oberflächen aufgeteilt, wodurch im Vgl. zur Kollektroptik mit nur einer Linse nur moderate Brechungswinkel im System vorkommen. Auf diese Weise werden zum einen die optischen (Abbildungs-)Eigenschaften des Systems verbessert und zum anderen Fresnelverluste reduziert.

Die Anordnung von Kollimationslinse (bikonvexe Linse) und dielektrischem Filter wurde so gewählt, dass der dielektrische Filter von einem möglichst parallelen Strahlenbündel beleuchtet wird und somit dessen Eigenschaften optimal genutzt werden.

Um störende Fluoreszenz im Farbfilter, welcher eine sehr hohe optische Dichte für die Anregungsstrahlung aufweist, zu minimieren, wurde der dielektrische Filter vor dem Farbfilter angeordnet. Da die Eigenschaften des Farbfilters vom Beleuchtungswinkel weitestgehend unabhängig sind, wurde dieser in den konvergenten Strahlengang in den Bauraum hinter der asphärischen Linse positioniert. Somit konnte eine sehr hohe Ausnutzung des Bauraumes von $82,4\ \%$

erreicht werden. D.h. lediglich in 17,6 % (2,9 mm) der Gesamtbaulänge (16,5 mm) der Kollektoroptik befinden sich keine optischen Komponenten.

II.1.4. Arbeitspaket K2.3

Fertigung optischer Freiformflächen:

Für die Realisierung komplexer optischer Freiformflächen zur selektiven Beleuchtung der NDHS ist eine präzise Fertigung mittels Ultrapräzisionsfräsen erforderlich. Um die Genauigkeit durch Minimierung von Konvertierungsverlusten zu erhöhen, wurden folgende Methoden zur Erstellung der Fertigungsdaten aus den Optikdesigndaten in [3] und [4] eingehend untersucht:

1. Aus den Designdaten wurde ein Volumenkörper basierend auf einer Splineinterpolation zw. den Datenpunkten erstellt. Anschließend wurden die Fräswege mit einer CAD/CAM-Software berechnet und an die Maschinensteuerung übergeben.
2. Die Designdaten, bestehend aus einer Punktwolke, wurden durch ein x-y-Polynom angenähert. Die CNC-Fertigungsdaten wurden anschließend während des Fräsprozesses in Echtzeit mit Hilfe des in das Ultrapräzisionsbearbeitungszentrum integrierten PCs berechnet, so dass flexibel auf systematische Fertigungsfehler reagiert werden kann.

Beide Fertigungsverfahren wurden am Beispiel des in I1 beschriebenen Strahlformungselementes in Kupfer umgesetzt. Details zur mechanischen Fertigung können dem Kapitel I1.2 entnommen werden.

Abb. K2.3-1 zeigt die durch das Polynom beschriebene Oberfläche (a), die profilometrische Messung des nach dem Polynom gefertigten Oberflächenprofils in Kupfer (b) sowie die Differenz zw. beiden (c). Die Analyse der Daten ergab eine PV-Formabweichung von $2,9 \mu\text{m}$ und eine RMS-Abweichung von 189 nm über die gesamte freie Apertur ($10 \times 14 \text{ mm}^2$). Mit einem formnerhaltenden Polierprozess konnte die Rauheit von $R_a = 20 \text{ nm}$ auf $R_a < 5 \text{ nm}$ reduziert werden.

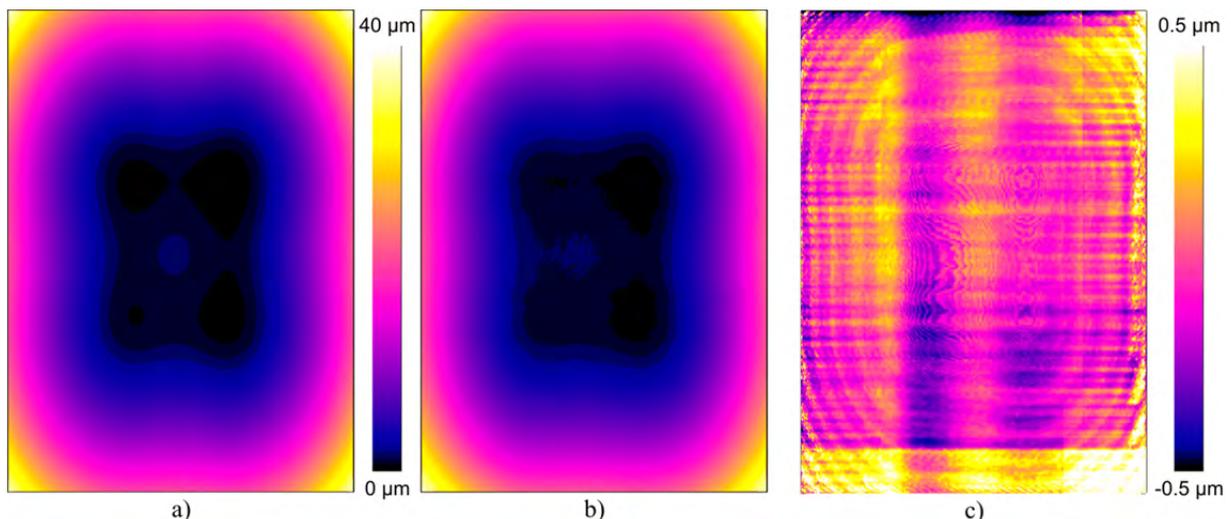


Abb. K2.3-1: zentraler Ausschnitt aus der Oberfläche des off-axis Strahlformungselementes (leicht verkippt): (a) aus dem Polynom berechnete Designdaten, (b) profilometrische Messung, (c) Differenz zwischen (a) und (b). [4]

Für die mittels Volumenkörper gefertigte Komponente konnte die Formtreue nicht bestimmt werden, da ein Vergleich der Messdaten mit den Designdaten aufgrund des unterschiedlichen Punkterasters nicht möglich ist. Eine Interpolation der Mess- bzw. Designdaten würde zusätzliche Fehler generieren und keine sinnvolle Aussage über die Formtreue zulassen.

Allerdings zeigten die optischen Charakterisierungen im Rahmen von I3.2 ähnliche optische Eigenschaften der unterschiedlich gefertigten Komponenten. Es konnte nachgewiesen werden, dass die asymmetrische gaußförmige Intensitätsverteilung in eine nahezu symmetrische, quadratische Verteilung transformiert wird (I3.2). Allerdings war in beiden Fällen eine starke Modulation der Intensitätsverteilung zu erkennen. Diese ist auf Beugungseffekte an periodischen Strukturen (Abb. K2.3-1 (c) und K2.3.-2 (c)) mit einer Periode von ca. 300 μm und einer Tiefe von 150 nm infolge des Fräsprozesses zurückzuführen. [3]

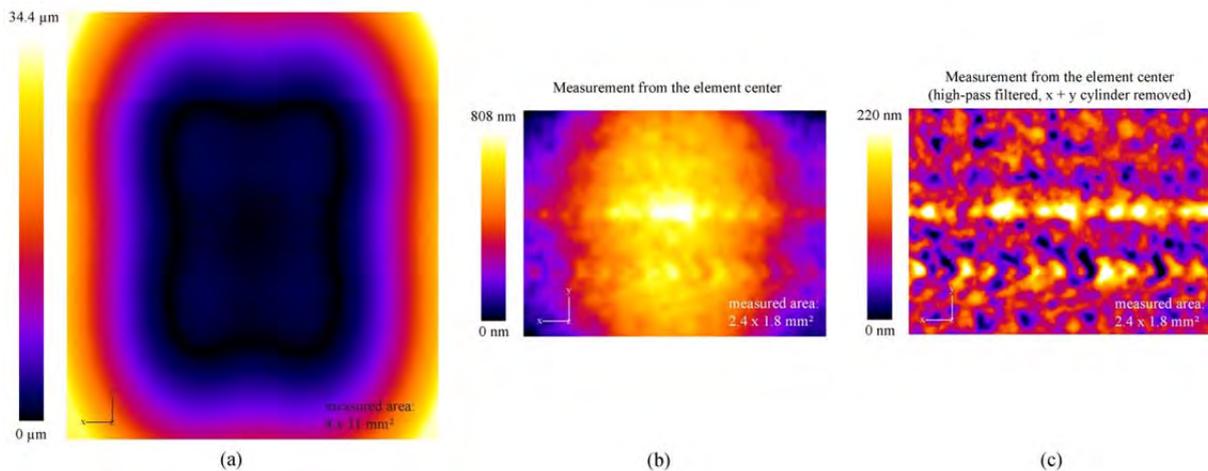


Abb. K2.3-2: profilometrische Messung des via Volumenkörper gefrästen off-axis Strahlformungselementes (a); Detailaufnahme aus dem Zentrum (b); hochpass-gefilterte Detailaufnahme abzüglich eines x und y Zylinders [3]

Wie die Fertigung einer analytisch beschriebenen bikonischen Linse [4] gezeigt hat, sind in PMMA aufgrund niedrigerer Bearbeitungskräfte wesentlich geringer ausgeprägte Strukturen und somit eine bessere Homogenität zu erwarten. Des Weiteren konnte an diesem Beispiel hinsichtlich der erreichten Fertigungspräzision sowie der Menge der erzeugten CNC-Daten Vorteile gegenüber einer CAD/CAM basierten Lösung festgestellt werden [4]. Demzufolge ist das Fertigungsverfahren in Abhängigkeit der zu realisierenden Oberfläche (Größe, Steigungen, analytische Beschreibbarkeit usw.), dem verwendeten Fräswerkzeug und dem zu bearbeitenden Material zu wählen.

Materialcharakterisierung und Untersuchungen zur Sol-Gel-Abformung:

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes zu realisierenden optischen Mikrosysteme werden voraussichtlich in hochreinen Plexiglas „GS Farblos 2458“ gefertigt. Dieses weist entsprechend der Kurve in Abb. K2.3-3 eine hohe Transmission bis in den UV-Bereich auf.

Lichttechnik: Spektralkurven PLEXIGLAS® GS Farblos 2458, 3 und 5 mm (durchsichtig, UV-durchlässig)

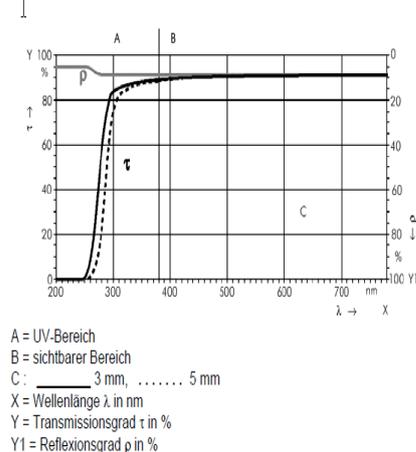


Abb. K2.3-3: Transmission des hochreinen Plexiglas GS Farblos 2458 [6]

Um jedoch für die Beleuchtungswellenlänge von 405 nm eine geringe Absorption auch bei höheren Substratdicken, eine hohe Langzeitstabilität sowie eine potentiell kostengünstige Fertigung des optischen Mikrosystems zu gewährleisten, ist eine Abformung eines optischen Mikrosystems in SiO_2 nach dem Sol-Gel-Verfahren der Firma SGIL möglich. Hierzu wurde zunächst die Replikation diffraktiver Strukturen untersucht. In einem ersten Schritt erfolgten die Erforschung geeigneter Abformwerkzeuge und die Ermittlung der minimal abformbaren Strukturgrößen. Für binäre Mikrostrukturen hat sich dabei die lithographische Fertigung des Masters in Silizium mit einer zusätzlichen Antihalt-Beschichtung (PTFE) als vorteilhaft erwiesen. Auflösungstests haben gezeigt, dass damit minimale Strukturgrößen von ca. $1 \mu\text{m}$ mit einer Rauheit von $R_a < 20 \text{ nm}$ in SiO_2 abgeformt werden können. In Abb. K2.3-4 (c) ist ein Ausschnitt einer replizierten Mikrostruktur mit minimalen Strukturgrößen von $2 \mu\text{m}$ sowie der entsprechende Bereich im Master (Abb. K2.3-4 (b)) und in den Designdaten (Abb. K2.3-4 (a)) dargestellt. [7]

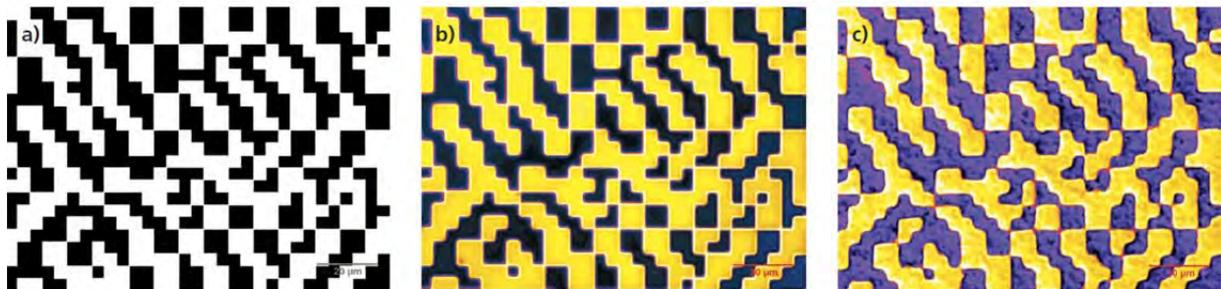


Abb. K2.3-4: Beugungsstruktur im Design (a) sowie profilometrische Messungen der entsprechenden Struktur im Master (b, bei 50x Vergrößerung) und im abgeformten SiO_2 -Diffusor (c, bei 100x Vergrößerung, negativ, gespiegelt) [7]

Zu Demonstrationszwecken wurde im Optikdesign als Zielintensitätsverteilung das Photonik-Logo in Abb. K2.3-5 (a) gefordert. Die optische Charakterisierung der Komponente zeigte sowohl für die gemessene Intensitätsverteilungen (Abb. K2.3-5 (c) und (d)) als auch die ermittelte Beugungseffizienz eine sehr gute Übereinstimmung mit den simulierten Ergebnissen (Abb. K2.3-5 (b)). [8]

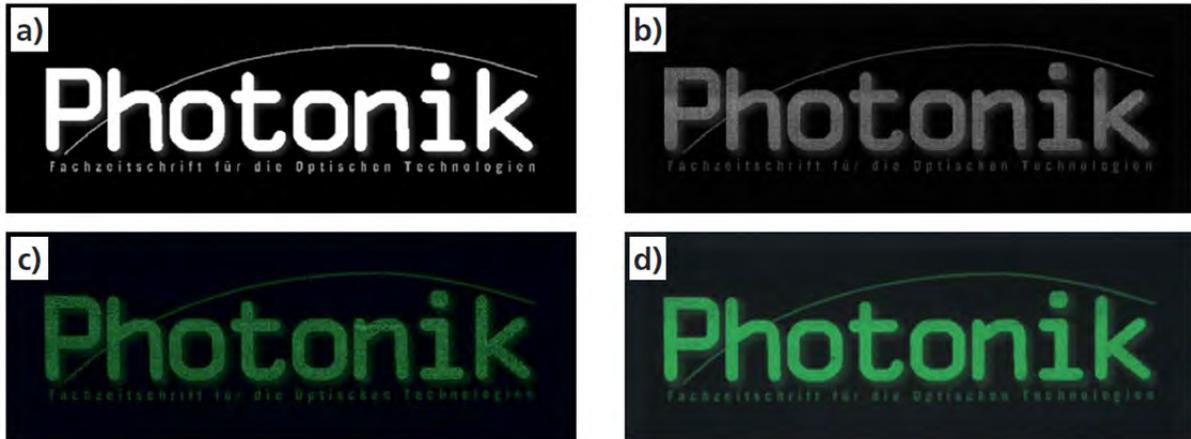


Abb. K2.3-5: Intensitätsverteilungen in der Beugungsebene des DOE: a) angestrebte Zielintensitätsverteilung, b) simulierte (Speckle-)Intensitätsverteilung bei vollständig kohärenter Beleuchtung, c) gemessene, durch das DOE erzeugte Intensitätsverteilung bei kohärenter Beleuchtung und d) bei „nachgeahmter“ partiell kohärenter Beleuchtung durch inkohärente Überlagerung von 36 Messungen bei kohärenter Beleuchtung an unterschiedlichen Stellen [8]

In nachfolgenden Versuchen wurde weniger Wert auf die Erzeugung einer komplexen Intensitätsverteilung gelegt. Vielmehr wurden die erreichbare Beugungseffizienz und die Möglichkeit der Unterdrückung der nullten Beugungsordnung untersucht. Hierfür wurde ein 1 auf 8 Strahlteiler-Design und ein Tophat-Diffuser-Design für eine Beleuchtungswellenlänge von 532 nm gewählt. Die Erzeugung der Abformmaster erfolgte wiederum durch die bereits erwähnte lithographische Mikrostrukturierung oxidierten Siliziumwafer. Die abgeformten SiO₂-Elemente wiesen eine minimale Strukturgröße von ca. 1,5 µm und eine Rauheit von < 20 nm auf. Die im Fernfeld mit diesen Elementen bei einer Beleuchtungswellenlänge von 532 nm erzeugten Intensitätsverteilungen sind in Abb. K2.3-6 dargestellt.

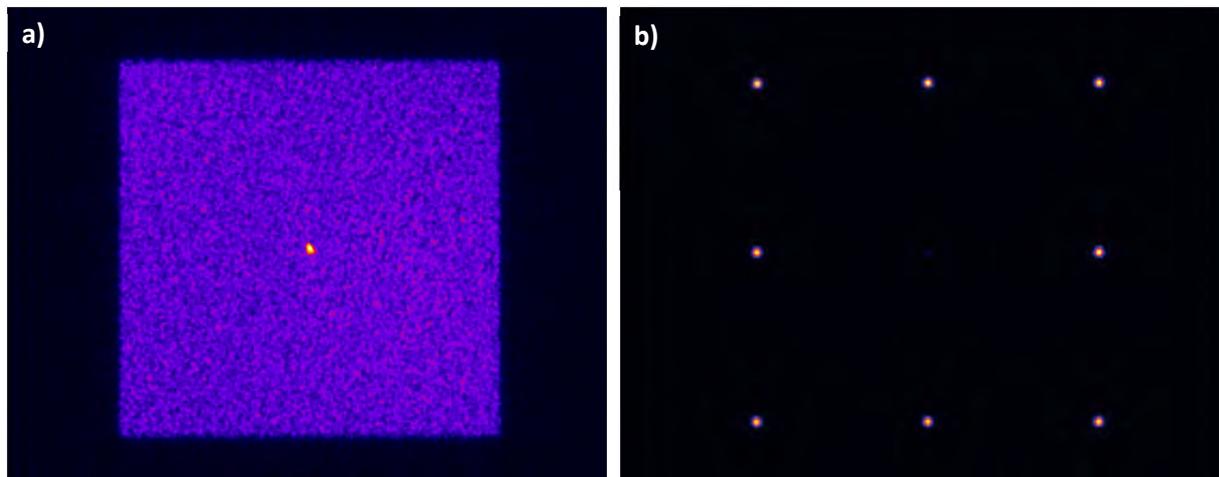


Abb. K2.3-6: Im Fernfeld erzeugte Intensitätsverteilungen a) Tophat-Diffuser, b) 1 auf 8 Strahlteiler

Für die Tophat-Verteilung in Abb. K2.3-6 a) wurde im Experiment eine Beugungseffizienz von > 78 % und für die 8 erzeugten Spots in Abb. K2.3-6 b) von > 61 % ermittelt. In beiden Fällen wurde eine nullte Beugungsordnung mit einem Leistungsinhalt von < 1% der einfallenden Gesamtleistung und eine globale Modulation der erzeugten Intensitätsverteilungen von < ±5 % gemessen.

Neben der Abformung diffraktiver Strukturen in synthetischem Quarzglas wurde auch das Verhalten der SolGel-Abformung refraktiver, asphärischer Linsen untersucht. Dafür wurden die Profile der Abformwerkzeuge mit den Profilen der Asphären verglichen. In den ersten Auswertungen wurden die

Profile der Asphären mit einem erwarteten Schrumpfungsfaktor von 2 skaliert. Die Ergebnisse in Abb. K2.3-7 zeigen eine maximale PV-Abweichung von 6,42 μm (bzw. skaliert mit 1/2,0 \rightarrow 3,21 μm) und eine maximale mittlere Abweichung von < 1,214 μm (bzw. skaliert mit 1/2,0 \rightarrow 0,607 μm).

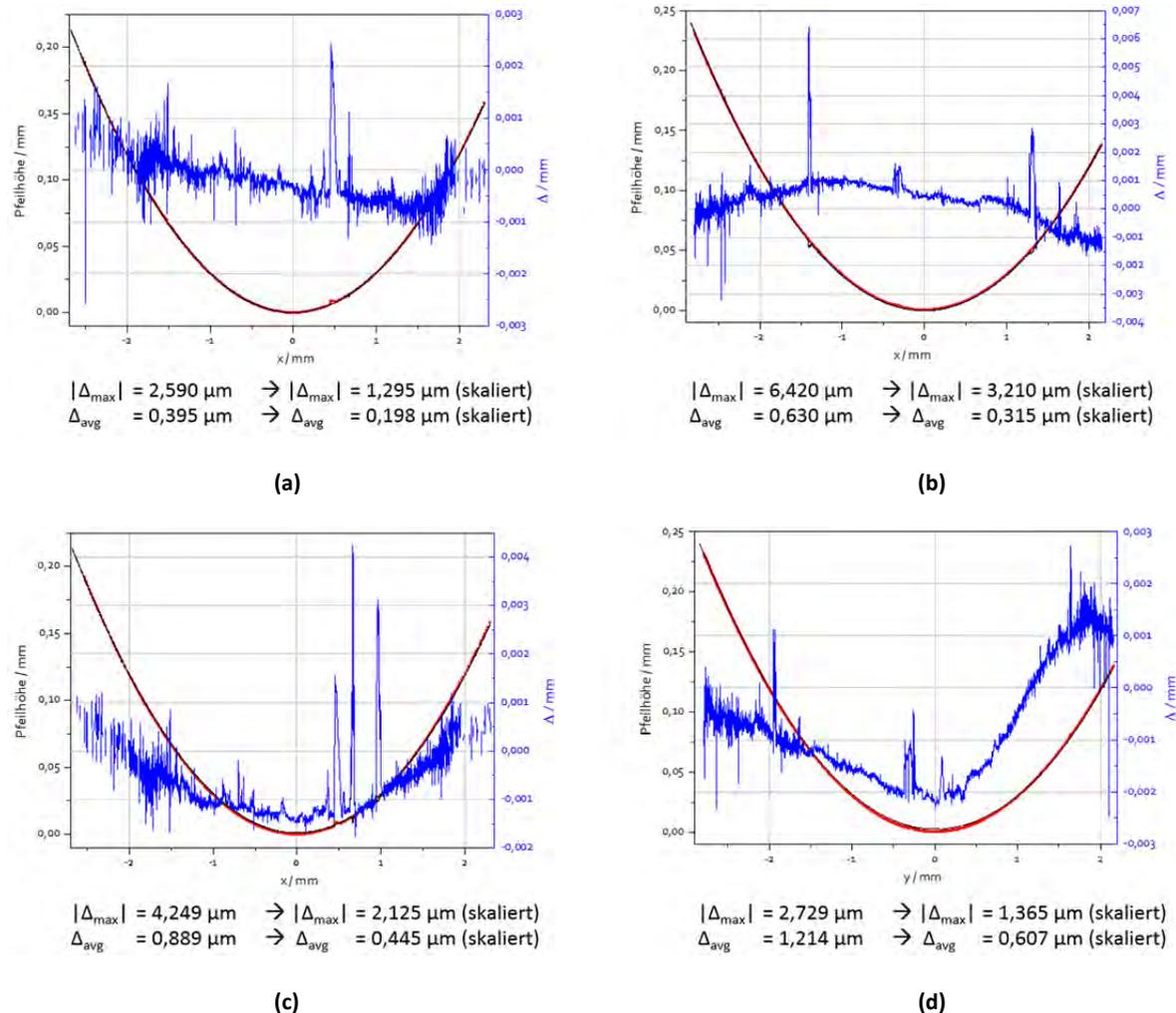
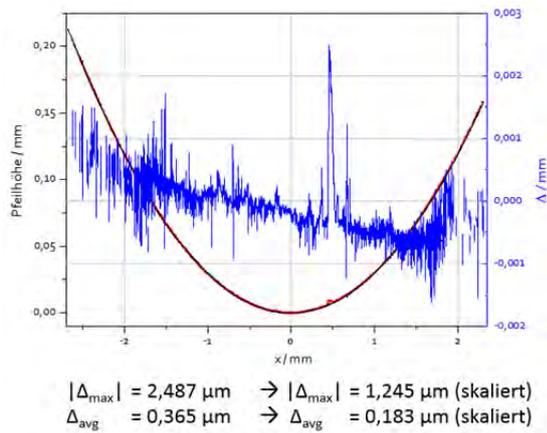
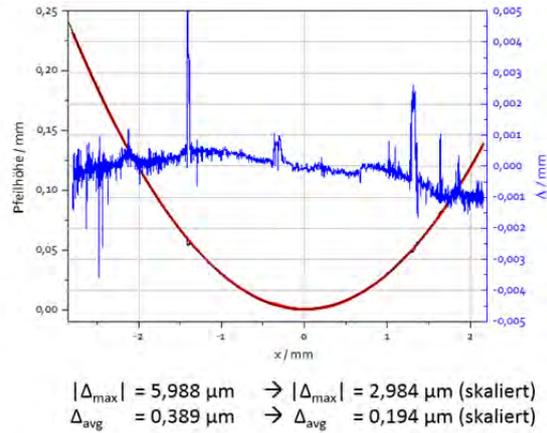


Abb. K2.3-7: x- und y-Profile der Abformwerkzeuge (schwarz), x- und y-Profile der Asphären (skaliert mit 2) und Abweichung der Profile (blau) bei Abformung 1 ((a)+(b)) und Abformung 2 ((c)+(d))

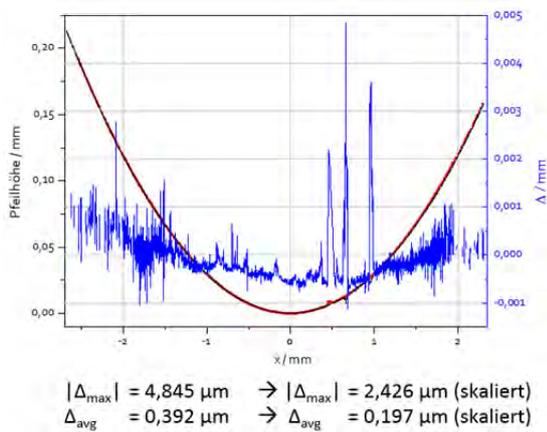
In der zweiten Auswertungsreihe (Abb. K2.3-8) wurde der Schrumpfungsfaktor bei der Anpassung der Asphärenbeschreibung an die Messwerte so optimiert, dass eine minimale Abweichung zwischen den Designprofilen und den Profilen der abgeformten Asphären erreicht wird. Damit ist zum einen eine genauere Aussage zur Formtreue des Abformprozesses und zum anderen zur Genauigkeit des Schrumpfungsfaktors möglich. Während diese Auswertung eine vergleichbare maximale PV-Abweichung von < 5,988 μm (bzw. skaliert mit 1/2,0068 \rightarrow 2,984 μm) liefert, wurde eine maximale mittlere Abweichung von lediglich 0,461 μm (bzw. skaliert mit 1/1,9816 \rightarrow 0,233 μm) ermittelt. Die maximale Abweichung des optimierten Schrumpfungsfaktors (1,9816) vom erwarteten Schrumpfungsfaktor (2,0) beträgt 0,93 %.



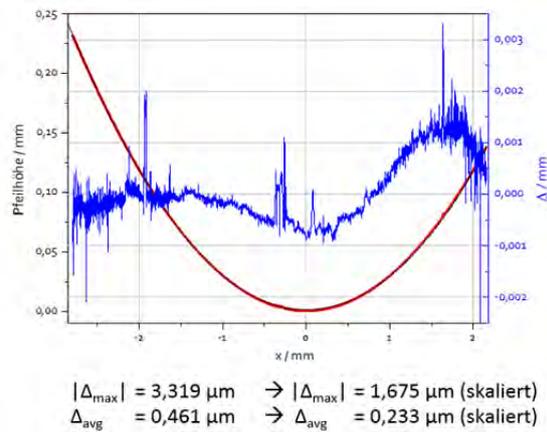
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. K2.3-8: x- und y-Profiles der Abformwerkzeuge (schwarz), x- und y-Profiles der Asphären (skaliert mit optimierten Faktoren) und Abweichung der Profile (blau) bei Abformung 1 ((a)+(b)) und Abformung 2 ((c)+(d))

Die Abformungsergebnisse der Asphären zeigen eine für Beleuchtungsoptiken ausreichend gute Formtreue. Somit können die sphärischen und asphärischen Linsen der PL-Detektionssysteme (insbesondere für Integrationsstufe, Kap. Abschnitt K2.2), nach der Überprüfung der prinzipiellen Funktionsweise mit gekauften Prototypen, durch kostengünstigere mittels SolGel-Abformung realisierte Linsen ersetzt werden.

Mit den Untersuchungen zur Abformung optischer Oberflächen (diffraktive Strukturen, asphärische Oberflächen) und dem Design sowie der Fertigung komplexer Strahlformungselemente wurde ein Großteil der Grundlagen für die Realisierung optischer Mikrosysteme mit Hilfe des SolGel-Verfahrens der Firma SGIL geschaffen.

Untersuchung unterschiedlicher Qualitäten des im SolGel-Prozess hergestellten synthetischen Quarzglas:

Abb. K2.3-9 zeigt für unterschiedlich prozessierte SiO_2 -Substrate erhebliche Unterschiede im Streuverhalten eines transmittierten Laserstrahls.

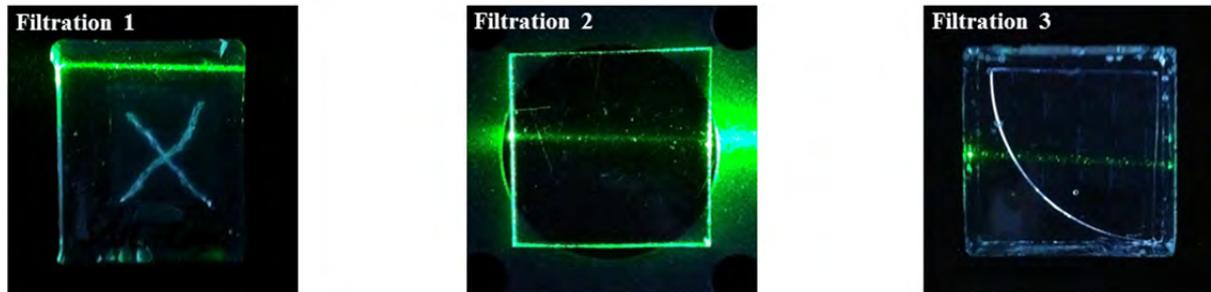


Abb. K2.3-9: Streuung eines Laserstrahls ($\lambda = 532 \text{ nm}$) in unterschiedlich prozessierten SiO_2 -Substraten

Eine Auszählung detektierbarer Partikel in einem definierten Volumen (Abb. K2.3-10) hat für die schlechteste SiO_2 -Qualität eine Partikeldichte von $2330 \text{ Partikeln/cm}^3$ und die beste Qualität von lediglich $323 \text{ Partikeln/cm}^3$ ergeben. Weitere Untersuchungen zum Streuverhalten des von SGIL zur Verfügung gestellten SiO_2 werden im Nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.



Abb. 2.9-10: Aufsummierte Dunkelfeldaufnahmen; aufgenommen an unterschiedlich prozessierten SiO_2 -Substraten

Streulichtmessung an UV-optimierten PMMA und synthetischen Quarzglas:

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes realisierten optischen Mikrosysteme wurden in hochreinen Plexiglas „GS Farblos 2458“ gefertigt. An einem polierten PMMA-Substrat wurde mit einer winkelaufgelösten Streulichtmessung der Anteil der Volumenstreuung untersucht. In Abb. K2.3-11 (a) ist der vorwärtsgestreute Anteil dargestellt. Die über alle Profilschnitte gemittelte Streuerverteilung in Abb. K2.3-11 (b) zeigt, dass der ungestreute Anteil ca. 6 Größenordnungen über dem gestreuten Anteil liegt. Zu beachten ist die logarithmische Darstellung der Messergebnisse.

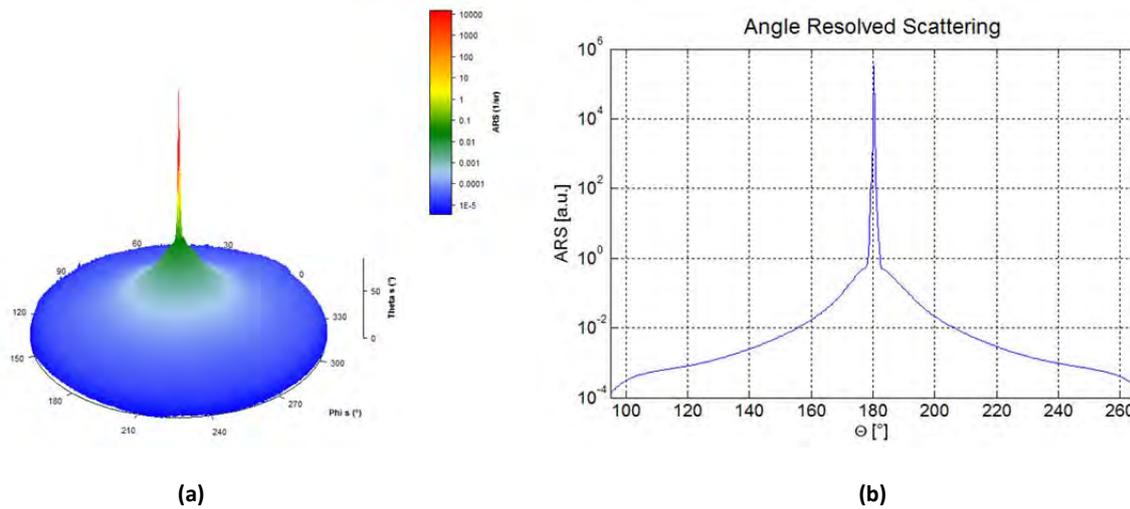


Abb. K2.3-11: Logarithmische Darstellung der winkelaufgelösten (a) und über die Profilschnitte gemittelten (b) Vorwärtstreulichtmessung an UV-optimierten PMMA

Bei den Messungen an synthetischen Quarzglas konnte ein nur geringfügig höherer Streulichtanteil detektiert werden (Abb. K2.3-12). Da sowohl das synthetische Quarzglas als auch das UV-optimierte PMMA eine hohe UV-Transmission sowie sehr niedrigen Volumenstreuanteile aufweisen, sind beide Materialien für die Fertigung der optischen Integrationsplattform geeignet.

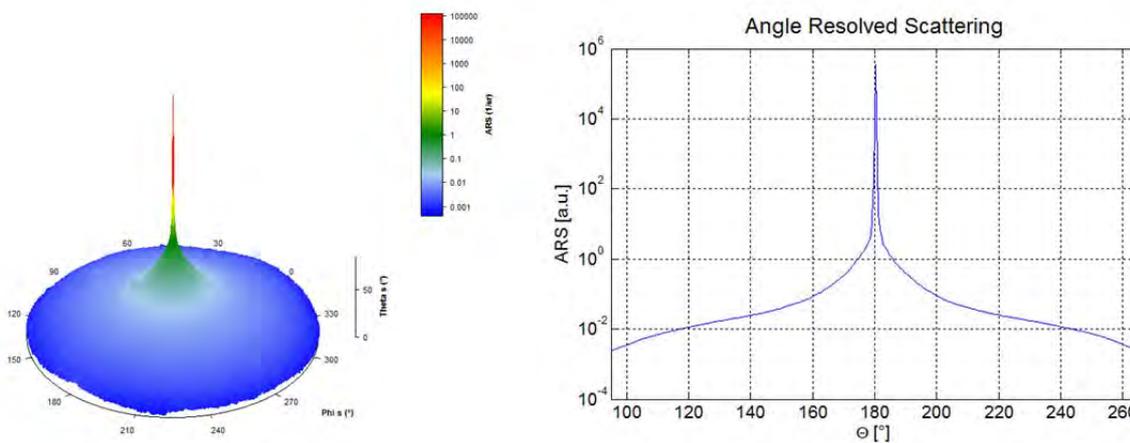


Abb. K2.3-12: Logarithmische Darstellung der winkelaufgelösten (a) und über die Profilschnitte gemittelten (b) Vorwärtstreulichtmessung an synthetischen Quarzglas

Leistungsstabilisierungssystem:

Um die Fertigungspräzision diffraktiver Strukturen auf planen und Freiformflächen mittels direkter ps-Laserablation innerhalb der Ultrapräzisionsbearbeitungsanlage zu optimieren, wurde das in Abb. K2.3-13 (a) skizzierte Leistungsstabilisierungssystem entwickelt.

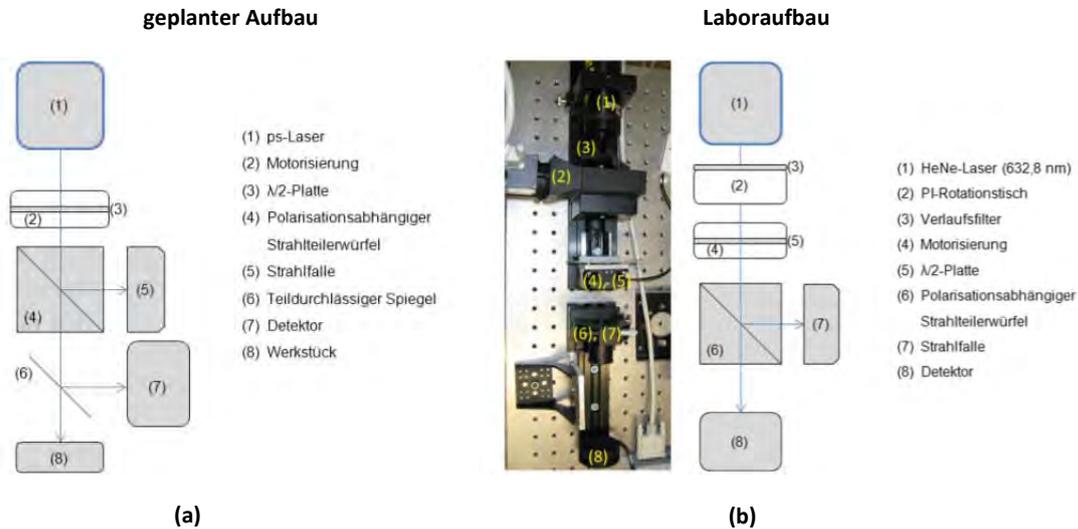


Abb. K2.3-13: schematische Darstellung des Leistungsstabilisierungssystems (a), Foto und schematische Darstellung des Demonstrationaufbaus (b)

Hierbei wird die Laserleistung mit einem photosensitiven Empfänger detektiert und schwankende Leistungsanteile polarisationsabhängig mit Hilfe einer motorisierten $\lambda/2$ -Platte über einen Polarisationsstrahlteiler ausgekoppelt [9]. Die Regelung wurde in LabView auf einem separaten Rechner realisiert. Abb. K2.3-14 zeigt die Benutzeroberfläche des entwickelten Programms.

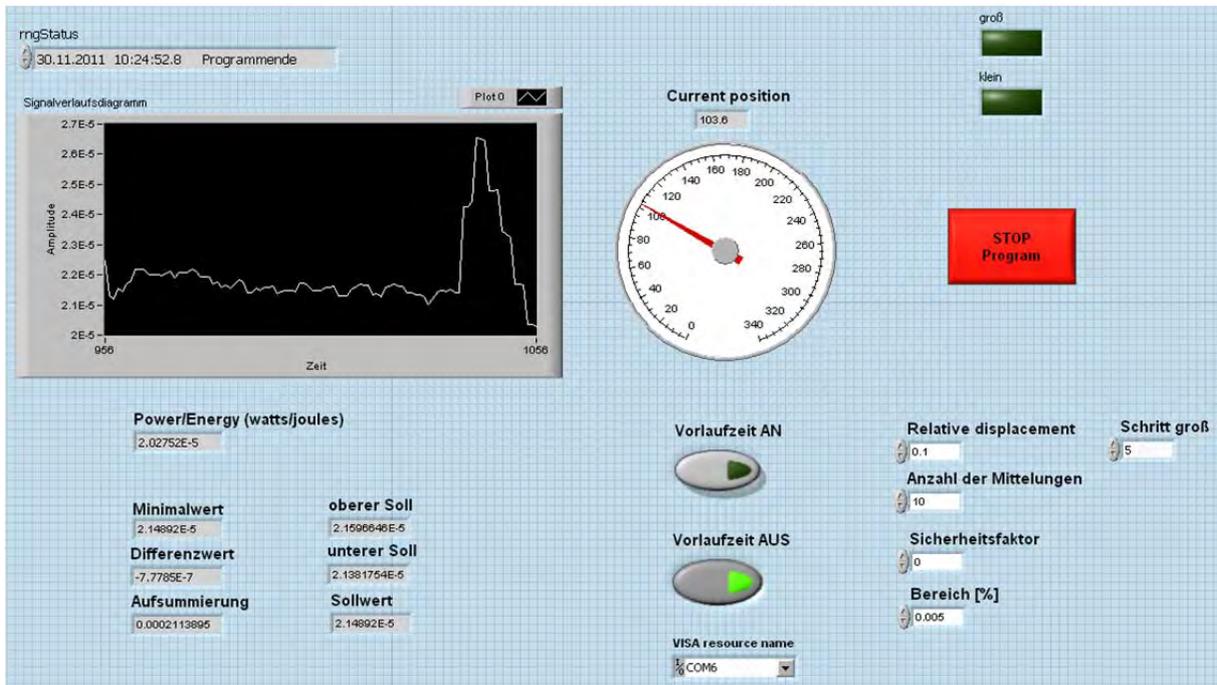


Abb. K2.3-14: Benutzeroberfläche

Wie in K2.3-15 dargestellt, konnten in einem Testaufbau (Abb. K2.3-13 (b)) mit diesem System sowohl extrem hohe (Abb. K2.3-15) als auch sehr geringe Leistungsschwankungen (Abb. K2.3-16) kompensiert werden, so dass am Werkstück eine annähernd konstante Ausgangsleistung zur Verfügung steht. Damit sollte es möglich sein, Tiefenabweichungen um die mittlere Strukturtiefe weiter zu reduzieren. Zudem könnte es durch den Einsatz des Systems möglich sein, mittels direkter Laserablation kontinuierliche Oberflächenprofile zu Korrektur- bzw. Strahlformungszwecken in zuvor mechanisch bearbeitete Oberflächen einzubringen.

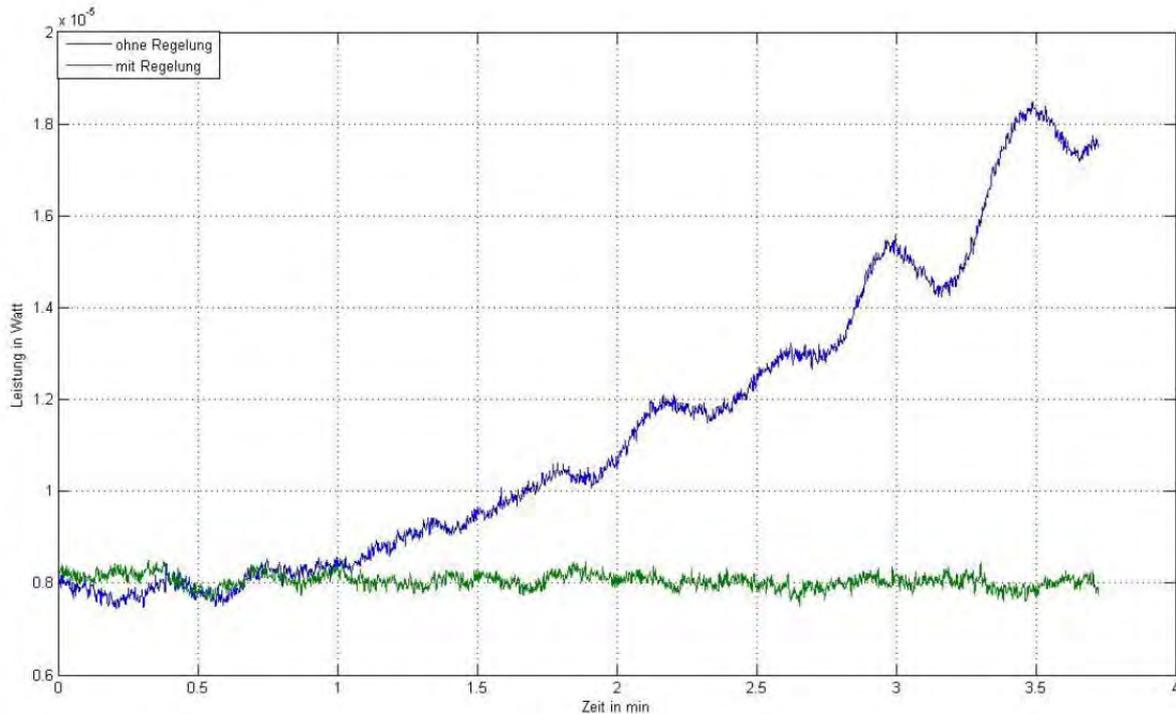


Abb. K2.3.-15: Beispiel für die Stabilisierung einer stark schwankenden Leistung; Leistungsmessung mit (grün) und ohne (blau) Leistungsstabilisierung

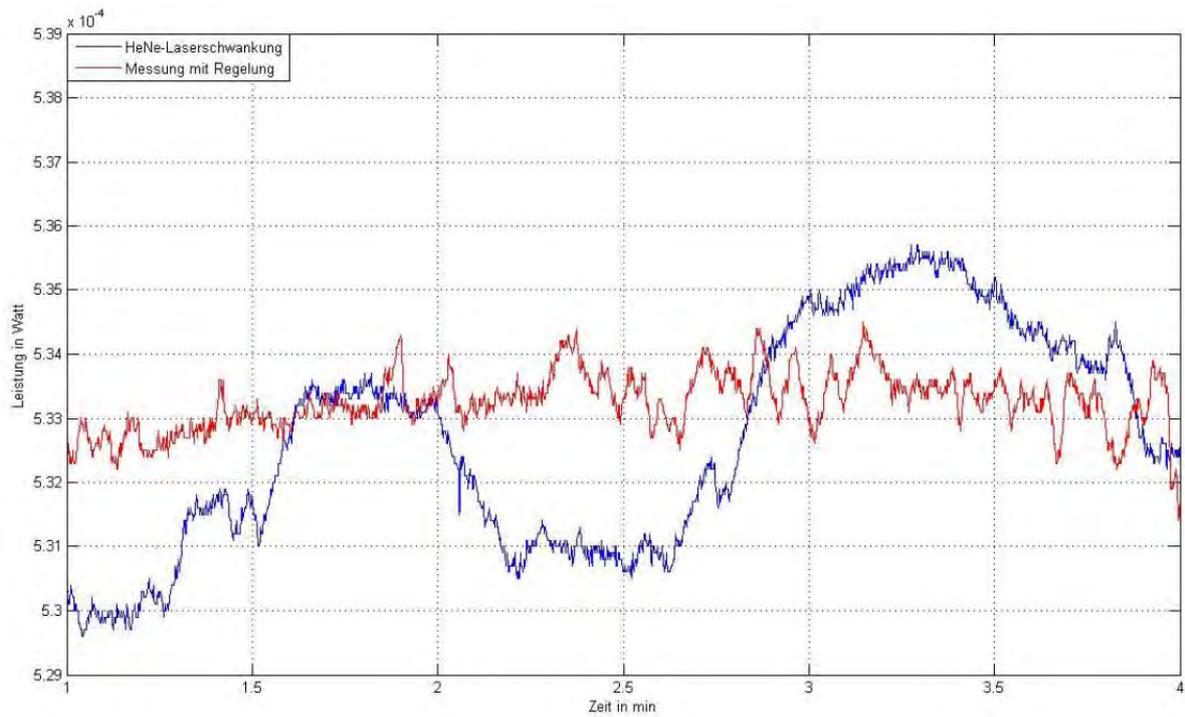


Abb. K2.3-16: Beispiel für die Stabilisierung einer nur gering schwankenden Leistung; Leistungsmessung mit (rot) und ohne (blau) Leistungsstabilisierung

Projektbereich I1 – Integration

II.1.5. Arbeitspaket I1.1

Integration der Beleuchtungsoptik und des Photolumineszenz-Detektionssystems:

Durch Zusammenführung des Beleuchtungsstrahlenganges mit dem Photolumineszenz-Detektionssystem der Integrationsstufe 4 ergibt sich die in Abb. I1.1-1 dargestellte optische Integrationsplattform.

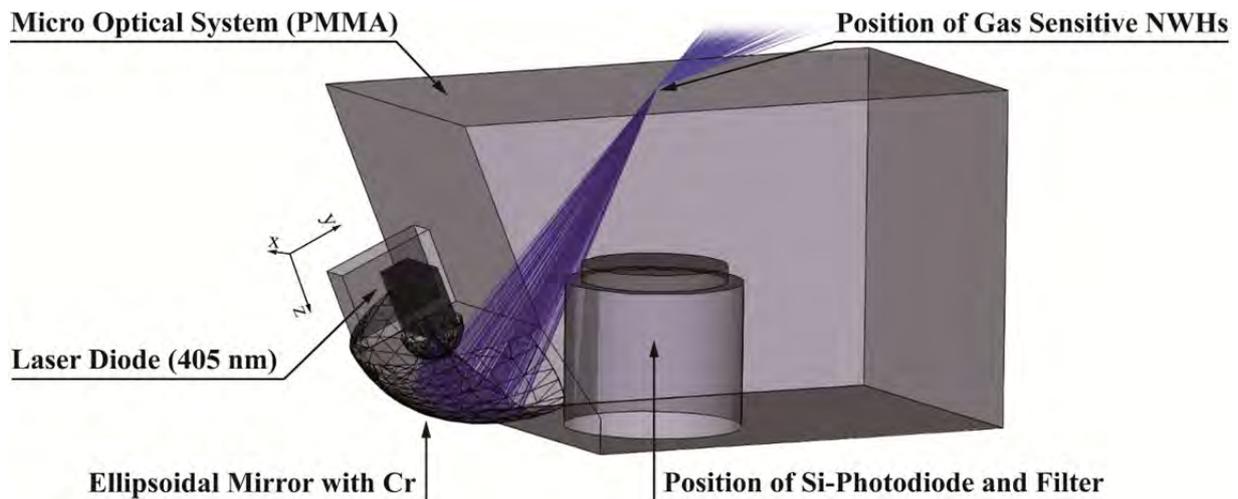


Abb. I1.1-1: Volumenkörper der optischen Integrationsplattform

Wie in Abb. I1.1-1 dargestellt, wird die Anregungsstrahlung ausgehend von einem Diodenlaser durch die Einkoppelfläche in das Substrat eingekoppelt und mit dem elliptischen Spiegel auf die gassensitiven Nanodrähte an der Oberfläche der Integrationsplattform beugungsbegrenzt fokussiert. Das mit einer Lambertschen Charakteristik emittierte Photolumineszenzsignal und entsprechende Änderungen werden anschließend von der Photodiode (+ Filter) in der Aussparung direkt unterhalb der Nanodrähte detektiert.

Nachfolgende Ausbaustufen unterscheiden sich von der hier dargestellten lediglich in der gesteigerten Komplexität der Detektionsoptik. In die Aussparung direkt unterhalb der gassensitiven NDHS werden in diesen Fällen die in K2.2 vorgestellten optischen Komponenten positioniert, mit dem Ziel, einen größeren Anteil des PL-Signals auf die PD zu konzentrieren.

Design verkippter Strahlformungselemente:

Um die Grundlagen für die Berechnungen der optischen Mikrosysteme zu schaffen, wurden Designalgorithmen zur optischen Funktionsintegration in verkippten Oberflächen entwickelt. Diese konnten erfolgreich am Beispiel eines Strahlformungselementes demonstriert werden, in welches eine korrigierte Fourierlinsenfunktion, eine Gauß-zu-Tophat-Strahltransformation, eine 90°-Strahlableitung und eine Strahlteilungsfunktion implementiert wurden. Das konkrete Ziel der Berechnungen war, die gaußförmige Intensitätsverteilung des abgelenkten Eingangsstrahls in eine quadratische, homogenisierte Intensitätsverteilung in der Zielebene zu transformieren und den Strahl senkrecht zur Ablenkrichtung in mehrere Tophatverteilungen zu teilen, wobei so wenig wie möglich Leistung innerhalb der 0. Beugungsordnung zu liegen kommen sollte [3]. Um dies zu

realisieren, wurden die optischen Funktionen einzeln, jedoch basierend aufeinander unter Anwendung der nachfolgend aufgelisteten Design- und Simulationsansätze berechnet:

- korrigierte Fourierlinsenfunktion zur Fokussierung → Raytracing
- Gauß-zu-Tophat-Transformation zur Erzeugung eines homogenisierten Quadrates → Wellenoptik
- Optimierung der Gitterstrukturen zur Realisierung der Strahlteilung → numerische der Lösung Maxwell-Gleichungen

Durch diese „Designdekomposition“ ist es möglich, den spezifischen Anforderungen der Berechnung jeder einzelnen optischen Funktionalität hinsichtlich der notwendigen Präzision und Flexibilität gerecht zu werden. Das Höhenprofil der daraus resultierenden hybriden optischen Freiform ist in Abb. I1.1-2. dargestellt. [3]

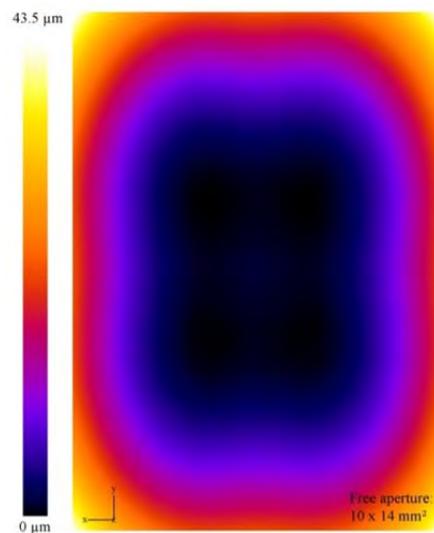


Abb. I1.1-2: berechnetes Oberflächenprofil des hybriden, freiformoptischen Strahlformers [3]

Da aufgrund der Komplexität der Komponente eine allumfassende Simulation nicht möglich ist, ist eine Interpretation **spezialisierter** Teilsimulationen erforderlich. So zeigt Abb. I1.1-3 beispielsweise eine Raytracing-Simulation der durch das hybride Bauteil erzeugten 0. sowie ± 1 . Beugungsordnung (BO), was vor allem Ausschuss über die laterale Form der erzeugten Intensitätsverteilung gibt.

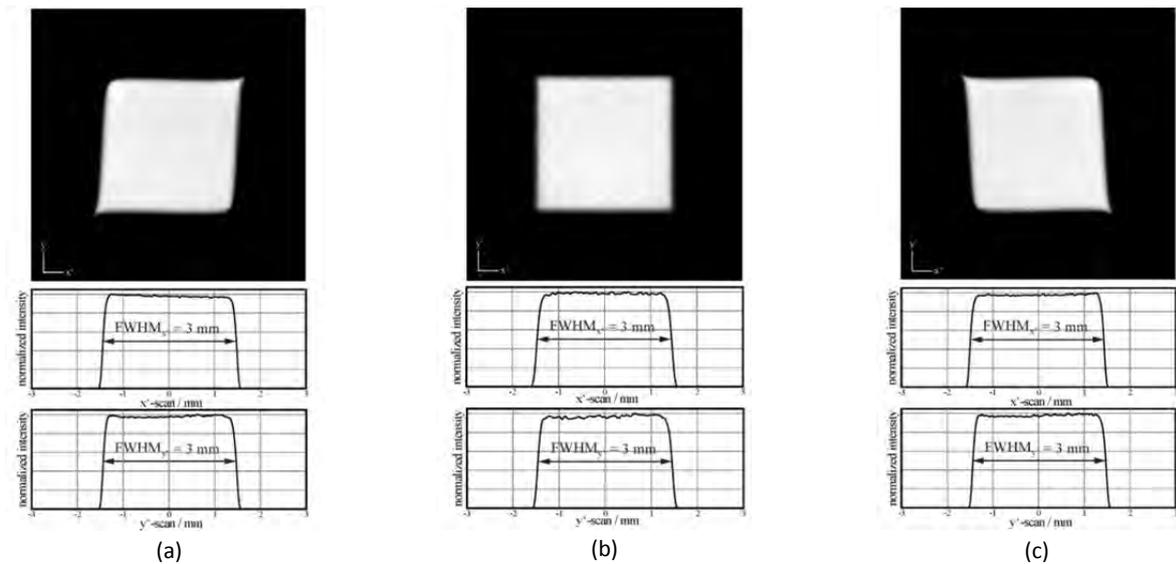


Abb. 11.1-3: Raytracing-Simulationsergebnisse für die 0. (b) sowie ± 1 . Beugungsordnung (a), (c) [3]

Ein leichter Abfall der Intensitätsverteilungen ist darauf zurückzuführen, dass keine wellenoptischen Effekte in dieser Simulation berücksichtigt werden. Eine nur für die 0. BO mögliche wellenoptische Simulation (Abb. 11.1-4) des erzeugten Tophats zeigt diese Abweichung hingegen nicht.

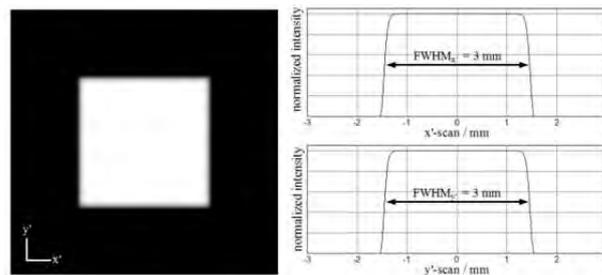


Abb. 11.1-4: wellenoptische Simulation der 0. Beugungsordnung [3]

Demzufolge ist in allen BO mit einer homogenen jedoch für die ± 1 . BO auch mit einer leicht verzeichneten Intensitätsverteilung zu rechnen.

Mit der Implementierung der diffraktiven Strukturen wurde das Ziel verfolgt, möglichst viel Leistung aus der 0. BO in die ± 1 . BO zu verteilen [3][3]. Den rigorosen Simulationsergebnissen in Abb. 11.1-5 zufolge, ergibt sich bei einer Strukturweite von 284 nm eine minimale Effizienz der 0. BO von 0,16 % bezüglich der gesamten reflektierten Leistung.

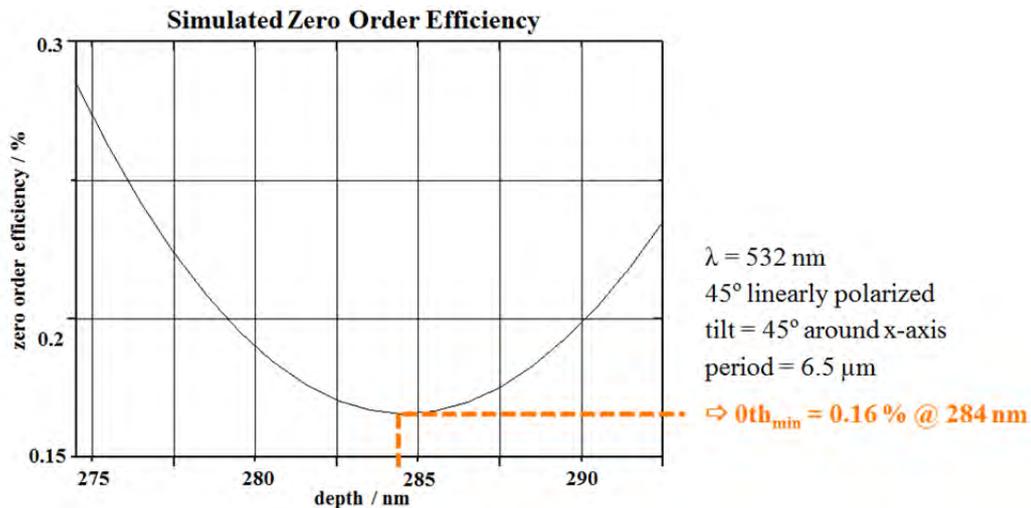


Abb. I1.1-5: rigoros simulierte Beugungseffizienz der 0. Beugungsordnung in Abhängigkeit der Strukturtiefe

Die im Rahmen dieses Arbeitspaketes erarbeiteten Grundlagen sind vor allem für die Auslegung zukünftiger Optiken zur selektiven Beleuchtung der NDHS von großer Bedeutung.

II.1.6. Arbeitspaket I1.2

Integrierte Fertigung hybrider optischer Freiformflächen:

Wie bereits in K2.3. erwähnt, wurden die Designdaten der in I1.1. berechnete Freiformfläche auf unterschiedliche Weise in die Fertigungsdaten überführt. In beiden Fällen wurde das Oberflächenprofil mit einem rasterförmig über das angestellte Substrat geführten Kugelfräser entsprechend Abb. I1.2-1 (a) eingebracht. Der Abstand zwischen den Frässpuren betrug dabei $2 \mu\text{m}$. Auf den zweistufigen Fräsprozess folgte eine formerhaltende Politur [4][10]. Daraus resultierte die reflektierende Oberfläche des Strahlformers in Abb. I1.2-1 (a) bzw. (b) mit einer Fläche von $10 \times 14 \text{ mm}^2$, welche die Strahlableitung, die korrigierte Fourierlinsenfunktion und die Strahltransformation beinhaltet. [3]

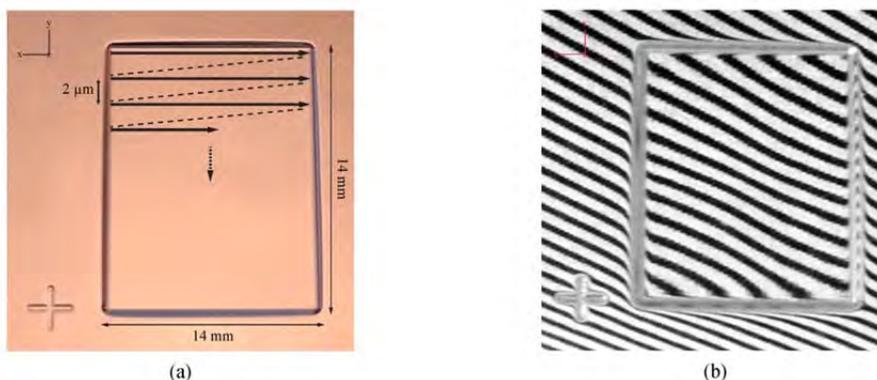


Abb. I1.2-1: Fotos des Strahlformelementes in Kupfer: schematische Darstellung der rasterförmigen Frässtrategie (a) und Verdeutlichung der freiform-optischen Oberfläche (b) [3][3]

Innerhalb desselben Ultrapräzisionsbearbeitungszentrums wurde abschließend die zusätzliche Strahlteilungsfunktion mittels direkter 3-dimensionaler ps-Laserablation diffraktiver Strukturen in die zuvor mechanisch gefertigte Oberfläche integriert.

Dafür wurde der Laserfokus exakt zur Substratoberfläche positioniert und durch eine gezielte Adressierung der Maschinenachsen über das Oberflächenprofil geführt. Die Bewegungsabläufe hierfür basieren auf denselben Oberflächenbeschreibungen, welche sowohl für die Simulationen als auch für die mechanische Bearbeitung der reflektiven Grundform verwendet wurden. Dieses Vorgehen erlaubt eine präzise und flexible Fertigung hybrider optischer Freiformflächen und somit die effiziente Integration diverser optischer Funktionalitäten. [3]

Fertigung der Integrationsplattform:

Auf Grundlage der Voruntersuchungen zur Fertigung komplexer Freiformflächen wurde die optische Integrationsplattform in UV optimierten PMMA durch Ultrapräzisionsfräsen in einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum auf Basis der analytischen Beschreibungen der optischen Oberflächen realisiert. D.h. die Fräswege werden ohne Konvertierung direkt anhand der Optikdesigndaten unmittelbar vor dem jeweiligen Frässchritt ermittelt, wodurch eine dynamische Implementierung von Fehlerkompensationsroutinen (3D-Werkzeugkompensation, Kompensation von Positionierungsfehlern usw.) ermöglicht wird. Im Vergleich zur Fertigung auf Basis eines zuvor erstellen Volumenkörpers werden mit dieser Methode Konvertierungsfehler vermieden und spontan auftretenden Abweichungen kann entgegengewirkt und somit die Fertigungspräzision erhöht werden[4].

Nach dem Schrappvorgang folgte der angestellte Schlichtprozess zur Erzeugung der erforderlichen Qualität der (optischen) Oberflächen hinsichtlich ihrer Formtreue und Rauheit. In Abb. I1.2-2 ist dieser Schritt bei der Bearbeitung der Anregungsquellenplattform (a)), des elliptischen Spiegels (b)), der Einkoppelfläche (c)) und der planen Auskoppelfläche / Position der Nanodrähte (d)) gezeigt.

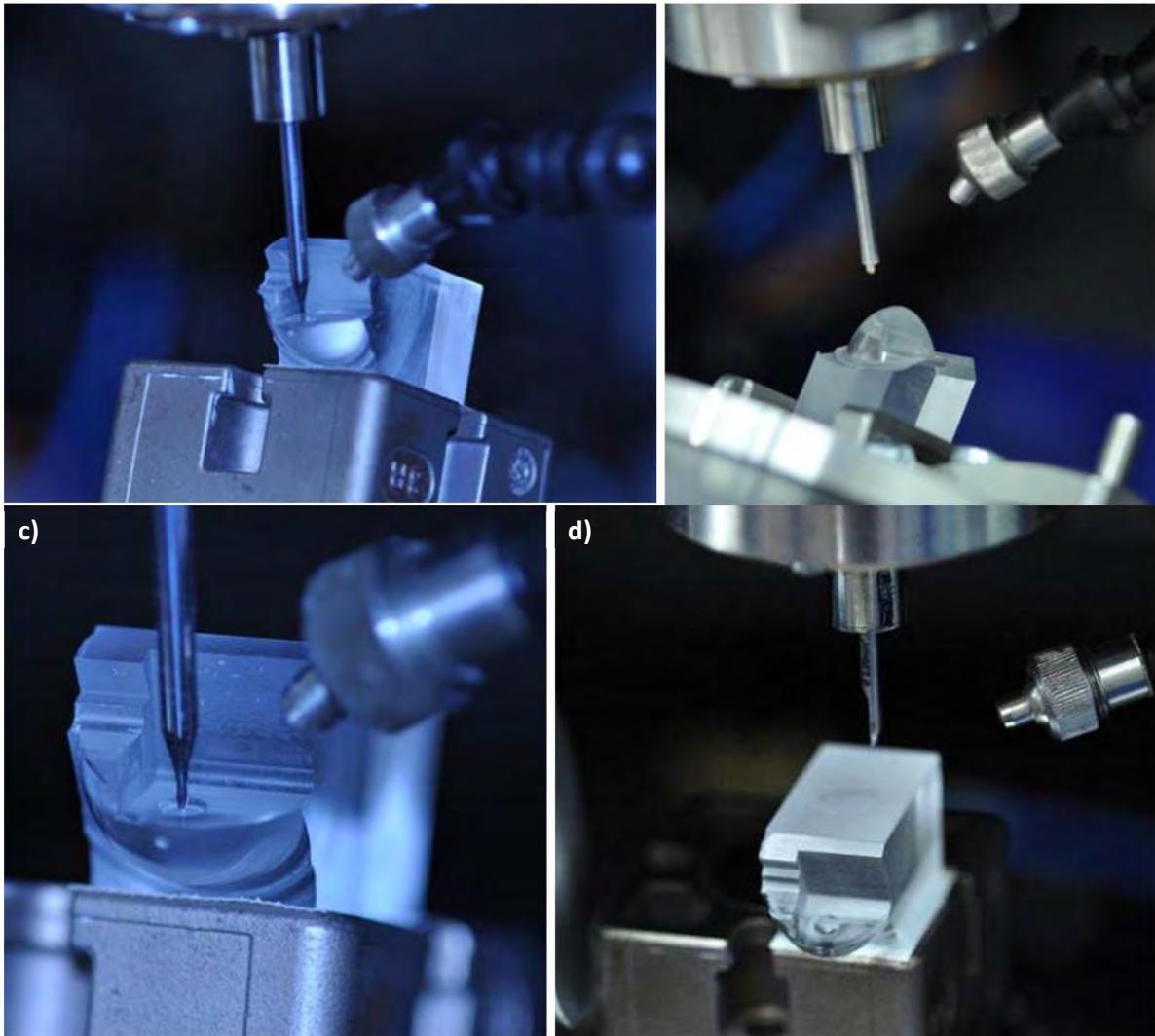


Abb. 11.2-2: Sequentielle Fertigung (Schichtvorgang) des optischen Mikrosystems; a) Anregungsquellenplattform, b) elliptischer Spiegel, c) Einkoppelfläche und d) Auskoppelfläche / Position der Nanodrähte

Der zweistufige Fertigungsprozess vom PMMA-Substrat bis hin zur optischen Integrationsplattform (Abb. 11.2-3) dauerte ca. 60 Stunden. Für eine kommerzielle Anwendung des opto-chemischen Detektors sind demnach Massenfertigungsverfahren in UV transparenten Materialien wie der in K2.3 erläuterte SolGel-Abformungsprozess in SiO_2 für die Fertigung der Integrationsplattform erforderlich.



Abb. 11.2-3: Optische Integrationsplattform (Integrationsstufe 3) in UV optimierten PMMA

Zur weiteren Funktionsintegration (Strahlteilung zur Parallelisierung/Multiplexing) können die refraktiven und reflektierenden Oberflächen des Systems unmittelbar nach dem Fräsvorgang mittels direkter Picosekundenlaserablation strukturiert werden [11]. In Zusammenarbeit mit dem BMBF-geförderten Projekt OptiMi II (FKZ: E715-10064) konnte durch den Einsatz weiterentwickelter Bearbeitungsstrategien und der in diesem Projekt entwickelten Leistungsstabilisierung die Strukturierungsqualität weiter verbessert werden.

Lithographische Fertigung diffraktiver optischer Elemente:

Diffraktive optische Elemente bieten die Möglichkeit nahezu beliebige optische Funktionen zu implementieren und dabei im Vergleich zu konventionellen Optiken wie beispielsweise Linsen erheblich weniger Bauraum in Anspruch zu nehmen. Um zukünftig jedoch die Linsen des Detektionssystems der Ausbaustufe 6 durch diffraktive Linsen zu ersetzen, ist eine weitreichende Optimierung der photolithographischen Fertigung dieser Komponenten am Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien erforderlich. Dabei standen im Rahmen dieses Projektes insbesondere Prozessanpassungen des ICP-RIE-Trockenätzverfahrens mit dem Photolack AZ ECI3027, welcher sich durch ein hohes Auflösungsvermögen und seine Robustheit auszeichnet, im Mittelpunkt. Dieser Photolack ist besonders wärmebeständig und lässt somit eine verbesserte Vorbereitung der SiO₂-Wafer durch Tempern zu, ohne dabei entscheidend an Empfindlichkeit zu verlieren. Dies ist vor allem für die Fertigung diffraktiver, optischer Elemente wichtig, da diese oftmals aus sehr kleinen Strukturen (< 1 µm) bestehen, welche mit einer hohen Strukturgenauigkeit (Breite, Flankensteilheit) zu realisieren sind. Die Strukturmaßhaltigkeit (Breite) konnte zudem durch umfangreiche Belichtungstests und entsprechende Dosisvariationen optimiert werden. Des Weiteren wurde die Ätzrate auf SiO₂-Wafers weitestgehend stabilisiert und damit die Ätztiefenfehler auf < ± 5 nm reduziert. Die Ätzhomogenität über einen 4“-Wafer konnte durch den Austausch eines Aluminiumliners gegen einen Glasliner von 3,5 % auf 2,5 % verbessert werden, so dass eine höhere Ausbeute durch eine effizientere Belegung des Wafers mit diffraktiven Strukturen möglich ist.

Die für die Fertigung mehrstufiger, diffraktiver, optischer Elemente besonders wichtigen Justagemarken wurden weiterentwickelt und auf die zur Verfügung stehenden technologischen Gegebenheiten angepasst. Abb. 11.2-4 zeigt das interferometrisch vermessene Profil des zentralen Bereiches einer 8-stufigen diffraktiven Linse, welche mithilfe eines 8-stufigen, logarithmischen Photolithographieprozesses gefertigt wurde.

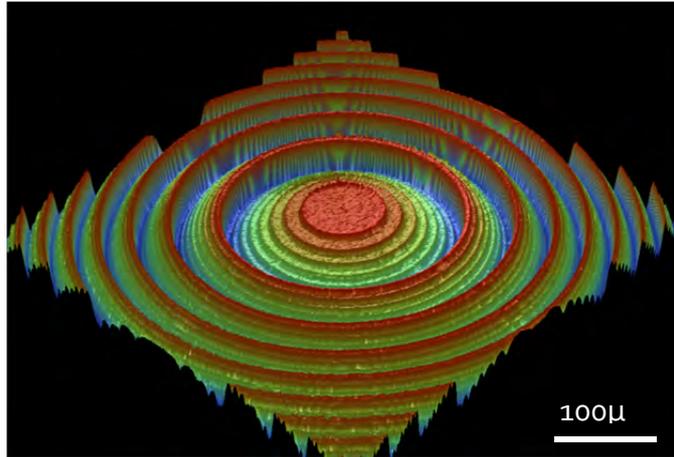


Abb. I1.2-4: interferometrisch vermessenes Profil des zentralen Bereiches einer 8-stufigen, diffraktiven Linse

II.1.7. Arbeitspaket I1.3

Charakterisierung der durch integrierte Fertigung realisierten hybriden Freiform:

Die Charakterisierungsergebnisse zur Formtreue der gefrästen reflektierenden Grundform (I1.2.) sind in Kapitel K2.3. zu finden. Mit der in I1.2. erläuterten Methode zur Erzeugung der diffraktiven Strukturen mittels direkter ps-Laserablation konnte auf der komplexen Freiform ein sinusförmiges Gitter mit einer der Zieltiefe von 284 nm (I1.1.) nahezu identische mittlere Strukturtiefe von 290 nm auf einer Fläche von 10 x 14 mm² realisiert werden. Abb. I1.3-1 zeigt die mikrostrukturierte Oberfläche sowie eine profilometrische Messung einer beliebigen Stelle des eingebrachten Gitters, dessen Strukturtiefe über die gesamte Fläche eine Standardabweichung von ±9 nm aufweist. [3]

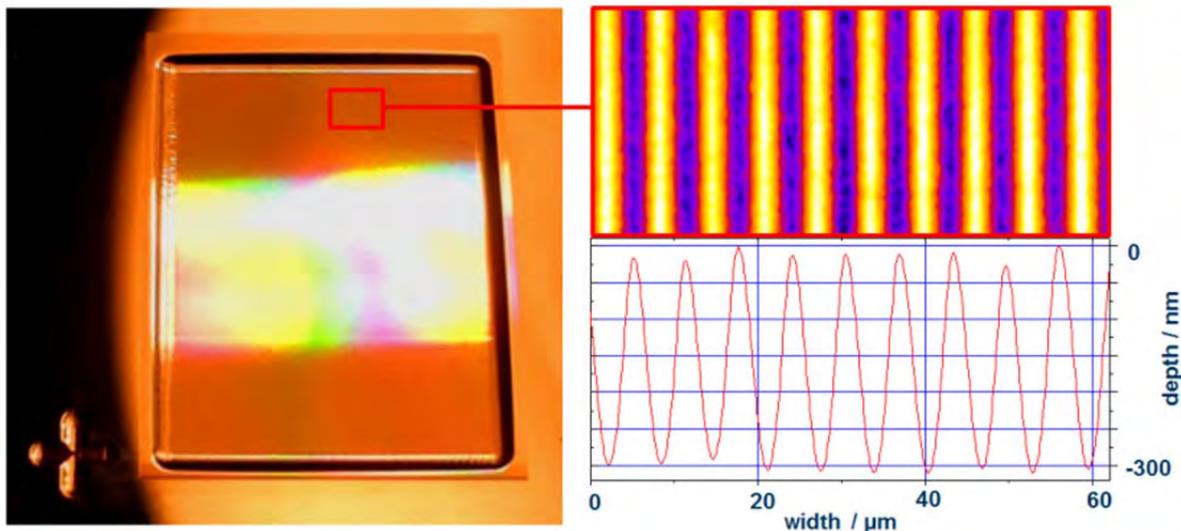


Abb. I1.3-1: Foto der hybriden freiform-optischen Komponente in Kupfer sowie profilometrische Detailaufnahme der diffraktiven Strukturen

Mit dem im Rahmen von Arbeitspaket K2.3. realisierten Leistungsstabilisierungssystem war es möglich, auf einer wesentlich größeren Fläche von 25 x 50 mm² die Zieltiefe noch genauer zu treffen und Schwankung im Vergleich zur Strukturierung ohne Leistungsstabilisierungssystem von ±18 nm (Abb. I1.3-2 (a)) auf ±9 nm (Abb. I1.3-2 (b)) zu reduzieren.

In Abb. I1.3-2 sind Profilschnitte der Strukturierungen und entsprechende Strukturparameter dargestellt.

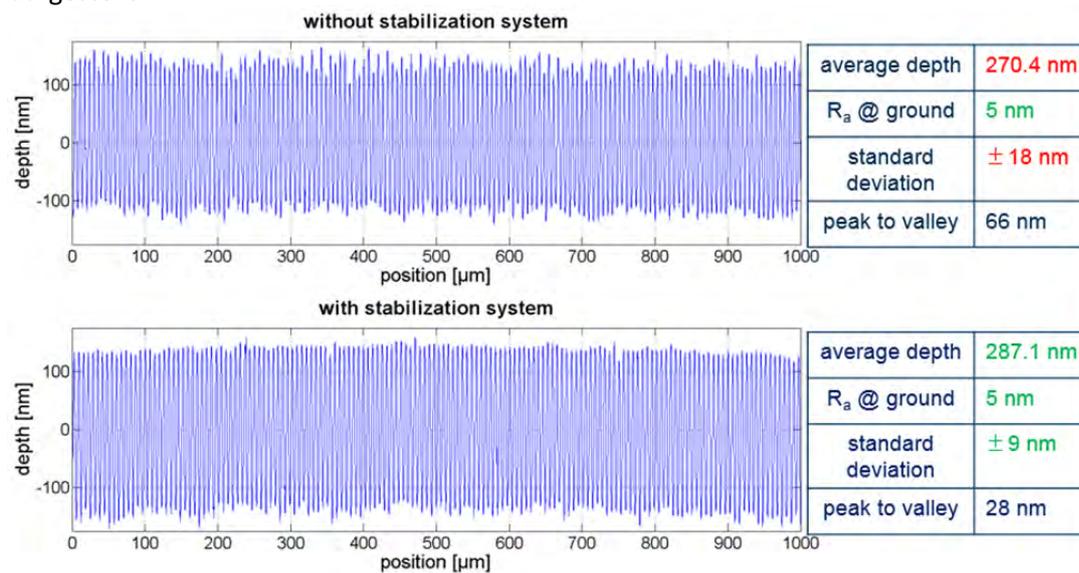


Abb. I1.3-2: Profilschnitte mittels direkter ps-Laserablation erzeugter Gitter; ohne (oben) und mit (unten) Leistungsstabilisierung

Abb. I1.3-3 zeigt ein 3-dimensionales Profil des mit Leistungsstabilisierung generierten Gitters.

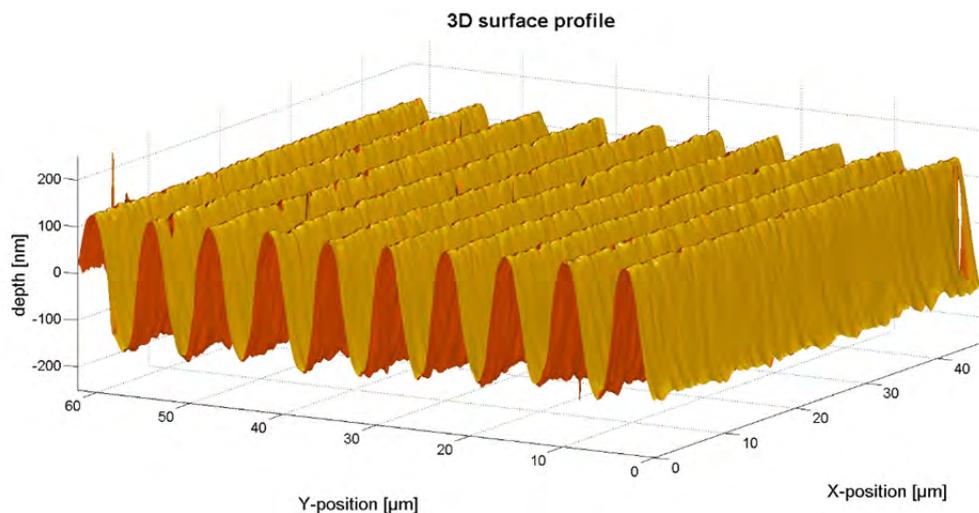


Abb. 1.3-3: 3-dimensionales Profil eines mit Leistungsstabilisierung erzeugten Gitters [9]

Zu beachten ist, dass hier im Vergleich zur Strukturierung der zuvor vorgestellten Freiform eine ca. 9-mal größere Fläche bearbeitet wurde, deren Strukturierung ca. 6,75 Stunden anstatt 45 min in Anspruch genommen hat. Aufgrund der relativ kurzen Bearbeitungszeit im Falle der Freiform, konnte für die Bearbeitung ein Zeitfenster gewählt, in dem erfahrungsgemäß mit geringeren Schwankungen der Laserleistung zu rechnen war. Dies war im Falle der Strukturierungen der wesentlich größeren Flächen aufgrund der hohen Bearbeitungsdauer nicht möglich. Somit sind die Strukturschwankungen der zuvor vorgestellten Strukturierung der Freiform nicht direkt mit den in Abb. I1.3-2 dargestellten Ergebnissen vergleichbar.

Profilometrische Charakterisierung der Integrationsplattform:

Die profilometrische Charakterisierung der wichtigsten optischen Oberflächen der Integrationsplattform (Einkopffläche, elliptischer Spiegel) wurde mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop durchgeführt. In Abb. I1.3-4 a) ist das Ergebnis der Vermessung der zentralen Region des elliptischen Spiegels mit einer Rauheit von $R_a < 18 \text{ nm}$ dargestellt. [12]

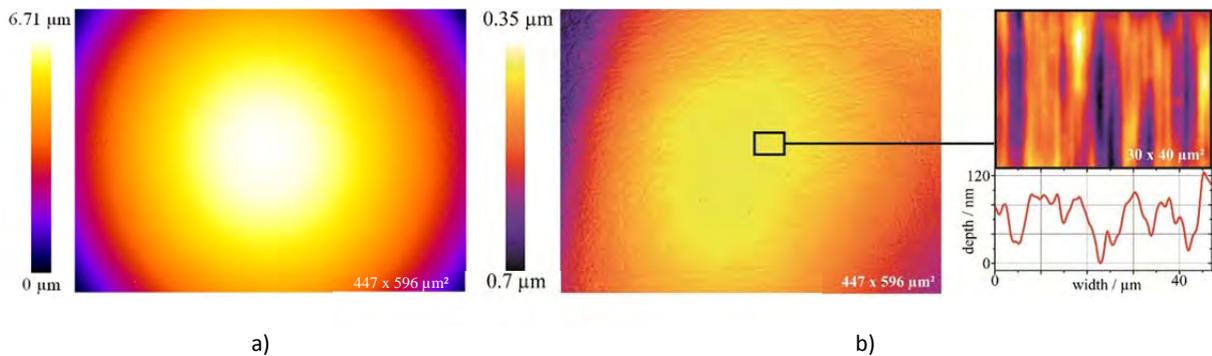


Abb. I1.3-4: zentraler Ausschnitt des gemessenen Oberflächenprofils des elliptischen Spiegels a); Differenz zw. Designdaten und gemessenen Oberflächenprofil des elliptischen Spiegels b) mit Vergrößerung zur Verdeutlichung der Frässpuren [12]

Ein Vergleich mit den Designdaten resultierte in der in Abb. I1.3-4 (b) dargestellten Abweichung, welche über eine Fläche von $447 \times 596 \mu\text{m}^2$ im Durchschnitt 150 nm beträgt. Mit einer detaillierteren Vermessung der Oberfläche in Kombination mit einer Hochpassfilterung (Vergrößerung Abb. I1.3-4 (b)) konnte insbesondere vor dem Poliervorgang eine periodische Struktur detektiert werden. Diese ist auf die in Abb. I1.3-5 schematisch dargestellte Frässtrategie (rote Linien) zurückzuführen, welche für die Fertigung des elliptischen Spiegels verwendet wurde. Letztendlich erzeugen die Gitterstrukturen mit einer Tiefe von $< 20 \text{ nm}$ (nach dem Polieren) Beugungseffekte, welche als separierte Beugungsordnungen bei der optischen Charakterisierung der Integrationsplattform in Abschnitt I3.2 nachgewiesen werden konnten.

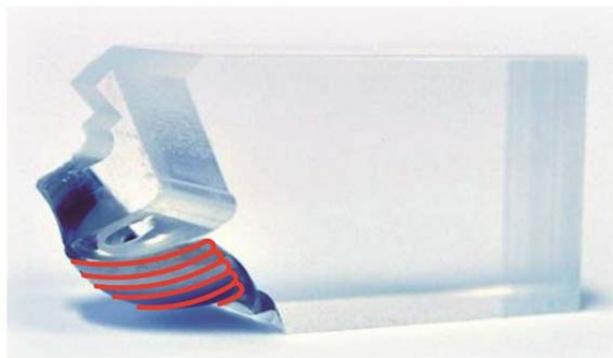


Abb. I1.3-5: schematische Darstellung der Frässpuren zur Fertigung des elliptischen Spiegels [12]

Aufgrund der Anregungsquellenplattform und dem eingeschränkten Arbeitsabstand der Messobjektive war eine direkte Vermessung der sphärischen Einkopffläche nicht möglich. Um dennoch eine Aussage über die erreichbare Formtreue und Oberflächenqualität machen zu können, wurde eine identisch gefertigte Testfläche profilometrisch untersucht. Das Ergebnis aus einem zentralen Bereich der sphärischen Oberfläche mit einer Rauheit von $< 20 \text{ nm}$ ist in Abb. I1.3-6 (a)

dargestellt. Ein Vergleich mit den Designdaten resultierte in einer Abweichung des gemessenen Krümmungsradius vom Designkrümmungsradius von lediglich 0,1 %. Eine kleine Erhöhung im Krümmungsmittelpunkt der sphärischen Oberfläche mit einer Höhe von 0,4 μm und einem Durchmesser von ca. 12 μm ist auf eine geringfügige Dezentrierung des Fräsers von der Rotationsachse (siehe Abb. I1.3-6 (b)) zurückzuführen. Ein signifikanter Einfluss auf die Strahlformungseigenschaften konnte in den optischen Experimenten (I3.2) nicht nachgewiesen werden.

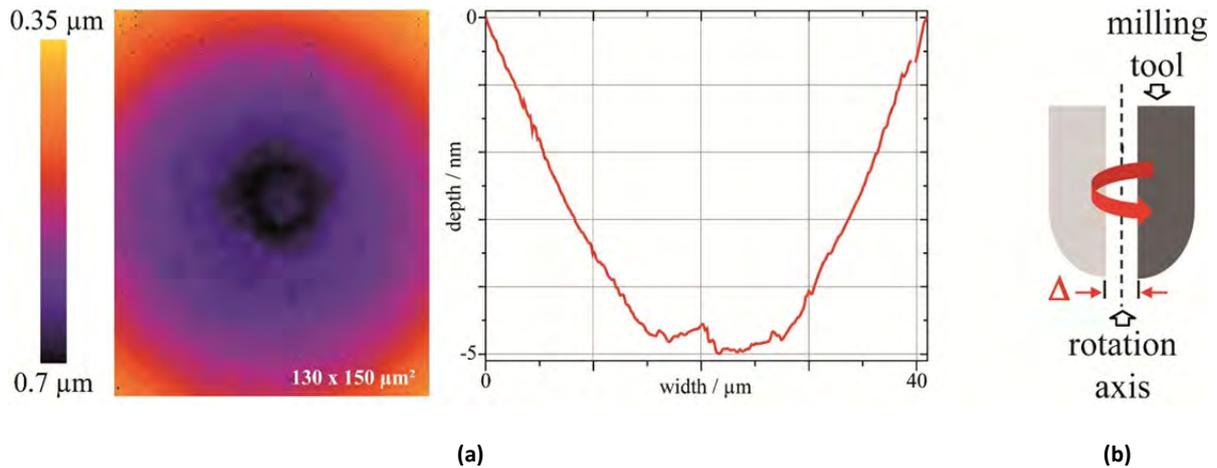


Abb. I1.3-6: Oberflächenprofil und Profilschnitt eines Replikates der Einkopffläche (a), schematische Darstellung der Dezentrierung des Fräsers (b) [12]

Projektbereich I3

II.1.7. Arbeitspaket I3.2

Charakterisierung der optischen Funktionalität der Beleuchtungseinheit der Integrationsplattform:

Zur qualitativen Untersuchung der Abbildungseigenschaften der Integrationsplattform wurden, wie in Abb. I3.2-1 dargestellt, horizontal und vertikal ausgerichtete Gitter an die zukünftige Position der Austrittsfacette der Laserdiode positioniert und über den elliptischen Spiegel auf die zukünftige Position der gassensitiven Nanodrähte an der Oberfläche des Systems abgebildet.

Diese Untersuchung des Systems ist insbesondere für eine zukünftige Parallelisierung / Multiplexing unterschiedlicher Detektionsaufgaben interessant, bei denen mehrere Flächen mit unterschiedlich empfindlichen Nanodrähten mit der Anregungsstrahlung beleuchtet werden müssen.

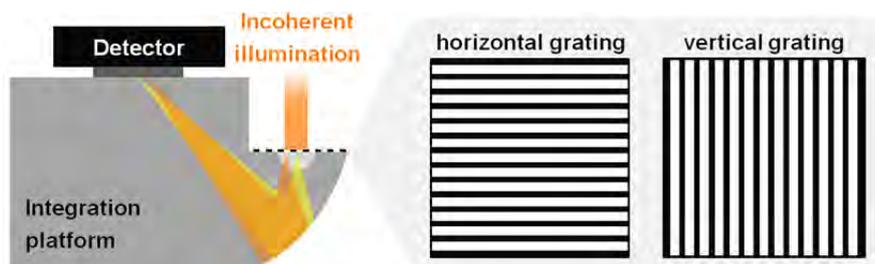


Abb. I3.2-1: schematische Darstellung des Experiments zur Untersuchung der Abbildungsqualität [12]

Wie in Abb. I 3.2-2 zu sehen ist, werden Gitter mit einer Periode von 50 μm bis 10 μm sowohl in horizontaler als auch vertikaler Ausrichtung mit ausreichend hohem Kontrast an die Position der Nanodrähte abgebildet. In vertikaler Ausrichtung ist eine leicht reduzierte Modulation der abgebildeten Gitterstruktur zu erkennen, was auf eine Faltung des Anregungsstrahlenganges in dieser Richtung und somit eine partielle Defokussierung infolge einer verkippten Bildebene zurückzuführen ist.

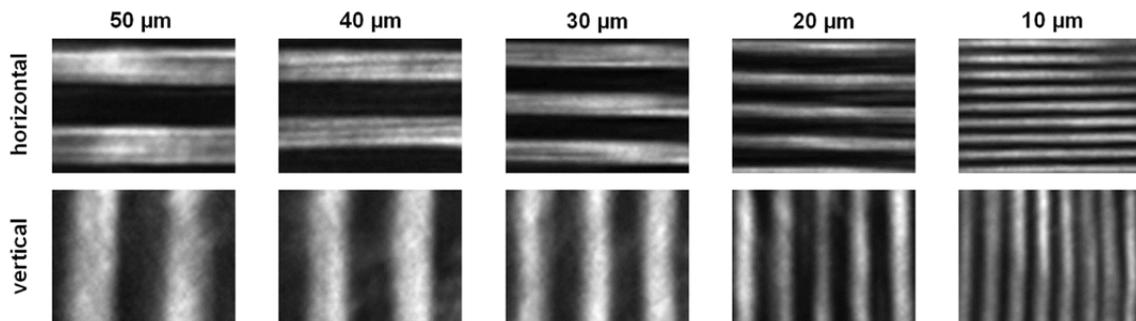


Abb. I3.2-2: mit der optischen Integrationsplattform abgebildete horizontal und vertikal ausgerichteter Gitter [12]

Für die quantitative Analyse der optischen Eigenschaften der Integrationsplattform hinsichtlich der geplanten Anwendung wurde der Aufbau in Abb. I 3.2-3 (a) verwendet.

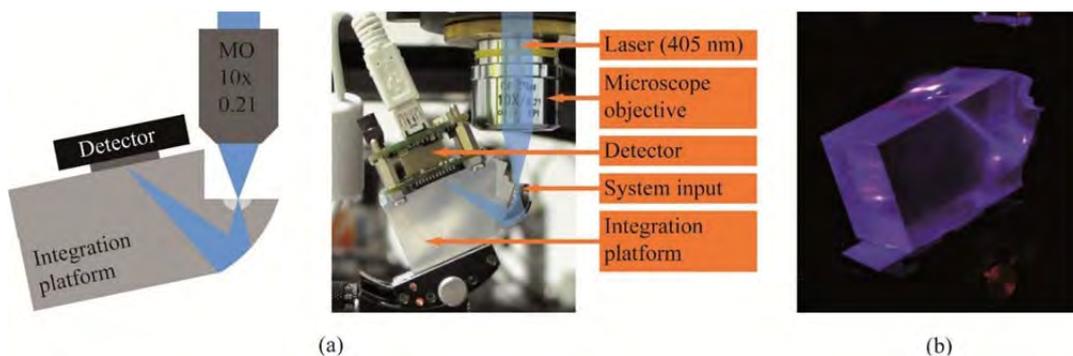


Abb. I3.2-3: schematische Darstellung und Foto des Aufbaus zur experimentellen Bestimmung der Fokussiereigenschaften der Integrationsplattform (a); Foto der Integrationsplattform während der optischen Charakterisierung (b) [12]

Während Abb. I 3.2-3 b) einen qualitativen Eindruck der Fokussiereigenschaft des Systems vermittelt, ist in Abb. I 3.2-4 die tatsächlich detektierte Intensitätsverteilung dargestellt. Die daraus ermittelten $1/e^2$ -Durchmesser des elliptischen Fokus von 24 μm in horizontaler Richtung und 14 μm in vertikaler Richtung stimmen mit den simulierten Ergebnissen von 21 μm bzw. 13 μm sehr gut überein.

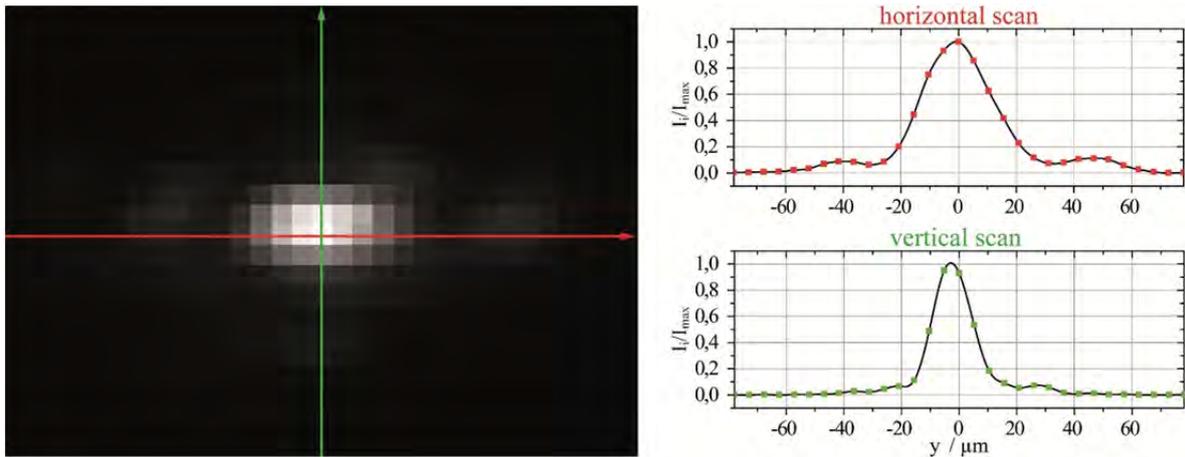


Abb. 13.2-4: durch die Integrationsplattform erzeugter Fokus [12]

Bei näherer Betrachtung des horizontalen Intensitätsprofils in Abb. 13.2-4 sind jedoch links und rechts vom Hauptintensitätsmaximum symmetrische Nebenmaxima zu erkennen. Der Grund hierfür sind die bei den profilometrischen Messungen detektierten periodischen Strukturen infolge der Frässtrategie zur Fertigung des elliptischen Spiegels. Die durch die Gitterstrukturen entstehenden Beugungsordnungen beinhalten weniger als 1 % der gesamten, durch das System transmittierten Leistung.

Charakterisierung der optischen Funktionalität der Detektionseinheit der Integrationsstufe 6:

Um möglichst viel Energie des PL-Signals auf die PD zu konzentrieren wurde das in Abschnitt K2.2 bereits vorgestellte optische Detektionssystem bestehend aus einer bikonvexen Linse und einer Asphäre realisiert. Abb. 13.2-5 (a) zeigt qualitativ die hervorragenden Fokussiereigenschaften der Kollektroptik. Eine Vermessung des erzeugten Spots (Abb. 13.2-5 (b)) resultierte in einem Fokusdurchmesser von ca. $53 \mu m$ (FWHM), welcher auf der PD mit einer aktiven Fläche von $3,6 \times 3,6 \text{ mm}^2$ erzeugt wird. Somit wird eine Überstrahlung der PD verhindert und ein großer Anteil des von den NDHS emittierten Signals von der ersten Linse aufgenommen und von der zweiten Linse auf die PD konzentriert.

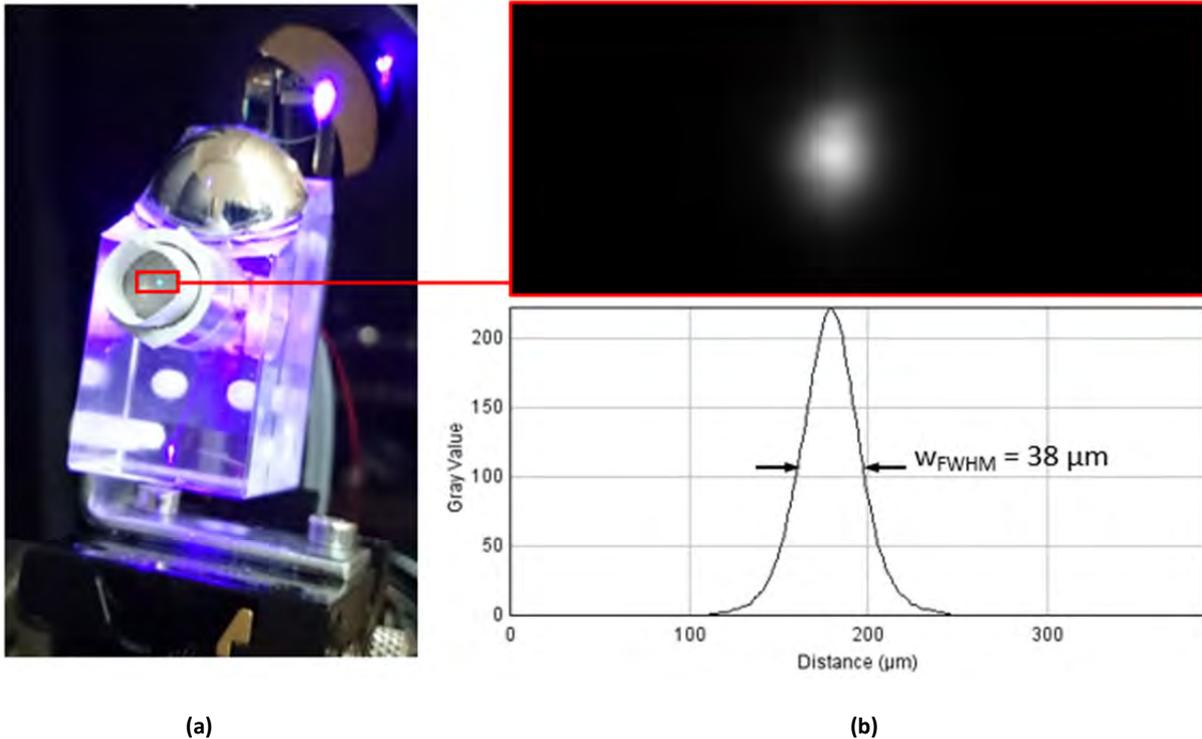


Abb. 13.2-5: von der Kollektoroptik erzeugte Intensitätsverteilung am Ort der PD (gemessener Durchmesser $w_{FWHM} = 38 \mu\text{m}$, simulierter Durchmesser $w_{FWHM} = 26 \mu\text{m}$)

Optische Charakterisierung der hybriden Freiform:

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde ein Messplatz zur Vermessung der Strahlformungseigenschaften (erzeugte Intensitätsverteilung, Beugungseffizienz) optischer Komponenten aufgebaut. Abb. 13.2-6 (oben) zeigt die damit aufgenommenen Intensitätsverteilungen, welche durch das im Arbeitspaket I1.1 bis I1.3 vorgestellte integrierte (hybride) optische (Freiform-)Strahlformungselement in einem Arbeitsabstand von 200 mm in der 0. bzw. ± 1 . BO erzeugt wurden. Wie die Analyse der Messergebnisse (Abb. 13.2-6 (unten)) und der Vergleich mit den Simulationsergebnissen (Abb. 13.2-6 (oben)) zeigen, wurde die asymmetrische, gaußförmige Eingangsverteilung erfolgreich in die geforderte Verteilung in der Zielebene transformiert. Allerdings sind, wie bereits in K2.3. erwähnt, starke Modulationen der erzeugten Verteilungen zu erkennen. Diese sind senkrecht zu den periodischen Fertigungsabweichungen in Abb. K2.3.-2 (b) und (c) ausgerichtet und können somit auf Beugungs- und Interferenzeffekte an diesen Strukturen zurückgeführt werden. [3]

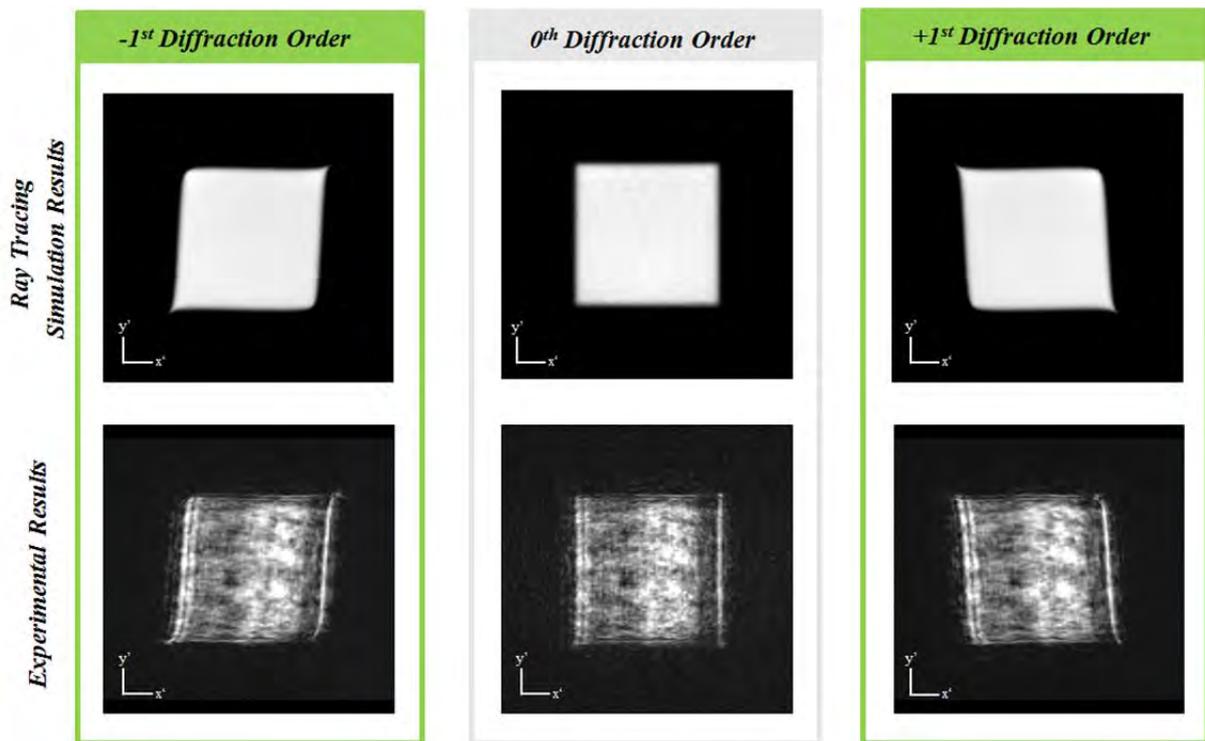


Abb. 13.2-6: Raytracing-Simulationsergebnisse (oben) und gemessene Intensitätsverteilungen (unten) für die 0. bzw. ± 1 . Beugungsordnung [13]

Die bereits in I1.3. mit profilometrischen Messungen nachgewiesene hochgenaue Realisierung der Beugungsstrukturen mittels direkter ps-Laserablation konnte durch eine Vermessung der Effizienzen der erzeugten BO bestätigt werden. Der Vergleich der experimentell ermittelten Beugungseffizienzen (Abb. 13.2.-7, rot) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den rigoros simulierten bei der Zielstrukturtiefe von 284 nm (Abb. 13.2.-7, schwarz) bzw. der realen Strukturtiefe von 290 nm (Abb. 13.2.-7, grau) [3].

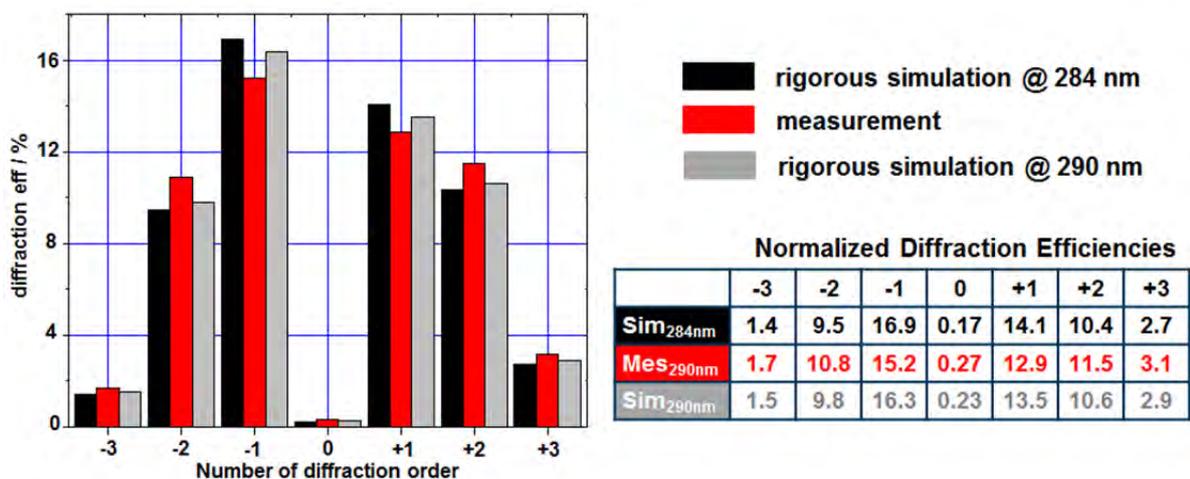


Abb. 13.2-7: Vergleich der gemessenen (rot) sowie bei einer Tiefe von 284 nm (schwarz) bzw. 290 nm (grau) rigoros simulierten Beugungseffizienzen [13]

Mit den Ergebnissen der optischen Charakterisierung konnte die Gültigkeit der verwendeten Berechnungsalgorithmen und Simulationsmethoden (I1.1.) nachgewiesen werden. Abweichungen gemessener von simulierten Intensitätsverteilungen können auf Fertigungsfehler zurückgeführt werden, deren Minimierung Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein wird.

II.1.8. Arbeitspaket I3.4

In verschiedenen, getrennt voneinander durchgeführten Messungen konnten die korrekten Funktionsweisen sowohl der Nanodrähte [1] als auch des optischen Freiformsystems bestätigt werden [3][5][12]. Um die Funktionsweise des vollständig integrierten Gassensors zu untersuchen, wurde daher an der TU-Ilmenau ein semi-integrierter Aufbau bestehend aus dem optischen Freiformsystem, den Nanodrähten, einer Photodiode bzw. einem Spektrometer sowie einer Kavität zur Erzeugung einer definierten Atmosphäre erstellt, siehe Abb. I3.4-1.

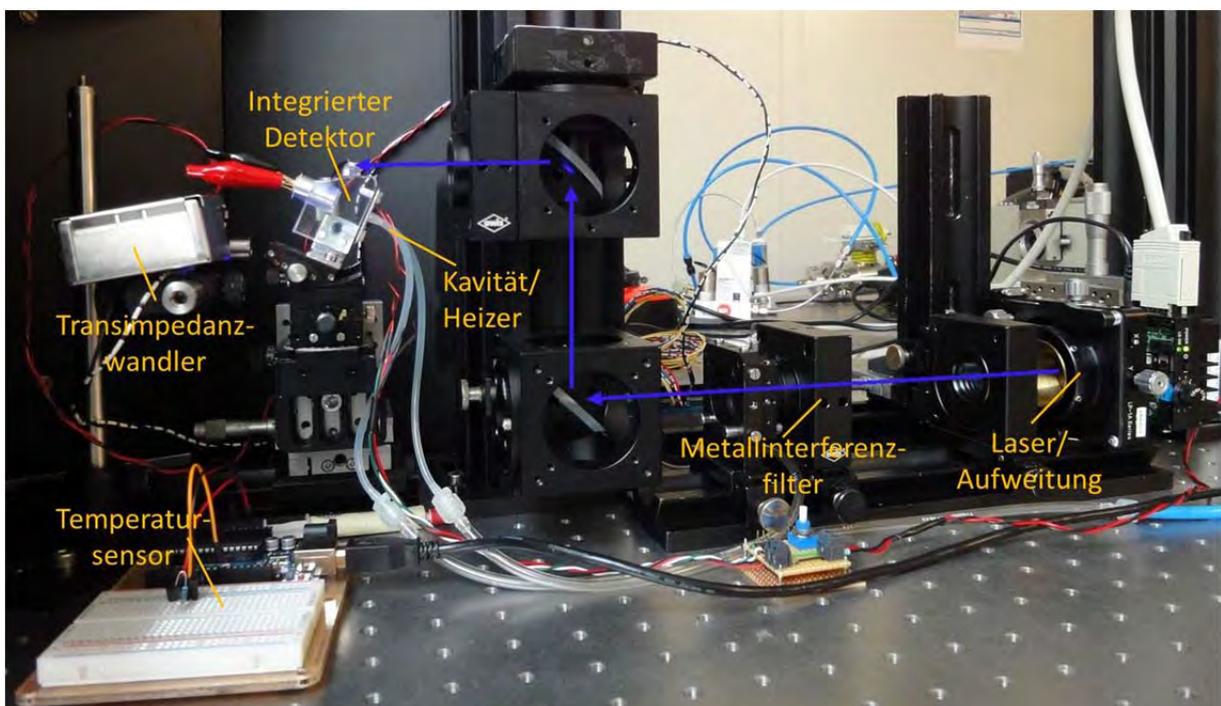


Abb. I3.4-1: Semi-integrierter Gassensor mit externer Laserdiode

Als Strahlquelle wurde eine externe 405 nm Laserdiode (Roithner Lasertechnik SLD3237VF) zusammen mit einem Laserdiodentreiber (Thorlabs LDC205C) sowie einem aktiven Kühlkörper (Thorlabs LDM9T) verwendet. Der divergente Strahl der Laserdiode wird über eine Linse kollimiert und mittels Metall-Interferenzfilter auf ein Wellenlängenspektrum von 405 ± 10 nm reduziert. Eine Linse fokussiert den kollimierten Strahl an die Facette des PMMA-Systems, an der sich später der Ausgang der geplanten, integrierten Laserdiode befindet. Die Nanodrähte sind über eine luftdichte Kavität mit dem PMMA-System verbunden, sodass eine definierte Gasatmosphäre um die Drähte herum erzeugt werden kann. Die Erfassung des Photolumineszenzsignals (PL-Signal) erfolgt entweder über ein Spektrometer (Ocean Optics Maya 2000) oder über eine Photodiode (Thorlabs FDS100). In beiden Fällen befinden sich vor den Detektoren dielektrische Filter und der chromatische Filter, sodass nur das PL-Signal erfasst wird.

Aus den Messungen mit dem Spektrometer geht das in Abbildung I3.4-2 gezeigte Spektrum des PL-Signals hervor. Für die Messung wurde der Fasereingang des Spektrometers an die Position der Photodiode innerhalb der Detektionsoptik positioniert und eine Stickstoffatmosphäre um die Nanodrähte herum erzeugt. Hierbei konnte durch eine angepasste Auswahl der verwendeten Filter im kurzwelligeren Spektralbereich etwas mehr Leistung als bei vorhergehenden Messungen detektiert werden. Von dieser Änderung abgesehen konnten keine Unterschiede zwischen den Messungen mit dem semi-integrierten Detektor und den direkten Messungen der Nanodrähte festgestellt werden.

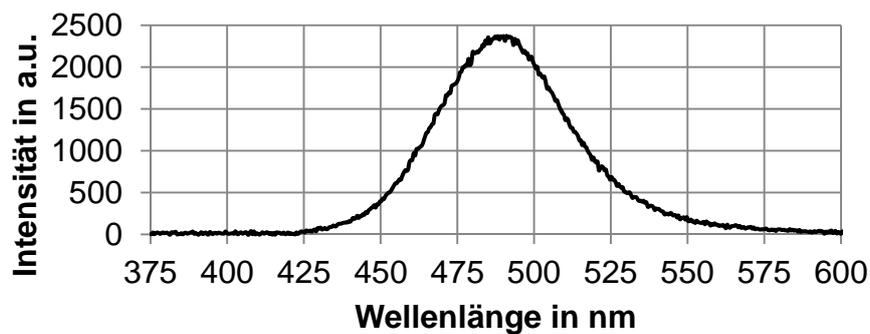


Abb. I3.4-2: Wellenlängenspektrum des PL-Signals im semi-integrierten System.

Daraus folgt einerseits, dass die im PMMA gestreute und reflektierte 405 nm Strahlung an der Position der Photodiode optimal durch den Aufbau und von den optischen Filtern spektral geblockt wird. Andererseits sinkt die detektierbare Leistung des PL-Signals nur unmerklich durch die Verwendung des semi-integrierten Systems.

Für die Detektion mittels Photodiode wurde ein Transimpedanzverstärker (Abb. I3.4-3) angefertigt, dessen Ausgangsspannung mit Hilfe einer Datenerfassungskarte (National Instruments USB-6361) digitalisiert und über eine in LabVIEW programmierte Software ausgewertet wird.

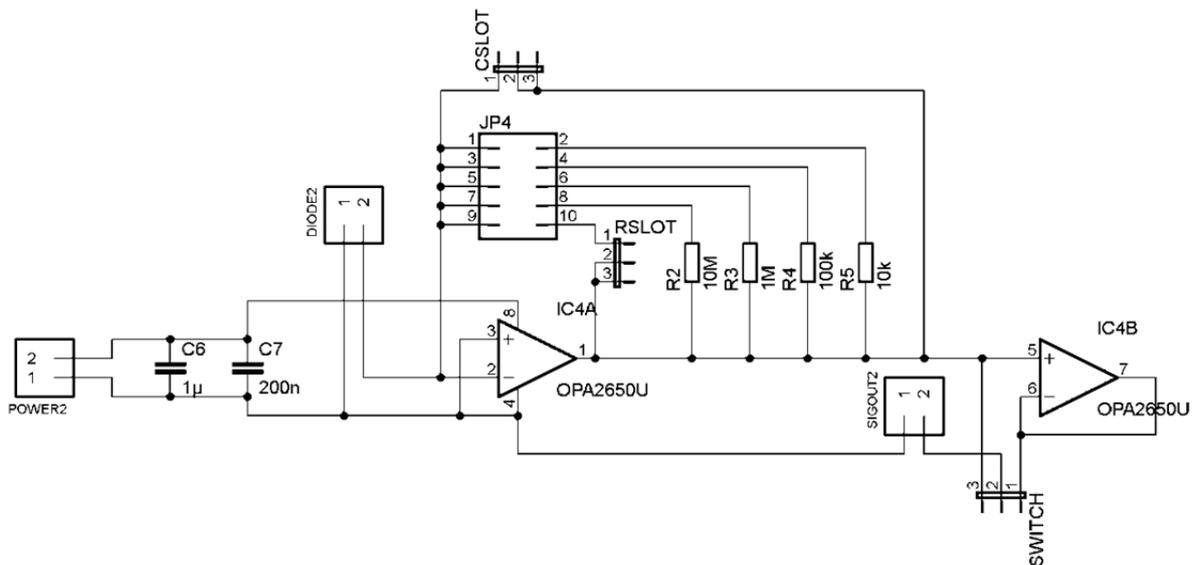


Abb. I3.4-3: Verstärkerschaltung für die Detektion des PL-Signals mittels Photodiode.

Um bei den Messungen die Reaktion auf verschiedene Gasarten von Temperatureinflüssen trennen zu können, wurde der gesamte Messaufbau in ein Reinraumlabor verlagert. Dies gewährleistet einerseits eine konstante Umgebungstemperatur, welche zusätzlich durch ein USB-Thermometer während der Messungen kontrolliert wurde. Andererseits konnte so eine identische Temperatur der Sauerstoff- sowie Stickstoffzufuhr erreicht werden, welche beide von einem Gaspanel entnommen werden. Da die Reaktion auf eine Gasänderung mit der Temperatur der Nanodrähte zunimmt [14], wurde an die Kavität ein Heizelement angebracht, welches die Nanodrähte auf bis zu 60°C aufheizt, siehe hierzu Abb. I3.4-4. Zudem gewährleistet dies ebenfalls eine konstante Temperatur während der Messung.

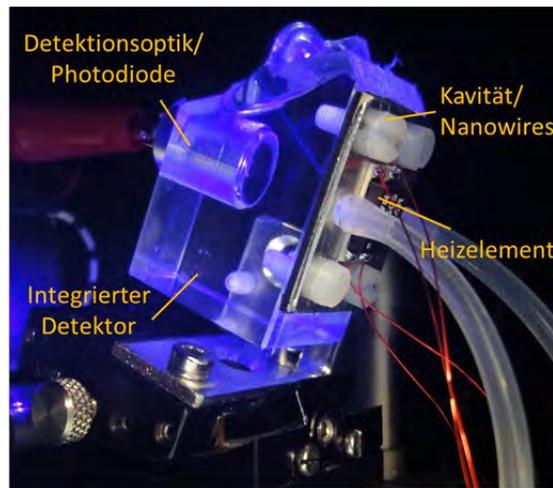


Abb. I3.4-4: Integrierter Detektor mit beheizbarer Kavität.

Für die Messungen mit der Photodiode wurde die Kavität abwechselnd mit reinem Sauerstoff bzw. über einen Ozongenerator mit Ozon (Konzentration > 1 ppm) und mit reinem Stickstoff (Reinheit 5.0) durchströmt. Der Fluss wurde hierbei unter 100 sccm gehalten, sodass der unterschiedliche Wärmetransport beider Gase vernachlässigt werden konnte.

Abb. I3.4-5 zeigt eine Beispielmessung für den Wechsel zwischen reinem Sauerstoff, vermischt mit Ozon, und reinem Stickstoff.

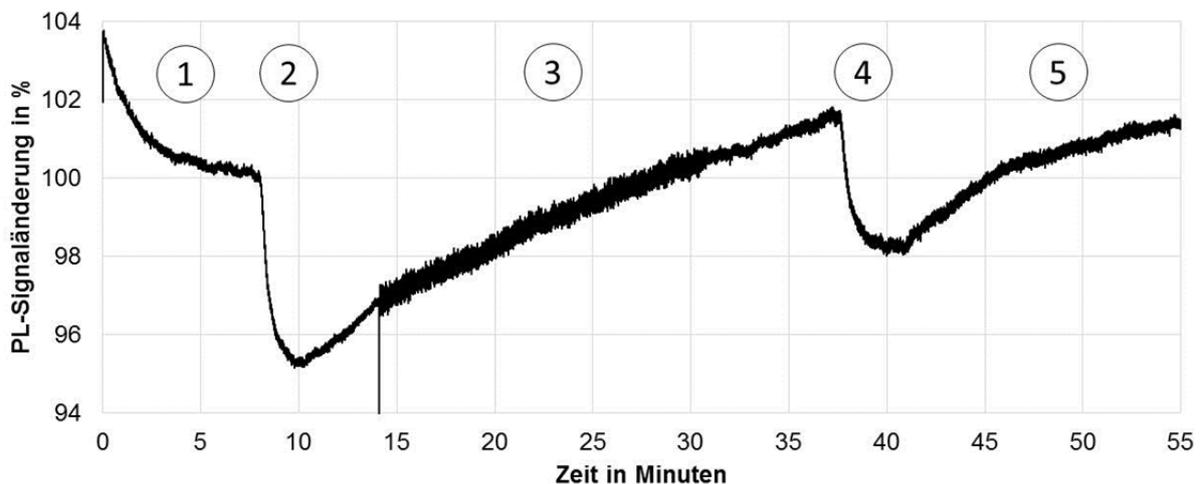


Abb. I3.4-5: PL-Signaländerung des semi-integrierten Systems beim Wechsel zwischen Stickstoff und Sauerstoff, vermischt mit Ozon.

Abschnitt 1 zeigt einen Teil der Heizphase der Nanodrähte in einer Stickstoffatmosphäre. Insgesamt sank durch die Heizung das PL-Signal um ca. 22%, was nach Aussage der JLU in etwa einem Temperaturanstieg der Nanodrähte von 21°C auf 50° entspricht. Anschließend wurde in Abschnitt 2 das Gemisch aus Sauerstoff und Ozon in die Kavität geleitet. Daraus ergab sich eine schnelle und deutliche Verminderung des PL-Signals um 4,5%. Aufgrund der Höhe dieser Änderung kann ein Temperatureffekt ausgeschlossen werden. Zudem entspricht die Richtung der Signaländerung der in [1] beobachteten für die Reaktion auf Sauerstoff. Im Scheitel von Abschnitt 2 wurde statt dem Gasgemisch reiner Stickstoff durch den Ozongenerator geleitet. Dies gewährleistet, dass aufgrund der Eigenerwärmung des Generators beide Gasarten die gleiche Temperatur besitzen, was messtechnisch auch bestätigt werden konnte. Aus Abschnitt 3 geht hervor, dass die Reaktion auf den Stickstoff dabei deutlich langsamer ausfällt. Eine Vergleichsmessung ergab zudem, dass die langsame Reaktion nur teilweise durch das restliche, noch im Ozongenerator vorhandene Ozon hervorgerufen wurde. Bei genauerer Betrachtung lässt sich die unterschiedliche Reaktion auf Sauerstoff und Stickstoff auch in [1] beobachten, sodass die hier gezeigten Messergebnisse des semi-integrierten Systems mit den zuvor getätigten Messungen im Einklang sind.

In den Abschnitten 4 und 5 wurde die Messabfolge wiederholt, wobei eine leicht verringerte Reaktion auf das Sauerstoff/Ozongemisch detektiert wurde. Bei weiteren Wiederholungen der Messung nahm diese Verringerung zu, was auf eine Degradation der Nanodrähte aufgrund der warmen Ozonatmosphäre hindeutet.

Zusammenfassend ergaben die Messungen mit dem semi-integrierten System eine gute Übereinstimmung zu den direkten Messungen mit den Nanodrähten aus [1], sodass eine korrekte Funktionsweise der Drähte auch im integrierten Detektor gewährleistet ist.

II.1.9. Im Bericht zitierte Quellen

- [1] Teubert, J., Becker, P., Furtmayr, F., Eickhoff, M. "GaN nanodiscs embedded in nanowires as optochemical transducers", *Nanotechnology* 22, 275505 (2011)
- [2] Kleindienst, R., Kampmann, R., Stoebenau, S., Sinzinger, S. "Hybrid optical (freeform) components - functionalization of nonplanar optical surfaces by direct picosecond laser ablation", *Appl. Opt.* 50, 3221-3228 (2011)
- [3] Kleindienst, R., Kampmann, R., Stoebenau, S., Sinzinger, S. "Synthetic design and integrated fabrication of multifunctional hybrid beam shapers", *Proc. SPIE 8130, 81300E*; doi:10.1117/12.893768 (2011)
- [4] Stoebenau, S., Kleindienst, R., Hofmann, M., Sinzinger, S. "Computer-aided manufacturing for freeform optical elements by ultraprecision micromilling", *Proc. SPIE 8126, 812614*; doi:10.1117/12.893750 (2011)
- [5] Kleindienst, R., Cimalla, V., Eickhoff, M., Grewe, A., Holc, K., Schätzle, J., Schwarz, U., Teubert, J., Sinzinger, S. "Micro-optical system as integration platform for III-N nanowire based opto-chemical detectors", *Proc. SPIE, Photonics West 2013, San Francisco* (2013)
- [6] Evonik Industries AG, Kirschenallee, 64293 Darmstadt, Germany
- [7] Bär, M., Kleindienst, R., Sinzinger, S. "Replikation diffraktiver optischer Elemente aus synthetischem Quarzglas nach dem Sol-Gel-Verfahren", *Photonik* 6/2011 (2011)
- [8] Bär, M., Kleindienst, R., Sinzinger, S. "Replicating diffractive optical elements in synthetic quartz glass using the sol-gel-process", *Photonik international (Best of 2012)* (2012)
- [9] Kampmann, R., Kleindienst, R., Rose, F., Hartung, N., Naglatzki, M., Sinzinger, S. „Laser Power Stabilization for Improved Ablation Depth Uniformity“ *Proceedings DGaO, 113. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik* (2012)
- [10] Stoebenau, S., Kleindienst, R., Kampmann, R., Sinzinger, S. "Enhanced Optical Functionalities by Integrated Ultraprecision Machining Techniques", *Proc. of the 11th international conferences of the euspen (Ultra Precision Manufacturing & Assembly Processes)* (2011)
- [11] Kleindienst, R., Kampmann, R., Stoebenau, S., Sinzinger, S. "Three-dimensional laser ablation for functionalization of non-planar optical surfaces", *Congress proceedings / International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 32 (Miami, Florida): 2013.10.06-10. - Orlando, Fla. : LIA* (2013), S. 919-925 (2013)
- [12] Kleindienst, R., Cimalla, V., Eickhoff, M., Grewe, A., Holc, K., Schätzle, J., Schörmann, J., Schwarz, U., Teubert, J., Sinzinger, S. „Miniaturisierte optische Integrationsplattform für III-N-basierte opto-chemische Detektoren“, *Von Bauelementen zu Systemen / Mikrosystemtechnik Kongress 5 (Aachen): 2013.10.14-16. - Berlin [u.a.]: VDE-Verl. (2013), S. 464-467* (2013)
- [13] Kleindienst, R., Kampmann, R., Stoebenau, S., Sinzinger, S. „Integriertes Design und Fertigung optischer Bauelemente“, *Optik&Photonik 2/2013, WILEY-VCHVerlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim* (2013)
- [14] Paul, S., Helwig, A., Müller, G., Furtmayr, F., Teubert, J., Eickhoff, M. "Opto-chemical sensor system for the detection of H₂ and hydrocarbons based on InGaN/GaN nanowires", *Sensors and Actuators B* 173, 120– 126, (2012)

II.2. Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit für KMU

Als zentrales Ergebnis des Verbundprojektes SINOMICS steht die Demonstration eines kompakt mikrotechnisch integrierten Gassensors auf Basis von Nanodraht Heterostrukturen. Im Rahmen einer Verwertung dieses Ergebnisses wurden bereits Kontakte zu industriellen Interessenten geknüpft, die sich bisher jedoch noch nicht hinreichend konkretisiert haben. Hier wird weiter das Ziel verfolgt Folgeprojekte mit starker Beteiligung von Anwendern zu initiieren.

Konkreter stellt sich die Verwertung von Teilergebnissen aus dem Projekt dar. Insbesondere die technologischen Entwicklungen im Hinblick auf das Design und die Realisierung von Freiform und diffraktiven Optiken sind für zahlreiche regionale und überregionale KMUs von großem Interesse und finden dort mit Unterstützung des Fachgebietes Technische Optik teilweise bereits Einzug. Besonders zu nennen sind hier die erzielten Ergebnisse zu Design und Realisierung von diffraktiven Optiken für die Strahlformung und -führung sowie deren Kombination mit freiformoptischen Bauelementen. Unmittelbar in Kontakt mit KMU zur Verwertung stehen wir ferner im Zusammenhang mit der Abformung optischer Module mit dem sog. SolGel Prozess, die im Rahmen der Untersuchungen in SINOMICS intensiv vorangebracht wurde.

Mit Hilfe der Ausgründung "Ilmenau Optics Solutions GmbH" wird seit 2011 versucht, die Marktdurchdringung der erzielten Ergebnisse weiter zu verbessern.

II.3. Veröffentlichung der Ergebnisse

Bereits im Laufe der Arbeiten in dem Projekt wurden die Ergebnisse in zahlreichen internationalen Wissenschafts- und Anwendungsjournalen sowie auf internationalen Tagungen veröffentlicht. Die große Resonanz auf diese Veröffentlichungen ist nicht nur in durch zwei "best student paper awards" sondern auch durch zahlreiche Kontakte und Anfragen dokumentiert. Derzeit sind noch weitere Veröffentlichungen zu den zuletzt erzielten Ergebnissen in Vorbereitung.

II.4. Vollständige Liste der eigenen Veröffentlichungen

2011

Bär, M., Kleindienst, R., Sinzinger, S. "Replikation diffraktiver optischer Elemente aus synthetischem Quarzglas nach dem Sol-Gel-Verfahren", Photonik 6/2011 (2011)

2012

Bär, M., Kleindienst, R., Sinzinger, S. "Replicating diffractive optical elements in synthetic quartz glass using the sol-gel-process", Photonik international (Best of 2012) (2012)

Kampmann, R., Kleindienst, R., Rose, F., Hartung, N., Naglatzki, M., Sinzinger, S. „Laser Power Stabilization for Improved Ablation Depth Uniformity“ Proceedings DGaO, 113. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (2012)

Kleindienst, R., Cimalla, V., Eickhoff, M., Grewe, A., Schwarz, U. T., Teubert, J., Sinzinger, S. „Micro-Nano Integration of a III-N Nanowire Based Opto-chemical Detector“ Proceedings EOS Annual Meeting 2012, Optical Systems for the Energy & Production Industries (2012) **(best student paper award)**

2013

Hillenbrand, M., Lorenz, L., Kleindienst, R., Grewe, A., Sinzinger, S. „Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing“, *Optics Letters*, Vol. 38, No. 22 (2013)

Kleindienst, R., Kampmann, R., Stoebenau, S., Sinzinger, S. „Integriertes Design und Fertigung

optischer Bauelemente- Herstellung eines hybriden diffraktiv-reflektiven optischen Strahlformers“ *Optik&Photonik 2/2013*, WILEY-VCHVerlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2013)

Kleindienst, R., Cimalla, V., Eickhoff, M., Grewe, A., Holc, K., Schätzle, J., Schwarz, U., Teubert, J., Sinzinger, S. "Micro-optical system as integration platform for III-N nanowire based opto-chemical detectors", *Proc. SPIE, Photonics West 2013, San Francisco (2013)* **(best student paper award)**

Kleindienst, R., Sinzinger, S. (2013) "Laser Beam Shaping - From Source to Application", "International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)", Miami, FL, USA, 06.-10.10.2013, Miami **(short course)**

Kleindienst, R., Kampmann, R., Stoebenau, S., Sinzinger, S. (2013): „Three-Dimensional Laser Ablation for Functionalization of Non-Planar Optical Surfaces“, "International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)", Miami, FL, USA, 06.-10.10.2013.

Kleindienst, R., Cimalla, V., Eickhoff, M., Grewe, A., Holc, K., Schätzle, J., Schörmann, J., Schwarz, U., Teubert, J., Sinzinger, S. „Miniaturisierte optische Integrationsplattform für III-N basierte opto-chemische Detektoren – Miniaturized Optical Integration Platform for III-N based opto-chemical Detectors“, *Proceedings Mikrosystemtechnik Kongress 2013 (14. – 16. Oktober 2013 in Aachen)* (2013)

Sinzinger, S., Hillenbrand, M., Abd-El Maksoud, R. H. "Freeform Surfaces in Optical (Micro-)systems: From Paraboloidal Theory to Applications" Tucson (2013) **(eingeladener Vortrag)**

2014

Sinzinger, S. "Microstructured and freeform elements for imaging systems", *Conference on Optics-photonics, Design & Fabrication 2014*, Itabashi City, Tokyo, Japan, 12.-14.02.2014. **(eingeladener Vortrag)**

Sinzinger, S. "Optical Freeforms in Integrated Optical Microsystems", *Proceedings of International Conference on Optics & Optoelectronics (ICOL)*, Dehradun, Uttarakhand, Indien, 5.-8. March 2014. **(eingeladener Vortrag)**

Abbildungsverzeichnis

Abb. K2-1: Integrationsstufen 3 – 6 mit optimierter Detektionsoptik	6
Abb. K2-2: Integriertes PL-Signal ohne (a) und mit (b) Linse zur Konzentration der PL-Strahlung.....	7
Abb. K2.1-1: Fernfeldintensitätsverteilung des Lichtquellenmodells der Laserdiode	8
Abb. K2.1-2: Maximum des Spektrometersignals in Abhängigkeit des Abstandes vom Fokus der Anregungsstrahlung	9
Abb. K2.1-3: Spektral aufgelöste PL-Signale nach erhöhter Anregungsleistung (80/100/130/150/170 mW).....	9
Abb. K2.1-4: Designansatz (Anregungsstrahlengang) für ein transmissionsoptimiertes optisches System	10
Abb. K2.2-1: kompakteste (a) und effizienteste (b) Anordnung der refraktiven Kollektoroptik bestehend aus nur einer Linse mit simulierten Intensitätsverteilungen auf der Photodiode	11
Abb. K2.2-2: refraktiven Kollektoroptik mit simulierten Intensitätsverteilungen auf der Photodiode	12
Abb. K2.3-1: zentraler Ausschnitt aus der Oberfläche des off-axis Strahlformungselementes (leicht verkippt): (a) aus dem Polynom berechnete Designdaten, (b) profilometrische Messung, (c) Differenz zwischen (a) und (b). [4].....	13
Abb. K2.3-2: profilometrische Messung des via Volumenkörper gefrästen off-axis Strahlformungselementes (a); Detailaufnahme aus dem Zentrum (b); hochpass-gefilterte Detailaufnahme abzüglich eines x und y Zylinders [3]	14
Abb. K2.3-3: Transmission des hochreinen Plexiglasses GS Farblos 2458 [6]	15
Abb. K2.3-4: Beugungsstruktur im Design (a) sowie profilometrische Messungen der entsprechenden Struktur im Master (b, bei 50x Vergrößerung) und im abgeformten SiO ₂ -Diffusor (c, bei 100x Vergrößerung, negativ, gespiegelt) [7].....	15
Abb. K2.3-5: Intensitätsverteilungen in der Beugungsebene des DOE: a) angestrebte Zielintensitätsverteilung, b) simulierte (Speckle-)Intensitätsverteilung bei vollständig kohärenter Beleuchtung, c) gemessene, durch das DOE erzeugte Intensitätsverteilung bei kohärenter Beleuchtung und d) bei „nachgeahmter“ partiell kohärenter Beleuchtung durch inkohärente Überlagerung von 36 Messungen bei kohärenter Beleuchtung an unterschiedlichen Stellen [8]	16
Abb. K2.3-6: Im Fernfeld erzeugte Intensitätsverteilungen a) Tophat-Diffuser, b) 1 auf 8 Strahlteiler	16
Abb. K2.3-7: x- und y-Profile der Abformwerkzeuge (schwarz), x- und y-Profile der Asphären (skaliert mit 2) und Abweichung der Profile (blau) bei Abformung 1 ((a)+(b)) und Abformung 2 ((c)+(d)).....	17

Abb. K2.3-8: x- und y-Profile der Abformwerkzeuge (schwarz), x- und y-Profile der Asphären (skaliert mit optimierten Faktoren) und Abweichung der Profile (blau) bei Abformung 1 ((a)+(b)) und Abformung 2 ((c)+(d)).....	18
Abb. K2.3-9: Streuung eines Laserstrahls ($\lambda = 532 \text{ nm}$) in unterschiedlich prozessierten SiO_2 -Substraten	19
Abb. 2.9-10: Aufsummierte Dunkelfeldaufnahmen; aufgenommen an unterschiedlich prozessierten SiO_2 -Substraten	19
Abb. K2.3-11: Logarithmische Darstellung der winkelaufgelösten (a) und über die Profilschnitte gemittelten (b) Vorwärtstreulichtmessung an UV-optimierten PMMA	20
Abb. K2.3-12: Logarithmische Darstellung der winkelaufgelösten (a) und über die Profilschnitte gemittelten (b) Vorwärtstreulichtmessung an synthetischen Quarzglas.....	20
Abb. K2.3-13: schematische Darstellung des Leistungsstabilisierungssystems (a), Foto und schematische Darstellung des Demonstrationsaufbaus (b).....	21
Abb. K2.3-14: Bedienoberfläche	21
Abb. K2.3.-15: Beispiel für die Stabilisierung einer stark schwankenden Leistung; Leistungsmessung mit (grün) und ohne (blau) Leistungsstabilisierung	22
Abb. K2.3-16: Beispiel für die Stabilisierung einer nur gering schwankenden Leistung; Leistungsmessung mit (rot) und ohne (blau) Leistungsstabilisierung.....	23
Abb. I1.1-1: Volumenkörper der optischen Integrationsplattform.....	24
Abb. I1.1-2: berechnetes Oberflächenprofil des hybriden, freiformoptischen Strahlformers [3].....	25
Abb. I1.1-3: Raytracing-Simulationsergebnisse für die 0. (b) sowie ± 1 . Beugungsordnung (a), (c) [3].	26
Abb. I1.1-4: wellenoptische Simulation der 0. Beugungsordnung [3]	26
Abb. I1.1-5: rigoros simulierte Beugungseffizienz der 0. Beugungsordnung in Abhängigkeit der Strukturtiefe	27
Abb. I1.2-1: Fotos des Strahlformungselementes in Kupfer: schematische Darstellung der rasterförmigen Frässtrategie (a) und Verdeutlichung der freiform-optischen Oberfläche (b) [3][3]...	27
Abb. I1.2-2: Sequentielle Fertigung (Schlichtvorgang) des optischen Mikrosystems; a) Anregungsquellenplattform, b) elliptischer Spiegel, c) Einkoppelfläche und d) Auskoppelfläche / Position der Nanodrähte	29
Abb. I1.2-3: Optische Integrationsplattform (Integrationsstufe 3) in UV optimierten PMMA.....	30
Abb. I1.2-4: interferometrisch vermessenes Profil des zentralen Bereiches einer 8-stufigen, diffraktiven Linse	31

Abb. I1.3-1: Foto der hybriden freiform-optischen Komponente in Kupfer sowie profilometrische Detailaufnahme der diffraktiven Strukturen.....	31
Abb. I1.3-2: Profilschnitte mittels direkter ps-Laserablation erzeugter Gitter; ohne (oben) und mit (unten) Leistungsstabilisierung	32
Abb. I1.3-3 zeigt ein 3-dimensionales Profil des mit Leistungsstabilisierung generierten Gitters.	32
Abb. 1.3-3: 3-dimensionales Profil eines mit Leistungsstabilisierung erzeugten Gitters [9]	32
Abb. I1.3-4: zentraler Ausschnitt des gemessenen Oberflächenprofils des elliptischen Spiegels a); Differenz zw. Designdaten und gemessenen Oberflächenprofil des elliptischen Spiegels b) mit Vergrößerung zur Verdeutlichung der Frässpuren [12]	33
Abb. I1.3-5: schematische Darstellung der Frässpuren zur Fertigung des elliptischen Spiegels [12] ...	33
Abb. I1.3-6: Oberflächenprofil und Profilschnitt eines Replikates der Einkoppelfläche (a), schematische Darstellung der Dezentrierung des Fräasers (b) [12]	34
Abb. I3.2-1: schematische Darstellung des Experiments zur Untersuchung der Abbildungsqualität [12]	34
Abb. I3.2-2: mit der optischen Integrationsplattform abgebildete horizontal und vertikal ausgerichteter Gitter [12].....	35
Abb. I3.2-3: schematische Darstellung und Foto des Aufbaus zur experimentellen Bestimmung der Fokussiereigenschaften der Integrationsplattform (a); Foto der Integrationsplattform während der optischen Charakterisierung (b) [12].....	35
Abb. I3.2-4: durch die Integrationsplattform erzeugter Fokus [12].....	36
Abb. I3.2-5: von der Kollektoroptik erzeugte Intensitätsverteilung am Ort der PD (gemessener Durchmesser $w_{FWHM} = 38 \mu\text{m}$, simulierter Durchmesser $w_{FWHM} = 26 \mu\text{m}$)	37
Abb. I3.2-6: Raytracing-Simulationsergebnisse (oben) und gemessene Intensitätsverteilungen (unten) für die 0. bzw. ± 1 . Beugungsordnung [13]	38
Abb. I3.2-7: Vergleich der gemessenen (rot) sowie bei einer Tiefe von 284 nm (schwarz) bzw. 290 nm (grau) rigoros simulierten Beugungseffizienzen [13]	38
Abb. I3.4-1: Semi-integrierter Gassensor mit externer Laserdiode	39
Abb. I3.4-2: Wellenlängenspektrum des PL-Signals im semi-integrierten System.	40
Abb. I3.4-3: Verstärkerschaltung für die Detektion des PL-Signals mittels Photodiode.....	40
Abb. I3.4-4: Integrierter Detektor mit beheizbarer Kavität.	41
Abb. I3.4-5: PL-Signaländerung des semi-integrierten Systems beim Wechsel zwischen Stickstoff und Sauerstoff, vermischt mit Ozon.....	41

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Skalenübergreifende Integration von Nanodraht- Heterostrukturen mit Optischen Mikrosystemen für Innovative Chemische Sensoren - SINOMICS – Teilprojekt: Freiraumoptische Systemintegration zur Gestaltung des Mikro-Nano-Interfaces für chemische Sensoren auf der Basis von Nanodraht-Heterostrukturen (FOSMNI)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Stefan Sinzinger Dipl. Ing. Roman Kleindienst M.Sc. Matthias Krüger	5. end of project 28.02.2014
	6. publication date 31.08.2014
	7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address) Technische Universität Ilmenau Institut für Mikro- und Nanotechnologien IMN-MacroNano Postfach 100565 98693 Ilmenau	9. originator's report no.
	10. reference no.
	11. no. of pages 48
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 14
	14. no. of tables
	15. no. of figures 52
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract This final report of the collaborative research project „SINOMICS“ includes the most significant results of the investigations on the integration of a chemical gas sensor based on (Al, In) GaN nanowire heterostructures. To this end a microoptical platform for the integration of gas sensitive nanowires with laserdiodes and optoelectrical detectors has been realized and demonstrated. As a result a compact optical microsystem which is capable of detecting a H ₂ or O ₂ induced change in the photoluminescence signal excited in the nanowire heterostructures is demonstrated. We also report on the numerous technological achievements which were necessary in order to achieve this overall result. Thus advancements in the design of hybrid diffractive-refractive optical elements are presented. On the technological side the fabrication of freeform optical elements by ultraprecision micromachining is combined with laser ablation for surface optimization and functionalization.	
19. keywords Optical Microsystems; Micro-Nano Integration; Freeform Optics; Diffractive Optics; Nanowire gas sensing	
20. publisher	21. price