Johannes Kirchner*, Rostyslav Mastylo, Uwe Gerhardt, Florian Fern, Ralf Schienbein, Laura Weidenfeller, Martin Hofmann, Taras Sasiuk, Stefan Sinzinger und Eberhard Manske

Anwendungen eines fasergekoppelten chromatisch konfokalen Sensors in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

Applications of a fiber coupled chromatic confocal sensor in nanopositioning and nanomeasuring machines

DOI 10.1515/teme-2019-0041

Zusammenfassung: Mit der Entwicklung eines neuen Sensorsystems nach dem chromatisch konfokalen Prinzip erweitern sich die Anwendungsmöglichkeiten für Nano-Koordinatenmessmaschinen [8]. Unter Verwendung der im Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS) der Technischen Universität Ilmenau entwickelten Nanopositionier- und Nanomessmaschinen (NPMM) stehen ausgedehnte und präzise adressier- und positionierbare Mess- und Arbeitsvolumina zur Verfügung [9]. Beschrieben wird die Integration des neuen Sensors in die NPMM, sowie die Erweiterung des Systems um einen Lithografielaser für maskenloses direktes Laserschreiben (engl. Direct-Laser-Writing (DLW)) [16]. Die messtechnischen Eigenschaften des Sensors werden vorgestellt und seine Anwendungsmöglichkeit in lithografischen Strukturierungsprozessen erweitert. Der Sensor wird genutzt, um den Bearbeitungslaser im Bereich seiner Tiefenschärfe konsequent auf die Probenoberfläche zu fokussieren. Dadurch werden Strukturbreiten minimiert [17].

Schlüsselwörter: Nano-Koordinatenmessmaschinen, optische Messtechnik, chromatisch konfokaler Sensor.

*Korrespondenzautor: Johannes Kirchner, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Straße 1, 98693 Ilmenau, E-Mail: johannes.kirchner@tu-ilmenau.de

Rostyslav Mastylo, Uwe Gerhardt, Florian Fern, Laura Weidenfeller, Taras Sasiuk, Eberhard Manske, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Straße 1, 98693 Ilmenau,

E-Mail: info.pms@tu-ilmenau.de

Ralf Schienbein, Fachgebiet Feinwerktechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau Martin Hofmann, Fachgebiet Mikro- und nanoelektronische Systeme, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Straße 1, 98693 Ilmenau

Stefan Sinzinger, Fachgebiet Technische Optik, Technische Universität Ilmenau, Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau

Abstract: By developing a new sensor system based on the chromatic confocal principle, the application potential for nano-coordinate measuring machines has expanded [8]. Using the Nanopositioning and Nanomeasuring Machines (NPMM) developed at the Institute for Process Measurement and Sensor Technology (IPMS) at Technische Universität Ilmenau, large and precisely addressable and positionable measuring and working volumes are available [9]. The integration of the new sensor into the NPMM and the extension of the system by a lithography laser for maskless Direct-Laser-Writing (DLW) are described [16]. The metrological properties of the sensor are presented and its possible applications in lithographic structuring processes are discussed. The sensor is used to focus the processing laser consistently on the sample surface in the area of its depth of field. This leads to a decrease in the structure widths [17].

Keywords: Nano-coordinate measuring machines, optical metrology, chromatic confocal sensor.

1 Einleitung

1.1 Nanopositionier- und Messmaschinen

Die Forschung im Bereich der Nano-Koordinatenmessmaschinen hat in den letzten zwei Jahrzehnten zu erheblichen Steigerungen im Hinblick auf Auflösungsvermögen, Präzision, Reproduzierbarkeit und Positioniergenauigkeit geführt (vgl. [15], [6]). Das Institut für Prozessmess- und Sensortechnik und der Sonderforschungsbereich SFB 622: Nanopositionier- und Nanomessmaschinen haben mit der Entwicklung der gleichnamigen Maschinen maßgeblich zum Stand der Technik beigetragen. Diese Maschinen zeichnen sich durch ihre großen Arbeitsvolumina von $25 \times 25 \times 5 \,\mathrm{mm}^3$ der kleinen (NMM-1) bzw. $200 \times 200 \times 5 \,\mathrm{mm}^3$ der großen Maschinenversionen (NPMM-200) aus [5, 7].

Über den gesamten Bereich erreichen NPMMs eine 3D-Messunsicherheit von weniger als 10 nm. Die hohe Ortsauflösung von 80 pm wird durch stabilisierte interferometrische Messsysteme erreicht [18]. In Kombination mit adäquaten optischen oder taktilen Oberflächensensoren werden hochpräzise Struktur- und Oberflächenmessungen im Nanometerbereich ermöglicht. Der Sensor ist dabei am metrologischen Rahmen der Maschine befestigt. Nanopositionier- und Nanomessmaschinen arbeiten im Sample Scanning Mode, das bedeutet, dass das Messobjekt relativ zum Sensor bewegt wird. Die Maschinenregelung führt die Probenoberfläche in axialer Richtung immer wieder auf einen bestimmten Fixpunkt des Sensorsystems nach. Die laterale Bewegung der Probe bzw. des beweglichen Probentisches wird vom Bediener vorgegeben. Der Probentisch ist an den Außenflächen verspiegelt. Drei Interferometer zeichnen die relative Bewegung des Tisches während des Messvorgangs in X-, Y- und Z-Richtung auf. Durch dieses Messkonzept wird das Abbe'sche Komperatorprinzip in allen Koordinatenrichtungen eingehalten und die Messabweichung verringert [1].

1.2 Fasergekoppelter chromatisch konfokaler Sensor

Im Rahmen des Graduiertenkollegs Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen ist ein Sensorprototyp entwickelt worden, der nach dem chromatisch konfokalen Prinzip arbeitet und einen fasergekoppelten Sensorkopf besitzt [8]. Bei diesem Prinzip wird die chromatische Aberration genauer der Farblängsfehler - ausgenutzt, wodurch Licht unterschiedlicher Wellenlänge unterschiedlich gebrochen wird [3]. Dadurch entstehen die Fokusebenen zweier Laser mit unterschiedlicher Wellenlänge hinter einer sammelnden Optik in einer leicht versetzten Lage entlang der optischen Achse [10]. Dieser Versatz wird im Folgenden als Schnittweitendifferenz bezeichnet und kann bei genauer Kenntnis der geometrischen Eigenschaften und des Werkstoffs der Optik durch die Sellmeier-Gleichung beschrieben werden [13]. Die Wellenlängen sind so gewählt, dass sie durch eine gemeinsame Monomodefaser geleitet werden können. Die Faser ist an einen verstellbaren Kollimator angeschlossen. Die Funktion der Konfokalblende, die bei solchen Sensoren die Grundlage des Messprinzips bildet, wird hier durch das Faserende selbst übernommen [11]. Wird eine der aus der Faser austretenden Laserstrahlungen durch ein Objektiv optimal auf die Oberfläche fokussiert und dort reflektiert, wird das rücklaufende Licht mit der gesamten Intensität wieder in die Faser eingekoppelt. Die Intensität des reflektierten Lichts bildet genau dann ihr Maximum aus,

wenn sich die reflektierende Oberfläche exakt in der Fokusebene der Laserstrahlung befindet. Entlang der optischen Achse entstehen somit zwei, den beiden Laserstrahlungen zugeordnete, photodetektive Signalpeaks mit einem messbaren Versatz zueinander. Die Differenz dieser Signale weist einen linearen Bereich aus, welcher zur Hubregelung von Nanopositionier- und Messmaschinen genutzt wird [2]. Abbildung 1 verdeutlicht die Regelung des Maschinenhubs mit Hilfe der Signale. Im aufgebauten Sensorsystem werden Lichtwellenleiterkoppler verwendet, um einfallendes und reflektiertes Licht zu trennen. Durch optische Filter werden die beiden Wellenlängen separiert und die Lichtintensität mit Hilfe von Photodioden in ein elektrisches Signal umgewandelt.

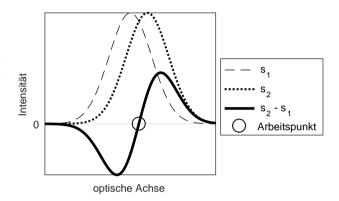


Abb. 1: Prinzipielle Darstellung der durch die Faser rückgekoppelten Intensitätssignale zweier Laserdioden: Die Signale s_1 und s_2 stellen den gemessenen Intensitätsverlauf zweier Lichtwellenlängen λ_1 und λ_2 dar. Die Differenz beider Signale bildet in der Mitte des Graphen einen annähernd linearen Arbeitsbereich aus. Der Arbeitspunkt der Maschinenregelung wird zweckmäßig in den Nulldurchgang gelegt.

2 Anwendungen des Sensors

In Kombination mit Nanopositionier- und Nanomessmaschinen bestimmt der optische Sensor die Korrekturbewegung des Probentisches in z-Richtung, während die Probe relativ zum Sensorkopf lateral verschoben wird. Die Korrekturbewegung, sowie die Messwerte der lateralen Ansteuerung bilden zusammen einen eindeutigen Positionswert für jeden gemessenen Punkt auf der Probenoberfläche. Somit repräsentiert die Bewegung des Probentisches die Oberfläche der Probe. In Hinblick auf mögliche Anwendungen können mit Hilfe dieses Systems hochauflösende Messaufgaben realisiert werden. Weiterhin wird diese Sensor-Aktor-Kombination genutzt, um eine konsequente Abstandsregelung zwischen Photolack und Laserfokus zu ermöglichen und somit den Anwendungsbereich von NPMMs um die maskenlose Photolithgrafie zu erweitern.

2.1 Messtechnische Untersuchungen

Die messtechnischen Eigenschaften des Sensors unterscheiden sich je nach verwendetem Objektiv. Eine Optik mit hoher Farbkorrektur führt zu einem schmalen Arbeitsbereich, da die Schnittweitendifferenz der Messwellenlängen verringert wird. Auch die numerische Apertur der verwendeten Optik beeinflusst die Intensität des in die Faser reflektierten Lichts. Folgende Untersuchungen und Ergebnisse beziehen sich auf die Verwendung eines $100\times$ Objektiv der Firma Nikon mit einer numerischen Apertur von 0.8.

Hinsichtlich des Auflösungsvermögens des Sensors müssen laterale und axiale Auflösung unterschiedlich betrachtet werden. Die laterale Auflösung ist weitestgehend durch Beugung begrenzt und kann beispielsweise mit dem Rayleigh-Kriterium bestimmt werden [17]. Da sich die eigentliche Messebene aber zwischen den Fokusebenen der zwei Messwellenlängen ausbildet, verschlechtert sich die tatsächliche laterale Auflösung etwas.

Mit Hilfe einer Quadrantenphotodiode kann der Querschnitt eines Strahls nach [14] messtechnisch bestimmt werden. Dabei wird der scharfkantige Übergang vom Steg zwischen den Quadranten auf die aktive Fläche als Foucault'sche Schneide betrachtet. Der messbare Anstieg der Photospannung an diesem Übergang lässt sich auf die Größe des Strahldurchmessers zurückrechnen. Wird diese Methodik entlang der optischen Achse durch den Fokus-

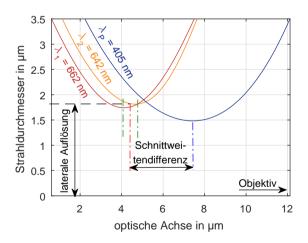


Abb. 2: Geometrische Beschreibung der fokussierten Wellenlängen λ_1 und λ_2 des Sensorsystems und der Fabrikationswellenlänge λ_P . Mit Hilfe der in [14] vorgestellten Methodik sind sowohl die Lage der Fokuspunktebenen als auch die Spotdurchmesser der fokussierten Laserstrahlen bestimmbar. Der Arbeitsbereich ist zwischen den Fokuspunktebenen der Messwellenlängen aufgespannt (grüne Strich-Punkt-Linien). Mittig im Arbeitsbereich liegt die Arbeitspunktebene, auf die die NPMM ihren Hub nachregelt (rote Strich-Punkt-Linie).

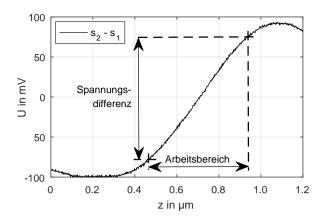


Abb. 3: Differenzsignal des chromatisch konfokalen Sensors. Der Arbeitsbereich wird im annähernd linearen Bereich des Graphen ausgebildet.

bereich angewendet, erhält man einen Umkehrpunkt - die Fokusebene der entsprechenden Wellenlänge. In Abbildung 2 sind die Strahldurchmesser in Abhängigkeit der relativen Höhenänderung entlang der optischen Achse aufgetragen. Der Arbeitsbereich zur Maschinenregelung wird durch die Fokusebenen der Messlaser aufgespannt. Der kritische Strahldurchmesser, der die laterale Auflösung begrenzt, beträgt in der Mitte des Arbeitsbereiches etwa 1,8 µm.

Die axiale Auflösung des Sensors wird von der Größe des Arbeitsbereiches und der messbaren Photospannung in diesem Bereich bestimmt. Der lineare Bereich des Differenzsignals liegt in der Größenordnung von 500 nm (vgl. Abb. 3). Der Spannungsunterschied in diesem Bereich liegt bei ca. 160 mV. Das ergibt eine elektrische Sensorauflösung von 3,1 nm/mV. In Verbindung mit dem AD-Wandler der NPMM, der über eine Auflösung von 0,3 mV/digit verfügt, wird eine Gesamtauflösung von etwa 1 nm/digit erreicht.

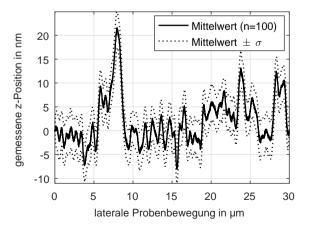


Abb. 4: Mittelwert der gemessenen z-Positionen von 100 Messwertaufnahmen des gleichen lateralen Messbereichs und Standardabweichung σ der z-Werte.

Zur quantitativen Bestimmung der Messpräzision des Systems wurde ein undefinierter Planspiegel in einem Bereich von 30 μ m 100 mal vermessen. In Abbildung 4 werden der Mittelwert der gemessenen z-Werte sowie die Standardabweichung σ dargestellt. Die Standardabweichung beträgt dabei ca. 5 nm.

2.2 Maskenlose Strukturierung

Direktes Laserschreiben hat sich als maskenloses Fabrikationsverfahren bewährt [12]. Das physikalische Prinzip hinter diesem Verfahren wird durch Photonenabsorptionsprozesse beschrieben [4]. Ein photosensitiver Resist (Photolack) wird dafür auf die Bearbeitungsfläche aufgetragen. Wird der Resist mit einer bestimmten Wellenlänge belichtet, polymerisiert bzw. depolymerisiert er an dieser Stelle. Nach dem Entwicklungsprozess bleiben die belichteten Bereiche (Negativlack) oder einzig die unbelichteten Bereiche (Positivlack) erhalten. Um das Sensorsystem für den beschriebenen Lithografieprozess zu verwenden, wird eine zusätzliche Laserlichtquelle in den Aufbau integriert (vgl. Abb. 5). Die Strahlengänge des chromatisch konfokalen Sensors und des Strukturierungslasers werden über einen dichroitischen Spiegel und einen Strahlteilerwürfel in dieselbe optische Achse gelenkt. Der kleinste

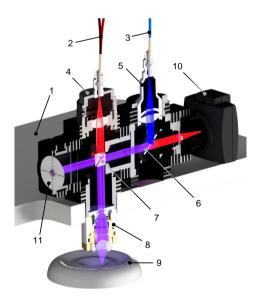


Abb. 5: Aufbau des Sensorkopfes zur Kombination der Messund Strukturierungslaser: 1 - Metrologischer Rahmen der NPMM; 2 - Faser des chromatisch konfokalen Sensors (λ_1, λ_2) ; Faser des Strukturierungslasers (λ_P) ; 4 - Fokussierkollimator; 5 - Fix-Kollimator; 6 - Dichroitischer Spiegel; 7 - 90:10 Strahlteilerwürfel; 8 - Objektiv (NA = 0,8); 9 - Messobjekt; 10 - Kamera; 11 - Schirm mit Markerplatte

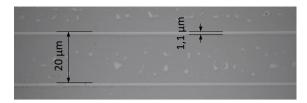


Abb. 6: Durch direktes Laserschreiben erzeugte Strukturen mit dem um einen Bearbeitungslaser erweiterten chromatisch konfokalen Sensor

Spotdurchmesser - und somit auch die minimale Strukturbreite - hängt direkt von der Wellenlänge ab [17]. Aus diesem Grund wird ein möglichst kurzwelliger fasergekoppelter Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda_P=405\,\mathrm{nm}$ in den Aufbau integriert. Unter Verwendung eines Objektivs mit der numerischen Apertur von 0,8 werden theoretische Strukturgrößen von weniger als 1 µm erreicht [17]. In der praktischen Anwendung konnte bereits in frühen Versuchen eine wiederholbare minimale Strukturbreite von 1,1 µm erzeugt werden (vgl. Abb. 6).

Ein Grund für die Diskrepanz zwischen theortischem und praktischem Wert der Strukturbreite ist wiederum auf den Farblängsfehler des Objektives zurückzuführen. Eine Schnittweitendifferenz bildet sich nun auch zwischen den Messwellenlängen $\lambda_1 = 642\,\mathrm{nm}$ und $\lambda_2 = 662\,\mathrm{nm}$ und

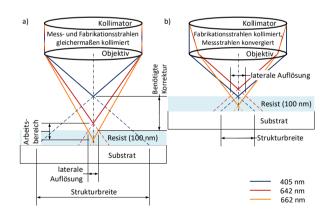


Abb. 7: Korrektur der Schnittweitendifferenz zwischen Mess- und Fabrikationslaser:

- a) Unkorrigiert: Der Fabrikationslaser bildet seinen Fokusspot nicht auf der Resistschicht aus. Der Strahl läuft hinter der Fokusebene auseinander und belichtet einen größeren Bereich der Resistschicht. Es kommt zu hohen Strukturbreiten.
- b) Korrigiert: Durch gezieltes Konvergieren der Messstrahlen wird der Arbeitsbereich zum Objektiv hin verschoben. Dieser umschließt nun die Fokusebene des Fabrikationslasers. Somit liegt der Fokusspot des $405\,\mathrm{nm}$ -Lasers während einer Messung direkt auf der Resistoberfläche. Die Strukturbreiten nehmen minimale Größe an.

der Fabrikationswellenlänge $\lambda_P=405\,\mathrm{nm}$ aus, die dazu führt, dass der Resist zwar an seiner Oberfläche angetastet und der Maschinenhub während der Messung nachgeregelt wird, der Fokus des Fabrikationslasers jedoch nicht auf der angetasteten Oberfläche liegt (vgl. Abb. 2). Der belichtete Bereich der Resistschicht und somit die Breite der entwickelten Strukuren vergrößert sich (vgl. Abb. 7a). Um die Schnittweitendifferenz zwischen der Arbeitsebene des Sensors und der Fokusebene des Fabrikationslasers zu korrigieren, ist der Sensorkopf an einen Fokussierkollimator angeschlossen (vgl. Abb. 5). Durch konvergieren der Messstrahlen vor Eintritt in das Objektiv verschieben sich die Fokusebenen der beiden Wellenlängen zum optischen Element hin. Dadurch wird die Schnittweitendifferenz gezielt korrigiert (vgl. Abb. 7b).

3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein neuer Sensor nach dem konfokalen Prinzip beschrieben. Die Integration des Sensors als Messsystem für Nanopositionier- und Nanomessmaschinen ist als eine Anwendung des Systems dargelegt. Das axiale und laterale Auflösungsvermögen, sowie eine Wiederholbarkeitsmessung des Sensors werden diskutiert. Als zusätzliche Anwendungsmöglichkeit des Systems wird ein lithografisches Verfahren erläutert, wozu der Aufbau um einen Strukturierungslaser erweitert wird. Eine Beschreibung zur Regulierung der Schnittweiten zwischen Strukturierungs- und Messlaser schließt den Aufsatz ab.

Danksagung: Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Graduiertenkollegs GRK 2182 der Technischen Universität Ilmenau, Deutschland.

Literatur

- E. Abbe. Messaparate für Physiker. In Zeitschrift für Instrumentenkunde - Organ für Mittheilungen aus dem gesammten Gebiete der wissenschaftlichen Technik, S. 446– 448.
- [2] F. G. Balzer, U. Gerhardt, T. Hausotte, K. Albrecht, E. Manske und G. Jäger. Application of a novel fibre-coupled confocal sensor in a nanopositioning and nanomeasuring machine. In 12th Euspen International Conference, 2012.
- [3] R. E. Bedford und G. Wyszecki. Axial chromatic aberration of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, 47(6), June 1957. 10.1364/josa.47.0564_1.
- [4] J. Fischer und M. Wegener. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit. Laser & Photonics Reviews, 7(1):22–44, 2013.

- [5] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte und H.-J. Büchner. Nano Measuring Machine for Zero Abbe Offset Coordinate-measuring. tm Technisches Messen, 67(7-8/2000), 2000. ISSN 0171-8096. 10.1524/teme.2000.67.7-8.319.
- [6] G. Jäger, T. Hausotte, E. Manske, H.-J. Büchner, R. Mastylo, N. Dorozhovets und N. Hofmann. Nanomeasuring and nanopositioning engineering. *Measurement*, 43(9), 2010. 10.1016/j.measurement.2010.04.008.
- [7] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, A. Müller und F. Balzer. Nanopositioning and nanomeasuring machine NPMM-200 a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 4(3), 2016. 10.1088/2051-672X/4/3/034004.
- [8] J. Kirchner, L. Weidenfeller, U. Gerhardt, R. Mastylo, M. Kühnel, S. Sinzinger und E. Manske, editors. A combined laser scanning and DLW tool for measuring and fabrication tasks with NPMM, 2019. International Society for Optics and Photonics.
- [9] M. Kühnel, T. Fröhlich, R. Füßl, M. Hoffmann, E. Manske, I. W. Rangelow, J. Reger, C. Schäffel, S. Sinzinger und J.-P. Zöllner. Towards alternative 3D nanofabrication in macroscopic working volumes. *Measurement Science and Technology*, 29(11), 2018. 10.1088/1361-6501/aadb57.
- [10] M. Quinten. Dickenbestimmung transparenter Schichten mit einem chromatisch-konfokalen Sensor. tm - Technisches Messen. 86(6). May 2019. 10.1515/teme-2019-0059.
- [11] A. K. Ruprecht, C. Pruss, H. J. Tiziani, W. Osten, P. Lucke, A. Last, J. Mohr und P. Lehmann. Confocal micro-optical distance sensor: Principle and design. SPIE Proceedings, S. 128. SPIE, 2005. 10.1117/12.612008.
- [12] A. Selimis, V. Mironov und M. Farsari. Direct laser writing: Principles and materials for scaffold 3D printing. *Microelectronic Engineering*, 132, 2015. 10.1016/j.mee.2014.10.001.
- [13] W. Sellmeier. Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spektrum einiger Substanzen. In Annalen der Physik, Band 143, S. 272–282.
- [14] Y. Shimizu, T. Maruyama, S. Nakagawa, Y.-L. Chen, H. Matsukuma und W. Gao. A PD-edge method associated with the laser autocollimation for measurement of a focused laser beam diameter. *Measurement Science and Technology*, 29(7), May 2018. 10.1088/1361-6501/aac0a6.
- [15] K. Takamasu, S. Ozawa, T. Asano, A. Suzuki, R. Furutani und S. Ozono. Basic concepts of nano-CMM. In *Jpn.-China Bilateral Symp. on Advanced Manufacturing Eng*, Band 155, 1996.
- [16] L. Weidenfeller, R. Schienbein, J. Kirchner, C. Reinhardt und E. Manske. Development of laser positioning system of high accuracy in the nanometer range. 10.1117/12.2312704.
- [17] F. Zhu und J.-Y. Ma. Direct Laser Writing Facility for Fabrication of Submicron Mask. *Chinese Physics Letters*, 31 (4), 2014. 10.1088/0256-307X/31/4/048102.
- [18] S. Zschäck, S. Hesse, A. Amthor, M. Katzschmann, C. Schäffel und C. Ament. Vergleich der scan-performance bei nanopositioniersystemen mit großem bewegungsbereich. tm - Technisches Messen, 81(6), Jan. 2014. 10.1515/teme-2014-0358.