

Optische Systeme (14. Vorlesung)

Martina Gerken
05.02.2007

Inhalte der Vorlesung

1. Grundlagen der Wellenoptik
2. Abbildende optische Systeme
3. Optische Messtechnik
4. Biomedizinische optische Systeme
5. Optische Materialbearbeitung
6. Optische Datenspeicherung -> Optik in der Datenspeicherung
7. Optische Informationstechnik (letzte Vorlesung)
8. Mikro- und Nanooptische Systeme
 - 8.1 Klassifizierung optischer Komponenten
 - 8.2 Herstellung optischer Komponenten von Makro bis Mikro
 - 8.3 Mikrooptische Systeme
 - 8.4 Nanooptik

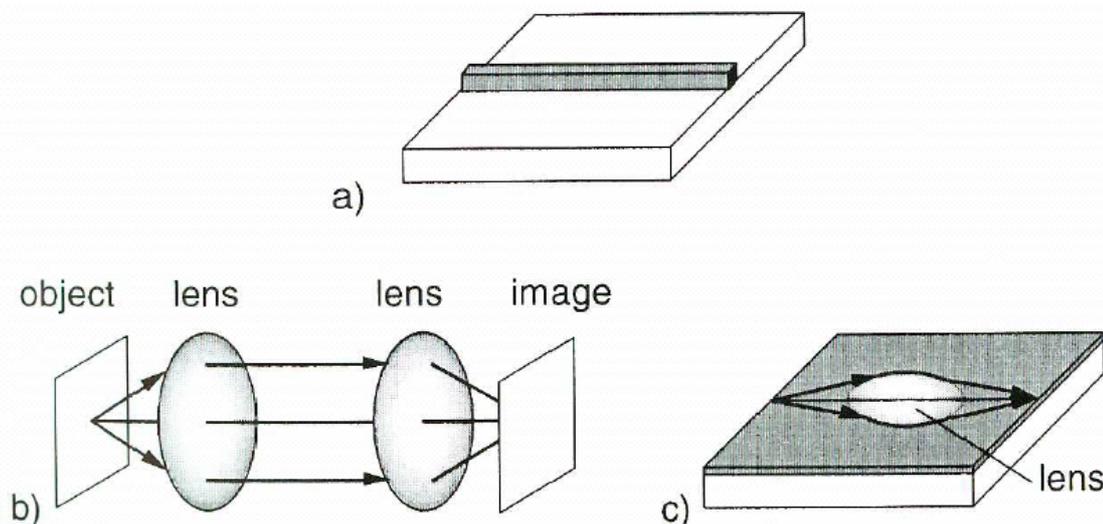
- **Definition von Mikrooptik: Herstellung mit Mikrotechnologie**
 - Minimale Merkmalsgröße im Mikrometerbereich (Gesamtbauelement kann größer sein)
 - Meistens planare, lithographische Herstellungsverfahren
 - Parallele Herstellung vieler Komponenten

technology	processing techniques	mounting techniques
classical optics ("macrooptics")	grinding, polishing, diamond turning	fine mechanics
"miniature optics"	grinding, polishing, gradient index optics, LIGA process (components), fiber pulling	miniaturized mechanics, micromechanics
"microoptics"	lithographic: optical, electron beam, X-ray, LIGA non-lithographic: diamond turning, microjet printing	micromechanics, integration on single substrate bonding techniques

Tab. 1.1: Areas of optics defined by their fabrication and mounting techniques.

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

- **Optische Systeme können als Wellenleiteroptiken (a) oder als Freistrahloptiken (b) oder als Kombination (c) realisiert werden**
 - Anwendung bestimmt, welche Realisierung die beste ist

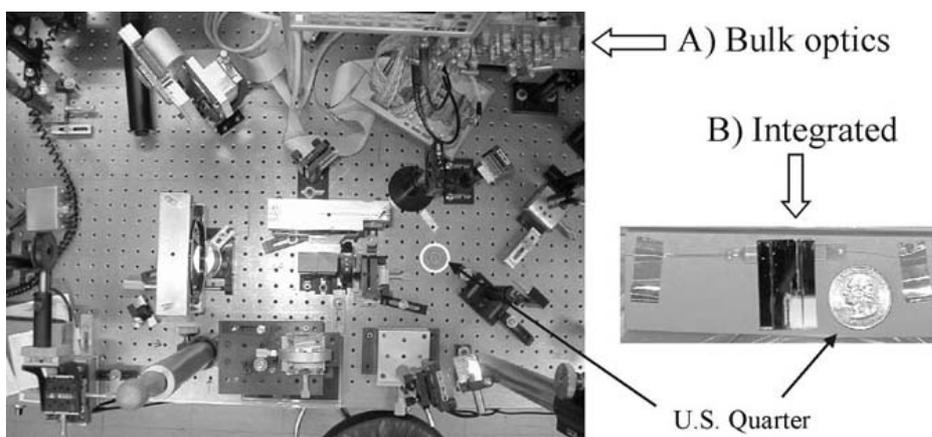


Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

Diskrete Optik und integrierte Optik

	waveguide optics	free-space optics
discrete mounting	fiber optics lenses	beam splitters etc.
integrated optics	IGWO	IFSO

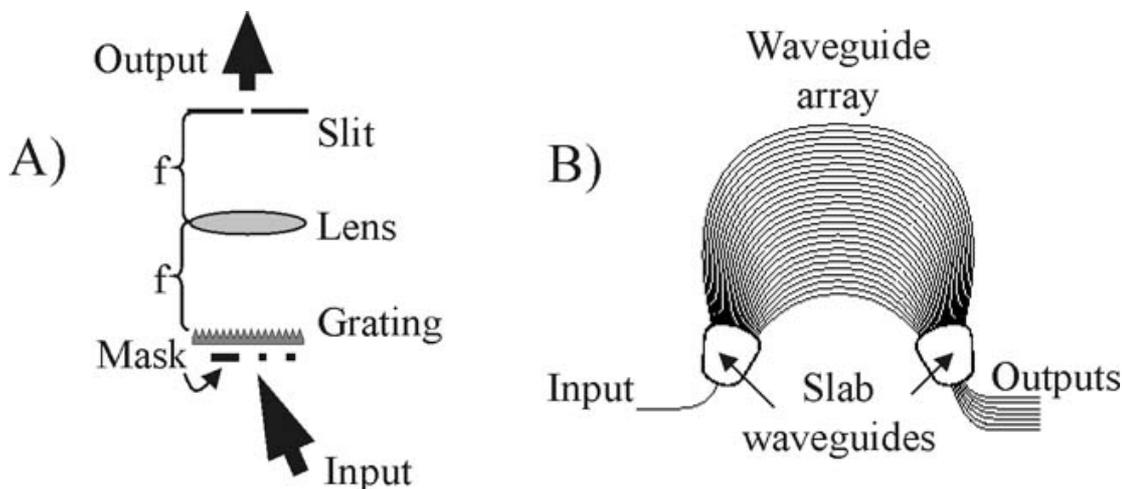
Tab. 1.2: Classification of optics. IGWO - integrated waveguide optics, IFSO - integrated free-space optics.



Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999; Leaird/Shen/Weiner; LEOS Newsletter, Dezember 2000

Integrierte Optik

- Ziel der Integrierten Optik ist es, verkleinerte optische Systeme mit hoher Funktionalität (Lichtquellen, Wellenleiter, Strahlteiler, Intensitäts- oder Phasen-Modulatoren, Filter, Schalter usw.) auf einem Substrat unterzubringen
 - Beispiel: DST pulse shaper



Quelle: Leaird/Shen/Weiner; LEOS Newsletter, Dezember 2000

- Optische Funktionen können mit Hilfe von Brechung, Spiegelung oder Beugung realisiert werden bzw. über eine Kombination

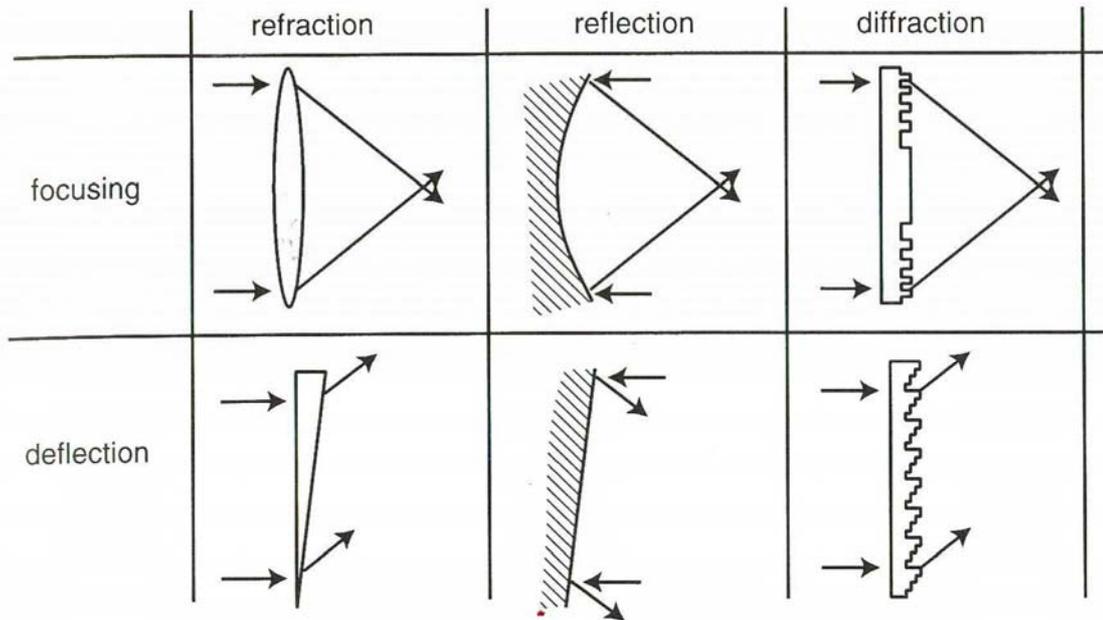


Fig. 1.2: Optical functions and their implementation.

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

- Lichtlenkung durch Brechung

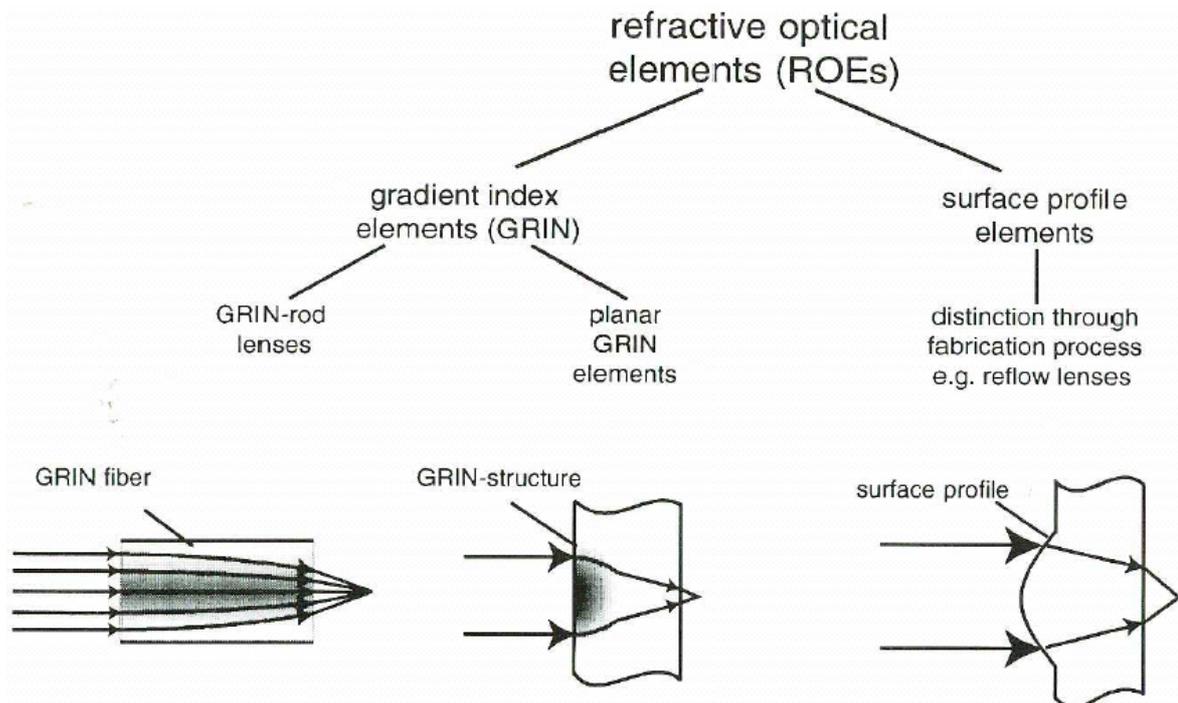


Fig. 1.3: Classification of refractive optical elements.

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

- Lichtlenkung durch Beugung und Interferenz
 - Funktionsweise entspricht computergeneriertem Hologramm (CGH)
 - DOE wird so entworfen, dass gewünschte Lichtlenkung erreicht wird

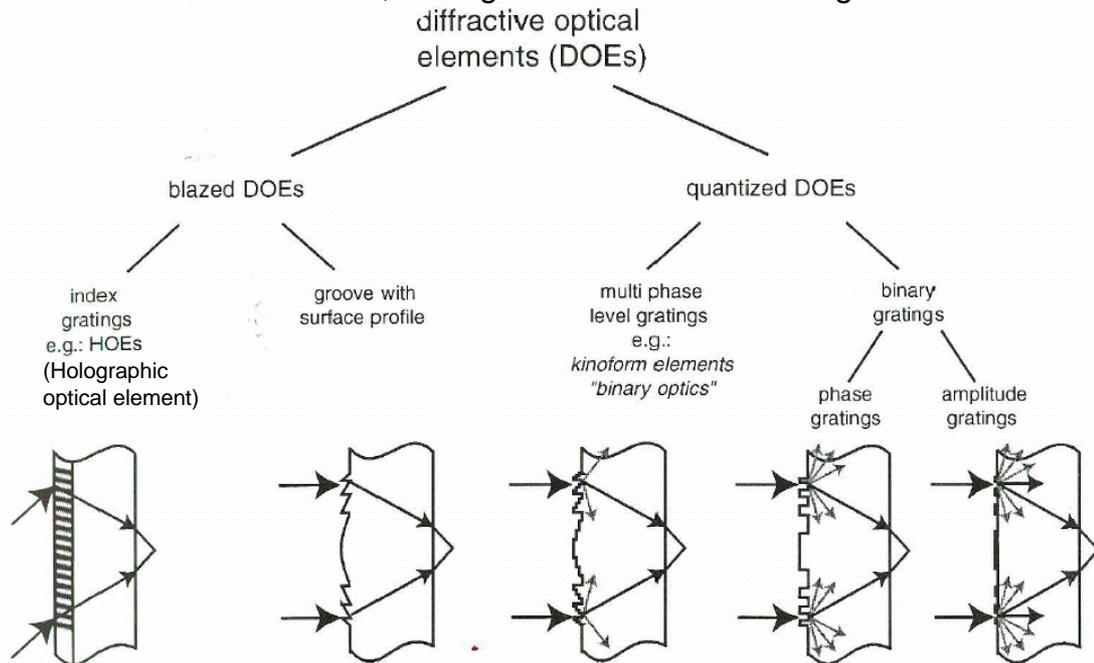


Fig. 1.4: Classification of diffractive optical elements.

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Refraktive Optiken <ul style="list-style-type: none"> – Lichtlenkung durch Brechung – Beispiel: Konkavlinse – Funktioniert für breiten Wellenlängenbereich – Fresnel-Gleichung zentral – Hohe Abbildungsqualität | <ul style="list-style-type: none"> • Diffraktive Optiken <ul style="list-style-type: none"> – Lichtlenkung durch Beugung und Interferenz – Beispiel: Beugungsgitter – Funktioniert nur für Designwellenlänge – Bragg-Gleichung zentral – Mehrere Funktionalitäten können in einem DOE vereint werden – Leicht und klein – Auf beliebigen Substratmaterialien und – formen herstellbar |
|--|--|

1. Grundlagen der Wellenoptik
2. Abbildende optische Systeme
3. Optische Messtechnik
4. Biomedizinische optische Systeme
5. Optische Materialbearbeitung
6. Optische Datenspeicherung -> Optik in der Datenspeicherung
7. Optische Informationstechnik (letzte Vorlesung)
8. Mikro- und Nanooptische Systeme
 - 8.1 Klassifizierung optischer Komponenten
 - 8.2 Herstellung optischer Komponenten von Makro bis Mikro
 - 8.3 Mikrooptische Systeme
 - 8.4 Nanooptik

- Zeiss: 114 optische Glastypeen unterschiedlicher Brechkraft, Farbzerstreuung (Dispersion), Gewicht und chemischer Zusammensetzung
 - einige fast so schwer wie Stahl, andere teurer als Gold
- Presslinge für Serienfertigung
 - Glas geschmolzen und in Form gepresst
- Glasblöcke für Fertigung von Prototypen und Sonderteilen
 - Mit cdiamantbesetztem Werkzeug in Form geschnitten



Glaslinsenherstellung: Schleifen

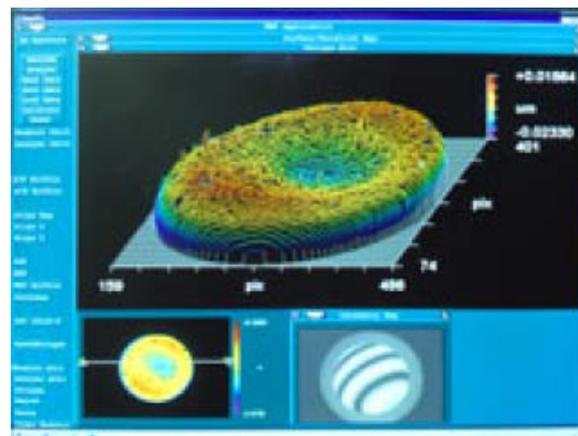
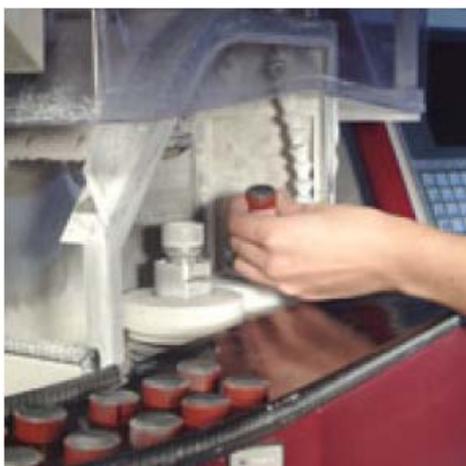
- Schleifen des rohen Glases mit mehrachsiger CNC-Maschine, um ersten Radius beider Linsenoberflächen herzustellen
 - 1. Schritt: ca. 1 mm Glas abgetragen mit Abweichung von 5 μm vom Normradius.
 - 2. Schritt (Feinschleifen): ca. 1/10 mm Glas abgetragen mit Abweichung von 1 μm vom Normradius



Quelle: <http://www.zeiss.com>

Glaslinsenherstellung: Polieren

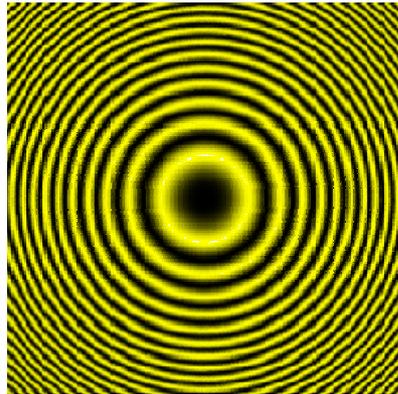
- Polieren der Linsen mit CNC-Maschinen
 - Vorgang dauert 4 bis 25 Minuten, je nach Durchmesser der Linse und Empfindlichkeit der Glasart
 - Polierte Glasfläche nach Newtonschen Ringen optimiert
 - Unterschied von einem Newtonschen Ring zum nächsten ca. 300 nm
- Interferometrische Überprüfung der Oberfläche während und nach dem Polieren



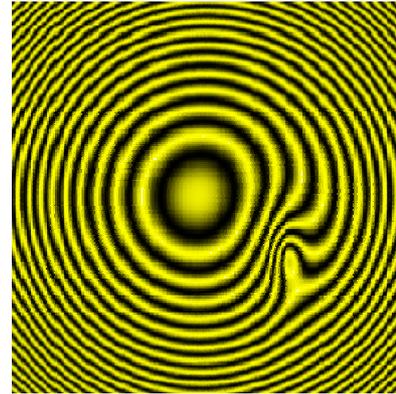
Quelle: <http://www.zeiss.com>

Einschub: Newtonsche Ringe

- Newtonsche Ringe durch Interferenz von Reflexion an Linse und Reflexion an Glasplatte



Ohne Fehler



Mit Fehler

Quelle: wwwex.physik.uni-ulm.de

Glaslinsenherstellung: Zentrieren

- Beim Zentrieren der Linsen wird optische und mechanische Achse der Linsen ab gestimmt.
 - Randzylinder jeder Linse werden mit Diamantwerkzeug bearbeitet, um vorgegebenen Durchmesser und Richtung zu erhalten
 - Passungen im Bereich von h6 (Abweichung im μm -Bereich)



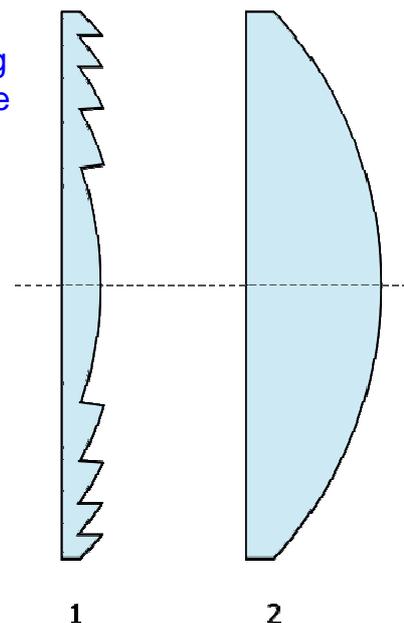
Quelle: <http://www.zeiss.com>

- **Ultraschall-Reinigung von Linsen**
 - Zeiss: 15 verschiedenen Reinigungsstationen
 - Reinigungsmittel auf jeweilige Glasart abgestimmt
- **Eventuell Bedampfung der Linsenoberfläche mit entspiegelnden Beschichtungen**

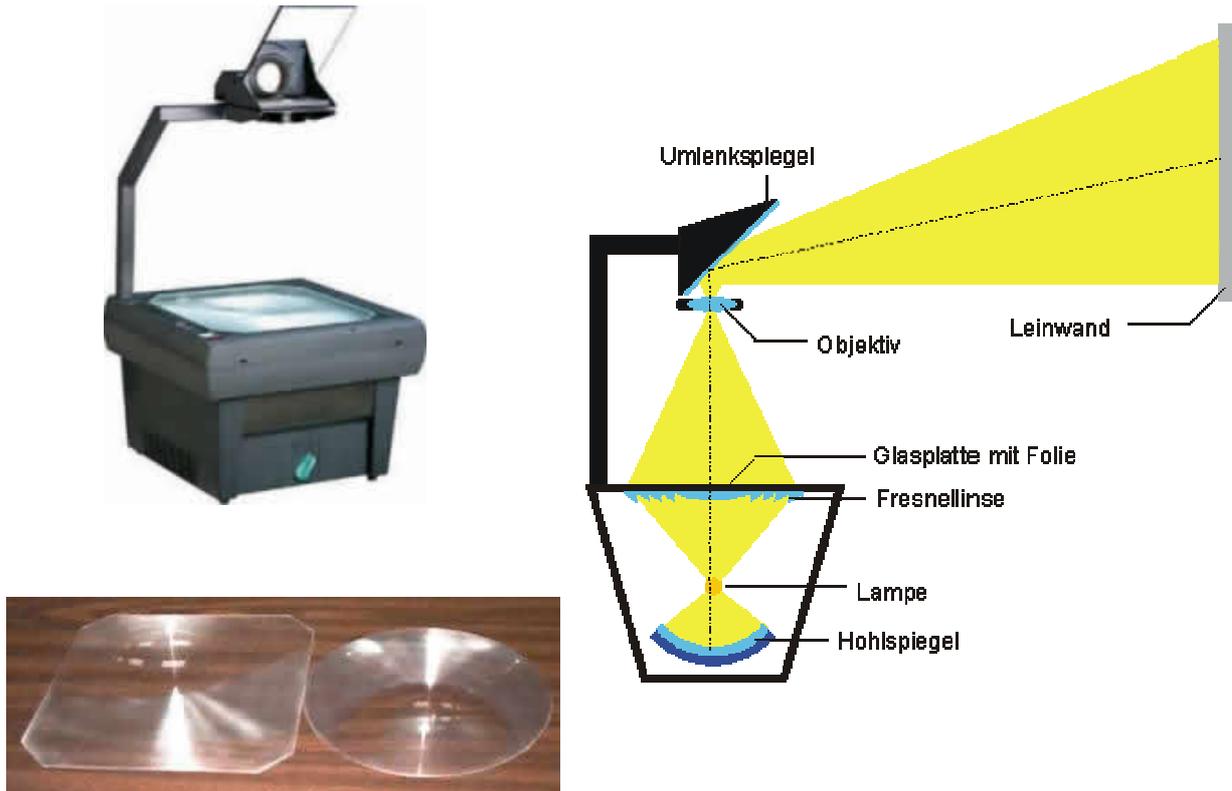


Quelle: <http://www.zeiss.com>

- **Licht wird nur an Linsenoberfläche gebrochen, Brechungswinkel unabhängig von der Dicke**
- **Verringerung des Linsenvolumens durch Aufteilung in ringförmige Bereiche und Verringerung der Dicke**
 - Billige Fresnellinsen aus Kunststoff gepresst
- **Große Linsen mit kurzer Brennweite ohne das Gewicht und Volumen von Glaslinsen möglich**
- **Bildqualität durch Stufenstruktur beeinträchtigt**



Quelle: <http://de.wikipedia.org>



Quelle: <http://leifi.physik.uni-muenchen.de>

- Einsatzbereiche
 - Barcode Scanner
 - Optik im DVD Spieler
 - Sensor im Tintenstrahldrucker
 - Optische Maus
 - Linsen in der LED Beleuchtungsoptik,
 - Kameraobjektiv im Mobiltelefon



ABBILDUNG 1: Optik für LEDs.

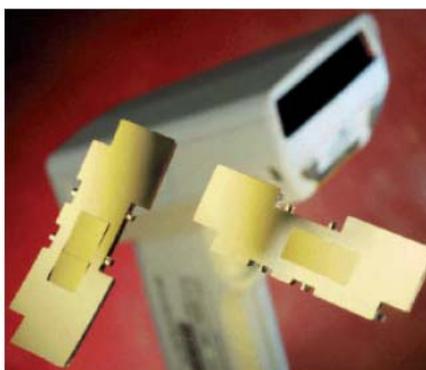


ABBILDUNG 2: Barcode Scanner mit Kunststoffspiegeloptik.



ABBILDUNG 3: Objektiv für ein Mobiltelefon.

Kunststoffoptiken: Herstellung

- **Qualitativ hochwertigere Anwendungen von Kunststoffoptiken durch neue technologische Entwicklungen**
 - Diamantdrehtechnik ermöglicht Herstellung von "optischen" Formen (Werkzeugen) in Stahl mit Oberflächenqualitäten von 2 nm RMS (Rauheit) und Formgenauigkeiten von 0.5 µm
 - Vorder- und Rückfläche vom Werkzeug weniger als 5 µm dezentriert
 - Genauigkeit kann mit geeignetem Spritzgussprozess auf Kunststoffoptik übertragen werden
- **Am Anfang höhere Kosten für Werkzeuge, daher erst ab Stückzahl von mehreren tausend eingesetzt**
 - Werkzeugkosten einmalig, Materialpreis relativ gering
 - In Großserie ist Plastikoptik sehr kostengünstig
 - Z.B. Herstellungskosten für Kameraoptik für Mobiltelefone unter 1,50 Euro (Stückzahl mehrere Millionen Stück pro Jahr)

Quelle: de Schipper/Bäumer, Optik & Photonik, S. 46, Oktober 2006

Kunststoffoptiken: Nachteile

- **Relativ eingeschränkte Materialauswahl**
- **Niedrige Verformungstemperatur zwischen 70° und 120° Celsius**
- **Lineare Ausdehnung und Brechzahländerung mit Temperatur ca. Faktor 10 höher als bei Glasoptiken**
- **Hohe Feuchtigkeitsaufnahme**

Eigenschaft	Einheit	Bedingung	Polymer							
			Markenname							
			PMMA	PC	COP	COP	COC	COC	COP	PSU
			Acrypet®	Panlite®	Zeonex®	Zeonex®	Apel®	Topas®	Arton®	Udel®
			VH	AD5503	E48R	330R	5014DP	5013	FX4727	P-1700
			Mitsubishi rayon	Teijin Chem.	Zeon	Zeon	Mitsui Chem.	Ticona	JSR	Solvay
Spezif. Gewicht	–	–	1.19	1.2	1.01	1.01	1.04	1.02	1.06	1.24
Wasser Absorption	%	–	0.3	0.2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.05*	0.3
Licht-durchlässigkeit	%	Dicke: 3 mm	92.5	89	92	92	90	92	93	84
Brechungsindex	–	–	1.49	1.585	1.53	1.509	1.54	1.53	1.523	1.634
Abbe Zahl	–	–	58	30	56	56	56	56	52	23
Glass Übergangstemperatur	°C	–	106*	147	139	123	135	136	120	190
Verformungstemperatur (belastet)	°C	1.80 MPa	101	124	122	103	125	123	110	174
Linearer Ausdehn. Koeffizient	cm/cm°C	–	6×10 ⁻⁵	7×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁵	9×10 ⁻⁵	–	6×10 ⁻⁵	9×10 ⁻⁵	5.4×10 ⁻⁵

Quelle: de Schipper/Bäumer, Optik & Photonik, S. 46, Oktober 2006

Kunststoffoptiken: Vorteile

- Kunststoffoptik in (beliebiger) Form realisierbar
 - Konventionelle Optik durch Herstellungsverfahren meistens sphärisch

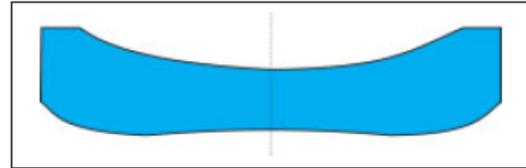


ABBILDUNG 6: Typische, asphärische Linse in einem Objektiv einer Kamera für Mobiltelefone.

- Integration von Optik und Mechanik beim Spritzgussverfahren möglich
 - Z.B. integrierte Optomechanik bei der sowohl mechanische Referenzen als auch verschiedene optische Funktionen miteinander in einer Komponente verbunden

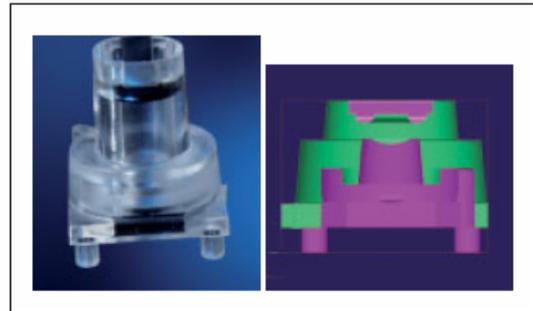


ABBILDUNG 5: Integrierter Sensorkopf [3].

- Realisierung mikrooptischer Komponenten möglich

Quelle: de Schipper/Bäumer, Optik & Photonik, S. 46, Oktober 2006

Mikrooptik: Masterherstellung

- Meistens Lithographie, um Master herzustellen

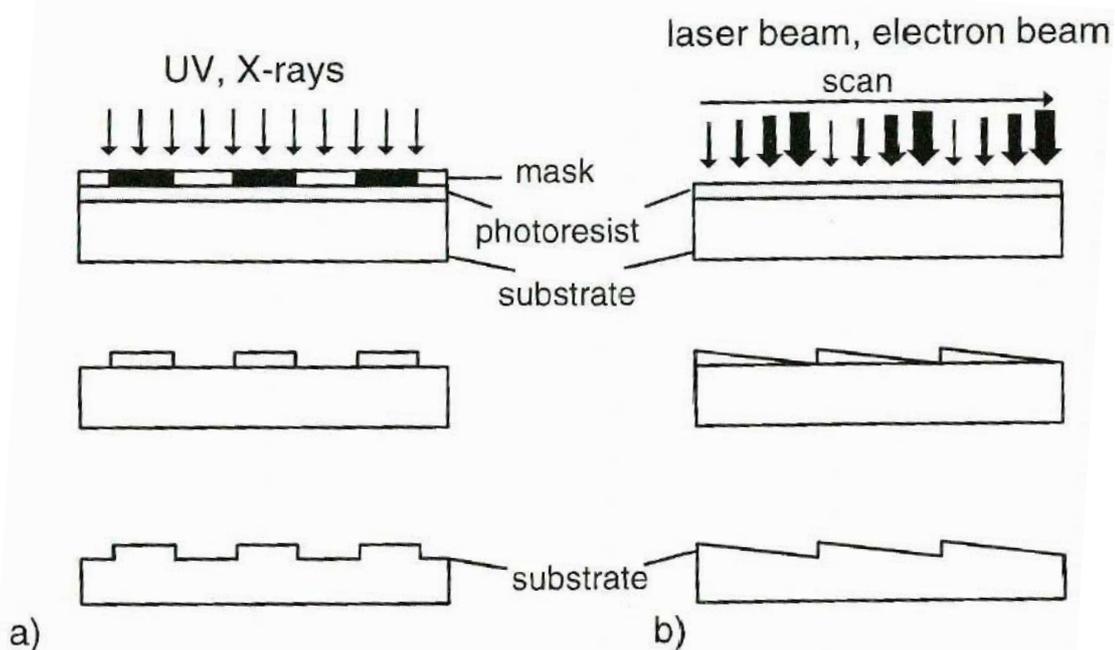


Fig. 3.1: Approaches to lithographic fabrication: a) mask lithography, b) scanning lithography.

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

Mikrooptik: Vervielfältigung

- Wie Kunststoffoptik im Allgemeinen werden auch Mikrooptiken durch Vervielfältigung kostengünstig

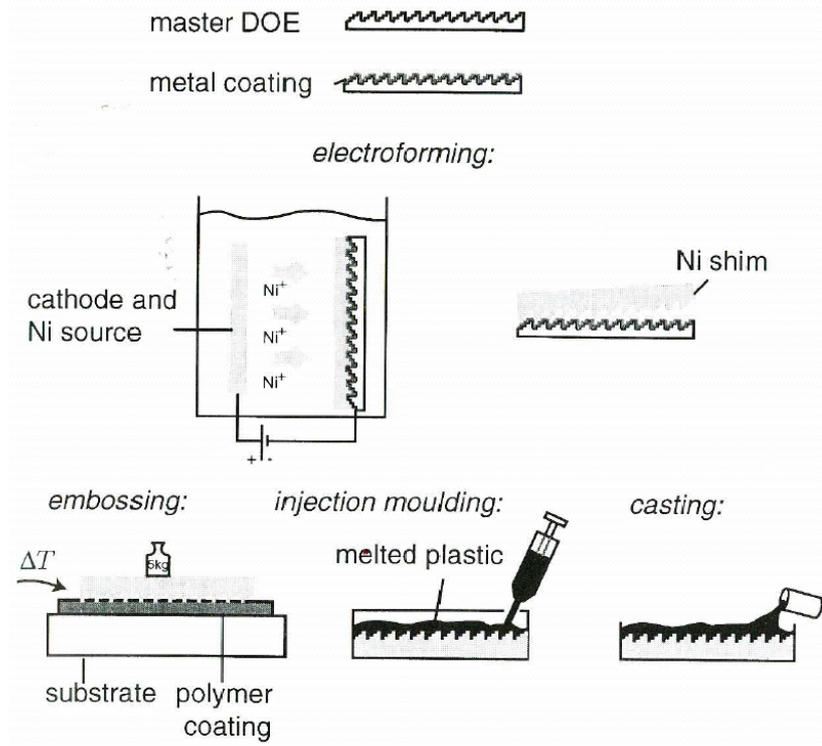
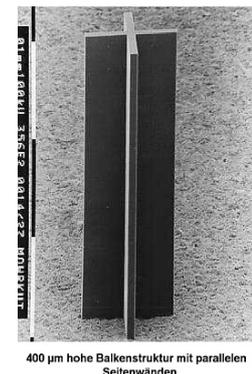
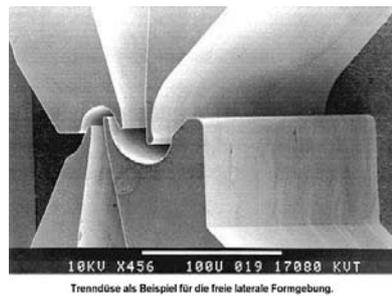
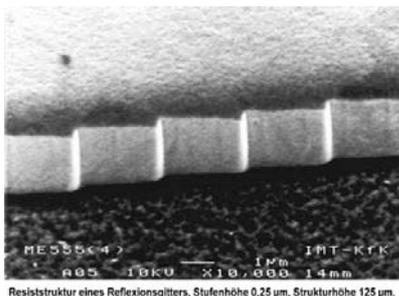


Fig. 3.16: The main processing steps for the replication of microoptical components.

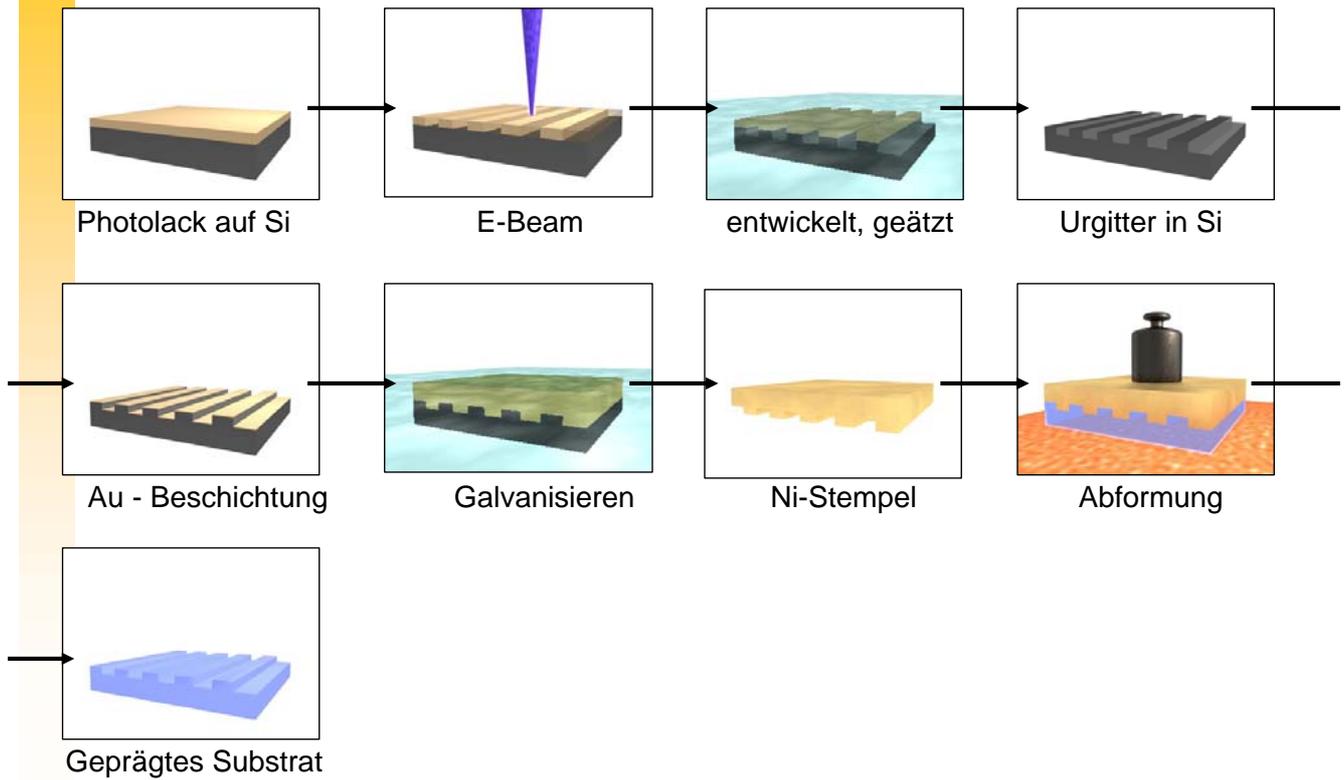
Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

LIGA-Verfahren

- LIGA**
 - Röntgentiefenlithographie
 - Galvanik
 - Abformung
- Höhen von mehr als 1 mm
- Laterales Auflösungsvermögen bis zu 0,2 μm
- Aspektverhältnisse von freistehenden Einzelstrukturen bzw. Detailstrukturen über 50 bzw. 500
- Oberflächenqualität im Submikrometerbereich mit Rauigkeiten von 30 nm

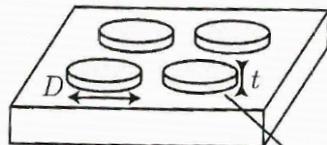


Quelle: www.fzk.de

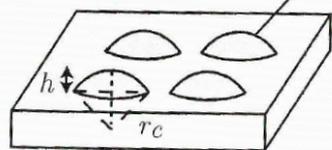


- Lithographische Strukturierung mit anschließendem Aufschmelzen, um sphärische Form zu erhalten

1) lithographic fabrication of photoresist cylinders



2) reflow: photoresist melting



3) reactive ion etching into the substrate



substrate material (e.g., glass)

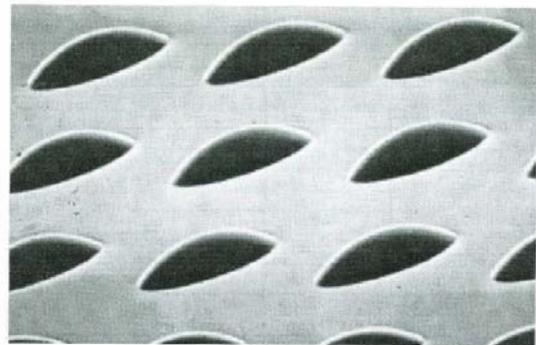


Fig. 4.3: REM photograph of an array of melted photoresist microlenses (diameter: 100 μm).

Fig. 4.1: The reflow fabrication process for refractive lenses.

Beispiel: Refraktive Mikrolinsen

- Eigenschaften der Mikrolinsen durch Herstellungsparameter bestimmt

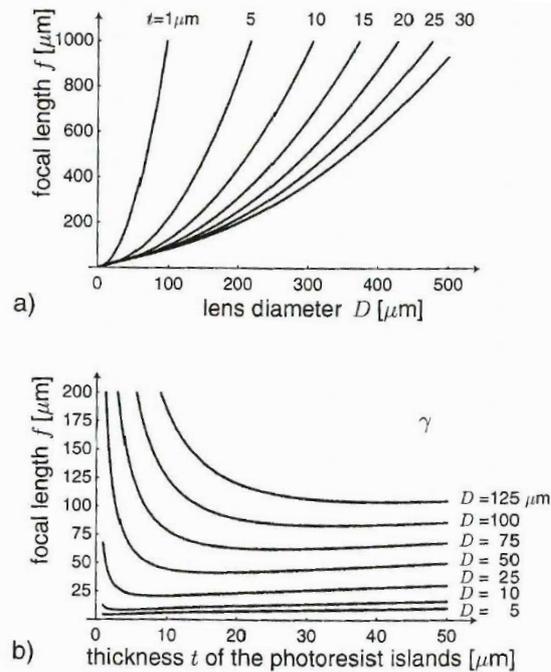


Fig. 4.2: Microlenses fabricated by melting of photoresist. Simulation of: a) the focal length f depending on the diameter D of the photoresist cylinders (thickness t as a parameter); b) the focal length f as a function of the thickness t of the initial coating (diameter D as a parameter)

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

Beispiel: Diffraktive Linsen

- Fresnelsche Zonenplatte ist diffraktive Linse
- Herstellung z.B. mit Elektronenstrahlithographie und anschließendem Heißprägen

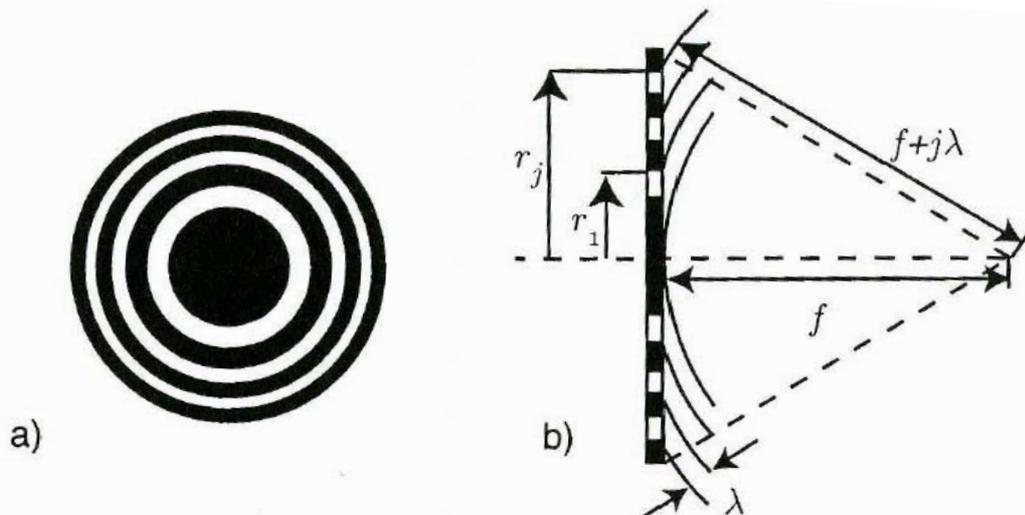
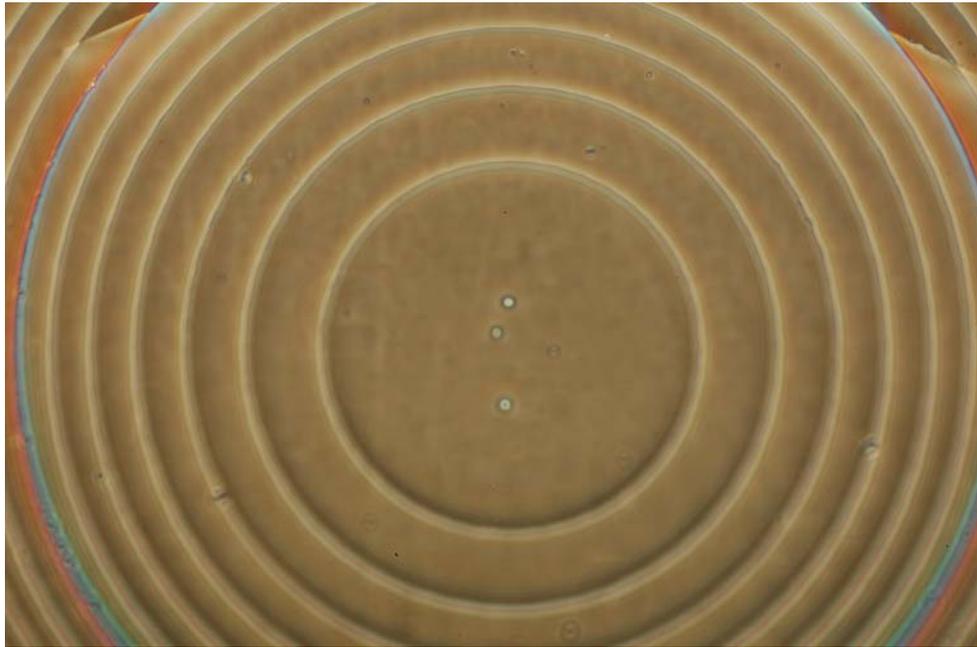


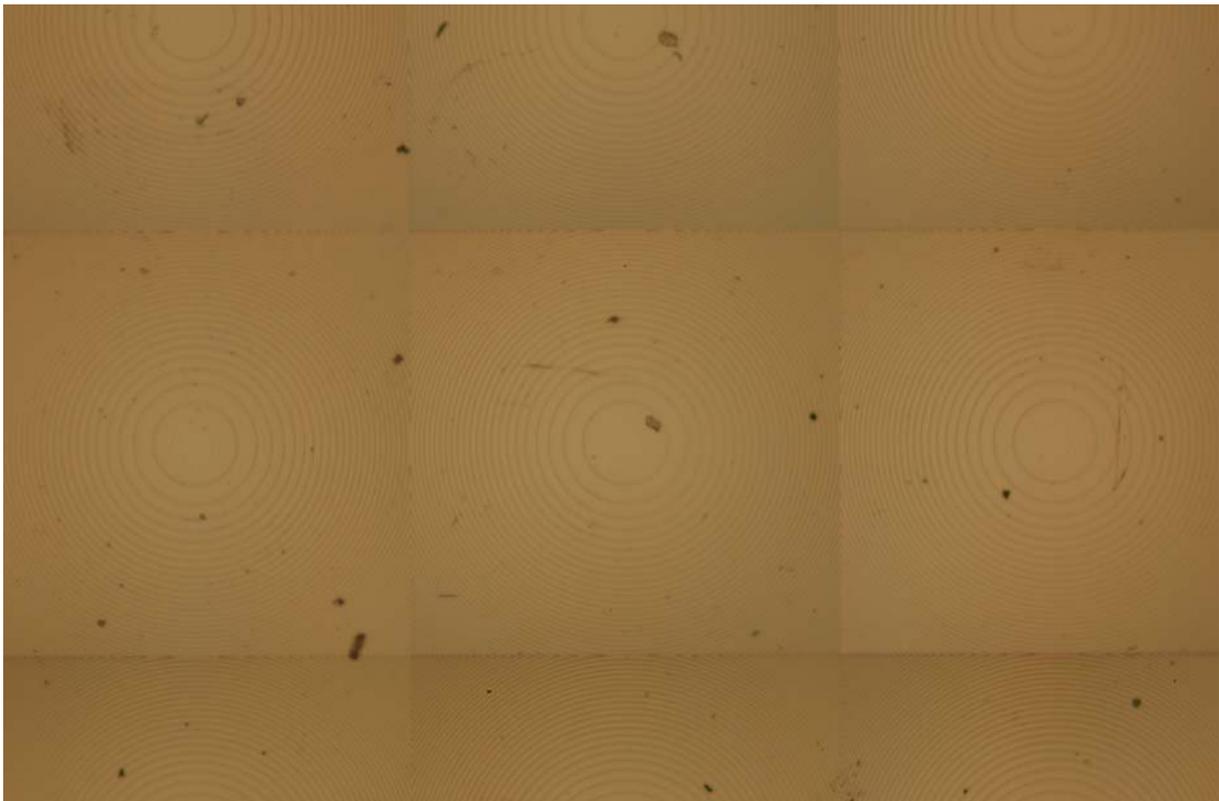
Fig. 5.15: Arrangement of the annular rings in Fresnel lenses: a) texture of the Fresnel zone plate; b) optical path differences between light rays from different zones.

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

- Aufnahme 20x mit Phasenkontrast



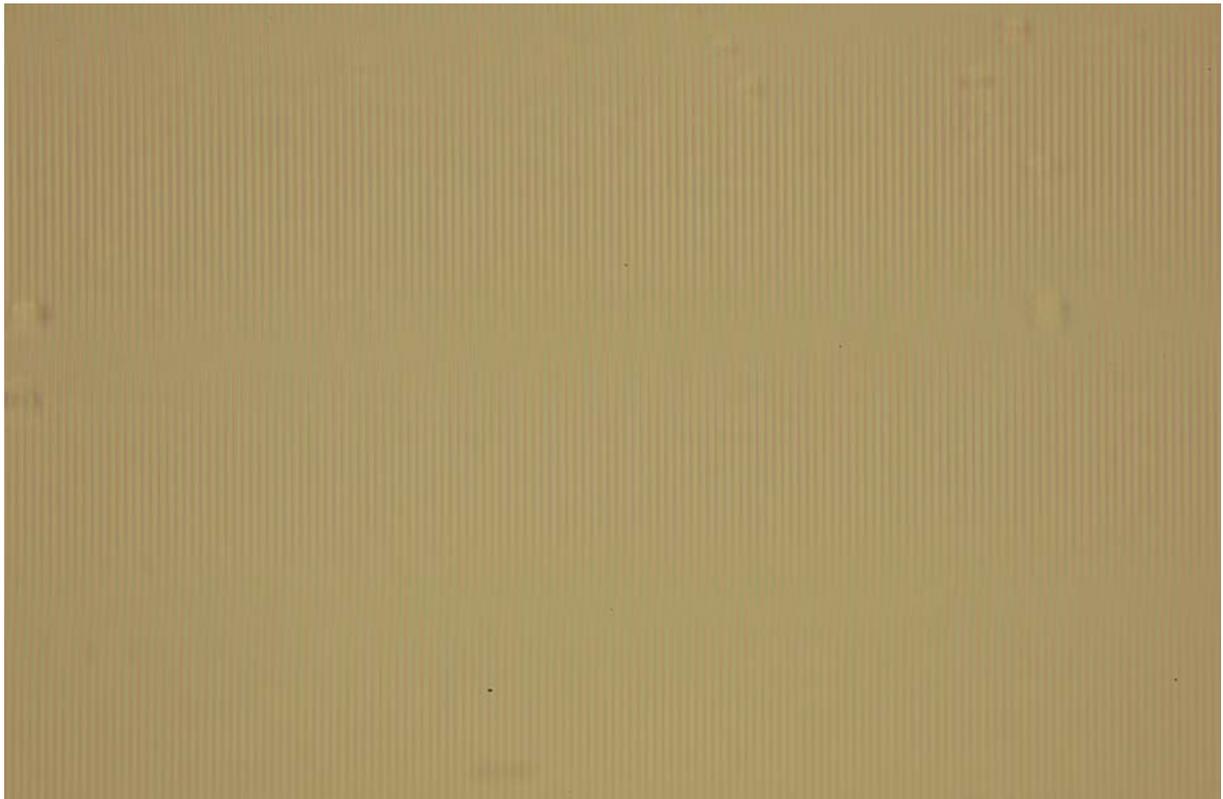
- Aufnahme 4x



- Aufnahme 4x

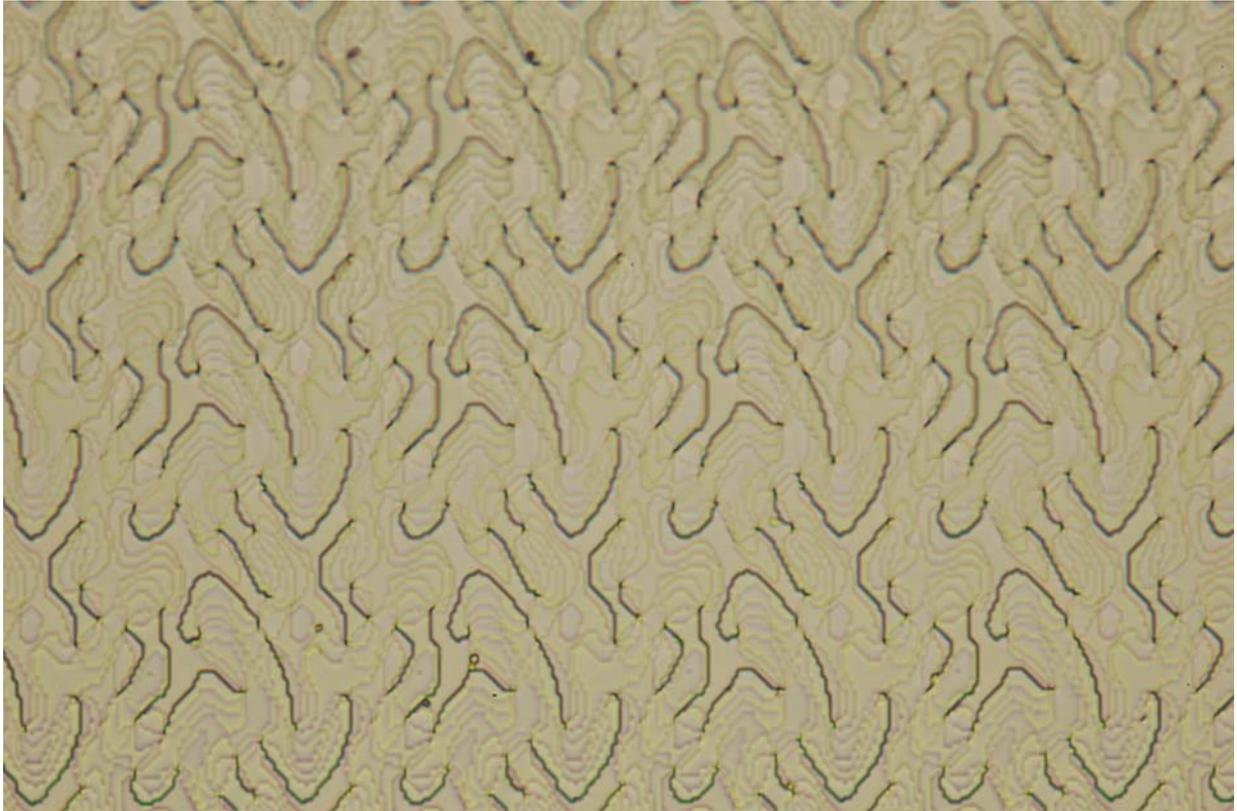


- Aufnahme 40x



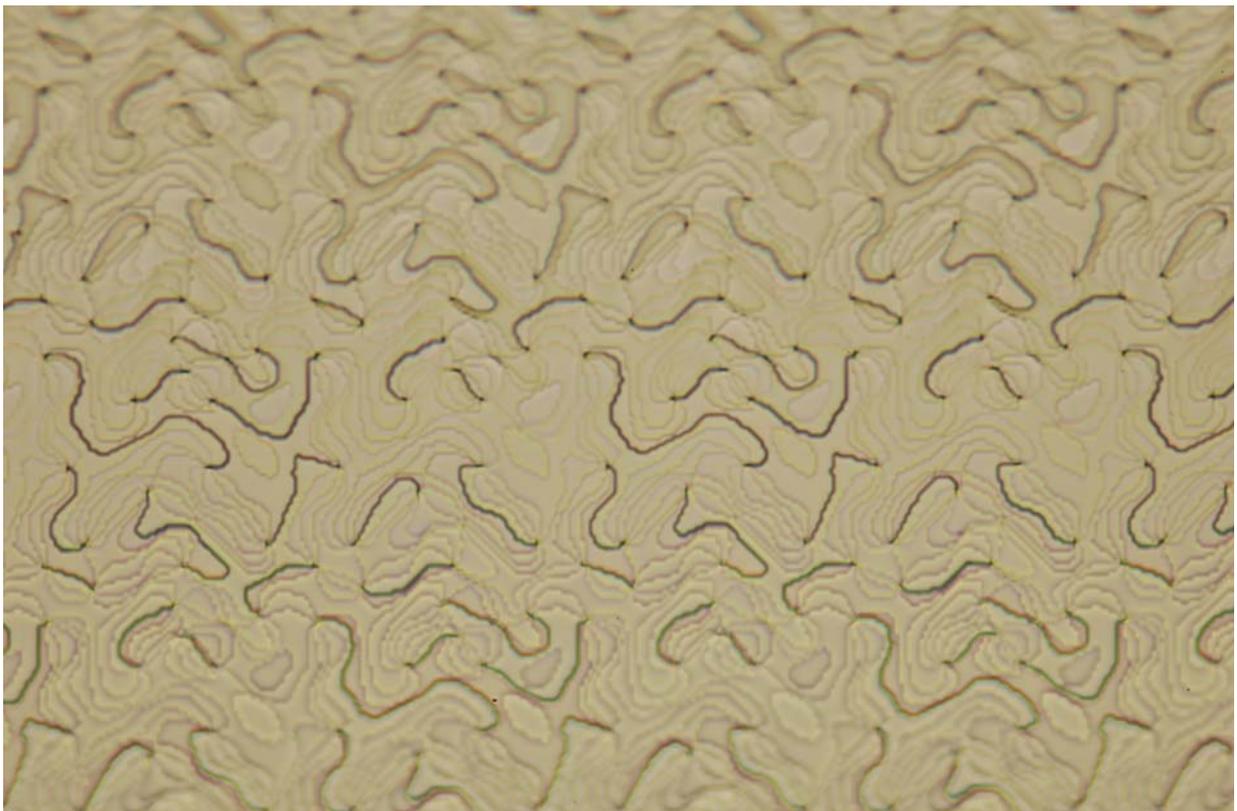
Beispiel: Spot Array Generator 7 x 11

- Aufnahme 40x



Beispiel: Spot Array Generator 8 x 8

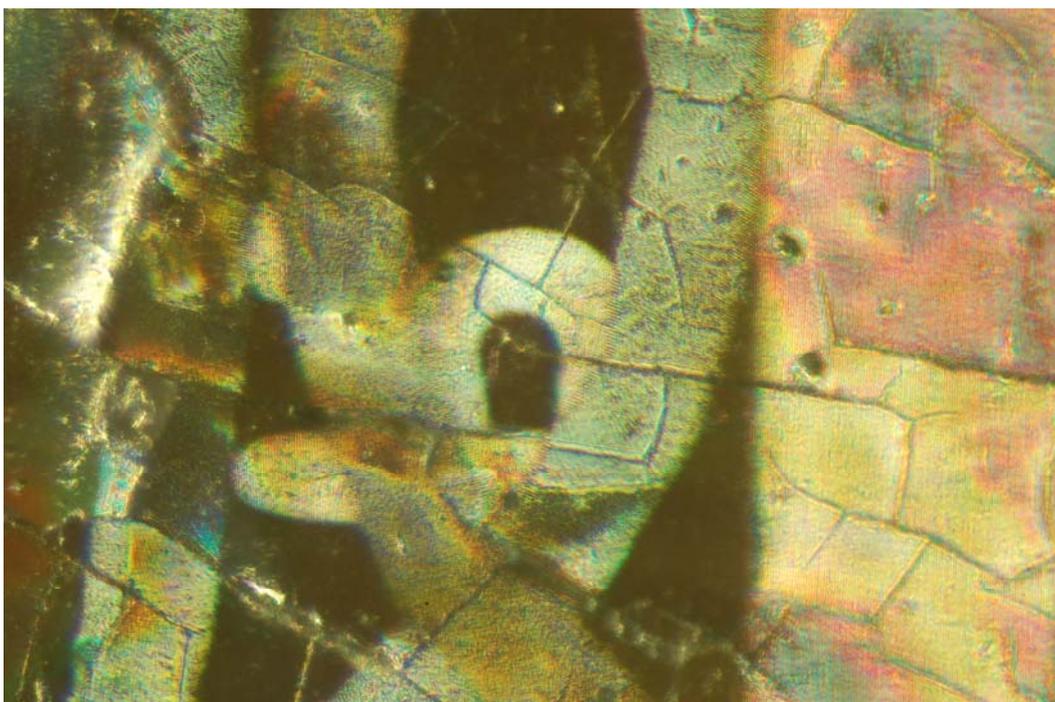
- Aufnahme 40x



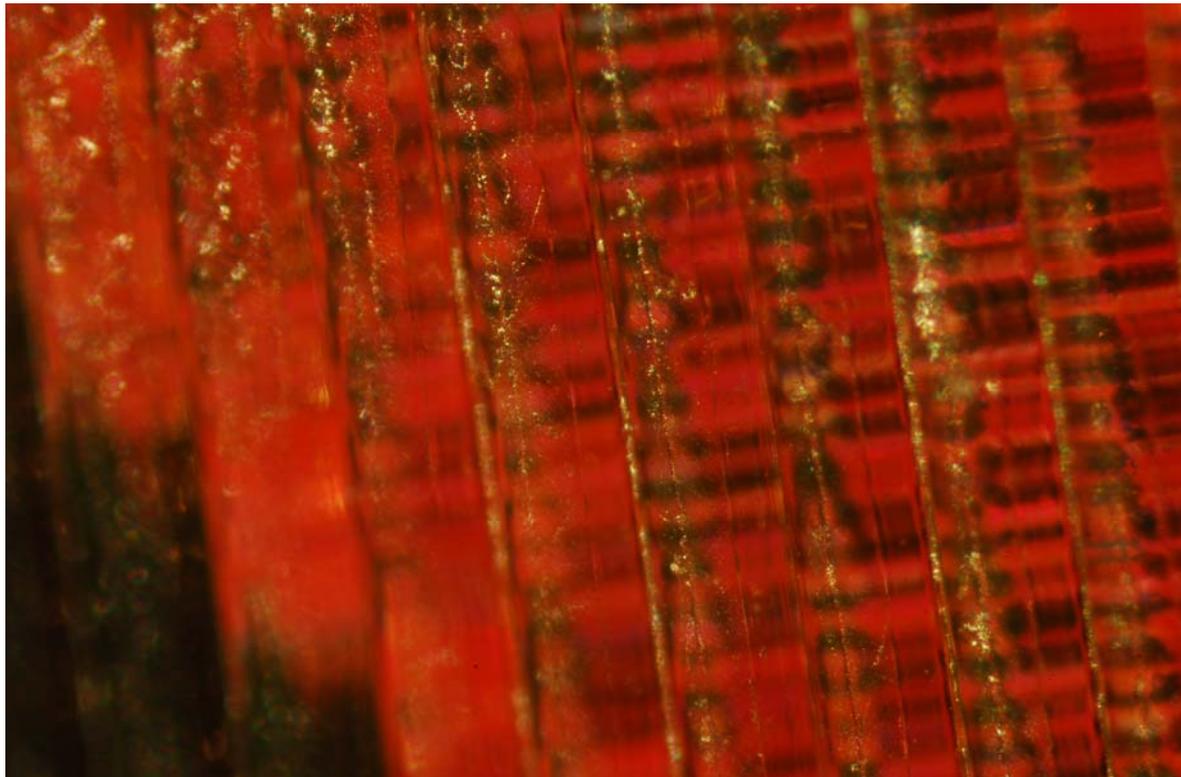
- Aufnahme 40x



- Aufnahme 20x

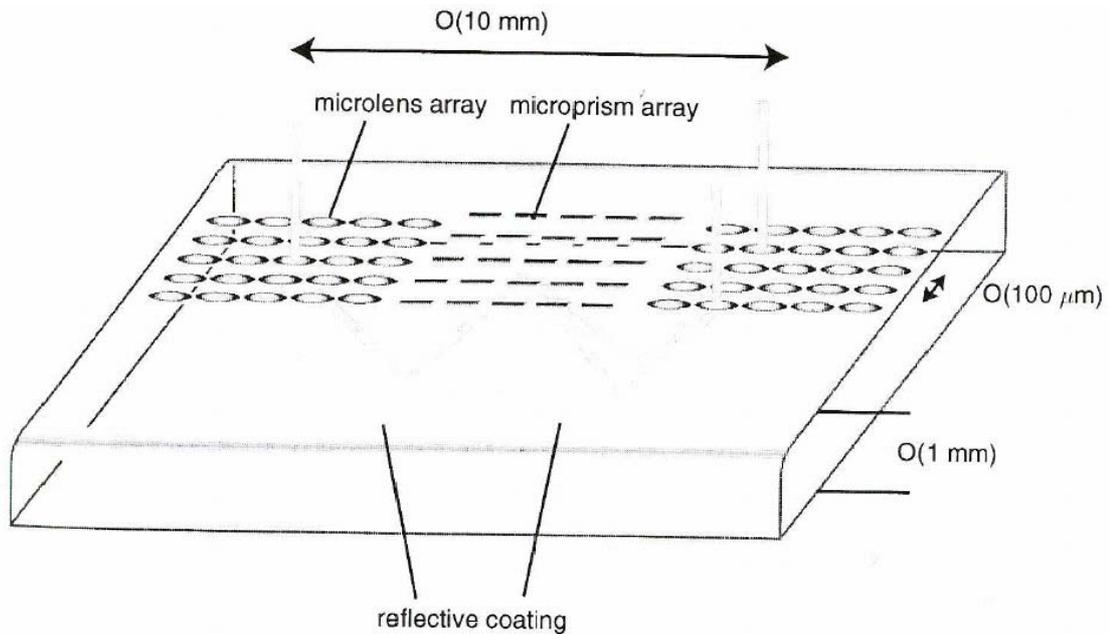


- Aufnahme 4x



1. Grundlagen der Wellenoptik
2. Abbildende optische Systeme
3. Optische Messtechnik
4. Biomedizinische optische Systeme
5. Optische Materialbearbeitung
6. Optische Datenspeicherung -> Optik in der Datenspeicherung
7. Optische Informationstechnik (letzte Vorlesung)
8. Mikro- und Nanooptische Systeme
 - 8.1 Klassifizierung optischer Komponenten
 - 8.2 Herstellung optischer Komponenten von Makro bis Mikro
 - 8.3 Mikrooptische Systeme
 - 8.4 Nanooptik

- Gesamtes System wird auf einmal prozessiert



Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

- Substrate werden nacheinander hergestellt und „gestapelt“
- Siehe Demo
 - http://www.doc.com/swf/chip_demo_small.swf

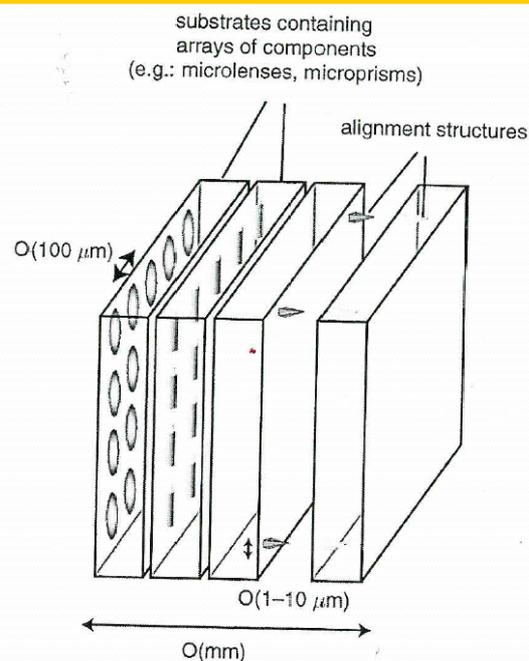


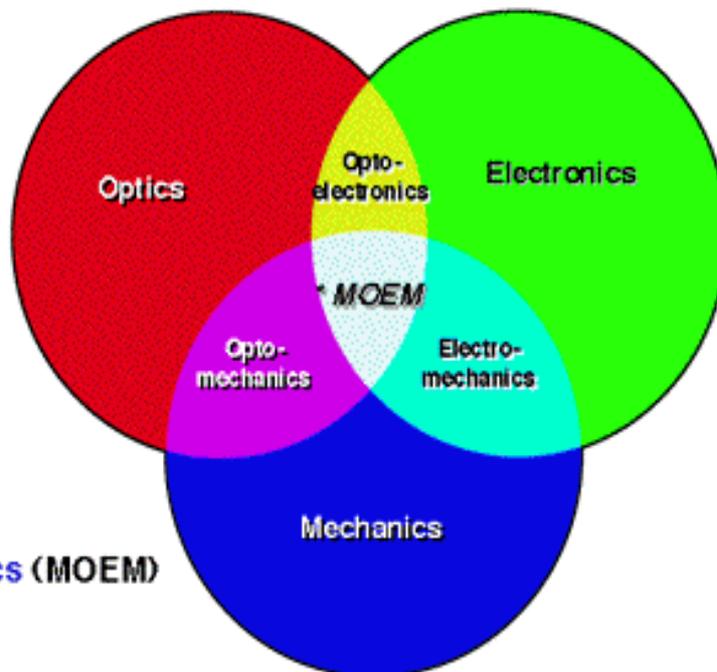
Fig. 7.4: The concept of stacked microoptics for the integration of microoptical systems: system dimensions in the order of mm, $O(\text{mm})$; component dimensions: $O(10\text{--}500 \mu\text{m})$; dimensions of the alignment structures: $O(10 \mu\text{m})$ with alignment precision $O(1 \mu\text{m})$.

Quelle: Sinzinger/Jahns, Microoptics, 1999

Herstellung mikrooptischer Systeme: MOEMS

- Micro-opto-electro-mechanical-systems

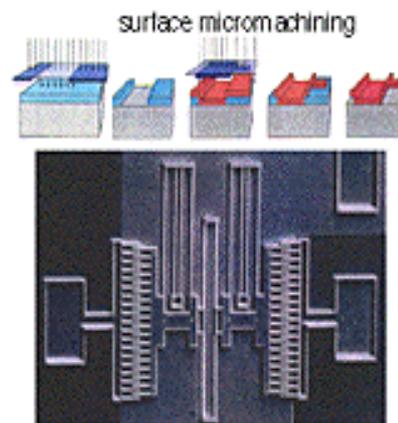
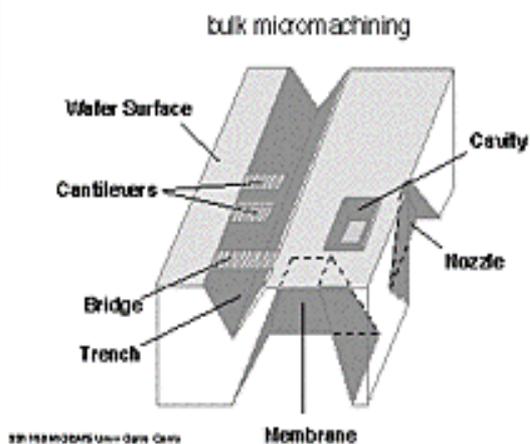
- Optics
- Electronics
- Mechanics



* Micro**Opto**Electro**Mechanics** (MOEM)

Herstellung mikrooptischer Systeme: MOEMS

- MOEMS Herstellung durch
 - Bulk Präparation (Z.B. tiefe Löcher und Gräben)
 - Oberflächenpräparation

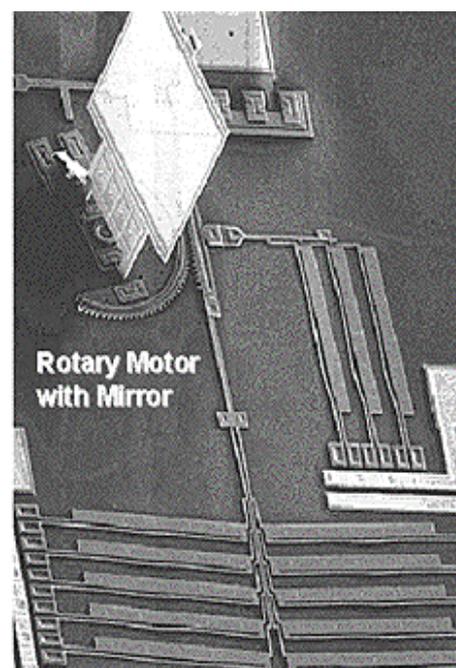
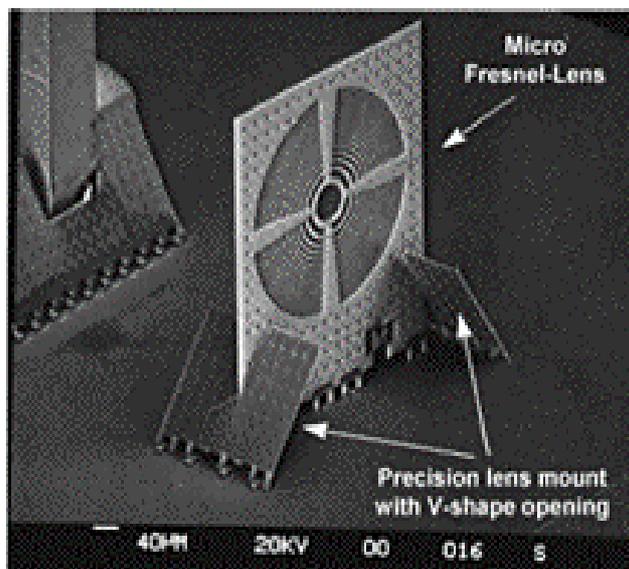


- Alle optischen Grundelemente können mit MOEMS realisiert werden:

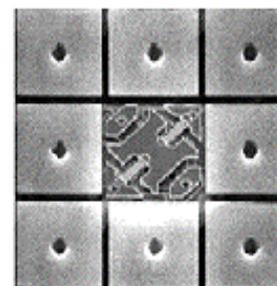
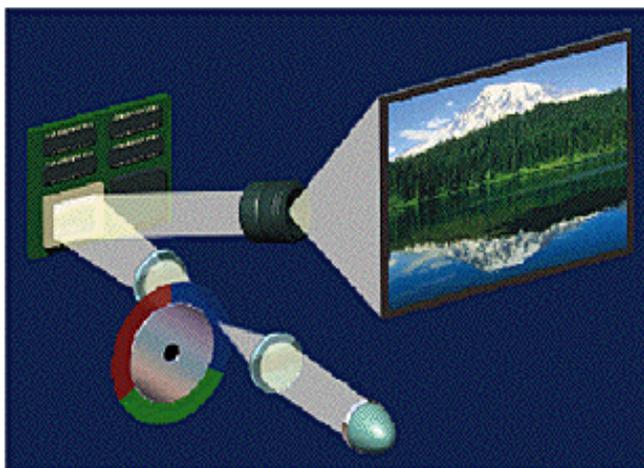
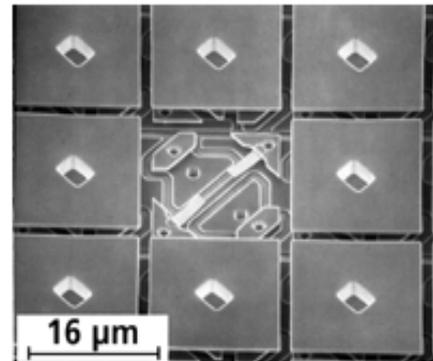
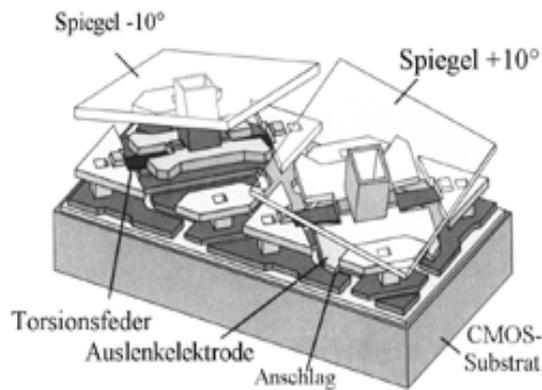
Element	Function
• Lens	— focusing
• Post/Stand	— mechanical support
• Mirror	— reflection
• Grating	— deflection/diffraction/spectral resolution
• Beam Splitter	— beam combiner/divider
• Waveguide	— beam guidance
• Modulator (Chopper)	— modulation/attenuation

➔ Schaltzeiten je nach Größe weniger als 1 ms

- Selbst aufklappende Fresnel-Linse
- Rotierender Spiegel mit Mikromotor

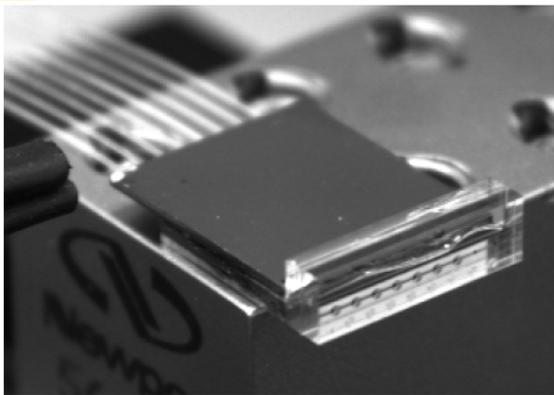
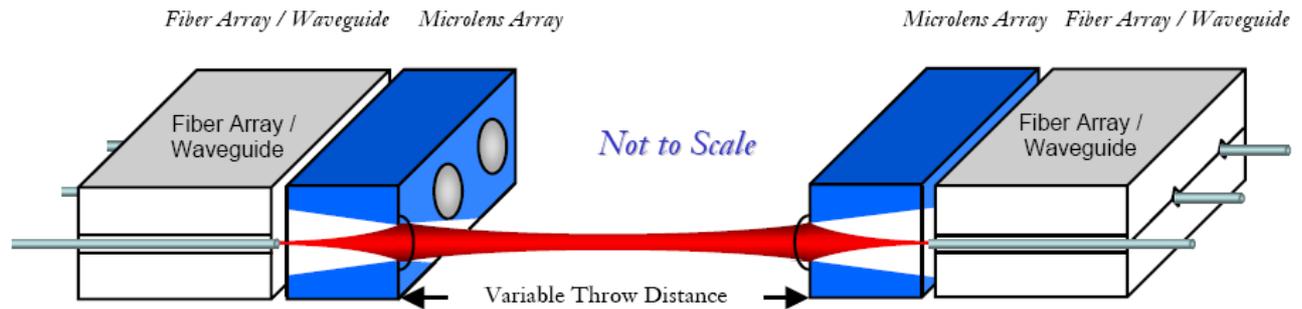


- Strahlableitung in Displays



- 2000x1000 pixel resolution (2 million micromirrors)
- 16 μm x 16 μm mirrors
- digital gray scale using pulse width modulation

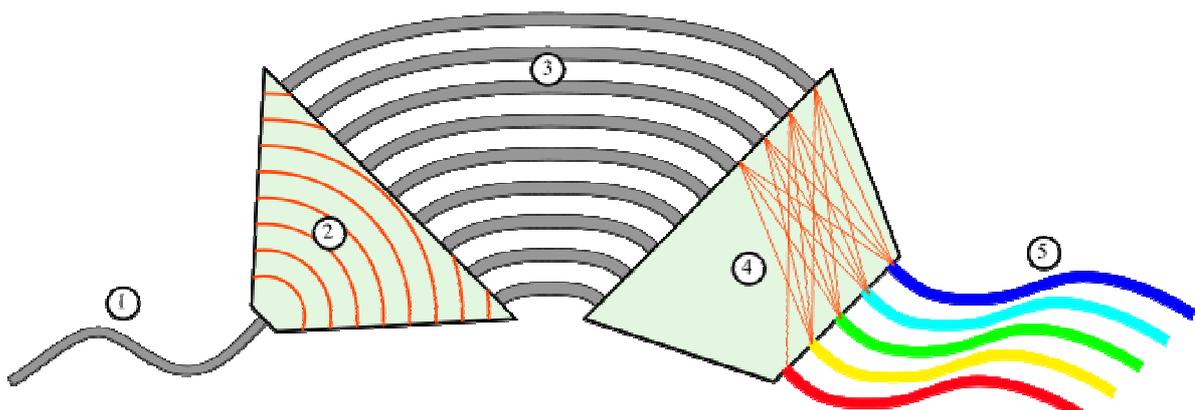
Beispiel: Mikrolinsenarray für Faserstecker



Quelle: <http://www.doc.com>

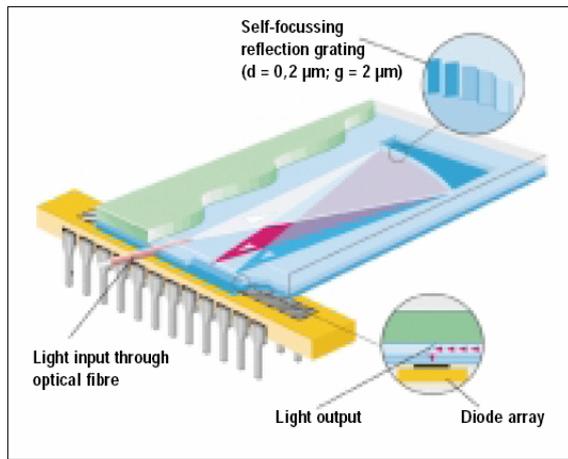
Beispiel: Arrayed-Waveguide Grating (AWG)

- Lichtweg von (1) nach (5) funktioniert als Wellenlängendemultiplexer, von (5) nach (1) als Multiplexer.
 - Licht aus Eingangslichtleiter (1) durchläuft Freistrahلبereich (2) und wird in Anordnung von Lichtwellenleitern unterschiedlicher Länge (3) eingespeist.
 - Nach dem Austritt aus Wellenleitern interferieren Teilstrahlen in weiterem Freistrahلبereich (4) so, dass in jeden Ausgangswellenleiter (5) jeweils nur das Licht einer bestimmten Wellenlänge eintreten kann.
 - Orangefarbenen Linien dienen nur der Illustration des Lichtweges.
- Multiplexen von 96 Wellenlängen auf nur ca. 10 cm² möglich!

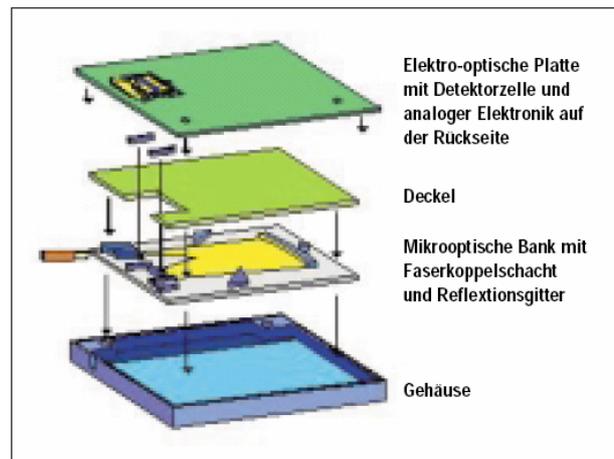


Quelle: <http://de.wikipedia.org>

Beispiel: Mikrospektrometer



Schichtwellenleiter

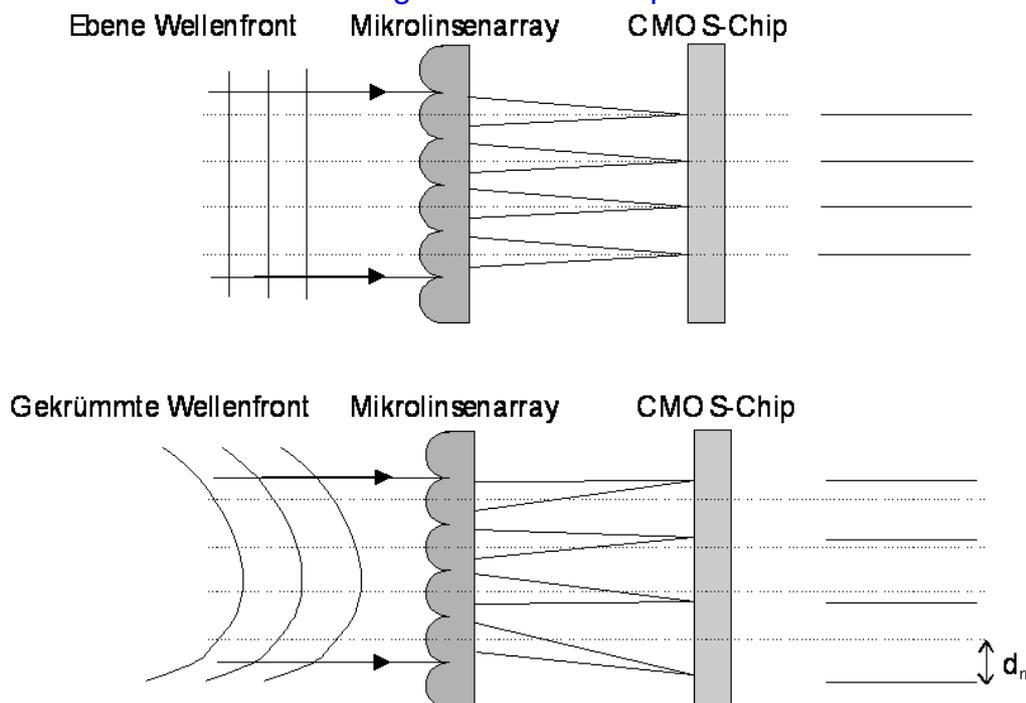


Modulares Konzept zur Herstellung elektro-optischer Mikrosysteme am Beispiel eines Hohlwellenleiters (NIR-Spektrometer)

Quelle: www.fzk.de

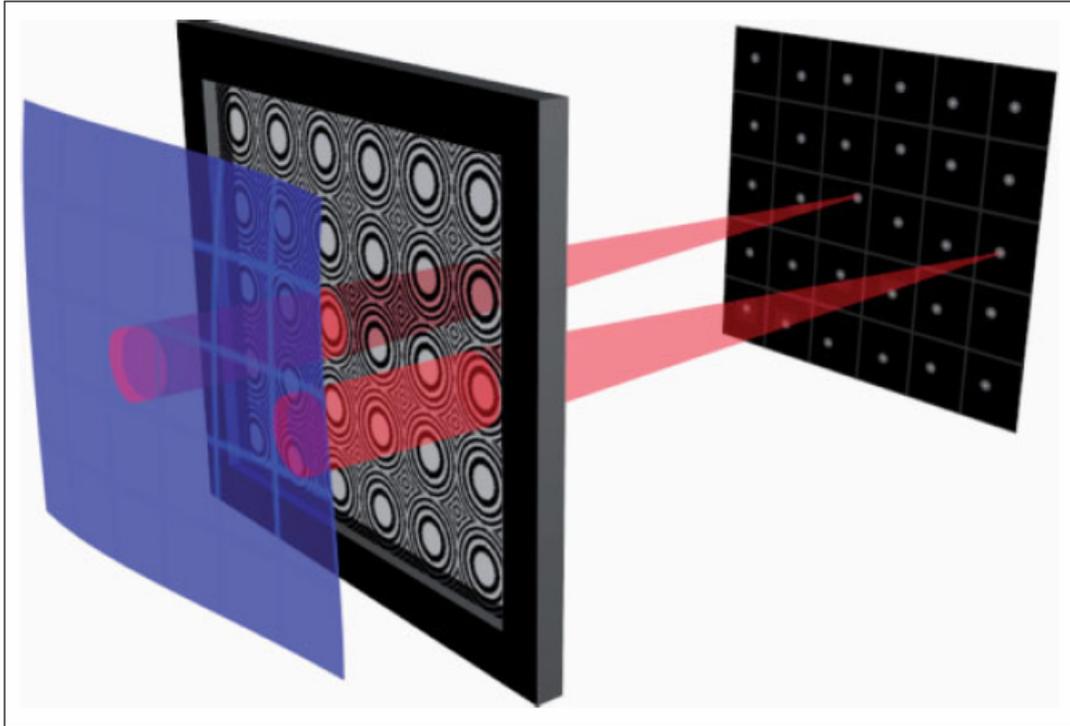
Beispiel: Shack-Hartmann-Sensor

- Dient der Bestimmung von Wellenfronten
- Einsatz in der adaptiven Optik für Teleskope
- Einsatz in der Charakterisierung von Kunststoffoptiken



Quelle: <http://de.wikipedia.org>

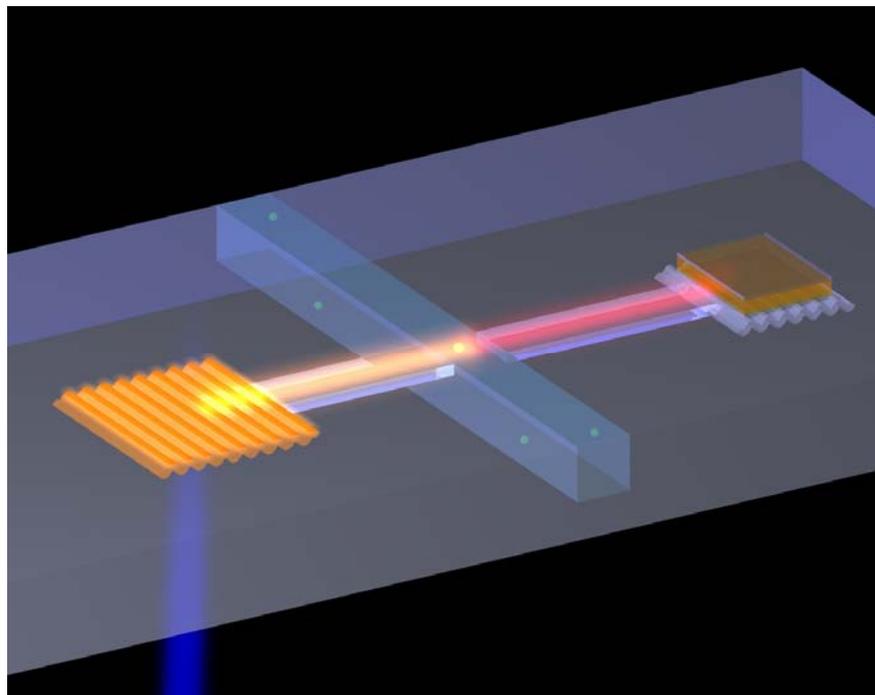
Beispiel: Shack-Hartmann-Sensor



Quelle: Pruss/Seifert/Osten, Optik & Photonik, S. 32, November 2006

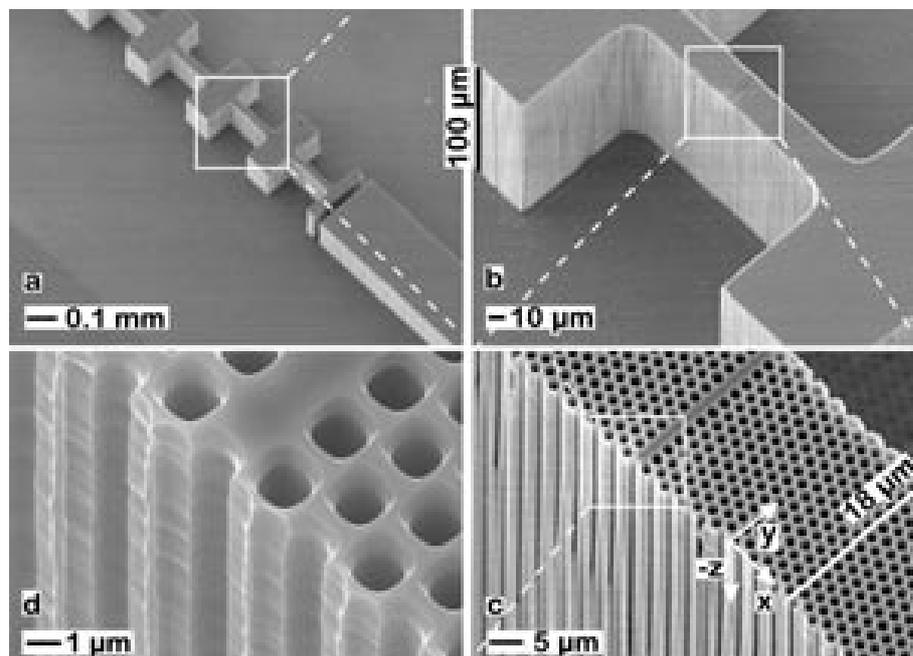
Lab-on-a-Chip

- Reagenzien in Mikrofluidikkanälen
- Forschungsthema am LTI: Integration von optischem System auf gleiches Substrat

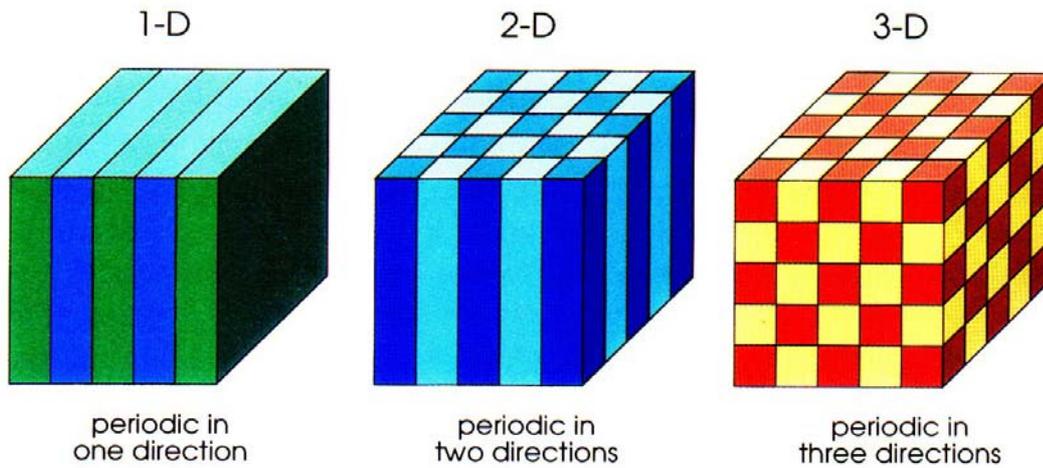


1. Grundlagen der Wellenoptik
2. Abbildende optische Systeme
3. Optische Messtechnik
4. Biomedizinische optische Systeme
5. Optische Materialbearbeitung
6. Optische Datenspeicherung -> Optik in der Datenspeicherung
7. Optische Informationstechnik (letzte Vorlesung)
8. Mikro- und Nanooptische Systeme
 - 8.1 Klassifizierung optischer Komponenten
 - 8.2 Herstellung optischer Komponenten von Makro bis Mikro
 - 8.3 Mikrooptische Systeme
 - 8.4 Nanooptik

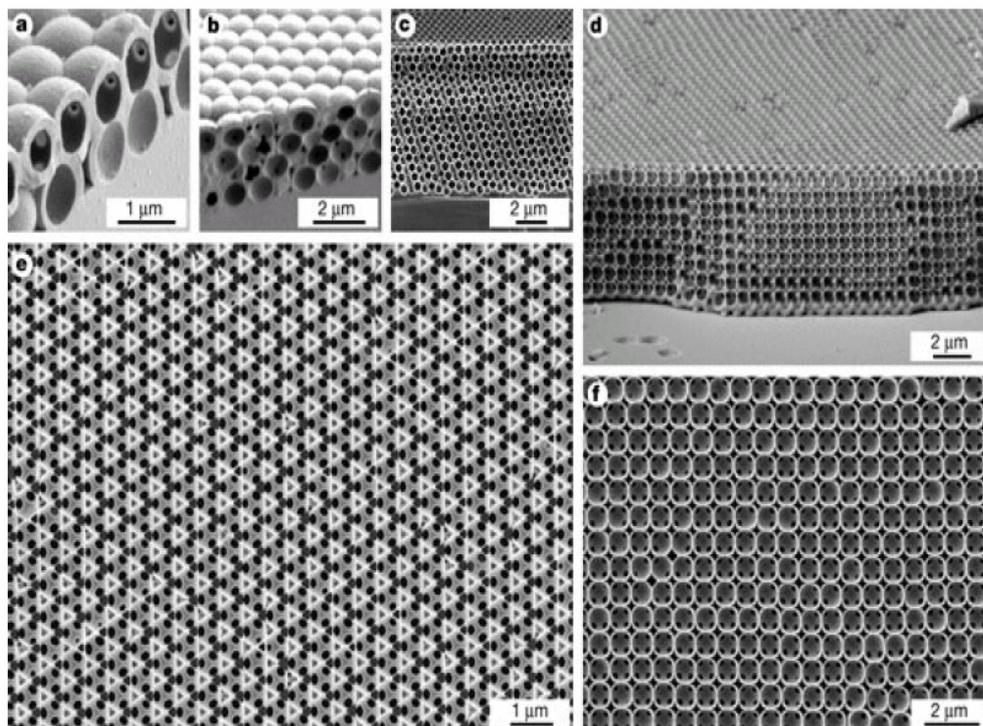
- Definition von Nanooptik: Herstellung mit Nanotechnologie
 - Minimale Merkmalsgröße im Nanometerbereich (Gesamtbauelement kann größer sein)



- Periodische Modulation des Brechungsindex
 - Periode in Größenordnung der Wellenlänge



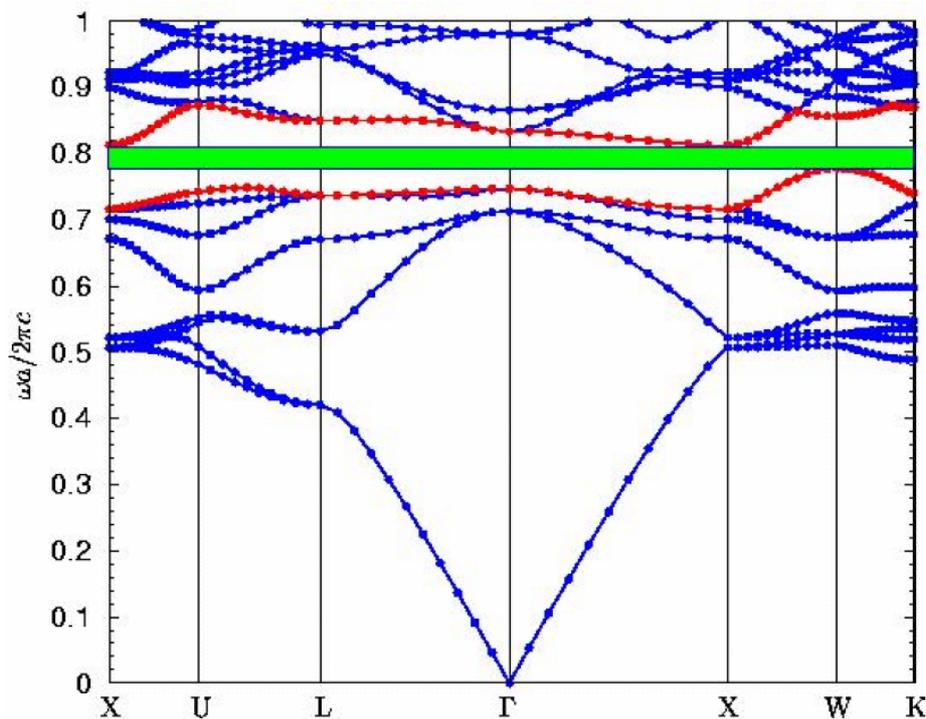
Quelle: Joannopoulos/Meade/Winn, *Photonic Crystals-Molding the Flow of Light* (1995).



Quellen: H. Sözüer, J. Haus, R. Inguva, *Phys. Rev. B* **45**, 13962 (1992)
J. Wijnhoven, W. Vos, *Science* **281**, 802 (1998)
A. Blanco et al., *Nature* **405**, 437 (2000)
Y.A. Vlasov et al., *Nature* **414**, 289 (2001)

Bandstruktur einer inversen Siliziumopalstruktur

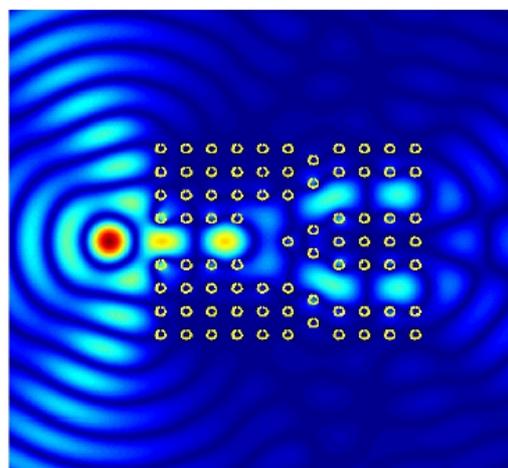
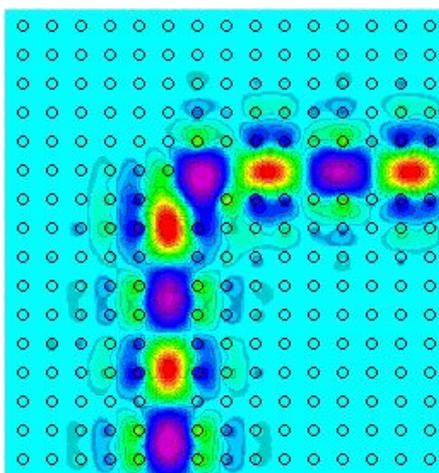
- Äquivalent zu der Bandstruktur für Elektronen im Festkörper ergeben sich erlaubte Bänder und Bandlücken für Photonen



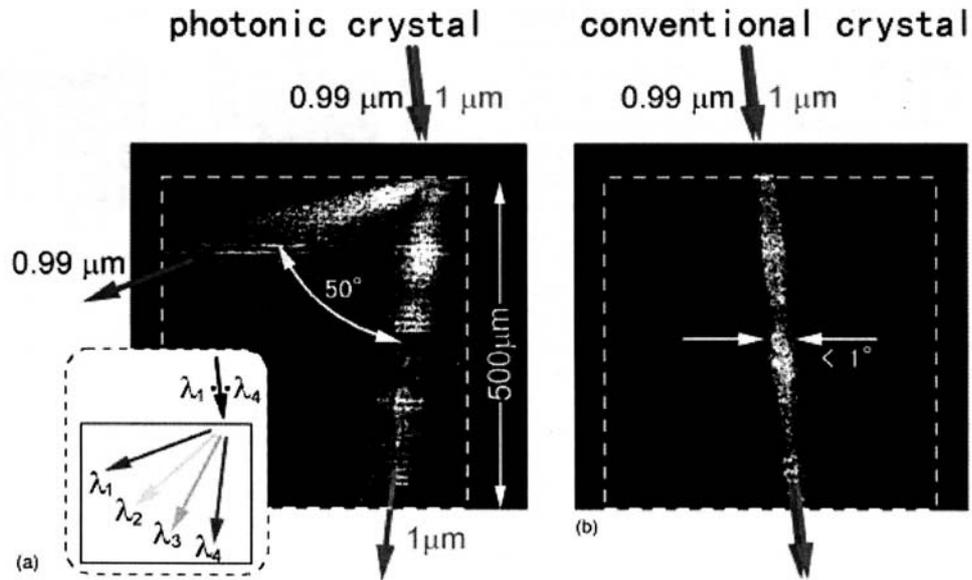
Quelle: K. Busch

Beispiel: Wellenleiter und Splitter

- Neuartige Wellenleiter mit kleinen Krümmungsradien möglich
- Neue Ansätze für integrierte Optik



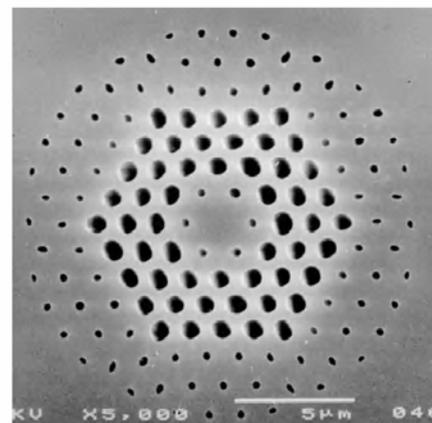
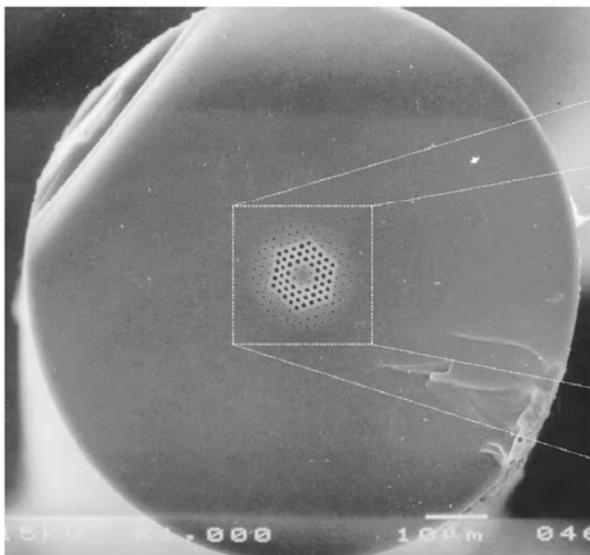
- Starke Änderung der Ausbreitungsrichtung mit Wellenlänge
 - Hervorgerufen durch Nanostrukturierung nicht durch Materialdispersion



Quelle: H. Kosaka et al., Phys. Rev. B **58**, R10 096-R10 099 (1998).

A typical photonic crystal fibre

Will Reeves

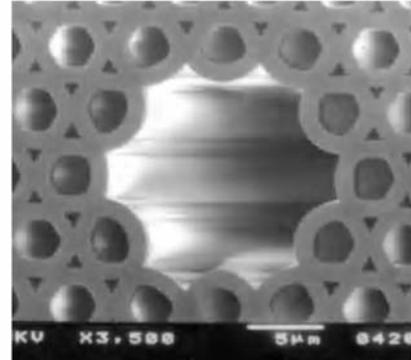
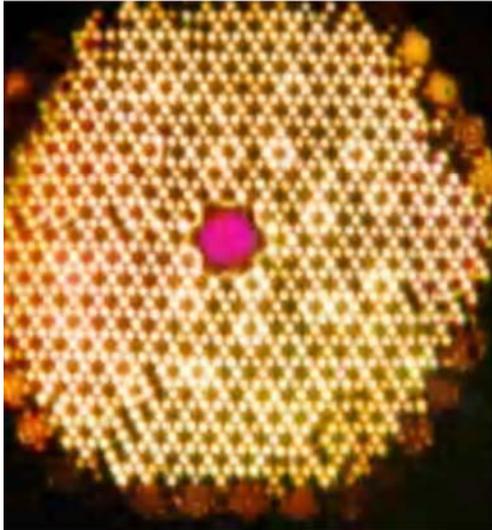


... pure fused silica throughout

Philip Russell, University of Bath, p.s.j.russell@bath.ac.uk

Hollow-core PCF guiding pink light

Cregan et al, Science **285** (1537-1539) 1

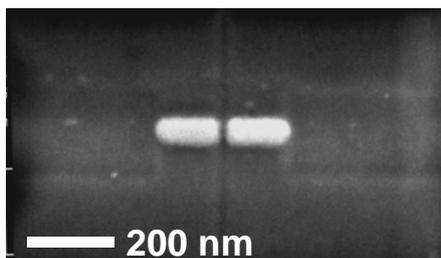
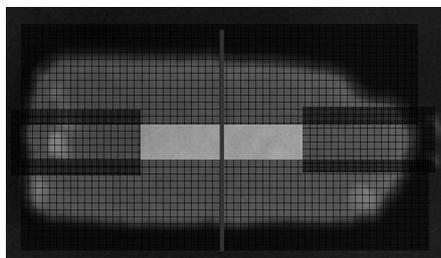


- guided colour depends on geometry & size

Fabrication of Optical Antennas

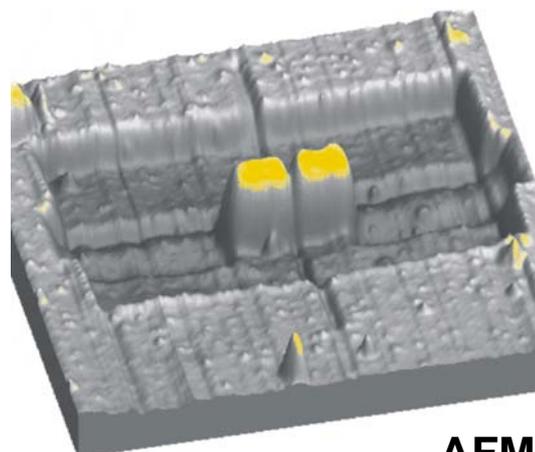
II. Focused ion-beam milling

➔ Au antennas & rods

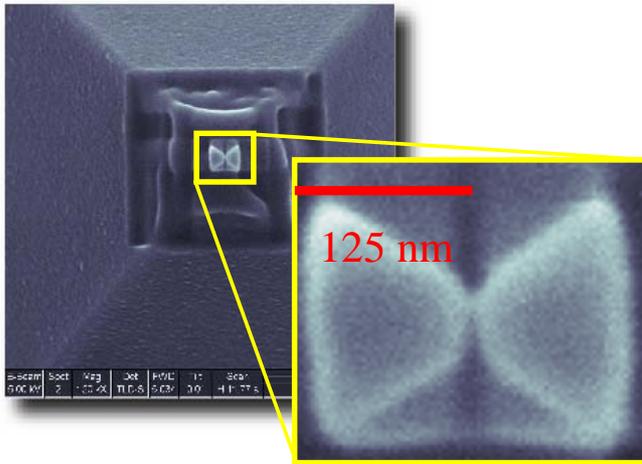


SEM

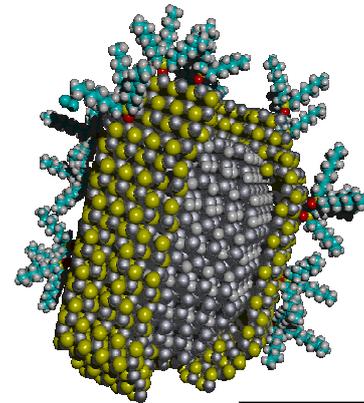
Analysis by SEM and AFM



AFM



**Scanning optical
bowtie antenna**



Quantum Dot
~5 nm

- Mehr zum Thema in der Vorlesung „Nanooptik“ im nächsten Semester!

Quelle: H. Eisler

- Was ist Mikrooptik?
- Was ist integrierte Optik?
- Welche Möglichkeiten gibt es, um ein fokussierendes Element zu realisieren?
- Vergleichen Sie die Eigenschaften refraktiver und diffraktiver Optiken!
- Skizzieren Sie eine refraktive Linse und eine diffraktive Linse!
- Wie werden Glaslinsen hergestellt?
- Wie werden Fresnellinsen hergestellt?
- Nennen Sie zwei Vorteile und zwei Nachteile von Kunststoffoptiken!
- Nennen Sie zwei Beispiele für mikrooptische Systeme!
- Was ist Nanooptik?