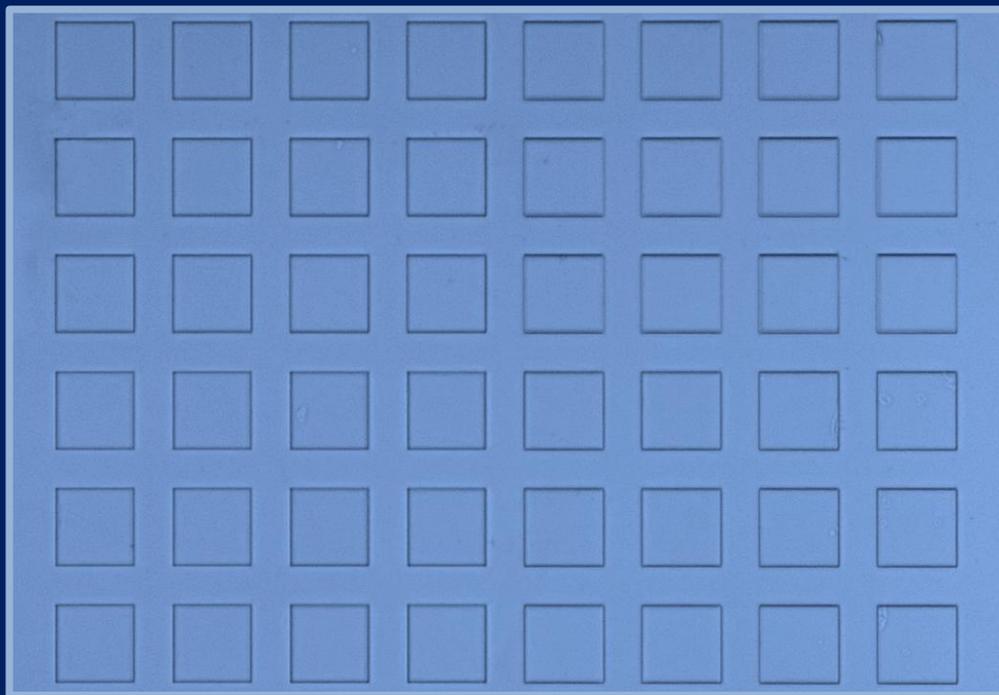


Florestan Köhler

Untersuchungen zu Fabry-Pérot Filterfeldern

Herstellung mittels Nanoimprinttechnologie,
experimentelle Charakterisierung und
Anwendungen



Untersuchungen zu Fabry-Pérot Filterfeldern: Herstellung mittels Nanoimprinttechnologie, experimentelle Charakterisierung und Anwendungen

Dissertation zur

Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr. - Ing.)

Im Fachbereich Elektrotechnik/Informatik

Der Universität Kassel

Vorgelegt von: Florestan Köhler

Gutachter: Prof. Dr. H. Hillmer
Prof. Dr. sc. techn. B. Witzigmann
Prof. Dr.-Ing. A. Bangert
Prof. Dr.-Ing. A. Claudi

Kassel im Juli 10

Tag der mündlichen Prüfung: 06.07.2010

Meinen Eltern und meinem Bruder

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt und andere als die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe. Alles Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Kein Teil dieser Arbeit ist in einem anderen Promotions- oder Habilitationsverfahren verwendet worden.

Ort, Datum

(Florestan Köhler)

Inhalt

Erklärung	I
Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Zusammenfassung.....	XI
2 Einleitung und Motivation: Bedeutung von miniaturisierten Spektrometern für bestehende und neue Anwendungen	1
2.1 Stand der Forschung auf dem Arbeitsgebiet der miniaturisierten Spektrometer	2
2.2 Ziele, Methodik und Aufbau dieser Arbeit	8
3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien.....	9
3.1 Beschreibung grundlegender Begriffe der Spektroskopie.....	9
3.2 Die optische spektrale Analyse.....	11
3.3 Beschreibung von Spektrometern, basierend auf unterschiedlichen Licht beugenden Elementen	13
3.4 Eine Auswahl theoretische Grundlagen zum Thema Licht	18
3.4.1 Dünne Schichten und ihre Eigenschaften in der Optik	24
3.4.2 Dünnschichtstapel und ihre Eigenschaften in der Optik.....	28
3.4.3 Randbedingungen.....	28
3.4.4 Die Transfermatrixmethode: Beschreibung von Grenzflächen.....	29
3.4.5 Die Transfermatrixmethode: Beschreibung von mehrere Grenzflächen	30
3.4.6 Eigenschaften nicht idealer Grenzflächen	32
3.4.7 Idealer planarer Fabry-Pérot-Resonator	33
3.4.8 Resonatormoden.....	34
3.5 Verlustbehafteter und nicht idealer Fabry-Pérot-Resonator.....	35
3.6 Bragg-Spiegel	42
3.7 Spektrometer, basierend auf Fabry-Pérot-Resonatoren	45
4 Nanoimprint-Lithografie.....	49
4.1 Nanoimprint-Lithografie – Grundlegende Technologie.....	49
4.2 Vorteile und Potenzial der Nanoimprint-Lithografie	50

4.3	Anwendungsgebiete der Nanoimprint-Lithografie.....	51
4.4	Stempelherstellung	52
4.4.1	Stempel aus dem INA	53
4.5	Nanoimprint-Prägematerial	56
4.5.1	Am INA verwendete Prägematerialien.....	57
4.6	Nanoimprint-Varianten	58
5	Experimentelle Charakterisierung der Filter	62
5.1	Messaufbau für flächige Filter.....	62
5.2	Das Mikroskopspektrometer.....	63
5.3	Temporärer Messaufbau des Filterfeldes	64
6	Experimentelle Untersuchungen verschiedener Nanoimprint- Verfahren.....	67
6.1	Heißprägemethode.....	67
6.2	UV-Prägen (UV imprint) im INA.....	71
6.3	UV-Prägen (UV imprint) bei SÜSS MicroTec in Garching	89
6.4	Prägungen mit dem MA6 für den Spektrometer-Demonstrator	102
6.5	Auswertung aller Prägeversuchsreihen	106
7	Spektrale Analyse des Filterfeldes.....	109
7.1	Ergebnisse	109
7.2	Diskussion	113
8	Ausblick: Zukünftige Bedeutung der Nanoimprint-Technologie für auf FP-Filterfeldern basierende Nanospektrometer	115
8.1	Die SCIL-Technologie für zukünftige großflächige Prägungen, um die Herstellungskosten weiter zu senken.....	116
	Literaturverzeichnis	121
	Eigene Publikationen	135
	Über den Autor	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mini-Spektrometer C10988MA der Firma HAMAMATSU. Links: eine Fotografie des Spektrometers. Rechts: schematisches Funktionsprinzip. Das Licht fällt durch den Eingangsschlitz auf das in die Linse geprägt Gitter und wird, aufgespalten in seine Spektralkomponenten, auf den Detektor reflektiert. [21].....	3
Abbildung 2: Ein in Silizium integriertes, auf Gitter zur Beugung des Lichtes basierendes Spektrometer [13].....	4
Abbildung 3: Schematische Zeichnung des Filtersystems. Die unterschiedlichen lateralen Ausdehnungen der strukturierten Schichten zwischen den Spiegeln sorgen für einen unterschiedlichen Brechungsindex in der Kavität. Dadurch entstehen Filterflächen mit unterschiedlichen Filtern [22].	5
Abbildung 4: links: ein 4 x 4-Mikrospektrometerfeld. Jede der Fabry-Pérot-Kavitäten ist ausgelegt, um eine unterschiedliche Wellenlänge des Lichts zu transmittieren. Rechts: eine Fotografie eines hergestellten Mikrospektrometers mit 4 x 4 Kanälen [23].....	6
Abbildung 5: Schrittweise Deposition einer treppenförmigen Struktur mittels geeigneter Masken. Diese ermöglichen es, $2N$ verschiedene Höhen in N Prozessschritten herzustellen [24]	6
Abbildung 6: Sichtbares Lichtspektrum [31].....	10
Abbildung 7: Prinzipieller Aufbau eines Spektrometers [2].....	13
Abbildung 8: Brechung des Lichts beim Durchlaufen eines Prismas.....	14
Abbildung 9: Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle in einer dünnen Schicht auf einem Substrat (in Anlehnung an [40], [42]).....	25
Abbildung 10: Idealer Fall, eine monochromatische Welle trifft auf ein lineares, homogenes und nicht dispersives Material. Dann entstehen Transmission, Absorption und Reflexion. .	32
Abbildung 11: Nicht idealer Fall von Transmission und Reflexion an einer Grenzfläche [48].	33
Abbildung 12: Fabry-Pérot-Resonator, bestehend aus zwei parallelen planaren Spiegeln..	33
Abbildung 13: Feldverteilung der verschiedenen Moden eines planaren Interferometers [49].	34
Abbildung 14: Diagramm der optischen Schleife	35
Abbildung 15: Durch die Vor-und-zurück-Reflexion zwischen den Resonatorspiegeln entsteht eine Phasenverschiebung [49].....	36
Abbildung 16: Die Halbwertsbreite (FWHM) und der freie spektrale Abstand (FSR) bestimmen die Finesse.	40
Abbildung 17: Modellierter Transmissionsgrad verschiedener Bragg-Spiegel aus SiO_2 (L) und Si_3N_4 (H) auf Borosilicatglas mit einer Designwellenlänge von 650 nm. Variiert wurde die Anzahl der Perioden des Spiegels: 4,5, 9,5 und 14,5 Perioden.	43
Abbildung 18: Modellierter Transmissionsgrad verschiedener Bragg-Spiegel aus SiO_2 (L) und Si_3N_4 (H) auf Borosilikatglas mit einer Designwellenlänge von 650 nm. Variiert wurde die Anzahl der Perioden (9, 9,5 und 10 Perioden), sodass die an die Luft angrenzende Schicht variiert.....	44

Abbildung 19: Durchstimmbarer Spektrometertyp.....	45
Abbildung 20: Statischer Spektrometertyp.....	46
Abbildung 21: a) reales Spektrum einer monochromatischen Welle, b) aufgezeichnetes Spektrum eines realen Spektrometers.....	46
Abbildung 22: a) das von der Lichtquelle ausgestrahlte Spektrum, b) die einzelnen Intensitäten der Resonatoren, welche zusammen das Gesamtspektrum abbilden.....	47
Abbildung 23: Mikroskopaufnahme eines 3-D-Nanoimprint-Stempels mit bis zu 64 verschiedenen Höhen [105].....	54
Abbildung 24: Weißlichtinterferometermessung der Oberflächenstruktur eines 3-D-Nanoimprint-Stempels. Die Zahlen repräsentieren die designte Höhe und die gemessene (in Klammern). Die untere Zeichnung zeigt eine Liniendarstellung des Profils [105].....	54
Abbildung 25: WLI-Messung, um die Oberflächenrauigkeit einer Mesavertiefung zu analysieren [105].....	55
Abbildung 26: Stempel (oben) und dazugehörige Prägung (unten). Die Oberflächenrauigkeit beträgt jeweils weniger als 1 nm.....	55
Abbildung 27: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Schleuderdrehzahl (nach Backschritt) bei einer Schleuderdauer von 60 s für mr-UVCur06 (links) und mr-UVCur21 (rechts) laut Hersteller [119], [120].	58
Abbildung 28: Messaufbau mit a) Spektrometer, b) Lichtquelle, c) Transmissionsmessung sowie d) Reflexionsmessung.....	63
Abbildung 29: Mikroskopspektrometer Axio Imager D1 der Firma Carl Zeiss.....	64
Abbildung 30: Temporärer Messaufbau der Firma Opsolution.....	65
Abbildung 31: Darstellung eines EVG501-Manual-Thermo-Compression-Bonder-Systems. Dieses System wird für die Heißprägungen an der TU Braunschweig verwendet [159].....	67
Abbildung 32: Schematische Zeichnung der EVG501-Heißpräganlage beim Bestücken der Prägekammer. Der Schichtstapel aus (von unten nach oben) elastischer Unterlage zur Druckverteilung, opakem Stempel und beschichtetem Substrat wird auf dem unteren Probenhalter justiert.....	68
Abbildung 33: Schematische Zeichnung der EVG501-Heißpräganlage während des Prägeprozesses. Nach dem Evakuieren der Prägekammer wird die Prägung mittels Druck und Hitze ausgeführt.....	69
Abbildung 34: Schematische Zeichnung der EVG501-Heißpräganlage nach dem Abkühlen. Das geprägte PMMA wird mittels Pressluftkühlung unter seine Glastemperatur abgekühlt, um es so wieder formstabil zu machen. Der Stapel aus Stempel und Substrat kann nun manuell herausgenommen und getrennt werden.....	69
Abbildung 35: Am INA hergestellte Stempel nach den Prägeversuchsreihen. Der linke Stempel ist noch mit dem Substrat verbunden. Eine erfolgreiche Trennung war nicht möglich. Rechts zu sehen ist ein Teilstück eines bei einem Trennungsversuch zerbrochenen Stempels.....	70
Abbildung 36: Karl-SÜSS-MA4-Mask-Aligner.....	72
Abbildung 37: Transmission von Borosilicatglas bei einer Dicke von 2 mm [161].....	74
Abbildung 38: Vakuum-Adapter für den MA4 im INA. Material: Quarzglas. In der Explosionszeichnung (links) sind von unten nach oben zu erkennen: erste Quarzplatte mit	

den Vakuumeinlasslöchern und den eingeschliffenen Vakuumkanälen, zweite Quarzplatte mit den Ausgangslöchern, auf die das Substrat gelegt wird, und, etwas dunkler, das Substrat. Rechts sieht man das zusammengefügte Bauteil.....	74
Abbildung 39: Vakuum-Adapter mit der Membran in der Mitte.....	75
Abbildung 40: Gummiring für Vakuumkontaktmodus mit den entsprechenden Abmessungen.....	76
Abbildung 41: Schematische Veranschaulichung des Vakuumkontaktmodus mit zwischengelegtem Gummiring.....	76
Abbildung 42: Schematische Veranschaulichung des Vakuumkontaktmodus mit der Aluminiumplatte auf der Vakuumlippe.....	77
Abbildung 43: Lichtmikroskopische Aufnahmen zeigen den Einfluss der Aluminiumplatte auf die Qualität der Prägung. Links ist ein Prägeergebnis vor dem Verwenden der Aluminiumplatte zu sehen, rechts nach der Prägung mit der Platte. Beim Vergleich der Aufnahmen ist der Unterschied zwischen beiden deutlich zu erkennen: Rechts sind weniger Lufteinschlüsse vorhanden.....	77
Abbildung 44: MA4.....	78
Abbildung 45: Prägeschritt 1: Schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA.....	78
Abbildung 46: Prägeschritt 2: Schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA (Hartkontaktmodus).....	78
Abbildung 47: Prägeschritt 2: Schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA (Vakuumkontaktmodus).....	78
Abbildung 48: Prägeschritt 3: Aushärten des Resists durch UV-Belichtung der Probe: schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA.....	79
Abbildung 49: Prägeschritt 4: Absenken des Chucks: schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA.....	79
Abbildung 50: Lichtmikroskopische Aufnahme von den mit dem MA4 geprägten und präzise abgeformten Strukturen. Links ist ein Feld (1,35 x 1,35 mm ²) mit 100 x 100 µm ² -Strukturen bei einer Vergrößerung von x5 abgebildet, rechts ein x20 vergrößerter Ausschnitt mit 2 Strukturen.....	80
Abbildung 51: Lichtmikroskopische Abbildungen der Beispiele für Prägedefekte: a) Rand um den Stempel und b) unvollständig ausgefüllte Strukturen.....	80
Abbildung 52: Lichtmikroskopische Abbildungen zeigen ein Beispiel für eine nicht gelungene Prägung. Der Resistauftrag auf ein Glassubstrat erfolgte mittels Spin-Coating-Methode. Die Strukturen wurden aufgrund des geringen Drucks unvollständig übertragen. Außerdem enthalten die Proben viele vermeintliche Blasen, die entweder auf einen langen Softbake oder eine dicke Fotolackschicht zurückzuführen sind.....	82
Abbildung 53: Lichtmikroskopische Aufnahmen zweier Prägungen (Array mit 64 Strukturen). Rechts erfolgte der Resistauftrag direkt auf den Stempel, somit konnten Lufteinschlüsse in den Vertiefungen innerhalb des Stempels, wie sie auf der linken Aufnahme zu sehen sind, vermieden werden.....	83
Abbildung 54: Die lichtmikroskopischen Aufnahmen zeigen Bereiche eines Stempels, auf dem Resistreste haften. Die Ringmuster (Newtonsche Ringe) bei beiden Aufnahmen entstanden durch Interferenz an der dünnen Luftschicht zwischen dem Substrat und dem	

Resist bei UV-Beleuchtung, was auf die Luftpneinschlüsse zwischen dem Substrat und dem Resist zurückzuführen ist.	83
Abbildung 55: Lichtmikroskopische Aufnahmen zweier Prägungen auf den Objektträger: Die Herkunft der großen unausgefüllten Bereiche ist auf die Oberflächenwelligkeit der Objektträger zurückzuführen. Es konnte nicht exakt parallel zur Substratoberfläche gestempelt werden.	84
Abbildung 56: Lichtmikroskopische Aufnahmen verschiedener Proben nach der Prägung mit MA4. Bei den Substraten handelt es sich hier um DBR-Spiegel. Die strukturierte mr-UVCur06-Schicht konnte, was den Strukturübertrag angeht, nicht erfolgreich hergestellt werden. Der Grund hierfür war unzureichende Haftung zwischen dem DBR-Spiegel und der Restschichtschicht.....	85
Abbildung 57: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines Prägestempels, die zwei extreme Beispiele des Resisthaftproblems nach der Prägung darstellen: a) besonders stark mit Resist verunreinigter Bereich; b) ein ebenso stark verschmutzter Bereich mit einem Staubpartikel in der Mitte.....	85
Abbildung 58: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines mit n-Octyltrichlorsilan beschichteten Stempels nach vier Prägungen ohne einen Zwischenreinigungsschritt. An den Bildern ist deutlich zu erkennen, dass keine Resistreste vorhanden sind.....	88
Abbildung 59: MA6 – optimiert für UV-NIL [160].	89
Abbildung 60: Chuck und Stempelhalter der MA6 [160].	90
Abbildung 61: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der Chuck ist mit einem Wafer beladen und befindet sich in Ausgangsstellung für eine Prägung.	91
Abbildung 62: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der mit einem Wafer beladene Chuck ist nach oben gefahren, ca. 100 µm entfernt vom Stempel.....	92
Abbildung 63: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Die Dichtlippen, die sich im Chuck befindlichen werden aufgeblasen um ein Vakuum zwischen Stempel und Wafer zu ermöglichen.....	92
Abbildung 64: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der Stempel wird in das, auf dem Wafer befindliche Material gedrückt.....	93
Abbildung 65: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der Chuck befindet sich wieder in Ausgangsposition und der geprägte Wafer wurde entnommen.	94
Abbildung 66: Imprint-Ergebnisse in 5-facher (links) und 20-facher (rechts) Vergrößerung. Mesagröße: 100 µm; Abstand zwischen den Mesen: 50 µm; Resist: mr-UVCur06.....	95
Abbildung 67: Imprint-Ergebnisse in 100-facher (links und rechts) Vergrößerung. Mesagröße: 100 µm; Resist: mr-UVCur06.....	95
Abbildung 68: WLI-Messung des verwendeten transparenten Stempels.....	97
Abbildung 69: Imprintergebnisse, betrachtet in 5facher Vergrößerung durch ein Lichtmikroskop.	98
Abbildung 70: Imprintergebnisse, betrachtet in 20 und 50facher Vergrößerung durch ein Lichtmikroskop.	98
Abbildung 71: Messergebnis eines FP-Filterfeldes mittels temporären Messaufbaus bei 466nm.	99
Abbildung 72: Messergebnis eines FP-Filterfeldes mittels temporären Messaufbaus bei ...	101

Abbildung 73: Lichtmikroskopaufnahmen der Demonstratorprägungen.....	103
Abbildung 74: WLI-Aufnahmen der Demonstratorprägung.....	104
Abbildung 75: Detaillierte WLI-Aufnahme der Demonstratorprägung.....	104
Abbildung 76: Messergebnisse der spektralen Analyse eines Fabry-Pérot-Filterfeldes mit 64 einzelnen Filtern.	110
Abbildung 77: Vier Transmissionsbänder, die im Stempeldesign die gleiche Höhe aufweisen. Bei der spektralen Analyse treten Unterschiede in den Wellenlängen von bis zu 1 nm auf.	111
Abbildung 78: Spektrale Analyse des hergestellten Filterfeldes. Zu sehen sind fünf Messungen von verschiedenen Mesen mit verschiedenen Kavitätshöhen. Dadurch entstehen die zu erkennenden Transmissionen innerhalb des Stoppbandes. Je kleiner die Kavitätshöhe ist, desto kleiner ist auch die Wellenlänge des Maximums des spektralen Filterprofils. Die Maxima erstrecken sich von 523 nm bis 626 nm.....	112
Abbildung 79: Ausschnittvergrößerung des Maximums des spektralen Filterprofils 613 nm. Die Halbwertsbreite (FWHM) beträgt dabei ca. 3 nm.....	113
Abbildung 80: Schematische Darstellung des SCIL Prägeprozesses. Zunächst wird der Stempel mittels Vakuum am Stempelhalter fixiert (1.). Danach wird die Vakuumfixierung nach und nach gelöst und der Stempel in das Material gedrückt (2-3). Hat sich der Stempel vollständig, über die gesamte zu prägende Fläche auf dem Substrat ausgedehnt, wird das Prägematerial ausgehärtet (4). Danach wird das Vakuum wieder nach und nach zwischen Stempel und Stempelhalter gezogen und der Stempel sukzessive von der Prägung gelöst (5-6) [28].....	117
Abbildung 81: SCIL Prägeergebnisse [173].....	118
Abbildung 82: Zu sehen sind Lichtmikroskopaufnahmen einer mit SCIL geprägten Probe. Es sind kleine Defekte an den Rändern der Mesen zu erkennen.....	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Oberflächenrauigkeit und vertikale Auflösung von nicht transparenten und transparenten 3-D-Nanoimprint-Stempeln [105].	55
Tabelle 2: Tabelle zur Auswertung des Heißprägens. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.	71
Tabelle 3: Tabelle zur Auswertung des UV-Prägen (UV imprint) im INA. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.	88
Tabelle 4: Tabelle zur Auswertung des UV-Prägen (UV imprint) bei SÜSS MicroTec in Garching. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.	96
Tabelle 5: Tabelle zur Auswertung der Glasstempel-Prägungen am MA6. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.	100
Tabelle 6: Tabelle zur Auswertung der Prägungen mit dem MA6 für den Spektrometer-Demonstrator. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.	104
Tabelle 7: Zusammenstellung der Ergebnisse aus den Tabellen 2 bis 6.	106
Tabelle 8: Intensitäten in % der fünf Maxima der Filterprofile.	112
Tabelle 9: Vergleich dreier miniaturisierter auf Fabry-Pérot-Filterfeldern basierender Ansätze. Das im INA hergestellte Feld besitzt Kavitäten, die mittels Nanoimprint-Verfahren geprägt wurden. Dies verkürzt die technologische Herstellung solcher Felder beträchtlich.	113

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
AAL	Ambient Assisted Living
AFM	Atomic Force Microscope
AlGaAs	Aluminium gallium arsenide
a-PFPE	Acryloxy Perfluoropolyether
ATR	Attenuated Total Reflexion
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
c	Lichtgeschwindigkeit
CCD	Charge-coupled Device
DBR	Distributed Bragg Reflector
DIN	Deutsche Institut für Normung e. V.
DNA	Desoxyribonukleinsäure
e-Beam	Elektronenstrahl
E-Modul	Elastizitätsmodul
et. al	Lateinisch für "und andere"
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
FP	Fabry-Pérot
FPF	Fabry-Pérot Filter
FSR	Freier Spektralbereich
FWHM	Full Width at Half Maximum
GaAs	Galliumarsenid
G-Modul	Gleitmodul
HCl	Salzsäure
He-Ne-Laser	Helium-Neon-Laser
HMDS	Hexamethyldisilazan
IESE	International Solar Energy Society
INA	Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik
Ink-Jet Drucker	Tintenstrahldrucker
In-situ	lateinisch für "an Ort und Stelle"
IR	Infrarot
ISBD	Ionen sputter beam deposition
J	Joule
MA4	Mask Aligner 4
MA6	Mask Aligner 6
Mesa	Spanisch: "Tafelberg"
NIL	Nanoimprintlithography
nm	Nanometer
OPN	Opsolution Nanophotonic

PDMS	Polydimethylsiloxan
PECVD	plasma enhanced chemical vapour deposition
PGO	Präzisions Glas & Optik GmbH
PMMA	Polymethylmethacrylat
R	Auflösungsvermögen
RM	replica molding
SCIL	Substrate Conformal Imprint Lithography
SFIL	step-and-flash imprint lithography
Si	Silicium
SiO	Siliciummonoxid
sr	Steradian
T-NIL	thermische Nanoimprintlithography
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolett
V	Volt
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
W	Watt
WLI	Weißlichtinterferometrie
WSE	Wellenlängenselektives Element
ZrO	Zirconiumoxid

1 Zusammenfassung

Die spektrale Zusammensetzung von Licht ändert sich, wenn es mit gasförmiger, flüssiger oder fester Materie d.h. mit Ionen, Atomen, Molekülen, Atom- und Molekülverbänden und amorphen oder kristallinen Festkörpern interagiert. Spektroskopische Messungen des Lichts nach der Wechselwirkung geben Aufschluss über die Eigenschaften der zu untersuchenden Materie [2]. Viele der heute noch nicht realisierbaren Ideen und Konzepte in den verschiedensten Anwendungsfeldern der Sensorik benötigen aber für ihre Umsetzung extrem miniaturisierte Spektrometer als Kernbestandteil der Sensoren. Ziel ist es jedoch nicht, dem Anwender dieser Sensoren Informationen über das Spektrum zu liefern, sondern die ausgewerteten spektralen Information als Indikator zum Handeln zu nutzen. Derartige intelligente Sensoren werden in Zukunft unter anderem dazu beitragen intelligente persönliche Umgebungen (engl.: smart rooms, smart buildings, smart cities, smart personal environments) zu entwerfen und zu realisieren. Grundvoraussetzung für die Erschließung der verschiedenen Anwendungsgebiete sind Spektrometer, die die Anforderungen an niedrige Kosten, hohe Stückzahlen sowie geringe Größe und geringes Gewicht besser als verfügbare Hochleistungsgitter-Spektrometer erfüllen, die zwar bereits in den Bereich weniger Zentimeter miniaturisiert wurden, aber immer noch makroskopisch sind.

Ziel dieser Arbeit ist es, zu zeigen, dass es möglich ist, ein Fabry-Pérot Filterfeld herzustellen, welches später den Kern eines Nanospektrometers darstellen soll, bei dem die unterschiedlichen Kavitäten in einem einzigen Schritt mithilfe der Nanoimprint-Technologie erzeugt werden. Angesichts des Forschungsdefizits hinsichtlich der Nutzung der Nanoimprint-Technologie zur Fertigung von in ihrer Höhe exakten Strukturen werden in der vorliegenden Arbeit zwei Nanoimprint-Technologien untersucht: Das Heißprägen und das UV-Prägen. Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein Fabry-Pérot Filterfeld, welches mittels geeigneter Nanoimprint-Technologie hergestellt wurde und demonstriert, dass ein Nanospektrometer auf der Basis eines Feldes von Filtern technisch realisierbar ist.

Dazu werden im praktischen Teil dieser Arbeit (Untersuchung der Prägeprozesse) verschiedene technologische Methoden und Maschinen vorgestellt und die damit erreichten Ergebnisse hinsichtlich der Fabry-Pérot-Filterfelder verglichen. Die hergestellten Filterfelder wurden systematisch spektral vermessen. Diese Analyse zeigt 64 Transmissionsbänder der einzelnen Filter eines Feldes. Ein Vergleich mit publizierten Arbeiten des Standes der Wissenschaft und Technik zeigt, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine deutliche Verbesserung erreicht wurde. So konnte eine drastische Steigerung der transmittierten Lichtintensität der Filter erzielt werden und eine Nanoimprint-Methode identifiziert werden, mit welcher es möglich ist, einen Demonstrator herzustellen. Aufgrund der im Rahmen einer ausführlichen Charakterisierung ermittelten sehr guten experimentellen Ergebnisse des Demonstrators kann ein Nanospektrometer mit dem Fabry-Pérot-Filterfeld als Kernbestandteil in Zukunft hergestellt werden.

2 Einleitung und Motivation: Bedeutung von miniaturisierten Spektrometern für bestehende und neue Anwendungen

Licht verändert sich in seiner spektralen Zusammensetzung, wenn es mit gasförmiger, flüssiger oder fester Materie d.h. mit Ionen, Atomen, Molekülen, Atom- und Molekülverbänden und amorphen oder kristallinen Festkörpern interagiert. Dieses veränderte Lichtspektrum gibt bei seiner Messung Aufschluss über die Bestandteile der zu untersuchenden Materie [1].

In der Lebensmittelkontrolle kommt beispielsweise die Spektroskopie zur quantitativen Bestimmung von Lebensmittelinhaltsstoffen und Zusatzstoffen zum Einsatz und bildet gleichzeitig die Grundlage für die quantitative enzymatische Analyse [2]. In der Prozesskontrolle wird die optische ATR-Spektroskopie (Attenuated Total Reflexion, auch abgeschwächte Totalreflexion) verwendet, um chemische Reaktionen in hoher Konzentration bis hin zu Suspension zu überwachen [3]. Bei der In-situ-Prozesskontrolle von Beschichtungen findet die fouriertransformierte Infrarotspektroskopie Anwendung [4]. Auch in der Medizin hat die optische Spektroskopie schon eine lange Tradition. Bereits 1977 veröffentlichte Jöbsis [5] eine Methode, die Sauerstoffsättigung des Zytochroms a, a₃, und das durchschnittliche Hämoglobin-Oxihämoglobin-Gleichgewicht spektroskopisch zu bestimmen. Beispiele für weitere Anwendungen auf diesem Gebiet sind z. B. im „Handbook of optical biomedical diagnostics“ [6] von Tuchin dargestellt.

Die für diese Anwendungen verwendeten Spektrometer besitzen in der Regel ein hohes Auflösungsvermögen, das es erlaubt genaueste spektrale Messungen durchzuführen. Dabei beruht ihr Funktionsprinzip heutzutage meist auf Gittern als Licht beugenden Elementen, wodurch sie teilweise groß, schwer und teuer werden. Ältere Geräte dieser Bauform besitzen eine Länge von über 1 m und können ein Gewicht von mehr als 500 kg erreichen. Ein solches Spektrometer wurde z. B. von Lindblom et al. [7] entwickelt, es ist etwa 1 m lang und wiegt ca. 600 kg. Das erreichte Auflösungsvermögen bei diesem Gerät beträgt $R = 2 \cdot 10^6$, wobei das Auflösungsvermögen R dabei als $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ definiert ist. Mit λ , der zu messenden Wellenlänge, und $\Delta\lambda$, dem kleinsten noch unterscheidbaren Abstand zweier Lichtintensitätsmaxima, ist das Auflösungsvermögen eines Spektrometers das Verhältnis zwischen betrachteter Wellenlänge und kleinstem Abstand zweier Maxima. Oft wird für $\Delta\lambda$ die Halbwertbreite eines Transmissionsbandes eingesetzt [8]. Die Anschaffungskosten solcher Instrumente liegen bei einigen Hunderttausend Euro, wodurch sich bei zusätzlicher Betrachtung von Größe und Gewicht ihre Anwendungsfelder auf singuläre und stationäre Fälle einschränken. Mobile Anwendungen oder Anwendungen, bei denen mehrere Spektrometer gleichzeitig eingesetzt werden, sind somit nicht realisierbar.

Neuere Spektrometer, deren Abmaße im Zuge der Weiterentwicklung reduziert wurden und die etwa handtellergrößer sind, lassen sich zwar bequem transportieren, eine dauerhafte mobile Anwendung, vergleichbar mit anderen mobilen Geräten wie dem allgegenwärtigen Mobiltelefon, lassen aber auch diese nicht zu.

Doch genau das ist wünschenswert. Viele heute noch nicht realisierbare Ideen und Konzepte in den verschiedensten Anwendungsfeldern benötigen für ihre Umsetzung ein extrem miniaturisiertes Spektrometer. Wolffenbuttel verwies 2004 in seiner Publikation „State-of-the-Art in Integrated Optical Microspectrometers“ [8] auf die Anforderungen der Industrie und somit auch ihrer Kunden hin, miniaturisierte Spektrometer erwerben zu können, die in sehr großer Anzahl für eine breite Masse der Bevölkerung in verschiedensten Geräten zugänglich sind. Sie sollen dem Anwender keinerlei Wissen über Spektren und deren Analyse abverlangen, sondern intuitiv bedienbar sein und mit einfachen Benutzeroberflächen dafür sorgen, dass die Lebensqualität der Nutzer steigt. So können in Zukunft für die Fitness relevante Werte mobil zur jeder Zeit gemessen werden, vergleichbar mit heutigen Pulsuhren, und das Training so angepasst sowie die individuelle Leistung gezielt gesteigert werden. Im medizinischen Bereich können vielleicht in Zukunft Krankheiten durch eine kontinuierliche Messung relevanter Werte, die Menschen mit erhöhtem Krankheitsrisiko zuhause selbstständig durchführen, frühzeitig erkannt werden. So berichtet Prof. Dr. Dieter Rombach vom Fraunhofer IESE auf dem 3. AAL-Kongress von BMBF und VDE 2010 [9], dass nur durch Entwicklung und Einsatz vernetzter, intelligenter Sensoren das deutsche Niveau im Gesundheits- und Pflegebereich aufrechtzuerhalten ist. Zu solchen Sensoren sollen in Zukunft die miniaturisierten Spektrometer gehören.

Grundvoraussetzung für die Erschließung dieser Anwendungsgebiete sind Spektrometer, die die Anforderungen an niedrige Kosten, hohe Stückzahlen sowie geringe Größe und geringes Gewicht besser als verfügbare makroskopische Hochleistungs-Mehrfachgitter-Spektrometer erfüllen.

Daraus ergibt sich die Forderung, miniaturisierte, flexibel einsetzbare Spektrometer mit Methoden herzustellen, die den Einsatz in großen Stückzahlen ermöglichen. Zu diesem Ansatz kamen Wissenschaftler schon vor mehr als 20 Jahren und begannen erste Ansätze für die Fertigung miniaturisierter Spektrometer mit Mikro- und Nanotechnologie zu entwickeln.

2.1 Stand der Forschung auf dem Arbeitsgebiet der miniaturisierten Spektrometer

Seit den 1990er Jahren präsentierten verschiedene wissenschaftliche Gruppen Ergebnisse auf einem Gebiet, das als Stand der Forschung und Technik auf dem von der vorliegenden Arbeit adressierten Thema anzusehen ist [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19].

Miniaturisierte gitterbasierte Spektrometer

Yee et al. [11] präsentierten 1997 ein miniaturisiertes Spektrometer auf der Basis eines Gitters, welches über einem CCD-Detektorfeld positioniert ist. Dieses Gitter spaltet das Licht spektral auf, das nachfolgend auf das CCD-Detektorfeld fällt und dort aufgetrennt nach Wellenlängeninterwallen detektiert wird. Der Abstand zwischen dem Gitter und dem Detektor bestimmt bei diesem Ansatz das Auflösungsvermögen. Die gemessene Auflösung beträgt $R = 69,8$, bei einer Wellenlänge von 632,8 nm.

2 Einleitung und Motivation: Bedeutung von miniaturisierten Spektrometern für bestehende und neue Anwendungen

Ein weiterer Ansatz gitterbasierter Spektrometer findet sich heute in den neusten Produkten der Firma HAMAMATSU PHOTONICS wieder [20] (siehe Abbildung 1). Das Licht fällt dabei nicht mehr durch ein Gitter auf den Spiegel, sondern durch einen Eingangsspalt auf ein Gitter direkt im Spiegel und wird dadurch gebeugt. Von dem Spiegel wird es nachfolgend auf den Fotodetektor gelenkt und dort erfasst. Dieser Ansatz selbst ist nicht neu und es gibt zahlreiche Produkte, die in ähnlicher Weise arbeiten, neu ist jedoch die starke Verkleinerung des Spektrometers. Diese wird erreicht, indem das Gitter in eine Linse geprägt wird. Dieses Mini-Spektrometer arbeitet in dem Bereich von 340 nm bis 750 nm. Der Hersteller gibt eine Auflösung von 12 nm an, was zu einem Auflösungsvermögen von etwa $R = 45$ führt.

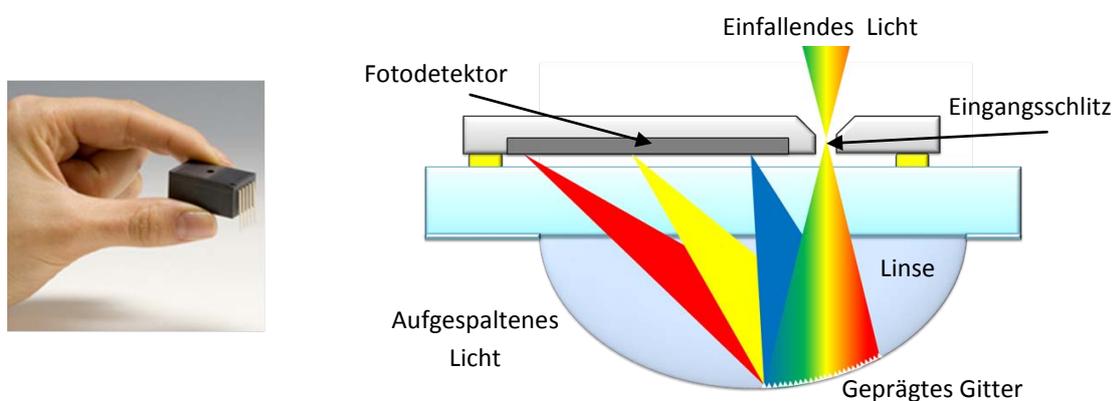


Abbildung 1: Mini-Spektrometer C10988MA der Firma HAMAMATSU. Links: eine Fotografie des Spektrometers. Rechts: schematisches Funktionsprinzip. Das Licht fällt durch den Eingangsschlitz auf das in die Linse geprägte Gitter und wird, aufgespalten in seine Spektralkomponenten, auf den Detektor reflektiert. [20].

T. Kwa et al. [12] entwickelte ein in Silizium integriertes Spektrometer. Es beruht ebenfalls auf Gittern zur Lichtbeugung. Es erreicht eine Auflösung von $R = 10$, bei Wellenlängen zwischen 380 nm und 730 nm. Damit besitzt es eine geringere Auflösung als auf Interferometrie beruhende Spektrometer, ist aber kompatibel mit der Integration in Silizium. Bei der verwendeten Technik, dem „Wafer-zu-Wafer-Bonding“, wird der obere, mit einem Transmissionsgitter versehene Wafer auf einen unteren Wafer, in dem Spiegel produziert wurden, gebracht. Das Licht fällt dann durch das Gitter, umgelenkt mittels der Spiegel, auf das ebenfalls im oberen Spiegel integrierte Detektorfeld (siehe Abbildung 2).

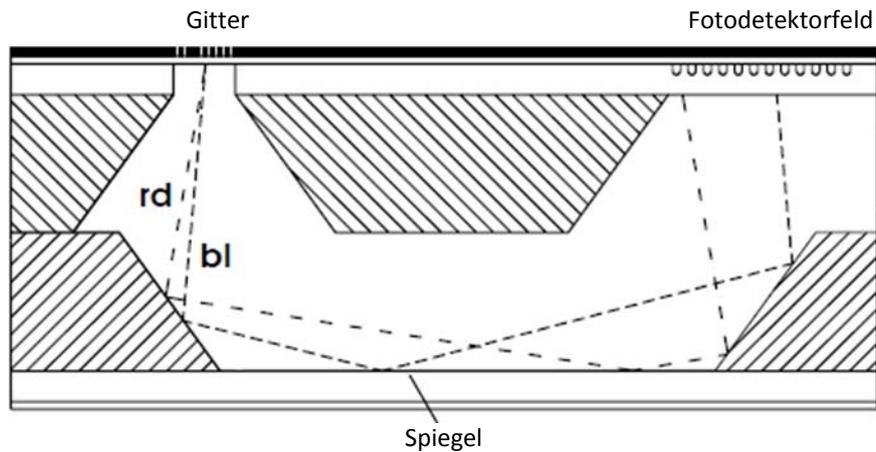


Abbildung 2: Ein in Silizium integriertes, auf Gitter zur Beugung des Lichtes basierendes Spektrometer [12].

Miniaturisierte Spektrometer, basierend auf durchstimbaren Fabry-Pérot-Filtern

Jerman et al. [14] stellte in seiner Publikation „A miniature Fabry-Pérot interferometer with a corrugated silicon diaphragm support“ ein aus zwei Wafern bestehendes Interferometer vor, welches in der Kommunikationstechnologie bei einer Wellenlänge von $1,5 \mu\text{m}$ arbeitet. Der Verwendungszweck ist dabei die Trennung von verschiedenen Wellenlängenkanälen mittels einer aktuierbaren Membran. Diese im oberen Wafer implementierte Membran wird elektrostatisch bewegt, was eine Änderung der Resonatorhöhle zur Folge hat und so eine Selektion von Wellenlängen des Lichts ermöglicht. Nachteile solcher Systeme sind die hohen Spannungen von bis zu 70 V , die benötigt werden, um sie zu aktuieren.

Ebenfalls ein Fabry-Pérot-Filter mit beweglichem oberem Spiegel stellte J. Patterson et al. 1996 [15] vor. Dabei nutzte er einen Biegebalken als oberen Spiegel, um so die Kavität verändern zu können. Die zur Durchstimmung benötigte Spannung liegt bei diesem Ansatz bei 53 V .

Raley et al. erweiterte diese Ansätze, indem er sein Mikrointerferometer aus einem soliden Material fertigte. Er verwendete dabei ein ähnliches Design wie Jerman et al., wählte aber das sichtbare Licht als Applikation. Für die Durchstimmung dieses Filters benötigt er 100 V .

Die gezeigten Ansätze miniaturisierter Spektrometer bieten bereits Vorteile hinsichtlich der Größe und des Gewichts gegenüber nicht miniaturisierten Spektrometern. Auch am INA konnten solche Filter erfolgreich hergestellt werden [21][22].

All diese Systeme haben jedoch auch Nachteile. Sie benötigen eine externe elektrische Schaltung, um die bewegliche Membran zu kontrollieren. Die Spannungsversorgung muss exakt angesteuert werden können. Systeme, die Gitter zur Beugung des Lichts nutzen, sind empfindlich gegenüber Temperaturänderungen sowie gegenüber Justagefehlern und haben zudem noch den Nachteil, dass ihr Auflösungsvermögen mit der Verkleinerung des Systems, genauer des Abstandes zwischen Gitter und Detektor, abnimmt.

Fabry-Pérot-Filterfeld-basierte Spektrometer

Die im folgenden aufgeführten Konzepte eröffnen mit den innovierten neuen Ansätzen, Möglichkeiten diese Nachteile miniaturisierter Spektrometer zu überwinden. Ein erster Ansatz findet sich bei Kaushik und Stallard [23]. Ihr Spektrometer basiert auf einem Feld von Fabry-Pérot-Filtern. Dabei verzichten sie auf bewegliche Teile, indem jedes Maximum des spektralen Filters durch einen separaten Filter selektiert wird. Zur Erzeugung unterschiedlicher Filter wird eine Variation des Brechungsindex im Kavitätsmaterial realisiert. Dies führt zu einer Änderung der optischen Länge der Kavität. Durch die Strukturierung des unteren Spiegels mittels Elektronenstrahl-Lithografie kann der effektive Brechungsindex der Kavität eingestellt werden, gleichzeitig ermöglicht dieser Ansatz auch eine Selektion des Lichtes nach seiner Polarisatio.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung, die der Originalzeichnung nachempfunden wurde.

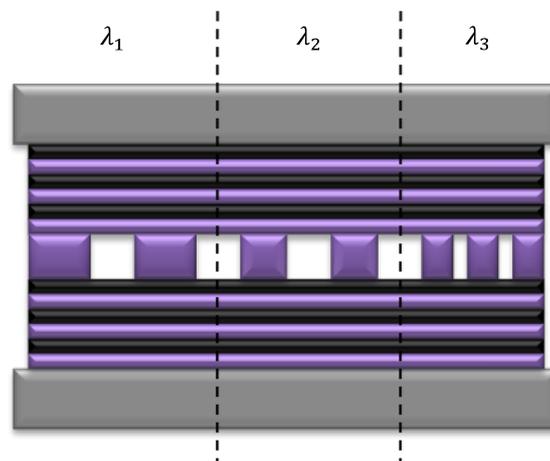


Abbildung 3: Schematische Zeichnung des Filtersystems. Die unterschiedlichen lateralen Ausdehnungen der strukturierten Schichten zwischen den Spiegeln sorgen für einen unterschiedlichen Brechungsindex in der Kavität. Dadurch entstehen Filterflächen mit unterschiedlichen Filtern [23].

Correia et. al [24] stellte 2000 ein „Single-Chip-Spektrometer“ vor, das aus einem Feld von soliden Fabry-Pérot-Filtern besteht. Dieses Feld, bestehend aus 16 verschiedenen Filtern, wird direkt auf einem Fotodetektor aufgebracht und bietet eine Auflösung von $R = 25$. Zur Herstellung der unterschiedlichen Höhen der Kavitäten wird eine Sequenz von Ätzungen vorgenommen, sodass nicht jeder Filter einzeln geätzt wird. Für 16 verschiedene Filter sind 4 Ätzungen nötig. Abbildung 4 zeigt links eine schematische Zeichnung und rechts eine Fotografie des hergestellten Mikrospektrometers.

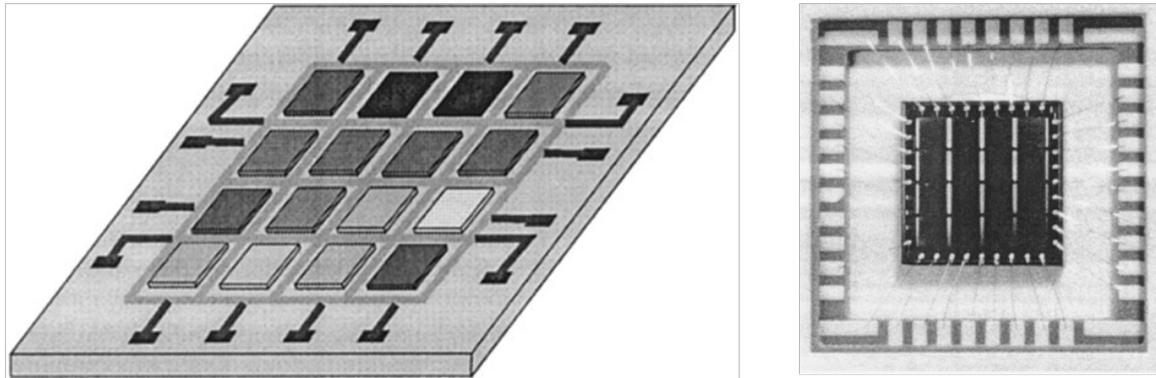


Abbildung 4: links: ein 4 x 4-Mikrospektrometerfeld. Jede der Fabry-Pérot-Kavitäten ist ausgelegt, um eine unterschiedliche Wellenlänge des Lichts zu transmittieren. Rechts: eine Fotografie eines hergestellten Mikrospektrometers mit 4 x 4 Kanälen [24].

In ähnlicher Weise erfolgt auch die Herstellung der 128 verschiedenen Filter des 2007 publizierten Ansatzes von Wang et al. [25]. Hierbei werden die Kavitäten der Filter mit ihren individuellen Höhen in einem speziellen Verfahren deponiert. Dazu wird auf einem unteren Spiegelsystem mittels geeigneter Deposition und unter Verwendung von den in Abbildung 5 zu erkennenden Masken sukzessive eine Treppenstruktur aufgebracht. Durch Abdecken dieser Schichten mit einem oberen Spiegel entstehen Filter, die durch die verschiedenen Kavitätshöhen verschiedene Wellenlängen des Lichts transmittieren.

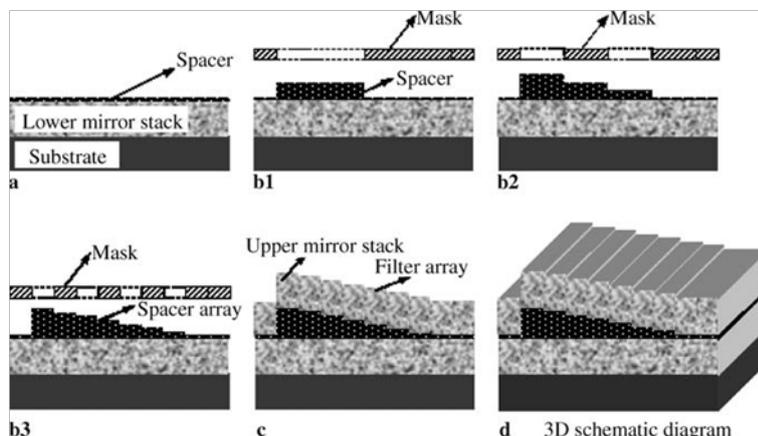


Abbildung 5: Schrittweise Deposition einer treppenförmigen Struktur mittels geeigneter Masken. Diese ermöglichen es, 2^N verschiedene Höhen in N Prozessschritten herzustellen [25]

Das durch diese vielen Herstellungsschritte generierte Spektrometer besitzt im Wellenlängenbereich von 720 nm bis 880 nm schmale Transmissionsbänder des gefilterten Lichts mit einer Halbwertsbreite von 1,72 nm bis 3,84 nm, was im Mittel einem Auflösungsvermögen von $R = 287,8$ entspricht. Damit haben Wang et al. gezeigt, dass es möglich ist, ein miniaturisiertes Spektrometer herzustellen, basierend auf einem Feld von Fabry-Pérot-Filtern, welches im Vergleich zu miniaturisierten Gitter- oder durchstimmbaren Spektrometern ein höheres Auflösungsvermögen besitzt.

2 Einleitung und Motivation: Bedeutung von miniaturisierten Spektrometern für bestehende und neue Anwendungen

Die Herstellung der Kavitätshöhen eines kompletten Filterfeldes, sowohl bei Correia et al. als auch bei Wang et al., bedarf zahlreicher Prozessschritte. Im ersten Fall wird eine auf dem unteren Spiegel deponierte Siliziumoxidschicht sequenziell dünner geätzt, um die gewünschten Höhen zu erreichen, im zweiten Fall, bei Wang et al., erfolgt eine sequenzielle Deposition des Kavitätsmaterials. Beide Verfahren benötigen für 2^N verschiedene Höhen N Prozessschritte. Correia et al. benötigt 4 Ätzschritte, um die 16 beschriebenen Kanäle zu fertigen, und für 128 verschiedene Höhen, wie sie bei Wang et al. hergestellt wurden, werden 7 Depositionszyklen benötigt. Eine solche Herstellungsmethode ist zeitaufwendig und verursacht damit hohe Kosten, die eine kommerzielle Nutzung bis heute infrage stellen. Eine drastische Senkung der Kosten kann erreicht werden, wenn die Anzahl der Prozessschritte reduziert werden kann. Somit entstehen geringere direkte Kosten, die mit der benötigten Herstellungszeit steigen (Personalkosten und Betriebskosten), und weniger Folgekosten durch weniger Fehlermöglichkeiten aufgrund der geringeren Anzahl von Prozessschritten.

Eine sehr moderne und für kommerzielle Produkte attraktive Technologie, die Nanoimprint-Technologie [26], kann die Lösung auf der Suche nach Möglichkeiten für die Reduktion der Prozessschritte sein. Mit dieser Technologie, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet wird, werden Strukturen, deren Größe im Nanometerbereich liegt, von einem Stempel in ein geeignetes Polymer übertragen [26], [27], [28], [29]. Theoretisch wäre es so möglich den von Correia et al. oder Wang et al. vorgestellten Ansatz eines auf einem Fabry-Pérot-Filterfeld basierenden Spektrometers zu erweitern und somit eine drastische Reduktion der Prozessschritte zu erreichen. Die vielen Ätz- oder Depositionsschritte werden durch einen einzigen Imprintschritt ersetzt und so die Anzahl der Prozessschritte reduziert.

2.2 Ziele, Methodik und Aufbau dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es daher, zu untersuchen, ob es möglich ist, ein vergleichbares Filterfeld wie das von Wang et al. vorgestellte Filterfeld herzustellen, bei dem die Kavitäten jedoch in einem einzigen Schritt mit Nanoimprint erzeugt werden. Dieses Konzept basiert auf dem von Prof. Dr. H. Hillmer et al. erfundenen Verfahren, welche unter dem Titel „Optische Filter und Verfahren zu seiner Herstellung sowie Vorrichtung zur Untersuchung der spektralen und örtlichen Verteilung einer elektromagnetischen, von einem Gegenstand ausgehenden Strahlung“ zum Patent angemeldet wurde [30].

Angesichts des Forschungsdefizits hinsichtlich der Nutzung der Nanoimprint-Technologie zur Fertigung von in ihrer Höhe exakten Strukturen werden in der vorliegenden Arbeit zwei Nanoimprint-Technologien praktisch untersucht: das Heißprägen und das UV-Prägen an unterschiedlichen Anlagen. Da die Verwendung der verschiedenen Technologien bezüglich der Herstellung genauer Höhen in der Literatur weitgehend unbekannt ist, soll diese Arbeit einen Beitrag zur Beantwortung der Frage leisten, inwieweit die verschiedenen Nanoimprint-Technologien in der Lage sind, Mesen von exakter Höhe zu prägen.

Im Folgenden werden Nanoimprint-Technologien lediglich hinsichtlich ihres Potenzials bezüglich des Prägens von vertikal hochauflösenden Strukturen untersucht, nicht aber hinsichtlich der lateralen Auflösung, denn diese ist seit dem Aufkommen dieser Technologie intensiv thematisiert worden [26], [31], [32]. Auf eine qualitative Auswertung aller Prägungen wurde verzichtet. Die Vermessung jeder geprägten Mesa zur Bestimmung ihrer Höhe hätte einen unverhältnismäßigen Zeitaufwand mit sich gebracht. In der hier vorgestellten Machbarkeitsstudie wird kein vollständiges Nanospektrometer gezeigt. Ergebnis soll ein Filterfeld sein, welches mittels geeigneter Nanoimprint-Methode hergestellt worden ist und zeigt, dass das ausgewählte Konzept technisch umsetzbar ist.

Dazu werden am Anfang dieser Arbeit Grundlagen auf dem Gebiet der optischen Spektroskopie vorgestellt, um am Ende einen Vergleich der relevanten Parameter Auflösungsvermögen, Halbwertsbreite und Empfindlichkeit zu ermöglichen. Um den experimentellen Teil, die Suche nach einer geeigneten Nanoimprint-Methode zur Herstellung der Kavitäten der Filterfelder einzuleiten, wird die Nanoimprint-Technologie kurz vorgestellt und um die wichtigsten Elemente Stempel und Prägematerialien erweitert. Im experimentellen Teil werden Versuche und Ergebnisse zum Nanoimprint vorgestellt und analysiert. Ihre Eignung zur Herstellung eines Filterfeldes steht dabei im Mittelpunkt. Abgeschlossen wird der experimentelle Teil mit dem Vergleich der optischen Eigenschaften des erstellten Filterfeldes.

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen beschrieben, die zur Erklärung der Funktionsweise optischer Spektrometer, basierend auf dem Fabry-Pérot-Filter-Prinzip, nötig sind. Zunächst werden die grundlegenden Begriffe wie sichtbares Licht, Wellenlänge, Spektrometer usw. definiert, daran anschließend wird der Arbeitsbereich der optischen Spektralanalyse eingeführt. Nach und nach werden die einzelnen elementaren Baugruppen von Spektrometern mit besonderer Beachtung der wellenlängenselektierenden Elemente beschrieben und einige weitere Ausdrücke der Spektroskopie werden definiert.

Die Grundlage der theoretischen Analyse bildet die allgemeine elektromagnetische Theorie der Maxwell-Gleichungen. Es wird zunächst eine einfache monochromatische Welle mit senkrechtem und schrägem Einfall und einfachen Randbedingungen besprochen. Die so erlangten Ergebnisse werden im Anschluss benutzt, um auf allgemeingültige Gleichungen für die Reflexion und Transmission von dünnen Schichten auf einem Substrat zu schließen. Zum Schluss wird die Transfer-Matrix-Methode eingeführt, die es ermöglicht, die Wechselwirkung zwischen einer monochromatischen Welle und einem Dünnschichtsystem zu berechnen. Zusätzlich werden die Begrifflichkeiten der gleichen Schichten, der optischen Eigenschaften, der fehlenden Schichten und die optische Dicke einer Viertelwellenlänge erklärt.

Der abschließende Teil dieses Kapitels wird sich auf Fabry-Pérot-Filter konzentrieren. Grundlegende Eigenschaften des Fabry-Pérot-Filters werden mittels eines stark vereinfachten Modells berechnet. Im Weiteren werden einige Phänomene, die aus einem nicht idealen Fabry-Pérot-Filter resultieren, besprochen. Die spektrale Transmission, FWHM, Finesse, Auflösung und der freie spektrale Bereich werden berechnet. Die Berechnungen berücksichtigen die Verluste in den Spiegelmaterialien und der Kavität, welche durch Absorption und Streuung entstehen. Die Effekte von nicht senkrecht einfallendem Licht, die endliche Größe der Spiegel und die mögliche Nichtparallelität werden ebenfalls behandelt.

3.1 Beschreibung grundlegender Begriffe der Spektroskopie

Licht, sichtbares Licht

Licht ist als solches ein elektromagnetisches Phänomen, das sich durch die gleichen Gesetzmäßigkeiten und Theorien beschreiben lässt wie jede andere elektromagnetische Strahlung auch. Eine vollständige mathematische Abhandlung vom elektromagnetischen Charakter des Lichts wurde bereits von James Maxwell erstellt. Obwohl Licht nicht nur als Welle betrachtet werden kann, ist die Beschreibung von Lichtausbreitung in Wellengleichungen für diese Arbeit passender als die der Quantenelektrodynamik. Licht

breitet sich im freien Raum mit einer Geschwindigkeit von $c_0 \sim 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ aus, in anderen Materialien ändert sich die Geschwindigkeit und hängt von der Frequenz des Lichtes ab. Um Licht zu beschreiben, wird häufig der Ausdruck der Wellenlänge genutzt. Die Wellenlänge beschreibt dabei den Abstand zwischen zwei willkürlichen Punkten einer periodischen Welle, welche in ihrer Oszillation die gleiche Phase haben. Licht beansprucht im elektromagnetischen Spektrum ein Band vom Infraroten über das Sichtbare bis hin zum Ultravioletten. Das Band der optischen Wellenlängen reicht von 10 nm bis 1 mm. Innerhalb dieses Bandes liegt der für das menschliche Auge sichtbare Bereich von 380 nm bis 760 nm (siehe

Abbildung 6)

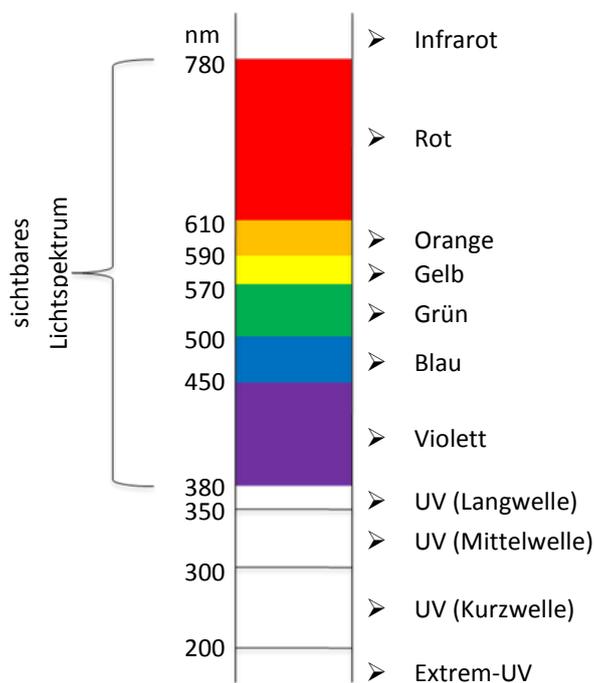


Abbildung 6: Sichtbares Lichtspektrum [33].

Spektroskopie

Spektroskopie ist die Beobachtung von Absorption und Emission von Licht und anderen Strahlungen im Bezug auf die Wellenlänge der ausgehenden Strahlung. Diese Wissenschaft behandelt die Quellen, die Messungen, die Analyse und die Spektre [34]. Mittels der Spektroskopie ist es möglich, auch kleinste Mengen einer Substanz zu analysieren, und dies schneller und akkurater als mit chemischen Techniken.

Größen und Einheiten der Radiometrie und der Spektrometrie

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Die Wissenschaft der Radiometrie befasst sich mit der Messung elektromagnetischer Strahlung, wobei die Teildisziplin der Fotometrie sich mit der optischen Strahlung beschäftigt. In der Radiometrie werden fünf verschiedene Größen behandelt. Dazu gehört die *Strahlungsenergie*, die in Joule [J] gemessen wird. Sie beschreibt die Energie einer Anzahl von Photonen. Der *Strahlungsfluss* wird in Watt [W] gemessen und entspricht der Strahlungsenergie pro Zeit. Die dritte Größe ist die *Strahlungsstärke*, gemessen in Watt pro Steradian [Wsr^{-1}]. Die Strahlungsstärke gibt den Strahlungsfluss pro Raumwinkel an. Die *Bestrahlungsstärke* beschreibt den Strahlungsfluss pro effektive Empfängerfläche und wird in Watt pro Quadratmeter [Wm^{-2}] angegeben. Die fünfte Größe ist die *Strahldichte* mit der Einheit Watt pro Steradian pro Quadratmeter [$\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$] die den Strahlungsfluss pro Raumwinkel pro effektive Sendequelle darstellt. Entsprechend gelten für die Fotometrie Lichtmenge, Lichtstrom, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte.

Optische Spektrometer

Für die Analyse von Spektren werden gewöhnlich vier Elemente benötigt:

- eine Lichtquelle, deren Strahlung direkt gemessen werden soll, oder die in Wechselwirkung mit Objekten transmittierte oder reflektierte Strahlung der Quelle.
- ein dispersives Element, um die zu analysierende Strahlung in ihre einzelnen Wellenlängenanteile zu zerlegen.
- ein Detektor, um die einzelnen Wellenlängen des Lichtes nach der Dispersion zu messen.
- Ein Aufzeichnungsgerät, um aus den einzelnen Intensitäten der Wellenlängen ein Spektrum zu generieren und dies zeitbegrenzt oder langfristig zu sichern.

Ein solches Gerät, welches Licht in seine einzelnen Wellenlängenanteile zerlegt und diese als Spektrum aufnimmt, wird als optisches Spektrometer bezeichnet.

3.2 Die optische spektrale Analyse

Die Identifikation der spektralen Anteile einer einfallenden elektromagnetischen Strahlung durch die Messung der Intensität der einzelnen Komponenten wird spektrale Analyse genannt. Diese Untersuchung bestimmt die Intensität I als eine Funktion der Wellenlänge, $I = f(\lambda)$, für ein spezielles Spektrum.

Wenn die Beschreibung einer Lichtwelle eine Funktion der Zeit wie $U = f(t)$ wäre, könnte sie mittels reiner mathematischer Methoden, in die spektrale Domain zerlegt werden, z. B. $U = f(\lambda)$. Zurzeit ist es aber nicht möglich, Lichtwellen als eine Funktion der Zeit zu messen. Dies begründet sich durch die extrem hohen Frequenzen, die mit dem sichtbaren Licht verbunden sind. Lösungen können in den Entwicklungen der mathematischen Werkzeuge wie der Fourieranalyse, die sich mit der Zerlegung beliebiger periodischer Funktionen in ihre Sinus- und Kosinusanteile beschäftigt, gefunden werden. Diese ist heute bereits die

Basis moderner Ansätze in der optischen Physik. Dazu kommen noch neue mathematische Theorien der optischen Prozessierung und anpassungsfähige optische Bauelemente.

Fourieranalyse

Die Fourier-Theorie teilt sich in die Fourierreihe, die es ermöglicht, eine periodische Funktion $f(t)$ in eine Summe aus Sinus- und Kosinusfunktionen zu zerlegen, und die Fourier-Transformation, die beliebige nicht periodische Funktionen umfasst und ihnen ihre transformierte Funktion zuordnet. Da die fouriertransformierte Funktion eine von der Zeit abhängige Funktion im Frequenzbereich ist, lassen sich mittels dieser Transformation Funktionen einfach aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich überführen. Die Theorie kann genutzt werden, um jegliche Wellenfronten in Form einer Kombination von ebenen Wellen zu beschreiben. Dies, dargestellt in einer Fourierreihe einer periodischen Funktion $f(t)$, z. B. $f(t) = f(t + T)$, wobei $T = 2\pi/\omega$, ist:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\omega t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \sin(i\omega t). \quad (3.1)$$

Jedes harmonische Vielfache i der fundamentalen Frequenz ω wird mit einem Koeffizienten a_i bei Ausdrücken mit Kosinusfunktionen und b_i bei Ausdrücken mit Sinusfunktionen multipliziert.

Eine nicht periodische Funktion kann mittels der Fouriertransformation durch folgendes Integral dargestellt werden:

$$F\{f(t)\} = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (3.2)$$

Diese Funktion überführt $f(t)$ aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich $F(\omega)$. Die Umkehrung dieser Operation kann wie folgt erreicht werden:

$$F^{-1}\{F(\omega)\} = f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (3.3)$$

Manchmal ist es notwendig, zwei Funktionen zu vergleichen, z. B. Interferenzen zweier Wellen. Hier ist die Korrelationsfunktion ein nützliches Integral, um die Ähnlichkeiten zweier Funktionen zu vergleichen:

$$h(\tau) = a(t) \otimes b(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) b(t + \tau) dt. \quad (3.4)$$

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Veranschaulicht kann man das Ergebnis als Überlapp zweier Funktionen, die übereinandergelegt werden, bezeichnen.

Ein weiteres sehr nützliches Integral in linearen Systemen ist die Faltung. Sie ähnelt in ihrem Ergebnis einem gleitenden Durchschnitt und ist somit gut geeignet, um scharfe Spitzen in Funktionen zu glätten. Das Faltungsintegral von $a(t)$ und $b(t)$ ist definiert als:

$$g(\tau) = a(t) * b(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)b(\tau - t)dt. \quad (3.5)$$

3.3 Beschreibung von Spektrometern, basierend auf unterschiedlichen Licht beugenden Elementen

Ein Spektrometer identifiziert die Wellenlänge einer spektralen Komponente einer einfallenden Strahlung und misst deren Intensität. Abbildung 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Spektrometers. Die grundsätzlichen Elemente sind dabei: ein wellenlängenselektives Element (WSE), das ein schmales spektrales Band selektiert, und ein Detektor, der das durch das WSE transmittierte oder reflektierte Licht detektiert.

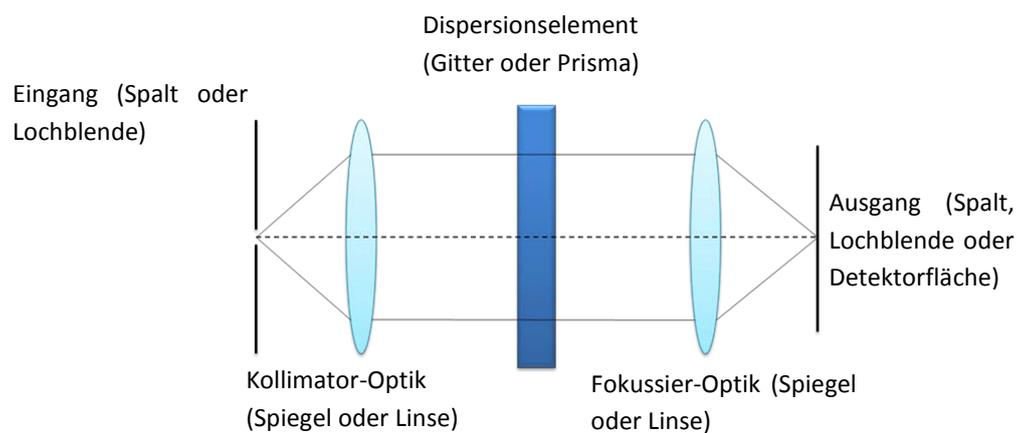


Abbildung 7: Prinzipieller Aufbau eines Spektrometers [1].

Um den Lichteinfall in das Spektrometer zu optimieren, werden optische Elemente verwendet, die dafür sorgen, dass das Licht der Quelle optimal in das Spektrometer fällt. Ein einfaches Spektrometersystem besteht daher aus einer Eingangsoptik wie einem Schlitz und einer Sammellinse, einem WSE sowie einer Ausgangsoptik wie einer fokussierenden Linse und einem Fotodetektor.

Eingangsschlitz und Sammellinse

Die Aufgabe eines Eingangsschlitzes ist es, die Lichtquelle an das Instrument anzupassen. Dabei wird der Schlitz von der externen Quelle, deren Spektrum es zu analysieren gilt,

beleuchtet. Der Schlitz definiert so die externe Quelle, um sicherzugehen, dass die Messung nur von den Wellenlängen abhängt und unabhängig von der Form der Quelle, der Divergenz des Lichtstrahls und der Position der Quelle relativ zur optischen Achse des Spektrometers ist [35].

Die Sammellinse formt aus dem divergenten Lichtstrahl, der durch den Eingangsschlitz fällt, einen parallelen. Zusammen bilden der Eingangsschlitz und die Sammellinse einen Kollimator, der für einen parallelen Lichtstrahl im Spektrometer sorgt. Sollte die benutzte Lichtquelle ihrerseits einen parallelen Lichtstrahl produzieren, ist der Kollimator natürlich unnötig. Eine solche Strahlform erzeugen Laser und Quellen, die als unendlich weit entfernt angesehen werden können. Manchmal ist die Kollimation schon ein Teil des WSEs. Der Kollimator sorgt dann dafür, dass ein Maximum des Ausstoßes der Beleuchtung auf die fokussierte Platte fällt, wenn das WSE ein Fabry-Pérot-Bauteil ist.

Wellenlängen selektierendes Element

Der entscheidende Teil eines Spektrometers ist das WSE. Grundsätzlich werden drei verschiedene Licht zerlegende Elemente verwendet: Prismen, Gitter oder Interferometer. Diese Elemente beruhen alle auf verschiedenen Methoden der Zerlegung des Lichts zu einem Spektrum: Lichtbrechung, Lichtbeugung und Interferenzen.

Prisma

Historisch gesehen wurden Glasprismen als Erstes genutzt, um Licht in seine Komponenten zu zerlegen. Der Pfad des Lichtstrahls wird beim Übergang von einem transparenten Medium in ein anderes abgelenkt, beim Prisma zum Beispiel von Luft zu Glas. Verschiedene Wellenlängen oder, vereinfacht, Farben des Lichtes werden mit unterschiedlichen Winkeln gebrochen, sodass jeder Strahl, abhängig von seiner Farbe, das Prisma in einer anderen Richtung verlässt. Dabei ist der Zusammenhang zwischen dem Brechungswinkel und der Wellenlänge des Lichtes ein nichtlinearer.

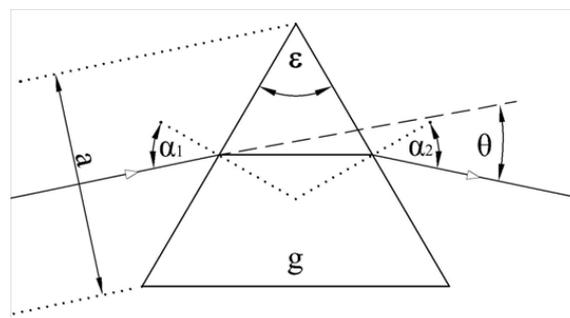


Abbildung 8: Brechung des Lichts beim Durchlaufen eines Prismas.

Optisches Gitter

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Beugungsgitter bestehen aus einer Vielzahl von lichtdurchlässigen Schlitzen auf einer flachen Oberfläche oder alternativ aus linearen parallel zueinander angeordneten Strukturen, die jeweils den gleichen Abstand untereinander ausweisen. Dadurch entstehen Beugungsreflexe, ähnlich wie beim Doppelspalt. Jedoch erhöht sich die Schärfe der Linien mit der Anzahl der Schlitze. Da der Winkel der Reflexionen von der Wellenlänge anhängt, kann auf diese Weise Licht in seine spektrale Anteile zerlegt werden. Ein typisches Gitter könnte aus einer Aluminiumbeschichtung auf einem Glassubstrat bestehen und würde 100 bis 6000 Linien pro Millimeter besitzen. Holografisch hergestellte Gitter werden benutzt, wenn die Dichte der Linien mindestens 1200 Linien pro Millimeter oder mehr beträgt, für den Einsatz in Nah-UV-, sichtbarem und Nah-IR-Licht.

Interferometer

Eine dritte Art der lichtaufspaltenden Elemente bilden die Interferometer. Diese teilen den Lichtstrahl mittels Strahlteiler in zwei Strahlen auf, die jeweils einen anderen Weg durchlaufen und dann wieder zusammengeführt werden. Die beiden Strahlen interferieren nur konstruktiv, wenn ihr Wegunterschied genau 1, 2, 3 ... mal der Wellenlänge ist. Nach der Umlenkung und Zusammenführung der beiden Strahlen, wofür der gleiche oder unterschiedliche Strahlteiler benutzt werden können, kann die Gesamtintensität gemessen werden. Dieses Gerät arbeitet wie ein Filter, der bestimmte Wellenlängen transmittiert und die anderen zurück zur Quelle reflektiert.

Ausgangsoptik

Die Aufgabe dieser Bauteile ist es, den Ausgang des WSEs an die Detektorzeile anzupassen. Üblicherweise wird eine fokussierende Linse benutzt, die das aufgespaltene Licht auf die Fotodetektorenfläche projiziert. Der Hauptzweck liegt dabei in der Maximierung der optischen Energie und damit in der Maximierung des Signals des Detektors bei einer gegebenen optischen Intensität.

Fotodetektoren

Der Fotodetektor misst die Intensität der spektralen Komponenten des transmittierten Lichtes unter Berücksichtigung der designten Wellenlängen. Abhängig von der zu untersuchenden spektralen Weite und der Signalintensität können verschiedene Detektoren zum Einsatz kommen. Zur Verfügung stehen z. B. Fotomultiplier, Bildverstärker, Bolometer oder ein Fotowiderstand. Für das sichtbare Licht werden üblicherweise fotografischer Film, Fotodioden oder Charge Coupled Devices, CCDs, verwendet. In der Vergangenheit wurden Abschnitte von Filmen oder fotografische Platten benutzt, um das Muster der spektralen Linien aufzunehmen, diese dienten gleichzeitig als Datenaufbewahrung. Heutzutage werden dafür Fotodioden benutzt, zusammen mit einem Stromspannungsverstärker, gefolgt von einem Analog-digital-Wandler. Die elektronische Form der Aufzeichnung ermöglicht es, digital zu messen und die Daten zu speichern.

Abtastender Ansatz gegenüber arraybasiertem Ansatz

Bei einer spektroskopischen Messung müssen alle spektralen Komponenten einzeln gemessen werden. Grundsätzlich gibt es zwei Ansätze dafür. Zum einen eine sequenzielle Messung mittels abtastender Technologie und zum anderen eine parallele Messung, basierend auf flächigen Array-Detektoren.

Der abtastende Ansatz

In einem abtastenden Spektrometer werden die Messungen in einer zeitlichen Abfolge gemacht. Zwei Konfigurationen sind dabei möglich und beide werden in der Praxis benutzt. Wenn die relative Position des einfallenden Lichtstrahls als fest gilt, dann wird unter Berücksichtigung der Position des WSEs zum Detektor die erste spektrale Komponente gemessen. Anschließend wird die Position des WSEs im Verhältnis zum Detektor ein wenig geändert und die nächste spektrale Komponente wird gemessen. Eine Rotation des WSEs über einen gut definierten Winkelbereich ermöglicht die Abtastung und Aufzeichnung des gesamten Spektrums. Alternativ dazu kann auch der Fotodetektor entlang aller spektralen Linien bewegt werden.

Arraybasierter Ansatz

Bei einem arraybasierten Ansatz erfolgt die Messung parallel, wodurch eine große Anzahl von Detektoren benötigt wird. Dieser Umstand beschreibt schon einen auflösungslimitierenden Faktor des Ansatzes. Im Gegensatz zu dem vorherigen Ansatz müssen bei den Messungen keine Bauteile mechanisch bewegt werden, wodurch sich der arraybasierte Ansatz sehr gut eignet, um schnelle Messungen durchzuführen. In der Praxis gibt es kommerziell erhältliche Systeme mit einem WSE und einer Detektorzeile.

Ausdrücke der Spektroskopie

Kohärente Wellen

Als kohärente Wellen werden Wellenzüge bezeichnet, die beliebig lange Zeiten ohne Phasensprünge laufen und somit immer eine feste Phasenbeziehung zueinander haben. Ein Beispiel für Kohärenz ist eine monochromatische Lichtwelle, wobei es in der Praxis keine exakt monochromatische Lichtquelle gibt. Das oft als monochromatisch bezeichnete Laserlicht, das aus einer Folge von zufällig schwankenden Zeitpunkten der Emission von Lichtwellen besteht, kann als eine Folge von harmonischen Wellenzügen endlicher Länge gesehen werden. Diese Wellen lassen sich durch ihre mittlere Zeitdauer, die Kohärenzzeit τ in Sekunden bezüglich der Kohärenz, kennzeichnen. Es gilt: je größer die Kohärenzzeit, desto monochromatischer die Strahlungsquelle. Die räumliche Länge der Kohärenz zwischen zwei oder mehr Teilwellen wird als Kohärenzlänge in Metern bezeichnet. Sie bestimmt sich aus:

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

$$l_t = c\tau_0, \quad (3.6)$$

womit sie unter der Berücksichtigung der Unschärferelation der Signaltheorie – je kürzer ein Wellenzug ist, desto größer die Frequenzbreite, die zur Darstellung benötigt wird – zu

$$l_t \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3.7)$$

wird. Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde. $\Delta\lambda$ beschreibt die Linienbreite. Weißes Licht hat etwa eine Kohärenzlänge von 2 Wellenlängen, was in etwa $1\ \mu\text{m}$ entspricht, und bildet nur schwache Interferenzstreifen aus, wohingegen Gasentladungslampen mit einer Linienbreite von $25\ \text{pm}$ schon eine Kohärenzlänge von $1,2\ \text{cm}$ aufweisen und Laser, insbesondere stabilisierte He-Ne-Laser mit noch schmalere Linienbreiten von unter $10\ \text{fm}$, eine Kohärenzlänge von $100\ \text{m}$ bis zu Hunderten von Kilometern erreichen. In üblichen Dünnschichtsystemen, in denen die einzelnen Schichten jeweils nur einen Wellenlängenteil bis ein paar Wellenlängen dick sind, können alle Wellen, die an einer Schicht reflektiert werden, kohärent addiert werden, wobei die Phase der Wellen berücksichtigt werden muss, wenn die Amplituden addiert werden.

Spektrale Empfindlichkeit

Ein Lichtsensor wird über seine spektrale Empfindlichkeit definiert. Eine solche Fotodiode absorbiert die einfallende Lichtstrahlung und nutzt die Energie der Photonen, um frei bewegliche Ladungsträger zu generieren. Diese freien Elektronen generieren einen Strom in der externen Schaltung, welcher proportional zur Photonenenergie ist. Die spektrale Empfindlichkeit R ist damit:

$$R = \eta_D \frac{e}{h\nu}. \quad (3.8)$$

R entspricht dabei dem generierten Strom der Fotodiode pro Watt der einfallenden Energie. η_D beschreibt die Detektionseffizienz und e die Elektronenladung ($1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$). $h\nu$ ist die Energie der Photonen. Bei einer üblichen Photonenenergie von $2\ \text{eV} \approx 3 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$ und wenn $e/h\nu$ im Bereich von $0,5\ \text{A/W}$ ist, ergibt sich unter Berücksichtigung der Detektionseffizienz η_D von $0,5$ bei $500 - 800\ \text{nm}$ eine spektrale Empfindlichkeit von $0,25\ \text{A/W}$. Bei Siliziumfotodioden mit einem Empfindlichkeitsbereich von $400\ \text{nm} - 1,1\ \mu\text{m}$ ist dann das Empfindlichkeitsmaximum bei $800\ \text{nm}$ [36].

Spektrales Auflösungsvermögen

Das spektrale Auflösungsvermögen gibt an, wie nah nebeneinander zwei monochromatische einfallende Wellen im Spektrum liegen dürfen, damit das Instrument sie noch auflösen kann. Dabei gilt als aufgelöst, ein Messergebnis, bei dem am Ausgang zwei deutlich voneinander

unterscheidbare Maxima abgebildet werden. Dies geht zurück auf Lord Rayleigh, der die These aufstellte, dass zwei Komponenten der gleichen Intensität als aufgelöst gelten, wenn deren Maxima auf das erste Beugungsminimum der anderen fällt [37]. Damit ist das spektrale Auflösungsvermögen definiert als:

$$R = \left| \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \right| \quad (3.9)$$

Wobei $\Delta\lambda$ den minimalen Wellenlängenabstand zweier Wellen angibt. So kann ein Gitterspektrometer theoretisch eine spektrale Auflösung von $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 5 \cdot 10^6$ erreichen, welche in der Realität wegen der Beugungseffekte aber kleiner ist. Ein Fabry-Pérot-Interferometer erreicht im Vergleich dazu $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2 \cdot 10^6$, also eine höhere Größenordnung als ein Gitterspektrometer [38].

Streulicht

Die Hauptursache für Messfehler bei WSE benutzenden Spektrometern bildet das Streulicht, welches der unerwünschte Teil der Strahlungsenergie außerhalb der spektralen Bandbreite ist. Der Haupteffekt ist eine Verringerung der zu beobachteten Spitzen, z. B. an einer Absorptionsspitze oder an den Wellenlängengrenzen des Instrumentes sowie bei 190 nm. Es tritt durch eine teilweise Transmission dieses Lichtes durch die WSEs auf und kann am Gehäuseinneren reflektiert werden. Um dies zu verhindern, sind die Innenseiten von Gehäusen mit einer Antireflexionsschicht ausgestattet und werden Kollimatorlinsen verwendet [39].

3.4 Eine Auswahl theoretische Grundlagen zum Thema Licht

Um die in praktisch allen Anwendungsgebieten der Optik elementare Ausbreitung von Licht beschreiben zu können und um grundlegende Berechnungen zu ermöglichen, muss zunächst auf die fundamentalen Theorien von Licht als elektromagnetische Welle eingegangen werden. Die aus den maxwellschen Gleichungen abgeleitete Wellengleichung ermöglicht diese theoretische Beschreibung von Licht im freien Raum und im Material. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf einer Einführung in die Problematik der Interaktion von Licht mit Dünnschichtsystemen. Die Ausführungen werden nur punktuell sein und können in voller Länge in [40], [41], [42] nachgelesen werden.

Maxwellsche Gleichungen¹

Die maxwellschen Gleichungen beschreiben elektrische und magnetische Felder und deren Erzeugung durch Ladungen und Ströme. Dabei ist das elektromagnetische Feld beschrieben durch die Verknüpfte von dem elektrischen Feld $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ und dem magnetischen Feld $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$,

¹ In den hier beschriebenen Gleichungen sind Vektoren und Vektorfelder durch Fettdruck verdeutlicht.

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

wobei beide Felder von Ort und Zeit abhängig sind. Die maxwellschen Gleichungen können in differenzieller Form und in Integralform geschrieben werden, dabei sind sie über den Satz von Gauß und Strokes miteinander verbunden. Je nach Schreibweise lassen sich verschiedene Zusammenhänge einfacher verdeutlichen.

Mit dem elektrischen Fluss $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$ in homogenen, isotropen Materialien und in allgemeiner Form ergibt sich für das Quellenfeld:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (3.10)$$

wobei die Ladungsdichte ρ als Quelle für das elektrische Feld angesehen wird. Der gleiche Zusammenhang in Integralform macht deutlich, dass der elektrische Fluss durch eine geschlossene Oberfläche des Volumens ∂V gleich der elektrischen Ladung in seinem Inneren sein muss, formal gilt:

$$\oiint_{\partial V} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = Q(V). \quad (3.11)$$

Das magnetische Feld gilt als quellenfrei, wodurch die magnetische Flussdichte $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$ in homogenen, isotropen Materialien durch

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.12)$$

beschrieben werden kann. In Integralform zeigt sich, dass der magnetische Fluss durch eine geschlossene Oberfläche null ist, dies ist einsichtig, da es keine magnetischen Monopole gibt, und es gilt:

$$\oiint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0. \quad (3.13)$$

Das Induktionsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen einem sich ändernden magnetischen Fluss und dem daraus resultierenden elektrischen Gegenfeld. Das elektrische Feld ist dabei abhängig von der zeitlichen Änderung der magnetischen Induktion.

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0. \quad (3.14)$$

Mittels des Satzes von Stokes ergibt sich daraus für die Integralform:

$$\oint_{\partial A} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} + \frac{d}{dt} \left(\iint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \right) \equiv 0. \quad (3.15)$$

Das letzte der vier Gleichungspaare stellt das Durchflutungsgesetz dar. Die elektrische Leitungsstromdichte \mathbf{j}_l ist dabei ursächlich für die Wirbel des Magnetfeldes.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_l + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.16)$$

In Integralform geschrieben wird deutlich, wie die Summe aus dem elektrischen Strom und der zeitlichen Änderung des elektrischen Flusses durch die Fläche die magnetische Zirkulation über die Randkurve dieser Fläche beschreibt. Es gilt:

$$\oint_{\partial A} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \iint_A \mathbf{j}_l \cdot d\mathbf{A} + \frac{d}{dt} \left(\iint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} \right). \quad (3.17)$$

Wellengleichung

Aus (3.10) bis (3.17) lassen sich zwei Gleichungen ableiten, die beide die zweite Ableitung nach Raum und Zeit beinhalten. Diese werden im Allgemeinen als Wellengleichung bezeichnet, da ihre Lösung Wellencharakter besitzt [41]. Für das elektrische Feld gilt unter Berücksichtigung des Umstandes, dass in der Optik $\mu = 1$ ist:²

$$\Delta \mathbf{E} - \varepsilon \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.18)$$

Und für das magnetische Feld gilt:

$$\Delta \mathbf{B} - \varepsilon \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.19)$$

Der Faktor $\varepsilon \varepsilon_0 \mu_0$ wird normalerweise abgekürzt durch $\frac{1}{v_{ph}^2}$, da $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 299792,458 \frac{km}{s}$ ist, gilt $v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} c$. v_{ph} steht dabei für die Ausbreitungsgeschwindigkeit oder auch die Phasengeschwindigkeit der Welle. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist somit abhängig von der Lichtgeschwindigkeit c und dem Faktor $\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$, der den Einfluss des durchlaufenen Mediums beschreibt. Mit $n = \sqrt{\varepsilon}$ wird der Brechungsindex n eingeführt [41].

Die einfachste Lösung der Wellengleichung bildet die ebene Welle mit konstanter Amplitude \mathbf{E}_0 , die sich in Richtung \mathbf{k} ausbreitet:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \mathbf{r} + \varphi). \quad (3.20)$$

² Wobei $\nabla \cdot \nabla = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ist.

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Der Zusammenhang zwischen \mathbf{k} und ω wird als Dispersionsrelation für Licht bezeichnet und ist folgendermaßen beschrieben:

$$\mathbf{k}^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{n^2 \omega^2}{c^2}. \quad (3.21)$$

Brechzahl oder Brechungsindex

Der Brechungsindex n gibt das Verhältnis zwischen Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der Geschwindigkeit von Licht in einem Medium an. Im einfachsten Fall gilt damit:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad \text{und somit ist } c = \frac{c_0}{n}. \quad (3.22)$$

Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeit des Lichts in einem Medium der n -te Teil der Lichtgeschwindigkeit ist. Ist die Dielektrizitätskonstante frequenzabhängig, was häufig in Medien beobachtet wird, deren Moleküle ein Dipolmoment besitzen, kann sie folgendermaßen angegeben werden:³

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{e^2 N}{\varepsilon_0 m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}. \quad (3.23)$$

Da n von der nun frequenzabhängigen Dielektrizitätszahl abhängt, wird der Brechungsindex auch komplex und teilt sich in den Realteil n_R und in den Imaginärteil n_I .

$$n_R = 1 + \frac{e^2 N}{2\varepsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (3.24)$$

$$n_I = 1 + \frac{e^2 N}{2\varepsilon_0 m} \frac{-\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}. \quad (3.25)$$

Der Imaginärteil n_I ist dabei nur nahe der Resonanzfrequenz ω_0 merklich von null verschieden und sonst sehr klein. Der Realteil n_R hingegen startet bei kleinen Frequenzen, $\omega \rightarrow 0$ bei $1 + \frac{e^2 N}{2\varepsilon_0 m \omega_0^2}$, und steigt fortwährend an. Bei der Resonanzfrequenz sinkt er und nähert sich bei hohen Frequenzen, $\omega \gg \omega_0$, dem Wert $n = 1$ an [41].

Ideale Bedingungen an den Oberflächen

Eine dünne Schicht mit idealen Oberflächen erzeugt kein diffuses Licht an den Grenzflächen, besitzt somit ideale Bedingungen an beiden Seiten. Trifft eine monochromatische Welle auf so eine lineare und homogene dünne Schicht, kommt es zu zwei physikalischen Vorgängen,

³ Eine ausführliche Beschäftigung mit diesem Thema wird in der Festkörperphysik vorgenommen und kann in einschlägigen Lehrbüchern dieser Disziplin nachgelesen werden.

zum einen der Transmission und zum anderen der Reflexion. Der Teil der Energie der Welle, der diesen beiden Vorgängen nicht unterliegt, wird durch die Absorption beschrieben.

Es sei I_i, I_t, I_r die Flussdichte des einfallenden, des transmittierten und des reflektierten Strahls. Zusammen mit dem jeweiligen Strahldurchmesser ergibt sich für die einzelnen Leistungen: $I_i A \cos \theta_i, I_t A \cos \theta_t$ und $I_r A \cos \theta_r$. Trifft Licht auf eine dünne Schicht, so wird als **Transmission** das Verhältnis zwischen der einfallenden Leistung und der durch das Medium transportierten Leistung definiert, formal gilt:

$$T \equiv \frac{I_t \cos \theta_t}{I_i \cos \theta_i} \quad (3.26)$$

Analog dazu gilt für die Reflexion:

$$R \equiv \frac{I_r A \cos \theta_r}{I_i A \cos \theta_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (3.27)$$

R wird auch als **Reflexionsgrad** bezeichnet und gibt das Verhältnis zwischen einfallender Leistung und reflektierter Leistung an [43].

Absorption kann entstehen, wenn Atome mit Licht bestrahlt werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Energie der Lichtquanten hf gleich der Energiedifferenz zwischen dem unteren und oberen Niveau, $hf = E_2 - E_1$, ist. Haben Festkörper breite Energiebänder und somit einen großen Wellenlängenbereich, in dem sie absorbieren, dann verringert sich die Leistungsdichte I in $\frac{W}{m^2}$ längs des Weges dx um dI .

$$\left(\frac{dI}{dx}\right)_A = -\sigma_{12} N_1 I \quad (3.28)$$

N_1 in $\frac{\text{Atome}}{m^2}$ beschreibt dabei die Dichte der absorbierenden Atome und σ_{12} gibt die effektive Querschnittsfläche in m^2 an, mit der ein Atom absorbiert, und wird „Wirkungsquerschnitt für Absorption“ genannt. Wird (3.28) integriert, entsteht eine e -Funktion, die „Absorptionsgesetz“ genannt wird, und es gilt:

$$I_A = I_0 e^{-\sigma_{12} N_1 x} = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.29)$$

Der Index A soll zeigen, dass es sich um eine Absorption handelt, wodurch I_A die absorbierte Intensität und I_0 die eingestrahelte Intensität ist. Die Größe $\alpha = \sigma_{12} N_1$ ist der Absorptionskoeffizient [44].

Betrachtung von Wellen an Grenzflächen

Ausgehend von einer ebenen, monochromatischen einfallenden Welle einfach geschrieben:

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

$$\mathbf{E}_i = E_{0i} \cos(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} - \omega_i t) \quad (3.30)$$

Unter der Annahme, dass diese Welle linear polarisiert ist und der zeitliche sowie der räumliche Nullpunkt frei gewählt sind, können die reflektierte und transmittierte Welle wie folgt aufgeschrieben werden:

$$\mathbf{E}_r = E_{0r} \cos(\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r} - \omega_r t + \epsilon_r) \quad (3.31)$$

und

$$\mathbf{E}_t = E_{0t} \cos(\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} - \omega_t t + \epsilon_t). \quad (3.32)$$

Durch die Einführung der Phasenkonstanten ϵ_r und ϵ_t kann der Anfangsort der Welle weiter unbestimmt bleiben. Aus den drei Gleichungen (3.30), (3.31) und (3.32) lässt sich, unter Verwendung der Randbedingungen für das elektrische und das magnetische Feld an einer Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika

$$\hat{\mathbf{u}}_n \times \mathbf{E}_i + \hat{\mathbf{u}}_n \times \mathbf{E}_r = \hat{\mathbf{u}}_n \times \mathbf{E}_t, \quad (3.33)$$

das Brechungsgesetz ableiten. Es lautet

$$k_i \sin \theta_i = k_r \sin \theta_r \quad (3.34)$$

und führt wegen $\omega_i = \omega_t$ zum Snelliusschen Gesetz:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t. \quad (3.35)$$

Fresnelsche Gleichungen

Nach der Betrachtung des einfallenden, des reflektierten und des transmittierten Feldes sollen im Folgenden die Zusammenhänge der Amplituden E_{0i} , E_{0r} und E_{0t} untersucht werden. Betrachtet wird der Fall, dass \mathbf{E} senkrecht auf der Einfallsebene steht. Dann gilt

$$\mathbf{E}_{0i} + \mathbf{E}_{0r} = \mathbf{E}_{0t} \quad (3.36)$$

zu jeder Zeit und an jedem Ort der Grenzfläche. Dies beruht auf der Stetigkeit der tangentialen Komponenten des \mathbf{E} -Feldes. Die aus diesem Zusammenhang ableitbaren fresnelschen Gleichungen gelten völlig allgemein für jedes lineare, isotrope und homogene Medium, wodurch sie aber auch an Komplexität gewinnen. Für diese Arbeit ist eine Betrachtung des einfacheren Falls für Dielektrika ausreichend und unter der Annahme $\mu_i \approx \mu_t \approx \mu_0$ gilt die einfachere Gleichung des fresnelschen Gesetzes:

$$r_{\perp} \equiv \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (3.37)$$

r_{\perp} ist der Amplituden-Reflexionskoeffizient, für den Amplituden-Transmissionskoeffizient t_{\perp} ergibt sich:

$$t_{\perp} \equiv \left(\frac{\mathbf{E}_{0t}}{\mathbf{E}_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}. \quad (3.38)$$

Für den Fall, dass \mathbf{E} parallel zur Einfallsebene ist, lassen sich zwei ähnliche Gleichungen herleiten,

$$r_{\parallel} \equiv \left(\frac{\mathbf{E}_{0r}}{\mathbf{E}_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad (3.39)$$

und

$$t_{\parallel} \equiv \left(\frac{\mathbf{E}_{0t}}{\mathbf{E}_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i}. \quad (3.40)$$

Aus den Gleichungen (3.37), (3.38), (3.39), (3.40) lässt sich erkennen, dass die Komponente des elektrischen Feldes, die senkrecht auf der Einfallsebene steht, bei der Reflexion um π rad phasenverschoben wird, wenn der Brechungsindex des Eintrittsmediums kleiner als der Brechungsindex des zweiten Mediums ist [43]. Unter Zuhilfenahme der Gleichungen (3.26) und (3.27), gepaart mit der Annahme, dass $\theta_i = 0$ ist, können der Reflexionsgrad R und die Transmission T in Abhängigkeit von den Brechungsindizes geschrieben werden:

$$R = \left(\frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right)^2 \quad (3.41)$$

und

$$T = \frac{4n_t n_i}{(n_t + n_i)^2}. \quad (3.42)$$

3.4.1 Dünne Schichten und ihre Eigenschaften in der Optik

Ein einfaches für Optik relevantes System aus dünnen Schichten besteht aus einer Schicht, aufgebracht auf ein Substrat. Diese Schicht trennt das Medium, aus dem das Licht eingestrahlt wird, oft Luft, von dem verwendeten Substrat-Medium. An den zwei Oberflächen, der ersten zwischen dünner Schicht und Einstrahlmedium und der zweiten zwischen dem Substrat und der dünnen Schicht, wird das einfallende Licht mehrfach reflektiert und gebrochen.

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

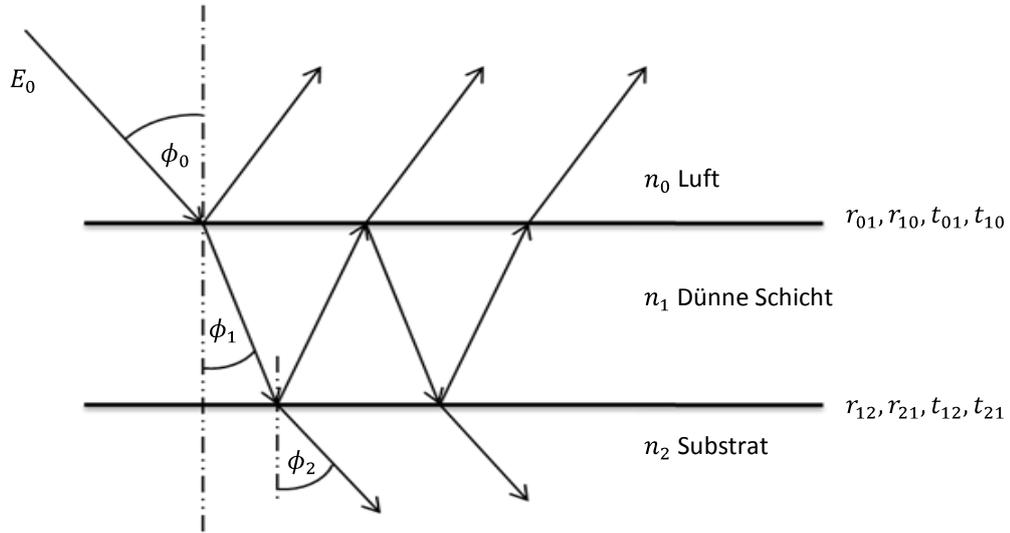


Abbildung 9: Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle in einer dünnen Schicht auf einem Substrat (in Anlehnung an [43], [45])

Wird die einfallende Lichtwelle als E_0 definiert, so ist die totale Reflexionsamplitude die Summe aller einzelnen reflektierten Strahlen, die in das einstrahlende Medium zurückreflektiert werden [46], [47], [45], [48].

$$\begin{aligned}
 E_{refl} &= r_{01}E_0 + r_{12}t_{01}t_{10}E_0e^{2j\delta} + r_{10}(r_{12})^2t_{01}t_{10}E_0e^{4j\delta} \\
 &\quad + (r_{10})^2(r_{12})^3t_{01}t_{10}E_0e^{6j\delta} + \dots \\
 &= r_{01}E_0 \\
 &\quad + r_{10}t_{01}t_{10}E_0e^{2j\delta}[1 + r_{10}r_{12}e^{2j\delta} + (r_{10}r_{12})^2e^{4j\delta} + \dots]
 \end{aligned} \tag{3.43}$$

Entscheidend für Anwendungen ist oft das Verhältnis zwischen der reflektierten und der eingestrahnten Lichtwelle. Aus (3.43) lässt sich dieses Verhältnis ableiten:

$$\rho = \frac{E_{refl}}{E_0} = \left(r_{01} + \frac{r_{12} \cdot t_{01} \cdot t_{10} \cdot e^{2j\delta}}{1 - (r_{10} \cdot r_{12} \cdot e^{2j\delta})} \right) = \frac{r_{01} + r_{12} \cdot e^{2j\delta}}{1 + r_{10} \cdot r_{12} \cdot e^{2j\delta}}, \tag{3.44}$$

wobei

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_1 \cdot d \cdot \cos \phi_1 \tag{3.45}$$

den Phasenwechsel des Lichtstrahls beim Durchlaufen der Schichten beschreibt. d entspricht der Dicke der dünnen Schicht. Auf die gleiche Art und Weise, wie die Amplitude des reflektierten Lichtes beschrieben werden kann, lässt sich auch die Amplitude des transmittierten Lichtes als Summe der Einzelstrahlen beschreiben.

$$\begin{aligned}
 E_{transm} &= t_{01}t_{12}E_0e^{j\delta} + r_{10}t_{01}t_{12}E_0e^{2j\delta} + (r_{10}r_{12})^2t_{01}t_{12}E_0e^{4j\delta}e^{j\delta} \\
 &\quad + (r_{10}r_{12})^3t_{01}t_{12}E_0e^{6j\delta}e^{j\delta} + \dots \\
 &= r_{01}E_0 \\
 &\quad + r_{12}t_{01}t_{10}E_0e^{2j\delta}[1 + r_{10}r_{12}e^{2j\delta} + (r_{10}r_{12})^2e^{4j\delta} + \dots]
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

Für das Verhältnis von transmittierter Welle und einfallender Welle ergibt sich aus (3.46):

$$\tau = \frac{E_{transm}}{E_0} = \frac{t_{01} \cdot t_{12} \cdot e^{j\delta}}{1 + (r_{10} \cdot r_{12} \cdot e^{2j\delta})}. \tag{3.47}$$

Der Reflexionsgrad R und der Transmissionsgrad T sind in allen Systemen gegeben durch:

$$R = \rho\rho^* = \rho^2 \text{ und } T = \left(\frac{n_2}{n_0}\right) \tau\tau^* = \tau^2. \tag{3.48}$$

Für viele Applikationen lassen sich bestimmte Einschränkungen machen. So kann zur Vereinfachung häufig von idealen Materialien ausgegangen werden. Als solche werden isotrope, homogene und nicht absorbierende Materialien angesehen. Mittels dieser Einschränkungen können für den Reflexionsgrad und den Transmissionsgrad folgende Gleichungen abgeleitet werden:

$$R = \frac{r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2 \cdot r_{01} \cdot r_{12} \cdot \cos 2\delta}{1 + r_{01}^2 \cdot r_{12}^2 + 2 \cdot r_{01} \cdot r_{12} \cdot \cos 2\delta} \tag{3.49}$$

$$T = \frac{t_{01}^2 \cdot t_{12}^2}{1 + r_{01}^2 \cdot r_{12}^2 + 2 \cdot r_{01} \cdot r_{12} \cdot \cos 2\delta} \cdot \frac{n_2 \cdot \cos \phi_2}{n_0 \cdot \cos \phi_0} \tag{3.50}$$

Wird für δ durch $\delta + \pi$ ersetzt, so ändert sich in den Gleichungen (3.49) und (3.50) nichts, das heißt, d wird durch $d + \Delta d$ ersetzt, wobei

$$\Delta d = \frac{\lambda_0}{2n_1} \cos \phi_1 \tag{3.51}$$

ist. Daraus folgt, dass der Reflexionsgrad und der Transmissionsgrad von dielektrischen Schichten, die sich in ihrer Dicke um ein Integervielfaches von $\Delta d = \lambda_0/2n_1 \cos\phi_1$ unterscheiden, gleich ist. Als Nächstes werden die Maxima und Minima des Reflexionsgrades bestimmt. Dazu wird zunächst die optische Schichtdicke als $D = n_1d$ definiert und aus Gleichung (3.49) ergibt sich dann:

$$\frac{dR}{dD} = 0 \text{ wenn } \sin 2\delta = 0. \tag{3.52}$$

Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die optische Dicke D

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

$$D = \frac{m \cdot \lambda_0}{4 \cdot \cos \phi_1}, \text{ wobei } (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.53)$$

ist.

Dabei müssen zwei Lösungen beachtet werden. Einmal für den Fall, dass m ungerade ist, und einmal für den Fall, dass m eine gerade Zahl ist. Im Fall einer ungeraden Zahl wird in Gleichung (3.49) $\cos 2\delta = -1$ und die Gleichung kann wie folgt geschrieben werden:

$$R = \left(\frac{r_{01} - r_{12}}{1 - (r_{01} \cdot r_{12})} \right)^2. \quad (3.54)$$

Wird von einem senkrechten Lichteinfall ausgegangen, kann Gleichung (3.54) noch weiter vereinfacht werden, indem

$$r_{01} = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right) \quad (3.55)$$

und

$$r_{12} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \quad (3.56)$$

eingesetzt wird. Für den Reflexionsgrad bei einem ungeraden Wert von m ergibt sich schlussendlich:

$$R = \left(\frac{(n_0 \cdot n_2 - n_1)^2}{(n_0 \cdot n_2 + n_1)^2} \right)^2. \quad (3.57)$$

Wird für m eine gerade Zahl gewählt, so wird $\cos 2\delta = 1$ und Gleichung (3.49) zu:

$$R = \left(\frac{r_{01} + r_{12}}{1 + (r_{01} \cdot r_{12})} \right)^2. \quad (3.58)$$

Vereinfacht für senkrechten Lichteinfall folgt:

$$R = \left(\frac{n_0 - n_2}{n_0 + n_2} \right)^2. \quad (3.59)$$

In Gleichung (3.59) lässt sich erkennen, dass der Reflexionsgrad nicht mehr von n_1 abhängt. Wird n_i nun ersetzt durch $n_i \cos \phi_i$ mit $i = 1, 2, 3, \dots$ in allen Formeln, wird ersichtlich, dass Schichten mit einer optischen Dicke von $m \cdot \lambda_0 / 2 \cdot \cos \phi_1$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) keinen Einfluss mehr auf die Intensität der Reflexion oder der Transmission haben. Sie werden auch

„Absentee“-Schichten genannt [48], [45]. Mit diesen Kalkulationen ist es nicht möglich, Mehrschichtsysteme zu beschreiben, es muss ein anderer Ansatz gewählt werden.

3.4.2 Dünnschichtstapel und ihre Eigenschaften in der Optik

3.4.3 Randbedingungen

Für beide Seiten einer Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Materialien bei $Y = 0$ müssen die Tangentialkomponenten der elektrischen Feldvektoren gleich sein. Diese Bedingung folgt aus den Maxwell'schen Gleichungen.

Aus diesem Grund kann die einfallende planare Lichtwelle als eine elektromagnetische Welle wie folgt beschrieben werden [49]:

$$E_i^\perp = A_i^\perp e^{j(k_1 x - \omega t)}. \quad (3.60)$$

A_i^\perp beschreibt dabei die Amplitude der Tangentialkomponente der einfallenden planaren Welle mit ihrer Wellenzahl k_1 innerhalb des Mediums 1. Die Wellenzahl ist gegeben durch:

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad (3.61)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist. Auf die gleiche Weise werden die reflektierte und die transmittierte Welle beschrieben, sie lauten:

$$E_r^\perp = A_r^\perp e^{j(k_1 x - \omega t)} \quad (3.62)$$

und

$$E_t^\perp = A_t^\perp e^{j(k_2 x - \omega t)}. \quad (3.63)$$

Die transmittierte Welle befindet sich dabei in Medium 2 und erhält dadurch die Wellenzahl k_2 .

Mittels der Randbedingungen der Maxwell'schen Gleichungen lassen sich die Gleichungen (3.60), (3.62) und (3.63) miteinander verknüpfen:

$$A_i^\perp e^{j(k_1 x - \omega t)} + A_r^\perp e^{j(k_1 x - \omega t)} = A_t^\perp e^{j(k_2 x - \omega t)} \quad (3.64)$$

Die jeweiligen Raumkoordinaten x_i , x_r und x_t können für einen bestimmten Punkt P so gewählt werden, dass sie null ergeben. Damit vereinfacht sich Gleichung (3.64) zu:

$$A_i^\perp + A_r^\perp = A_t^\perp. \quad (3.65)$$

⁴ Vom englischen „absentee“ = der Fehlende.

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Auch die parallelen Komponenten der elektrischen Feldvektoren haben Anteile, die tangential zu der Grenzfläche sind. Diese Anteile hängen von dem Winkel θ und θ_t ab, wobei $\theta_i = \theta_r = \theta$ ist. Für diese Komponenten gelten auch die Randbedingungen der Maxwell'schen Gleichungen:

$$A_i^{\parallel} e^{j(k_1 x - \omega t)} \cdot \cos \theta + A_r^{\parallel} e^{j(k_1 x - \omega t)} \cdot \cos \theta = A_t^{\parallel} e^{j(k_2 x - \omega t)} \cdot \cos \theta_t. \quad (3.66)$$

Bei gleicher Wahl der Raumkoordinaten x_i , x_r und x_t lässt sich auch Gleichung (3.66) vereinfacht schreiben als:

$$A_i^{\parallel} \cdot \cos \theta + A_r^{\parallel} \cdot \cos \theta = A_t^{\parallel} \cdot \cos \theta_t. \quad (3.67)$$

Die Randbedingung für das magnetische Feld besagt, dass die senkrechten Komponenten der Feldvektoren auf beiden Seiten der Grenzfläche gleich sein müssen. Da nur die parallelen Komponenten der magnetischen Wellenvektoren Anteile besitzen, die senkrecht zur Grenzfläche sind, müssen die tangentialen Komponenten nicht betrachtet werden. Vereinfacht lautet dann die Gleichung für die magnetische Welle [49]:

$$-B_i^{\parallel} \cdot \cos \theta + B_r^{\parallel} \cdot \cos \theta = -B_t^{\parallel} \cdot \cos \theta_t. \quad (3.68)$$

Um mit diesen Gleichungen die Reflexion und Transmission von Dünnschichtsystemen berechnen zu können, werden sie in eine Matrixform überführt und mittels eines mathematischen Lösungsverfahrens gelöst. Eines der am häufigsten verwendeten Lösungsverfahren ist die Transfer-Matrix-Methode (TMM). Für die TMM gelten einige Vereinfachungen, $\theta = \theta_t = \theta^\circ$, und die einfallende Welle ist eine harmonische. Dann ist die Amplitude der einfallenden Welle innerhalb des Mediums 1 A_1 und die reflektierte A_1' . Die transmittierte Welle im Medium 2 wird mit A_2 bezeichnet. Unter Verwendung dieser Notation und der Beziehung $B^{\parallel} = \frac{n}{c} E^{\perp}$, die aus den Maxwell'schen Gleichungen resultiert, entstehen aus den Gleichungen (3.65), (3.67) und (3.68)

$$A_1 + A_1' = A_2 \quad (3.69)$$

und

$$-n_1 A_1 + n_1 A_1' = -n_2 A_2. \quad (3.70)$$

3.4.4 Die Transfermatrixmethode: Beschreibung von Grenzflächen

Wird die Annahme getroffen, dass an der Grenzfläche zwischen Medium 1 und Medium 2 jeweils auf beiden Seiten eine einfallende Welle und eine transmittierte Welle existiert, welche durch Reflexionen an anderen Schichten entstehen kann, so ergeben sich

$$A_1 + A_1' = A_2 + A_2' \quad (3.71)$$

und

$$-n_1 A_1 + n_1 A'_1 = -n_2 A_2 + n_2 A'_2. \quad (3.72)$$

Die Gleichungen (3.71) und (3.72) können auch in vektorieller Schreibweise, wie folgt, geschrieben werden [49]:

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ B_1 \end{pmatrix}_{Y=0} = \begin{pmatrix} A_1 + A'_1 \\ -n_1 A_1 + n_1 A'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_2 + A'_2 \\ -n_2 A_2 + n_2 A'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_2 \\ B_2 \end{pmatrix}_{Y=0}. \quad (3.73)$$

Die Separation der Amplituden führt zu:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_1 & n_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_2 & n_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ A'_2 \end{pmatrix} \quad (3.74)$$

und kann in

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ A'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_2 & n_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_1 & n_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A'_1 \end{pmatrix} \quad (3.75)$$

überführt werden. Mit T wird eine Zusammenfassung wie folgt eingeführt:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_2 & n_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_1 & n_1 \end{pmatrix} \quad (3.76)$$

Nach Kalkulation der inversen Matrizen ergibt sich:

$$T = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{n_2} \\ 1 & \frac{1}{n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_1 & n_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{n_1}{n_2} & 1 - \frac{n_1}{n_2} \\ 1 - \frac{n_1}{n_2} & 1 + \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \quad (3.77)$$

was eingesetzt zu

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ A'_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{n_1}{n_2} & 1 - \frac{n_1}{n_2} \\ 1 - \frac{n_1}{n_2} & 1 + \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A'_1 \end{pmatrix} \quad (3.78)$$

führt.

3.4.5 Die Transfermatrixmethode: Beschreibung von mehrere Grenzflächen

Es wird angenommen, dass sich ein drittes Medium (Medium 3) mit einem Abstand von $Y = d$ und einem Brechungsindex von n_3 in dem zu betrachtenden Schichtsystem befindet. Für diesen Abstand gilt [49]:

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

$$E_2 = A_2 e^{jk_2 d} + A_2' e^{-jk_2 d} = A_3 e^{jk_3 d} + A_3' e^{-jk_3 d} = E_3 \quad (3.79)$$

und

$$B_2 = -n_2 A_2 e^{jk_2 d} + n_1 A_2' e^{-jk_2 d} = -n_3 A_3 e^{jk_3 d} + n_3 A_3' e^{-jk_3 d} = B_3. \quad (3.80)$$

Die Gleichungen (3.79) und (3.80) können in Matrizenform geschrieben werden und lauten dann:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_2 \\ B_2 \end{pmatrix}_{Y=d} &= \begin{pmatrix} e^{jk_2 d} & e^{-jk_2 d} \\ -n_2 e^{jk_2 d} & n_2 e^{-jk_2 d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ A_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{jk_3 d} & e^{-jk_3 d} \\ -n_3 e^{jk_3 d} & n_3 e^{-jk_3 d} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} E_3 \\ B_3 \end{pmatrix}_{Y=d} \end{aligned} \quad (3.81)$$

In dieser Gleichung kann der Vektor $\begin{pmatrix} A_2 \\ A_2' \end{pmatrix}$ durch die Gleichung (3.75) ersetzt werden zu

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ B_3 \end{pmatrix}_{Y=d} = \begin{pmatrix} e^{jk_3 d} & e^{-jk_3 d} \\ -n_3 e^{jk_3 d} & n_3 e^{-jk_3 d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -n_1 & n_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_1' \end{pmatrix}. \quad (3.82)$$

Mit

$$M_2 = \begin{pmatrix} e^{jk_3 d} & e^{-jk_3 d} \\ -n_3 e^{jk_3 d} & n_3 e^{-jk_3 d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2n_2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2n_2} \end{pmatrix} \quad (3.83)$$

entsteht

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ B_3 \end{pmatrix}_{Y=d} = M_2 \begin{pmatrix} E_1 \\ B_1 \end{pmatrix}_{Y=0}. \quad (3.84)$$

Mittels der Gleichung (3.84) kann nun das elektrische und magnetische Feld an der Grenzfläche bei $Y = d$ vorherbestimmt werden, indem das Feld bei $Y = 0$ mit der Matrix M_2 multipliziert wird.

Mittels dieser Methode kann für unterschiedliche Medien eine Gleichung wie folgt gefunden werden:

$$\begin{pmatrix} E_f \\ B_f \end{pmatrix}_{Y=Y_{final}} = M_{f-1} \dots M_3 \cdot M_2 \begin{pmatrix} E_1 \\ B_1 \end{pmatrix}_{Y=0} \quad (3.85)$$

Eine vollständige Betrachtung von Multischichtsystemen ist in [47], [50] dargestellt.

3.4.6 Eigenschaften nicht idealer Grenzflächen

In den zuvor vorgestellten Ansätzen ist von einigen Vereinfachungen und Einschränkungen ausgegangen worden. Hier soll nun auf nicht ideale Grenzflächen eingegangen werden, um zu zeigen, welche grundsätzlichen Effekte auftreten können. Fällt ein Strahlungsfluss auf eine nicht ideale Oberfläche, treten drei Effekte auf:

- Transmission,
- Absorption und
- Reflexion.

An einer Grenzfläche gibt es einen spiegelnden Teil und einen diffusen Teil in der Reflexion und der Transmission. Als spiegelnder Teil wird das Licht bezeichnet, das ohne Streuung reflektiert oder transmittiert wird. Eine diffuse Reflexion oder Transmission hingegen besteht aus gestreutem Licht. Im Falle einer idealen, glatten Grenzfläche kann davon ausgegangen werden, dass nur ein spiegelnder Teil existiert.

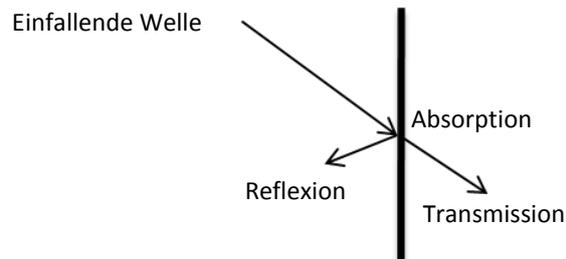


Abbildung 10: Idealer Fall, eine monochromatische Welle trifft auf ein lineares, homogenes und nicht dispersives Material. Dann entstehen Transmission, Absorption und Reflexion.

Anders verhält sich dies bei Oberflächen, die nicht ideal sind und eine höhere Rauigkeit aufweisen. Hier treten im Wesentlichen fünf Arten der Reflexion oder Transmission auf. Je nach Beschaffenheit des Materials, auf das das Licht fällt, treten diese kombiniert auf. In Abbildung 11 sind diese fünf Arten schematisch dargestellt [51].

- a) Reflexion mit starken diffusen Komponenten
- b) Reflexion mit starken spiegelnden Komponenten
- c) Reflexion mit starken retroreflektierenden Komponenten
- d) Normale Transmission
- e) Diffuse Transmission

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

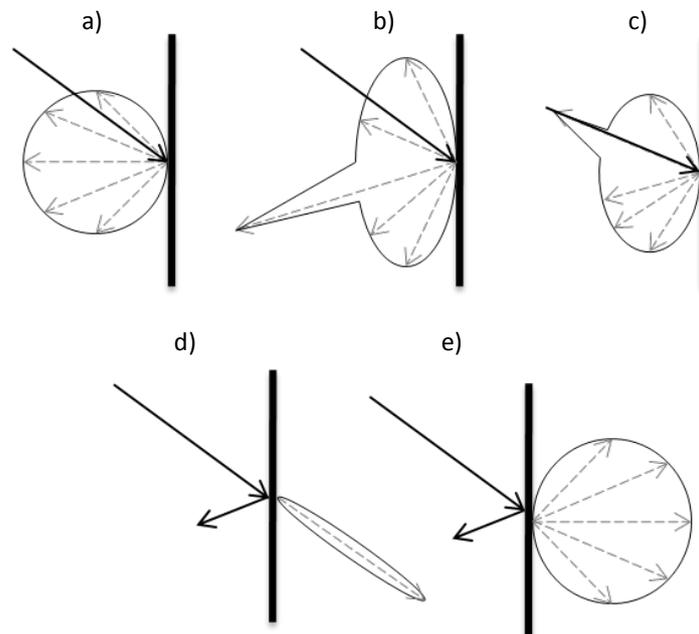


Abbildung 11: Nicht idealer Fall von Transmission und Reflexion an einer Grenzfläche [51].

3.4.7 Idealer planarer Fabry-Pérot-Resonator

Ein optischer Resonator fängt und definiert Licht bestimmter Wellenlängen, indem das einfallende Licht in ihm zirkuliert. Es wird wiederholt innerhalb des Systems reflektiert, so dass der größte Teil des Lichtes nicht hinausgelangt. Der einfachste Aufbau eines Resonators besteht aus zwei parallelen planaren Spiegeln (Abbildung 12), zwischen denen das Licht mit wenigen Verlusten reflektiert und transmittiert wird. Dieser Aufbau ist als Fabry-Pérot-Resonator bekannt. Da nur Licht mit bestimmten Wellenlängen von diesem System transmittiert wird, kann diese wellenlängenabhängige Selektion eines Fabry-Pérot-Resonators genutzt werden, um als WSE in einem Spektrometer eingesetzt zu werden.

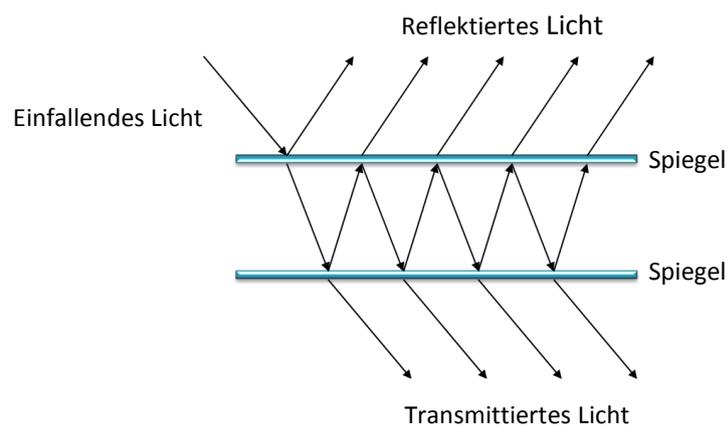


Abbildung 12: Fabry-Pérot-Resonator, bestehend aus zwei parallelen planaren Spiegeln.

Ein idealer Resonator hat keine Verluste in den beiden Spiegeln, die zudem perfekt parallel sind. Auch in dem Resonatormedium zwischen den Spiegeln entstehen keine Verluste.

3.4.8 Resonatormoden

Die Resonatormoden lassen sich aus der Helmholtzgleichung errechnen und sind deren triviale Lösung. Es wird von einer monochromatischen Welle mit der Frequenz f ausgegangen:

$$u(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{U(\mathbf{r})e^{j2\pi ft}\}. \quad (3.86)$$

Gleichung (3.86) beschreibt die transversalen Komponenten des elektrischen Feldes, dabei erfüllt $U(\mathbf{r})$ die Helmholtzgleichung

$$\nabla^2 U + k^2 U = 0 \quad (3.87)$$

mit der Wellenzahl $k = 2\pi f/v_m$ und v_m der Geschwindigkeit des Lichtes in dem Medium. Bei einem planaren Resonator verschwinden die Transversalkomponenten an den Grenzflächen, sodass bei $z = 0$ und $z = d$ der Wert $U(\mathbf{r}) = 0$ ist. Das Ergebnis daraus ist eine stehende Welle, die Resonatormode [52]:

$$U(\mathbf{r}) = A \sin kz. \quad (3.88)$$

In der Gleichung (3.88) ist A konstant und erfüllt die Helmholtzgleichung, d.h. A verschwindet bei $z = 0$ und $z = d$, wenn k die Bedingung $kd = m\pi$ mit m als Integerzahl erfüllt. Dies führt dazu, dass für $k_m = m\pi/d$ gilt und die Moden eine komplexe Amplitude haben: $U(\mathbf{r}) = A_m \sin k_m z$. Somit sind die Moden in einem Resonator stehende Wellen und die positiven Integerzahlen $m = 1, 2, 3, \dots$ heißen Modenzahlen.

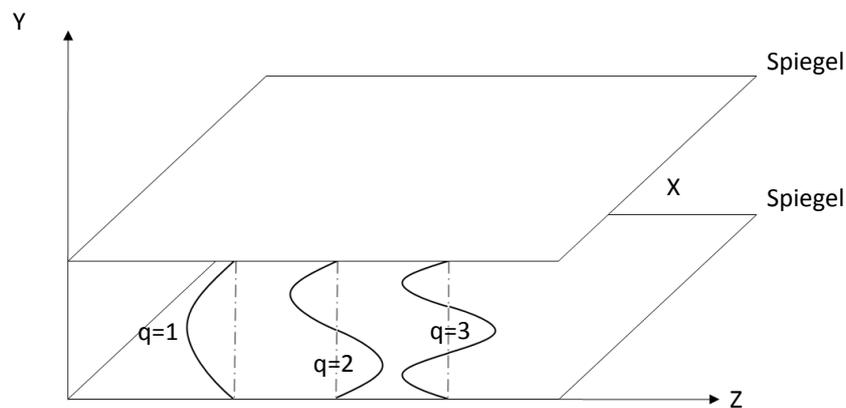


Abbildung 13: Feldverteilung der verschiedenen Moden eines planaren Interferometers [52].

Eine beliebige Welle innerhalb des Resonators kann als eine Überlagerung von Resonatormoden angesehen werden.

$$U(\mathbf{r}) = \sum_m A_m \sin k_m z \quad (3.89)$$

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Dabei ist die Frequenz $f = v_m k / 2\pi$ auf diskrete Werte festgelegt:

$$f_m = \frac{mv_m}{2d} \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.90)$$

Diese Frequenzen werden auch Resonatorfrequenzen genannt. Die Resonanzwellenlängen sind $\lambda_m = 2d/m$ und $v_m = c_0/n$ ist die Geschwindigkeit des Lichtes im Kavitätsmaterial. Bei jedem Durchgang ($2d$) in der Lichtausbreitung innerhalb des Resonators findet zusätzlich ein Phasensprung statt.

$$\varphi = k2d = m2\pi \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.91)$$

Dies führt zu der Beziehung $kd = m\pi$, wobei k die Wellenzahl ist, welche zuvor als $k = 2\pi\nu/c$ definiert worden ist. Ein solcher Resonator arbeitet wie eine Schleife, bei der der Ausgang mit dem Eingang verbunden ist.

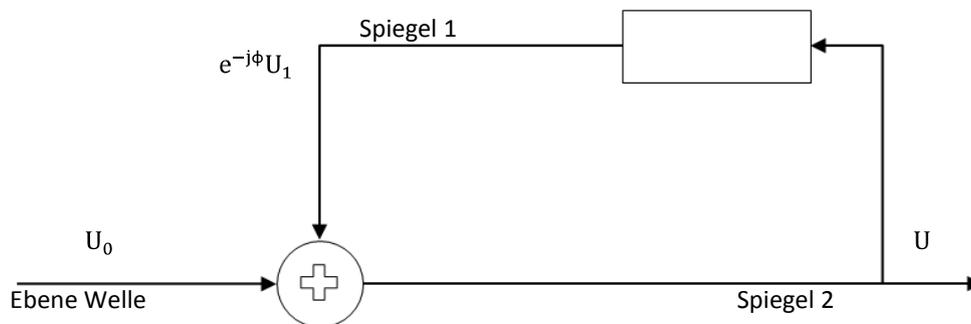


Abbildung 14: Diagramm der optischen Schleife

Das Licht mit einer komplexen Amplitude U_0 wird vom Spiegel 2 reflektiert und läuft zurück zu Spiegel 1, wo es wieder reflektiert wird, wobei es die Amplitude U_1 bekommt. Dies setzt sich fort mit $U_0, U_1, U_2, U_3, \dots$, womit eine Welle als Ganzes eine Summe unendlich vieler Versoren mit gleichem Betrag ist, unter der Bedingung, dass keinerlei Absorption oder andere Verluste auftreten.

3.5 Verlustbehafteter und nicht idealer Fabry-Pérot-Resonator

Im Abschnitt „Resonatormoden“ wurde der Fabry-Pérot-Resonator als ideal behandelt, um seine Funktionsweise zu verstehen. In Wirklichkeit besteht ein solches System aus mehreren Schichten unterschiedlicher Materialien, die jeweils spezifische Absorptionen aufweisen. Um solche Systeme hinsichtlich ihrer Transmission und Reflexion zu berechnen, stehen verschiedene kommerziell erhältliche Softwarepakete zur Verfügung. Sie basieren größtenteils auf der im Abschnitt „Die Transfermatrixmethode: Beschreibung von mehrere Grenzflächen“ eingeführten Matrixmethode. Im Rahmen dieser Arbeit kam das Programm OpenFilters zum Einsatz, um die Mehrschichtsysteme zu berechnen. Aus diesem Grund wird hier darauf verzichtet, eine komplette Abhandlung des Themas „Nicht ideale Fabry-Pérot-

Resonatoren“ zu präsentieren, es wird nur auf die wichtigsten Teile eingegangen. Ein vollständige Abhandlung findet sich in [52] und [37].

Intensität der Transmission eines nicht idealen Fabry-Pérot-Resonators

Ein nicht idealer Fabry-Pérot-Resonator besteht aus zwei nicht vollkommen transparenten mit Verlusten behafteten Spiegeln, die durch ein Kavitätsmaterial mit der Dicke d voneinander getrennt sind. Im Folgenden wird ein solcher Resonator analysiert. Auf diesen Planar-Spiegel-Resonator trifft eine ebene Welle mit der komplexen Amplitude U_i und der Intensität I_i (einfallende Welle, i steht für incident), die beim Durchlaufen mehrere Reflexionen und Transmissionen erfährt (Abbildung 15). Es wird der Amplitudendämpfungsfaktor r eingeführt, der die Verluste bei der Reflexion an den Spiegeln und die Absorption beschreibt.

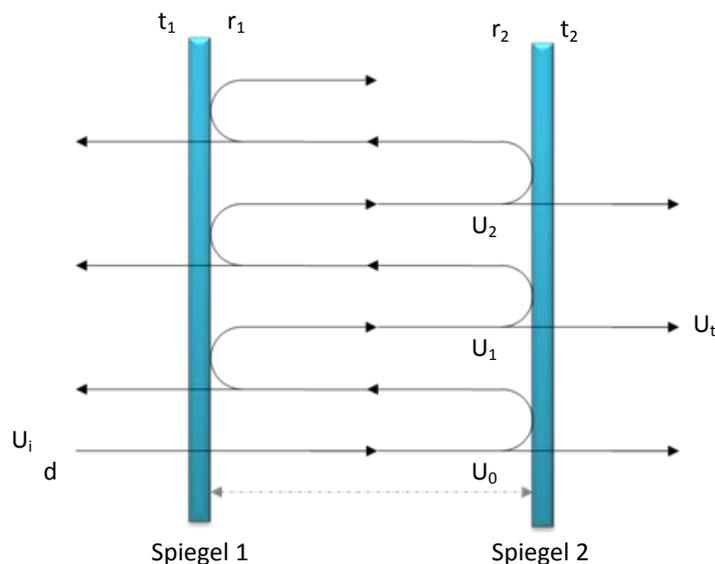


Abbildung 15: Durch die Vor-und-zurück-Reflexion zwischen den Resonatorspiegeln entsteht eine Phasenverschiebung [52].

In einem Resonator mit Verlusten verursacht die Welle U_0 eine unendliche Anzahl von weiteren Wellen durch wiederholte Reflexion. Der Phasenunterschied nach den Reflexionen an beiden Spiegeln ist dabei:

$$\varphi = k2d = \frac{4\pi nd}{v_m}. \quad (3.92)$$

Aufgrund der nicht perfekten Spiegel und der Absorption in den Medien wird eine effektive „Spiegel“-Reflexion R eingeführt. Dies führt im Weiteren dazu, dass ein Intensitätsfaktor R^2 und die Relation $h = Re^{-j\varphi}$ definiert werden können. Unter Verwendung von R sei

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

$U_1 = hU_0$ und U_2 ist wiederum mit dem gleichen komplexen Faktor h mit U_1 verknüpft. Genauso wie für alle weiteren entstehenden Wellen gilt [52]:

$$U = U_0 + U_1 + U_2 + \dots = U_0 + hU_0 + h^2U_0 + \dots \quad (3.93)$$

$$U = U_0 \cdot (1 + h + h^2 + \dots) = \frac{U_0}{1-h}. \quad (3.94)$$

Die Intensität kann wie folgt abgeleitet werden:

$$I = |U|^2 = \frac{U_0^2}{|1-Re^{-j\varphi}|^2} = \frac{I_0}{(1+R^2-2R\cos\varphi)} = \frac{I_0}{(1-R)^2+4R\sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)}. \quad (3.95)$$

Diese Funktion ist als Airy-Funktion bekannt und wird oft wie folgt geschrieben [53], [54]:

$$\frac{I_T}{I_0} = \frac{1}{1+F\cdot\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)}. \quad (3.96)$$

Der Koeffizient $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ ist der Finesse-Koeffizient.

Verluste im Kavitätsmaterial des Resonators

Auch in dem Medium, das die beiden Spiegel voneinander trennt, entstehen Verluste durch Absorption und Streuung. Um für diese Materialien einen Dämpfungskoeffizienten zu definieren, wird zunächst ein Absorptionskoeffizient für das jeweilige Material definiert. Dieser sei α_m , wobei das m das jeweilige Material verdeutlicht. Für einen Durchlauf innerhalb des Resonators kann dann der Dämpfungskoeffizient festgelegt werden [52]:

$$e^{-2\alpha_m d} \quad (3.97)$$

Freier Spektralbereich FSR, FWHM, Finesse und Auflösungsvermögen

Es gibt vier wichtige Parameter, mit denen die spektrale Antwort eines Fabry-Pérot-Resonators charakterisiert werden kann. Dies sind der freie Spektralbereich, die Halbwertsbreite, die Finesse und das Auflösungsvermögen.

Freier Spektralbereich (FSR)

Als freier Spektralbereich wird der Abstand zwischen zwei benachbarten Modenfrequenzen bezeichnet. Die Abkürzung FSR ist von dem englischen Begriff „free spectral range“ abgeleitet.

Ausgehend von der Airy-Funktion wird im Folgenden der freie Spektralbereich hergeleitet. Die Airy-Funktion beschreibt das Verhältnis zwischen der von einem Fabry-Pérot-Resonator transmittierten Intensität und der Intensität der einfallenden Welle. Um das

Maximum an Transmission zu erlangen, muss das Verhältnis $\frac{I_T}{I_0} = 1$ sein. Dies geschieht, wenn

$$\sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = 0 \quad (3.98)$$

ist. Gleichung (3.98) wird null, wann immer $\Delta\varphi/2$ ein ganzzahliges Vielfaches von π ist. Unter Zuhilfenahme der Berechnung des Phasenwinkels:

$$\Delta\varphi = \frac{2d \cdot \cos(\theta_r)}{\lambda} \cdot 2\pi = \frac{4\pi nd}{\lambda_0} \cdot \cos(\theta_r) \quad (3.99)$$

kann $\Delta\varphi$ durch

$$m \cdot \pi = \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi nd}{\lambda_{0,max}} \cdot \cos(\theta_r), \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.100)$$

ersetzt werden. Die Gleichung (3.100) wird nach der Wellenlänge der maximalen Transmission aufgelöst:

$$\lambda_{0,max} = \frac{2nd}{m} \cdot \cos(\theta_r), \text{ wobei } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.101)$$

Für diese speziellen Wellenlängen wird die Airy-Funktion maximal. Da der freie Spektralbereich nicht über Wellenlängen definiert ist, sondern über Frequenzen, wird Gleichung (3.101) mittels der Relation $f = c_0/\lambda_0 = c/\lambda$ zu:

$$f_{max} = \frac{m \cdot c_0}{2nd \cdot \cos(\theta_r)}, \text{ wobei } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.102)$$

Der Abstand zwischen diesen benachbarten Frequenzen, der Frequenz f_m und der Frequenz f_{m+1} , ist schließlich der freie Spektralbereich:

$$\text{FSR: } \Delta f_{FSR} = \frac{c_0}{2nd \cdot \cos(\theta_r)} \quad (3.103)$$

Die Literatur gibt den freien Spektralbereich oft für senkrechten Einfall an [53], [55]:

$$\Delta f_{FSR}(\theta_r = 0) = \frac{c_0}{2nd} \quad (3.104)$$

Halbwertsbreite FWHM

FWHM steht im Englischen für „full width half maximum“ und beschreibt die Breite des spektralen Bereiches, in dem die (transmittierte) Intensität mindestens die Hälfte der maximalen Intensität beträgt:

$$\frac{I_T}{I_0} = \frac{1}{2} \quad (3.105)$$

Wie schon bei der Bestimmung des freien Spektralbereichs wird diese Bedingung in die Airy-Funktion eingesetzt. Sie ist erfüllt, wenn

$$\Delta\varphi_{\text{FWHM}} = 2 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{F}}\right) + 2(m \cdot 2\pi), \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.106)$$

gilt. Gleichung (3.106) gibt die Anfangs- und Endpunkte an, bei denen die Intensität genau 50 % beträgt. Der Abstand zwischen diesen beiden Punkten wird mit

$$\Delta\Delta\varphi_{\text{FWHM}} = 4 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{F}}\right) \approx \frac{4}{\sqrt{F}} \quad (3.107)$$

berechnet und ist die Größe des Bereichs zwischen zwei benachbarten Phasenverschiebungen [56]. Um den Zusammenhang zwischen Phasenverschiebung und Wellenlänge herzustellen, wird wieder die Gleichung (3.99) verwendet. Eingesetzt ergibt sich eine Gleichung, die die Wellenlängen angibt, bei denen die Intensität 50 % beträgt:

$$\lambda_{0,\text{FWHM}} = \frac{2\pi nd \cdot \cos(\theta_r)}{\arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{F}}\right) + (m \cdot 2\pi)}, \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.108)$$

Und für die Frequenz gilt:

$$f_{\text{FWHM}} = \frac{c_0 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{F}}\right) + c_0(m \cdot 2\pi)}{2\pi nd \cdot \cos(\theta_r)} \quad (3.109)$$

Die Halbwertsbreite Δf_{FWHM} ergibt sich aus der Differenz zweier benachbarter Frequenzen, die die Gleichung (3.109) erfüllen:

$$\text{FWHM: } \Delta f_{\text{FWHM}} = \frac{c_0 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{F}}\right)}{\pi nd \cdot \cos(\theta_r)} \quad (3.110)$$

Für senkrechten Einfall und einen großen Finesse-Koeffizienten wird daraus

$$\Delta f_{FWHM} \approx \frac{c_0}{\pi m d \sqrt{F}}, \text{ für } F \gg 1. \quad (3.111)$$

Finesse \mathcal{F}

Mit Finesse wird das Verhältnis zwischen dem freien Spektralbereich und der Halbwertsbreite bezeichnet:

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta f_{FSR}}{\Delta f_{FWHM}}. \quad (3.112)$$

Aus den zuvor hergeleiteten Gleichungen für den freien Spektralbereich (Gleichung (3.103)) und für die Halbwertsbreite (Gleichung (3.110)) lässt sich die Finesse berechnen [53], [54], [57], [58]:

$$\mathcal{F} = \frac{\pi}{2 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{F}}\right)} \approx \frac{\pi\sqrt{F}}{2} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}. \quad (3.113)$$

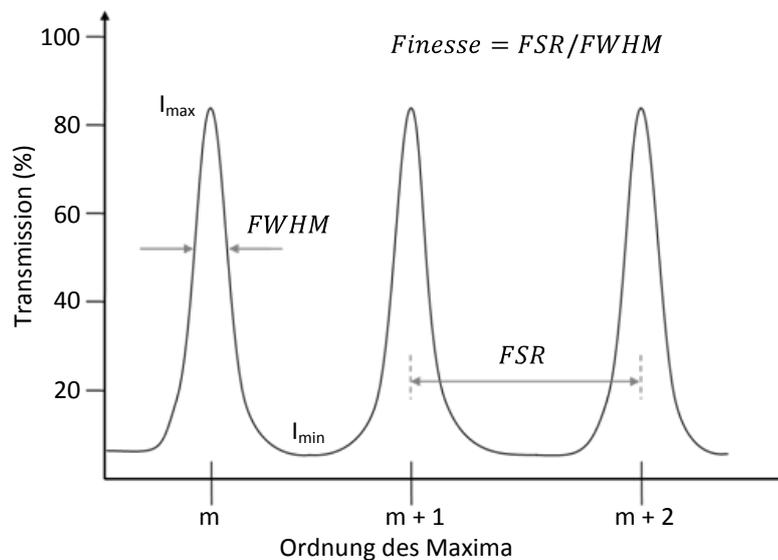


Abbildung 16: Die Halbwertsbreite (FWHM) und der freie spektrale Abstand (FSR) bestimmen die Finesse.

Auflösungsvermögen

Wie bereits in Abschnitt „Ausdrücke der Spektroskopie“ kurz beschrieben, gibt das spektrale Auflösungsvermögen an, wie nah nebeneinander zwei monochromatische einfallende Wellen im Spektrum liegen dürfen, damit das Instrument sie noch auflösen kann.

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Hier wird nun von dem Rayleigh-Kriterium ausgegangen, wodurch sich das Auflösungsvermögen eines Fabry-Pérot-Resonators wie folgt beschreiben lässt [59]:

$$A = \frac{\lambda_{0,\max}}{\Delta\lambda_{0,\text{FWHM}}} = \frac{\Delta\varphi_{\max}}{\Delta(\Delta\varphi_{\text{FWHM}})}. \quad (3.114)$$

Zusammen mit der Gleichung (3.99) für die Phasenverschiebung und der Gleichung (3.107) für den Bereich der Phasenverschiebung $\Delta(\Delta\varphi_{\text{FWHM}})$ ergibt sich eine Lösung, die mit den Gleichungen (3.101) und (3.113) vereinfacht werden kann [57], [59]:

$$A = \frac{\pi n d \cdot \cos(\theta_r)}{\lambda_{0,\max} \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{F}}\right)} = m \cdot \mathcal{F} \quad (3.115)$$

Verluste in den Spiegeln

Die wichtigsten Quellen für Verluste innerhalb der Spiegel sind [52]:

- nicht perfekte Reflexion durch eine zu raue Oberfläche,
- teilweise Reflexion aufgrund teils transparenter Spiegel, wodurch Licht aus dem Resonator entkommen kann,
- und der endlichen Größe der Spiegel, wodurch Licht verloren geht.

Herkömmliche makroskopische Geräte haben typischerweise eine Arbeitsfläche von 5 cm² und eine Oberflächenplanarität der Spiegel besser als $\lambda/150$ im sichtbaren Bereich. Solche Werte sind unrealistisch für mikromechanische Technologien.

Die effektiven Reflexionen R_1 und R_2 an den Spiegeln reduzieren die Intensität der Welle bei jedem Durchlauf durch den Resonator um den Faktor $R_1 R_2$ [52]:

$$R^2 = R_1 R_2 e^{-2\alpha_m d} \quad (3.116)$$

Es ist nun möglich, einen effektiven Gesamtverlustkoeffizienten zu definieren:

$$\alpha_r = \alpha_m + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (3.117)$$

Nicht senkrechter Lichteinfall und nicht parallele Spiegel

Licht, das nicht senkrecht auf einen Resonator trifft, kann diese leichter verlassen als Licht, das senkrecht einfällt. Dies liegt an der Ausbreitung einer solchen Welle Richtung Rand, in dem Sie dann verschwindet. Bezogen auf ein aus Fabry-Pérot-Resonatoren bestehendes Spektrometer führt dies zu schlechteren Auflösungen. Sind die beiden Spiegel parallel zueinander und wird der Einfallswinkel verändert, können spektrale Informationen über die folgende Gleichung errechnet werden:

$$m\lambda = 2nd \cos \alpha, \quad (3.118)$$

wobei m einen ganzzahligen Wert annimmt, α der Winkel des einfallenden Lichts ist, n den Brechungsindex des Kavitätsmaterials beschreibt und d der Abstand zwischen den beiden Spiegeln ist. Wenn der Winkel erhöht wird, d.h. vom senkrechten Einfall mit 0° abweicht, verändert sich der Mode innerhalb des Resonators und die Auflösung und die Transmission werden schlechter.

Sind die Spiegel nicht parallel, läuft das Licht genauso aus dem Resonator. Im Grunde kann ein solcher Resonator benutzt werden, um damit zu messen, jedoch muss von einer stark verminderten Finesse und Auflösung ausgegangen werden. Aus diesem Grund sind in kommerziell erhältlichen Geräten mit einer hohen Stabilität ($\lambda/5000$) Kontrollsysteme integriert, die die Parallelität der zwei Spiegel bis auf 0,1 nm genau überwachen, bei einer Wellenlänge von $\lambda = 500$ nm [60].

3.6 Bragg-Spiegel

Ein Bragg-Spiegel oder DBR-Spiegel (aus dem englischen „distributed Bragg reflector“) ist eine Struktur, die aus einer Sequenz von zwei unterschiedlichen optischen Materialien besteht. Die am häufigsten genutzte Variante ist der Viertelwellenlängenspiegel, bei dem alle Schichten eine Dicke von einem Viertel der Wellenlänge $d_i = \lambda_0/(4n_i)$ haben, für die der Spiegel designt wurde [61].

Für die Beschreibung und Modellierung solcher Schichtsysteme, bestehend aus alternierenden Schichten H mit hoher Brechzahl n_H und L mit entsprechend niedriger Brechzahl n_L auf einem Substrat g , kann die folgende Schreibweise verwendet werden:

$$gHLHLHL a \text{ bzw. } g(HL)^3 a$$

Der Buchstabe a steht dabei für das Medium, in dem sich die Welle ausbreitet, bis sie auf den Bragg-Spiegel trifft. Vier verschiedene Designs für einen einfachen Bragg-Spiegel sehen dann wie folgt aus:

$$g(HL)^m a,$$

$$g(HL)^m H a,$$

$$g(LH)^m a \text{ und}$$

$$g(LH)^m L a.$$

Die Anzahl der Perioden, die für einen Bragg-Spiegel verwendet werden, werden mit dem Buchstaben m beschrieben. Eine solche Periode besteht aus einer hoch und einer niedrig brechenden Schicht.

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

Als Substrat wurde Borosilicatglas verwendet und Siliziumnitrid sowie Siliziumdioxid als Materialien für die Spiegel. Da Siliziumnitrid eine höhere Brechzahl hat als Siliziumdioxid, wird es hier mit H und Siliziumdioxid mit L bezeichnet.

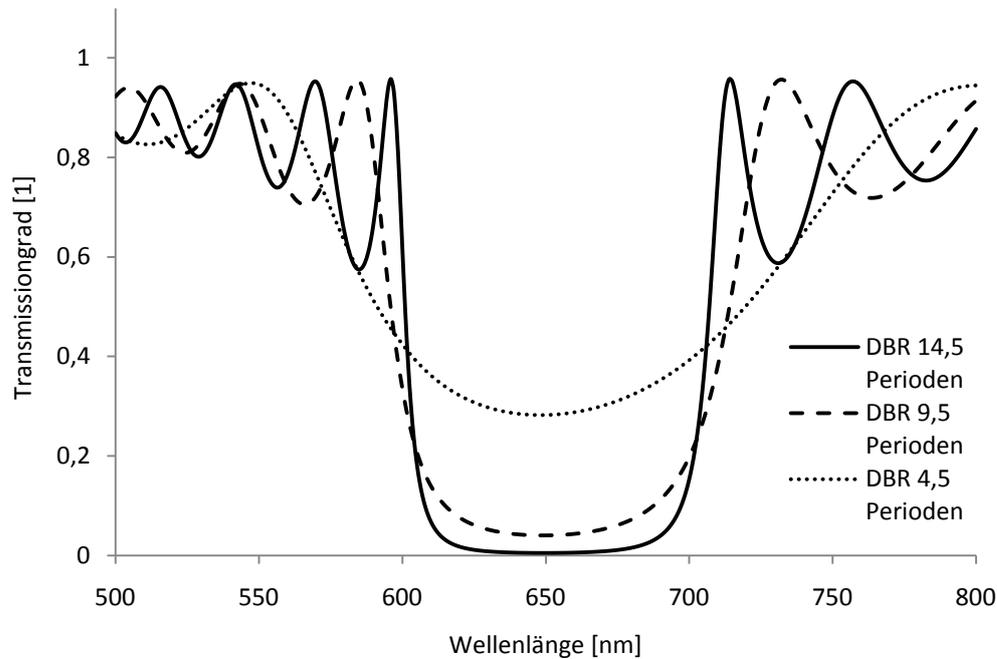


Abbildung 17: Modellierter Transmissionsgrad verschiedener Bragg-Spiegel aus SiO_2 (L) und Si_3N_4 (H) auf Borosilicatglas mit einer Designwellenlänge von 650 nm. Variiert wurde die Anzahl der Perioden des Spiegels: 4,5, 9,5 und 14,5 Perioden.

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Modellrechnungen, zu sehen sind die Transmissionsgrade für verschiedene Anzahlen von Perioden m bei einem Schichtsystem der Form $g(HL)^mHa$. Die Designwellenlänge, für die dieser Spiegel ausgelegt ist, beträgt $\lambda_0 = 650$ nm. Die Simulation zeigt, dass der Spiegel nicht nur Wellenlängen der Designwellenlänge reflektiert, sondern ein spektrales Band, dessen augenscheinliche Mitte bei der Designwellenlänge liegt. Dieses Band hoher Reflektivität wird als Stoppband bezeichnet.

Die Verwendung dieser Spiegel beim Bau eines Fabry-Pérot-Filters bringt auch spezifische Anforderungen an die Spiegel mit sich. So sollte das Stoppband spektral möglichst breit sein und in diesem Bereich einen hohen Reflexionsgrad und geringen Transmissionsgrad aufweisen. Der Transmissionsgrad ist für die Designwellenlänge am geringsten und hängt von der Anzahl der Perioden des Bragg-Spiegels ab. Je größer die Anzahl Perioden ist,

- umso geringer ist die transmittierte Energie der Designwellenlänge,
- umso steiler sind die Flanken des Stoppbandes und

- umso größer ist die Breite des Stoppbandes, unter Berücksichtigung der Tatsache, dass dessen generell erreichbare Breite vom Brechungsindexkontrast bestimmt wird. Je höher dieser ist, desto breiter ist das resultierende Stoppband.

Das Gleiche gilt auch an den Grenzflächen zwischen Filter und Substrat sowie Filter und Einstrahlmedium. Da die Brechzahlen von Borosilicatglas und Siliziumdioxid nahezu identisch sind, wurden die Varianten $g(HL)^m a$ und $g(HL)^m Ha$ verwendet.

Abbildung 18 zeigt eine Modellrechnung, in der die letzte Schicht hin zum einstrahlenden Medium variiert wurde.

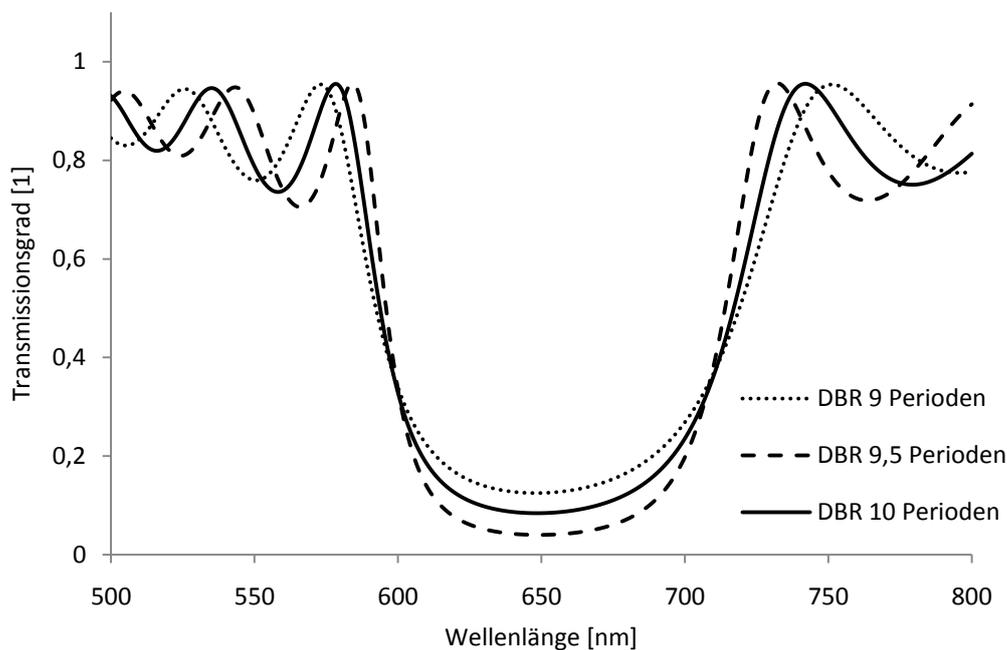


Abbildung 18: Modellierter Transmissionsgrad verschiedener Bragg-Spiegel aus SiO_2 (L) und Si_3N_4 (H) auf Borosilikatglas mit einer Designwellenlänge von 650 nm. Variiert wurde die Anzahl der Perioden (9, 9,5 und 10 Perioden), sodass die an die Luft angrenzende Schicht variiert.

Die drei berechneten Schichtsysteme unterscheiden sich aber nicht nur in der letzten Schicht an sich, sondern auch in der Anzahl der Perioden. Die mit der gepunkteten Linie dargestellte Funktion hat die wenigsten Schichten, die gestrichelt Dargestellte hat eine halbe Periode und die durchgängig Dargestellte eine ganze Periode mehr. Die Modellrechnung des Schichtsystems mit einer ganzen Periode mehr hat, wie zu erwarten war, einen geringeren Transmissionsgrad als die mit einer ganzen Periode weniger. Die Modellrechnung zeigt jedoch, dass die Funktion, bei der die letzte Schicht hoch brechend ist, einen noch geringeren Transmissionsgrad hat. Der Grund hierfür liegt in dem höheren Brechungsindexkontrast zwischen der hoch brechenden Schicht und der Luft. Auf diese Weise kann trotz einer Schicht weniger ein geringerer Transmissionsgrad erreicht werden.

3.7 Spektrometer, basierend auf Fabry-Pérot-Resonatoren

Es lassen sich zwei Arten von Spektrometern, basierend auf Fabry-Pérot-Resonatoren oder auch Fabry-Pérot-Filtern, unterscheiden. Je nach dem, ob die Kavität dynamisch verändert werden kann oder feststeht, entsteht im einen Fall ein durchstimmbares Spektrometer, welches die Wellenlängen nacheinander durchläuft, oder im anderen Fall, wenn die Kavität statisch ist, dafür jedoch für jede zu untersuchende Wellenlänge ein Filter zur Verfügung steht, ein statisches arraybasiertes Spektrometer.

Durchstimmbares Spektrometer

Ein durchstimmbares Spektrometer kann genutzt werden, um einen schmalen Bereich von Wellenlängen zu untersuchen. Es fungiert dabei als wellenlängenselektives Element. Dazu wird eine in seinem Abstand von den beiden Spiegeln veränderbarer Fabry-Pérot-Filter mit einigen Linsen und einem guten Fotodetektor kombiniert.

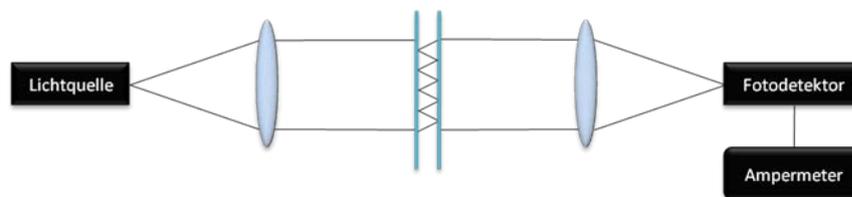


Abbildung 19: Durchstimmbarer Spektrometertyp.

Durch eine mechanische Veränderung des Abstandes kann ein bestimmter Teil eines Spektrums durchlaufen werden und erlaubt so eine präzise Messung der Lichtintensität. Ein solches Fabry-Pérot-basiertes Spektrometer benötigt eine sehr kleine Absorption in den Spiegeln und der Kavität sowie einen empfindlichen Fotodetektor bezüglich des zu messenden Wellenlängenbereichs. Eine kleine Veränderung im Abstand der beiden Spiegel zueinander bewirkt dabei eine entscheidende Verschiebung der Resonanzwellenlänge λ_m und auch des freien Spektralbereichs.

Statisches arraybasiertes Spektrometer

Im Gegensatz zu dem durchstimmbaren Typ hat das statische arraybasierte Spektrometer solide Kavitäten innerhalb jedes Filters. Unter den Resonatoren ist im Idealfall für jeden Filter ein Detektor angebracht, der die Intensität des jeweiligen Lichts, welches durch den Filter transmittiert wird, bestimmt. Eine Kollimatorlinse sorgt im einfachsten Fall für eine gleichmäßige Ausleuchtung des gesamten Feldes mit den jeweiligen Filtern. Eine fokussierende Linse ist dann nicht nötig, da die Fotodetektoren sich direkt unter den Filtern befinden.

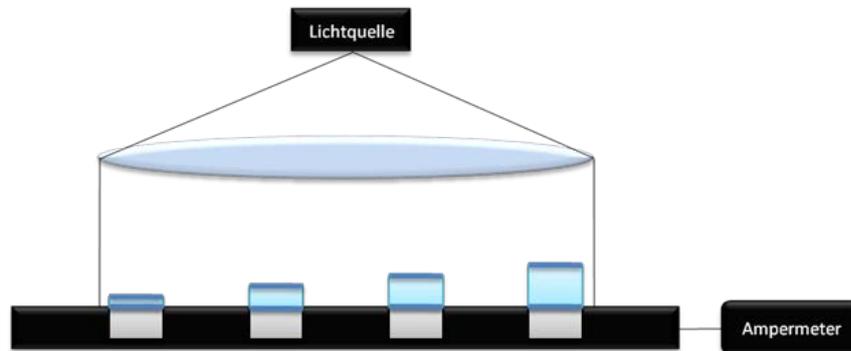


Abbildung 20: Statischer Spektromertyp.

Die Intensität, die jedes Etalon erreicht, entspricht vereinfacht der Gesamtintensität I_g/n , wobei n die Anzahl der Filter ist. Dabei wurde vernachlässigt, dass zwischen den einzelnen Filtern ein ungenutzter Zwischenraum sein kann.

Spektren

Jedes auftretende Spektrum kann als eine Summe von unendlich vielen einfachen, monochromatischen Linien verschiedener Wellenlängen betrachtet werden. Ein ideales Spektrometer würde als elektrisches Signal ein identisches Spektrum liefern wie das zu Messende. Dies ist in der Realität nicht so. Der größte Einflussfaktor, der dies verhindert, ist die spektrale Verbreiterung des Signals am Eingang.

Angenommen, eine Lichtquelle emittiert ein Spektrum, das aus nur einer monochromatischen Wellenlänge besteht. Nachdem dieses Spektrum das Spektrometer durchlaufen hat, ist aus der Linie ein Profil geworden, welches eine finite Breite hat [62].

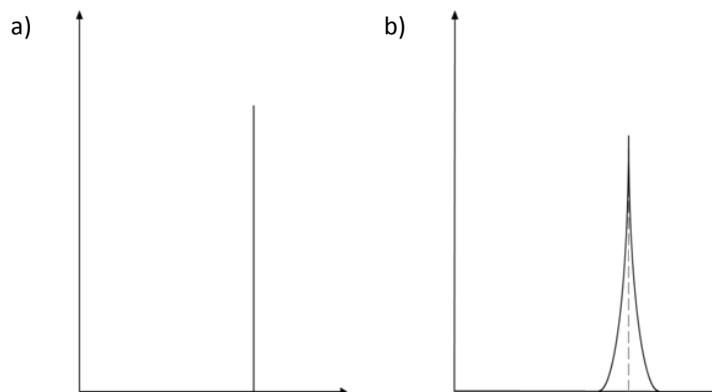


Abbildung 21: a) reales Spektrum einer monochromatischen Welle, b) aufgezeichnetes Spektrum eines realen Spektrometers.

Für diesen Fall gilt die Beziehung zwischen Spektrometerlinienprofil, dem Eingangsspektrum und dem aufgezeichneten Spektrum des Spektrometers:

3 Theoretische Betrachtung von Spektrometern verschiedener Bauformen und Grundprinzipien

$$R(\lambda) = L(\lambda) * P(\lambda), \quad (3.119)$$

wobei $R(\lambda)$ das aufgezeichnete Spektrum des Spektrometers ist, $L(\lambda)$ das Eingangsspektrum beschreibt, welches zu analysieren ist, und $P(\lambda)$ das Spektrometerlinienprofil. Das aufgezeichnete Spektrum ist die Faltung des Eingangsspektrums und des Spektrometerlinienprofils [63], [64]. Das Spektrometerlinienprofil setzt sich dabei aus verschiedenen Parametern zusammen: der Linienbreite des Eingangsstrahls, der Beugungsphänomene, der Qualität der Beschichtungen, der präzisen Ausrichtung der Einzelkomponenten und der Absorption [62].

Durchstimmbares Spektrometer

Im Falle eines durchstimmbaren Spektrometers führt eine Messung zu einer zeitkontinuierlichen Funktion $I(t)$, in welcher die Intensität sequenziell gemessen wird. Die spektrale Auflösung hängt dabei von der Genauigkeit der Spiegelbewegung ab.

Statisches arraybasiertes Spektrometer

Das statische arraybasierte Spektrometer erzeugt kein kontinuierliches Spektrum, sondern eine diskrete Anzahl von Messpunkten. Diese sind die Transmission jedes einzelnen Filters im Spektrometer. In Abhängigkeit von der Anzahl der einzelnen Filter und deren Linienbreite wird so ein Bereich des Eingangsspektrums diskretisiert und danach zu einem Ergebnisspektrum rekonstruiert. Dazu muss die Wellenlänge, die jeder einzelne Filter transmittiert, bekannt sein und mittels eines Fotodetektors aufgenommen werden.

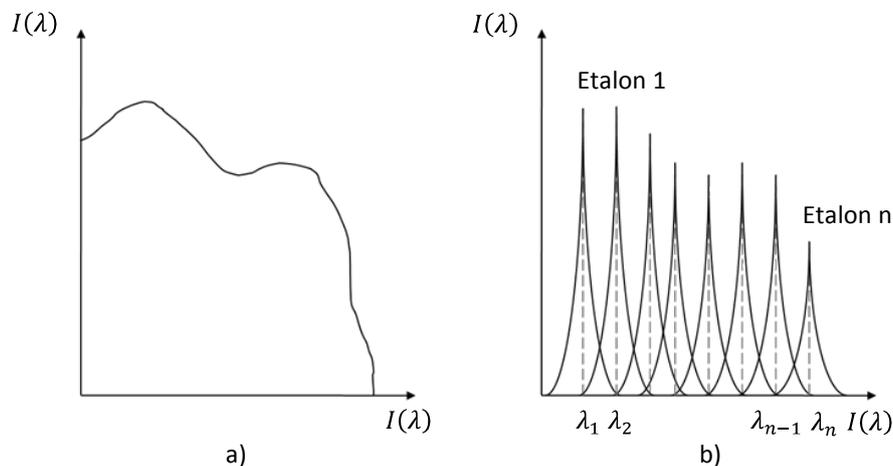


Abbildung 22: a) das von der Lichtquelle ausgestrahlte Spektrum, b) die einzelnen Intensitäten der Resonatoren, welche zusammen das Gesamtspektrum abbilden.

Wenn ein beliebiges im Messbereich des Spektrometers liegendes Spektrum mit einer spektralen Verteilung $L(\lambda)$ einstrahlt, dann ergeben die Transmissionen aller messenden Etalons des Spektrometers zusammengesetzt das Ergebnisspektrum des Spektrometers. Ein

Spektrum $L(\lambda)$ wird so beim Durchlaufen des Spektrometers in n Intensitäten aufgeteilt, die mit den n Etalons korrespondieren.

Der gesamte hier vorgestellte theoretische Teil soll helfen die am Ende dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse der spektralen Analyse des FP-Filterfeldes beurteilen zu können. Dazu wurden theoretische Grundlagen vom Licht bis hin zu verschiedenen Spektrometertypen vorgestellt.

4 Nanoimprint-Lithografie

In diesem Kapitel wird die Nanoimprint-Lithografie vorgestellt. Dabei werden die notwendigen Grundlagen geschaffen, die zum Verstehen des experimentellen Teils nötig sind. Zunächst werden die drei wesentlichen Grundmethoden, thermische NIL, UV-NIL und SCIL, vorgestellt und eine Einführung in die Prozessierung gegeben. Gleichzeitig sollen aber auch die Potenziale und Anwendungsgebiete der Nanoimprint-Lithografie erwähnt werden. Dabei geht es um die Vorteilhaftigkeit gegenüber traditionellen Lithografiemethoden wie Masken- oder Elektronenstrahl-Lithografie. Der kurze Einblick in die vielseitigen Anwendungsgebiete der NIL soll verdeutlichen, dass die Wissenschaftswelt zusammen mit der Industrie längst das Potenzial dieser Technologie in Produkte umgesetzt hat.

Im Anschluss daran folgt ein Abschnitt mit pragmatischem Inhalt. Die grundsätzlichen Herstellungsmethoden von Stempeln werden vorangestellt, um dann auf die am INA hergestellten Stempel einzugehen, die in dieser Arbeit Anwendung fanden. In ähnlicher Weise wird das verwendete Prägematerial vorgestellt.

Dieses Kapitel abschließend werden einige wichtige Nanoimprint-Varianten dargestellt, um dem Leser die Vielfalt der Nanoimprint-Ansätze näherzubringen.

4.1 Nanoimprint-Lithografie – Grundlegende Technologie

Nachdem die Schrift von Chou et al. [26] veröffentlicht wurde, entstand aufgrund des dargestellten Potenzials ein großes Interesse an der NIL-Thematik. Weltweit wurden die Entwicklungen verschiedener NIL-Methoden vorangetrieben. Dabei wurden die zu prägenden Materialien, die Stempel und deren Material sowie der Prägeprozess selbst variiert. Die meisten dieser Ansätze lassen sich in die folgenden drei Gruppen einordnen oder sind eine Kombination dieser:

Thermisches NIL (T-NIL) oder Heißprägen: Die Verwendung thermisch härtender Polymere für die Nanoimprint-Lithografie und der damit entstandene Prozess des Thermischen NIL ist der initiale Ansatz im Bereich des Prägens von Strukturen mit einer Größe in wenigstens einer Raumrichtung von wenigen Nanometern. Dabei wird das Polymer, um es verformbar zu machen, über seine Glastemperatur hinaus erhitzt. Als nächster Schritt wird der Stempel mit einem definierten Druck in das Polymer gedrückt. Dabei nimmt das Polymer die negative Form des Stempels an. Um diese Strukturen zu fixieren, wird das Polymer unter die Glastemperatur abgekühlt, solange der Stempel noch in Kontakt ist. Als letzter Schritt wird der Stempel entfernt und die geprägten Strukturen bleiben im Polymer erhalten [26].

Mittels ultravioletten Lichts aushärtende Polymere, heute bekannt als UV-NIL, wurden zunächst veröffentlicht als „step-and-flash lithography“ (SFIL): Im Unterschied zu dem T-NIL-Ansatz wird bei diesem das zu prägende Material nicht erhitzt, um es formbar zu machen. Stattdessen wird der Effekt einer Polymervernetzung, ausgelöst durch die Bestrahlung mit UV-Licht während des Prägeprozesses, ausgenutzt, um das zunächst

verformbare Material formstabil auszuhärten, bevor der Stempel entfernt wird. Wird von einem nicht transparenten Substrat ausgegangen, müssen die Stempel, die für die UV-NIL verwendet werden, selbst transparent für UV-Licht sein. Als Konsequenz daraus bestehen sie aus Materialien wie Quarzglas oder „Fused Silica“ [27], [28].

Der dritte Ansatz ist gleichzeitig auch der chronologisch gesehen neuste Ansatz. Er wurde 2009 in einer Kooperation zwischen Philips Research (Holland) und SÜSS MicroTec (Deutschland) entwickelt. Die substratkonforme Prägelithografie (engl. „Substrate Conformal Imprint Lithography“, SCIL) wurde eigens für die Strukturierung im Sub-50-nm-Bereich entwickelt. Im Unterschied zu den vorangehenden Ansätzen bietet diese Technologie durch die Verwendung eines flexiblen Stempels, der sich dem Substrat anpasst, die Möglichkeit, großflächig zu prägen, ohne Fehlerstellen zu erzeugen, wie es bei starren Stempeln vorkommt [29].

Die drei Verfahren bestehen im Wesentlichen aus 4 gleichen oder ähnlichen Schritten:

1. Auf einem Substrat, auf welches eine Struktur mittels Nanoimprint geprägt werden soll, wird zunächst das zu prägende Material deponiert. Wenn T-NIL ausgeführt werden soll, wird das zu prägende Material, meist ein Polymer, über seine Glasatemperatur T_g erhitzt. Kein Erhitzen des Polymers wird bei den Verfahren UV-NIL und SCIL benötigt.
2. Im zweiten Schritt wird der verwendete Stempel, der die zu prägenden Strukturen besitzt, in das Polymer gepresst und formt so die bis dato homogene Polymerschicht.
3. Bevor der Stempel wieder entfernt wird, muss das Polymer ausgehärtet werden. Dies geschieht beim T-NIL durch Abkühlen des Materials unter dessen Glasatemperatur und beim UV-NIL durch Belichtung mit UV-Licht, um die Vernetzung im Polymer zu starten. Das Aushärten des Polymers während eines SCIL-Prozesses erfolgt durch Ausgasen des Lösungsmittels durch den dafür durchlässigen flexiblen SCIL-Stempel.
4. Im vierten und in dieser vereinfachten Betrachtung letzten Schritt wird der Stempel wieder aus dem Polymer entfernt. Zu beachten ist, dass bei jedem Prägen eine dünne Schicht des zu prägenden Polymers zwischen Stempel und Substrat verbleibt, auch an den Stellen, an denen der Stempel eigentlich das Substrat berühren sollte. Dies ist auf den Druck und das Fließverhalten des Prägematerials bei einer Prägung zurückzuführen und lässt sich nicht vermeiden. Um die geprägten Strukturen in das Substrat zu übertragen, können dann herkömmliche Methoden verwendet werden, wie reaktives Ionenätzen oder Sauerstoff-Plasma-Ätzen in Kombination mit Metallmasken für mögliche „Lift-off“-Prozessschritte [65], [66], [67].

4.2 Vorteile und Potenzial der Nanoimprint-Lithografie

Die Nanoimprint-Lithografie erzeugt Strukturen durch mechanische Kräfte und nicht mehr durch chemische Reaktionen während der Belichtung. Sie kann deshalb als völlig neuer Ansatz im Bereich der Lithografie gesehen werden. Mit ihrem komplett anderen Arbeitsprinzip ist sie nicht mehr wie UV-Licht-basierte Lithografie durch Beugung limitiert. Stattdessen ist die zu erreichende Auflösung der Strukturen abhängig von den den Prägeprozess beeinflussenden mechanischen Faktoren wie der Oberflächenspannung, der

Elastizität und der Viskosität des Polymers. Dies ermöglicht es, die Auflösungsgrenzen von Strukturen weit nach unten zu verschieben, bis hin zu einer Auflösung von unter 10 nm. Bereits 2004 veröffentlichten Wissenschaftler der Universität von Chicago eine Schrift, in der sie von einer Auflösung ihres Nanoimprint-Verfahrens auf molekularer Größe berichten [68], und im gleichen Jahr veröffentlichte Chou et al. seine Schrift, in der er zeigt, wie mit einer Kante eines geteilten, mit alternierenden und selektiv geätzten GaAs/AlGaAs-Schichten versehenen Wafers als Stempel eine Auflösung von 5 nm beim Prägeprozess erzielt wird [31].

Im Vergleich zu anderen Lithografieverfahren bietet NIL zudem noch weitere Vorteile in der Prozessierung hinsichtlich der zu fertigenden Bauteile. Die zu bearbeitenden Teile müssen z. B. nicht mehr einem hochenergetischen Elektronenstrahl ausgesetzt werden, wie dies bei der Elektronenstrahl-Lithografie der Fall ist. Besonders bei der Herstellung von empfindlichen Bauteilen wie organischen Semikonduktor- und ultradünnen Tunnel-Transistoren ist eine Bestrahlung mit Elektronen äußerst störend. Forscher auf diesem Gebiet sind daher sehr interessiert an einer NIL-Lösung, die gleiche Ergebnisse wie eine E-Beam-Lithografie liefert und keine starke Strahlung beinhaltet. Genauso schwierig ist es, Materialien zu strukturieren, die eine hohe Rückstreurrate haben. Besonders Substrate aus Atomen mit einer hohen Z-Nummer kann die NIL-Technologie für die Folgeprozesse fertig strukturieren, wohingegen die konventionelle E-Beam-Lithografie durch Streuung sehr ungenau ist. Die NIL-Technologie bietet einen weiteren Vorteil: Während des Prägens hat das störende Schrotrauschen keinen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der einzelnen Teile. Natürlich lassen sich solche Effekte auch bei NIL nicht ganz eliminieren, wenn der Stempel mit einem Elektronenstrahl-Lithografieverfahren hergestellt worden ist [69]. Jedoch können von diesem Stempel nahezu identische Teile schnell und großflächig hergestellt werden. Die NIL-Technologie stellt daher eine wichtige Verbesserung gegenüber Elektronenstrahl-Lithografieverfahren und jeglichen belichtungsbasierten Lithografien dar.

4.3 Anwendungsgebiete der Nanoimprint-Lithografie

Nanoimprint ist aufgrund seines simplen Prozessablaufes und seiner Attraktivität für die Wirtschaft hinsichtlich der Prozesskosten eine der Zukunftstechnologien bei der Herstellung von Nanostrukturen. Die Halbleiterindustrie für großflächige und Große-Stückzahlen-Anwendungen [70] hat schon 2003 reagiert und NIL in ihre „International Technology Roadmap for Semiconductors“ (ITRS) aufgenommen [71], [72]. Als ähnlich wichtig erachtet das „Massachusetts Institute of Technology“ diese Technologie und listet sie in ihrem „Technology Review“ unter den 10 Technologien auf, die in Zukunft eine hohe Wirkung auf die wissenschaftliche Welt haben werden [73].

Weltweit erfolgreiche Unternehmen auf dem Gebiet der Maschinenherstellung für Nanotechnologie haben die NIL-Technologie in ihr Portfolio übernommen. Zu diesen Unternehmen gehören z. B. SÜSS MicroTec (Deutschland), micro resist technology (Deutschland), Obducat (Schweden), Nanonex (USA), Intel Corp. (USA), IBM (USA) und Hewlett Packard (USA).

Die so durch verschiedene Maschinen und Anlagen unterstützte NIL-Technologie leistet einen vielfältigen Beitrag im Bereich der Forschung und Entwicklung von neuen Produkten. Guo stellte diesen Einfluss der NIL 2007 in seiner Veröffentlichung [67] exemplarisch an einigen Technologiefeldern dar:

Elektronik: hybride Plastikelektronik [74], organische Elektronik und Photonik [75], [76], Nanoelektronik-Bauteile in Si [77], [78] und in GaAs [79].

Photonik [80]: organische Laser [81], konjugierte [82] und nichtlineare optische Strukturen aus Polymeren [83], OLED-Pixel [84], [85], beugende optische Elemente [86] und Breitband-Polarisatoren [87], [32], [88].

Magnetische Bauteile: „single-domain“-magnetische Strukturen [89], [90], eng strukturierte magnetische Medien und hoch kapazitive Festplatten [91], [92], [93].

Kontrolle von Polymerkristallisation auf Nanoebene [94].

Biologische Anwendungen: Nanokanäle, um DNA zu manipulieren [95], [96], Proteinstrukturierung [97], [98] und Effekte von Prägungen auf Zellkulturen [99].

All diese Beispiele zeigen, wie interessant die NIL für die vielen Anwendungsfelder ist. Um aber die hohen Anforderungen der Halbleiterindustrie bezüglich des Durchsatzes und der Fehlerquote zu erfüllen, bedarf es noch weiterer Optimierungen des Prägeprozesses. Da sich der Stempel während des Prägens im Gegensatz zu den berührungslosen, strahlungsbasierten Lithografie-Methoden im Kontakt mit dem zu prägenden Polymer befindet, hat er einen natürlichen Verschleiß. Im folgenden Abschnitt wird ausgewähltes technisches Hintergrundwissen bezüglich NIL dargestellt, das für diese Arbeit relevant ist.

4.4 Stempelherstellung

Aufgrund der verschiedenen NIL-Verfahren wurden auch verschiedene Stempel und Herstellungsverfahren entwickelt. Die meisten der NIL-Stempel sind aus festen Materialien, um eine möglichst große Steifigkeit, Stabilität und Hitzebeständigkeit zu erlangen. Als Material hierfür wurden Silizium oder dielektrische Komponenten daraus, wie Siliziumnitrid, Siliziumcarbit oder Siliziumdioxid, Metalle wie Aluminium oder Nickel, Diamantfilme oder Polymere wie PDMS, Fluor-Polymere [100] oder ETFE [101] verwendet.

Stempel für großflächige Anwendungen sind hingegen meist weich. Sie werden aus den zuletzt genannten Polymeren gefertigt [102]. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf einem möglichst gleichförmigen Kontakt zwischen dem Stempel und der zu strukturierenden Fläche, auch wenn diese nicht 100%ig eben ist. Im Unterschied zu den Stempeln aus festem Material passen sich weiche Stempel der Oberfläche an, neigen aber auch dazu, sich unter dem Druck des Prägeprozesses zu verformen, und eignen sich somit nur bedingt für Prägungen mit einer vertikalen Auflösung unter 10 nm.

Es gibt auch Ansätze, die versuchen die Stärken beider Stempelarten, der weichen und der harten, zu kombinieren. Ein solcher Ansatz ist die sogenannte Rigiflex-Lithografie [103], die

2005 vorgestellt wurde. Der zurzeit modernste Ansatz, die Vorteile von harten und weichen Stempeln zu vereinen, ist das SCIL-Verfahren [29].

Um die in dieser Arbeit genutzten Verfahren SFIL oder T-NIL anzuwenden, müssen sowohl transparente bzw. nicht transparente Stempel hergestellt werden. Für nicht transparente Stempel besteht eine große Vielfalt an Materialien, aus denen sie hergestellt werden. Die Auswahl an Material für UV-Licht-transparente Stempel ist eher begrenzt. Quarz und Fused Silica bieten sich für SFIL und PDMS für flexible Stempel an.

Die Herstellung von Stempeln ist ein klassischer Lithografie-Prozess. Zunächst wird ein Fotolack mittels Lackschleuder auf das Stempel-Substrat aufgebracht. Im nächsten Schritt wird diese Schicht an den gewünschten Stellen belichtet. Hierbei kommen konventionelle Lithografie-Technologien zum Einsatz, wie UV- oder Röntgenstrahlen-Lithografie, Elektronenstrahl-Lithografie, holografische Interferenz-Lithografie für großflächige, ganze Wafer-Belichtung oder Immersion-Lithografie [104]. Im nächsten Schritt wird der Fotolack entwickelt und mit seiner Hilfe eine Metallmaske durch einen „Lift-off“-Prozess hergestellt oder es wird direkt in das Substrat geätzt, um entweder die positiven oder die negativen Strukturen in das Substrat zu übertragen.

Bei sehr komplizierten Strukturen kann die Belichtung auch mittels nicht konventioneller Lithografiemethoden erfolgen, wie der fokussierten Ionenstrahl-Lithografie oder einer Atomkraft-Mikroskop-(AFM-)basierten Nanoeinkerbe-Lithografie, um die Strukturen auf den Stempel zu übertragen.

Ist ein harter sogenannter Master-Stempel hergestellt, kann die NIL-Technologie genutzt werden, um von diesem Duplikate herzustellen. Dazu werden die folgenden Prozessschritte genutzt:

1. Die Struktur des Master-Stempels wird in das noch flüssige PDMS geprägt (dieser Vorgang wird als „replica molding“ (RM) bezeichnet),
2. das im Anschluss ausgehärtet wird [102], [105].

Diese Technologie ist eine heutzutage weitverbreitete Methode in der Stempelherstellung, die es ermöglicht, Strukturgrößen von ~ 30 nm [106] bis hinunter zu einem Minimum von 3 nm [68] lateraler Größe und 1,5 nm [107] Abweichung in der Höhe herzustellen.

4.4.1 Stempel aus dem INA

Die für diese Arbeit verwendeten Stempel wurden alle am INA von Herrn Dr. Bartels und Herrn Wang und ihren Mitarbeitern gefertigt. In diesem Abschnitt wird kurz ein Abriss über deren Vermessung und die erzielte Qualität gegeben.

Am INA wurden nicht transparente sowie transparente Stempel erstellt und für die Nanoimprint-Versuchsreihen verwendet. In Abbildung 23 ist die laterale Struktur des Stempels zu sehen. Es handelt sich dabei um 64 Felder der Größe $100\ \mu\text{m}$ mal $100\ \mu\text{m}$ mit einem Abstand von $50\ \mu\text{m}$ zueinander. Diese Felder prägen später die Kavitäten der einzelnen FP-Resonatoren. Die Herstellung erfolgt mit Standardreinraumprozessen wie

trockenem und nasschemischem Ätzen. Die Beschaffenheit der Oberflächen hinsichtlich der Rauigkeit und die exakte Höhe bzw. Tiefe der Strukturen wurden mittels Weißlichtinterferometrie (WLI) vermessen. Im Vergleich mit der Messung mittels Rasterkraftmikroskop zeigte die Nutzung eines WLI den Vorteil einer kürzeren Messzeit sowie gleichzeitig des Messens einer größeren Fläche. Zusätzlich hat eine optische Messmethode die gleichen Abhängigkeiten und Empfindlichkeiten an den Oberflächen wie das Licht in den späteren Anwendungen [108].

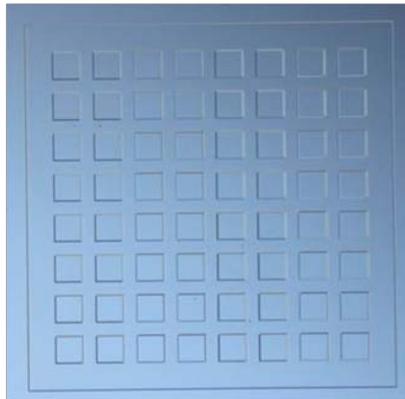


Abbildung 23: Mikroskopaufnahme eines 3-D-Nanoimprint-Stempels mit bis zu 64 verschiedenen Höhen [108].

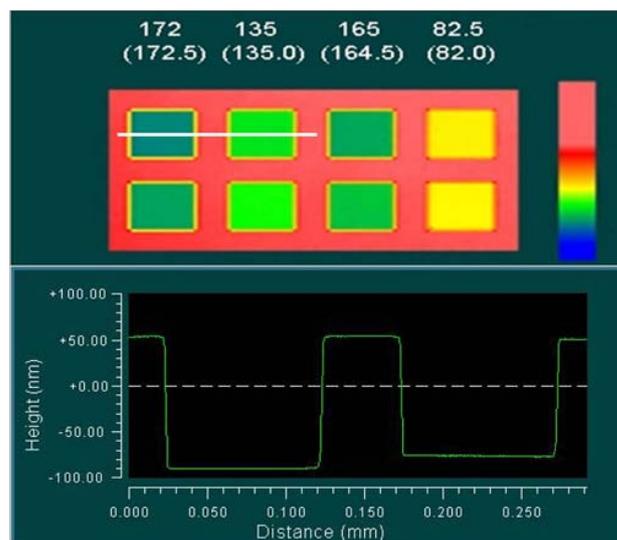


Abbildung 24: Weißlichtinterferometermessung der Oberflächenstruktur eines 3-D-Nanoimprint-Stempels. Die Zahlen repräsentieren die designte Höhe und die gemessene (in Klammern). Die untere Zeichnung zeigt eine Liniendarstellung des Profils [108].

Abbildung 24 zeigt eine WLI-Aufnahme eines kleinen Teils des Stempels. Die oberen Zahlen in der Abbildung repräsentieren die angestrebten Tiefen und die unteren in Klammern stehenden Zahlen zeigen die gemessenen Tiefen. Alle Größen sind in Nanometern angegeben. Die untere Grafik zeigt eine Liniendarstellung des Höhenprofils. Es dient der Verdeutlichung und Kontrolle der exakten Höhe sowie der Ebenheit der Ätzungen.

4 Nanoimprint-Lithografie

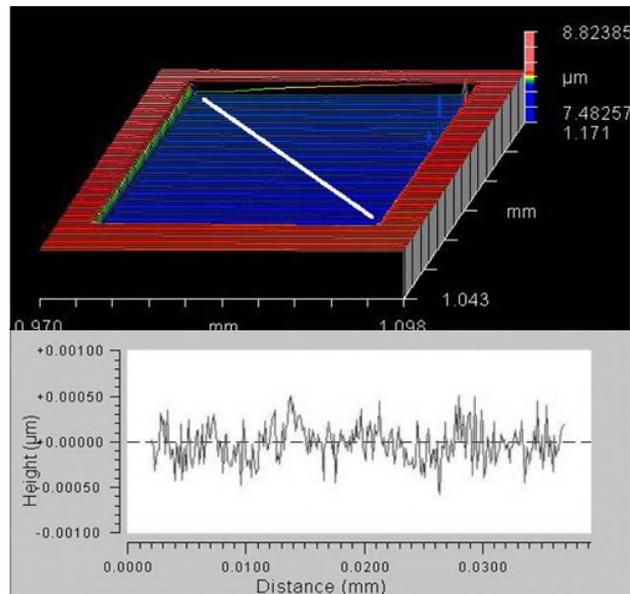


Abbildung 25: WLI-Messung, um die Oberflächenrauigkeit einer Mesavertiefung zu analysieren [108].

Abbildung 25 zeigt eine Detailaufnahme einer einzelnen Mesa mittels WLI. Diese Aufnahmen werden verwendet, um die Rauheit der einzelnen Ätzungen an Stellen mit gleichbleibender Höhe (Mesa) zu bestimmen. Die Rauheit bei dieser Messung ist signifikant kleiner als 1 nm. Eine Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse von transparenten und nicht transparenten Stempeln ist in Tabelle 1 gegeben [108].

Tabelle 1: Oberflächenrauigkeit und vertikale Auflösung von nicht transparenten und transparenten 3-D-Nanoimprint-Stempeln [108].

	Optische Oberflächenrauigkeit	Vertikale Auflösung
Nicht transparente Stempel	<i>Kleiner als 0,2 nm</i>	<i>Kleiner als 1 nm</i>
Transparente Stempel	<i>Kleiner als 1 nm</i>	<i>Kleiner als 2 nm</i>

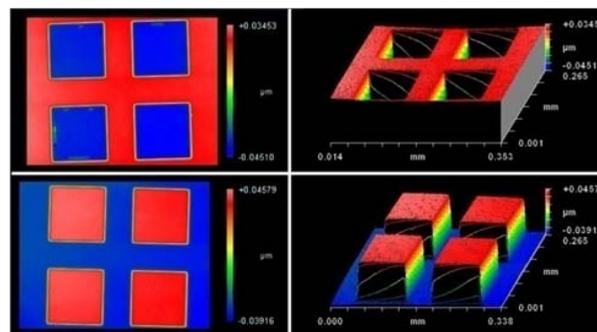


Abbildung 26: Stempel (oben) und dazugehörige Prägung (unten). Die Oberflächenrauigkeit beträgt jeweils weniger als 1 nm.

Abbildung 26 zeigt letztlich eine WLI-Messung eines Stempels (oben) sowie einer korrespondierenden Abformung (unten). Beim Vergleich zeigte sich, dass die Vertiefungen des Stempels (Negativ) mit den Höhen der Mesa in den abgeformten Strukturen (Positiv) nicht übereinstimmen. Es wurde innerhalb eines Prägeschrittes im Durchschnitt ein Unterschied von 7 % gemessen. Der Unterschied in der betrachteten Messung beträgt zwischen der Höhe von 71 nm (Stempel) und 66 nm (geprägte Struktur nach Aushärtung) 5 nm, was etwa 9 % Änderung ausmacht. Ursache dafür ist die Belichtung des Polymers mit UV-Licht, bei der ein chemischer Prozess angeregt wird, welcher dafür sorgt, dass sich die Moleküle vernetzen, sodass das Polymer aushärtet. Dabei schrumpft das Polymer um einen festen Faktor. Dieser Faktor hängt von der Menge an Lösungsmittel ab, der sich in der Lösung befindet, und liegt üblicherweise zwischen 4 % und 8 % [109].

Diese hier nur kurz angerissene Tatsache muss beim Design des Stempels mit in Betracht gezogen werden, um eine präzise Höhe der Mesen zu garantieren.

4.5 Nanoimprint-Prägematerial

Prägematerialien werden während der Prägung mechanisch verformt, sodass sich die Strukturen des Stempels auf das Material übertragen. Aus diesem Grund müssen sie sich unter einem bestimmten Druck wiederholbar gleich verformen lassen, gleichzeitig aber auch eine hohe Festigkeit erreichen, nachdem sie ausgehärtet worden sind. Eine weitere notwendige Eigenschaft dieser Materialien ist, sich leicht von dem Stempel abzulösen, wenn dieser nach dem Aushärten wieder entfernt wird. In vielen Anwendungen wird das Prägematerial genutzt, um die Strukturen in das darunterliegende Substrat zu übertragen. In solchen Fällen wird die geprägte Schicht einem reaktiven Ionen-Ätzschrift (RIE) unterzogen, um das unerwünschte Prägematerial zu entfernen und so die gewünschte Ätzmaske für weitere Ätzungen zu erzeugen. Zuletzt muss das nach dem Ätzen übergebliebene Prägematerial noch entfernt werden können. Die Materialien, die in solchen Prozessen eingesetzt werden, müssen ein gutes anisotropes Ätzverhalten aufweisen.

Die zuvor gewünschten mechanischen Eigenschaften der Prägematerialien, meist Polymere, lassen sich am besten mittels der drei Parameter Elastizitätsmodul, Gleitmodul und Viskosität [110] beschreiben.

Elastizitätsmodul: Das Elastizitätsmodul, abgekürzt auch E-Modul, beschreibt den Widerstand des Materials gegenüber einer Verformung. Je größer der Betrag des E-Moduls ist, je höher muss die Kraft sein, die auf dieses Material einwirkt, um es zu verformen. Materialien wie Stahl mit einem hohen Elastizitätsmodul gelten als steif, wohingegen Gummi als nachgiebig gilt [111]. Beim Nanoimprint muss das Polymer ein niedrigeres E-Modul aufweisen als das Material des verwendeten Stempels. Zu berücksichtigen ist dabei, dass beim T-NIL das Prägematerial samt Stempel bis auf die Glasstemperatur erhitzt wird und sich dabei beide Elastizitätsmodule verändern.

Gleitmodul: auch G-Modul abgekürzt, beschreibt, wie ein Material auf Scherkräfte und Schubspannungen reagiert, genauer dessen lineare elastische Verformung [112]. Für NIL

bedeutet dies, dass der minimale aufzuwendende Druck während des Prägens größer sein muss als das Gleitmodul des zu prägenden Materials [113].

Viskosität: Sie ist nach der DIN 1342 wie folgt definiert. Viskosität ist die Eigenschaft eines fließfähigen (vorwiegend flüssigen oder gasförmigen) Stoffsystems, beim Verformen eine Spannung aufzunehmen, die von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt. Ebenso kann die Spannung (Schub-, also Tangentialspannung) als Ursache angesehen werden, durch die eine Verformungsgeschwindigkeit im Fluid hervorgerufen wird. Die Stoffgröße „Viskosität“ ist demnach ein Maß für die durch innere Reibung bestimmte Verschiebbarkeit der Fluidteilchen gegeneinander [114]. Für Polymere, die beim Prägen eingesetzt werden, bedeutet dies, dass ihre Viskosität während des Prägens niedrig genug sein muss, um die komplette Deformation des Polymers in einer angemessenen Zeit zu erreichen [115]. Nach dem Aushärten des Polymers muss die Viskosität jedoch so hoch sein, dass die geprägten Strukturen im Polymer verbleiben.

Basierend auf diesen Grundüberlegungen wurden in der Vergangenheit Simulationen und experimentelle Untersuchungen [67], [116], [117], [118], [119], [120], [121] bezüglich des Verformungsverhaltens von Polymeren während des Nanoimprint-Prozesses durchgeführt, um neue Erkenntnisse für neue Polymere zu erlangen.

4.5.1 Am INA verwendete Prägematerialien

Durch die immer stärker werdende Verbreitung der Nanoimprint-Technologie gibt es heutzutage eine große Angebotspalette an kommerziell erwerblichen Nanoimprint-Materialien. In dieser Arbeit fiel die Wahl des Polymers bei der Durchführung der Versuche zunächst auf die mr-UVCur-Serie von MicorResist Technology GmbH (Berlin). Das erste erhältliche Produkt speziell für den Nanoimprint war das Polymer mr-UVCur06. Im Laufe der Weiterentwicklung wurde 2008 das Polymer mr-UVCur21 auf den Markt gebracht, dieses ist in drei verschiedenen Verdünnungsstufen erhältlich. Die folgenden Gründe führten zur Auswahl dieser Polymere:

Das Polymer ist im sichtbaren Bereich des Lichtes nahezu transparent. Eine der wichtigsten Eigenschaften, wenn das Polymer die Kavität eines Fabry-Pérot-Resonators bilden soll [122], [123].

Beide Polymere können sehr dünn auf Substrate aufgebracht werden. Das Polymer mr-UVCur06 kann bei hohen Aufschleudergeschwindigkeiten bis ca. 130 nm dünn aufgeschleudert werden, das Polymer mr-UVCur21 in seiner höchsten Verdünnungsstufe bis zu 60 nm dünn (vgl. Abbildung 27). Um zu vermeiden, dass eine Restschicht des Polymers zwischen Stempel und Substrat an Stellen, an denen Kontakt herrschen sollte, verbleibt, muss die Menge an Prägematerial gleich dem Füllvolumen des Stempels sein [122], [123]. So können Restschichten von nur 10 nm erreicht werden [124].

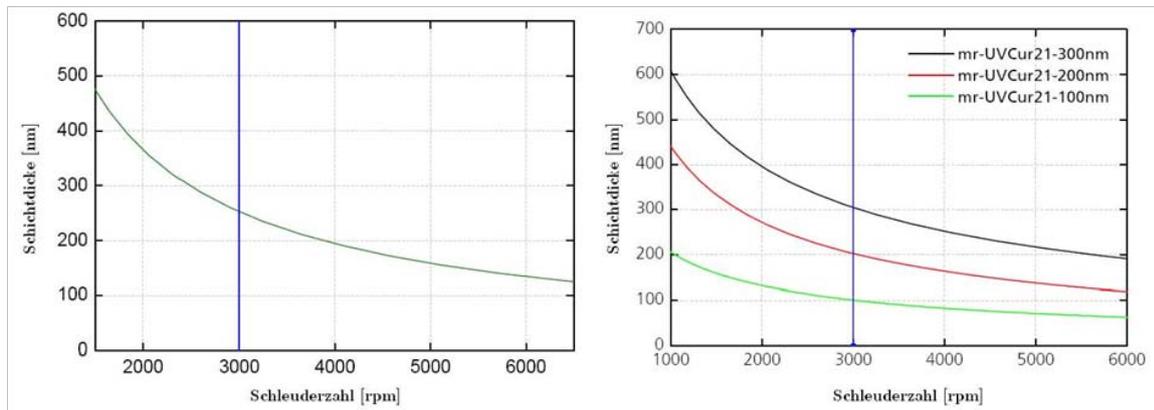


Abbildung 27: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Schleuderdrehzahl (nach Backschritt) bei einer Schleuderdauer von 60 s für mr-UVCur06 (links) und mr-UVCur21 (rechts) laut Hersteller [122], [123].

Entscheidend für den Nanoimprint ist das Auflösungsvermögen des Polymers. Wenn auch für die angestrebte Anwendung nicht von oberster Priorität, so kann es doch in Zukunft wichtig werden da die Strukturen kleiner werden sollen. Das Polymer mr-UVCur06 kann eine minimale Strukturgröße von 50 nm bei einem Aspektverhältnis von < 2 erreichen. Das weiterentwickelte mr-UVCur21 soll eine Auflösung von unter 30 nm und ein Aspektverhältnis von über 2 erreichen können [125], [124].

Die lineare Schrumpfung des Volumens durch die Belichtung beläuft sich auf ca. 3 – 6 % und ist damit klein im Vergleich zu typischen Schrumpfungen von 10 – 15 % [126], [122], [123], [125].

Die mit einigen Sekunden angegebene Belichtungszeit bei mr-UVCur06, z. B. 7 Sekunden für die Aushärtung, ermöglicht eine schnelle Prozessierung [125].

Die beiden Polymere mr-UVCur06 und mr-UVCur21, obwohl vom gleichen Hersteller, unterscheiden sich deutlich in ihrer Zusammensetzung und ihrer Viskosität. Die Weiterentwicklung führte dazu, dass mr-UVCur21 eine geringere Schleuderdicke und eine höhere Strukturauflösung ermöglicht.

Auch der Brechungsindex in flüssiger Form unterscheidet sich, mr-UVCur21 liegt mit ca. $n = 1,48 - 1,50$ im gleichen Bereich wie Siliziumnitrid bei sichtbaren Wellenlängen, mr-UVCur06 hat einen deutlich höheren Brechungsindex von ca. $n = 1,49 - 1,57$. Dieser ändert sich jedoch durch die Aushärtung, da zum einen die Lösungsmittel verdampft sind und durch die Polymerisation ein völlig neues Material vorliegt. Bei mr-UVCur06 gibt der Hersteller daher einen Bereich von ca. $n = 1,52 - 1,61$ an, was eine Zunahme des Brechungsindex um ca. 0,03 ausmacht. Ein Unterschied ist auch bei mr-UVCur21 zu erwarten [122], [123].

4.6 Nanoimprint-Varianten

Rasterkraftmikroskop-(AFM-)basierte Nanofabrikation-Nanoindent-Lithografie

Die wissenschaftliche Gemeinschaft hat nun schon über 20 Jahre Erfahrung im Bauen von makroskopischen Instrumenten, um eine Rasterkraftmikroskop-Nadel (AFM = „atomic force microscopy“) zu manipulieren. Eine AFM-Nadel hat ein interessantes und gleichzeitig einzigartiges Potenzial bei der Nanofabrikation von Bauelementen. So können die Nadeln, auch „Cantilever“ genannt, ihre Umgebung auf einem Substrat in einer Sub-Mikrometer-Größe manipulieren, wie z. B. große Hitze lokal einbringen oder starke elektrische und magnetische Felder erzeugen. Für die Wissenschaftler ist somit die Umgebung um eine solche Nadel herum eine einzigartige, lokalisierbare, kontrollierbare Fertigungsumgebung, in der neue Konzepte und Methoden zur Nanofabrikation möglich werden.

Da diese Methoden jedoch nicht als prägend im Sinne von „etwas abformend“ eingestuft werden können, wird im Weiteren nur ein kurzer Abriss bezüglich einiger erfolgreicher Anwendungen der Vergangenheit gegeben. Schon 1999 veröffentlichte Mirkin et al. seine Methode, ein AFM in ähnlicher Weise wie einen Ink-Jet-Drucker zu nutzen und so winzige Strukturen auf einem Aluminiumsubstrat zu erzeugen [127].

Eine weitere einfache Methode der Strukturierung eines Polymers mittels einer AFM-Nadel ist die sogenannte Nanoindent-Lithografie. Hierbei wird die Nadel in das auf einem Substrat aufgebrachte Polymer eingetaucht und hinterlässt einen Abdruck. Im Folgenden kann die Nadel bewegt werden, um Strukturen zu generieren, oder angehoben werden und an einer anderen Stelle wieder in das Polymer eintauchen. Diese Methode wurde schon recht früh, und zwar 1994, von Wendel et al. veröffentlicht [128], [129], [130].

Die vielleicht bemerkenswerteste und erfolgreichste Anwendung dieser Technologie ist das Millipede-Programm von IBM. In diesem Programm ging es darum, mittels einer großen Anzahl flächig verteilter AFM-Nadeln eine topologische Struktur als Datenspeicher zu generieren. Mittels Hitze konnten 18 nm Abstand zwischen einzelnen Spuren des Speichermediums und 9 nm Abstand zwischen einzelnen Strukturen innerhalb einer Spur realisiert werden, mit einer Tiefe von 1 nm [131], [132], [133].

Inverser Nanoimprint

Grundsätzlich lässt sich der inverse Nanoimprint in zwei einfache Schritte unterteilen [134]. Im ersten Schritt wird im Unterschied zu den anderen Prägeverfahren nicht das Substrat, sondern der Stempel selbst mit einem Polymer überzogen. Dies geschieht, wenn es die Größe und Form des Stempels erlaubt, mittels einer Lackschleuder. Sind alle Strukturen des Stempels mit Polymer bedeckt, wird dieser teilweise oder ganz ausgehärtet. Im zweiten Schritt wird der Stempel wie auch bei den anderen Prägeverfahren unter einem bestimmten Druck mit dem Substrat in Kontakt gebracht. Beim inversen Nanoimprint muss die Haftkraft zwischen Stempel und Polymer zwingend kleiner sein als die zwischen Polymer und Substrat. Daraus ergibt sich, dass sich das Polymer beim Entfernen des Stempels von diesem löst und am Substrat haftet. Diese Technologie ermöglicht es, auf unebenen oder schon vorstrukturierten Oberflächen zu prägen [134], [135]. So können mehrere Schichten übereinander geprägt werden und Mikrofluidik-Kanäle oder 3-D-photonische Kristalle hergestellt werden.

Soft-Nanoimprint-Lithografie – Nanotransfer-Prägen und Mikrokontakt-Prägen

Die Nanotransfer-Prägetechnologie (nTP⁵) sowie die Mikrokontakt-Prägetechnologie (μ CP⁶) sind im Grunde Weiterentwicklungen der Soft-Nanoimprint-Lithografie [102]. Bei beiden Technologien wird im Gegensatz zu der klassischen NIL nicht der Stempel in ein aufgesponnenes Material gepresst, um eine Abformung zu erreichen, sondern es wird eine Transferschicht oder ein Multitransferschichtsystem gegen ein Substrat gedrückt, das zuvor mit einer sich selbst organisierenden Monolage (SAM⁷), welche als „Kleber“ dient, beschichtet wurde. Während des Entfernens des Stempels haftet die Transferschicht an der mittels der SAM aktivierten Oberfläche des Substrates und ist somit vom Stempel auf das Substrat transferiert worden [136], [137], [138], [139], [140], [141], [142].

In der Vergangenheit entstanden eine Vielzahl von Techniken und Anwendungen für das nTP. Wie bei fast allen Prägetechnologien ist auch bei dieser Technologie das Ziel, eine möglichst großflächige und homogene Kontaktfläche zwischen Stempel und Substrat zu erreichen. Das Besondere an nTP ist jedoch, dass ohne Druck gearbeitet wird, weshalb sich als Lösung zum Erreichen des Ziels, großflächig und homogen zu arbeiten, die Verwendung von entweder weichen Stempeln oder weichen Substraten verbreitet hat. Polymere mit hohem E-Modul (h-PDMS), nicht manipulierte PDMS [136], [138], [143] und Acryloxyperfluoropolyther (α -PFPE) [144] sind in vielen Bereichen bereits als weiche Materialien akzeptiert, wohingegen GaAs [136], [145], [146] und Si/SiO₂ [142], [147] sowie Plastiksubstrate wie Polyethylene Terephthalate (PET) [136] Beispiele für starrere Stempel oder Substrate sind. Ojima et al. zeigte unter Verwendung solcher harten Stempel und Substrate den Transfer von Goldelektroden in Mikrometergröße [147]. Häufig verwendete Transfermaterialien sind z. B. Gold [141], [147] und Kupfer [146], sie benötigen eine passende SAM, von der es eine Vielzahl gibt: Thiol-behandelte SAMs eignen sich für den Transfer von Gold [141], wohingegen 1,8-octanedithiol beim nTP eine sehr hohe Haftkraft mit Kupfer entwickelt [139], [146]. 3-Mercaptopropyltrimethoxysilane (MPTMS) wird beim Transfer von Gold von einem PDMS-Stempel auf ein SiO₂-Substrat verwendet [136].

nTP findet sich heute in einer Vielzahl von Anwendungen wieder. Diese reichen von der Nanofabrikation von Elektroden [138], [147], Mikrofluidikkanälen [139] über Plastik- [136], [138] und organische [142] Elektrobauteile bis hin zu „subwavelength“-photonischen Elementen [136].

Step-and-Repeat-UV-Nanoimprint-Lithografie

Die 1999 [148] von Colburn et al. vorgestellte Step-and-Flash-NIL (SFIL) war ausgelegt, um pro Prägekreislauf einmal die zu fertigende Struktur zu prägen. Schon zu diesem Zeitpunkt war deutlich erkennbar, dass diese Technologie das Potenzial besaß, von einem Zirkel-Prozess zu einem Multikreislauf-Prozess entwickelt zu werden. Bei diesem sogenannten

⁵ Vom englischen „nanoscale transfer printing“.

⁶ Vom englischen „microcontact printing“.

⁷ Vom englischen „self-assembled monolayer“.

Step-and-Repeat-UV-Nanoimprint-Lithografie-Verfahren wird nicht nur ein SFIL-Kreislauf durchlaufen, sondern mehrere, um ganze Wafer schrittweise zu prägen. Erste Erfolge wurden 2000 [149], [150] mit manuell geladenen Wafern von 200 mm Durchmesser erzielt, die mit bis zu 20 sequenziell ausgeführten SFIL-Kreisläufen geprägt wurden. Die für diese Technologie erforderlichen Multistep-Maschinen wurden daraufhin weiterentwickelt und waren nicht viel später kommerziell erhältlich [151].

Die größten Herausforderungen bei der Entwicklung dieser Maschinen und der Prozesstechnologie waren, kleinste Mengen des zu prägenden Materials an den richtigen Stellen zu verteilen. Im Unterschied zu Prägetechnologien mit nur einer Belichtung pro Wafer wird bei der Step-and-Repeat-NIL der Wafer beim Durchlaufen jedes Prägekreislaufes einmal belichtet. Ein Aufschleudern des Prägematerials auf den ganzen Wafer ist damit nicht möglich. Ein weiteres Problem war wie bei allen Prägetechnologien die Notwendigkeit eines homogenen physikalischen Kontakts zwischen Stempel und Substrat respektive dem zu prägenden Material. Die dritte Schwierigkeit, die es zu lösen galt, war das Ausrichten des Stempels zum Substrat, wenn mehrere Schichten übereinander oder schon vorstrukturierte Wafer geprägt werden sollten. Die Lösungen dieser Probleme sind spezielle X-y-z-Verstelleinheiten, die es erlauben, die Wafer in jede Richtung genau auszurichten [152], [153], kombiniert mit automatischen Dispensersystemen, die einzelne Tröpfchen des Prägematerials mit einem Volumen von weniger als 5 nl präzise an die gewünschte Position bringen [151]. Es konnte gezeigt werden, dass Step-and-Repeat-SFIL ein selbstreinigender Prozess ist, der mit einer zusätzlichen Antihafschicht am Stempel weit über 1000 Prägungen ohne Reinigung oder Austausch ermöglicht [149], [150].

Heute gibt es eine Vielzahl von SFIL-Maschinen von verschiedenen Herstellern. Einige wichtige Beispiele sind hierbei: SÜSS MicroTec (Deutschland), Molecular Imprints Inc. (USA), EVGroup (Österreich), Nanonex (USA) und Obducat (Schweden). Diese Firmen besitzen State-of-the-Art-Multistep-SFIL-Maschinen in ihrem Angebot, mit denen es möglich ist, Strukturen mit einer Auflösung von 20 nm [27] auf 300-mm-Wafern zu prägen. Damit bietet diese Technologie einen hohen Durchsatz für die Nanofabrikation.

SCIL – Substrate Conformal Imprint Lithography

Wie bei der bereits erwähnten Soft-Nanoimprint-Lithografie wird auch bei SCIL ein weicher Stempel, meist aus Polydimethylsiloxanen (PDMS), verwendet. Diese ermöglichen es, große Flächen gleichmäßig zu prägen. Zugleich bietet diese Technologie im Gegensatz zu Ansätzen mit harten Stempeln einen Kostenvorteil, der aus den niedrigen Herstellungskosten der weichen Stempel durch Abformung des Masterstempels entsteht. So können von einem teuren harten Masterstempel einige Tausend Kopien reproduziert werden [154]. Bei weichen, somit flexiblen und biegsamen Stempeln treten anders als bei harten Stempeln sehr leicht laterale Stempelverzerrungen und Strukturdeformationen auf, die durch den rückseitigen Druck beim Prägen entstehen. Oftmals können so nur Auflösungen von einigen hundert Nanometern erreicht werden.

Um die Vorteile der weichen Stempel, großflächig und kostengünstig zu prägen, zu nutzen und gleichzeitig eine ähnlich hohe Auflösung wie bei harten Stempeln zu erreichen, hat Philips Research aus dem niederländischen Eindhoven in Kooperation mit der Firma SÜSS MicroTec aus Garching ein neues Prägeverfahren entwickelt. SCIL bietet dem Anwender eine hohe Auflösung von kleiner als 50 nm (Ergebnisse mit 10 nm breiten Strukturen wurden erzielt) zusammen mit der Möglichkeit, bis zu 6 Zoll große Flächen zu prägen [29]. Um mögliche Luftpinschlüsse zu vermeiden, wird der Stempel bei SCIL nicht mit einem Mal auf das Substrat gedrückt, sondern es wird ein sequenzieller Kontaktierungsprozess durchgeführt. Der Stempel wird beginnend auf einer Seite Stück für Stück auf das Substrat gelassen, dabei wirken die Kapillarkräfte des flüssigen Prägematerials und ziehen den Stempel an. Durch diese Methode wird sichergestellt, dass der Stempel sehr präzise auf dem wellenförmigen Substrat anliegt. Auch die für weiche Stempel üblichen Verzerrungen und Strukturdeformationen können so verhindert werden. Unterstützt wird dies noch durch die 200 µm dicke Glasfolie auf der Rückseite des abgeformten Stempels, die zwar flexibel ist, jedoch keine lateralen Verzerrungen zulässt.

5 Experimentelle Charakterisierung der Filter

Um eine zielgerichtete Entwicklung und Optimierung der Filterfelder auch über die Ziele dieser Arbeit hinaus zu erreichen, müssen die hergestellten Filterfelder optisch vermessen werden. Zu diesem Zweck wurden am INA entsprechende Messaufbauten installiert. In diesem Kapitel soll ein kurzer Abriss bezüglich der verwendeten Messaufbauten gegeben werden. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Aufbau und die Betreuung dieser Messaufbauten nicht vom Autor geleistet wurde. Lediglich in der Planungsphase und in der frühen Phase der Beschaffung und Installation wirkte der Autor mit.

Zunächst wird ein älterer Messaufbau dargestellt und seine Schwächen aufgezeigt. Diese sind der Grund, warum in die Entwicklung neuerer und genauerer Messaufbauten viel Zeit und Geld investiert wurde. Das daraus entstandene aktuell verwendete System, welches im Wesentlichen aus einem Mikroskopspektrometer besteht, ist dasjenige, mit dem die Messungen für diese Arbeit größtenteils durchgeführt wurden. Als Drittes wird ein Messaufbau vorgestellt, der der späteren Applikation ähnlich ist. Dieser Messaufbau befindet sich nicht im INA, sondern in der Partnerfirma Opsolution.

5.1 Messaufbau für flächige Filter

Dieser am INA gefertigte Messaufbau erlaubt es, flächige Filter sowohl in Transmission wie auch in Reflexion zu charakterisieren. Abbildung 28 zeigt den Messaufbau aus verschiedenen Ansichten. Zu erkennen sind a) das HR 2000 High Resolution Spectrometer der Firma Ocean Optics und b) die Lichtquelle, welche einen Eigenbau des INA darstellt. Die Quelle strahlt ein breitbandiges Licht aus, welches jedoch nicht gleichmäßig und stabil ist. Der Transmissionsmessungshalter c) erzeugt aus dem eingestrahlt Licht mittels geeigneter Linsen ein paralleles Licht zwischen den beiden Glasfaserenden. In diesen Strahl können Proben eingebracht und mittels X-y-z-Verstelleinheit justiert werden. Der

Messbereich erstreckt sich dabei über ca. 1 mm². Es handelt sich hierbei um ein HR 2000 High Resolution Spectrometer, welches mit dem Analyserechner verbunden ist. Die Lichtein- und -auskopplung geschieht dabei über Glasfaserkabel und geeignete Linsen. Nachteile und Unzulänglichkeiten dieses Systems sind:

- ein zu großer Messbereich. Es gibt keine Möglichkeit, in diesem Aufbau das Licht auf ein Filterfeld der Größe 100 µm x 100 µm zu fokussieren und zu vermessen.
- Die selbst erstellte Beleuchtungseinheit bietet ungleichmäßiges und instabiles Licht.
- Zur Messung der Transmission und der Reflexion muss die Probe von einem Halter zu einem anderen bewegt werden. In einem System, welches beide Werte ohne Wechsel messen könnte, wären Vergleiche von Reflexion und Transmission valider.

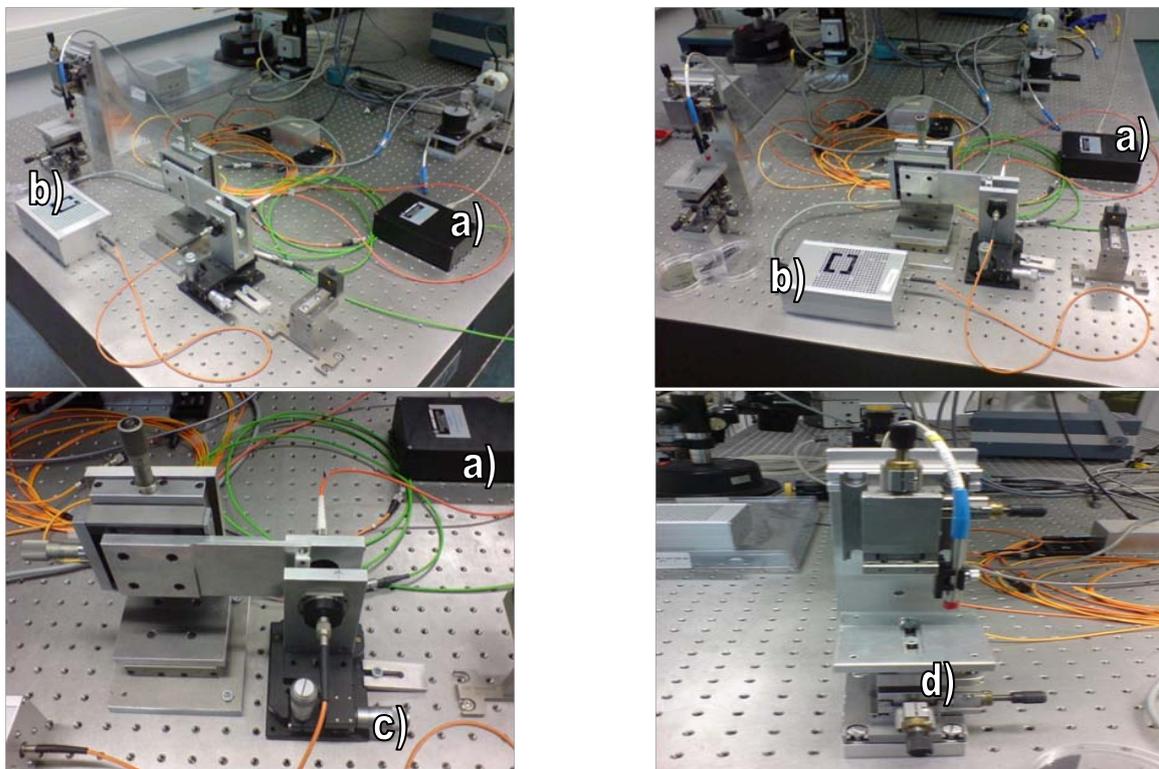


Abbildung 28: Messaufbau mit a) Spektrometer, b) Lichtquelle, c) Transmissionsmessung sowie d) Reflexionsmessung.

5.2 Das Mikroskopspektrometer

Bei den meisten der spektralen Messungen im Rahmen dieser Arbeit kam das Mikroskopspektrometer Axio Imager D1 der Firma Carl Zeiss zum Einsatz. Es verfügt über zwei Lichtquellen, um Messungen der Transmission und Reflexion zu gewährleisten. Weiterhin hat das Mikroskop drei kontrastreiche EC-Epiplan-NEOFLUAR-Objektive mit jeweils einer anderen Magnitude: 2,5x, 10x und 50x. Dabei setzt Zeiss auf eine konsequente Streulichtminimierung, die zu einer deutlichen Kontrastverstärkung führt und entscheidend in allen mikroskopischen Verfahren ist [155]. Bei den Messungen wurde kein Filter verwendet, um so die maximale Intensität der Lichtquellen nutzen zu können.



Abbildung 29: Mikroskopspektrometer Axio Imager D1 der Firma Carl Zeiss.

Um dieses Komplettsystem an die Anforderungen der Messungen für diese Arbeit anzupassen, wurde die mitgelieferte Glasfläche unter den Objektiven, auf die die Proben gelegt werden, durch eine metallene ersetzt. In der Metallplatte befindet sich ein Loch, durch welches die Messungen erfolgen. Auf diese Weise lassen sich unerwünschte Reflexionen und Interferenzen innerhalb der Glasplatte oder zwischen Probe und Glasplatte vermeiden.

Des Weiteren ist der Probenstisch motorisiert, um die Verfahrswege mittels Joystick präzise durchführen zu können. Zur Vereinfachung und Zeitersparnis lässt sich die Bewegung auch mittels einer Software ansteuern und so das Vermessen der feldförmigen Filterflächen effektiver gestalten. Um die Position der Probe während der Messung zu bestimmen, ist eine CCD-Kamera verfügbar. Sie liefert ein Schwarz-Weiß-Bild an den Computermonitor.

Die eigentliche Messung des Spektrums erfolgt in einem Spektrometer der Firma Ocean Optics, dem HR2000. Dieses Spektrometer ist über Glasfaserkabel mit dem Axio Imager verbunden und liefert die Daten der Messungen via USB an den Computer. Das HR2000 High-Resolution Fiber Optic Spectrometer bietet eine Auflösung von 0,065 nm (FWHM) und reagiert sensitiv auf Licht der Wellenlängen von 400 – 800 nm [156].

5.3 Temporärer Messaufbau des Filterfeldes

Im Gegensatz zum obigen Aufbau werden alle Filter des Filterfeldes gleichzeitig und schmalbandig beleuchtet und das transmittierte Licht auf einen CCD-Sensor abgebildet. Der Austrittsspalt des Monochromators wird auf die Ebene der Filterflächen abgebildet, wobei das Bild größer ist als das Feld. Das Verhältnis von Gegenstandsweite und Bildweite wird < 1 gewählt, sodass das Filterfeld in einem kleinen Winkelbereich beleuchtet wird. Das beleuchtete Filterfeld selbst wird vergrößert auf einen CCD-Sensor abgebildet. Die Lichtquelle und der Monochromator sind zu einer Einheit zusammengefasst, die enthaltene

5 Experimentelle Charakterisierung der Filter

Optik zur Kollimierung, die Abbildung auf den Spalt und die Ordnungfilter sind in der Abbildung 30 nicht dargestellt. Durch die gleichzeitige Beleuchtung aller Pixel sind Wechselwirkungen benachbarter Filterfelder schwerer zu bestimmen, die Transmission aller durch die Abbildung einem Sensorpixel zugeordneten Orte der Filter des Filterfelds kann aber gleichzeitig erfasst werden. Die maximale theoretische Ortsauflösung dieses Aufbaus wird bestimmt durch die Größe der Sensorpixel und der Vergrößerung und ist daher um Größenordnungen schlechter als die des obigen Aufbaus.

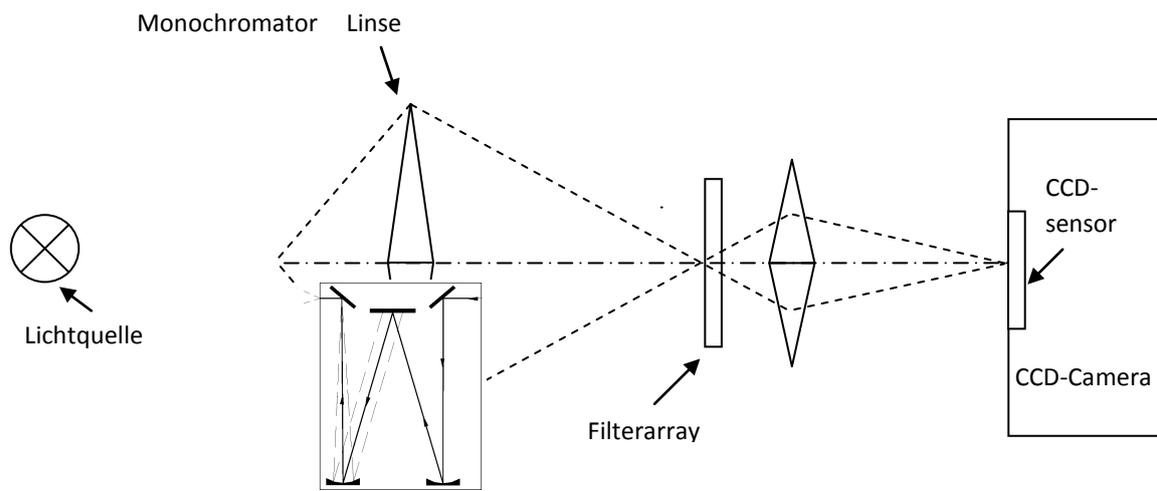


Abbildung 30: Temporärer Messaufbau der Firma Opsolution.

Die Beleuchtung soll mittels einer Halogenlampe erfolgen, der ein Monochromator nachgeschaltet ist. Die spektralen Eigenschaften eines Filters des Filterfelds können also nur im Rahmen der Halbwertsbreite des Monochromators bestimmt werden. Dazu wird der Monochromator durchgeföhren und jeweils ein Bild des Filterfelds aufgenommen. Dann kann für jedes Pixel des Sensors die Abhängigkeit der transmittierten Intensität über der Zentralwellenlänge des Monochromators dargestellt werden. Dividiert man diese Intensität durch die entsprechende Intensität des Pixels bei der entsprechenden Zentralwellenlänge eines Referenzbildes (Messung ohne Filter), so erhält man die Transmission des Filters bzw. des auf den Pixel abgebildeten Bereiches des Filters in Abhängigkeit von der Zentralwellenlänge.

6 Experimentelle Untersuchungen verschiedener Nanoimprint-Verfahren

In diesem Kapitel werden experimentelle Untersuchungen verschiedener Nanoimprint-Verfahren dargestellt.

6.1 Heißprägemethode

Die Technologie des Heißprägens, in der Literatur auch unter „hot embossing“ zu finden, ist eine schon 30 Jahre alte, in der Industrie routiniert eingesetzte Technologie, um Mikrostrukturen aus verformbaren Polymeren zu generieren. Im Laufe der langen Geschichte dieser Technologie entstanden die unterschiedlichsten Verfahren wie das Spritzgießen, das reaktive Spritzgießen und das Heißprägen. Zugleich entstanden die dazu benötigten Maschinen und Werkzeuge und bilden heute eine etablierte Technologie, mit der potenziell auch die gewünschten Prägungen für diese Arbeit hergestellt werden können [157].

Die erste Versuchsreihe zur Evaluierung einer für den 3-D-Nanoimprint geeigneten Methode wurde aus diesem Grund an einer Heißprägemaschine durchgeführt. Diese Technologie beruht auf der Verformbarkeit des zu prägenden PMMAs bei einer hohen Temperatur, die über der Glastemperatur des PMMAs liegt. Für das in den Versuchen verwendete PMMA ist dies eine Temperatur von ca. 105 °C, ab der sich das Material verformen lässt. Die Untersuchungen des Heißprägens wurden an der TU Braunschweig durchgeführt. Die TU Braunschweig besitzt ein EVG501 Manual Thermo Compression Bonder System. Abbildung 31 zeigt ein baugleiches Modell dieser Anlage.



Abbildung 31: Darstellung eines EVG501-Manual-Thermo-Compression-Bonder-Systems. Dieses System wird für die Heißprägungen an der TU Braunschweig verwendet [158].

Prägeprozess

Die Anlage besteht aus dem durch einen Stempel- und Substrathalter aufgerüsteten Bonder-System und wurde dadurch in die Lage versetzt, Heißprägungen zu durchzuführen. Dazu wird eine elastische Dämpfungsunterlage auf den unteren erhitzbaren Halter gelegt. Auf

diese Unterlage wird der Stempel manuell platziert und mit dem zuvor beschichteten Substrat abgedeckt (Abbildung 32). Das verwendete Substrat ist Glas und wird mit PMMA⁸ als verformbarem zu prägendem Material beschichtet. Bei dieser auch Sandwichbestückung genannten Methode ergibt sich weder die Möglichkeit der präzisen Justage zwischen Stempel und Substrat noch die eines kontrollierbaren Keilfehlerausgleichs⁹. Die Justage zwischen Stempel und Substrat ist lediglich durch das Verschieben des Substrates mit der Hand gegeben. Der Keilfehlerausgleich findet durch die eingangs erwähnte Dämpfungsunterlage statt, die gleichzeitig für eine gleichmäßige Druckverteilung sorgen soll.

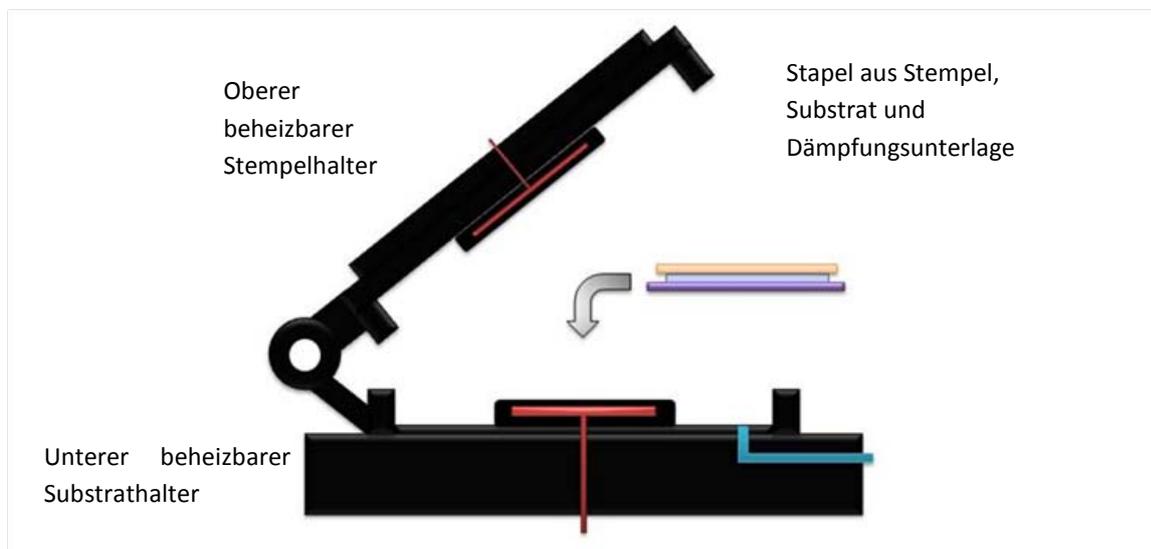


Abbildung 32: Schematische Zeichnung der EVG501-Heißpräganlage beim Bestücken der Prägekammer. Der Schichtstapel aus (von unten nach oben) elastischer Unterlage zur Druckverteilung, opakem Stempel und beschichtetem Substrat wird auf dem unteren Probenhalter justiert.

Ist die Anlage bestückt, werden die zuvor aufgeheizten Platten, d.h. der untere Halter und das obere Gegenstück, zusammengeklappt. Es folgt das Abpumpen der Atmosphäre, um ein Vakuum innerhalb des EVG501 zu erzeugen. Dies verhindert Lufteinschlüsse zwischen Stempel und Prägematerial. Ist ein ausreichendes Vakuum erreicht, so wird die obere Platte mit Pressluft auf die untere Platte, auf der der Stempel und das Substrat aufgeschichtet sind, gepresst (Abbildung 33). Durch die erzeugte Temperatur, die über der Glasübergangstemperatur des PMMA liegt, und den aufgebrachtten Druck nimmt das PMMA die Form des Stempels an. Nach kurzer Zeit, innerhalb der das Fließen des Materials erfolgt, werden die Platten abgekühlt, um das PMMA unter seine Glasübergangstemperatur zu kühlen und so aushärten zu lassen.

⁸ Polymethylmethacrylat (PMMA), besser bekannt als Acrylglas oder Plexiglas, ist ein synthetischer glasähnlicher thermoplastischer Kunststoff mit einer Glasübergangstemperatur von um 105 °C.

⁹ Der Keilfehlerausgleich ist die Korrektur zwischen dem Stempel und dem Substrat hinsichtlich ihrer Parallelität zueinander.

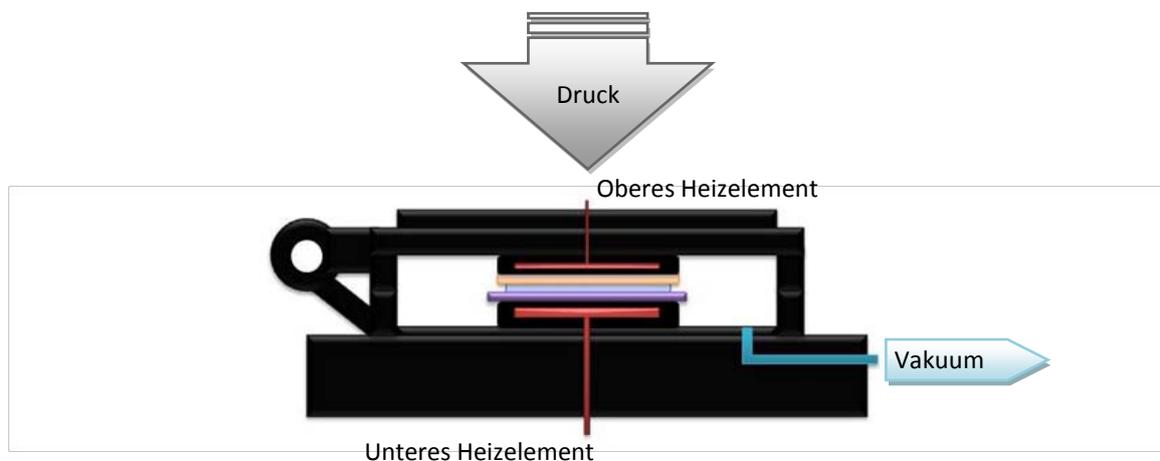


Abbildung 33: Schematische Zeichnung der EVG501-Heißprägeanlage während des Prägeprozesses. Nach dem Evakuieren der Prägekammer wird die Prägung mittels Druck und Hitze ausgeführt.

Nach dem Abkühlen können die zusammengesetzten Teile (Stempel und Substrat) per Hand herausgenommen und voneinander getrennt werden (Abbildung 34).

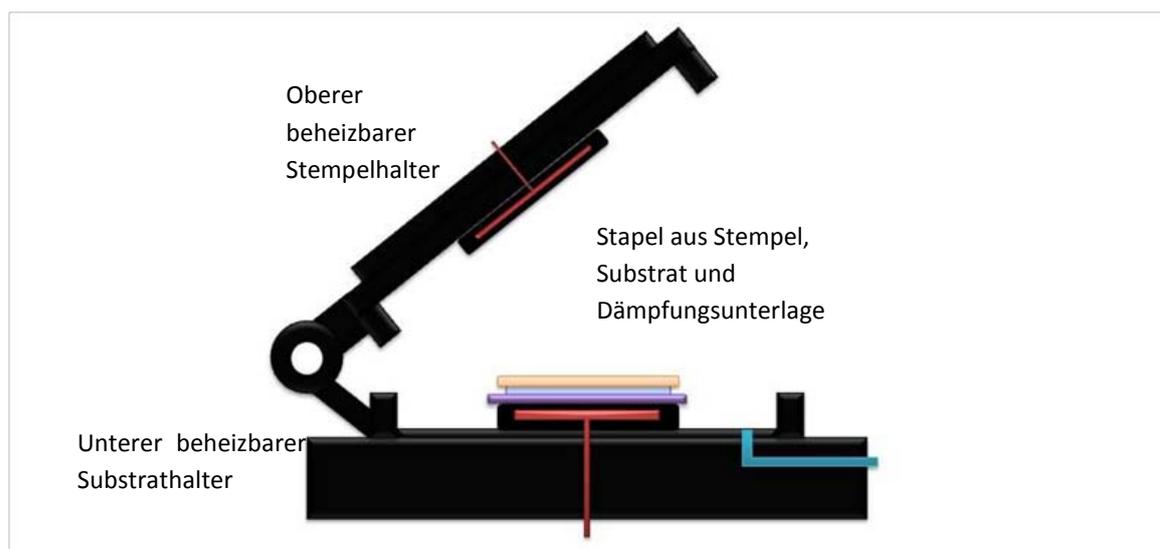


Abbildung 34: Schematische Zeichnung der EVG501-Heißprägeanlage nach dem Abkühlen. Das geprägte PMMA wird mittels Pressluftkühlung unter seine Glastemperatur abgekühlt, um es so wieder formstabil zu machen. Der Stapel aus Stempel und Substrat kann nun manuell herausgenommen und getrennt werden.

Ergebnisse

Die aus den Prägungen erhaltenen Ergebnisse waren aus mehreren Gründen nicht zufriedenstellend:

Auf den Substraten befand sich keinerlei erkennbare Prägung. Vielmehr ließen sich nur sehr verschwommene Umrisse erkennen, die auf den Kontakt zwischen Stempel und Substrat hinweisen. Mögliche Gründe hierfür sind ein zu hoher oder niedriger Druck, eine zu hohe oder zu niedrige Temperatur, Probleme mit der Haftung am Substrat oder die Zerstörung

der Strukturen bei der Trennung des Stempels vom Substrat. Da nach der ersten Versuchsreihe das Nutzen der Heißprägetechnologie zum Erreichen der in dieser Arbeit gesteckten Ziele ausgeschlossen wurde, fanden keinerlei weitere Untersuchungen statt, die genannten Fehlermöglichkeiten zu analysieren.

Des Weiteren lassen sich der Stempel und das Substrat nach dem Prägen nicht zerstörungsfrei trennen. Beim vorsichtigen Ablösen des Stempels vom Substrat zerbrach dieser. Kleinste Splitter des Stempels hafteten noch an der Prägung und verunreinigten das Ergebnis. Keine der durchgeführten Prägungen führte zu einem brauchbaren Ergebnis. In Abbildung 35 sind exemplarisch zwei Stempel zu sehen. Der linke ist noch mit dem Substrat verbunden und lässt sich nicht mehr ohne Gewalt trennen. Der rechte Stempel ist ein Teilstück eines beim Trennungsversuch zerbrochenen Stempels. Deutlich sind zwischen dem linken Stempel und dem Substrat farbige Ringe zu erkennen. Diese lassen auf einen inhomogenen Abstand der beiden Flächen voneinander schließen. Trotz der elastischen Dämpfungsunterlage konnte kein gleichmäßiger Druck aufgebaut werden, sodass die Prägung inhomogen wurde.

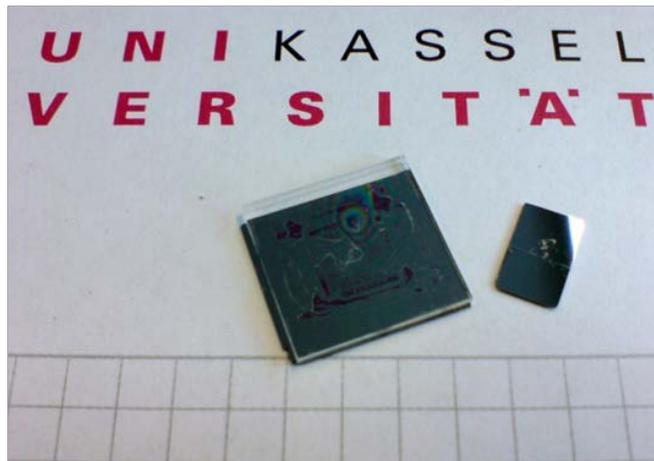


Abbildung 35: Am INA hergestellte Stempel nach den Prägeversuchsreihen. Der linke Stempel ist noch mit dem Substrat verbunden. Eine erfolgreiche Trennung war nicht möglich. Rechts zu sehen ist ein Teilstück eines bei einem Trennungsversuch zerbrochenen Stempels.

Diese nicht zufriedenstellenden Prägergebnisse und die Abschätzung des Potenzials bezüglich ihrer Verbesserung führten zu dem Entschluss, nicht mit dem Heißprägen fortzufahren. Ein weiterer Grund für diese Entscheidung ist der zu hohe Zeitbedarf je Prägung. Durch den Aufheiz- und Abkühlzyklus benötigt diese Maschine etwa 45 Minuten pro Prägung. Kombiniert mit dem Umstand, dass keinerlei Justage vorgenommen werden kann, ist es nicht möglich, auf dieser Maschine die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Eine ausführliche Analyse der Heißprägeprozesse an der in Braunschweig stehenden EVG501 wurde nach der Entscheidung, mit diesem Verfahren nicht zu arbeiten, nicht vorgenommen.

Auswertung

In Tabelle 2 sind die für diese Arbeit verwendeten Kriterien beim Vergleich der Prägeergebnisse zusammengefasst. Dabei wird mit dem Parameter Kontaktfläche diejenige Fläche bezeichnet, auf der der Stempel und das Substrat während des Prägens in Kontakt standen. Die prozentuale Angabe bezieht sich immer auf die Größe des Substrates. Mit dem Parameter Vollständigkeit wird die Unversehrtheit der Strukturen in der Prägung bewertet. Für diese Arbeit besteht eine Struktur aus einem Feld mit 64 Mesen. Maßgeblichen Einfluss auf diesen Parameter haben Abrisse und nicht gefüllte Prägestrukturen. Ausgeschlossen von diesem Parameter sind Lufteinschlüsse, sie werden mit einem eigenen Wert quantifiziert. Der letzte Parameter, Homogenität der Prägung, beurteilt, wie parallel die Prägung insgesamt ist. Da eine genaue Analyse dieser Größe aufgrund der Oberflächenwelligkeit als Startparameter der verschiedenen Substrate sehr aufwendig ist und hier keinerlei wichtige Erkenntnisse bei der Evaluierung der verschiedenen Imprintverfahren beisteuern würde, wird dieser Wert nur mit einer einfachen Skala bewertet, von „sehr gut“ bis „sehr schlecht“. Diese simple Bewertung vereinfacht die Gesamtbeurteilung des Prägeverfahrens.

Tabelle 2: Tabelle zur Auswertung des Heißprägens. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.

Parameter	Heißprägemethode
Kontaktfläche	Etwa 20 %
Vollständigkeit	0 %
Lufteinschlüsse	Keine Aussage möglich
Homogenität	Sehr schlecht

Für die Prägetechnologie Heißprägen ergibt sich eine geringe Kontaktfläche von nur ca. 20 %. Die Vollständigkeit der zu prägenden Strukturen liegt bei 0 %. Das heißt, es konnten nach dem Prägen keinerlei Strukturen auf dem Substrat gefunden werden. Über Lufteinschlüsse lässt sich aufgrund der schlechten Ergebnisse keine Aussage treffen, über die Homogenität jedoch sehr wohl. Sie ist mit „sehr schlecht“ bewertet, da, wie in Abbildung 35 zu sehen ist, Newtonringe deutlich auf Inhomogenitäten hinweisen.

Die für diese Arbeit durchgeführten Versuche und die dabei erzielten Ergebnisse der Heißprägeversuche an der TU Braunschweig lassen es zumindest bezüglich der hier zu erreichenden Ziele zu, diese Technologie als Imprintmethode für die Herstellung von Nanostrukturen zu negieren.

6.2 UV-Prägen (UV imprint) im INA

Eine weitere NIL-Technologie nutzt die Möglichkeit, das Prägematerial mittels UV-Licht auszuhärten. Diese Imprint-Technologie ist als UV-Prägen oder UV-Imprint bekannt. Nachdem S. Y. Chou et al. 1995 in seiner für den Nanoimprint initialen Veröffentlichung [41] zeigte, dass es mittels Nanoimprint möglich ist, Strukturen von 25 nm Größe von einem

Stempel auf ein Substrat zu übertragen, kam 1999 mit der „Step-and-Repeat“- oder „Flash NIL“-Technologie [134] die Verwendung von UV-Licht als aushärtendes Medium hinzu.

Für diese Technologie gebräuchlich ist die Verwendung einer rUV-Imprint-Anlage. Diese ermöglicht die Aushärtung des Prägematerials mittels UV-Licht, eine mechanische Justage von Stempel und Substrat zueinander und einen definierten Druck auf den Stempel während des Prägens. Eine solche Anlage gehörte bis Ende 2009 nicht zur Ausstattung des INA. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden Versuchsreihen an dem im INA befindlichen Mask Aligner MA4 oder dem in Garching stehenden MA6 mit NIL-Tooling [159] bei SÜSS MicroTec durchgeführt.

Der im INA stehende Karl-SÜSS-MA4-Mask-Aligner (Abbildung 36), der einen ähnlichen Aufbau wie der MA6 hat, wird im normalen Laborbetrieb für Lithografieprozesse verwendet. Es ist wirtschaftlich nicht möglich, ein Nanoimprint-Tooling von SÜSS MicroTec nachzurüsten. Um dennoch Imprint-Versuche durchzuführen, wurde die Anlage vom Autor modifiziert. Im folgenden Abschnitt werden die Methode, UV-Nanoimprint mit einem modifizierten MA4 zu betreiben, sowie ihre Ergebnisse dargestellt.



Abbildung 36: Karl-SÜSS-MA4-Mask-Aligner.

Ergebnisse der Maschinenmodifikation

Der Mask Aligner MA4 ist eine weitverbreitete Lithografie-Maschine. Die in dieser Maschine implementierte Software unterstützt nur den Lithografie-Modus. Eine Softwareerweiterung des MA4 wie bei dem Nachfolgermodell MA6, welches auch zu einer Nanoimprint-Anlage umgerüstet werden kann, ist aus technischen Gründen nicht möglich bzw. wäre mit zu hohen Kosten verbunden. Die Prägungen wurden somit im „Hard-Contact-Mode“ des Lithografieprogrammes durchgeführt. Dieses Programm wird dazu genutzt, bei Lithografieprozessen die Maske und das zu strukturierende Substrat miteinander in Kontakt zu bringen. Der minimierte Abstand zwischen den beiden sorgt für eine maximale Schärfe der Strukturen beim Übertrag durch die Belichtung.

Angesichts der Tatsache, dass ein nicht transparentes Material für die Herstellung des Stempels verwendet wurde, war es nicht möglich, die NIL-Standardmethode, bei der von oben durch einen UV-transparenten Stempel hindurch belichtet wird, zu verwenden. Aus diesem Grund musste der Prozess umgedreht werden, sodass für die Prägungen der Stempel unten und oben ein für die Belichtung UV-transparentes Substrat befestigt wurde. Dies hatte zur Folge, dass einige Modifizierungen an dem Mask Aligner vorgenommen werden mussten:

- die Entwicklung und Herstellung eines Probenhalters,
- die Optimierung der Druckverteilung bei der Prägung,
- Erzeugung eines Vakuums zwischen dem Substrat und dem Stempel,
- Optimierung des Anpressdruckes zwischen Stempel und Substrat.

Der Probenhalter oder auch Vakuum-Adapter

Der Vakuum-Adapter ist ein Bauteil, das dafür sorgt, dass das zu prägende Substrat an der Stelle fixiert werden kann, an der sich bei einem normalen Lithografieprozess die Maske befindet. Die verwendeten Substrate sind wesentlich kleiner als eine Maske und können nicht mit der Maskenaufnahme des MA4 gehalten werden. Die Anforderungen an den deswegen benötigten Vakuum-Adapter lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Er muss aus einem verwindungssteifen Material bestehen und eine möglichst planare Oberfläche besitzen,
- er muss für die UV-Belichtung transparent sein,
- das Substrat muss auf dem Adapter ausreichend fixiert werden können und
- die Abmessungen des Adapters müssen mit den lateralen Abmessungen der Maske, 102 mm x 102 mm, übereinstimmen, um sowohl eine mechanische Fixierung als auch eine Fixierung mittels Vakuum auf dem Maskenhalter zu ermöglichen.

Die erste Generation des Vakuum-Adapters, die hergestellt und erprobt wurde, bestand aus PMMA. Aufgrund seiner unzureichenden Stabilität wurde dann ein stabilerer Adapter aus Borosilicatglas der Firma Präzisions Glas & Optik GmbH entwickelt. Abbildung 37 zeigt das Transmissionsspektrum dieses Glases bei einer Dicke von 2 mm. Das Glas transmittiert ab einer Wellenlänge von etwa 300 nm zu 90 %, was ausreichend für die Belichtung der Proben ist.

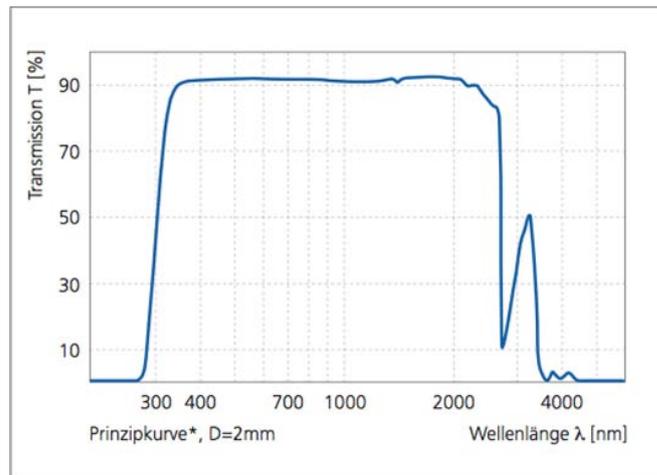


Abbildung 37: Transmission von Borosilicatglas bei einer Dicke von 2 mm [160].

Abbildung 38 zeigt eine schematische Darstellung des entwickelten Vakuum-Adapters. Er besteht aus zwei quadratischen Glasplatten, die den geforderten Abmessungen entsprechen und folgende Strukturdetails aufweisen: (1) fünf Bohrungen in der oberen Glasplatte als Vakuumöffnungen, um darauf die Probe zu fixieren (Vakuumausgänge), (2) zwei rechtwinklig zueinander angeordnete, gefräste Einkerbungen auf der unteren Glasplatte, die die Vakuumkanäle bilden, und (3) zwei Bohrungen (Vakuumeingänge). Die Vakuumeingänge stimmen mit den Vakuumausgängen des Maskenhalters überein, sodass diese mit den Vakuumkanälen verbunden sind, die in die untere Glasplatte gefräst wurden. Beim Aufeinanderlegen beider Platten befinden sich die Kanäle mittig zwischen den Platten. Die fünf Bohrungen in der oberen Glasplatte bilden die Vakuumausgänge, auf die das zu fixierende Substrat gelegt wird. Auf diese Weise ist es möglich, die Substrate im Maskenhalter zu fixieren.

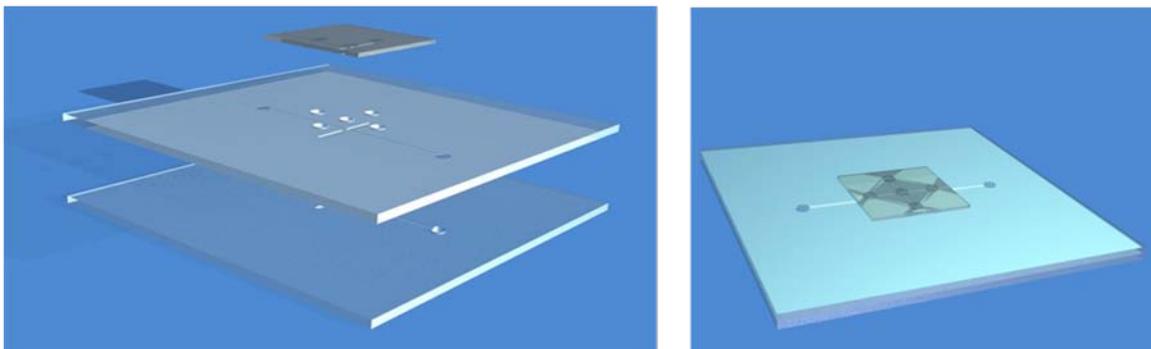


Abbildung 38: Vakuum-Adapter für den MA4 im INA. Material: Quarzglas. In der Explosionszeichnung (links) sind von unten nach oben zu erkennen: erste Quarzplatte mit den Vakuumeinlasslöchern und den eingeschliffenen Vakuumkanälen, zweite Quarzplatte mit den Ausgangslöchern, auf die das Substrat gelegt wird, und, etwas dunkler, das Substrat. Rechts sieht man das zusammengesetzte Bauteil.

Optimierung der Druckverteilung

Anhand erster Versuche wurde festgestellt, dass der Druck zwischen Substrat und Stempel sich beim Prägen ungleichmäßig verteilt. Dieses Problem ließ sich zum Teil mithilfe einer

quadratischen Membran aus weichem Material mit den Abmessungen 6 mm x 6 mm x 0,1 mm lösen. Bei dem hierfür verwendeten Material handelt es sich um eine dünne Plastikfolie, die zur besseren Druckverteilung zwischen dem Vakuum-Adapter und der Probe platziert wurde, wie es in Abbildung 39 veranschaulicht ist. Die Membran wird mittig auf den Vakuum-Adapter gelegt, wodurch ein Vakuumanschluss in der Mitte verschlossen bleibt und das Ansaugen der Probe an vier äußeren Vakuumanschlüssen erfolgt. Auf diese Weise soll ein Durchbiegen der Probe verhindert werden.

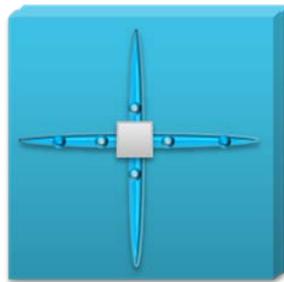


Abbildung 39: Vakuum-Adapter mit der Membran in der Mitte.

Das Durchbiegen konnte durch die Membran verhindert werden, sodass gerade im mittleren Bereich des Substrates, in dem sich die wichtigen Strukturen befinden, bessere Prägungen realisiert wurden.

Erzeugung eines Vakuums zwischen Stempel und Substrat

Um Lufteinschlüsse in den Prägungen zu vermeiden, muss während des Prägens zwischen Stempel und Substrat ein Vakuum herrschen. Diese Anforderung sollte im Vakuumkontaktmodus der Anlage umgesetzt werden, da es nur in diesem Modus möglich ist, ein Vakuum zwischen Stempel und Substrat zu erzeugen.

Im Lithografiebetrieb befindet sich normalerweise zwischen der Maske und dem Substrathalter (Chuck) nur ein Wafer, der 500 µm dünn ist. Bei der Nanoimprint-Lithografie sind es sowohl das Substrat als auch der Stempel, infolgedessen kann von der Maschine selbst keine Vakuumkammer zwischen dem Vakuum-Adapter und dem Chuck gebildet werden, da die Dichtlippe, die sich automatisch aufpumpt, nicht groß genug ist, um diese Höhe zu überwinden. Die wenigen Millimeter, die noch fehlen, um den unteren Chuck mit dem oberen Vakuum-Adapter in Kontakt zu bringen, sollen mithilfe eines Gummiringes überwunden werden (Abbildung 40).

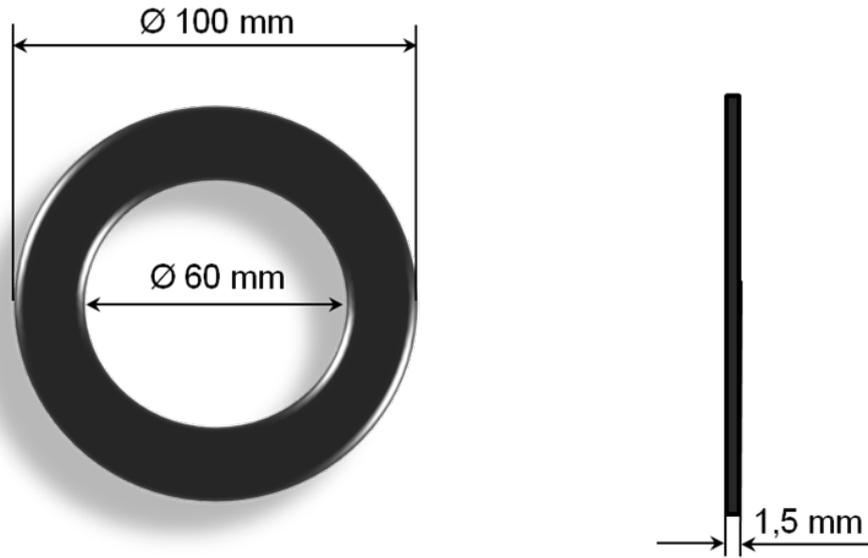


Abbildung 40: Gummiring für Vakuumkontaktmodus mit den entsprechenden Abmessungen.

Der Gummiring wird auf die nur um wenige Millimeter aufpumpbare Dichtlippe, die sich auf dem Chuck befindet, gelegt. Beim Hinauffahren können damit die fehlenden Millimeter überwunden werden und somit kann erfolgreich eine Vakuumkammer gebildet werden, wie es in Abbildung 41 dargestellt ist.

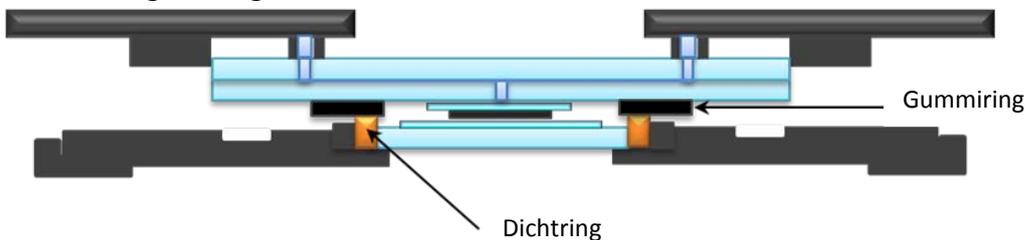


Abbildung 41: Schematische Veranschaulichung des Vakuumkontaktmodus mit zwischengelegtem Gummiring.

Nach einigen Prägeversuchen konnten dennoch keine erkennbaren Verbesserungen der Prägungen festgestellt werden. Gründe dafür sind, dass der Stempel mit der Probe in Kontakt kommt und erst dann Vakuum aus der Kammer gezogen wird, somit haben sich die typischen Fehler wie z. B. Luftschlüsse, Schmierstellen und unvollständig gefüllte Strukturen bereits gebildet. Zur Verbesserung der Prägung müsste die Kammer zwischen dem Vakuum-Adapter und dem Chuck während des Prägeprozesses evakuiert werden. Um das Problem des fehlenden Vakuums zwischen dem Stempel und dem Substrat zu lösen, bedarf es größerer Umbaumaßnahmen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden konnten.

Optimierung des Anpressdruckes zwischen Stempel und Substrat

Mit dem bisherigen Verfahren zum Prägen mit dem MA4 wurde lediglich ein Druck von 1 bar erreicht, mit dem das Substrat auf den Stempel gedrückt wurde. Um einen großflächigeren Abdruck zu erhalten und um die Restschichtdicke zu minimieren, muss ein größerer Druck erreicht werden. Da sich gezeigt hat, dass sich die Vakuumlippe erst aufbläst, nachdem der Chuck in Kontakt gefahren ist, soll der Druck der Vakuumlippe hierbei dazu verwendet werden, zusätzlich von unten auf den Stempel zu drücken. Hierfür wurde eine Aluminiumplatte unter den Stempel auf die Vakuumlippe gelegt (Abbildung 42).

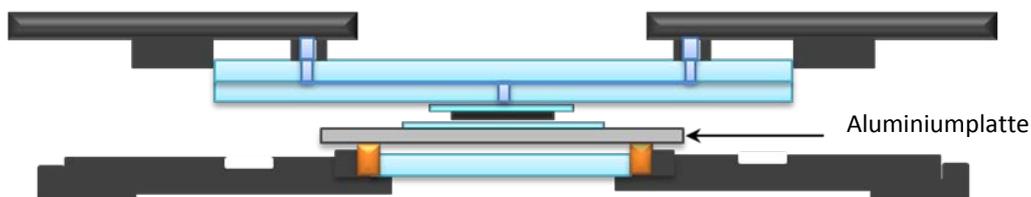


Abbildung 42: Schematische Veranschaulichung des Vakuumkontaktmodus mit der Aluminiumplatte auf der Vakuumlippe.

Dadurch war es möglich, den Druck um 0,2 bar zu erhöhen und ein etwas besseres Prägergebnis zu erzielen (Abbildung 43).

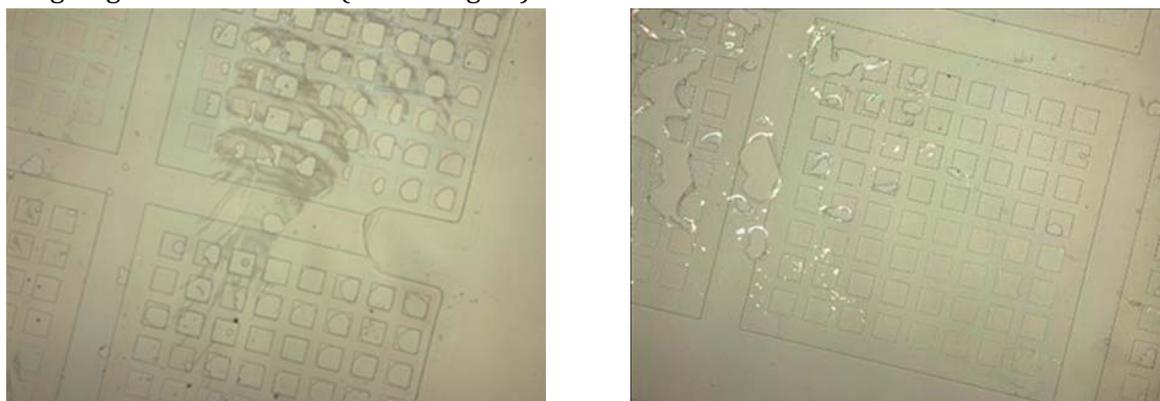


Abbildung 43: Lichtmikroskopische Aufnahmen zeigen den Einfluss der Aluminiumplatte auf die Qualität der Prägung. Links ist ein Prägergebnis vor dem Verwenden der Aluminiumplatte zu sehen, rechts nach der Prägung mit der Platte. Beim Vergleich der Aufnahmen ist der Unterschied zwischen beiden deutlich zu erkennen: Rechts sind weniger Luft einschüsse vorhanden.

INA-Prägeprozess mit MA4

- (1) Ein Substrat wird mittels einer Lackschleuder mit dem Polymer m-UVCur06 beschichtet.
- (2) Der Vakuum-Adapter mit dem belackten Substrat wird auf die Vakuum-Nut des Maskenhalters gesetzt und mechanisch eingespannt. Zwischen dem Vakuum-Adapter und dem Substrat befindet sich eine dünne Folie, die in der Mitte des Vakuum-Adapters aufliegt (siehe Abbildung 44).

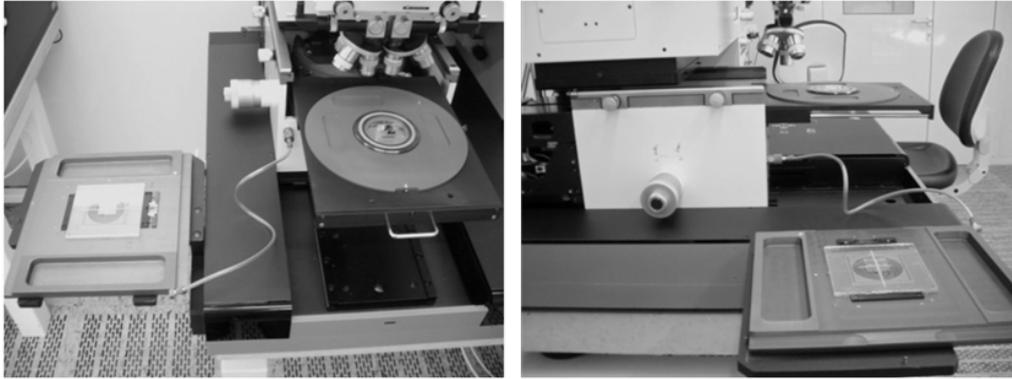


Abbildung 44: MA4.

(3) Der Stempel wird auf dem Chuck fixiert.

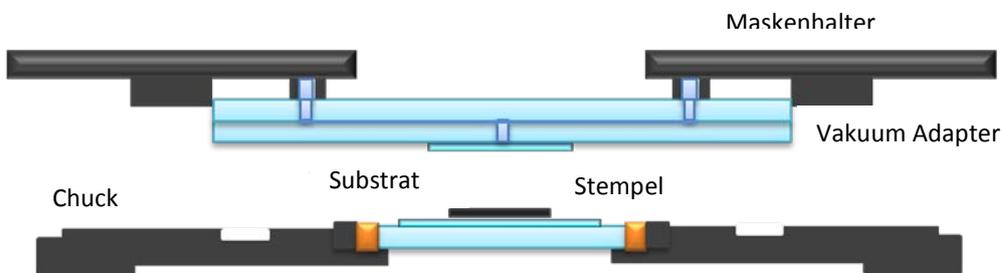


Abbildung 45: Prägeschritt 1: Schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA.

(4) Das Hinauffahren des Chucks (Abbildung 46). Um die Strukturen des Stempels in das zu prägende Material abzuformen, soll der Prägedruck über die ganze Zeit konstant gehalten werden, damit das Polymer in die Stempelräume fließt (Abbildung 47).

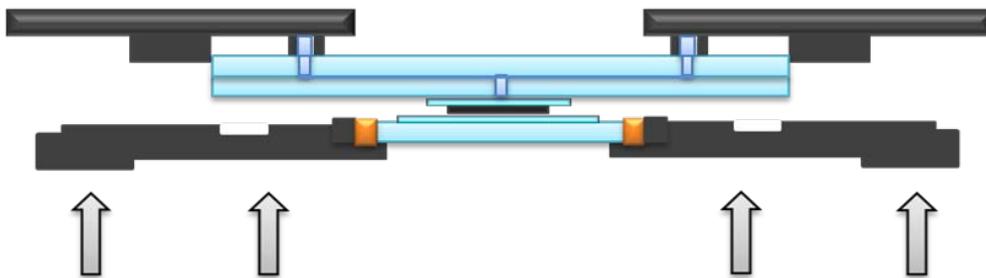


Abbildung 46: Prägeschritt 2: Schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA (Hartkontaktmodus).

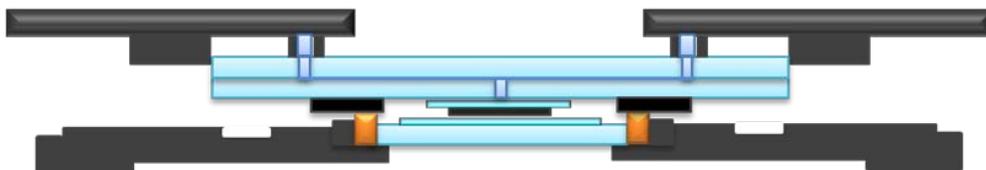


Abbildung 47: Prägeschritt 2: Schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA (Vakuumpunktmodus).

(5) Das Aushärten des Polymers. Die Aushärtung erfolgt während des Prägeschritts im Mask Aligner. Die aufgeschleuderte, flüssige Schicht wird mittels UV-Licht bei Raumtemperatur gehärtet. Hierbei kommt die UV-Lampe 350 Hg des MA4 zum Einsatz.

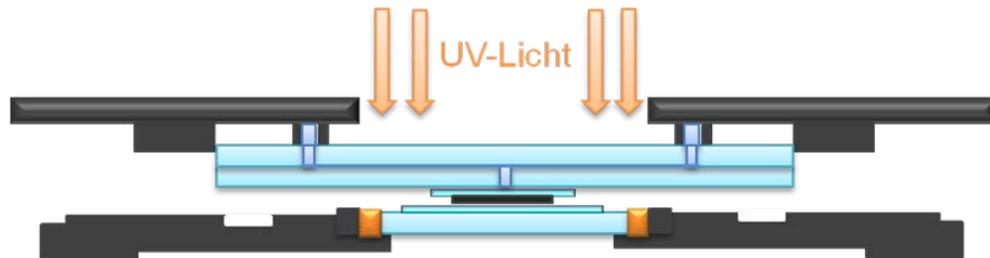


Abbildung 48: Prägeschritt 3: Aushärten des Resists durch UV-Belichtung der Probe: schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA.

Und zuletzt (6) das Absenken des Chucks, um Stempel und Substrat sauber voneinander zu trennen. Wichtig hierbei ist eine möglichst senkrechte Trennung der beiden Teile. Nach der Trennung behält der Polymerfilm die Form der Stempelstruktur.

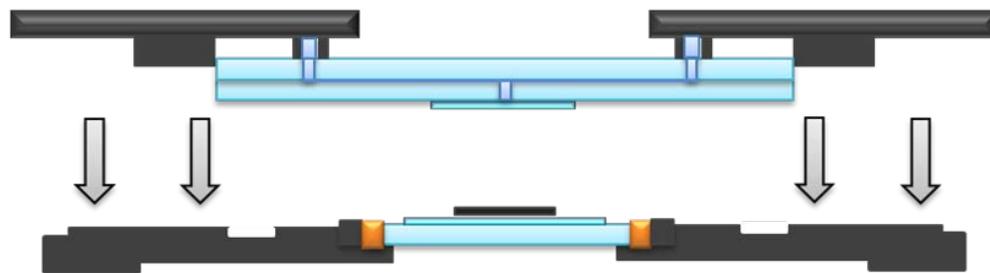


Abbildung 49: Prägeschritt 4: Absenken des Chucks: schematischer Aufbau des MA4-Prägetools am INA.

Ergebnisse, erzielt durch verschiedene Optimierungsversuche

Das Ziel einer Prägung ist die vollständige und präzise Abformung des Stempels in das zu prägende Material. Optimal ist dabei eine möglichst dünne Restschicht zwischen Stempel und Substrat. Abbildung 50 zeigt ein Beispiel dafür. Es handelt sich dabei um eine mit dem MA4 geprägte Struktur. Die Strukturen sind voll gefüllt und besitzen scharfe Konturen.

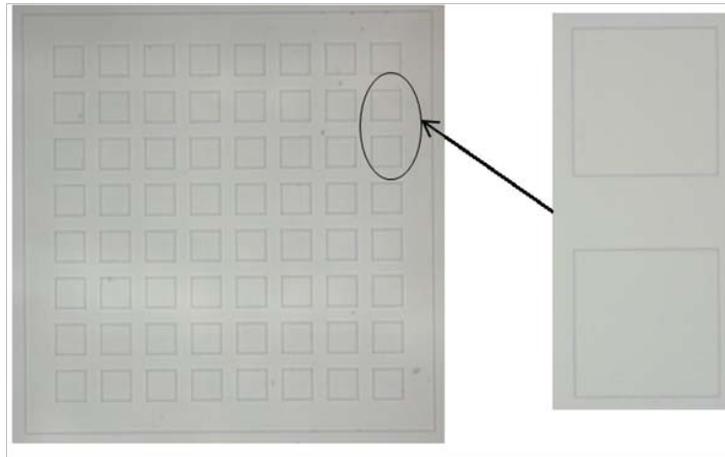


Abbildung 50: Lichtmikroskopische Aufnahme von den mit dem MA4 geprägten und präzise abgeformten Strukturen. Links ist ein Feld ($1,35 \times 1,35 \text{ mm}^2$) mit $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ -Strukturen bei einer Vergrößerung von $\times 5$ abgebildet, rechts ein $\times 20$ vergrößerter Ausschnitt mit 2 Strukturen.

Ergebnisse durch Optimierung der Restschichtdicke

Die Optimierung des Prägens im Hinblick auf homogene und geringe Restschichtdicken ist ein wichtiger Aspekt für die Fertigung von Fabry-Pérot-Kavitäten, da die Gesamtschichtdicke maßgeblich den Filter bestimmt. Wie und wie viel Polymer auf den Stempel bzw. das Substrat aufgetragen wird, ist im Wesentlichen für die Restschichtdicke entscheidend. Wird zu viel Prägematerial aufgebracht, so bildet sich ein Rand um den Stempel. Bei einer zu geringen Menge verteilt sich der Resist nicht unter der gesamten Stempelfläche, was unvollständig ausgefüllte Strukturen in der Prägung zur Folge hat (Abbildung 51).

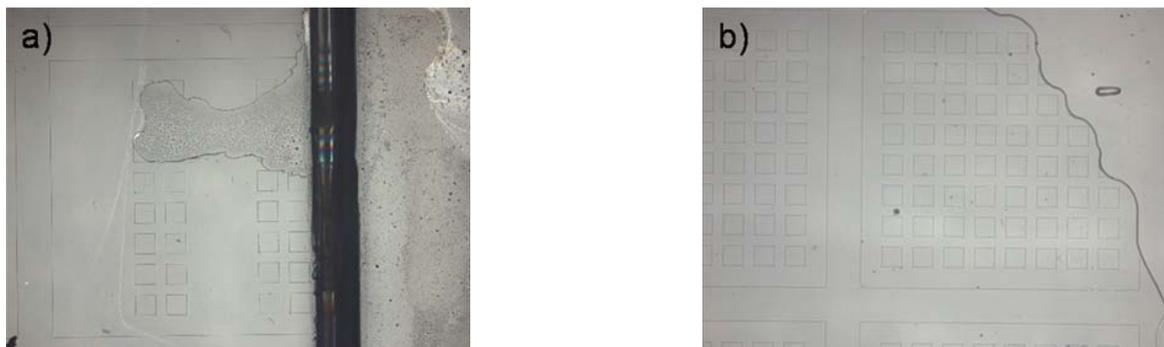


Abbildung 51: Lichtmikroskopische Abbildungen der Beispiele für Prägedefekte: a) Rand um den Stempel und b) unvollständig ausgefüllte Strukturen.

Um das Prägematerial auf den Stempel oder das Substrat aufzubringen, wurden im Wesentlichen drei Methoden verwendet.

Manuelles Dispensieren mittels Pipette

Das Prägematerial wird mit einer Pipette unmittelbar vor der Prägung auf den Stempel getropft (das Aufbringen des Polymers auf den Stempel sorgt dafür, dass keine Lufteinschlüsse entstehen). Das Substrat wird anschließend mit einer Pinzette vorsichtig auf den Stempel gelegt, damit das Polymer sich unter der Substratoberfläche verteilen kann.

Manuelles Dispensieren mittels Spritze

Ein Tropfen des Prägematerials wird am Ende der Spritzennadel erzeugt. Die Spritze wird dann an die Oberfläche des Stempels angenähert, bis der Tropfen an der Nadel abreißt und auf dem Stempel aufliegt.

Der Nachteil beider Methoden besteht darin, dass es nicht immer gelingt, die gleichen Tropfengrößen zu reproduzieren, und dass diese Polymerschichten weit weniger homogen sind als die mittels Spin-Coating-Methode erzeugten Schichten. Die Schichtdicken betragen $\approx 1,2 \mu\text{m}$, was 6 mal größer ist als erwünscht. Vorteilhaft ist allerdings, dass keine bzw. fast keine Lufteinschlüsse vorhanden sind.

Lackschleudermethode

Hierbei wird das Polymer mittels einer Lackschleuder aufgebracht. Es entsteht eine einstellbare, dünne Schicht auf den Substraten. Beim Aufschleudern auf Stempel kam es jedoch zu Ungleichmäßigkeiten und beim Prägen zu Lufteinschlüssen.

Softbake

Nach der Belackung mittels Lackschleudermethode erfolgt generell ein Tempervorgang auf einer Heizplatte. Die Fotolackschichten des mr-UVCur06 werden auf einer Heizplatte bei $90 \text{ }^\circ\text{C}$ für 45 Sekunden getrocknet [161]. Dieser Schritt dient der Erzeugung eines festeren Polymerfilms und der weitgehenden Entfernung des Lösemittels. Dadurch wird die mechanische Stabilität der Lackschicht durch das Trocknen erhöht und die Haftung am Substrat verbessert [162].

Ein zu langer bzw. heißer Softbake zersetzt Anteile des Fotoinitiators, durch den stark gesunkenen Restlösemittelanteil versprödet der Fotolack und wird – vor allem bei dicken Lackschichten – anfällig für Rissbildung.

Treten trotz ausreichenden Softbakes vermeintliche „Blasen“ in der Lackschicht auf, sind dies oft Spannungsrisse. Diese bilden sich in stark getrockneten, dicken Fotolackschichten beim Belichten durch das Volumen an aus dem Fotoinitiator gebildetem Stickstoff, welcher nicht rasch genug aus der Fotolackschicht ausgasen kann (Abbildung 52) [163].

In der überwiegenden Mehrzahl der Versuche zur Prozessentwicklung erfolgte der Auftrag des mr-UVCur06 mit einer Pipette bzw. Spritze. Der Grund dafür war bzw. ist der unzureichende Druck des Mask Aligners MA4. Der Druck von 1 bar, der beim MA4 höchstens erreicht werden kann, war nicht ausreichend, um die Stempelstrukturen in den mit der Lackschleuder aufgebrauchten Polymerfilm vollständig zu übertragen.

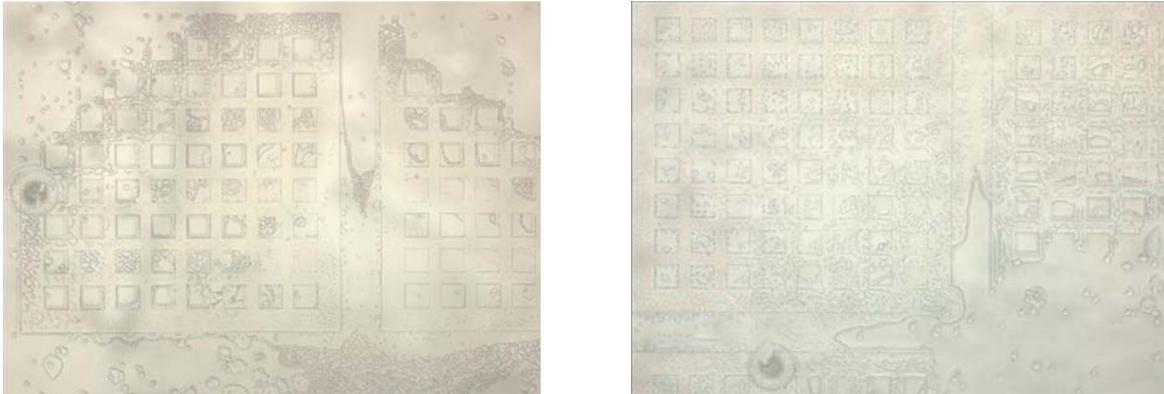


Abbildung 52: Lichtmikroskopische Abbildungen zeigen ein Beispiel für eine nicht gelungene Prägung. Der Resistauftrag auf ein Glassubstrat erfolgte mittels Spin-Coating-Methode. Die Strukturen wurden aufgrund des geringen Drucks unvollständig übertragen. Außerdem enthalten die Proben viele vermeintliche Blasen, die entweder auf einen langen Softbake oder eine dicke Fotolackschicht zurückzuführen sind.

Belichtungszeiten

Eine genaue Betrachtung der Belichtungszeiten war für diese Arbeit nicht notwendig, da die Proben überbelichtet wurden. Der Vakuum-Adapter besteht aus 2 Glasplatten, die das UV-Licht nicht zu 100 % transmittieren. Da eine längere Belichtung keinerlei Nachteile bezüglich des Aushärtprozesses des Polymers zeigte, eine zu kurze jedoch schon, wurde die Belichtungszeit um ein Vielfaches heraufgesetzt. Die somit entstandenen Verluste werden kompensiert, was durch ein Überbelichten der Probe erreicht werden konnte. Die Belichtungszeiten wurden von 300 bis 420 Sekunden variiert, um die Strukturen vollständig auszuhärten und ein problemloses Entformen zu gewährleisten.

Lufteinschlüsse

Beim Aufbringen des Polymers auf das Substrat mittels Pipette oder Spritze entstehen im weiteren Prägeprozess Lufteinschlüsse zwischen den Vertiefungen im Stempel und dem Polymer (Abbildung 53). Zur Lösung dieses Problems wurde das noch flüssige mr-UVCur06 mittels Spritze bzw. Pipette direkt auf den Stempel aufgebracht. Infolgedessen sollten die Hohlräume des Stempels mit Polymer gefüllt werden, bevor er mit dem Substrat in Kontakt kam.

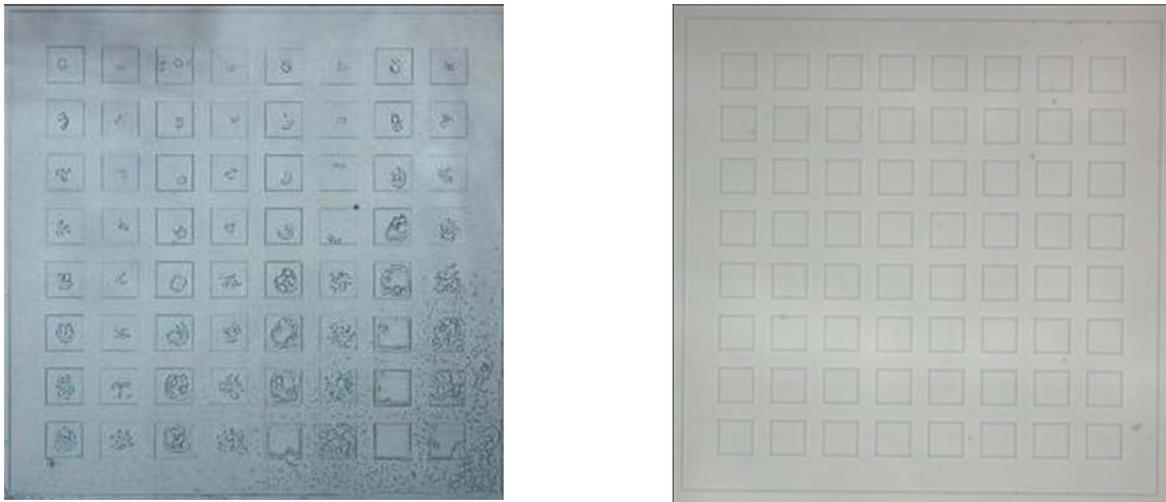


Abbildung 53: Lichtmikroskopische Aufnahmen zweier Prägungen (Array mit 64 Strukturen). Rechts erfolgte der Resistauftrag direkt auf den Stempel, somit konnten Lufteinschlüsse in den Vertiefungen innerhalb des Stempels, wie sie auf der linken Aufnahme zu sehen sind, vermieden werden.

Newton-Ringe, so wie sie in Abbildung 54 zu sehen sind, treten dann auf, wenn sich zwei durchsichtige Flächen, wie eine gewölbte Polymerschicht und ein flaches Glas, nur punktuell berühren. Dieses Phänomen wird durch die Interferenz des Lichtes in der Luft zwischen den beiden Oberflächen hervorgerufen [164], [165]. Die Vermutung liegt nahe, dass sich nach Aufbringen des Polymers auf den Stempel größere Luftblasen zwischen Substrat und Polymer gebildet haben.

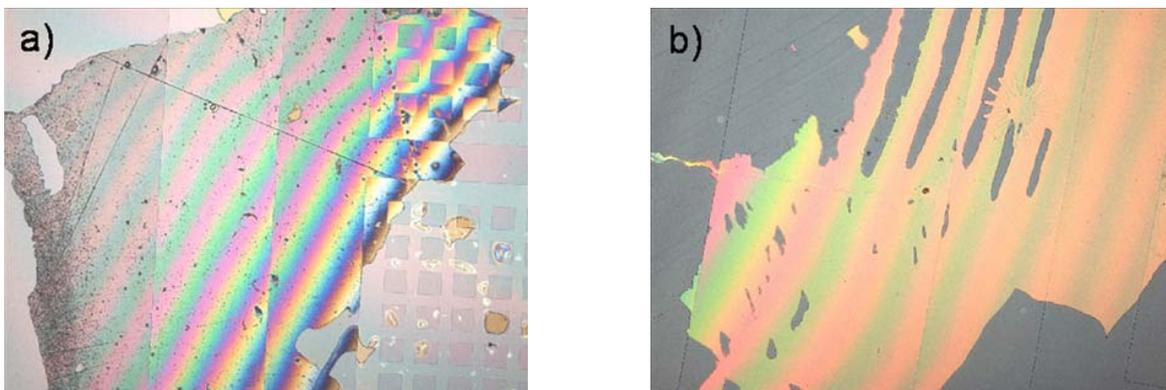


Abbildung 54: Die lichtmikroskopischen Aufnahmen zeigen Bereiche eines Stempels, auf dem Resistreste haften. Die Ringmuster (Newtonsche Ringe) bei beiden Aufnahmen entstanden durch Interferenz an der dünnen Luftschicht zwischen dem Substrat und dem Resist bei UV-Beleuchtung, was auf die Lufteinschlüsse zwischen dem Substrat und dem Resist zurückzuführen ist.

Das Auftreten von Lufteinschlüssen bzw. Luftblasen beim Prägen mit MA4 konnte nicht gänzlich vermieden werden. Die besten Ergebnisse, d.h. solche mit relativ wenigen Lufteinschlüssen, wurden im Vakuumkontaktmodus mit Aluminiumplatte mittels manuellen Pipettierens direkt auf den Stempel erzielt.

Haftungsprobleme

Abbildung 55 zeigt teilweise abgelöste Prägeergebnisse. Bei diesen Prägungen blieb ein Teil des Polymers bei der Trennung des Stempels und des Substrates am Stempel zurück. Gründe dafür sind hier nicht Haftungsprobleme, sondern die Welligkeit des Substrates. Der Stempel mit dem Prägematerial konnte nicht ganzflächig mit dem Substrat in Kontakt gebracht werden.

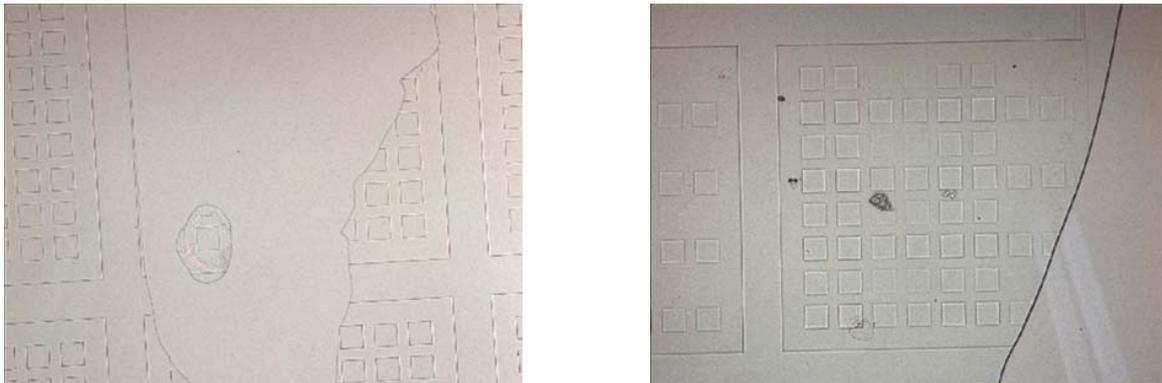


Abbildung 55: Lichtmikroskopische Aufnahmen zweier Prägungen auf den Objektträger: Die Herkunft der großen unausgefüllten Bereiche ist auf die Oberflächenwelligkeit der Objektträger zurückzuführen. Es konnte nicht exakt parallel zur Substratoberfläche gestempelt werden.

Die Lösung dieses Problems bestand in der Verwendung ebenerer Substrate.

Bei Prägungen auf DBR-Spiegeln mit der obersten Schicht aus ZrO_x traten Haftungsprobleme zwischen dem DBR-Spiegel und dem Prägematerial auf (Abbildung 56). Teile des Polymers blieben auf dem Stempel haften. Diese Erkenntnis wurde im Folgenden genutzt, um eine erste Antihafbeschichtung aus ZrO_x auf den Stempel aufzubringen. Mit der dünnen ZrO_x -Schicht auf dem Stempel konnte eine Besserung des Haftproblems erreicht werden, jedoch konnten Abrisse nicht gänzlich vermieden werden.

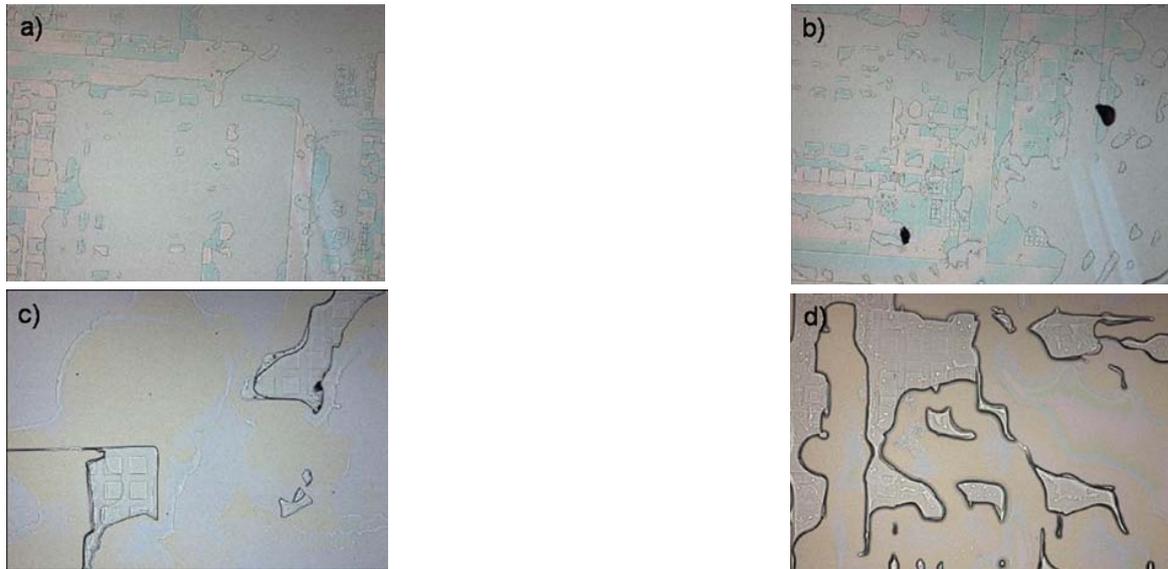


Abbildung 56: Lichtmikroskopische Aufnahmen verschiedener Proben nach der Prägung mit MA4. Bei den Substraten handelt es sich hier um DBR-Spiegel. Die strukturierte mr-UVCur06-Schicht konnte, was den Strukturübertrag angeht, nicht erfolgreich hergestellt werden. Der Grund hierfür war unzureichende Haftung zwischen dem DBR-Spiegel und der Restschichtschicht.

Adhäsionsproblem

Die Klebedefekte, wie sie beispielhaft in der Abbildung 57 dargestellt sind, sind durch die Haftkraft des Polymers an der Stempeloberfläche entstanden. Durch den direkten Kontakt der Stempeloberfläche mit dem Polymer kam es beim Prägen zum Anhaften des Polymers an der Stempeloberfläche. Beim Abnehmen des Stempels riss der Polymerfilm von dem Substrat ab und haftete an dem Stempel. Die Abbildung 57 a) stellt einen besonders stark mit Polymer bedeckten Ausschnitt aus dem 4 x 4-Feld des Prägestempels dar. Das Bild 57 b) zeigt ebenfalls einen stark bedeckten Bereich des Prägestempels mit einem Staubpartikel in der Mitte.

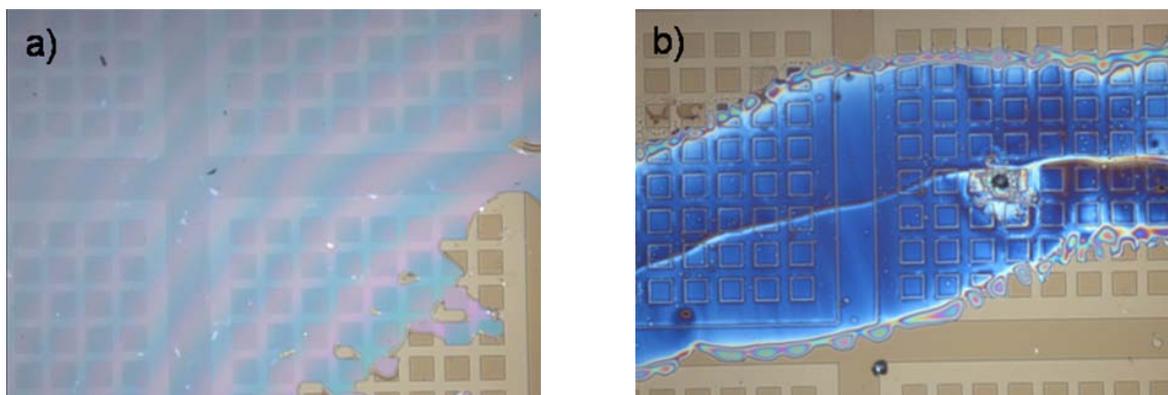


Abbildung 57: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines Prägestempels, die zwei extreme Beispiele des Resisthaftproblems nach der Prägung darstellen: a) besonders stark mit Resist verunreinigter Bereich; b) ein ebenso stark verschmutzter Bereich mit einem Staubpartikel in der Mitte.

Das beschriebene Problem der Haftung machte es schwer, wenn nicht unmöglich, homogene funktionelle Prägen auf Substratoberflächen zu erzeugen. Im Weiteren werden Methoden, zum einen Primern und zum anderen Salzsäurebehandlung, beschrieben, mit denen versucht wurde das Haftproblem zu lösen.

Primern

Dieses Verfahren wird dann eingesetzt, wenn durch Tempern keine eindeutige Verbesserung der Lackhaftung erzielt wird. Hierbei wird vor der eigentlichen Beschichtung mit dem Lack ein Haftvermittler aufgebracht. Es wurden zwei Haftvermittler verwendet: TI Prime und Hexamethyldisilasan (HMDS).

Haftvermittler TI Prime

Vor der Beschichtung des Substrates mit dem Polymer wird dieses mit dem Haftvermittler versehen. Das Aufbringen eines Haftvermittlers soll ein Ablösen des Polymers beim Prozessieren verhindern und die Haftung am Substrat verbessern. Es wurde der Haftvermittler TI Prime (MicroChemicals GmbH, Deutschland) verwendet.

Für Glasoberflächen ist charakteristisch, dass diese aufgrund ihres chemischen Aufbaus sehr leicht Feuchtigkeit an der Oberfläche binden (absorbieren), welche die Ausbildung von Haftungskräften des Polymers zum Glas behindern kann.

Haftvermittler (Primer) sind Substanzen, die die Haftung zwischen zwei Phasen, z. B. einem Substrat und einer Beschichtung, verbessern. Die Wirkung von Haftvermittlern beruht darauf, dass diese mit beiden Phasen ausreichend starke unpolare, polare oder kovalente Bindungen aufbauen, die stärker sind als die Bindungen der beiden Phasen untereinander [166].

TI Prime wird bei 3000 U/min 20 Sekunden lang [161] auf eine saubere Substratoberfläche aufgeschleudert, wobei durch die hohe Verdünnung der aktiven Substanz weniger als eine Monolage auf dem Substrat adsorbiert. In einem anschließenden Backschritt wird der Haftvermittler aktiviert, worauf die Belackung folgt [163].

Haftvermittler HMDS

Die OH-Gruppen können auch durch die Anwendung von HMDS-Hexamethyldisilazan $[(\text{CH}_3)_3\text{Si-NH-Si}(\text{CH}_3)_3]$ beseitigt werden. Im Gegensatz zu anderen Haftvermittlern reagiert HMDS nicht nur mit Wasser, sondern auch mit den Silanolgruppen an der Si-bzw. SiO_2 -Oberfläche. Dafür muss das Substrat zunächst bei erhöhter Temperatur in N_2 -Atmosphäre ausgeheizt werden. Danach wird die Oberfläche (ebenfalls in Stickstoffatmosphäre) im Priming-Ofen nach Erwärmung in einer gesättigten HMDS-Atmosphäre behandelt. HMDS wird bei der Temperatur 130 °C verdampft und schlägt sich als monomolekulare Schicht (< 5 nm) auf der Substratoberfläche nieder. Das Substrat kann ohne nachfolgende Temperung unmittelbar nach der HMDS-Behandlung mit dem Prägematerial beschichtet werden [162], [163].

Kurze Behandlung der Substratoberfläche mit Salzsäure (HCl)

Auf jeder unter Umgebungsbedingungen gelagerten Silizium-Probe befindet sich ein natürliches (natives) Oxid. Die Dicke des nativen Oxides hängt ab vom Alter des Substrates und davon, in welcher Umgebung es gelagert wird. Bei Raumtemperatur entsteht nur ein sehr dünnes natives Oxid von kaum mehr als einer bis zwei Moleküllagen von jeweils 1–2 nm Dicke.

Die Behandlung der Substratoberfläche mittels nasschemischer Prozesse dient der Entfernung des nativen Oxides, wodurch die Haftfestigkeit einer Beschichtung erhöht werden soll.

Das zu behandelnde Substrat wurde in ein Bad aus verdünnter Salzsäure (1 HCl : 5 H₂O) eingetaucht, dadurch sollte das natürliche Oxid gelöst werden. Um die nochmalige Bildung des nativen Oxides zu vermeiden, wird das Substrat nach dieser Prozedur möglichst schnell verwendet oder bei 90 °C bzw. 120 °C auf die Heizplatte gelegt, um zu verhindern, dass sich Wasser aus der Umgebungsluft auf dem Substrat niederschlägt.

Das Primern und die Behandlung der Substratoberfläche mit Salzsäure brachten keine sichtbaren Verbesserungen der Ergebnisse.

n-Octyltrichlorsilan-Beschichtung

Letztendlich konnte das Problem der Haftung mit einer n-Octyltrichlorsilan-Beschichtung gelöst werden. n-Octyltrichlorsilan bildet auf geeigneten Metalloberflächen einfache Monoschichten mit einer hohen inneren Ordnung. Chemisch betrachtet handelt es sich hierbei um eine Kondensationsreaktion auf der Substratoberfläche. Derartig behandelte Oberflächen sind ca. 1 nm dick, hydrophob und in Luft stabil. Unter Verwendung hydrophober Schichten (n-Octyltrichlorsilan) wurden die Adhäsionskräfte auf dem Stempel stark reduziert. Die Aufnahmen in Abbildung 58 zeigen Ausschnitte eines mit n-Octyltrichlorsilan beschichteten Stempels nach vier Prägungen ohne einen Zwischenreinigungsschritt.

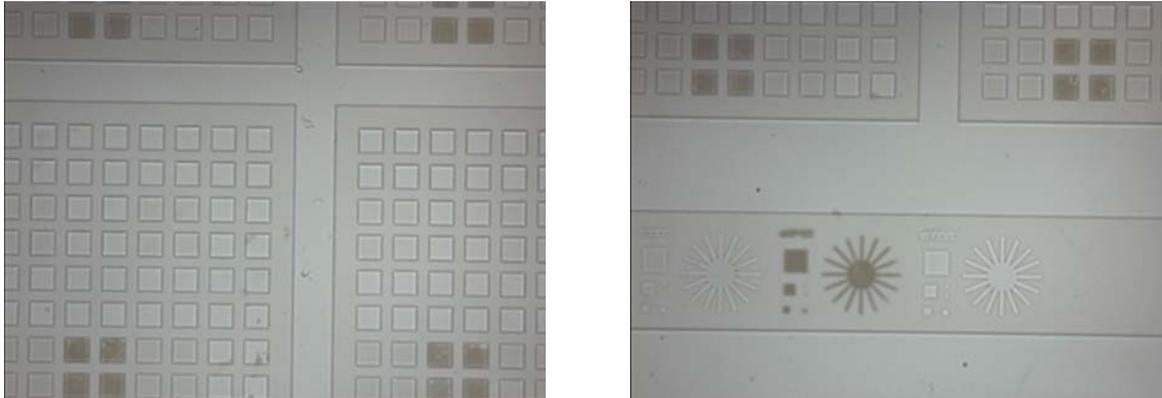


Abbildung 58: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines mit n-Octyltrichlorsilan beschichteten Stempels nach vier Prägungen ohne einen Zwischenreinigungsschritt. An den Bildern ist deutlich zu erkennen, dass keine Resistreste vorhanden sind.

Die Monolagenpräparation mit n-Octyltrichlorsilan erfolgte bei Raumtemperatur. Die Abscheidung von n-Octyltrichlorsilan geschieht durch Tauchen der Stempel in 0,2 mM toluolische Adsorbatlösung (1,4 µl n-Octyltrichlorsilan pro 30 ml Toluol; Wassergehalt des Toluols < 30 ppm) unter Inertbedingungen für 15–20 Stunden. Anschließend erfolgte gründliches Abspülen mit Toluol, bevor sie unter einem kräftigen Stickstoffstrom getrocknet wurden.

Auswertung

Tabelle 3: Tabelle zur Auswertung des UV-Prägen (UV imprint) im INA. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.

Parameter	UV-Prägen (UV imprint) im INA
Kontaktfläche	Zwischen ca. 20 % und ca. 50 %
Vollständigkeit	Circa 10 %
Lufteinschlüsse	Polymer auf dem Substrat: ca. 85 %; Polymer auf dem Stempel: ca. 30 %
Homogenität	Mittel bis schlecht

Die Auswertung der Prägeversuche am MA4 im INA ergaben die in Tabelle 3 zusammengestellten Ergebnisse. Die ausführlichen Optimierungen an dem Prägeprozess und der Anlage selbst führten zu einer signifikanten Verbesserung der Kontaktfläche zwischen Stempel und Substrat. Den größten Einfluss darauf hat die Wahl des Substrats, umso ebener es ist, umso größer ist die Kontaktfläche. An zweiter Stelle ist die Modifikation der Anlage zu sehen. Durch das Einbringen einer dünnen Folie wird das Durchbiegen des Substrats gewährleistet und so die Kontaktfläche erhöht. Die Vollständigkeit der Felder ist bei dieser Prägemethode nur zu ca. 10 % gegeben. Es gelang zwar, einzelne Mesen vollständig zu prägen, jedoch entstanden nur sehr wenige vollständige Felder, die zur

Herstellung eines Filterfeldes für den Demonstrator verwendet werden konnten. Positiv zu bewerten sind die Verbesserungen, die hinsichtlich der Lufteinschlüsse erzielt wurden. Durch das Aufbringen des Polymers direkt auf den Stempel füllten sich die Hohlräume und es gelang, Defekte durch Lufteinschlüsse deutlich zu verringern. Dies geschah aber auf Kosten der Polymerschichtdicke, die zunahm, und der Vollständigkeit, die durch Abrisse und durch das Kleben von Polymerresten am Stempel kleiner wurde. Die Homogenität lässt sich bei unvollständigen Prägungen mit vielen Defekten nur schwer bestimmen. Sie wird hier mit „mittel bis schlecht“ bewertet.

Trotz all der in diesem Abschnitt beschriebenen Bemühungen gelang es nicht, vollständige Prägungen zu generieren, die für die Herstellung eines Fabry-Pérot-Filterfeldes ausreichend wären.

6.3 UV-Prägen (UV imprint) bei SÜSS MicroTec in Garching

Die in Abschnitt 6.1 und 6.2 dargestellten Versuche erbrachten keine ausreichende Qualität der Prägungen, um zeigen zu können, dass es möglich ist, damit ein Fabry-Pérot-Filter-basiertes Nanospektrometer zu fertigen. Somit folgt der Schritt weg von umgebauten nicht professionellen Anlagen hin zu kommerziell erhältlichen Anlagen. In einer Kooperation mit der Firma SÜSS MicroTec aus Garching entstanden Prägungen, die letzten Endes aufgrund ihrer Qualität für die Applikation in Nanospektrometern verwendet werden konnten. Im folgenden Abschnitt werden die verwendeten Methoden und Prozesse erläutert, vom grundsätzlichen Prozess des Nanoimprints mittels MA6 über die nötigen Modifikationen für die vom INA verwendeten Stempel bis hin zu Stempelentwicklungen, mit denen der Prozess optimiert werden soll. Zum Schluss dieses Abschnittes werden die erzielten Ergebnisse vorgestellt.



Abbildung 59: MA6 – optimiert für UV-NIL [159].

Prägungen mit MA6 – der Prägeprozess

Der MA6 mit NIL-Tool ist für UV-Prägungen ausgelegt. Abbildung 59 zeigt eine baugleiche Maschine des Typs MA6. Der Prägeprozess an dem auf Nanoimprint umgerüsteten MA6 erfolgt in vier Schritten [159]. Voraussetzungen für eine erfolgreichen Prägung sind 1. ein geeigneter transparenter Stempel, 2. ein geeignetes Substrat, welches kompatibel zum Substrathalter ist, und 3. ein UV-aushärtendes Polymer als Prägematerial.



Abbildung 60: Chuck und Stempelhalter der MA6 [159]

Im ersten Prozessschritt wird der Probenhalter (Abbildung 60) mit dem mit Prägematerial beschichteten Substrat beladen. Ein Vakuum unter dem Substrat hält dieses während des gesamten Prägeprozesses an seiner Position. Abbildung 61 zeigt eine 3-D-Zeichnung des Probenhalters und des Stempelhalters im Querschnitt. Das Zusammenspiel dieser beiden Baugruppen ermöglicht im Wesentlichen die Prägung. Aus diesem Grund und um es überschaubar zu gestalten, wurden die Ansteuerelektronik, die mechanischen Komponenten und die Justageeinheiten nicht grafisch umgesetzt. Der Probenhalter ist ein bewegliches Teil, das sich während des Prägens nach oben verfahren lässt, um den Kontakt von Stempel und Substrat zu ermöglichen. Dabei ist es federnd auf drei Zylindern gelagert, um mögliche Verkippungen ausgleichen zu können. Dieser bewegliche Teil ist umgeben von einer starren Platte. In Abbildung 61 ist diese der untere Teil der Zeichnung. Die roten Dichtlippen ragen in dieser Phase des Prozesses nur ein wenig aus der Bodenfläche des Probenhalters heraus. Im oberen Teil der Zeichnung ist der Stempelhalter dargestellt. Er besteht aus einer massiven Metallplatte mit einer Aussparung in der Mitte. Auf der Oberseite befindet sich (da sie UV-transparent sein muss) eine festverschraubte Quarzglasplatte wie ein Fenster in dieser Aussparung. Auf der Unterseite der Aussparung wird der Stempel eingespannt. Dieser wird mittels eines Vakuums an seiner Position gehalten, das zwischen der oberen Quarzglasplatte und dem Stempel erzeugt wird. Ist der in der Zeichnung als runde Platte angedeutete Wafer in die Maschine eingelegt, ist sie bereit für den zweiten Schritt des Prägeprozesses [159].

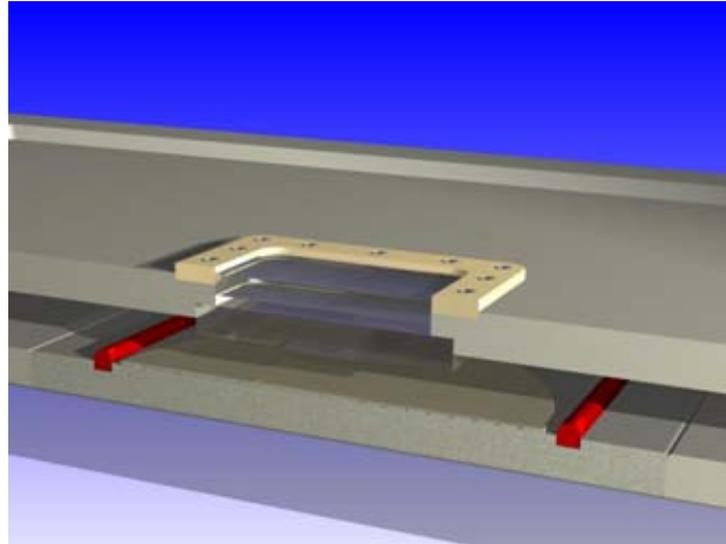


Abbildung 61: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der Chuck ist mit einem Wafer beladen und befindet sich in Ausgangsstellung für eine Prägung.

Im zweiten Schritt wird der Probenhalter nach oben verfahren. Diese Bewegung stoppt etwa $100\ \mu\text{m}$, bevor das mit Polymer beschichtete Substrat den Stempel berührt (Abbildung 62). In dieser Position erfolgt die Justierung des Substrats zum Stempel. Es wird zum einen ein Keilfehlerausgleich durchgeführt, welcher dafür sorgt, dass Substrat und Stempel parallel zueinander sind, und zum anderen wird das Substrat hinsichtlich seiner zu prägenden Strukturen zum Stempel hin ausgerichtet. Der Keilfehlerausgleich erfolgt, indem drei dünne Metallstreifen, an deren Ende drei kleine Metallkugeln befestigt sind, zwischen Substrat und Stempel bewegt werden. Der Probenhalter wird dann mit einem definierten Druck gegen die Kugeln, die am Stempel anliegen, gefahren. Durch die Verwendung der drei in einem Dreieck angeordneten Kugeln richtet sich nun der federnd gelagerte Probenhalter samt Substrat parallel zu dem Stempel aus. Diese Positionierung des Probenhalters wird im Folgenden mit einer Feststellbremse an jedem Zylinder fixiert. Erreicht der Probenhalter nach dem Durchführen des Keilfehlerausgleiches wieder die Grundposition von etwa $100\ \mu\text{m}$ zwischen Substrat und Stempel, folgt die laterale Ausrichtung des Substrates zum Stempel. Dies erfolgt über die Lithografieausrüstung des MA6, das Mikroskop und Mikrometerjustierschrauben. Für die in dieser Arbeit angestrebten Prägungen war nur eine grobe Justage vonnöten, da es sich um eine Einzelprägung handelt, die zu keiner anderen Struktur hin ausgerichtet werden musste. Aus diesem Grund wird auf ein genaueres Eingehen auf die vielfältigen Justiermöglichkeiten des MA6 hier verzichtet. Ist das Substrat ausreichend zum Stempel hin ausgerichtet, ist die Anlage bereit für den dritten, den eigentlichen Prägeschritt [159].

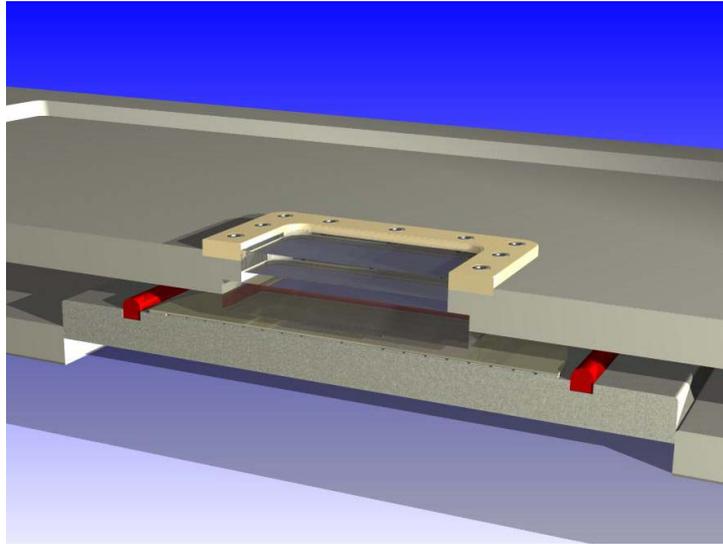


Abbildung 62: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der mit einem Wafer beladene Chuck ist nach oben gefahren, ca. 100 μm entfernt vom Stempel.

Im dritten Schritt erfolgt die eigentliche Prägung des Polymers. Bevor der Stempel in das Polymer gelassen wird, muss dafür gesorgt werden, dass keine Luft zwischen Stempel und Polymer befindet. Dies führt zu Lufteinschlüssen, die besonders oft in Vertiefungen im Stempel auftreten. Aus diesem Grund wird zwischen Stempel und Polymer ein Vakuum geschaffen. Dazu werden die in Abbildung 63 zu erkennenden roten Dichtlippen mit Pressluft gefüllt und blasen sich so auf, dass sie den Abstand zwischen Stempelhalter und Probenhalter überspannen. Die so entstandene Kammer zwischen den beiden Bauteilen wird evakuiert. Je besser das so entstandene Vakuum ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit von Lufteinschlüssen in der fertigen Prägung.

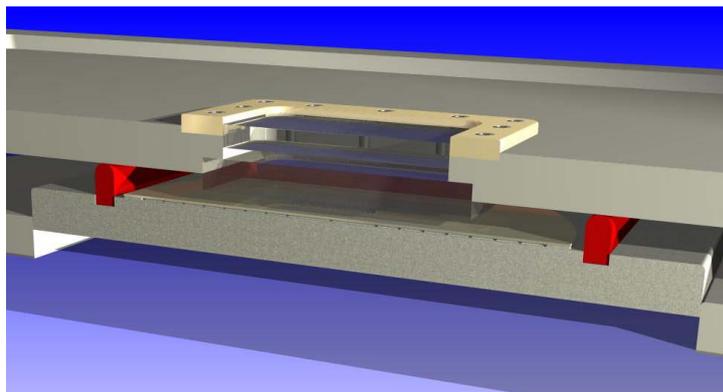


Abbildung 63: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Die Dichtlippen, die sich im Chuck befindlichen werden aufgeblasen um ein Vakuum zwischen Stempel und Wafer zu ermöglichen.

Des Weiteren wird dieses Vakuum genutzt, um den Stempel mit einer definierten Kraft möglichst gleichmäßig in das Polymer zu ziehen. Dazu wird das Vakuum zwischen Stempel und oberem Quarzglas mit Atmosphärenluft geflutet und so die Verbindung des Stempels zum Stempelhalter gelöst. Der Stempel gleitet in seiner seitlichen Führung die etwa 100 μm

hinunter und beginnt das weiche Polymer zu verformen (Abbildung 64). Ist die Verformung vollständig beendet, was stark von dem verwendeten Polymer und dessen Viskosität abhängt, wird das Polymer durch UV-Bestrahlung ausgehärtet. Hierfür kommt die auch für die Lithografie eingesetzte Quecksilber-UV-Lampe des MA6 zum Einsatz. Die gewählte Belichtungszeit und Intensität hängt von dem verwendeten Prägematerial ab. Nach vollständiger Aushärtung des Materials folgt der letzte Schritt im Prägeprozess mit dem MA6, das Trennen der Prägung vom Stempel [159].

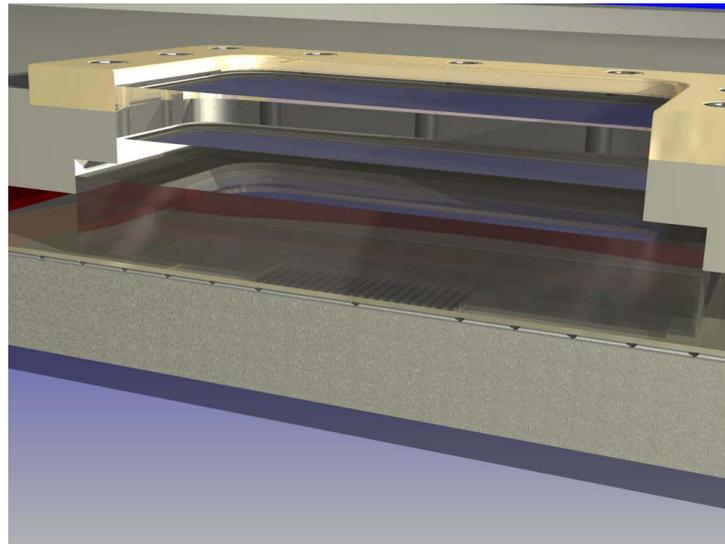


Abbildung 64: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der Stempel wird in das, auf dem Wafer befindliche Material gedrückt.

Im vierten Schritt wird die Prägung vom Stempel getrennt. Hierbei ist es besonders wichtig, dass weder Abrisse noch Verwischungen auftreten. Aus diesem Grund wird der Stempel senkrecht aus dem Polymer gezogen. Dazu wird das Vakuum in der Kammer zwischen dem Substrathalter und dem Stempelhalter geflutet und im Anschluss das Vakuum zwischen Stempel und oberer Quarzplatte wieder hergestellt. Dadurch bewegt sich der Stempel die etwa 100 μm wieder nach oben und hinterlässt die Prägung auf dem Substrat. Dieses kann nach dem Herunterfahren des Substrathalters entnommen werden (Abbildung 65) [159].

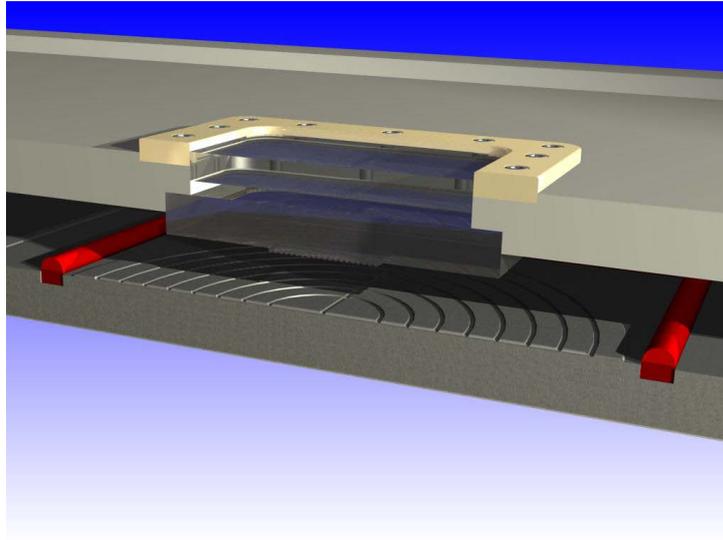


Abbildung 65: 3D CAD Zeichnung des Chuckes und des Stempelhalters. Der Chuck befindet sich wieder in Ausgangsposition und der geprägte Wafer wurde entnommen.

Modifikationen am MA6, um opake Stempel nutzen zu können

Die Voraussetzungen, waren bei den ersten Versuchsreihen nicht erfüllt. Es standen nur opake Stempel zur Verfügung und die Substrate waren nicht kompatibel mit dem Substrathalter. Aufgrund dieser Ausgangssituation und der Tatsache, dass der MA6 keinen großen Umbauten unterzogen werden konnte, entstanden die Ergebnisse unter schwierigen Umständen. Die entwickelte Lösung zum Prägen mit dem opaken INA-Stempel besteht darin, die Position des Stempels und des Substrates innerhalb der Maschine zu tauschen, was einem Belichten von der Rückseite gleichkommt.

Der opake INA-Stempel mit einer Größe von etwa 1" x 1" wird auf einen 4"-Wafer geklebt und mit diesem auf dem unteren Probenhalter mittels Vakuum fixiert. Das Substrat, ein Glassubstrat mit einer Größe von genau 1" x 1", wurde auf einen Quarzblock in der Größe eines UV-transparenten Stempels geklebt und konnte somit in den oberen Stempelhalter eingelegt werden.

Bei diesem Versuchsaufbau besteht das größte Problem im Kleben des Stempels auf dem Wafer und dem Substrat auf dem Quarzblock. Es muss gewährleistet sein, dass sowohl der Stempel wie auch das Substrat absolut parallel zu ihren jeweiligen Untergründen sind. Dies ist äußerst schwierig. Der Klebevorgang besteht im Wesentlichen darin, ein Harz (Crystalbond 509) zum Schmelzen zu bringen und die zu klebenden Teile per Hand aufeinander zu setzen. Durch die gegebene Viskosität des Klebers entsteht eine bestimmte Höhe des Klebers auf der Unterlage. Das gleichmäßige Eindrücken des Stempels bzw. des Glassubstrates ist so nahezu unmöglich. Aufgrund dieser äußerst ungünstigen Ausgangssituation konnte selbst der hervorragende Keilfehlerausgleich des MA6 nicht mehr dafür sorgen, dass eine vollkommen flächige Prägung erzeugt werden konnte.

Ergebnisse mit den opaken Stempeln

Trotz dieser Probleme sind die erzielten Ergebnisse besser als die zuvor vorgestellten des Heiß- bzw. UV-Prägens am MA4.

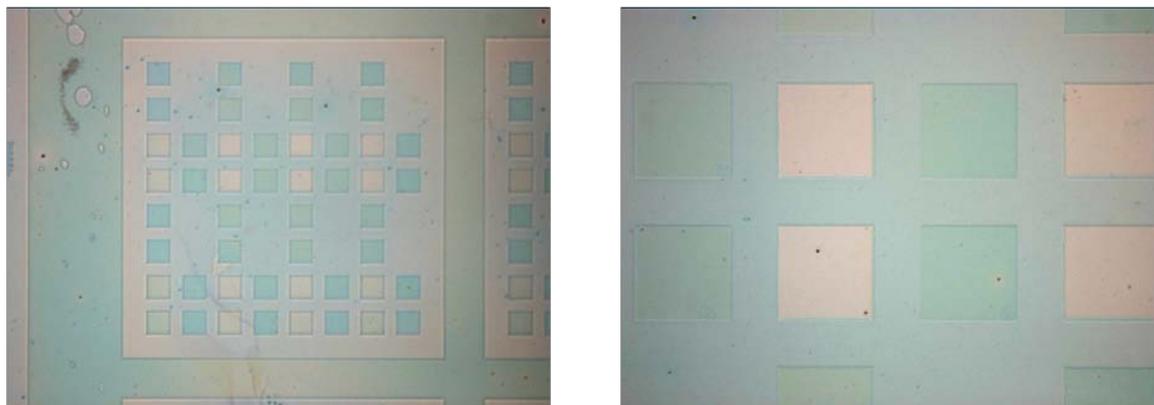


Abbildung 66: Imprint-Ergebnisse in 5-facher (links) und 20-facher (rechts) Vergrößerung. Mesagröße: 100 μm ; Abstand zwischen den Mesen: 50 μm ; Resist: mr-UVcur06.

Abbildung 66 zeigt zwei Lichtbild-Mikroskop-Aufnahmen der geprägten Flächen. Es sind deutlich die gewünschten verschiedenen Höhen anhand der unterschiedlichen Farben zu erkennen. Lufteinschlüsse im Polymer wie beim Prägen mittels MA4 (vgl. 6.2) sind dank des Vakuums zwischen dem Stempel und dem Polymer nur wenig aufgetreten.

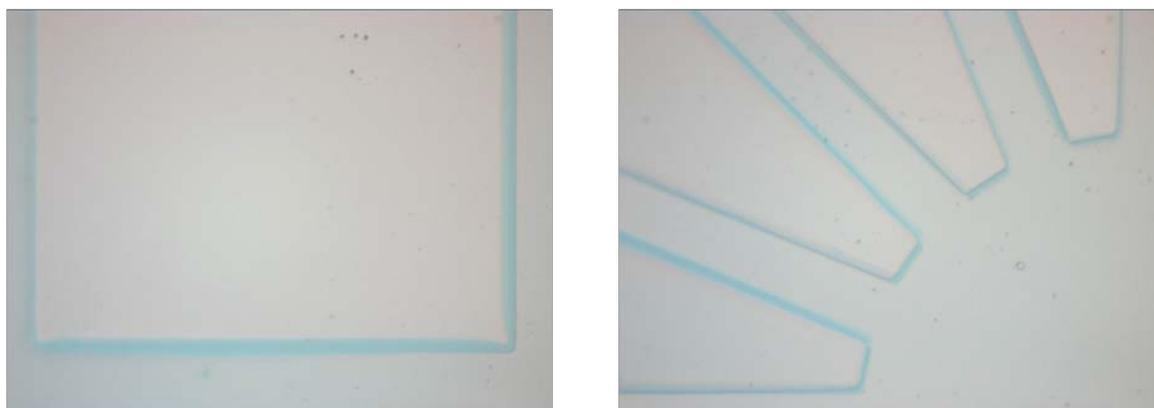


Abbildung 67: Imprint-Ergebnisse in 100-facher (links und rechts) Vergrößerung. Mesagröße: 100 μm ; Resist: mr-UVcur06.

Bei hoher Vergrößerung der einzelnen Strukturen, wie sie in Abbildung 67 zu sehen sind, lassen sich die scharfen Kanten der Prägungen erkennen. Der leicht bläuliche Bereich zwischen der exakten Kante und der Mesafläche deutet auf eine Abrundung hin und resultiert vorwiegend aus dem Herstellungsverfahren des Stempels, d.h., diese Formen sind schon im Stempel vorhanden, und zusätzlich aus dem Schrumpfen des Materials um 4 – 5%.

Auswertung

Tabelle 4: Tabelle zur Auswertung des UV-Prägen (UV imprint) bei SÜSS MicroTec in Garching. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.

Parameter	UV-Prägen (UV imprint) bei SÜSS MicroTec in Garching
Kontaktfläche	Mehr als 50 %
Vollständigkeit	Circa 40 % – 50 %
Lufteinschlüsse	Circa 20 %
Homogenität	Mittel

Die Verwendung einer kommerziell erhältlichen Nanoimprint-Anlage, selbst mit opaken Stempeln und nicht kompatiblen Substraten, führt zu einer Verbesserung der Prägen im Vergleich zu Eigen- und Umbauten von Anlagen (Tabelle 4). Die bereits erwähnten Probleme des Klebens des Stempels und der Substrate sowie die daraus resultierende Verkipfung der beiden zueinander führten zu einer Kontaktfläche von nur etwas über 50 %. Dies stellt eine Verbesserung dar, ist aber gemessen an den Möglichkeiten der Anlage laut Hersteller zu wenig. Die Vollständigkeit der Felder nach den Prägen liegt bei dieser Versuchsreihe bei etwa 40 % bis 50 % und die Luftporen ließen sich durch das erzeugte Vakuum während des Prägens auf nur ca. 20 % reduzieren. Die Homogenität wird mit „mittel“ bewertet und resultiert auch aus den nicht zu vermeidenden Verkipfungen, die während des Klebens entstehen.

Wegen der genannten Probleme bei den Prägeversuchen mit opaken Stempeln können mit dieser Methode keine flächigen Prägen in Substratgröße erzielt und somit auch keine kompletten Filter hergestellt werden.

Glasstempel-Prägen am MA6

Da die erreichten Ergebnisse unter Verwendung eines opaken Stempels und des MA6 nicht zufriedenstellend waren, wurde ein transparenter Stempel entwickelt. Diese Entwicklung wurde von Herrn Dr. Bartels und Herrn Wang am INA übernommen (vgl. hierzu Kapitel 4.4.1). Beide waren schon sehr erfolgreich bei der Herstellung der opaken Stempel.

Der entwickelte Stempel erfüllt die Anforderungen an Stempel für den MA6, d.h., seine Abmaße sind so gewählt, dass der Stempelhalter des MA6 ihn aufnehmen kann. Damit ist es möglich, die Anlage in ihrem bestimmungsgemäßen Prozessablauf zu betreiben. Der Stempel besteht aus einem Quarzglas, um für das zur Belichtung benötigte UV-Licht durchlässig zu sein, und hat eine 1" x 1" große strukturierte Fläche in der Mitte, die als aktive Fläche bezeichnet wird. Abbildung 68 zeigt eine WLI-Messung des verwendeten Stempels. Auf der linken Aufnahme ist die topologische Ansicht des Stempels zu sehen, in der verschiedene Farben verschiedene Höhen repräsentieren. Bei der Vermessung von

transparenten Stempeln unter dem WLI ist es nötig, eine reflektierende Schicht auf den Stempel aufzubringen, in diesem Fall Aluminium. Diese dünne Schicht kann zu Abrundungen von Kanten und bei einer inhomogenen Deposition auch zu leichten Inhomogenitäten an der Stempeloberfläche führen. Auf der rechten Seite von Abbildung 68 ist die 3-D-Rekonstruktion der Messdaten zu sehen.

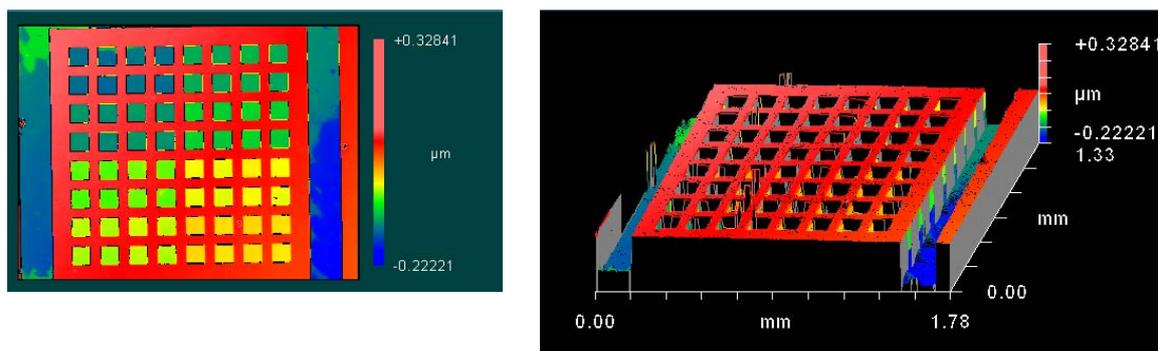


Abbildung 68: WLI-Messung des verwendeten transparenten Stempels.

Als Prägematerial wurde das Polymer mr-UVCur06 verwendet. Durch die Verwendung eines passenden Stempels ist es nicht mehr nötig, den Prozess umzukehren. Dennoch musste eine Lösung für die Fixierung des zu prägenden Substrates gefunden werden. Der Probenhalter ist nicht in der Lage, 1" x 1" große Substrate sicher zu halten. Die praktizierte Lösung bestand in der Verwendung von „Dicingfolie“. Diese spezielle Folie findet Verwendung bei Prozessen, bei denen kleinste Bauteile aus einem Wafer heraus vereinzelt werden. Sie ist reinraumtauglich und hat eine selbstklebende Seite. Eine solche Folie wurde modelliert und kann als Adapter zwischen den Vakuumeinlässen des Probenhalters und des Substrates dienen, indem sie die Vakuumkanäle abdeckt und die selbstklebende Seite das Substrat hält.

Eine Auswahl an erzielten Prägungen ist in Abbildung 69 und Abbildung 70 gegeben. Durch die Entwicklung des transparenten Stempels und der präzisen Fixierung der Substrate mittels Folie wurden nahezu Vollprägungen erzielt, d.h., die gesamte aktive Fläche des Stempels ist in das Prägematerial übertragen worden. Lediglich an den Rändern fehlen Strukturen, die aber aus Herstellungsgründen des Stempels keinerlei Wichtigkeit für die Applikation besitzen. Auf der linken und rechten Seite der Abbildung 69 sind deutlich die geprägten 64 Felder zu sehen. Jedes dieser Felder ist dazu bestimmt, eine Kavität eines Fabry-Pérot-Filters zu sein. Aus zeitlichen und Kostengründen wurden diese Prägungen mit einem Stempel geprägt, welcher nur 16 unterschiedliche Höhen aufweist. Dennoch sind sogar unter dem Lichtmikroskop die verschiedenen Höhen zu erkennen. Bei den schwarzen Flecken zwischen den Strukturen handelt es sich um ungewollte Partikel. Diese können z. B. schon während des Prägens sich entweder auf dem Stempel oder auf dem belackten Substrat befunden haben, im Lack selbst vorhanden sein, beim Aufschleudern eingebracht werden oder durch die Luft auf den Lack schweben. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Ursachen gilt es, bei jeder Prägung äußerste Vorsicht walten zu lassen und vom ersten bis zum letzten Prozessschritt auf eine hohe Partikelfreiheit zu achten. Auf der rechten Seite der

Abbildung 69 sind die Auswirkungen eines Partikels, welches nicht viel größer als $10\ \mu\text{m}$ ist, deutlich zu sehen. Um das Partikel herum verändert sich die Farbe unter dem Mikroskop, was auf eine Veränderung der Höhe schließen lässt. Die Erfahrung zeigte, dass der Radius einer solchen Störstelle maßgeblich von der Größe der Partikel und der Schichtdicke des zu prägenden Materials abhängt. Je kleiner ein Partikel ist, desto kleiner ist die verursachte Störstelle und je dicker die Schicht, umso eher verschwindet das gesamte Partikel in ihr und begrenzt so die Störstelle auf sich selbst. Ähnliche Ergebnisse sind auch aus der Literatur bekannt [167], [168].

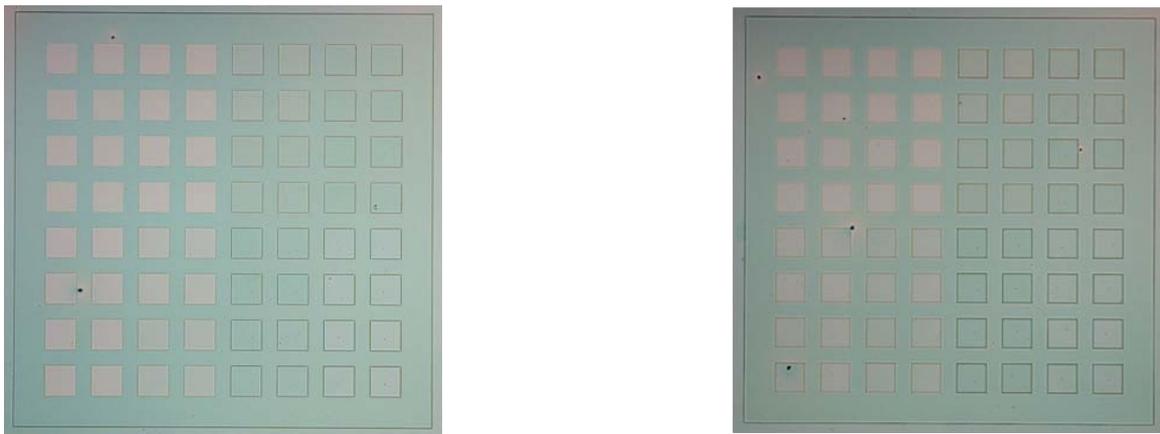


Abbildung 69: Imprintergebnisse, betrachtet in 5facher Vergrößerung durch ein Lichtmikroskop.

Um die erzeugten Prägungen im Detail zu bewerten, sind in Abbildung 70 drei Aufnahmen mit einer höheren Auflösung des Lichtmikroskopes gezeigt. Die Aufnahme links wurde mit einer 20-fachen Vergrößerung aufgenommen, die beiden anderen mit einer 50-fachen Vergrößerung. Das bläuliche Erscheinungsbild der Aufnahmen wurde durch spezielle Filtereinstellungen am Mikroskop hervorgerufen, die für ein plastischeres Aussehen der Strukturen sorgen. Die erzielten Prägungen sehen auch bei einer 20-fachen Vergrößerung noch homogen und, vor allem in den Mesen, glatt aus. Auf den Aufnahmen mit einer 50-fachen Vergrößerung sind deutlich Abstufungen an den Kanten zu erkennen. Diese sind eine Replikation der Abstufungen im Stempel, die während der Herstellung des Stempels durch Justagefehler erzeugt wurden. Die Justagegenauigkeit des zur Herstellung der Ätzmasken für den Stempel verwendeten MA4 liegt bei ca. $0,5 - 1\ \mu\text{m}$ und ist zusätzlich stark vom Benutzer abhängig.



Abbildung 70: Imprintergebnisse, betrachtet in 20 und 50facher Vergrößerung durch ein Lichtmikroskop.

Teile der in der Versuchsreihe verwendeten Substrate waren zuvor mit einem DBR beschichtet worden, um sie im Anschluss an die Prägungen mit einem oberen DBR zu einem Fabry-Pérot-Filterfeld kombinieren zu können. Dies soll Aufschluss darüber geben, ob die Prägungen nicht nur unter dem Mikroskop homogen und für die Applikation brauchbar aussehen, sondern ob ihre optischen Eigenschaften den Einsatz als Kavität eines Fabry-Pérot-Filters wirklich zulassen. Zu diesem Zweck wurden die mit oberen und unteren DBR ausgestatteten Proben bei der Firma OPN vermessen. Die OPN ist im Besitz eines wie in Abschnitt 5.3 beschriebenen Messaufbaus mit der dazugehörigen Software. Abbildung 71 zeigt eine Messung bei einer eingestrahlten Lichtwellenlänge von 466 nm. Zu sehen ist die Intensitätsverteilung in den verschiedenen Filterfeldern. Je heller ein Feld ist, desto höher die Intensität des Lichts mit der Wellenlänge 466 nm. Die Auswertung der Proben ergab eine hohe Homogenität der Felder für sich. Jedoch zeigte sich auch bei einigen Messungen, dass die Gesamtprägung einen Keilfehler haben kann oder Licht den Filter an Stellen passieren kann, an denen es nach dem Design reflektiert werden sollte.

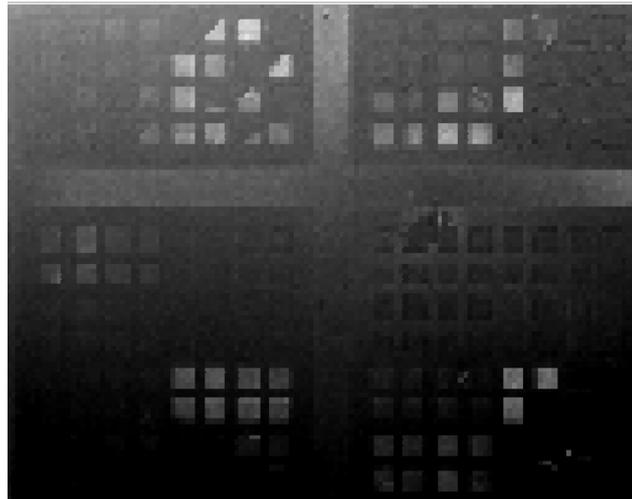


Abbildung 71: Messergebnis eines FP-Filterfeldes mittels temporären Messaufbaus bei 466nm.

Die Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe mit einem transparenten zur Anlage passenden Stempel sollten der Evaluierung dienen, ob sich eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Kontaktfläche zwischen Stempel und Substrat bzw. Polymer, der Homogenität der Gesamtprägung und der Vollständigkeit der Prägung nach dem Trennen von Stempel und Substrat ergibt.

Auswertung

Tabelle 5: Tabelle zur Auswertung der Glasstempel-Prägungen am MA6. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.

Parameter	Glasstempel-Prägungen am MA6
Kontaktfläche	Mehr als 80 %
Vollständigkeit	Circa 80 %
Lufteinschlüsse	Unter 10 %
Homogenität	Gut

Kontaktfläche

Die Kontaktfläche des Stempels auf dem Substrat hat sich, ohne eine genau Messung der Fläche vorgenommen zu haben, fast verdoppelt. Dieser signifikante Zuwachs an Kontaktfläche im Vergleich zu Prägungen am MA4 oder am MA6 mit opaken Stempeln reichte aus, um ohne eine genaue Quantifizierung der Flächen zu dem Schluss zu kommen, dass die Nutzung der Anlage MA6 gemäß den Herstellerangaben im Bezug auf die Stempelwahl von Vorteil ist. Durch die Verwendung der „Dicingfolie“ als Unterlage ist noch eine Komponente nicht so, wie der Hersteller es vorgibt. Durch die Verwendung von 1" x 1" großen Substraten ist es jedoch nicht möglich, ohne einen speziellen Probenhalter zu konzipieren, dieses Problem in vergleichbarer Form wie bei der Verwendung von 4" – 6"-Wafern zu lösen. Somit besteht an dieser Stelle noch Potenzial, die Kontaktfläche zu verbessern, was einer Vergrößerung entspräche.

Trennen von Stempel und Substrat

Bei der Trennung von Stempel und Substrat gab es bei den zuvor durchlaufenen Versuchsreihen an der Heißpräganlage in Braunschweig, am MA4 und am MA6 mit opaken Stempeln massive Probleme. Polymerreste blieben nach der Trennung am Stempel hängen, es entstanden Abrisse in der Prägung. Dieses Phänomen konnte bei der Nutzung eines Quarzstempels nicht mehr beobachtet werden.

Homogenität der Gesamtprägung

Die Homogenität der Gesamtprägung war im Vergleich zu den vorherigen Prägeversuchen gegeben. Sie hängt im Wesentlichen von dem durchgeführten Keilfehlerausgleich ab, der mit einem Stempel an der richtigen Position in der Maschine weitaus effizienter ist. Bei Prägungen, bei denen die Substrate 4"-Wafer sind, wird der Keilfehlerausgleich durch die drei an dünnen Stäbchen befestigten Kugeln zwischen Wafer und Stempel durchgeführt. In den hier beschriebenen Ergebnissen war dies jedoch nicht möglich, da keine feste Fläche

wie ein Wafer auf dem Probenhalter befand. Die „Dicingfolie“ über den Vakuumkanälen bot keine definierte und konstante Fläche, zu der sich der Probenhalter im Bezug auf den Stempel ausrichten konnte. Die Lösung dieses Problems erfolgte durch den direkten Kontakt des Stempels mit einer Dummy-Probe, bei der der Keilfehlerausgleich durchgeführt wurde. Die Position des Probenhalters wurde durch die Feststellbremsen fixiert und die Dummy-Probe gegen die belackte Probe ausgetauscht. Auf diese Weise erhöhte sich die Homogenität der Prägung, mit der hier auch ein Gesamtverkippfen des Stempels über die gesamte Prägung hinweg gemeint ist.

Optische Messung bei OPN

Die optischen Messungen bei der Firma OPN erfolgten an dem applikationsnahen Messplatz, wie er in Abschnitt 5.3 dargestellt ist. Die Verwendung dieses Messaufbaus diente dabei nicht allein dem Vermessen der Filter als solcher, sondern stellte auch einen Test der Software für die späteren Applikationen da. Hier soll es jedoch genügen, eine Auswertung der optischen Messung zu durchzuführen. Wie bereits erwähnt, zeigt Abbildung 71 das während der Messung aufgenommene Kamerabild der Filterfelder. Helle Stellen bedeuten dabei eine hohe Intensität des transmittierten Lichtes der spezifischen Wellenlänge, in diesem Fall 466 nm. Es konnte anhand dieser Messungen gezeigt werden, dass es je nach eingestrahelter Wellenlänge unterschiedliche Mesen gibt, die das Licht transmittieren, und dass es einen großen Bereich gibt (den Rest des Feldes), in dem kein Licht dieser Wellenlänge den Sensor der Kamera erreicht, sondern dieses vom Filterfeld reflektiert wird. Abhängig von der eingestrahelten Lichtwellenlänge waren die erreichten Ergebnisse jedoch stark unterschiedlich. So wurden auch Messungen durchgeführt, bei denen Licht fast überall durch den Filter gelangte, und dies in einer inhomogenen Verteilung.

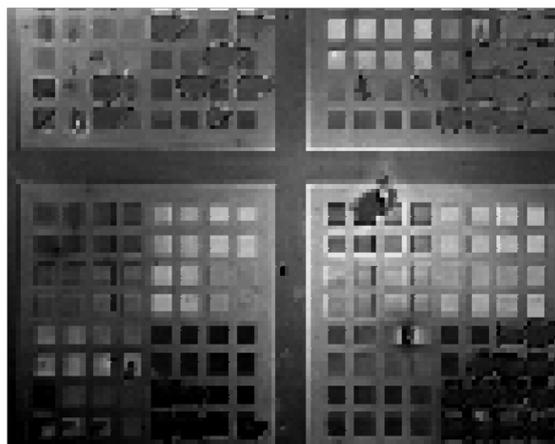


Abbildung 72: Messergebnis eines FP-Filterfeldes mittels temporären Messaufbaus bei.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 72 eine Aufnahme einer solchen Messung. Es lässt sich immer noch erkennen, dass manche Bereiche, insbesondere einzelne Mesen, heller sind, jedoch scheint das gesamte Filterfeld durchlässiger für diese Wellenlänge zu sein. Dennoch

lässt sich aus diesen Ergebnissen schließen, dass die Herstellung von Fabry-Pérot-Filtern als Felder mittels Nanoimprint möglich ist.

Die Betrachtung der erreichten Verbesserungen hinsichtlich der Prägungen durch die Verwendung eines transparenten Stempels, der den Anforderungen des verwendeten MA6 genügt, zeigt deutlich, dass eine kommerzielle Lösung des Nanoimprints mit einer für diese Technologie entwickelten Anlage signifikante Unterschiede in der Prägequalität bringt. Die Kontaktfläche zwischen Stempel und Substrat, die Homogenität der Gesamtprägung und die Vollständigkeit der Prägungen haben wesentlich zugenommen. Die erhöhte Qualität der Prägungen bezüglich der Verwendung als Kavität eines Filters ließen die Herstellung erster vollständiger Filterfelder zu. Da diese Versuchsreihe eigentlich dazu diente, die richtige Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, lag der Fokus der Messungen und Analysen noch nicht auf der optischen Auswertung der vollständigen Filterfelder.

6.4 Prägungen mit dem MA6 für den Spektrometer-Demonstrator

Mit dem Fokus auf den optischen Eigenschaften wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Ziel dieser Reihe war es, einen Demonstrator zu schaffen, mit dem gezeigt werden kann, dass es möglich ist, ein Nanospektrometer auf Basis eines Fabry-Pérot-Filterfeldes herzustellen, bei dem die Kavitäten der einzelnen Filter mittels Nanoimprint erzeugt werden. Dazu wurden unterschiedliche Spiegel auf 1" x 1" große Substraten deponiert. Etwa die Hälfte der Substrate wurde mit einem in der IBSD hergestellten Spiegel versehen, was in diesem Zusammenhang eine Neuheit darstellt. Diese Spiegel bestehen aus 5,5 Perioden SiO_2/TiO und weisen durch den hohen Brechungsindexkontrast der beiden Materialien ein breites Stopband auf. Für die Herstellung eines Fabry-Pérot-Filterfeldes ist dies grundsätzlich von Vorteil (ohne Beachtung der Tatsache, dass die FSR kleiner sein kann als das Stopband). Die andere Hälfte wurde wie bereits die Substrate der vorangegangenen Versuche mit Spiegeln, hergestellt in der PECVD, versehen.

Zusätzlich wurde ein neues Prägematerial verwendet. Es handelt sich dabei um das Nachfolgeprodukt des mr-UVCur06. Dieses Prägematerial, mr-UVCur21, zeigte verbesserte Eigenschaften hinsichtlich der Prozessierung am MA6. Zu beachten ist: Dieses Polymer kann nur in einer sauerstoffleeren oder sehr sauerstoffarmen Atmosphäre aushärten. In einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre reagiert der Sauerstoff mit den Fotoinitiatoren und verhindert so die Aushärtung durch UV-Bestrahlung.

Aufgrund der hervorragenden Ergebnisse bezüglich des Nanoimprints der letzten Versuchsreihe erfolgten die Prägungen auf gleiche Weise wie bereits beschrieben.

Ergebnisse

Die Versuchsreihe zum Erzeugen von Kavitätsstrukturen durch Prägen ist ein großer Erfolg. Durch die zuvor gewonnenen Erkenntnisse und die Verwendung des neuen Polymers mr-UVCur21 entstanden qualitativ hochwertige Prägungen. Die Qualität bezieht sich dabei auf die Vollständigkeit, die Homogenität und die geprägte Fläche als Ganzes. Kritisch zu betrachten sind immer noch Luftpfeinschlüsse in den Kavitäten, die nicht zu einhundert

Prozent vermieden werden konnten. Eine genauere Analyse wird an einigen ausgewählten Prägungen und schließlich Filterfeldern im Folgenden vorgenommen.

Zur weiteren Analyse wurden Proben herangezogen, die augenscheinlich ein hohes Potenzial besitzen, um als fertiger Demonstrator die Tauglichkeit des in dieser Arbeit vorgestellten Konzepts zu untermauern. In Abbildung 73 sind schon unter dem Mikroskop die verschiedenen Färbungen der einzelnen Mesen zu erkennen, die auf die verschiedenen Höhen dieser Flächen hinweisen. Zu erkennen ist die vollständige Abformung der beiden Filterfelder, wie sie gewünscht ist. Lediglich kleine Defekte lassen sich erkennen. So sind in der linken Aufnahme Lufteinschlüsse in drei Kavitäten zu erkennen. Die rechte Seite zeigt ebenfalls kleinste Lufteinschlüsse am rechten Rand. Diese vereinzelt auftretenden Einschlüsse von Restluft in der Vakuumkammer während des Prägens lassen sich nur schwer vermeiden und treten bei Prägungen, bei denen der Stempel Vertiefungen wie der hier verwendete hat, eher auf. Eine genaue Untersuchung dieser Prägungen fand unter dem WLI statt.

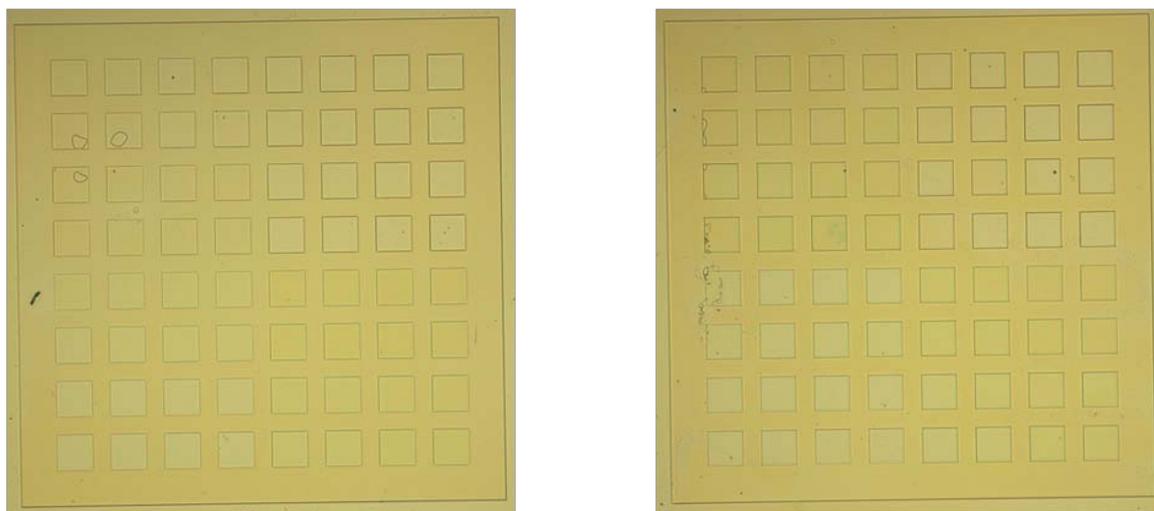


Abbildung 73: Lichtmikroskopaufnahmen der Demonstratorprägungen.

Abbildung 74 zeigt die WLI-Messergebnisse der in Abbildung 73 links gezeigten Mikroskopaufnahme. Wieder zu erkennen sind die drei Lufteinschlüsse in den linken oberen Feldern. Unterschiedliche Farben symbolisieren unterschiedliche Höhen, welche auf der rechten Seite der Abbildung 74 zu einem 3-D-Modell berechnet wurden. Auf dieser Ansicht lassen sich sehr gut die verschiedenen Höhen der einzelnen Kavitäten erkennen. Auf eine Vermessung der einzelnen exakten Höhen kann hier verzichtet werden, da das maßgebliche Interesse dieser Versuchsreihe in der Erstellung eines Demonstrators liegt, bei dem es noch nicht ausschlaggebend ist, welche exakten Höhen die Mesen haben respektive welche Wellenlänge durch welche Mesa transmittiert wird.

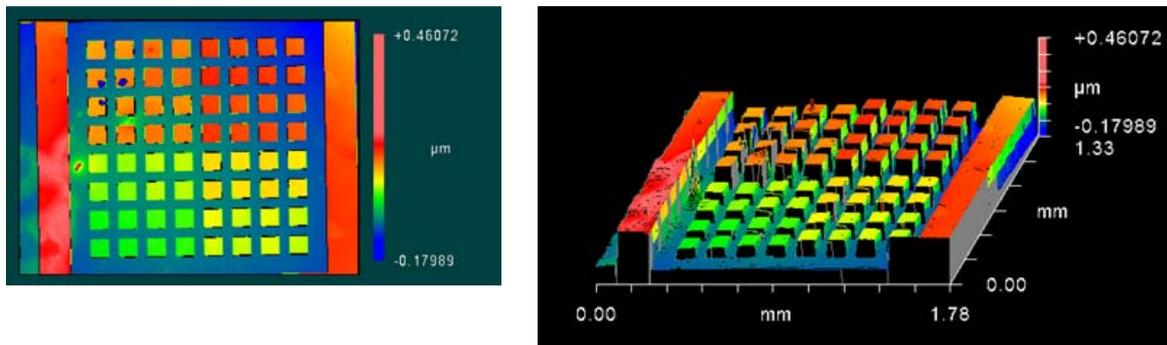


Abbildung 74: WLI-Aufnahmen der Demonstratorprägung.

Eine detailliertere Messung am WLI zeigt Abbildung 75. Es ist ein Ausschnitt des Filterfeldes zu sehen. Die einzelnen Mesen zeigen ein perfektes, im Sinne von „gewünschtes“, Erscheinungsbild nach ihrer Prägung. Sie besitzen eine homogene Oberfläche und keinerlei Lufteinschlüsse. Die unterschiedlichen Farben zeugen von ihren unterschiedlichen Höhen, welche im fertigen Demonstrator für die Transmission von unterschiedlichen Lichtwellenlängen sorgen.

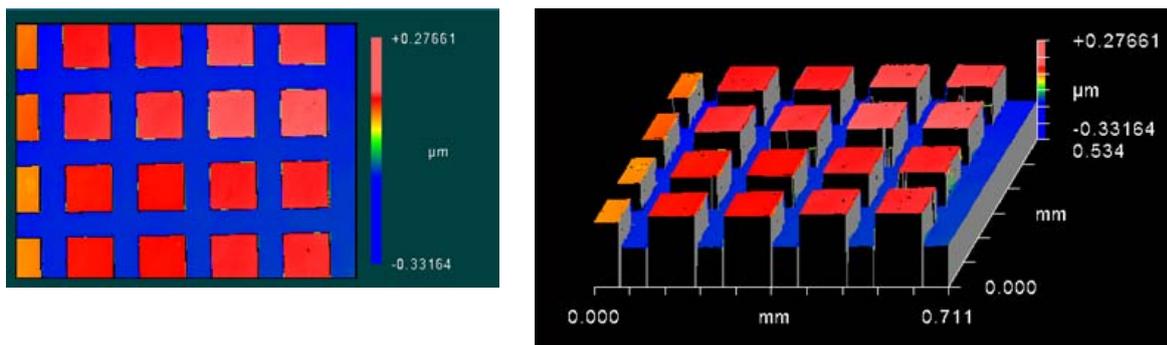


Abbildung 75: Detaillierte WLI-Aufnahme der Demonstratorprägung.

Auswertung

Tabelle 6: Tabelle zur Auswertung der Prägungen mit dem MA6 für den Spektrometer-Demonstrator. Dargestellt sind die für diese Arbeit wesentlichen Parameter, um eine Nanoimprint-Technologie zu evaluieren, die zur Herstellung eines auf Fabry-Pérot-Filtern basierenden Nanospektrometers geeignet ist.

Parameter	Prägungen mit dem MA6 für den Spektrometer-Demonstrator
Kontaktfläche	Mehr als 80 %
Vollständigkeit	Circa 80 %
Lufteinschlüsse	Unter 10 %
Homogenität	Sehr gut bis gut

Ziel dieser Versuchsreihe war es, mit Fokus auf der Verwendung der Proben als späterer Demonstrator die zuvor vorgestellten erfolgreichen Prägungen zu reproduzieren. Dies gelang selbst unter Verwendung neuerer Stempel und neuerer Prägematerialien. Beleg dafür sind die in Tabelle 6 zusammengefassten Ergebnisse. Die Kontaktfläche konnte ebenso wie die Vollständigkeit in gleicher Weise wieder erreicht werden. Es gelang nicht, eine vollständige Reduktion der Lufteinschlüsse auf 0 % zu erreichen, sodass sich auch diese Ergebnisse mit den Ergebnissen, die bereits erreicht wurden, decken. Eine Verbesserung gelang jedoch bei der Homogenität der Prägungen. Dies liegt an dem Stempel oder dem Prägematerial und dessen Fließverhalten.

Die Qualität hinsichtlich der untersuchten Parameter der in dieser Versuchsreihe erreichten Ergebnisse ist hoch genug, um sie als Filterfelder für den Demonstrator zu nutzen.

6.5 Auswertung aller Prägeversuchsreihen

Die experimentellen Untersuchungen zum Nanoimprint als Herstellungstechnologie für Kavitäten in einem Fabry-Pérot-Filterfeld wurden zur abschließenden Auswertung ihrer Eignung in Tabelle 7 zusammengestellt. Ziel hierbei ist es, durch den Vergleich der Prägeergebnisse zu evaluieren, welche der untersuchten Methoden die Anforderungen am besten erfüllt. Die Anforderungen an die Prägungen sind eine große Kontaktfläche, möglichst vollständige Strukturen, wenig Lufteinschlüsse und eine hohe Homogenität.

Parameter	Heißpräge	UV-Prägen (UV imprint) im INA	UV-Prägen (UV imprint) bei SÜSS MicroTec in Garching	Glasstempel-Prägungen am MA6	Prägungen mit dem MA6 für den Spektrometer-Demonstrator
Kontaktfläche	Etwa zu 20 %	Zwischen ca. 20 % und ca. 50 %	Mehr als 50 %	Mehr als 80 %	Mehr als 80 %
Vollständigkeit	0 %	Circa 10 %	Circa 40 % – 50 %	Circa 80 %	Circa 80 %
Lufteneinschlüsse	Keine Aussage möglich	Polymer auf dem Substrat: ca. 85 %; Polymer auf dem Stempel: ca. 30 %	Circa 20 %	Unter 10 %	Unter 10 %
Homogenität	Sehr schlecht	Mittel bis schlecht	Mittel	Gut	Sehr gut bis gut

Tabelle 7: Zusammenstellung der Ergebnisse aus den Tabellen 2 bis 6.

In Tabelle 7 sind die zuvor vorgestellten Tabelle 2 bis Tabelle 6 zusammengestellt. Zur Vereinfachung für den Leser sind die Ergebnisse mit Farben unterlegt. Je roter ein Ergebnis unterlegt ist, desto schlechter geeignet ist dieses Ergebnis.

Die Kontaktfläche ist die Fläche, mit der sich der Stempel und das Substrat bzw. das Polymer berühren. Sie ist eine der wichtigsten Größen, da bei einem mechanischen Prägeprozess nur

Strukturen von einem Stempel in ein Polymer übertragen werden können, wenn diese beiden in Kontakt kommen und eine Flächenkraft auf das Polymer ausgeübt wird. Die Größe der Kontaktfläche ist vor allem abhängig von der Parallelität von Stempel und Substrat zueinander sowie von der Welligkeit des Substrates. Im Vergleich der verschiedenen Prägemethoden lässt sich erkennen, dass es deutliche Unterschiede gibt. Die Heißprägemethode erreichte nur eine Kontaktfläche von etwa 20 % und erzeugte somit keine oder nur wenige geprägte Strukturen. Allein dieser Umstand schließt das Verfahren für die Herstellung der angestrebten Strukturen aus. Die vier UV-Imprint-Methoden zeigen eine Spanne von 20 % bis 80 % Kontaktfläche auf. Die erreichten 80 % Kontaktfläche beim Prägen mit dem MA6 zeigen klar den Vorteil einer professionellen Imprint-Anlage unter Verwendung des richtigen Stempels auf. Für die Herstellung von ersten Filterfeldern ist dieses erzielte Ergebnis bezüglich der Kontaktfläche ausreichend. Dennoch kann bei einer zu 80 % geprägten Substratfläche von 1" x 1" noch nicht von großflächig gesprochen werden.

Der untersuchte Parameter „Vollständigkeit“ beschreibt, wie viele Strukturen respektive Felder nach dem Trennen von Stempel und Substrat in einem unversehrten Zustand sind. Auch bei dem Vergleich dieses Parameters schneidet die Heißprägemethode sehr schlecht ab. Es sind keinerlei vollständige Strukturen auf den geprägten Substraten zu erkennen. Selbst an den Stellen, an denen der Stempel in das Polymer eingedrückt wurde, entstanden aufgrund von Abrissen keine vollständigen Felder. Ähnlich schlecht waren die Ergebnisse der Prägungen am MA4 im INA. Die Probleme der Haftung, der Verkippung und der Unebenheiten der Substrate führten nur zu wenigen vollständigen Prägungen. Im Vergleich dazu zeigten die Versuchsreihen am MA6 mit einem opaken Stempel wesentliche Verbesserungen. Rund die Hälfte aller Felder wurde vollständig abgeformt. Diese Ergebnisse werden noch übertroffen durch die Verwendung eines transparenten, passenden Stempels. Dabei wird eine Vollständigkeit der Prägungen von etwa 80 % erreicht. Da nicht alle Felder, insbesondere nicht die Felder am Rand der Prägung, welche öfter nicht vollständig geprägt wurden, relevant für die Ziele dieser Arbeit sind, sind diese Ergebnisse geeignet, um zu zeigen, dass sich Kavitäten mittels Nanoimprint erzeugen lassen.

Befindet sich Luft in den Vertiefungen des Stempels, wenn er in Kontakt mit dem zu prägenden Polymer kommt, so entstehen Lufteinschlüsse in der Prägung. Dieses Phänomen stellt eins der am schwierigsten zu lösenden Probleme dar, die während der Versuchsreihen auftauchten. Um Lufteinschlüsse zu verhindern, wird am MA6 in einer Vakuum- Umgebung geprägt. Doch selbst diese Methode sorgte nicht für einwandfreie Prägeergebnisse. Es treten bei etwa 10 % der Mesen Lufteinschlüsse auf und verhindern so die Nutzung der Mesen und im schlimmsten Fall der Felder als Filter. Da nicht vorhergesagt werden kann, wo und in welchem Mesa Lufteinschlüsse entstehen, beschreibt der Parameter „Lufteinschlüsse“ den kritischsten Defekt der hier analysierten. Wie in Tabelle 7 deutlich wird, sind die Resultate der anderen Methoden noch schlechter und bedürfen keines weiteren Vergleichs.

Als homogen wird eine Prägung angesehen, wenn sie gleichmäßig und ohne Verkippung erfolgt. Hierbei spielen Druck, Keilfehlerausgleich und Stempel-Substrat-Kombination eine

Rolle. Es hat sich gezeigt, dass sich mit dem Wechsel der Methoden vom Heißprägen bis hin zum Prägen mit dem MA6 für den Demonstrator auch die Homogenität verbessert hat. Dies liegt vor allem an den genutzten Imprint-Anlagen und an der Weiterentwicklung der Stempel. Die erreichte Homogenität von „sehr gut“ reicht für die Herstellung von Kavitäten vollkommen aus.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass eine Prägemethode gefunden wurde, mit der es möglich ist, Kavitäten für ein Fabry-Pérot-Nanospektrometer herzustellen. Dazu wird ein MA6 mit einem passenden, transparenten Stempel verwendet. Die Prägeergebnisse werden im Anschluss dazu verwendet, die Machbarkeit der Herstellung eines Nanospektrometers zu beweisen, bei dem die Kavitäten nicht mehr einzeln geätzt werden, sondern mit einer Nanoimprint-Methode hergestellt werden.

Dennoch sind nicht alle Probleme bezüglich des Prägens gelöst worden. Es kann nicht großflächig geprägt werden und die Luft einschüsse wurden nicht vollständig eliminiert.

7 Spektrale Analyse des Filterfeldes

Ziel dieser Arbeit ist es, zu demonstrieren, ob es möglich ist, mittels eines geeigneten Nanoimprint-Verfahrens die Kavitäten eines Fabry-Pérot-Filterfeldes in einem Schritt herzustellen. Das so erstellte Filterfeld sollte vergleichbare Eigenschaften aufweisen wie die von Wang et al. [25] und Correia et al. [24] vorgestellten Felder, um daran die Vorteilhaftigkeit des hier verfolgten Ansatzes zu verdeutlichen. So kann die Anzahl der benötigten Prozessschritte reduziert werden und ein wichtiger Schritt zur kommerziellen Umsetzung eines Nanospektrometers erreicht werden. Eine erfolgreiche Machbarkeitsstudie würde somit die Möglichkeit eröffnen, miniaturisierte Nanospektrometer in einer großen Stückzahl zu geringeren Kosten als mit konventionellen Ätzmethoden herzustellen. In den vorangegangenen Kapiteln wurden dazu die Grundlagen der eingesetzten Technologien vorgestellt und diese im Anschluss im experimentellen Teil dieser Arbeit ausführlich analysiert. Es wurde gezeigt, welche Nanoimprint-Methode die geeignetste ist. Die erarbeiteten Ergebnisse führten zur Herstellung eines kompletten Filterfeldes mit geprägten Kavitäten, welches in diesem Abschnitt vorgestellt wird.

7.1 Ergebnisse

Der im Folgenden vermessene Demonstrator, der das Konzept dieser Arbeit beweisen soll, besteht aus einem PGO-Glassubstrat, auf dem als unterer Spiegel ein aus Titanoxid/Siliziumoxid bestehender DBR abgeschieden wurde. Die auf dieses Schichtsystem geprägten Kavitäten erhielten zum Schluss einen oberen DBR. Das so gefertigte Feld aus Fabry-Pérot-Resonatoren wurde mit dem Mikroskopspektrometer vermessen. In Abbildung 76 sind die Intensitäten des hergestellten Filterfeldes mit 64 Feldern gegenüber der Wellenlänge dargestellt.

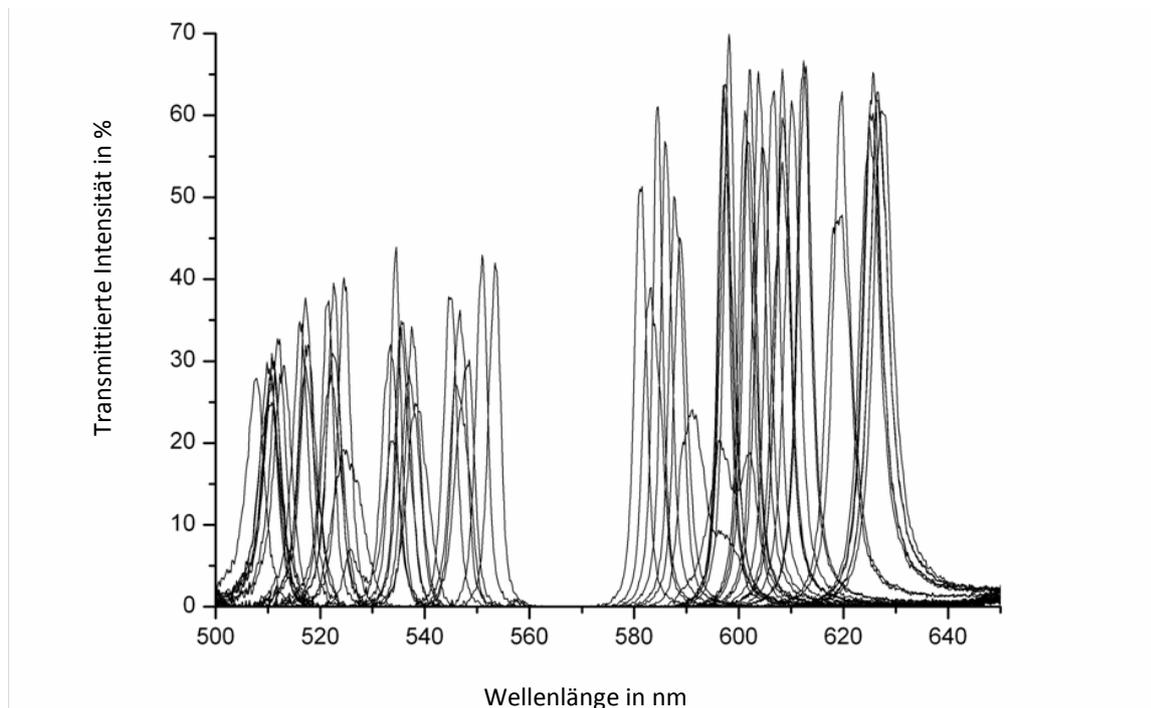


Abbildung 76: Messergebnisse der spektralen Analyse eines Fabry-Pérot-Filterfeldes mit 64 einzelnen Filtern.

Zu erkennen sind die 64 experimentell ermittelten Transmissionsspektren der einzelnen Filter. Die Position jedes Maximums des spektralen Filterprofils ist dabei definiert durch die Höhe der geprägten Kavitäten. Der Stempel zur Herstellung der Kavitäten dieses Filterfeldes besitzt 16 verschiedenen Höhen. Dies hat zur Folge, dass auch das Filterfeld 16 verschiedene Filter aufweisen müsste. Die Messungen zeigen jedoch eine Abweichung von dieser Theorie. Zwar lassen sich einzelne Gruppen von Transmissionsbändern erkennen, die eine gleiche Kavitätshöhe aufweisen sollten, eine exakte Übereinstimmung liegt jedoch nicht vor. Abbildung 77 zeigt vier dieser Bänder, die im Stempeldesign die gleiche Höhe haben sollten. Ihre Maxima liegen in einem Bereich von ca. 1 nm auseinander.

7 Spektrale Analyse des Filterfeldes

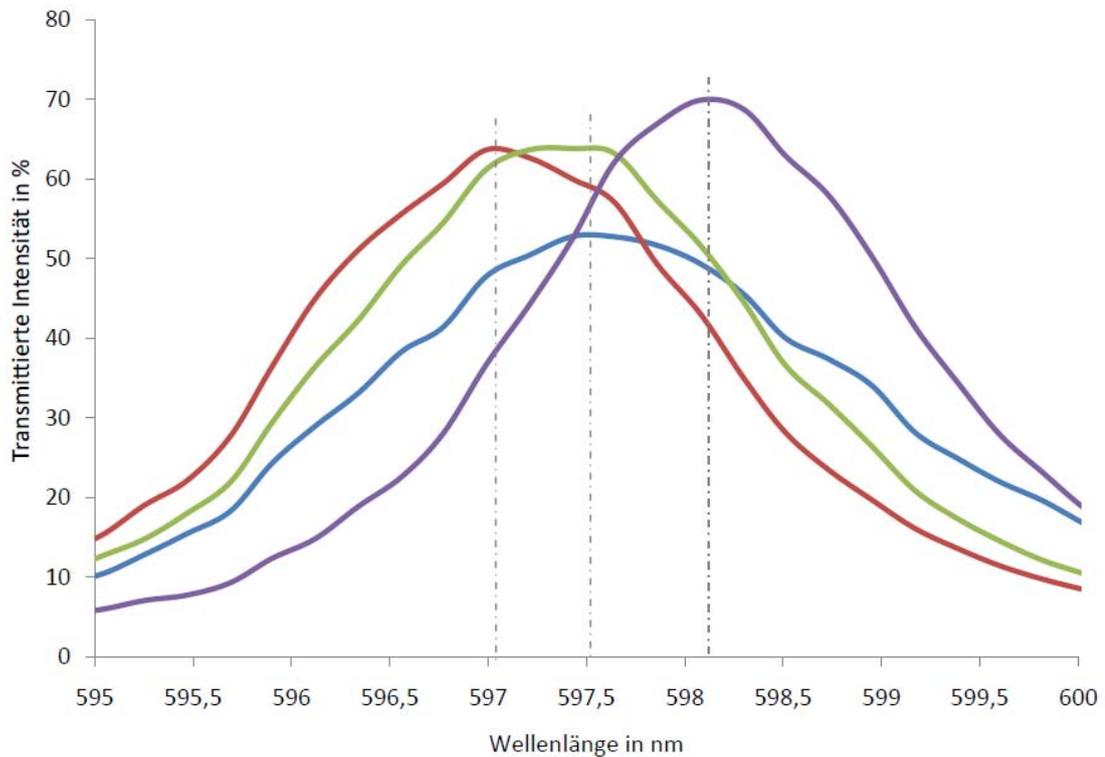


Abbildung 77: Vier Transmissionsbänder, die im Stempeldesign die gleiche Höhe aufweisen. Bei der spektralen Analyse treten Unterschiede in den Wellenlängen von bis zu 1 nm auf.

Somit müssen die Kavitäten unterschiedliche Höhen aufweisen. Durch eine rechnerische Abschätzung wird von einem Höhenunterschied von 1,8 nm ausgegangen [169]. Dies kann entweder schon bei der Stempelherstellung geschehen sein oder erst beim Prägen. Von den im INA hergestellten Stempeln ist bekannt, dass sie eine vertikale Präzision von unter 1 nm aufweisen. Wird im Weiteren von dieser maximalen Ungenauigkeit ausgegangen, so verbleibt immer noch ein Prägefehler von ca. 1 nm. Auszuschließen ist hierbei eine Verkippung, da die Filterfelder nahe zusammenliegen und sich eine so starke Verkippung auf den Rest der Felder stärker ausgewirkt hätte. Die Fehlerursache wird vielmehr in der unterschiedlichen Schrumpfung des Prägematerials gesehen. Bei 6 % Schrumpfung bei einer Höhe von ca. 450 nm schrumpft das Material um 27 nm und ein Fehler von 1 nm ist realistisch.

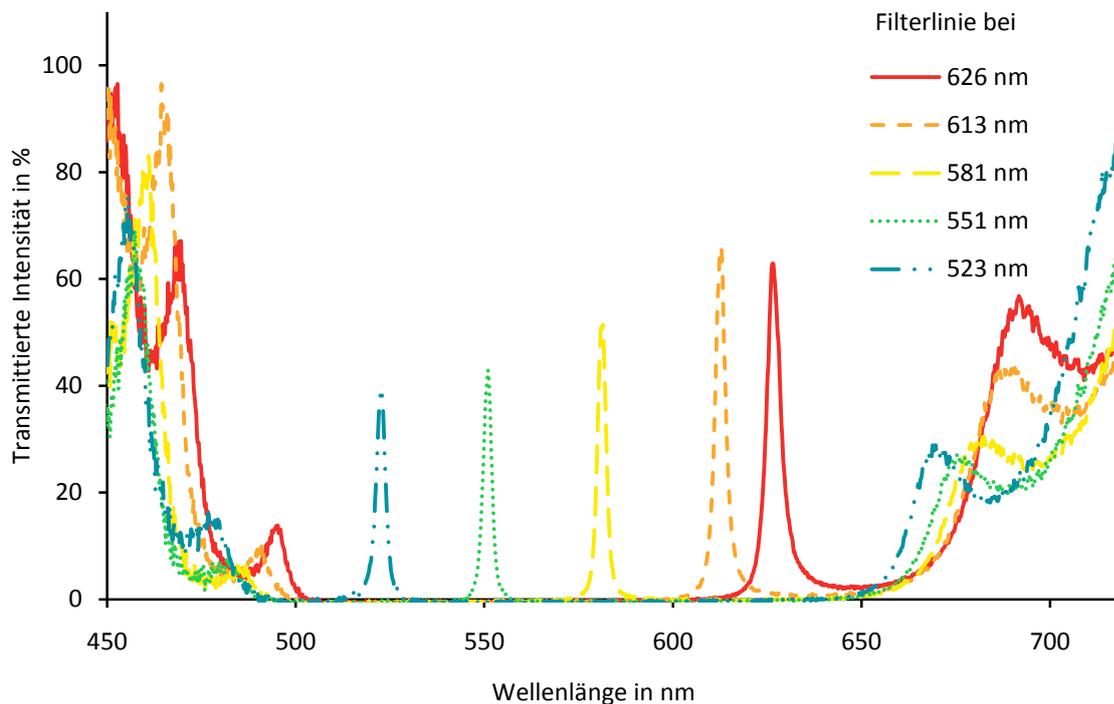


Abbildung 78: Spektrale Analyse des hergestellten Filterfeldes. Zu sehen sind fünf Messungen von verschiedenen Mesen mit verschiedenen Kavitätshöhen. Dadurch entstehen die zu erkennenden Transmissionen innerhalb des Stoppbandes. Je kleiner die Kavitätshöhe ist, desto kleiner ist auch die Wellenlänge des Maximums des spektralen Filterprofils. Die Maxima erstrecken sich von 523 nm bis 626 nm.

Zur Vereinfachung der Darstellung der erzielten Ergebnisse wurden fünf repräsentative Messungen in Abbildung 78 zusammengefasst. Die übrigen dazwischenliegenden Ergebnisse zeigen, wie in Abbildung 76 bereits vorgestellt, einen ähnlichen Trend bezüglich ihrer Intensität und der FWHM. Auffällig ist die sinkende Intensität des transmittierten Lichtes von den hohen zu den niedrigen Wellenlängen hin. Der Intensitätsabfall von 26 % zwischen dem höchsten und dem niedrigsten in dieser Abbildung gezeigten Wert und die einzelnen Intensitätswerte selbst sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Wellenlänge in nm	626	613	581	551	523
Intensität in %	62.9	66.0	51.3	42.9	39.6

Tabelle 8: Intensitäten in % der fünf Maxima der Filterprofile.

Die fünf schmalen Transmissionsbänder besitzen eine Halbwertsbreite (FWHM) von 2,5 – 4 nm. Daraus ergibt sich unter Verwendung des Rayleigh-Kriteriums zum Auflösungsvermögen eines Spektrometers, $R = \left\lfloor \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \right\rfloor$, eine theoretische Auflösung von $R \approx 200$. Abbildung 79 zeigt eine Detaildarstellung des Maximums des spektralen Filterprofils von 613 nm. Durch die Pfeile verdeutlicht, lässt sich dabei eine FWHM von etwas mehr als 3 nm erkennen.

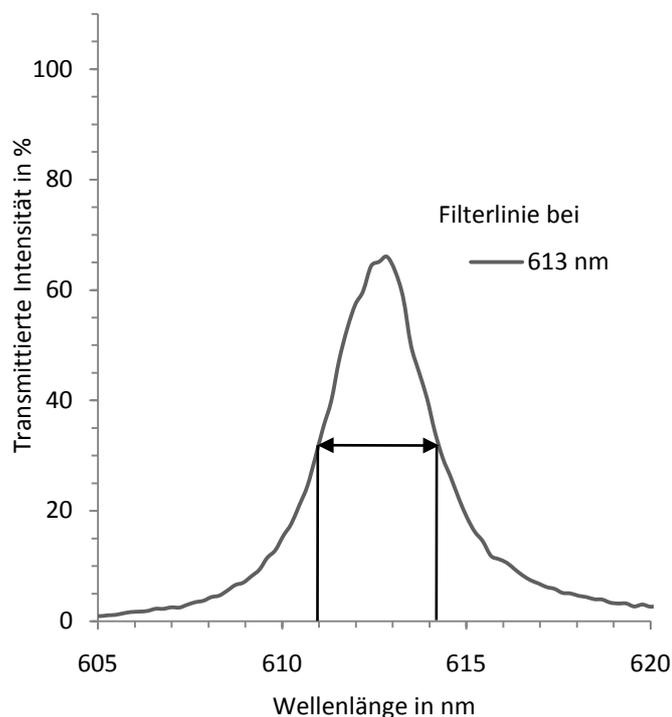


Abbildung 79: Ausschnittvergrößerung des Maximums des spektralen Filterprofils 613 nm. Die Halbwertsbreite (FWHM) beträgt dabei ca. 3 nm.

7.2 Diskussion

Ein Filterfeld mit 64 Filtern in 16 verschiedenen Höhen wurde hergestellt, um zu zeigen, dass es möglich ist, mittels Nanoimprint die nötigen unterschiedlichen Kavitäts Höhen in einem Prozessschritt herzustellen. Da das Filterfeld dieser Machbarkeitsstudie nicht zu einem Spektrometer zusammengefügt wurde, kann hier kein Vergleich mit anderen Spektrometern vorgenommen werden, stattdessen werden die Ergebnisse mit anderen Filterfeldern verglichen. In Tabelle 9 sind die wichtigsten Vergleichsparameter zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 9: Vergleich dreier miniaturisierter auf Fabry-Pérot-Filterfeldern basierender Ansätze. Das im INA hergestellte Feld besitzt Kavitäten, die mittels Nanoimprint-Verfahren geprägt wurden. Dies verkürzt die technologische Herstellung solcher Felder beträchtlich.

	Auflösungsvermögen	Intensität	FWHM	Anzahl der Filter
INA	$R \approx 200$	30 % – 70 %	$\approx 3 \text{ nm}$	64
Wang et al. [25]	$R \approx 400$	4 % – 42 %	$\approx 2 \text{ nm}$	128
Correia et al. [24]	$R \approx 25$	40 % – 65 %	$\approx 16 \text{ nm}$	16

Das am INA hergestellte Filterfeld besitzt ein Auflösungsvermögen von $R \approx 200$ bei einer gemessenen Intensität je nach Filter zwischen 30 % und 70 % des eingestrahnten Lichtes. Es wurden 64 Filter mit einer durchschnittlichen FWHM von ca. 3 nm gefertigt. Damit ordnet es sich im Auflösungsvermögen zwischen dem Filterfeld von Wang et al. mit $R \approx 400$ und den von Correia et al. mit $R \approx 25$ ein. Bei den gemessenen Intensitäten liegt das am INA gefertigte Filterfeld deutlich vorn, gefolgt von dem Filterfeld von Correia et al. Die 128 Filter von Wang et al. zeigen eine niedrige Intensität der einzelnen Filter.

Um sehr schmale Transmissionsbänder zu erzielen und so ein hohes Auflösungsvermögen zu erreichen, wird die Reflexion der Spiegel gesteigert. Dies geschieht, indem mehr Perioden für einen DBR deponiert werden. Gleichzeitig steigt bei nicht idealem Material mit mehr Perioden die Absorption in den Spiegeln, was zu einem Verlust an Intensität führt. Dieser Effekt wurde auch am INA beobachtet und die Periodenanzahl der DBRs daraufhin optimiert. Bei unveränderten Materialien besteht ein Zielkonflikt zwischen einer kleinen FWHM und somit einem großen Auflösungsvermögen und der zu detektierenden Intensität. Die FWHM von Correia et al. mit 16 nm ist größer als die der beiden anderen und resultiert aus den verwendeten Metallspiegeln. Diese bieten eine geringe Reflexion und verbreitern so die Transmissionsbänder.

Insgesamt betrachtet konnte das Filterfeld des INAs die beiden aktuellsten vergleichbaren Filterfelder teilweise deutlich übertreffen. Bei den Parametern, in denen es bisher nicht führt, besitzt es das Potenzial, in naher Zukunft mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Bestwerte zu erzielen. Beim Auflösungsvermögen und bei der FWHM konnten in Versuchen schon Ergebnisse von $R = 600$ mit einer FWHM von 1 nm bei einer Wellenlänge von 600 nm gezeigt werden. Auch die Erweiterung auf 128 oder 256 Felder ist genauso wie bei Wang et al. und Correia et al. möglich.

Der große Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes ist aber die Verwendung der Nanoimprint-Technologie. Diese Technologie ist in der Industrie bereits heute keine exotische mehr. Große Sensorhersteller wie HAMAMATSU Photonics haben auf der Basis dieser Technologie schon erste Serienprodukte [20] auf den Markt gebracht. Das zeigt, dass diese Technologie auch bei der Herstellung in Großserie reproduzierbar funktioniert und dass die gezeigte Machbarkeit eines FP-Filterfeldes der erste Schritt hin zu einer Produktion von kostengünstigen extrem miniaturisierten Spektrometern sein kann.

8 *Ausblick*: Zukünftige Bedeutung der Nanoimprint-Technologie für auf FP-Filterfeldern basierende Nanospektrometer

In dieser Arbeit wurde eine Machbarkeitsstudie vorgestellt, in der gezeigt wird, dass es möglich ist, ein FP-Filterfeld herzustellen, bei dem die verschiedenen Kavitätshöhen mittels Nanoimprint-Technologie hergestellt werden. Für einzelne Filterfelder ist dies nach Meinung des Autors zurzeit die effizienteste Herstellungsmethode. Sie übertrifft den Stand der Technik bei Weitem. Im Vergleich mit den bei Wang et al. [25] beschriebenen neun Depositionsschritten, die für ein 8 x 16 Filter großes Feld benötigt werden, wird bei diesem Ansatz nur ein Schritt benötigt.

Im praktischen Teil dieser Arbeit, der Untersuchung der Prägeprozesse, wurde mit verschiedenen Methoden und Maschinen gearbeitet und die erreichten Ergebnisse verglichen. Für die Herstellung von FP-Filterfeldern ist es von besonderer Bedeutung, vollständige, homogene und luftabschlussfreie Prägungen zu erzielen. Die Bewertung des Vergleichs zeigt, dass die Verwendung einer modernen Nanoimprint-Anlage sehr vorteilhaft ist. Sie ermöglicht es, mittels der verschiedenen Korrekturwerkzeuge qualitativ hochwertige Prägungen zu erzeugen. Im Vergleich dazu eignet sich die getestete Heißpräganlage überhaupt nicht für die gewünschten Prägungen. Mit dem abschließenden, in Tabelle 7 dargestellten Überblick über die verschiedenen Nanoimprint-Methoden wird die Frage kompakt beantwortet, welche der gewählten Methoden inwieweit geeignet ist, die Kavitäten des FP-Filterfeldes zu prägen. Mit deutlichem Vorsprung ist das Prägen an einem MA6 zu empfehlen.

Der an dieser Maschine hergestellte Demonstrator wurde im Weiteren spektral vermessen. Diese Analyse zeigt 64 Transmissionsbänder der einzelnen Filter. Ein Vergleich mit Arbeiten auf dem Stand der Wissenschaft zeigt, dass eine Verbesserung erreicht wurde. So konnte eine drastische Steigerung der Intensität gegenüber Wang et al. [25] aufgezeigt werden, bei nur geringen Verlusten bezüglich Auflösungsvermögen und FWHM. Die Frage, ob es möglich ist, ein FP-Filterfeld mittels Nanoimprint herzustellen, welches vergleichbare optische Eigenschaften wie das von Wang et al. [25] aufweist, kann eindeutig mit „ja“ beantwortet werden, wobei es gelungen ist, den Vergleich noch zu übertreffen.

Die Frage, ob das hergestellte FP-Filterfeld verwendet werden kann, um daraus ein Spektrometer zu fertigen, ging über die Ziele dieser Arbeit hinaus und wird nachfolgenden Qualifikationsarbeiten überlassen. Es fand keine Vereinigung mit einem CCD-Chip statt. Dennoch geht der Autor davon aus, dass das FP-Filterfeld zu einem Nanospektrometer zusammengefasst werden kann. Die zusätzlich benötigten Komponenten wie Bandpässe und Optiken sind heute schon weitestgehend fertig designt.

Eine weitere wichtige Frage, die nach der maximalen prägbaren Fläche und der damit einhergehenden Ausnutzung der prozessierbaren Fläche eines Wafers, wurde nicht

beantwortet. Hier soll dennoch kurz ein Ausblick auf eine mögliche Antwort auf diese Frage gegeben werden.

8.1 Die SCIL-Technologie für zukünftige großflächige Prägungen, um die Herstellungskosten weiter zu senken

Trotz der guten Ergebnisse dieser Arbeit darf nicht außer Acht gelassen werden, dass der Kostendruck im Bereich der Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Nanospektrometern hoch ist. Dies gilt nicht erst seit der zurückliegenden Finanz-Krise, aber besonders für diese [170]. Ein solcher Druck führt zu Forderungen an die Herstellungsprozesse, hohe Stückzahlen pro Prozessschritt zu ermöglichen und so zur Herstellungskostenenkung beizutragen. Die Weiterentwicklung von einem FP-Filterfeld, das durch viele Ätzschritte hergestellt wird, hin zu einem Verfahren, das nur einen Prozessschritt, die Nanoimprint-Technologie, benötigt, um verschieden hohe Kavitäten zu erzeugen, die in dieser Arbeit beschrieben wurde, ermöglicht zunächst grundsätzlich eine Herstellung in großer Stückzahl. Dennoch ist das verwendete Nanoimprint-Verfahren durch den benutzen Stempel auf 1" x 1" limitiert. In der Industrie sind Wafergrößen von 300 mm längst Standard und werden in Zukunft, etwa 2017, durch den kürzlich beschlossenen Standard von 450-mm-Wafern abgelöst [171]. Sollte ein Stempel mit einer 1 Zoll großen aktiven Fläche genutzt werden, so würden nur 0,9 % der prozessierbaren Waferfläche genutzt. Ökonomisch ist dies ein nicht akzeptabler Weg. Eine Vergrößerung der aktiven Fläche bei harten Stempeln führt jedoch zu Inhomogenitäten und Kontaktproblemen beim Prägen. Daher müssen Nanoimprint-Technologien entwickelt werden, die es ermöglichen, auch sehr große Flächen gleichmäßig und vollständig zu prägen.

Eine neue vielversprechende Lösung dieses Problems bietet die SCIL-Technologie. Sie ermöglicht schon heute das vollständige Prägen von 6"-Wafern und hat gleichzeitig das Potenzial, damit auch weitaus größere Wafer zu prägen.

Abbildung 80 zeigt den schematischen Prozessablauf bei SCIL-Imprints. Zunächst wird der Stempel mittels Vakuum am Stempelhalter fixiert (1.). Danach wird die Vakuumfixierung nach und nach gelöst und der Stempel in das Material gedrückt (2-3). Ist der Stempel vollständig, über die gesamte zu prägende Fläche, auf dem Substrat, wird das Prägmaterial ausgehärtet (4). Danach wird das Vakuum wieder nach und nach zwischen Stempel und Stempelhalter gezogen und der Stempel sukzessive von der Prägung gelöst (5-6) [29].

8 Ausblick: Zukünftige Bedeutung der Nanoimprint-Technologie für auf FP-Filterfeldern basierende Nanospektrometer

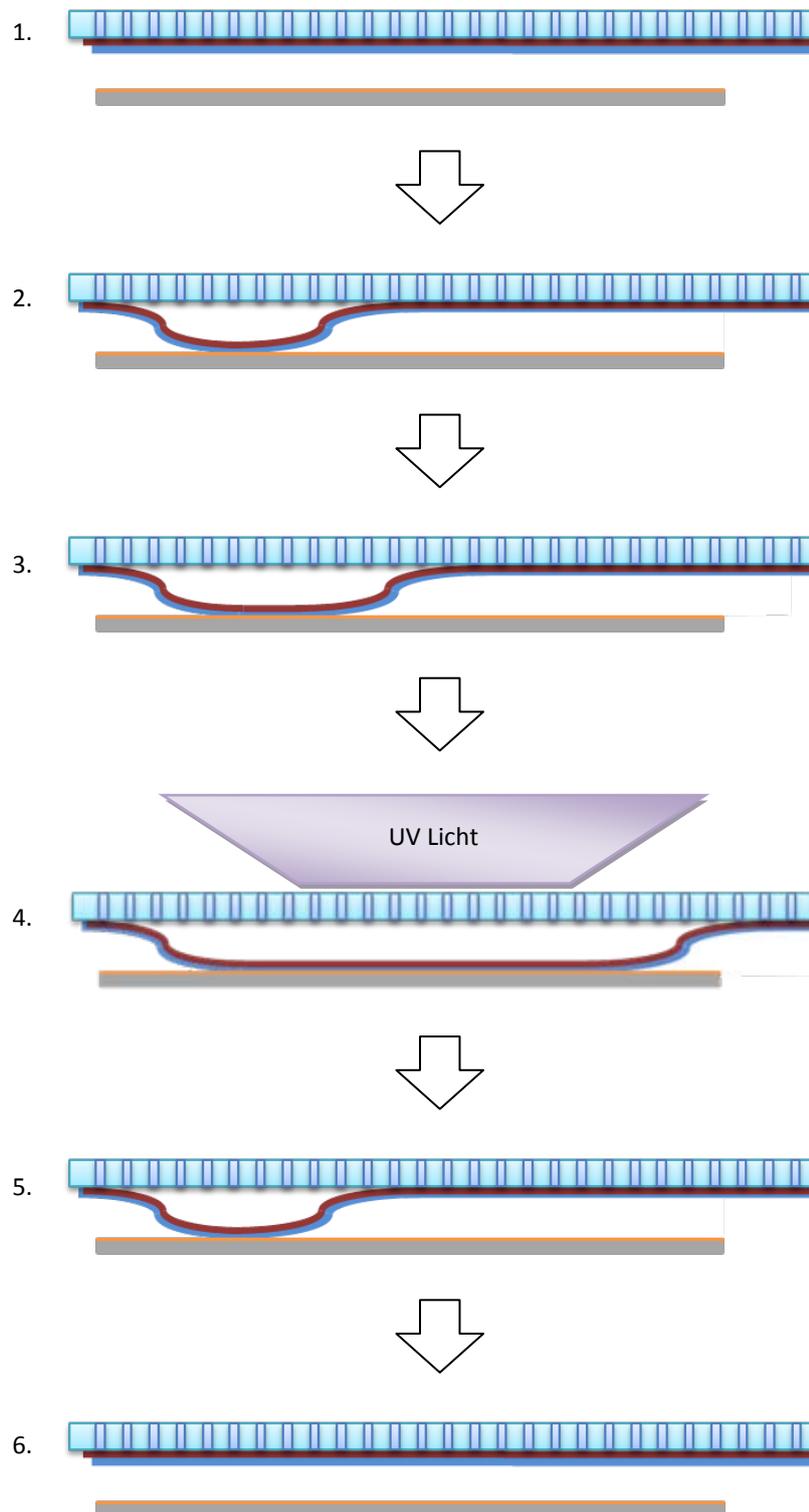


Abbildung 80: Schematische Darstellung des SCIL-Prägeprozesses. Zunächst wird der Stempel mittels Vakuum am Stempelhalter fixiert (1.). Danach wird die Vakuumfixierung nach und nach gelöst und der Stempel in das Material gedrückt (2-3). Hat sich der Stempel vollständig, über die gesamte zu prägende Fläche auf dem Substrat ausgehend, wird das Prägematerial ausgehärtet (4). Danach wird das Vakuum wieder nach und nach zwischen Stempel und Stempelhalter gezogen und der Stempel sukzessive von der Prägung gelöst (5-6) [29].

Der Vorteil dieser Technologie besteht in der Verwendung von einerseits weichen Stempeln, die Unebenheiten ausgleichen können und sich andererseits durch den in lateraler Richtung beim Prägen nicht deformierbaren Stempel auszeichnen. Der Ausgleich von Störstellen geht so weit, dass es möglich ist, über Partikel hinweg zu prägen. Abbildung 81 zeigt eindrucksvolle Aufnahmen der Firma SÜSS MicroTech, bei denen über Störstellen hinweggeprägt wurde.

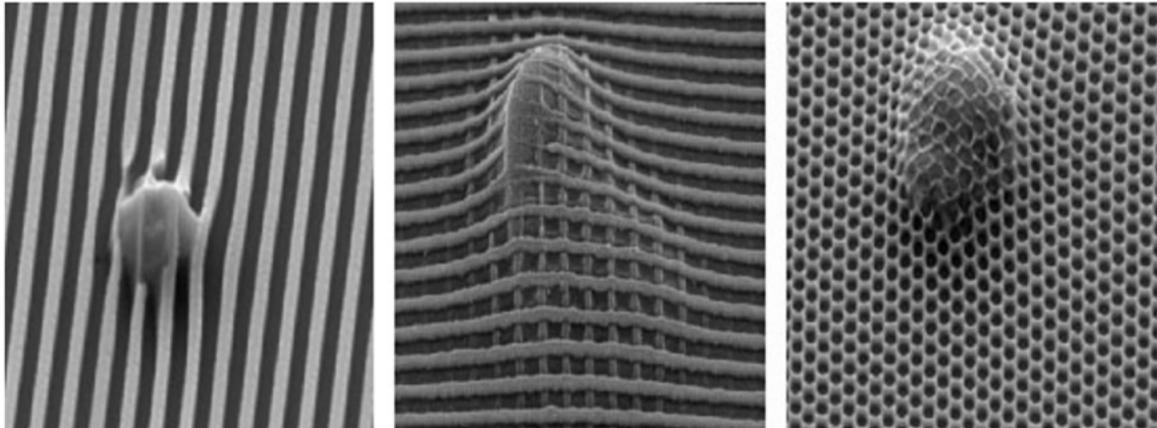


Abbildung 81: SCIL Prägeergebnisse [172]

Seit Ende 2009 ist das INA selbst im Besitz eines MA6 mit SCIL-Tooling. Im Folgenden werden erste Prägeergebnisse gezeigt, die gleichzeitig einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten und Ziele geben.

Die in Abbildung 82 gezeigten ersten Prägeergebnisse verdeutlichen das hohe Potenzial dieser Technologie hinsichtlich einer großflächigen Abformung. Die kleinen zu erkennenden Defekte an den Rändern der Mesen werden in Zukunft Ziel von Verbesserungen im Prägeprozess sein. Gleiches gilt für die Herstellung von Stempeln und die Auswahl von Prägematerialien.

8 Ausblick: Zukünftige Bedeutung der Nanoimprint-Technologie für auf FP-Filterfeldern basierende Nanospektrometer

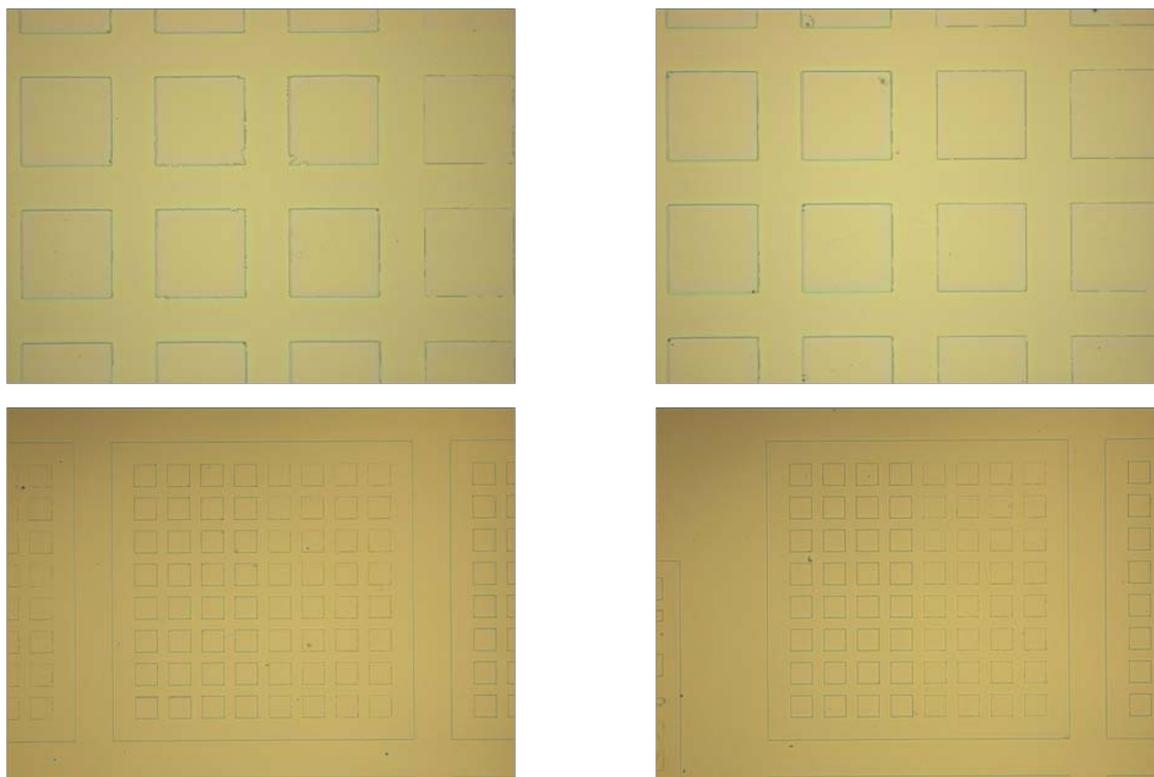


Abbildung 82: Zu sehen sind Lichtmikroskopaufnahmen einer mit SCIL geprägten Probe. Es sind kleine Defekte an den Rändern der Mesen zu erkennen.

An dieser Stelle soll diesen Arbeiten nicht vorgegriffen werden, sondern nur ein Blick in die Zukunft einer kommerziellen Herstellung eines Nanospektrometers mittels SCIL geworfen werden.

Die notwendigen finanziellen Mittel zur Durchführung der in der vorliegenden Arbeit gemachten Versuche wurden in Kooperation mit den Industriepartnern unter anderem von dem Autor der vorliegenden Arbeit über Drittmittelprojekte eingeworben. Infolgedessen standen die Ziele dieser Projekte im Mittelpunkt der Anstrengungen der gesamten Gruppe. Unter dem projektbezogenen Zeitdruck wurden einige Versuche, die sich in Hinblick der Projektziele offensichtlich als nicht zielführend erwiesen, sehr schnell beendet und somit nicht vollständig durchgeführt und systematisch analysiert. Diese Schwäche der Arbeit musste in Kauf genommen werden, um den Erfolg der Projekte zu sichern. Sehr deutlich wird dies bei der Versuchsreihe „Heißprägen in Braunschweig“. Ohne eine exakte Vermessung der Ergebnisse und ohne eine Wiederholung der Versuche wurde entschieden, diesen Weg nicht weiter zu verfolgen. Die erreichten Prägeergebnisse standen in keinem Verhältnis zu den eingesetzten Kosten und zum Materialaufwand. Das Aufzeigen der Grenzen dieser Arbeit soll die Ergebnisse nicht schmälern, vielmehr sollen diese dadurch in den richtigen Kontext, den einer projektbegleitenden Arbeit, gestellt werden. Im Verlauf der mit dieser Arbeit abgeschlossenen Promotion wurden Projekte auf dem Gebiet der Nanospektrometer, darunter EU-Projekte mit einem Gesamtvolumen von ca. 2 Mio. € begonnen (BMBF „TOSA 13N9342“, Hessen-Agentur „Entwicklung eines Prototypen für ein

Nano-Spektrometer-Modul 126/07-01“, Hessen Agentur „Vorprojekt zur Realisierung eines Messsystems zur Detektion von NO₂ im Abgasstrang von Nutzfahrzeugen“, AAL-EU/BMBF „EMOTION-AAL“). Ein weiteres interessantes Projekt mit weiteren 900.000 € könnte Mitte 2010 starten (BMBF „ECOS“) soweit eine Förderzusage vorliegt.

Trotz oder gerade wegen der erwähnten auftretenden Probleme im Zusammenhang dieser Arbeit war ein rasches Voranschreiten in den Projekten möglich. In Zukunft werden die Ergebnisse dieser Arbeit dazu beitragen, Nanospektrometer in einer Größe von 2 x 2 x 4 mm³ herzustellen. Sollten sie dank der Verwendung der Nanoimprint-Technologie kommerziell erhältlich sein, hätte dies eine nachhaltige Bedeutung für die Zukunft vieler Anwendungsgebiete, in denen heute noch keine Spektrometer zum Einsatz kommen. Beginnend mit hoch mobilem Monitoring von Patienten, die durch mehr Freiraum und Beweglichkeit an Lebensqualität gewinnen, bis hin zum Einsatz in Gebäuden, in denen Nanospektrometer in großer Stückzahl vernetzt die Umgebung überwachen. Das Licht, die Raumluft, verschiedene Schimmelpilze oder Rauchentwicklung könnten beobachtet und wenn nötig früh beeinflusst werden. Schlussendlich könnten all die Anwendungen realisiert werden, die seit Beginn der 1990er Jahre die Forscher antrieben miniaturisierte Spektrometer zu entwerfen.

Bezüglich einer solchen Zukunft stellt sich für den Autor eine wesentliche Frage: Können die FP-Filterfelder großflächig mittels SCIL hergestellt werden und wird es möglich sein, sie zu einem konkurrenzfähigen Spektrometer zusammenzufügen? Durch die starke Einbindung dieses Themas in Projekte ist der Autor sehr zuversichtlich, dass dies in Zukunft möglich ist.

Es konnte eine Nanoimprint-Methode identifiziert werden, mit welcher es möglich ist, einen Demonstrator herzustellen, die aber noch nicht ausreicht, um in großer Stückzahl zu produzieren. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Prägen der Höhen der Mesen und nicht auf kleinen lateralen Strukturen. Ändern sich die Anforderungen diesbezüglich, können auch die Imprint-Methode, der Stempel und das Prägematerial variieren.

Literaturverzeichnis

- [1]. **Neumann, W.** Spektrometer - Grundlagen. [Online] 2009.
- [2]. **Matissek, R.** *Lebensmittelanalytik*. 3., vollständig überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. 3-540-62513-5.
- [3]. **Skrabal, P.** *Spektroskopie*. Zürich : vdf-Hochschulverl., 2009. Bd. 8355. 3-8252-8355-0.
- [4]. **Puchalla, Jochen.** *Metallorganische Chemische Gasphasenabscheidung (MOCVD) ferroelektrischer Dünnschichten*. Jülich : Forschungszentrum Zentralbibliothek, 2007. 978-3-89336-492-3.
- [5]. **Jöbsis, F. F.** Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*. 1977, Bd. 198, 4323, S. 1264-1267.
- [6]. **Tuchin, V. V.** *Handbook of optical biomedical diagnostics*. Bellingham, Wash. : SPIE Press, 2002. S. 1093. Bd. 107. 0819442380.
- [7]. **Lindblom, P., Meinander, N. und Olsson, T.** Spectroscopy with the MEGA spectrometer, a very-high-resolution grating spectrometer. *Review of scientific instruments*. 1990, Bd. 61, 10, S. 2546-2548.
- [8]. **Wolffenbuttel, R. F.** State-of-the-Art in Integrated Optical Microspectrometers. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2004, S. Vol. 53, No. 1 (2004),197-202.
- [9]. **P., Janositz.** Intelligente Technik hält ältere Menschen mobil. *VDE-Dialog*. 2010, Bd. 2010, Nr.2.
- [10]. **Wu, M. C.** Micromachining for Optical and Optoelectronic Systems. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 1997, S. Vol. 85, No. 11 (1997),1833-1856.
- [11]. **Yee, G. M.** Miniature spectrometers for biochemical analysis. *Sensors and Actuators*. 1997, S. Vol. 58, No. 1 (1997),61-66.
- [12]. **Kwa, T. A., Sarro, P. M. und Wolffenbuttel, R. F.** Backside-illuminated silicon photodiode array for an integrated spectrometer. *Electron Devices, IEEE Transactions on*. 1997, Bd. 44, 5, S. 761-765.
- [13]. **Tabib-Azar, M.** *Integrated optics, microstructures, and sensors*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1995. 0-7923-9621-9.
- [14]. **J.H., Jerman, D.J., Clift und S.R., Mallinson.** A miniature Fabry-Perot interferometer with a corrugated silicon diaphragm support. *Sensors and Actuators A: Physical*. 1991, Bd. 29, 2, S. 151-158.

- [15]. **van Patterson B., Zeghbroeck.** Fabrication and analysis of Si/SiO₂ micro-mechanical modulators. 1996, S. 25-26.
- [16]. **Raley, N. F., et al.** A Fabry-Perot microinterferometer for visible wavelengths. 1992, S. 170-173.
- [17]. **Aratani, K.** Surface micromachined tuneable interferometer array. *Sensors and Actuators*. 1994, S. Vol. 43, No. 1/3 (1994),17.
- [18]. **Tran, A. T. T. D.** Surface Micromachined Fabry-Perot Tunable Filter. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 1996, S. Vol. 8, No. 3 (1996),393-395.
- [19]. **B., Correia, et al.** Bulk-micromachined tunable Fabry-Perot microinterferometer for the visible spectral range. 1998, S. 287-290.
- [20]. **HAMAMATSU PHOTONICS K.K.** Ultra-compact Mini-spectrometer integrating MEMS and image sensor technologies. [Online] 2009.
- [21]. **Hasse, A.** Wide continuous tuning range of 221 nm by InPair-gap vertical-cavity filters. *Electronics letters*. 2006, S. Vol. 42, No. 17 (2006),974.
- [22]. **Irmer, S.** Ultralow Biased Widely Continuously Tunable Fabry-Perot Filter. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2003, S. Vol. 15, No. 3 (2003),434-436.
- [23]. **Kaushik, S. und Stallard, B. R.** Two-dimensional array of optical interference filters produced by lithographic alterations of the index of refraction. 1995, S. 276-281.
- [24]. **Correia, J.** High-Selectivity Single-Chip Spectrometer for Operation at Visible Wavelengths. *International Electron Devices Meeting*. 1998, S. (1998),467-470.
- [25]. **Wang, S. W.** 128 channels of integrated filter array rapidly fabricated by using the combinatorial deposition technique. *Applied physics*. 2007, S. Vol. 88, No. 2 (2007),281-284.
- [26]. **Chou, S. Y.** Imprint Lithography with 25-Nanometer Resolution. 1996, S. No. 5258 (1996),85-86.
- [27]. **Ruchhoeft, P.** Patterning curved surfacesTemplate generation byh ion beam proximity lithography and relief transfer by step and flash imprint lithography. 1999, S. Vol. 17, No. 6 (1999),2965-2969.
- [28]. **Resnick, D. J.** Improved step and flash imprint lithography templates for nanofabrication. 2003, S. Vol. 69, No. 2-4 (2003),412-419.
- [29]. **Ji, R.** Nanoimprint nach dem SCIL-Prinzip. *Mikroproduktion*. 2009.
- [30]. **Hillmer, H., et al.** *Optische Filter und Verfahren zu seiner Herstellung, sowie Vorrichtung zur Untersuchung der spektralen und örtlichen Verteilung einer elektromagnetischen, von einem Gegenstand ausgehenden Strahlung.* 2007/007075 2007.

- [31]. **Austin, M. D., et al.** Fabrication of 5 nm linewidth and 14 nm pitch features by nanoimprint lithography. 2004, Bd. 84, 26, S. 5299-5301.
- [32]. **Ahn, S. -W.** Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography. *Nanotechnology*. 2005, S. Vol. 16, No. 9 (2005),1874-1877.
- [33]. **Lenz, C.** Lumineszenz - Spektakuläre und nützliche Eigenschaft von Mineralen. [Online] 2005. [Zitat vom: 24. 2 2010.] <http://www.geoberg.de/text/geology/05111601.php>.
- [34]. **Gove, P. B. (EDT) und (COR), Merriam-Webster.** *Websters Third New International Dictionary*. s.l. : Merriam Webster,U.S., 2008. 0877792011.
- [35]. **Kwa, T. A., Sarro, P. M. und Wolffenbuttel, R. F.** Backside-illuminated silicon photodiode array for an integrated spectrometer. 1997, Bd. 44, 5, S. 761-765.
- [36]. **Webster, J. G.** *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. [Hrsg.] John G. Webster. Boca Raton, Fla. : Springer Berlin;CRC Press [u.a.], 1999. 3540648305.
- [37]. **Vaughan, J. M.** *The Fabry-Perot interferometer*. Bristol etc. /// Bristol : Hilger, cop. 1989 /// 1989. S. XIX, 583 p. /// 583. 0-85274-138-3.
- [38]. **Demtröder, W.** *Laserspektroskopie*. 4., erw. und Neubearb. Aufl. Berlin : Springer, 2000. S. 778. 3540642196.
- [39]. **Khandpur, R. S.** *Handbook of Analytical Instruments*. s.l. : Tata McGraw-Hill Education Private Limited, India, 2006. 6612125942.
- [40]. **Haferkorn, H.** *Optik*. s.l. : Wiley-VCH, 2002. 3527403728.
- [41]. **Zinth, W. und Zinth, U.** *Optik*. 2., verb. Aufl. München : Oldenbourg, 2009. S. X, 335 S. 978-3-486-58801-9.
- [42]. **Pedrotti, F. L.** *Optik für Ingenieure*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2002. 3-540-67379-2.
- [43]. **Hecht, E.** *Optik*. s.l. : Oldenbourg, R., Verlag GmbH, 2005. 3486273590.
- [44]. **Eichler, J.** *Physik*. s.l.: Vieweg + Teubner in GWV Fachverlage GmbH, 2007. 3834802239.
- [45]. **Born, M.** *Principles of optics*. 7. (expanded) ed., repr. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 978-0-521-64222-4.
- [46]. **Heavens, O. S.** *The Optical Properties of Thin Solid Films*. s.l. : Dover Publications Inc., 1992. 0486669246.

- [47]. **Macleod, H. A.** *Thin-film optical filters*. 2nd ed. N.Y. : Macmillan Pub. Co., 1986. S. xxii, 519. 0029481104.
- [48]. **Poernar, D. P.** *Thin film colour sensors*. Delft The Netherlands : Delft University Press, 1996. S. x, 236. 904071343X.
- [49]. **Moeller, K. D.** *Optics*. New York : Springer, 2003. S. 443. 0387953604.
- [50]. **Rancourt, J.** *Optical Thin Films: User Handbook*. s.l. : SPIE Press, 1996. 0819422851.
- [51]. **America, Optical Society of.** *Handbook of optics*. 2. ed. Norwich, NY, New York : s.n., 1995. 978-1-60119-278-3.
- [52]. **Saleh, B. E. A. und Teich, M. C.** *Fundamentals of Photonics*. s.l. : John Wiley and Sons Ltd, 2007. 0471358320.
- [53]. **Hertel, I. V. und Schulz, C. P.** Atome, Moleküle und optische Physik 1. [Online] 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30617-7>.
- [54]. **Meschede, D.** *Optik, Licht und Laser*. 3., durchgesehene Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008. 978-3-8348-9288-1.
- [55]. **Demtröder, W.** *Experimentalphysik 2*. 5., überarbeitete und erweiterte Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. S. 495 S. 978-3-540-68210-3.
- [56]. **Demtröder, W.** *Elektrizität und Optik*. Berlin [u.a.] : Springer, 2006.
- [57]. **Demtröder, W.** *Laserspektroskopie*. 5., erw. und Neubearb. Aufl.. Berlin [u.a.] : Springer, 2007. 978-3-540-33792-8.
- [58]. **Pedrotti, F. L.** *Optik für Ingenieure*. 3., bearb. und aktualisierte Aufl.. Berlin [u.a.] : Springer, 2005. 978-3-540-22813-4.
- [59]. **Zinth, W. und Zinth, U.** *Optik*. München [u.a.] : Oldenburg, 2005. 978-3-486-27580-3.
- [60]. **Hicks, T. R., K., Reay N. und D., Atherton P.** The application of capacitance micrometry to the control of Fabry-Perot etalons. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1984, Bd. 17, 1, S. 49-55.
- [61]. **Paschotta, R.** *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. s.l. : Wiley-VCH, 2008. 3527408282.
- [62]. **Spex, J. Y.** Guide for Spectroscopy. *Instrument S.A. Group*. 1994.
- [63]. **Steward, E. G.** *Fourier Optics an Introduction 2nd*. s.l. : Dover Publications Inc., 2004. 0486435040.
- [64]. **Haseth, J. A. und Griffiths, P. R.** *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. s.l. : Wiley-Interscience, 2007. 0470106298.

- [65]. **Gates, B. D.** New Approaches to Nanofabrication Molding, Printing, and Other Techniques. 2005, S. Vol. 105, No. 4 (2005),1171-1196.
- [66]. **Guo, L. J.** Recent progress in nanoimprint technology and its applications. 2004, S. Vol. 37, No. 11 (2004),R123-R141.
- [67]. **Guo, L. J.** Nanoimprint Lithography Methods and Material Requirements. 2007, S. Vol. 19, No. 4 (2007),495-513.
- [68]. **Hua, F., et al.** Polymer Imprint Lithography with Molecular-Scale Resolution. 2004, Bd. 4, 12, S. 2467-2471.
- [69]. **Smith, H. I.** A model for comparing process latitude in ultraviolet, deep-ultraviolet, and x-ray lithography. 1988, Bd. 6, 1, S. 346-349.
- [70]. **Resnick, D. J.** Imprint lithography for integrated circuit fabrication. 2003, S. Vol. 21, No. 6 (2003),2624-2631.
- [71]. Roadmap for Semiconductors 2003 (ITRS) Chip- und Equipment-Entwicklung Hand in Hand. 2003, S. Vol. 52, No. 26 (2003),20-21.
- [72]. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2006.
- [73]. **Technology Review.** 10 Emerging Technologies That Will Change the World. [Online] 2003. [Zitat vom: 5. 11 2009.] <http://www.technologyreview.com/Infotech/13060/>.
- [74]. **McAlpine, M. C., Friedman, R. S. und Lieber, C. M.** Nanoimprint Lithography for Hybrid Plastic Electronics. *Nano Letters*. 2003/04/01/, Bd. 3, 4, S. 443-445.
- [75]. **Clavijo Cedeño, C., et al.** Nanoimprint lithography for organic electronics. *Microelectronic engineering*. 2002/7//, Bde. 61-62, S. 25-31.
- [76]. **Li, D. und Guo, L. G.** Micron-scale organic thin film transistors with conducting polymer electrodes patterned by polymer inking and stamping. *Applied physics letters*. 2006, Bd. 88, 6, S. 063513.
- [77]. **Guo, L. J., Krauss, P. R. und Chou, Y. S.** Nanoscale silicon field effect transistors fabricated using imprint lithography. *Applied physics letters*. 1997, Bd. 71, 13, S. 1881-1883.
- [78]. **Zhang, w. und Chou, S. Y.** Fabrication of 60-nm transistors on 4-in. wafer using nanoimprint at all lithography levels. *Applied physics letters*. 2003, Bd. 83, 8, S. 1632-1634.
- [79]. **Macintyre, D. S., et al.** Nanoimprint lithography process optimization for the fabrication of high electron mobility transistors. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 2003, Bd. 21, 6, S. 2783-2787.
- [80]. **Scarpa, G., et al.** Nanoimprint Lithography for Optical Components. 2007, Bd. 2, S. 194-197.

- [81]. **Pisignano, D., et al.** First-order imprinted organic distributed feedback lasers. *Synthetic Metals*. 2005, Bd. 153, 1-3, S. 237-240.
- [82]. **Pisignano, D.** Room-Temperature Nanoimprint Lithography of Non-thermoplastic Organic Films. *Advanced materials*. 2004, S. Vol. 16, No. 6 (2004),525 - 529.
- [83]. **Guo, L. J.** Fabrication of photonic nanostructures in nonlinear optical polymers. *Journal of modern optics*. 2002, S. Vol. 49, No. 3/4 (2002),663-674.
- [84]. **Cheng, X.** High-resolution organic polymer light-emitting pixels fabricated by imprinting technique. *Journal of vacuum science & technology*. 2002, S. Vol. 20, No. 6 (2002),2877-2880.
- [85]. **Kao, P.C., et al.** Fabrication of large-scaled organic light emitting devices on the flexible substrates using low-pressure imprinting lithography. *Electron Devices, IEEE Transactions on*. 2005, Bd. 52, 8, S. 1722-1726.
- [86]. **Wang, J. und Kostal, H.** Nanoimprint lithography enables fabrication of subwavelength optics. *Laser focus world*. Bd. 2005, 41, S. 76-81.
- [87]. **Wang, J. J.** High-performance nanowire-grid polarizers. *Optics letters*. 2005, S. Vol. 30, No. 2 (2005),195-197.
- [88]. **Ekinci, Y., et al.** Bilayer Al wire-grids as broadband and high-performance polarizers. *Opt. Express*. 2006, Bd. 14, 6, S. 2323-2334.
- [89]. **Chou, S. Y.** Patterned Magnetic Nanostructures and Quantized Magnetic Disks. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 1997, S. Vol. 85, No. 4 (1997),652-671.
- [90]. **Wu, W., et al.** Large area high density quantized magnetic disks fabricated using nanoimprint lithography. *Papers from the 42nd international conference on electron, ion, and photon beam technology and nanofabrication*. 1998, Bd. 16, 6, S. 3825-3829.
- [91]. **Martin, J. I.** Ordered magnetic nanostructures fabrication and properties. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2003, S. Vol. 256, No. 1-3 (2003),449-501.
- [92]. **Glinsner, T.** Nanoimprint lithography enables patterned tracks for high-capacity hard disks. *Solid state technology*. 2005, S. Vol. 48, No. 3 (2005),51-54.
- [93]. **McClelland, G. M.** Nanoscale patterning of magnetic islands by imprint lithography using a flexible mold. *Applied physics letters*. 2002, S. Vol. 81, No. 8 (2002),1483-1485.
- [94]. **Hu, Z., et al.** Nanoscale Control of Polymer Crystallization by Nanoimprint Lithography. *Nano Letters*. 2005/09/01/, Bd. 5, 9, S. 1738-1743.
- [95]. **Cao, H.** Fabrication of 10 nm enclosed nanofluidic channels. *Applied physics letters*. 2002, S. Vol. 81, No. 1 (2002),174-176.

- [96]. **Guo, L. J., Cheng, X. und Chou, C.-F.** Fabrication of Size-Controllable Nanofluidic Channels by Nanoimprinting and Its Application for DNA Stretching. *Nano Letters*. 2004/01/01/, Bd. 4, 1, S. 69-73.
- [97]. **Hoff, J. Damon, et al.** Nanoscale Protein Patterning by Imprint Lithography. *Nano Letters*. 2004/05/01/, Bd. 4, 5, S. 853-857.
- [98]. **Falconnet, D., et al.** A Novel Approach to Produce Protein Nanopatterns by Combining Nanoimprint Lithography and Molecular Self-Assembly. *Nano Letters*. 2004/10/01/, Bd. 4, 10, S. 1909-1914.
- [99]. **Hu, W.** Effects of nanoimprinted patterns in tissue-culture polystyrene on cell behavior. *Journal of vacuum science & technology*. 2005, S. Vol. 23, No. 6 (2005),2984-2989.
- [100]. **Khang, D. -Y.** Sub-100 nm Patterning with an Amorphous Fluoropolymer Mold. *Langmuir*. 2004, S. Vol. 20, No. 6 (2004),2445-2448.
- [101]. **Cheng, X.** Room-Temperature, Low-Pressure Nanoimprinting Based on Cationic Photopolymerization of Novel Epoxysilicone Monomers. *Advanced materials*. 2005, S. Vol. 17, No. 11 (2005),1419-1424.
- [102]. **Xia, Y.** Soft Lithography. *Angewandte Chemie*. 1998, S. Vol. 37, No. 5 (1998),550-575.
- [103]. **Suh, D.** Rigiflex Lithography for Nanostructure Transfer. *Advanced materials*. 2005, S. Vol. 17, No. 12 (2005),1554-1560.
- [104]. **Kim, J. H.** Enhancing the Performance of Immersion Lithography Current Challenges and Materials. *Fotoporimã-Konwakai*. 2009, S. Vol. 22, No. 5 (2009),615-618.
- [105]. **Poon, J. K. S.** Soft Lithography Replica Molding of Critically Coupled Polymer Microring Resonators. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2004, S. Vol. 16, No. 11 (2004),2496-2498.
- [106]. **Xia, Y., et al.** Complex Optical Surfaces Formed by Replica Molding Against Elastomeric Masters. *Science*. 1996, Bd. 273, 5273, S. 347-349.
- [107]. **Xu, Q.** Approaching Zero Using Fractured Crystals in Metrology for Replica Molding. *American Chemical Society*. 2005, S. Vol. 127, No. 3 (2005),854-855.
- [108]. **Bartels, M., et al.** 3D nanoimprint templates with ultra-high vertical precision. 2009, Bd. Symposium K, S. A01859-03214.
- [109]. **Witzack, S., et al.** HochprÄazise Nanoimprint-Templates fÃ¼r 3D-Strukturen. *Galvanotechnik*. 2009, Bde. Band 100, Heft 10, S. 2376-2382.
- [110]. **Young, R. J. und Lovell, P. A.** *Introduction to polymers. 2.*, reprinted. Cheltenham : Thornes, 2000. S. 443. 0748757406.

- [111]. **Bürgel, R.** *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*. s.l.: Vieweg + Teubner in GWV Fachverlage GmbH, 2006. 3528231076.
- [112]. **Klein, B.** *Leichtbau-Konstruktion*. 7., verbesserte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007. 978-3-8348-9155-6.
- [113]. **Hirai, Y.** Application of Nano-imprint Lithography. *Fotoporim̄a-Konwakai*. 2002, S. Vol. 15, No. 3 (2002),475-480.
- [114]. **Sigloch, H.** *Technische Fluidmechanik*. s.l. : Springer Berlin, 2009. 3642030890.
- [115]. **Hirai, Y.** Polymer Science in Nanoimprint Lithography. *Fotoporim̄a-Konwakai*. 2005, S. Vol. 18, No. 4 (2005),551-558.
- [116]. **Sotomayor Torres, C. M.** *Alternative Lithography*. s.l.: Springer US, 2003. 0306478587.
- [117]. **Hirai, Y.** Study of the resist deformation in nanoimprint lithography. *Journal of vacuum science & technology*. 2001, S. Vol. 19, No. 6 (2001),2811-2815.
- [118]. **Hirai, Y.** Simulation and experimental study of polymer deformation in nanoimprint lithography. *Journal of vacuum science & technology*. 2004, S. Vol. 22, No. 6 (2004),3288-3293.
- [119]. **Rowland, H. D.** Polymer deformation and filling modes during microembossing. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2004, S. Vol. 14, No. 12 (2004),1625-1632.
- [120]. **Rowland, H. D., et al.** Impact of polymer film thickness and cavity size on polymer flow during embossing: toward process design rules for nanoimprint lithography. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2005, Bd. 15, 12, S. 2414-2425.
- [121]. *Simulations of nonuniform embossing: The effect of asymmetric neighbor cavities on polymer flow during nanoimprint lithography.* **Rowland, H. D.** 2005.
- [122]. **Micro Resist Technology GmbH.** Processing Guidelines: mr-UVCur06 – UV-curable Polymer System for UV-based Nanoimprint Lithography. Berlin (Germany) : s.n., 2007. data sheet.
- [123]. **Micro, Resist Technology GmbH.** EG-Sicherheitsdatenblatt: mr-UVCur06. 2007.
- [124]. **Endrulat, T.** Materials for NanoImprint Lithography. 2008. Flyer.
- [125]. **Vogler, M., et al.** Low viscosity and fast curing polymer sytem for UV-based Nanoimprint Lithography and its processing. *Proceedings of the Society of Photographic Instrumentation Engineers*. 2007, Bd. 6517, S. 651727.

- [126]. **Costner, E. A., et al.** Nanoimprint Lithography Materials Development for Semiconductor Device Fabrication. *Annual Review of Materials Research*. 2009, Bd. 39, 1.
- [127]. **Piner, R. D.** "Dip-Pen" Nanolithography. *Science*. 1999, S. No. 5402 (1999),661-662.
- [128]. **Wendel, M.** Nanolithography with an atomic force microscope for integrated fabrication of quantum electronic devices. *Applied physics letters*. 1994, S. Vol. 65, No. 14 (1994),1775.
- [129]. **Wendel, M.** Sharpened electron beam deposited tips for high resolution atomic force microscope lithography and imaging. *Applied physics letters*. 1995, S. Vol. 67, No. 25 (1995),3732-3734.
- [130]. **Cappella, B. und Sturm, H.** Comparison between dynamic plowing lithography and nanoindentation methods. *Journal of applied physics*. 2002, Bd. 91, 1, S. 506-512.
- [131]. **Binnig, G. K., Rohrer, H. und Vettiger, P.** Mass-storage applications of local probe array. 677,696 US.
- [132]. **Vettiger, P., et al.** The "millipede" - nanotechnology entering data storage. *Nanotechnology, IEEE Transactions on*. 2002, Bd. 1, 1, S. 39-55.
- [133]. **Eleftheriou, E., et al.** Millipede - a MEMS-based scanning-probe data-storage system. *Magnetics, IEEE Transactions on*. 2003, Bd. 39, 2, S. 938-945.
- [134]. **Huang, X. D.** Reversal imprinting by transferring polymer from mold to substrate. *Journal of vacuum science & technology*. 2002, S. Vol. 20, No. 6 (2002),2872-2876.
- [135]. **Kehagias, N.** Three-dimensional polymer structures fabricated by reversal ultraviolet-curing imprint lithography. *Journal of vacuum science & technology*. 2005, S. Vol. 23, No. 6 (2005),2954-2957.
- [136]. **Loo, Y. -L.** Interfacial Chemistries for Nanoscale Transfer Printing. *American Chemical Society*. 2002, S. Vol. 124, No. 26 (2002),7654-7655.
- [137]. **Kumar, A. und Whitesides, G. M.** Features of gold having micrometer to centimeter dimensions can be formed through a combination of stamping with an elastomeric stamp and an alkanethiol "ink" followed by chemical etching. *Applied physics letters*. 1993, Bd. 63, S. 2002-2004.
- [138]. **Loo, Y.-L., et al.** Additive, nanoscale patterning of metal films with a stamp and a surface chemistry mediated transfer process: Applications in plastic electronics. *Applied physics letters*. 2002, Bd. 81, 3, S. 562-564.
- [139]. **Zaumseil, J., et al.** Three-Dimensional and Multilayer Nanostructures Formed by Nanotransfer Printing. *Nano Letters*. 2003, Bd. 3, 9, S. 1223-1227.

- [140]. **Schmid, H., et al.** Preparation of Metallic Films on Elastomeric Stamps and Their Application for Contact Processing and Contact Printing. *Advanced Functional Materials*. 2003, Bd. 13, 2, S. 145-153.
- [141]. **Menard, E.** Improved Surface Chemistries, Thin Film Deposition Techniques, and Stamp Designs for Nanotransfer Printing. *Langmuir*. 2004, S. Vol. 20, No. 16 (2004),6871-6878.
- [142]. **Kim, C.** Nanolithography based on patterned metal transfer and its application to organic electronic devices. *Applied physics letters*. 2002, S. Vol. 80, No. 21 (2002),4051-4053.
- [143]. **Schmid, H.** Siloxane Polymers for High-Resolution, High-Accuracy Soft Lithography. *Macromolecules*. 2000, S. Vol. 33, No. 8 (2000),3042-3049.
- [144]. **Truong, T. T.** Soft Lithography Using Acryloxy Perfluoropolyether Composite Stamps. *Langmuir*. 2007, S. Vol. 23, No. 5 (2007),2898-2905.
- [145]. **Loo, Y. -L.** High-resolution transfer printing on GaAs surfaces using alkane dithiol monolayers. *Journal of vacuum science & technology*. 2002, S. Vol. 20, No. 6 (2002),2853-2856.
- [146]. **Felmet, K.** Patterning conductive copper by nanotransfer printing. *Applied physics letters*. 2004, S. Vol. 85, No. 15 (2004),3316-3318.
- [147]. **Ojima, K.** Printing electrode for top-contact molecular junction (3 pages). *Applied physics letters*. 2005, S. Vol. 87, No. 23 (2005),234110.
- [148]. **Colburn, M.** Step and flash imprint lithography: a new approach to high-resolution patterning. *SPIE proceedings series*. 1999, 3676 (2).
- [149]. **Colburn, M.** Development and advantages of step-and-flash lithography. *Solid state technology*. 2001, Bd. 44(7).
- [150]. **Bailey, T.** Step and flash imprint lithography Template surface treatment and defect analysis. *Journal of vacuum science & technology*. 2000, S. Vol. 18, No. 6 (2000),3572-3577.
- [151]. **Resnick, D. J., et al.** Imprint lithography: lab curiosity or the real NGL. 2003, Bd. 5037, S. 12-23.
- [152]. **Choi, B. J., et al.** Partially constrained compliant stages for high resolution imprint lithography. *Proceedings of DETC2000 ASME Design Engineering Technical Conference*. 2000, S. 10-13.
- [153]. **Choi, B. J., et al.** Design of orientation stages for step and flash imprint lithography. *Precision engineering*. 2001, S. Vol. 25, No. 3 (2001),192-199.
- [154]. **Bender, M.** High resolution lithography with PDMS molds. *Journal of vacuum science & technology*. 2004, S. Vol. 22, No. 6 (2004),3229-3232.

- [155]. **Carl Zeiss MicroImaging GmbH**. Axio Imager 2. [Online] 2009. [Zitat vom: 3. 2 2010.]
[http://www.zeiss.com/C1256D18002CC306/0/270AEBC54453A2CFC12575D1004588A6/\\$file/60-2-0037_e.pdf](http://www.zeiss.com/C1256D18002CC306/0/270AEBC54453A2CFC12575D1004588A6/$file/60-2-0037_e.pdf).
- [156]. **Ocean Optics**. OEM Data Sheet -- HR2000. [Online] [Zitat vom: 3. 2 2010.]
- [157]. **Heckele, M.** Review on micro molding of thermoplastic polymers. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2004, S. Vol. 14, No. 3 (2004),R1-R14.
- [158]. **EV Group Europe & Asia/Pacific GmbH**. EVG501 Manual Thermo Compression Bonder System. [Online] 2006.
http://www.evgtshop.com/epages/EVGroup.sf/en_IE/?ViewObjectID=6615.
- [159]. **SÜSS MicroTec**. Enhance the Capability of SUSS MA6/8 Mask Aligners using Nanoimprint Technology. [Online] 2008.
- [160]. **Präzisions Glas & Optik**. [Online] [Zitat vom: 9. Oktober 2008.] http://www.pgo-online.com/de/katalog/kurven/boro_kurve.html.
- [161]. **Micro Resist Technology GmbH**. mr-UVCur06-UV-curable Polymer System for UV-based Nanoimprint Lithography. 2008. Processing guidelines.
- [162]. **Völklein, F. und Zetterer, T.** *Praxiswissen Mikrosystemtechnik, Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 2. Auflage 2006. S. 68.
- [163]. **MicroChemicals**. *Lithografie, Theorie und Anwendung von Fotolacken, Entwicklern, Ätzchemikalien und Lösemittel*. 2007. S. 9-10, 12, 17.
- [164]. **Hecht, E.** *Optik*. s.l. : Oldenbourg Verlag, 4. Auflage 2005. S. 307-316, 655-657.
- [165]. **Bergmann und Schaefer**. *Optik: Wellen- und Teilchenoptik*. s.l. : deGruyter Verlag, 10. Auflage 2004. S. 69-71, 324-327.
- [166]. **electronic diener: Plasma-Surface-Technology**. Lexikon (Haftvermittler). [Online] [Zitat vom: 20. August 2008.] <http://www.plasma.de/de/lexikon/lexikon-eintrag-284.html>.
- [167]. **Chen, L.** Defect control in nanoimprint lithography. *Journal of vacuum science & technology*. 2005, S. Vol. 23, No. 6 (2005),2933-2938.
- [168]. **DiBiase, T.** Comprehensive defect analysis methodology for nano imprint lithography. *Microelectronic engineering*. 2007, S. Vol. 84, No. 5-8 (2007),989-993.
- [169]. **Köhler, F. und Wittzack, S.** INA. Kassel (Germany) : University of Kassel, 24.04.2007.
- [170]. **Schormann, J.** Akzente-Trendbarometer: Unternehmen spüren Kostendruck. [Online] 2009.
http://www.mckinsey.de/downloads/presse/2009/pm_091217_trendbarometer.pdf.

- [171]. **Clarke, P.** SEMI publishes standard for 450-mm wafers. [Online] 2010.
- [172]. **SÜSS MicroTec AG.** SCIL-Technologie für große Flächen. [Online] SÜSS MicroTec AG, 2010. http://www.suss.com/applications/nano_imprint_lithography/de/scil.
- [173]. **Micro, Resist Technology GmbH.** EG-Sicherheitsdatenblatt: mr-UVCur21-300nm. 2008.
- [174]. **Präzisions Glas & Optik GmbH.** BOROFLOAT® 33. [Online] 2010. [Zitat vom: 12. 1 2010.] <http://www.pgo-online.com/de/katalog/borofloat.html>.
- [175]. **Opsolution NanoPhotonics GmbH (Kassel).** Entwicklung eines Prototyps für ein Nano-Spektrometer- Modul. 2006.
- [176]. **Hillmer, H., et al.** Potential for micromachined actuation of ultra-wide continuously tunable optoelectronic devices. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2002, Bd. 75, 1, S. 3-13.
- [177]. **Micro, Resist Technology GmbH.** EG-Sicherheitsdatenblatt: Verdünner mr-T 1070. 2008.
- [178]. **Becker, H. G. O. und Beckert, R.** *Organikum*. 22., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. /. Weinheim : Wiley-VCH, 2004. S. 852. 3-52731148-3.
- [179]. **Wicks, Z. W.** *Organic coatings*. 3. ed. Hoboken, NJ : Wiley-Interscience, 2007. S. 722. Uni Kassel library: Sign.No. 95 Che DS 0052. 978-0-471-69806-7.
- [180]. **Neumaier, K.** *Entwicklung und Anwendung eines ellipsometrischen Mikroskops zur lokalen Dickenmessung ultradünner, mikrostrukturierter Adsorbatfilme auf Festkörperoberflächen*. München : Utz Wiss., 1999. S. 115. 3896755730.
- [181]. **Nishi, Y. und Nishi, D.** *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. New York : Dekker, 2000. S. 1157. 0824787838.
- [182]. **Willey, R. R.** *Practical Monitoring and Control of Optical Thin Films, Second Edition*. s.l. : Willey Optical Consultants, 2007. 0615181449.
- [183]. **J.A. WOOLLAM CO. INC.** VASE® Ellipsometer. [Online] 2010. [Zitat vom: 15. 1 2010.] <http://www.jawoollam.com/pdf/VASEBrochure2007.pdf>.
- [184]. **Spehr, T.** Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik. Kassel (Germany) : University of Kassel, 2007. Dissertation.
- [185]. **Messow, F. J.** *Entwicklung und Herstellung eines Vertical-Cavity*. Kassel : University of Kassel, 15.08.2008. S. 87, Diplom.
- [186]. **Tompkins, H. G. und Irene, E. A.** *Handbook of Ellipsometry*. Norwich (NY) : Andrew Publishing, 2005.

[187]. **Brezinski, M.** *Optical coherence tomography*. Amsterdam [u.a.] : Academic Press {[u.a.], 2006. 978-0-12-133570-0.

[188]. **Szabo, T., et al.** *Biomedical Imaging and Signal Processing Ebook Collection: Ultimate CD*. s.l. : Elsevier Science & Technology, 2008. 0123746361.

[189]. **Brugger, R.** *Der IT Business Case*. s.l. : Springer, Berlin, 2009. 3540938575.

[190]. **Minas, G., et al.** An array of Fabry-Perot optical-channels for biological fluids analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2004, Bd. 115, 2-3, S. 362-367.

[191]. **Irmer, S, et al.** Surface micromachined optical low-cost all-air-gap filters based on stress-optimized Si₃N₄ layers. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2005, Bd. 15, 4, S. 867.

Eigene Publikationen

X. Wang; A. Albrecht; S. Schudy; T. Voit; V. Daneker; K. Schultz; H. Mai; **F. Köhler**; S. Wittzack; M. Bartels; H. Hillmer: High-resolution, Low-cost Microsensors for Networked Sensing Systems: Optical Nanospectrometers with Nanoimprinted Cavities of Filter Arrays. In: INSS 2010 (2010).

A. Albrecht; H. Mai; V. Daneker; X. Wang; S. Schudy; T. Voit; K. Schultz; C. Woidt; O. Setyawati; **F. Köhler**; S. Wittzack; M. Engenhorst; M. Bartels; H. Hillmer: Optical Characterization of High-resolution Optical Nanospectrometers for Networked Sensing Systems. In: INSS 2010 (2010).

M. Bartels; X. Wang; T. Kusserow; **F. Koehler**; S. Wittzack; H. Hillmer: 3D nanoimprint templates with ultra-high vertical precision. In: ICMAT 2009 & IUMRS-ICA 2009 (2009)

S. Wittzack; **F. Köhler**; X. Wang; O. Setyawati; T. Voit; A. Albrecht; M. Engenhorst; S. Schudy; C. Woidt; M. Bartels; H. Hillmer: Hochpräzise Nanoimprint-Templates für 3D-Strukturen (invited). In: Galvanotechnik (2009), Band 100, Heft 10, S. 2376-2382

Bartels, Martin; Wittzack, Stefan; **Köhler, Florestan**; Wang, Xiaolin; Albrecht, Alla; Schudy, Sabrina et al.: High Vertical Resolution 3D Nanoimprint Technology for Nanophotonic Applications. In: MOE 2009/LEOS International Conference of Optical MEMS & Nanophotonics (2009).

M. Bartels; **F. Köhler**; S. Wittzack; X. Wang; H. Hillmer: Ultra precise Nanoimprint templates (invited). In: NanoS 03.08 (2008), S. 18-22

H. Hillmer, **F. Köhler**, and S. Wittzack: "Höchstauflösende 3D-NanoImprint-Stempel für Massenmarkt-Anwendungen," Hessen-Nanotech NEWS, no. 2, p. 6, 2008.

F. Köhler; S. Wittzack: Investigation of optical Sensorarrays based on nanoimprint structured Fabry-Pérot filters: design, application and project-oriented implementation. Diploma Thesis II *Elektrotechnik* (2007)

F. Köhler: Analyse von Managementkonzepten zur Steigerung von Unternehmenswerten. Diplomarbeit I *Wirtschaftsingenieur Elektrotechnik* (2006)

F. Köhler; S. Wittzack: Modellierung von akustischen und elastodynamischen Wellenausbreitungsproblemen im Zylinderkoordinatensystem. Diplomarbeit I *Elektrotechnik* (2004)

Danksagung

Das Erstellen dieser Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung von vielen Menschen. Diesen Menschen möchte ich meinen tief empfundenen Dank aussprechen.

Ins Besondere möchte ich Herrn Prof. Hillmer, meinem Mentor dafür danken, mir die Möglichkeit eröffnet zu haben am Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik zu promovieren. Seinem Vertrauen und persönlichen, über die Maßen großen Einsatz verdanke ich heute einen wichtigen Teil meiner persönlichen Entwicklung.

Ich möchte mich bei Prof. Witzigmann, Prof. Bangert und Prof. Claudi für die Übernahme der Begutachtung meiner Arbeit bedanken.

Bei Dr. Martin Bartels, meinem Betreuer entlang meines Promotionsweges möchte ich mich für seine exzellente Betreuung meiner Arbeit und seiner großen freundschaftlichen Unterstützung in den vielen langen Nächten im Institut bedanken.

Ich danke der Nanospektrometergruppe und im Einzelnen Xiaolin Wang, Tatjana Woit, Alla Albrecht, Karin Schultz, Hanh Hong Mai, Vadim Daneker, Onny Setyawati, Carsten Woitd, Sabrina Schudy und Markus Engenhorst für ihre Einsatzbereitschaft und dem besonderen Teamgeist in der Gruppe.

An dieser Stelle möchte ich den etablierten, wissenschaftlichen Säulen des Institutes Volker Viereck und Thomas Kusserow für ihre Bereitschaft danken neue Mitarbeiter wie mich damals offen zu empfangen und ihr großes Wissen mit ihnen zu teilen.

In gleicherweise bin ich dankbar für und tief beeindruckt von dem technischen Wissen und der großen Hilfe von Ina Kommallein, Dietmar Gutermuth und Jens Krumpholz sowie im organisatorischen Bereichen von Ina Wensch.

Unseren Partnern aus der Industrie Dr. Köcher und Carl Sandhagen danke ich für ihr Vertrauen in meine Fähigkeiten und die immerwährende Unterstützung beim Erreichen der Projektziele.

Herrn Dr. Hornung und Herrn Martin Sellhorst danke ich für eine mehr als gute Kooperation in den vergangenen Jahren.

Ich danke Frau Yanqi Wang für ihre Hilfe zu Beginn meiner Promotion und Andreas Jäkel dafür das er immer ein offenes Ohr für mich hat und mir mit seinem großen Wissen in so vielen Situationen zur Seite stand.

Ich danke einem sehr engen Freund Julian Sonksen für die Zeit, die wir am INA während der Arbeit und privat miteinander verbracht haben. Deine Lebensart ist so inspirierend für mich und hat mir eine neue Seite des Lebens gezeigt, die mich ein Stück vollkommener gemacht hat.

In tiefer Verbeugung aus Dankbarkeit und Freundschaft möchte ich hier über Stefan Wittzack schreiben. Ich danke Dir für über 10 Jahre des Beistandes und der Ermutigung, für die unzähligen Tage und Wochen, in denen wir zusammen durch das Studium schritten. Für die Erfolge, die wir zusammen erreichten und auch für den Zusammenhalt in schwierigen Zeiten. Dein starker Wille und Dein mutiges Voranschreiten im Leben beeindruckten mich noch heute und sind stets ein Vorbild für mich. Ich danke Dir für all das was Du mir gezeigt und mich gelehrt hast, ohne Dich wäre ich nicht an dieser besonderen Stelle meines Lebens, Danke!

Ich möchte meinen Eltern danken, die mich stets unterstützt haben und mir meinen Werdegang erst ermöglicht haben. Ich danke Euch für Euren Glaube an mich und Eure Investitionen in meine Ausbildung, ich liebe Euch.

Als letzten und deswegen ganz Besonderen möchte ich meinem Bruder Sebastian Köhler danken. Ich danke Dir das Du seit meiner Geburt Deine schützende Hand über mich hältst und immer für mich da bist. Ich bin stolz auf Dich.

Florestan Köhler

Über den Autor



Florestan Köhler wurde am 02.05.1979 in Kassel, Deutschland geboren. 2006 schloss er sein Studium des Wirtschaftsingenieurwesens Elektrotechnik an der Universität Kassel ab, bevor er 2007 sein Studium der Elektrotechnik - ebenfalls an der Universität Kassel - erfolgreich beendete. Während des Studiums arbeitete er als studentische Hilfskraft im Fachgebiet Nachrichtentechnik sowie als Lehrkraft in einem Lernhilfeinstitut und führte Praktika in der EAM - Hauptverwaltung und einer Rechtsanwalts- und Notariatskanzlei durch. Mitte 2007 begann er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik seine Doktorarbeit auf dem Gebiet des Nanospektrometers. Zu Beginn 2008 leitete er als einer von zwei Projektleitern die Nanospektrometergruppe. Parallel zu seiner wissenschaftlichen Arbeit im Bereich der Nanoimprint-Technologie erwarb er den DGQ-Quality Systems Manager Junior im Jahre 2009.

