

Projektskizze

Polarisationsempfindlicher Wellenfrontsensor auf Basis von „Nano-Gittern“ zur Charakterisierung thermischer Aberrationen in Hochleistungs-Laseroptiken -

„NANOPOL“

eingereicht im Rahmen der Fördermaßnahme

"Photonik Plus"

des BMBF-Programms "Photonik Forschung Deutschland"

(überarbeitet Feb. 2016)

Projektpartner:

Primes GmbH

.....

Dr. O. Märten, Tel. 06157/9878-113
o.maerten@primes.de
(Koordinator)

SilOptics GmbH & Co KG

M. Zenz, Tel. 09129/9023-57
manuel.zenz@siloptics.de

Laser-Laboratorium Göttingen e.V.

Dr. K. Mann, Tel. 0551/5035-41
kmann@llg-ev.de

AMO GmbH

Dr. A.L.Giesecke, Tel. 0241/8867212
giesecke@amo.de

Saueressig GmbH & Co KG

(assoziiertes Partner)

R. Warmers, Tel. 02564/12-604
renate_warmers@saueressig.de

Förderzeitraum:

01.06.2016 – 31.5.2018



SAUERESSIG®



1. Thema und Zielsetzung des Vorhabens

1.1 Motivation

Eine genaue Kenntnis von Strahlprofil, Wellenfront und Polarisationszustand bildet in vielen Fällen die Grundlage für den erfolgreichen und langzeitstabilen industriellen Einsatz von Laserstrahlung. Von besonderer Relevanz ist die Kontrolle über die Strahlparameter beim Betrieb von Hochleistungslasern z.B. in der Materialbearbeitung. Hier kommt es durch die thermische Belastung der eingesetzten Strahlführungs- und Fokussierungsoptiken vielfach zu einer transienten Verzerrung der Wellenfront der durchtretenden Strahlung. Daraus resultiert eine u.U. erhebliche Abweichung der Strahlparameter von Design- bzw. angepeilten Prozesswerten im Bearbeitungsgebiet (Änderungen der Fokusslage ('Fokus shift'), Strahlprofil-Fluktuationen, Depolarisation). Alle etablierten Messverfahren (Kaustikmessungen nach ISO 11146, Hartmann-Shack- oder interferometrisch arbeitende Wellenfrontsensoren) berücksichtigen bisher allerdings nicht den Polarisationszustand; sie können daher nur Teilaspekte der Messproblematik abdecken, da eine orts aufgelöste Polarisationsbestimmung vier sequentielle Einzelmessungen erfordert und nicht echtzeitfähig ist. Dies ist insbesondere relevant für die zeitaufgelöste Analyse der Spannungs-Doppelbrechung und damit verbundener astigmatischer Wellenfront-Deformationen in thermisch belasteten Optiken. Ein kombiniertes Messverfahren könnte Hemmnisse im Gebrauch von Hochleistungslasern deutlich reduzieren.

1.2 Zielsetzung

In dem geplanten Vorhaben soll auf der Basis innovativer Subwellenlängen-Strukturen ein polarisationssensitiver Wellenfrontsensor entwickelt werden, der eine umfassende quantitative Lichtfeldanalyse und daraus die Bestimmung und Überwachung der o.g. relevanten Strahlparameter in Echtzeit gestattet. Auf diese Weise wird eine vollständige Charakterisierung von Laserstrahlung und damit auch der zeitabhängigen photothermischen Effekte in Laseroptiken ermöglicht. Auf Grundlage dieser Daten soll eine Reduzierung thermisch induzierter Aberrationen erfolgen, und zwar sowohl in laseroptischen Systemen als auch für konkrete Laser-Bearbeitungsprozesse in komplexen Produktionsanlagen des industriellen Projektpartners.

Im Einzelnen werden folgende Teilziele angestrebt:

I. Wellenfrontmessung aus Intensitätsprofilen

- Hochauflösende Erfassung der Wellenfront basierend auf dem Prinzip des Wellenfront-Krümmungssensors
- Entwicklung eines portablen Softwaremoduls zur Bestimmung der Wellenfront aus einer variablen Anzahl von in Propagationsrichtung aufgenommenen Strahlprofilen
- Messung der Wigner-Verteilung zur vollständigen quantitativen Lichtfeldanalyse

II. Subwellenlängen-Strukturen für die polarisationsempfindliche Wellenfrontmessung

- Design und Realisierung eines Nano-Gitters in einem lithographischen Prozess auf Glassubstrat; pixelgenaue Assemblierung auf Kamera-Sensor
- Gleichzeitige orts aufgelöste Messung von Strahlprofil, Wellenfront und Polarisation durch Kombination aus Krümmungssensor und „wire grid“-Polarisatoren
- Umsetzung in ein modulares Sensorkonzept zum Einsatz an Industrielasern (Laserleistungen > 1kW, Wellenlängen 1064nm, 532nm, cw bis UKP-Laser)

III. Anwendung: Hochleistungs-Laseroptiken

- Realisierung und Test geeigneter phasen-, amplituden- und polarisations-erhaltender Abschwächvorrichtungen für die kamerabasierte Strahldiagnostik (Laserleistungen bis 1kW) unter Einsatz des neuen Sensors
- Entwicklung eines thermisch korrigierten Fokussier-Objektivs; Praxistest des Objektivs an Lasern des assoziierten Industrie-Partners Saueressig hinsichtlich Fokus-Shift, höherer Aberrationen und Spannungs-Doppelbrechung

1.3 Lösungsansatz

Im Hinblick auf die Hauptzielsetzung des Vorhabens, also die umfassende und quantitative Lichtfeldanalyse unter Einbeziehung des Polarisationszustandes, werden folgende Lösungsansätze vorgeschlagen:

Wellenfront-Krümmungssensor

Für die hochaufgelöste Echtzeit-Erfassung von Strahlprofil und Wellenfront soll zunächst ein auf dem sogenannten „Wellenfront-Krümmungssensor“ beruhendes Messprinzip [1, Abschlussbericht ZIM-Projekt WKLAS] weiterentwickelt und anschließend um die Bestimmung des Polarisationszustandes erweitert werden.

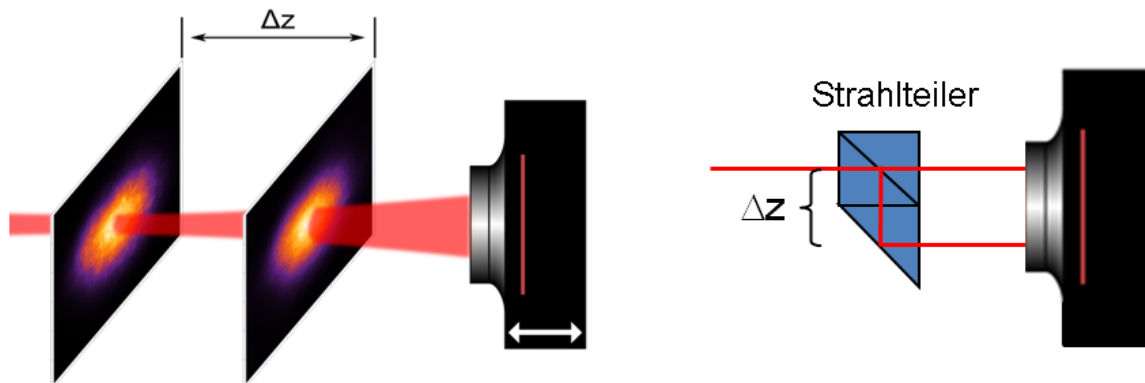


Abb.1: Zum Prinzip des Wellenfront-Krümmungssensors: Aus zwei in benachbarten Ebenen aufgenommenen Intensitätsprofilen lässt sich mit Hilfe der Intensitäts-Transport-Gleichung die Wellenfront des Strahls ermitteln. Dazu kann der Detektor entweder in Strahlrichtung verschoben (links) oder ein Strahlteiler eingesetzt werden (Echtzeitmessung, rechts).

Abb. 1 zeigt die Funktionsweise des Wellenfront-Krümmungssensors für die zwei im Projekt favorisierten Varianten: durch Verschiebung des Detektors oder aber mit Hilfe eines Strahlteilers wird ein einfallender Laserstrahl an zwei verschiedenen Positionen z_1 und z_2 in Propagationsrichtung mit einer Kamera detektiert. Aus dem Energieerhaltungssatz ergibt sich für die Wellenfront $w(x,y)$ eine Differentialgleichung vom Poisson-Typ:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\nabla_{\perp} I \cdot \nabla_{\perp} w - I \Delta_{\perp} w \quad (1).$$

In dieser „Intensitäts-Transport“-Gleichung sind die Intensitätsverteilung $I(x,y)$ bzw. ihre Ortsableitungen aus den beiden gemessenen Profilen numerisch approximierbar, so dass daraus die Wellenfront $w(x,y)$ mit hoher Ortsauflösung bestimmt werden kann (vgl. Kap. 2).

Der Wellenfront-Krümmungssensor bietet gegenüber herkömmlichen nach dem Hartmann-Shack-Verfahren (vgl. Kap. 2.1) arbeitenden Sensoren die folgenden Vorteile:

- deutlich erhöhte Ortsauflösung (limitiert durch Kamera-Pixel)
- daraus resultierend: Vermessung kleinerer Strahlprofile möglich (Laser-Fokus)
- selbstreferenzierendes Verfahren.

Bestimmung der Wignerverteilung

Alternativ zum Krümmungssensor soll die Wellenfront auch aus einer Messung der Wignerverteilung bestimmt werden. Die Wignerverteilung ist eine Fourier-Transformierte der vier-dimensionalen Kohärenzfunktion und enthält wie letztere (abgesehen vom Polarisationszustand) die vollständige Strahlinformation [2]. Im Gegensatz zur Kohärenzfunktion, die die Auswertung einiger tausend Young'scher Interferogramme erfordert, lässt sich die Wignerverteilung über eine tomographische Analyse aus einem Satz

von Strahlprofilen bestimmen, die, wie bei der Kaustik-Messung nach ISO 11146 [3], im Bereich der Strahltaile entlang der Propagationsrichtung aufgenommen werden [4]. Je nach Komplexität des Strahls genügen einige zehn bis einige hundert Profile für eine vollständige vierdimensionale Rekonstruktion. Die Methode ist daher um Größenordnungen schneller als die direkte Messung der Kohärenzfunktion mittels Young'schem Experiment.

Im Projekt vorgesehen ist eine Anbindung der Wigner-Auswerte-Software an das Kaustik-Messsystem der Fa. Primes zur Bestimmung von M^2 mit dem Ziel, aus der Kaustik zusätzlich auch die Wellenfront und die räumlichen Kohärenzeigenschaften des untersuchten Strahls auszuwerten. Allerdings lassen sich auf diese Weise keine Einzelpulsmessungen durchführen, wie sie z.B. bei fluktuierenden Quellen oder hinter thermisch instabilen Strahlführungsoptiken erforderlich wären.

Polarisationssensitiver Wellenfrontsensor

Zur Realisierung einer Echtzeitmessung der relevanten Strahlkenngrößen soll der oben beschriebene Wellenfront-Krümmungssensors um die orts aufgelöste Bestimmung des Polarisationszustandes erweitert werden. Dazu ist als polarisierendes Element ein Array von Sub-Wellenlängen-Gitterstrukturen aus Aluminium auf einem Quarzglassubstrat vorgesehen, das von der Fa. AMO auf lithographischem Wege hergestellt werden soll (vgl. Kap. 2.1). Die Elementarzelle dieses Nanogitter-Arrays besteht aus 4 Gittern mit unterschiedlicher Orientierung, die genau 4 Pixel des verwendeten CCD- oder CMOS-Detektors abdecken (s. Abb. 2). Sensor-Chip und Nanogitter-Array werden in einem Assemblierungsschritt pixelgenau übereinandergelegt und fest miteinander verbunden.

Mit dem neuen Sensor kann die Wellenfrontrekonstruktion wahlweise für jede Polarisationsrichtung separat oder unter Mittelung über die 4 Teilgitter erfolgen. Zudem besteht die Möglichkeit, den Polarisationszustand lokal über die Bestimmung der vier Stokes-Parameter [5] zu charakterisieren.

Aus der simultanen Messung von Intensität, Polarisation und Wellenfront ergeben sich darüber hinaus eine Reihe von Anwendungen des Sensors, die ansonsten nicht oder nur unter Verwendung mehrerer Messgeräte möglich sind:

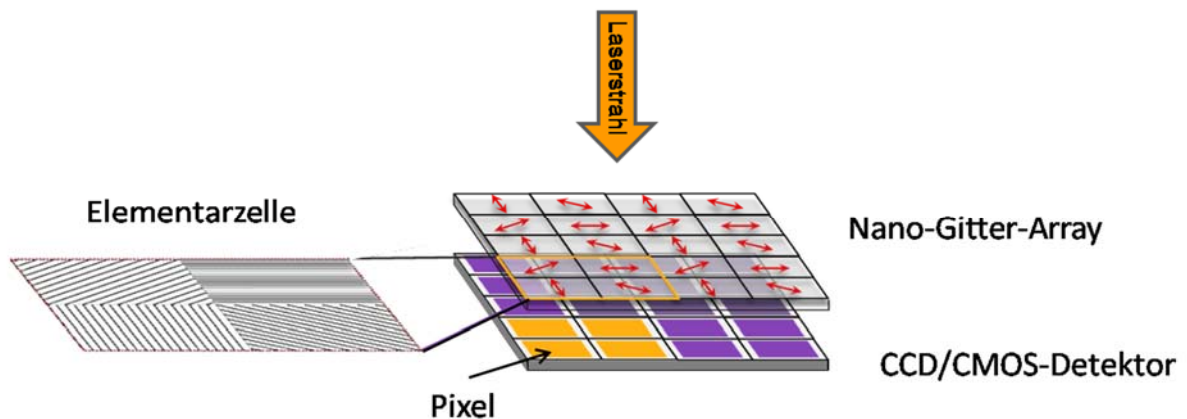


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau des polarisationssensitiven Wellenfrontsensors zur quantitativen Lichtfeldanalyse

- Bestimmung abgeleiteter Größen (z.B. Polarisationsmatrix oder -Ellipse)
- Umfassende Analyse der Spannungsdoppelbrechung und damit interner Spannungen sowie deren Auswirkungen auf Aberrationen in optischen Materialien
- Strahlpropagation in bzw. Reflexion an polarisierenden optischen Elementen
- Propagation inhomogen polarisierter Strahlen (z.B. radiale oder tangentielle Polarisation); Anwendungen: Materialbearbeitung, STED-Mikroskopie, optische Pinzette.

Auf Basis des neuen Sensors soll im Projekt ein modulares Messsystem zur umfassenden Charakterisierung von Laserstrahlung realisiert und anschließend von der Fa. Primes vermarktet werden.

Herstellung von Nanogitter-Strukturen

Wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung des beschriebenen Sensors ist die präzise Strukturierung der polarisierenden Subwellenlängen-Gitter. Zur Erzielung eines hohen Extinktionsverhältnisses bei der Polarisationsmessung sowie für den Einsatz bei möglichst kurzen Wellenlängen sind ein hohes Aspektverhältnis sowie eine geringe Periode der einzelnen gepixelten Polarisatoren erforderlich. Hierfür müssen die vorhandenen lithographischen Strukturierungs-Verfahren (Fa. AMO) erweitert werden, wobei die Qualität der Strukturen und die optimierte Auslegung der Gitter im Vordergrund stehen. Es sollen zwei unterschiedliche Lithographie-Methoden zum Einsatz kommen:

Da aufgrund der Array-Anordnung mit wechselnden Polarisationsrichtungen das Standardverfahren der Laser-Interferenz-Lithographie nicht eingesetzt werden kann (s. Kap. 2.1), sollen die gepixelten Nanogitter zunächst mit einem maskenlosen Verfahren erzeugt werden. AMO greift hierbei auf seine Elektronenstrahl-Lithographie (EBL) zurück, um die Subwellenlängenstrukturen auf einer Al-Schicht zu definieren und danach mit Reaktivem Ionenätzen (RIE) in das transparente Substrat zu übertragen. Die EBL wird während des Projektes zur Erzeugung der Funktionsmuster verwendet.

Nach Erstellung dieser Muster sollen die optimal ausgelegten und getesteten Strukturen mit einem zweiten Lithographie-Verfahren hergestellt werden, das auch das Potential zur Umsetzung in größere Stückzahlen und Flächen hat: Die von AMO verwendete Nanoimprint-Methode SCIL (substrate conformal imprint lithography) in Kombination mit einem hybriden Stempel ermöglicht die Herstellung auf großen Flächen mit sehr geringen Defekten bei gleichzeitig großem Durchsatz. Hierbei soll ein neues Imprint-Lackmaterial zum Einsatz kommen, das eine Entfernung der Lackschicht nach der Strukturübertragung ermöglicht ohne dabei die Al-Schicht aufzurauen oder zu beschädigen. Durch Entwicklung eines Step-Repeat-Verfahrens können zur Erhöhung der Ausbeute je Wafer auch großflächigere Stempel hergestellt werden. Insbesondere die Strukturgröße wie auch die pixelgenaue Anordnung der einzelnen Mikropolarisatoren stellt hierbei besondere Anforderungen an den Herstellungsprozess und erfordert entsprechenden Forschungsaufwand.

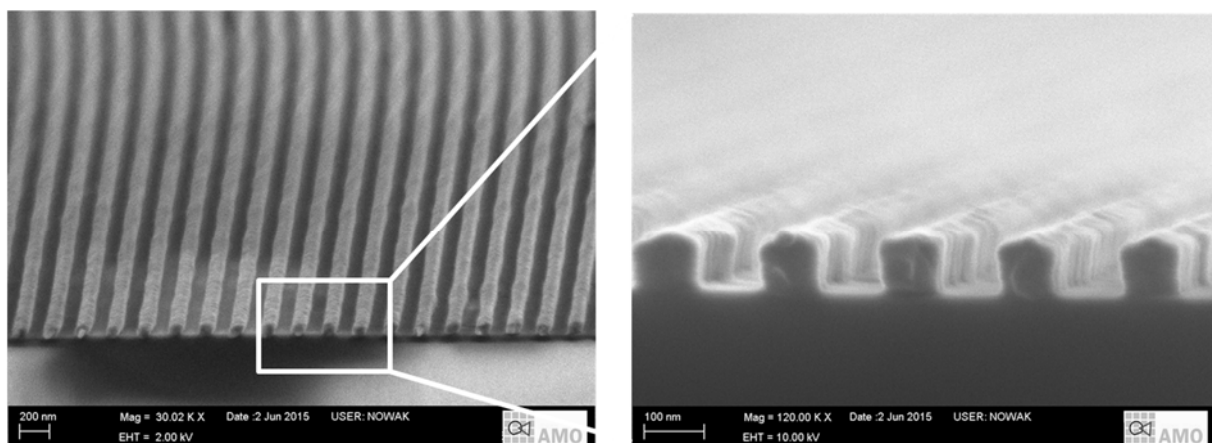


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von ersten mit Nanoimprint hergestellten Al-Gitterstrukturen der Fa. AMO (Periode 200 nm, Schichtdicke 100 nm); rechts: seitliche Ausschnittsvergrößerung.

Frau Giesecke: Haben Sie hierfür ein Zitat? Evtl [27]? → als Ref.[6] hierher!

In Abb. 3 ist eine bei AMO mit dem Nanoimprintverfahren hergestellte Gitterstruktur auf Basis von Aluminium zu sehen. Die Periode dieser großflächigen Gitterstruktur betrug hier 200 nm. Die Minimierung der Strukturgröße bei gleichzeitiger Reduzierung der

Oberflächenrauigkeit für ein möglichst hohes Extinktionsverhältnis im sichtbaren Spektralbereich stellt die Hauptentwicklungsaufgabe der AMO in dem Projekt dar. Aufgrund der gepixelten Anordnung der Nanogitter muss der Abformungsprozess des Stempels entscheidend weiterentwickelt werden.

Anwendungen

Nach Fertigstellung soll der neue Sensor zur Untersuchung und Reduzierung von z.T. zeitabhängigen thermischen Effekten in Hochleistungslaseroptiken eingesetzt werden. Zum einen sind Tests zur Verbesserung von Abschwächvorrichtungen für die kamerabasierte Strahldiagnostik geplant. Ziel ist hier eine sowohl phasen- und amplituden- als auch polarisations-erhaltende Abschwächung der Laserleistung über viele Größenordnungen.

Zum anderen sollen von Sill Optics thermisch korrigierte Fokussier-Objektive für die Wellenlängen 1064nm und 532nm entwickelt werden. Vorgesehen ist eine passive Kompensation thermischer Linsen durch Kombination von Quarz und optischem Glas mit Gläsern mit negativem Temperaturkoeffizienten des Brechungsindex dn/dT (s. Kap. 2.1). Durch speziell angepasste asphärische Formgebung der Kompensationselemente könnten auch Wellenfront-Aberrationen höherer Ordnung (sphärische Aberration) reduziert werden. Die entwickelten Objektive werden unter Einsatz des neuen Sensors an Laserbearbeitungsmaschinen der Fa. Saueressig getestet.

2. Stand der Wissenschaft und Technik, eigene Vorarbeiten, Neuheit des Lösungsansatzes

2.1 Stand der Technik

Wellenfrontsensorik

Gegenwärtig basieren Wellenfrontmessungen in Wissenschaft und Industrie im Wesentlichen auf vier unterschiedlichen Konzepten: Hartmann- oder Hartmann-Shack-Sensoren, Interferometern, Wellenfront-Krümmungssensoren und iterativen „Phase Retrieval“ Verfahren.

Hartmann(-Shack)-Sensoren [7,8] verwenden Arrays aus Lochblenden oder Mikrolinsen zur Aufteilung des Strahls in eine große Anzahl von Teilstrahlen. Die Auswertung der Schwerpunkte dieser Teilstrahlen auf einem hinter dem Array positionierten 2D-Detektor ergibt die lokalen Wellenfrontgradienten (Poyntingvektoren) und damit durch Integration die Wellenfront. Hartmann-(Shack)-Sensoren sind sehr kompakt, echtzeitfähig und bieten eine hohe Rekonstruktionsrate. Allerdings erlauben gegenwärtig existierende Varianten dieses Sensortyps bisher keine Bestimmung des Polarisationszustandes.

Eine ganze Reihe interferometrischer Verfahren kann zur Bestimmung der Wellenfront verwendet werden. Insbesondere „Shearing“- sowie „Point diffraction“-Interferometer [9,10] sind für die Strahlcharakterisierung geeignet, da sie bei vergleichbarer Genauigkeit eine höhere räumliche Auflösung besitzen als Hartmann-Sensoren. Andererseits sind die Kohärenzanforderungen hier wesentlich höher, und die erforderliche Aufteilung der Strahlamplitude beeinflusst in der Regel den Polarisationszustand. Die Polarisationsänderung kann zwar technisch kompensiert werden, dies hat aber komplexere opto-mechanische Aufbauten mit den bekannten Nachteilen (höherer Justage-Aufwand, reduzierte Langzeitstabilität) zur Folge.

Das Konzept des Wellenfront-Krümmungssensors [1,11] (s. Abschnitt 1.3) gestattet eine hohe räumliche Auflösung und benötigt keine externe Referenz. Die Anforderungen an die Strahlkohärenz sind äußerst gering. Darüber hinaus ergibt sich bei simultaner Aufnahme beider Profile die Möglichkeit von Echtzeitmessungen, z.B. für die Analyse von Einzelpulsen (vgl. Kap. 2.2).

Ähnlich wie beim Krümmungssensor rekonstruieren „Phase Retrieval“-Verfahren [12,13] die Wellenfront eines kohärenten Strahls aus zwei oder mehreren in Propagationsrichtung aufgenommenen Intensitätsprofilen, allerdings mittels iterativer Methoden. Sie sind daher vergleichsweise langsam. Der Polarisationszustand bleibt auch hier unberücksichtigt.

Polarisationsmessung mit Sub-Wellenlängen-Gitterstrukturen

Das Standard-Verfahren zur Messung des Polarisationszustandes besteht nach ISO 12005 [14] in der sequentiellen Messung von mindestens vier Werten der transmittierten Strahlleistung hinter einem drehbaren Polarisator und der nachfolgenden Bestimmung der Stokes-Parameter. Aus diesem Grunde ist das ISO-Verfahren weder echtzeitfähig, noch kann auf diese Weise eine orts aufgelöste Bestimmung des Polarisationszustandes realisiert werden.

Polarisationsmessungen mit hoher Ortsauflösung sind unter Einsatz einer auf Pixeln basierenden Kamera in Verbindung mit einem unmittelbar davor positionierten Sub-Wellenlängen-Gitter möglich [15]. Allerdings ist eine kombinierte Analyse von Polarisation und Wellenfront unter Einsatz solcher Gitter in der Literatur bisher nicht beschrieben worden.

Metallische Gitterstrukturen mit Perioden im Sub-Wellenlängen-Bereich sind schon seit längerer Zeit als effiziente Polarisatoren für elektromagnetische Strahlung bekannt: Ist der einfallende elektrische Feldvektor parallel zu den leitenden Stegen des Gitters ausgerichtet, so können die Elektronen wie bei einem metallischen Spiegel synchron zum E-Feld frei schwingen, die Lichtwelle wird also reflektiert. Senkrecht zu den Gitterstegen dagegen können sich die Elektronen aufgrund der Sub-Wellenlängen-Stegbreite nur sehr wenig bewegen, so dass die entsprechende Lichtwelle als linear polarisierte Strahlung transmittiert wird.

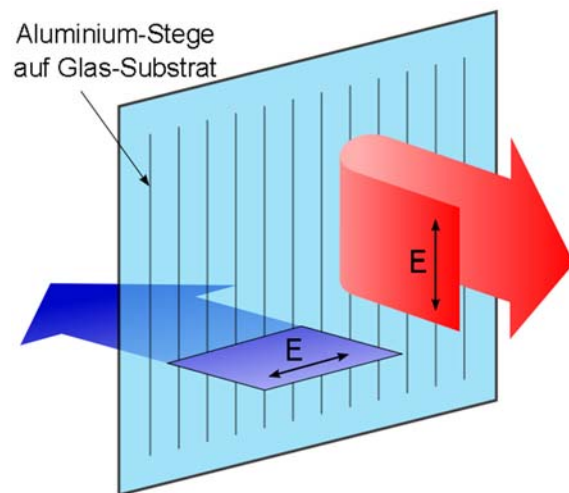


Abb. 5: Zum Funktionsprinzip eines metallischen Sub-Wellenlängen-Gitters

Derartige „wire grid“-Polarisatoren kamen bisher vor allem im mittleren und fernen IR-Bereich zum Einsatz; mit Hilfe innovativer lithographischer Techniken lassen sich Sub-Wellenlängen-Gitterstrukturen mit guter Extinktion heute aber auch für den nahen IR und den sichtbaren Bereich herstellen und sind zudem breitbandig einsetzbar. Theorie und Experiment zeigen dabei übereinstimmend, dass lediglich Aluminium für effiziente Polarisatoren im NIR/VIS Spektralbereich in Frage kommt. Zhang et al. etwa geben für ein Aluminiumgitter mit einer Periode von 140nm bei einem Füllfaktor von 0.5 und einer Steghöhe von 100nm ein Extinktionsverhältnis von 75:1 bei $\lambda=630\text{nm}$ an. Im NIR-Bereich oberhalb von $2\mu\text{m}$ sind optimierte Strukturen mit Extinktionsverhältnissen bis 10000:1 mittlerweile kommerziell verfügbar [16].

Lithographische Herstellung von Subwellenlängen-Gittern

Die präziseste Methode zur Herstellung periodischer Gitterstrukturen ist die Laser-Interferenz-Lithographie. Dabei interferieren zwei in der Phase verschobene Laserwellenfronten und bilden ein Intensitätsprofil großflächig in einen Lack ab. Aufgrund der im Vorhaben geforderten verschiedenen Polarisationsrichtungen der Nanogitter und der gepixelten Anordnung in Arrays ist dieses Verfahren jedoch hier nicht einsetzbar.

Freiformstrukturierungen mit höchster Auflösung lassen sich mittels Elektronenstrahl-Lithographie (EBL) realisieren. Dieses sequentielle Verfahren ist allerdings sehr aufwendig. Als kostengünstige Alternative bietet sich die Nanoimprint-Lithographie (NIL) an, bei der

zunächst ein großflächiger, ebenfalls mittels EBL hergestellter Master in einen transparenten, aus drei Materialien bestehenden Stempel abgegossen wird. Danach wird dieser Stempel als Werkzeug zur Replikation in einen dünnflüssigen Lack auf entsprechende Al-Schichten auf den transparenten Zielsubstraten abgebildet. Die Übertragung des Lackprofils in die darunterliegende Aluminium-Schicht erfolgt durch einen zweistufigen Trockenätzprozess (reaktives Ionenätzen). In diesem Prozess müssen durch selektives, anisotropes Ätzverhalten sowohl die Oberflächenrauigkeit als auch die Seitenwandrauigkeit minimiert werden, um ein optimales Ergebnis bei der Polarisationsmessung zu erhalten.

Abschwächung von Laserstrahlung

Für eine korrekte und stabile Diagnostik der Propagations-Kenngrößen von Laserstrahlung ist eine unverfälschte Strahlabschwächung unabdingbar. Vor allem bei kamera-basierten Systemen, die typischerweise Empfindlichkeiten im Bereich $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ aufweisen, muss die zu detektierende Strahlung teilweise um über 10 Größenordnungen abgeschwächt werden, um eine Übersteuerung, und im schlimmsten Fall natürlich die Zerstörung des Sensors zu vermeiden. Derartige Abschwächvorrichtungen sollten phasen-, amplituden- und polarisations-erhaltend sein, um das Messergebnis nicht zu verfälschen. **Obwohl verschiedene Ansätze auf Basis von Reflexionen an Planflächen oder unter Einsatz von Beugungsgittern in der Literatur beschrieben werden [17] ist bisher noch keine umfassende Lösung, insbesondere in nicht kollimierten Strahlengängen, für die kamerabasierte Strahldiagnostik realisiert worden.**

Kompensation thermischer Linseneffekte

In optischen Systemen, bei denen Linsen aus verschiedenen Materialien so miteinander kombiniert werden, dass ein Material eine positive und ein weiteres eine negative thermische Brechkraft dn/dT besitzt ist eine Kompensation thermischer Effekte möglich. Von Scaggs und Haas [18] ist ein solches System aus Quarzglas und Calciumfluorid vorgestellt worden. Dieses ist so ausgelegt, dass sich die Fokusslage bei einer Variation der Gesamttemperatur nur minimal ändert. Dies gilt allerdings nicht bei zeitabhängigen räumlichen Temperaturverteilungen innerhalb der Optiken. Auch im BMBF-Projekt BRIPRO und im ZIM-Projekt TFOS (s.u.) wurden Strategien zur passiven Kompensation thermischer Linsen untersucht und z.T. deutliche Verbesserungen erreicht.

Allerdings blieben die durch thermische Effekte verursachte Spannungsdoppelbrechung sowie zeitliche Änderungen des Polarisationszustandes bisher unberücksichtigt. Hier kann der neue Sensor wertvolle Beiträge leisten.

2.2 Eigene Vorarbeiten

Laser-Laboratorium Göttingen (LLG)

Ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten des LLG liegt auf der Weiterentwicklung von Wellenfront-Sensorik zur Laserstrahl- und Optik-Charakterisierung, insbesondere unter Einsatz von Hartmann- und Hartmann-Shack-Sensoren. Die Arbeiten umfassen die genaue Bestimmung der Propagationsparameter (M^2) [19], empfindliche Detektion thermischer Linsen sowie Sensoren für den kurzwelligen Spektralbereich (DUV, EUV, XUV) [20,21]. Begleitende Normungsaktivitäten (DIN, ISO) führten zur Herausgabe des Standards ISO15367-II (Wellenfrontmessung von Laserstrahlung) unter Federführung des LLG [22].

Seit 2012 beschäftigt sich das LLG mit der Entwicklung von Wellenfront-Krümmungssensoren. Im ZIM-Projekt WKALAS wurde ein Sensor mit internem Strahlteiler realisiert, der in der Strahlparameterbestimmung Genauigkeiten im Bereich von Hartmann-Shack-Sensoren erreicht. Auf der Lasermesse 2015 wurde der Prototyp eines Krümmungssensors vorgestellt, der einen großen Bereich messbarer Strahlen abdeckt ohne den Polarisationszustand zu beeinflussen (s. Abb. 6).

Zur Optik-Charakterisierung wurde ein schnelles photothermisches Absorptions-Messverfahren entwickelt: Ein hochempfindlicher Hartmann-Shack-Sensor erfasst kleinste laserinduzierte Wellenfrontdeformationen ($< 0.02\text{nm rms}$) und somit minimale Probenabsorptionen (Sub-ppm-Bereich [23]). Das Verfahren wurde in die industrielle Nutzung überführt. Fünf Systeme werden inzwischen weltweit zur industriellen Qualitätskontrolle optischer Komponenten (Substrate, Vergütungsschichten) vor allem im DUV-Spektralbereich eingesetzt.

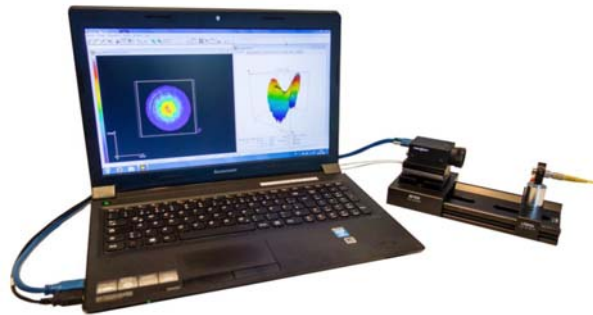


Abb. 6: Wellenfront-Krümmungssensor mit motorisierter Verschiebung

Darüber hinaus wurde ein Aufbau zur Bestimmung thermischer Wellenfrontdeformationen in komplexen optischen Systemen entwickelt und patentiert [DE102010052471]. Damit konnte innerhalb des mit der Fa. Sill Optics durchgeführten ZIM-Projekts TFOS die passive Kompensation der thermischen Linse einer F-Theta-Optik demonstriert werden (s.u.) [24].

AMO

Die AMO GmbH betreibt eine hochauflösende Elektronenstrahlolithographie-Anlage (Vistec EPBG 5200), welche die präzise Herstellung kleinster Strukturen ermöglicht. Des Weiteren verfügt AMO über jahrelange Erfahrung in der UV-Nanoimprint-Technologie. Dabei wurden bisher verschiedene Anwendungsmöglichkeiten untersucht, darunter insbesondere im Bereich der Optik [25,26]. Im Projekt Niltex setzte AMO gezielt Subwellenlängen-Strukturen zur Reduktion optischer Reflexionsverluste auf großflächigen Substraten um [27]. Es wurden erste periodische Subwellenlängen-Gitter für großflächige Wire-Grid-Polarizer auf durchgehenden Al-Schichten definiert, geätzt und gereinigt (vgl. Abb. 3). **Die Periodizität dieser Gitter lag im Bereich $\geq 200\text{ nm}$. Bisher wurden noch keine Strukturen kleinerer Periodizität oder in gepixelter Form hergestellt.**

Das Nanoimprint-Verfahren ist in der Auflösung technologisch bislang lediglich durch die Auflösung der Verfahren zur Stempelherstellung begrenzt. Im Projekt soll daher mittels EBL eine hochauflösende Nanogitterstruktur mit der benötigten Periode und dem entsprechenden Tastverhältnis großflächig geschrieben und als Masterstruktur für die Replikation mit NIL verwendet werden. Damit sollen dann ausreichende Stückzahlen für eine Untersuchung der Reproduzierbarkeit und auch für weiterführende Tests zum Bonden auf CMOS-Sensoren erstellt werden.

Primes

PRIMES ist Marktführer in industrieller Strahldiagnostik. Mit den Produkten von PRIMES werden die realen in der Prozesszone auftretenden Strahlverteilungen entlang der Strahlachse erfasst und daraus die Propagationseigenschaften ermittelt. PRIMES entwickelt seine Produkte vom physikalischen Messkonzept über die Optikauslegung, Leistungsabschwächung ohne Phasenstörung, bis hin zu den mechanischen Verfahreinrichtungen sowie abtastender und kamerabasierter Sensorik als integrierte Ready-to-Use-Systeme. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes Mabilas/WELDone wurden die Grundlagen zu kopfintegrierter propagationsbasierter Strahldiagnostik für Bearbeitungsköpfe entwickelt. Im Verbundprojekt GenChain werden derzeit die Grundlagen für eine in Scannersysteme integrierte Strahldiagnostik erarbeitet.

Eine propagationsbasierte Strahldiagnostik hat systembedingt den Nachteil, dass mehrere Messungen für eine Propagationsauswertung benötigt und darüber hinaus keine Informationen über Polarisation und Phasenfront des Laserstrahls ermittelt werden. Der in diesem Projekt verfolgte Messansatz soll PRIMES in die Lage versetzen, mittels weniger bzw. nur einer Messung alle für eine Strahlverteilungs-, Propagations-, Polarisations- und Phasenfrontauswertung benötigten Daten aufzunehmen. Die sich daraus ergebenden

Vorteile in der Messgeschwindigkeit erlauben dann eine wesentlich höhere Zeitauflösung als heutige Verfahren.

Sill

Die Fa. Sill Optics hat sich aufgrund langjähriger kundenspezifischer Orientierung (OEM-Hersteller) ein hohes Erfahrungs- und Expertenwissen im Bereich Strahlführung aufgebaut, mit dem entscheidenden Vorteil, alle Komponenten eines Objektivs direkt im Haus zu fertigen. Dies bezieht sich auf die gesamte Herstellungskette vom Rohglas bis zur vergüteten Linse, vom Metall als Stangenmaterial bis zum komplexen Gehäuse, von der Montage bis zur 100% Endkontrolle. Diese Wertschöpfungskette wird von keinem der Konkurrenten am Markt so tief abgedeckt.



*Abb. 7: Passives
Kompensationselement für F-theta
Optiken (Fa. Sill Optics)*

Sill Optics hat im ZIM-Projekt TFOS in Zusammenarbeit mit dem Laser-Laboratorium Göttingen Erfahrungen in der Herstellung von Kompensationselementen für thermische Linsen im NIR-Bereich gesammelt. Als Ergebnis konnte auf der Laser 2015 ein passives Ausgleichselement präsentiert werden, das abhängig von der durchstrahlten Glasdicke den thermischen Fokusschift der nachfolgenden Optik um den Faktor 2-3 kompensieren kann (s. Abb. 7). Für dieses Element wurde innerhalb des Projektes auch ein Low Absorption Coating entwickelt.

SAUERESSIG GmbH + Co. KG

Seit 2011 werden bei Saueressig Ultrakurzpulslaser für die Direktstrukturierung von Druck- und Prägezyindern eingesetzt. Dabei werden gezielt Bereiche der Kupferoberfläche der Zylinder derart abgetragen, dass das gewünschte Bild entsteht. Die Direktstrukturierung ersetzt damit den aufwendigen üblichen Herstellungsprozess mit sich wiederholenden Arbeitsgängen bestehend aus Maskierung, Laserstrukturierung, Ätzung und Demaskierung.

Bei der Direktstrukturierung werden die optischen Bauelemente durch die hohen mittleren Laserleistungen thermisch belastet. Die sich daraus bildende thermische Linse führt zu Verschiebungen in der Fokuslage und damit zu veränderten Intensitäten auf der Oberfläche und daraus resultierend zu geringerem Materialabtrag. Dies zeigt sich in Ungleichmäßigkeiten in den gravierten Strukturen. Zur Lösung des Problems wurden in Vorarbeiten zahlreiche Optiken getestet, z.B. Objektive und Linsen aus verschiedenen Gläsern und unterschiedliche Linsenformen. Durch diese Versuche konnte der Fokusschift durch die thermische Belastung reduziert, aber nicht eliminiert werden. Bei sensiblen Designs tritt er weiterhin auf und reduziert die Bebilderungsqualität bzw. schließt solche Designs für den Herstellungsprozess der Direktstrukturierung aus.

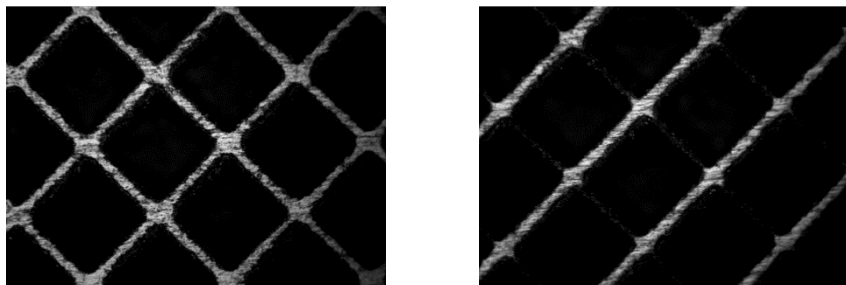


Abb. 8: Stege zwischen den Näpfchen auf Tiefdruckzylindern nach einmaliger (links) und mehrfacher Laserstrukturierung (rechts), vgl. Text

Bei großen Druckbreiten, d.h. langen Bearbeitungszeiten, erwärmen sich die Optiken, und der Fokus sowie die exakte laterale Strahlage werden durch die thermische Belastung geringfügig verschoben. Daher stimmen die Positionen der Stege nicht mit denen aus der ersten Laserbearbeitung überein und die Stege werden partiell zerstört, wie in Abb. 8 dargestellt. Bei Einsatz eines thermisch kompensierten Fokussierobjektivs sollte dieser

Effekt nicht mehr auftreten und sich damit qualitativ hochwertige Druckzylinder herstellen lassen.

2.3 Neuheit des Lösungsansatzes

Die erst durch den Einsatz neuartiger Subwellenlängen-Strukturen realisierbare simultane Messung der Intensitäts-, Wellenfront- und Polarisationsverteilung von Laserstrahlen wurde unseres Wissens bisher noch nirgendwo beschrieben; Messgeräte dieser Art (basierend sowohl auf Hartmann-Shack- als auch auf Wellenfront-Krümmungssensoren) sind dementsprechend gegenwärtig nicht kommerziell verfügbar. Zwar ist eine parallele Detektion prinzipiell auch unter Einsatz einer Strahlteilungsoptik und Verwendung unterschiedlicher Sensoren für die Wellenfront- und Polarisationsmessung möglich, eine solche Vorgehensweise besitzt aber entscheidende Nachteile:

- Mögliche Verfälschung der Polarisation durch den Strahlteiler
- Geringere Konsistenz der Ergebnisse, weil Messungen verschiedener Sensoren mit unterschiedlicher Empfindlichkeit und Ortsauflösung kalibriert und auf ein gemeinsames Bezugssystem adaptiert werden müssen
- Höhere Komplexität des opto-mechanischen Aufbaus sowie der Datenaufnahme- und Auswertesoftware.

Insbesondere im Fall von Korrelationen zwischen Intensität, Wellenfront und Polarisation, wie sie bei thermischen Linsen häufig vorkommen, wird das integrierte Sensorkonzept konsistentere und genauere Ergebnisse liefern. Der Einfluss durch zusätzliche optische Komponenten in getrennten Messsystemen wird somit eliminiert.

2.4 Patentlage

Den Antragstellern ist kein Patent bekannt, das für den neuen polarisationssensitiven Wellenfrontsensor von Relevanz ist.

3. Anwendungsrelevanz und Marktpotential

Polarisationssensitiver Wellenfrontsensor

Die Marktsegmente Produktionstechnik und Optische Komponenten tragen in Deutschland etwa 23% zum Gesamtumsatz der optischen Technologien von 25,7 Mrd. € (2011) bei, der Weltmarktanteil Deutschlands beträgt hier etwa 10-15%. Gleichzeitig wachsen diese Bereiche überdurchschnittlich (12% bzw. 4% im Durchschnitt der Jahre 2005-2008) und beschäftigen incl. Zulieferung ca. 35.000 Mitarbeiter (Steigerung 2005-2008 etwa 10%). Nimmt man die vielfältigen Einsatzbereiche u.a. in der Automobilindustrie, der Solartechnik oder der Medizintechnik hinzu, sind neue, umfassende Methoden der Strahldiagnostik in der der Laser-Materialbearbeitung für den Produktions- und Beschäftigungsstandort Deutschland von sehr hohem technischen und wirtschaftlichen Interesse.

Der im Projekt zu realisierende polarisationssensitive Wellenfront-Krümmungssensor besitzt aufgrund seiner Vielseitigkeit aussichtsreiches Potential in unterschiedlichen Marktsegmenten. So ist im Bereich der Wellenfront-Messtechnik zu erwarten, dass Krümmungssensoren mittelfristig die momentan marktbeherrschenden Hartmann-Shack-Systeme in einigen wichtigen Feldern ersetzen bzw. verdrängen werden. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Laserstrahlcharakterisierung und die Vermessung von Hochleistungslaseroptiken und von Objektiven in der konfokalen Lasermikroskopie interessant. Auch in den Bereichen Medizintechnik (Augenchirurgie), adaptive Optik und Test konventioneller Optiken ist mittelfristig von einem Marktanteil um die 20% auszugehen. Bei einigen hundert bis eintausend verkauften Systemen p.a. weltweit (Stückpreis ca. 4 – 15k€) liegt hier ein erhebliches wirtschaftliches Potential vor.

Soweit bekannt, wird ein Wellenfront-Krümmungssensor bisher nur von einer einzigen Firma kommerziell angeboten (Fa. PhaseView / F). Dieses System verfügt allerdings nicht über die in diesem Projekt angestrebte Fähigkeit, eine umfassende Strahlcharakterisierung incl. M^2 und Polarisations-Auswertung durchzuführen.

Im Segment der M^2 -Messplätze wird die realisierbare Marktdurchdringung im Wesentlichen von der erreichbaren Absolutgenauigkeit abhängen. M^2 -Messungen nach dem gegenwärtig verbindlichen ISO Standard 11146 erreichen, je nach Komplexität des Laserstrahls, hier Werte zwischen 1% u. 10%. Falls dieses Niveau erreicht werden kann, ist in Zukunft von einem beachtlichen Marktanteil auszugehen.

Da Systeme zur kombinierten Echtzeitmessung von Polarisationszustand und Wellenfront von Laserstrahlung bisher kommerziell nicht angeboten werden, sind die Marktchancen hier besonders aussichtsreich. Mögliche Interessenten für solche Systeme sind sowohl im Industrieumfeld (z.B. Hersteller und Anwender von Hochleistungs-Festkörperlasern, Diodenlasern und entsprechender Optiken) wie auch im Forschungssegment bei der Untersuchung innovativer oder komplexer Strahlquellen (Diodenlaser, Laser mit radialer oder tangentialer Polarisation, etc.) angesiedelt. Zusätzliche Informationen über die Polarisation sind vor allem als Input für das numerische Design komplexer Optiken relevant. Insgesamt kann weltweit von einem Potential von etwa 250 Systemen p.a. zur kombinierten Polarisations/Wellenfrontanalyse mit dem neuen Sensor ausgegangen werden.

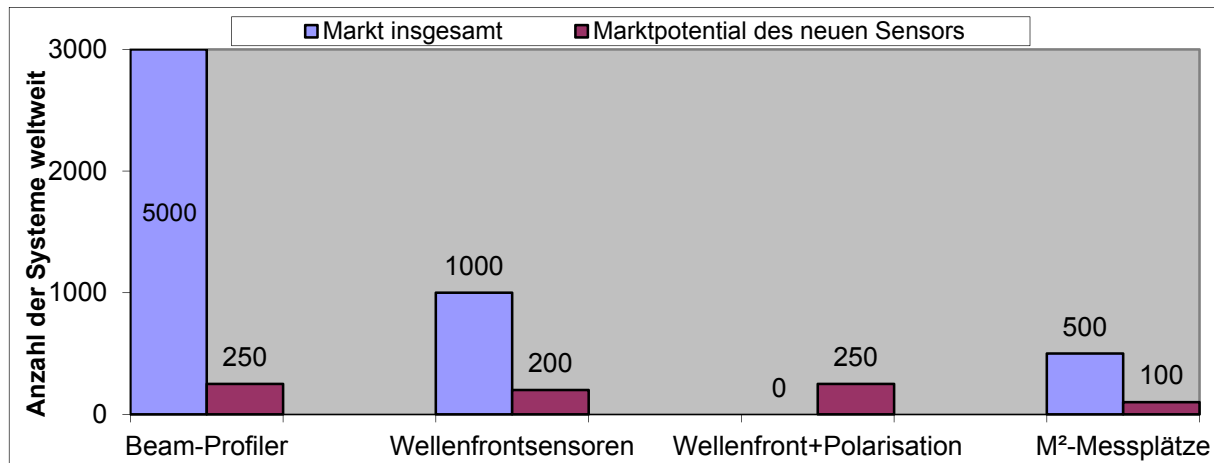


Abb. 9: Marktpotential des polarisationssensitiven Wellenfront-Krümmungssensors in verschiedenen Einsatzfeldern. Die angegebenen Zahlen beruhen auf Schätzungen auf der Basis langjähriger Marktbeobachtungen; exakte Daten sind den Autoren nicht bekannt.

Schließlich wird ein kleinerer Marktanteil (< 5%) im Bereich der reinen Laser Beam Profiler realisierbar sein. Zielgruppe wären hier potentielle Endanwender, die sich eine Option auf zukünftige zusätzliche Wellenfront- oder Polarisationsmessungen sichern möchten. Bei Verzicht auf das Nanogrid wäre auch hier eine attraktive Preisgestaltung möglich.

Bei der Fa. Primes sollen die im Rahmen des Projektes entwickelten Technologien in 2 Produktbereichen zum Einsatz kommen: Zum einen als eigenständige Messgeräte für den Multikilowattbereich, zum anderen als OEM-Produkte zur Integration in Bearbeitungsoptiken und Scanner-Systeme. PRIMES erwartet ein Marktpotential von ca. 100 Messgeräten pro Jahr für Laser-, Optik- und Anlagenhersteller sowie große Unternehmen mit laserbasierter Fertigung in Entwicklung, Abnahme bzw. Instandhaltung, außerdem von ca. 700 OEM-Systemen in Serienanlagen für Schneiden, Schweißen, SLM bzw. UKP. Der volkswirtschaftliche Beitrag dieser Systeme ergibt sich über Qualitätssteigerungen in der Fertigung mit Laseranlagen sowie einer Reduktion von Stillstandzeiten und Verlängerung der Einsatzzeiten von Optiken.

Die Fa. Sill Optics erhofft sich von dem Vorhaben Erkenntnisse zur Kompensation des thermischen Shifts bei Kurzpuls-Lasern sowie hochenergetischen Lasern bei 532 nm, da

diese in der Industrie eine immer größere Rolle spielen. Die in dem Projekt gesammelten Ergebnisse fließen direkt in das Portfolio von Sill Optics ein und bieten somit ein Eintrittstor für thermische und polarisationsoptische Anwendungen. Diese sind in der Medizintechnik bei der Augen Chirurgie und der Konfokal-Mikroskopie von entscheidender Bedeutung. Mit dem Projekt würde sich die Firma Sill Optics einen ganz neuen Absatzmarkt eröffnen.

4. Kurzdarstellung der Partner

Primes GmbH

PRIMES setzt Maßstäbe für Laserstrahlen. Gegründet 1992, ist PRIMES heute mit 60 Mitarbeitern und einer Distribution in 24 Ländern eines der führenden Unternehmen der Lasermesstechnik. Im Rahmen eigener Entwicklungen werden Geräte zur Messung der Strahlleistung und Intensitätsverteilung für die verschiedensten Lasertypen und Wellenlängen entwickelt. Ein eigenständiges Kalibrierlabor betreibt gegenwärtig verschiedene Strahlquellen zum 100%igen Test sowie zur Kalibrierung aller Messgeräte. Dabei kommen aktuell insgesamt fünf Laser mit mehr als 1 kW Leistung und sieben Laser zwischen 1 Watt und 1 kW zum Einsatz. In jüngster Zeit konzentriert sich PRIMES zunehmend auf die Entwicklung von Sensoren und Messgeräten, die direkt in der Fertigung eingesetzt werden. Das Unternehmen beliefert und berät Kunden aus der Laserbranche, dem Anlagenbau, der Automobilindustrie sowie Forschungsinstitute.

SillOptics GmbH & Co KG

Die Firma Sill Optics ist eines der wenigen mittelständischen Unternehmen in Deutschland, das sich auf die Herstellung optischer Komponenten spezialisiert hat. Dabei gilt die Philosophie: „100% Made in Germany“ mit bester Qualität gefertigt im eigenen Haus. Sill Optics beschäftigt derzeit 190 Angestellte, 145 davon (incl. 20 Auszubildende) in der Produktion und Montage von Präzisionslinsen und Fassungen. 50% der Angestellten sind Fachkräfte für Feinoptik, Feinmechanik und Sonderwerkzeuge. Zusätzlich überprüfen qualifizierte Facharbeiter die Qualität der gefertigten Linsen zu 100%. Der Jahresumsatz beträgt 19.5 Mio.€.

Sill Optics bietet Laser-Objektive für verschiedene Anwendungen an. Die Bandbreite der Laseroptiken umfasst den Bereich von 193nm bis 10,6µm für verschiedenen Lasertypen von cw- bis zu UKP-Lasern (Femtosekunden). Für typische Wellenlängen von 266nm, 355nm, 532nm und 1064nm können Kunden aus einer Vielzahl an Laseroptiken als Katalogware wählen. Kundenspezifische Lösungen werden von der Design-Phase bis zur Auslieferung der Systeme und Komponenten in einem Haus betreut. Sill Optics verfügt über umfassende Kompetenzen in Design, Konstruktion und Produktion von Feinoptiken, Feinmechaniken und Sonderwerkzeugen sowie einer Auswahl an optischen Komponenten.

Saueressig GmbH & Co KG

Saueressig ist ein in der grafischen Industrie tätiges Unternehmen. Bereits seit 1953 gehört Saueressig zu den europaweit führenden Unternehmen in der Druck- und Veredelungsindustrie. Als internationaler Full-Service-Dienstleister betreut Saueressig den gesamten grafischen Verpackungsprozess von der Designentwicklung bis hin zur Druckform für alle gängigen Druckverfahren. Die Produkte, Systemlösungen und Dienstleistungen werden für verschiedene Sparten, vornehmlich jedoch für die Verpackungs-, Dekor-, Textil-, Papier-, Sicherheits- und Kunststoffindustrie geliefert. Neben Tiefdruck- und Prägwalzen werden auch komplexe Systeme zur Verarbeitung bahnförmiger Materialien und die dazugehörigen Sondermaschinen gefertigt.

Das international expandierende Unternehmen bedient seine Kunden aktuell von neun Produktionsstandorten aus. Saueressig ist Teil der Markenumsatzsparte bei SGK. SGK ist ein Geschäftszweig der Matthews International Corporation (NASDAQ GSM: MATW).

Die Mitarbeiterzahl von Saueressig liegt bei 690, der Jahresumsatz bei ca. 100 Mio. €.

Laser-Laboratorium Göttingen

Das Laser-Laboratorium Göttingen e.V. wurde 1987 gegründet und betreibt mit z.Zt. ca. 60 Mitarbeitern anwendungsorientierte Forschung auf verschiedenen Gebieten der Lasertechnik. Die Abteilung 'Optik / Kurze Wellenlängen' (OKW) beschäftigt sich u.a. mit der Charakterisierung des Propagationsverhaltens von Laserstrahlung mittels Wellenfrontsensorik sowie den Verlustmechanismen und der Strahlungsstabilität von Optiken für Hochleistungslaser.

AMO GmbH

Die AMO GmbH ist ein privater gemeinnütziger Forschungsdienstleister und seit 1993 in den Bereichen Nanoelektronik, Nanophotonik und Nanostrukturtechnik mit ca. 35 Angestellten tätig. Die unternehmerische Zielsetzung ist auf die Entwicklung innovativer Technologien im Umfeld von mikro- und optoelektronischen Anwendungen und deren Implementation in neuartige Bauteile auf Prototypenlevel ausgerichtet. Im Nanotechnologielabor AMICA der AMO werden mit einer modernen CMOS-kompatiblen Prozesstechnik anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf Prozess-, Bauelement- bis hin zur Systemebene durchgeführt. Entwicklungs- und Produktionsschwerpunkte liegen in den Bereichen Silizium-Photonik für die Informations- und Kommunikationstechnik, Sensorik und Graphenelektronik für Hochfrequenzanwendungen sowie diffraktive Optiken für Laseranwendungen und THz-Analytik.

Zusammensetzung des Konsortiums:

Das hier vorgestellte Vorhaben ist streng entlang der Wertschöpfungskette strukturiert, um eine rasche Überführung der F&E-Ergebnisse in den Markt zu ermöglichen: Die Forschungsinstitute LLG und AMO sind als Experten verantwortlich für die Wellenfrontmessung bzw. die Nanostrukturierung der pixelgenauen Polarisationsfilter. Der Koordinator Primes GmbH wird als Marktführer für industrielle Strahldiagnostik das Vorhaben in Richtung Produktumsetzung vorantreiben. Die Fa. Silloptics ist mit der Herstellung **thermisch korrigierter Fokussierobjektive sowie optischer Abschwächeelemente** in das Vorhaben eingebunden. Diese Komponenten können bereits im laufenden Projekt bei der Saueressig GmbH in der realen Anwenderumgebung bei der Direktstruktuiierung von Druck- und Prägwalzen getestet und eingesetzt werden.

Damit wird die gesamte Prozess- und Wertschöpfungskette, beginnend mit grundlegenden F&E-Aktivitäten über die Systemeinbindung und Vermarktung bis hin zur Endanwendung abgebildet.

5. Arbeits- und Zeitplanung; Personalaufwand; Verbundstruktur

Zur effizienten Umsetzung der Projektziele ist das Vorhaben in 4 Haupt-Arbeitspakete gegliedert, wie in Tab. 1 dargestellt. Um eine zeitnahe Erfolgskontrolle zu gewährleisten sind ferner vier Meilensteine vorgesehen - einer nach Ende der Planungs- und Konzeptionsphase, ein zweiter und dritter nach Fertigstellung und Charakterisierung des Demonstrators und der vierte zu Projektende.

LLG	AMO	Sill	Saueressig	Primes	AP	Arbeitspakete im Teilprojekt	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3									
							Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4						
Arbeitspaket 1						Modellierung + Design																		
					1.1	Anforderungsanalyse; Konzeption des neuen Sensors																		
					1.2	Simulation, Design und Layout von Subwellennanogitter-Strukturen																		
					1.3	Festlegung der Software- und Hardware Schnittstellen																		

Arbeitspaket 2					Entwicklung und Herstellung Demonstrator															
				2.1	Herstellung E-beam Funktionsmuster Nanogitter															
				2.2	Master- und Stempelherstellung sowie Entwicklung eines Replikationsverfahrens (SCIL-Anlage) f. das Nanogitter															
				2.3	Algorithmen und Softwareentwicklung f. Wellenfront und Polarisationsanalyse															
				2.4	Entwicklung angepasster Konzepte zur Strahlabschwächung ohne Beeinflussung der Polarisation															
				2.5	Umsetzung des Sensorkonzepts in ein modulares Konzept zum Einsatz im Hochleistungsbereich > 1kW															
				2.6	Herstellung erster Demonstrator Nanogitter-Polarisator															
				2.7	Aufbau der Strahlabschwächung															
				2.8	Aufbau erster Demonstrator Sensor															
Arbeitspaket 3					Charakterisierung Demonstrator															
				3.1	Messung Transmissionseigenschaften Nanogitter															
				3.2	Evaluierung Demonstrator; Vergleich der Ergebnisse mit Standardverfahren															
				3.3	Charakterisierung des Abschwächers															
				3.4	Berechnung und Herstellung kompensierter Fokussieroptiken															
				3.5	Evaluierung der Fokussieroptiken in den Testapplikationen															
Arbeitspaket 4					Optimierung Nanogitter-Polarisator / Anwendungen															
				4.1	Optimierte Prototypen von Nano-Grid, Sensor und Fokussieroptiken															
				4.2	Evaluierung der optimierten Prototypen in den Testapplikationen															
				4.3	Demonstration des Einsatzes integrierter Sensoren in einem Bearbeitungskopf u. einem Scannersystem															
				4.4	Bewertung der Ergebnisse aus TP-4.1-4.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung															

Tabelle 1: Darstellung des zeitlichen Umfangs der Arbeitspakete

Meilensteine / Erfolgskontrolle

Zur Erreichung der Projektziele werden die folgenden Meilensteine definiert:

Arbeitspakete	Projektmonat	Meilensteine
AP1	9	M1: Anforderungsanalyse erstellt; Konzeptions- und Designphase abgeschlossen
AP2	18	M2: Erster Demonstrator des polarisationssensitiven Wellenfrontsensors fertiggestellt
AP3	27	M3: Demonstrator charakterisiert
AP4	36	M4: optimiertes Gesamtsystem hergestellt und charakterisiert

Tabelle 2: Definition der Meilensteine

Zusätzlich sollen in halbjährlichem Abstand Projekttreffen stattfinden, auf denen die Projektpartner über ihre Arbeiten berichten und die Planung für das nächste Halbjahr an Hand des aktuellen Projektfortschritts besprochen wird.

Zur Veranschaulichung der Zusammenarbeit ist in Tab. 3 dargestellt, welche Leistungen, Komponenten oder Informationen zwischen den Projektpartnern ausgetauscht werden.

Wer?	Was?	Wann? (Projekt- quartal)	An wen?	Wie?	AP
Sill Saueressig Primes	Anforderungsanalyse Testapplikationen Softwareschnittstellen	3	LLG AMO	Spezifikationen	1.1 1.3
AMO	Berechnung u. Design Nanogitter	3	LLG	Bericht	1.2
LLG	Software Bibliothek	5	Primes	Übergabe	2.3
AMO	Erster Prototyp Nanogitter	6	LLG	Übergabe	2.6
LLG	Erster Demonstrator Sensor	7	Primes	Übergabe	2.8
Primes	Charakterisierung erster Demonstrator	8	LLG AMO	Bericht	3.2
LLG	Optimierung Interface Software – Messsystem Opt. der Algorithmen	9	Primes	Modifikation Software	2.3
Sill	Thermisch kompensierte Fokussieroptiken	9	Saueressig	Übergabe	3.4
AMO	Optimierter Prototyp Nanogitter	10	LLG	Übergabe	4.2
Saueressig Sill	Tests der Fokussieroptiken	10	Sill LLG	Bericht	3.5
LLG	Optimierter Demonstrator	11	Primes	Übergabe	4.2
Alle	Projektende	12	Alle	Bericht	4.4

Tabelle 3: Darstellung der zwischen den Partnern ausgetauschten Informationen und Komponenten

Für den polarisationssensitiven Wellenfrontsensor werden die folgenden technischen und wirtschaftlichen Ziele definiert:

Nr.	Parameter	Projektziel
Technische Zielparameter		
1	Einsatzwellenlänge [nm]	532-1100
2	Strukturbreite Nano-Gitter	150nm
3	Extinktionsverhältnis Nano-Grid	100:1
4	Genauigkeit Strahlparameter [%]	5-10
5	Präzision der Wellenfront (rms) [nm]	30
6	Genauigkeit Stokesparameter [%]	2-5
7	Systemdimensionen [mm ³]	< 100x100x50
Wirtschaftliche Zielparameter		
8	Preisrelation Sensor [k€]	10 - 15
9	Produktstatus Sensor	Prototyp und Fertigungskonzept

Tabelle 4: Angestrebte Produkt-Spezifikationen des polarisationssensitiven Wellenfrontsensors

Die Verbundstruktur ist zusammen mit der Wertschöpfungskette in Abb. 10 des Abschnitts 7 dargestellt.

6. Finanzierungsplan

Partner	Typ	PM 1. J	PM 2. J	PM 3. J	PM Summe	Förder- quote	Kosten (in T€)		
							Personal- kosten	Sach- kosten	Gesamt- kosten
Primes	KMU	15	18	15	48	42%	610	140	750
Sill	KMU	3	7	10	20	42%	80	20	100
LLG	Institut	12	12	12	36	100%	240	80	320
AMO	Institut	12	12	12	36	100%	220	36	256
Saueressig	Endanwender	1	1	2	5	0	30	20	50 ???
Summen		50	61	65	176	65,4%	1150	276	1426

Einrechnung möglicher nicht geförderter Arbeiten von Saueressig prüfen!!!

Tabelle 5: Darstellung des Personalaufwands und Kostenabschätzung. Bei einer Förderung von 42% für die Firmen (zzgl. KMU-Bonus von 10%) und 100%-Förderung der Institute liegt die Förderquote für das Gesamtprojekt bei 65,4 %.

7. Vermarktungsstrategie, Verwertung der Ergebnisse

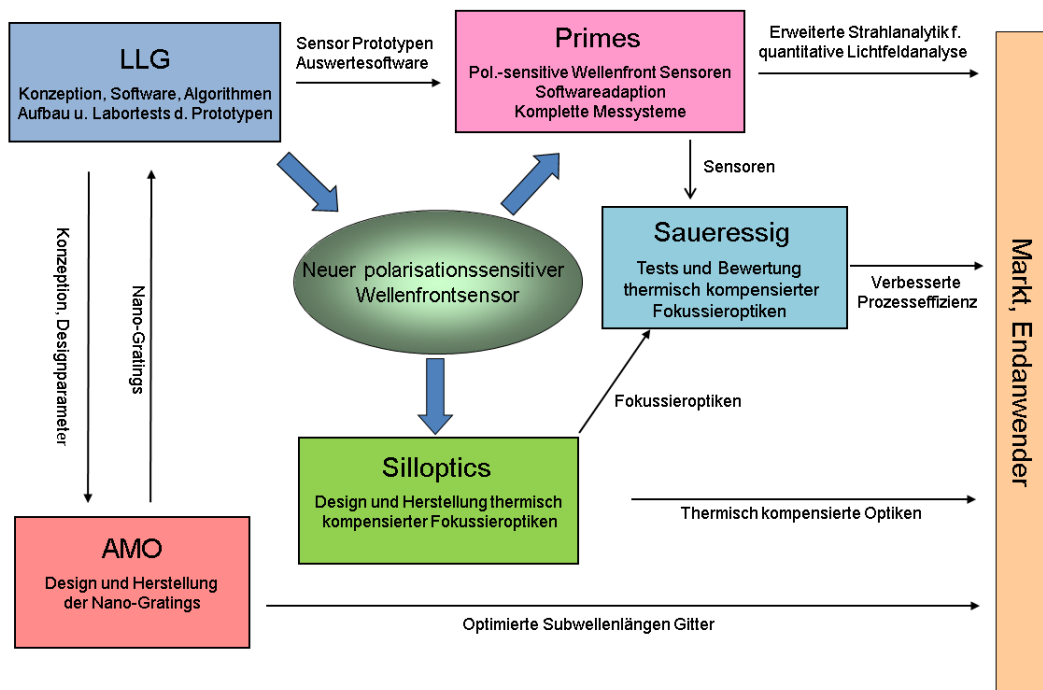


Abb. 10: Verbundstruktur, Aufgabenverteilung und Zuordnung der Projektpartner sowie Wertschöpfungskette

Ziel des Projektes ist es, mit der neu zur Verfügung stehenden Technologie für die beteiligten Firmen die Ausgangsbasis für neue Produkte und für eine Markterweiterung zu schaffen. Dabei erfolgt die Umsetzung der Ergebnisse gemäß Abb. 10.

Die **Fa. Primes** erwartet sich von dem Projekt eine weitere Stärkung und den Ausbau ihrer führenden Stellung im Bereich der Strahlcharakterisierung insbesondere von Hochleistungs-Industrielasern. Die geplante Vermarktung und der Einsatz des neuen Sensors im industriellen Umfeld (z.B. Automobilindustrie) kann zur Reduktion von Stillstandszeiten führen, die jährlichen Einsparungen im mehrstelligen Millionenbereich entsprechen.

Die Fa. **Sill Optics** strebt an, nach Ende des Projektes mit Hilfe der entwickelten Sensoren Aberrationen höherer Ordnung z.B. in polarisationssensitiven Materialien kompensieren zu können. Mit den gewonnenen Erkenntnissen plant die Firma Sill Optics, ihren Anteil auf dem Markt Medizintechnik / Life Sciences deutlich zu steigern. Bei positivem Verlauf des Projekts sind erweiterte Einsatzmöglichkeiten der thermisch kompensierten Optiken bei Hochleistungslasern vor allem im NIR, insbesondere aber auch bei frequenz-vervielfachten Festkörperlaser, Excimer- und CO₂-Lasern vorstellbar.

Saueressig erwartet durch die Kompensationselemente eine deutliche zeitliche Stabilisierung der Strahlparameter, besonders der Fokuslage. Die Qualität der Prägwalzen wird dadurch erheblich erhöht, die Fertigung von Tiefdruckzylindern mit stabilen Stegen wird erst durch die Temperaturkompensation der optischen Komponenten ermöglicht. Eine wirtschaftliche Produktion von direktstrukturierten Tiefdruckzylindern wird erst bei höheren einsetzbaren Laserleistungen erreicht. Die Laserbearbeitungszeiten könnten um ca. 50% reduziert werden, was zu jährlichen Einsparungen von bis zu 500.000 € führt. Ziel ist es, durch die Direktstrukturierung die konventionelle, die Umwelt stark belastende Ätztechnik von Prägwalzen und Tiefdruckzylindern zu verdrängen.

Das **Laser-Laboratorium Göttingen** erwartet eine Erweiterung des Angebots- bzw. Anwendungsspektrums seiner Wellenfrontsensoren und damit zusammenhängender Software, sowie weiterer Strahlanalytik. Daneben werden die Ergebnisse zur Weiterführung und Stärkung der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Lasermesstechnik und als Grundlage für sich anschließende Industrieprojekte benötigt.

AMO strebt an, mit den gepixelten Polarisatoren zur Strahldiagnostik ein weiteres Marktfeld zu erschließen und das Produktportfolio entsprechend zu erweitern.

Die Verwertung der erwarteten geschützten oder auch ungeschützten Projektergebnisse erfolgt in erster Linie durch Lizenzierung an die Projektpartner. Darüber hinaus werden nach Möglichkeit auch Lizenzen an interessierte Dritte ohne Projektbezug eingeräumt. Der Verwertungsplan wird von allen Verbundpartnern innerhalb der Projektlaufzeit stetig fortgeschrieben. Hierbei fließen Erkenntnisse der Partner aus Marktbeobachtungen, aber auch der Projektfortschritt selbst mit ein. Ferner sind Publikationen von Projektergebnissen auf Fachmessen, in Fachzeitschriften und anderen Medien geplant um die Verwertung durch die Projektpartner zu unterstützen. Dadurch wird nicht zuletzt gewährleistet, dass die im Rahmen von „PhotonikPlus“ geförderten Arbeiten und erzielten Ergebnisse einer breiteren Öffentlichkeit bekannt werden.

8. Wirtschaftliches und technisch-wissenschaftliches Risiko; Notwendigkeit der Zuwendung

8.1 Technisch-wissenschaftliche Risiken

Der in diesem Vorhaben verfolgte Ansatz zur simultanen Erfassung von Intensität, Wellenfront und Polarisation mit hoher Ortsauflösung wurde in dieser Form bisher noch nicht realisiert, so dass sich trotz des aussichtsreichen Potentials erst im Verlauf des Vorhabens zeigen muss, inwieweit der neue Sensor sämtliche Anforderungen erfüllen kann.

Die folgenden technischen Risiken werden gesehen:

- Aus den Vorarbeiten des LLG ergibt sich, dass Störungen in der Intensitätsverteilung die Qualität der Ergebnisse des Wellenfront-Krümmungssensors erheblich beeinflussen. Falls Inhomogenitäten oder Streuanteile des Nano-Gitter-Arrays zu stark ausgeprägt sind, können die angepeilten Ziele evtl. nicht erreicht werden.
- Der Einsatzbereich und damit natürlich auch die Marktperspektiven des neuen Sensors wären eingeschränkt, falls das angestrebte Extinktionsverhältnis von 100 : 1 nicht über den gesamten relevanten Spektralbereich erreicht wird.

- Sollten die Perioden von Detektor und Nano-Gitter nicht gut übereinstimmen, kann nur ein Teilbereich der Sensorfläche genutzt werden. Insbesondere die Sensorvariante mit Strahlteilung wird dann höchstwahrscheinlich nicht zu verwirklichen sein.
- Falls sich bei der Assemblierung von Detektor und Array erhebliche Probleme ergeben, müsste alternativ eine zusätzliche Optik zur 1:1 Abbildung des Arrays auf den Detektor entwickelt werden. Der Gesamtaufbau würde dadurch komplexer, teurer und vermutlich auch störanfälliger.

8.2 Wirtschaftliche Risiken

Die o.g. technischen Risiken ziehen im Regelfall wirtschaftliche Unwägbarkeiten nach sich. So kann es sein, dass während der Herstellungsphase Probleme hinsichtlich der Materialbeschaffung, Oberflächensauberkeit oder induzierten Materialspannung auftreten. Versuche müssen möglicherweise öfter als geplant wiederholt, Lösungen mehrfach überarbeitet oder sogar konzeptionelle Ansätze verworfen werden. Meist hat das höhere Kosten und längere Laufzeiten zur Folge.

Ein weiteres wirtschaftliches Risiko leitet sich aus der Tatsache ab, dass im Projekt der Aufbau eines Demonstrators vorgesehen ist. Hier bestehen Risiken hinsichtlich Beschädigungen (Einsatz an kW-Lasern !) oder der Notwendigkeit von Neuanschaffungen bei Konzeptänderungen. Generell ist dies in der Projektvorkalkulation bereits berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang betonen wir, dass uns in der Projektvorbereitung keine wirtschaftlichen Risiken bekannt geworden sind, die generell gegen das Projekt sprechen würden. Aufgrund der in den vorausgehenden Kapiteln dargestellten komplementären Kompetenzen der Partner kann das vorgeschlagene Vorhaben im Rahmen des Förderprogramms „Photonik Plus“ trotz der vorhandenen Risiken mit guten Erfolgsaussichten durchgeführt werden.

8.3 Notwendigkeit der Zuwendung

Die unterschiedlichen Teilaspekte des Vorhabens greifen eng ineinander und können von keinem Partner allein realisiert werden. Die mit der Durchführung des Vorhabens verbundenen Risiken können von den einzelnen Partnern mit ihren Ressourcen nicht getragen werden. Insbesondere sind die notwendigen Kompetenzen bislang nur verteilt vorhanden, die Partner können also die avisierte Technologieentwicklung nur gemeinsam erfolgreich durchführen.

9. Literatur

- [1] D. Paganin, and K. A. Nugent, Noninterferometric phase imaging with partially coherent light, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 2586-2589 (1998)
- [2] M.J. Bastiaans, The Wigner distribution function for partially coherent light, *Optica acta* (28) 9, (1981)
- [3] ISO 11146-1,2,3, Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios, International Organization for Standardization, Geneve (2005)
- [4] B. Schäfer, K. Mann, Characterization of an ArF excimer laser beam from measurements of the Wigner distribution function, *New J. Phys.*, 13 043013 (2011)
- [5] M. Born, and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th edn (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001)
- [6] AMO
- [7] D. R. Neal, W. J. Alford, J. K. Gruetzner, and M. E. Warren, Amplitude and phase beam characterization using a two dimensional wavefront sensor, *Proc. SPIE* **2870**, 72 (1996)
- [8] B. Schäfer, M. Lübbecke, and K. Mann, Hartmann-Shack wave front measurements for real time determination of laser beam propagation parameters, *Rev. Sci. Instr.* **77**, 053103 (2006)

- [9] J. C. Wyant, White light extended source shearing interferometer, *Appl. Opt.* **13**, 200-202 (1974)
- [10] R. N. Smartt, and W. H. Steel, Theory and application of point-diffraction interferometers, *Japan. J. Appl. Phys.* **14**, 351-356 (1975)
- [11] N. Streibel, Phase imaging by the transport equation of intensity, *Opt. Comm.* **49**, 6-10 (1984)
- [12] A. Anand, G. Pedrini, W. Osten, and P. Almero, Wavefront sensing with random amplitude mask and phase retrieval, *Opt. Lett.* **32**, 1584-1586 (2007)
- [13] H. M. Quiney, A. G. Peele, Z. Cai, D. Paterson, and K. A. Nugent, Diffractive imaging of highly focused X-ray fields, *Nature Physics* **Vol. 2**, 101-104 (2006)
- [14] ISO 12005, Lasers and laser-related equipment – Polarization, International Organization for Standardization, Geneva (2000)
- [15] Z. Zhang, F. Dong, T. Cheng, K. Qiu, Q. Zhang, W. Chu, and X. Wu, Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry, *Rev. Sci. Instr.* **85**, 105002 (2014)
- [16] www.infraspecs.de
- [17] C.B. Roundy, "Current Technology of Beam Profile Measurements", in: F.M. Dickey, S.C. Holswade ed., "Laser Beam Shaping", Marcel Dekker, New York (2000)
- [18] M. Scaggs and G. Haas, Thermal Lensing Compensation Objective for High Power Lasers, *Proc. SPIE* **7913**, 79130C (2011)
- [19] B. Schäfer, and K. Mann, Determination of beam parameters and coherence properties of laser radiation by use of an extended Hartmann-Shack wave-front sensor, *Appl. Optics*, **41** No. 15, 2809-2817 (2002)
- [20] B. Flöter, P. Juranic, S. Kapitzki, B. Keitel, K. Mann, E. Plönjes, B. Schäfer, and K. Tiedtke, EUV Hartmann sensor for wavefront measurements at free-electron laser FLASH, *New J. Phys.* **12** 083015 (2010) <http://iopscience.iop.org/1367-2630/12/8/083015>
- [21] B. Schäfer, B. Flöter, T. Mey, P. Juranic, S. Kapitzki, B. Keitel, E. Plönjes, K. Mann, and K. Tiedtke, FEL beam characterization from measurements of the Wigner distribution function, *Nucl. Instr. and Meth. A* (2011), doi:10.1016/j.nima.2011.07.031
- [22] ISO 15367-2, Lasers and laser-related equipment – Test methods for the shape of a laser beam wavefront - Part 2: Hartmann-Shack sensors, International Organization for Standardization, Geneva (2005)
- [23] B. Schäfer, K. Mann: Photo-Thermal Measurement of Absorptance Losses, Temperature induced Wavefront Deformation and Compaction in DUV-Optics, *Optics Express* **17**, No. 25, 23025 (2009)
- [24] M. Stubenvoll, B. Schäfer, K. Mann: Measurement and compensation of laser induced wavefront deformations and focal shifts in near IR optics, *Optics Express* **22**, No. 21, 25385 (2014)
- [25] U. Plachetka, A. Kristensen, S. Scheerlinck, N. Whitbread, J. Huskens, N. Koo, H. Kurz. "Fabrication of Photonic Components by Nanoimprint Technology within ePIXnet" *Microelectronic Engineering*, Volume 85, Issues 5-6, Pages 886-889, (2008)
- [26] C. Moormann, N. Koo, J. Kim, U. Plachetka, F. Schlachter, C. Nowak, "Liquid Transfer Nanoimprint Replication on non-flat Surfaces for Optical Applications"; *Microelectron. Eng.*, Volume 100, December 2012, Pages 28–32
- [27] U. Plachetka, J.W. Kim, R. Khandelwal, H. Windgassen, C. Moormann, H. Kurz; "Tailored etching processes for UV-NIL resist material for Si-antireflective surfaces"; *Microelectronic Engineering*, Volume 110, October, 2013 Pages 361-364