



Diffraktive Linsen mit veränderlicher Brechkraft

Stefan Bernet und Monika Ritsch-Marte

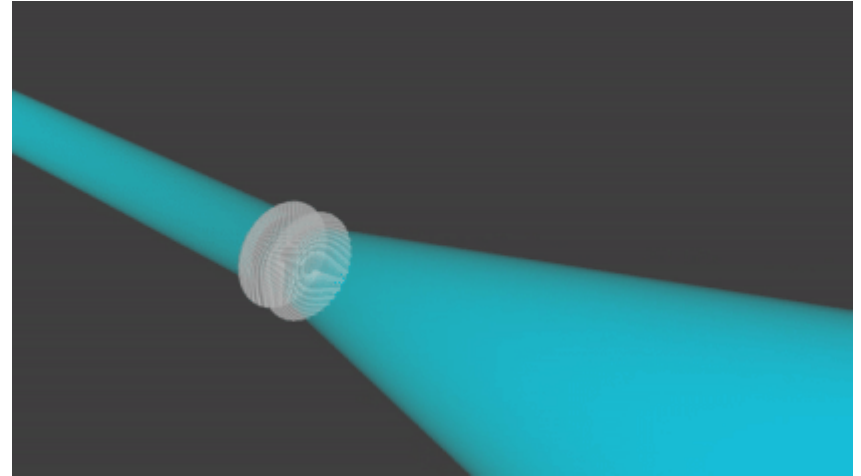
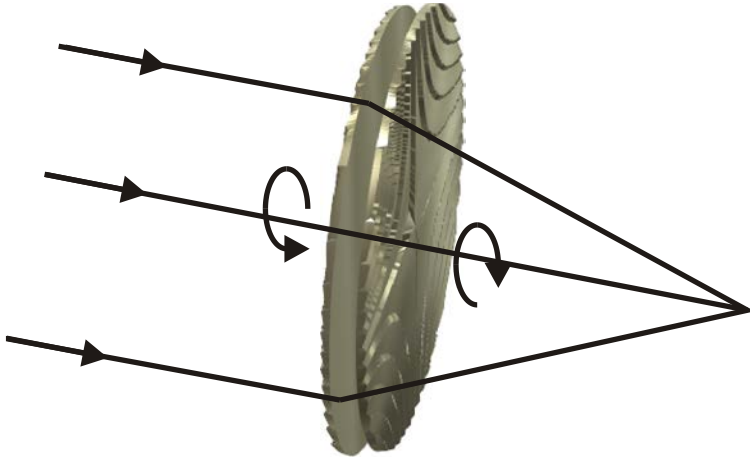
Sektion für Biomedizinische Physik der Medizinischen Universität Innsbruck



MEDIZINISCHE UNIVERSITÄT
INNSBRUCK

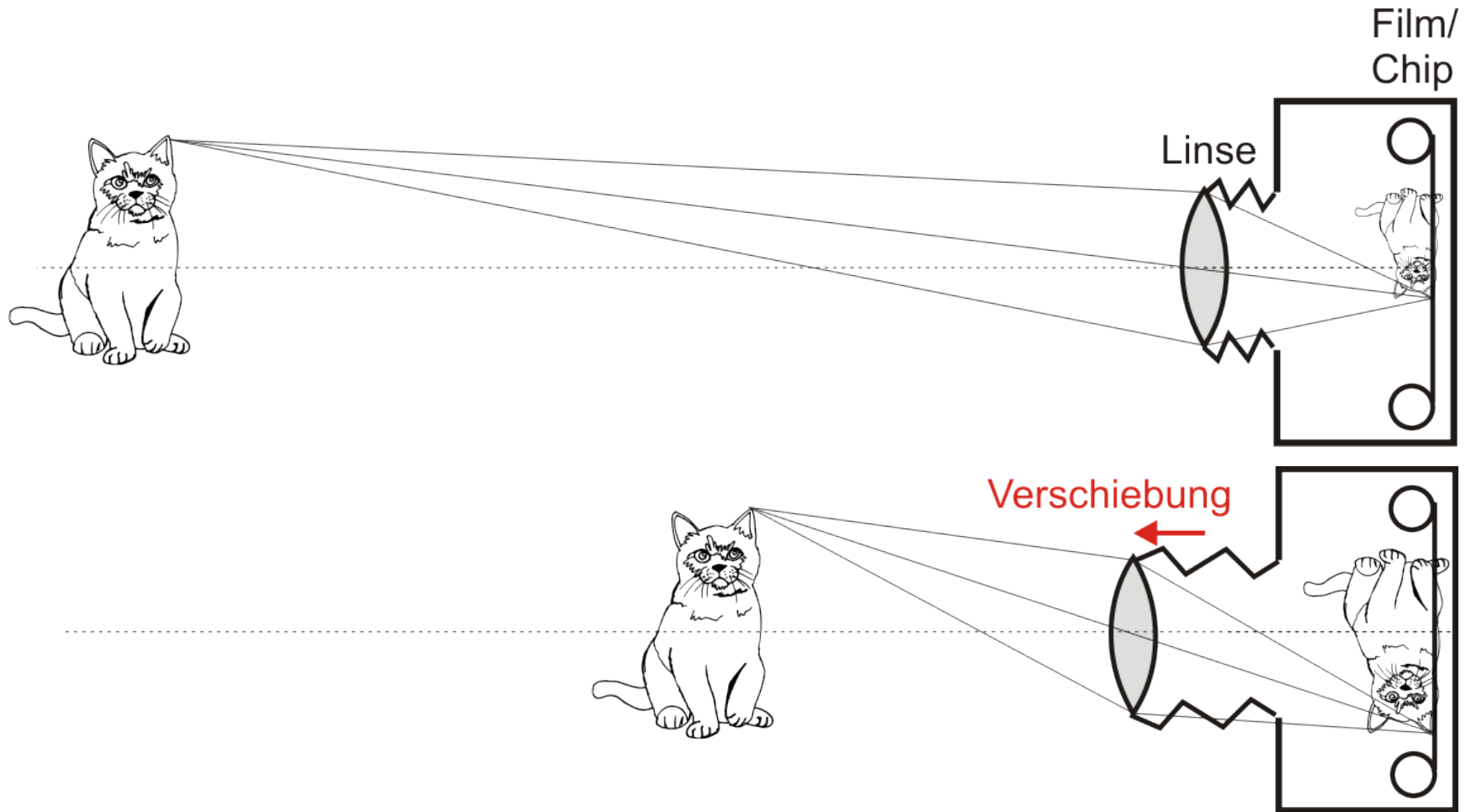
Verstellbare diffraktive Moiré Linse (2008)

Prinzip



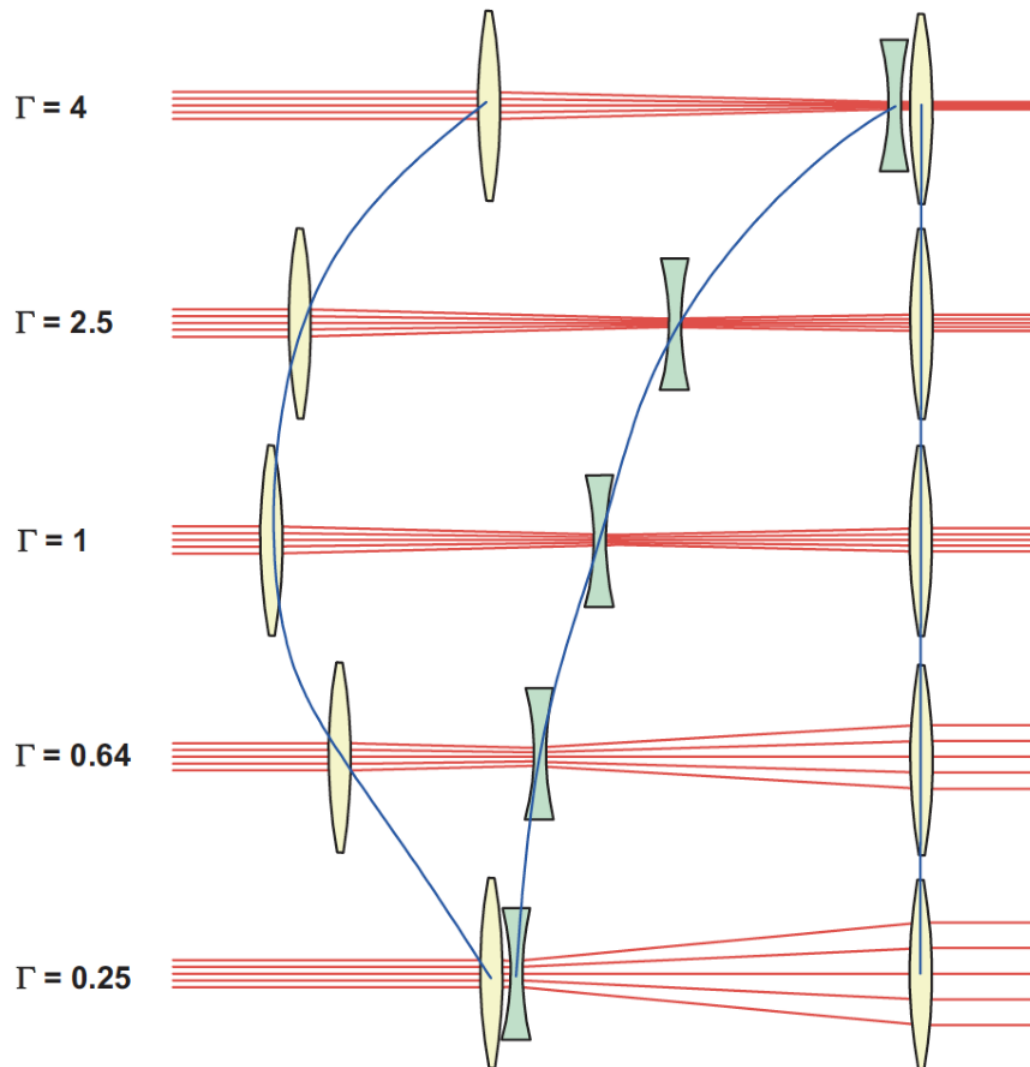
Was sind die Vorteile?

Vergleich mit herkömmlichen Linsen (Fotoapparat)



Zum Fokussieren ist Verschieben der Linse nötig!

Klassisches Zoom-Objektiv (Teleskop)



Verschiebung von mindestens 2 Linsen nötig!

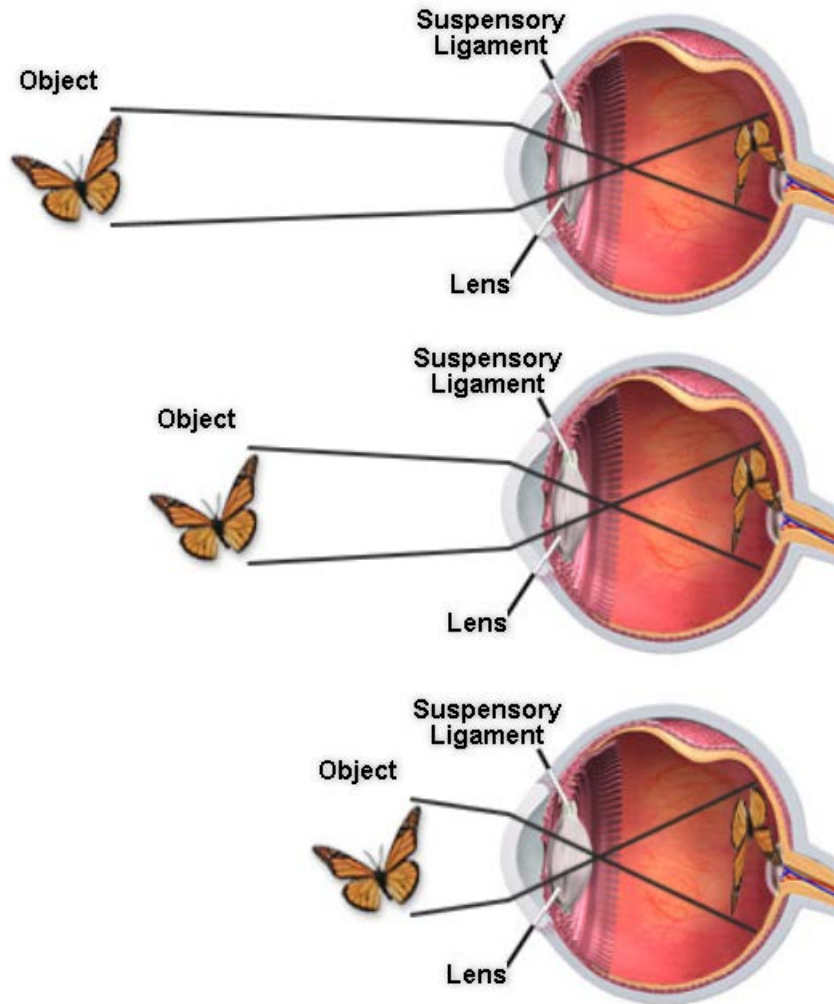
Auge: Fokussieren durch Linsenverschiebung?



Auge: Fokussieren durch Linsenverschiebung?

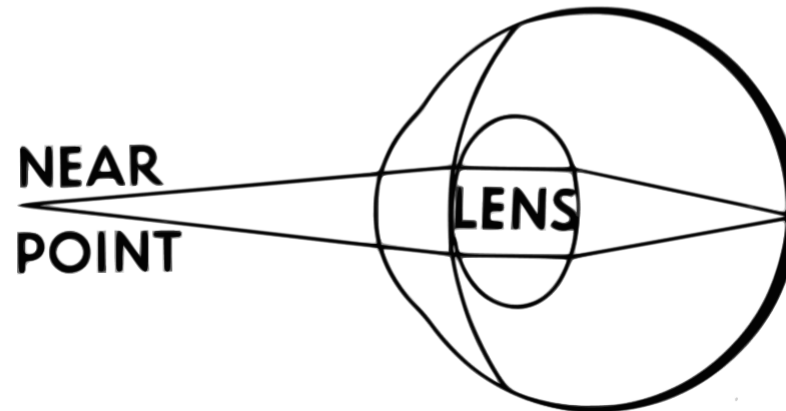
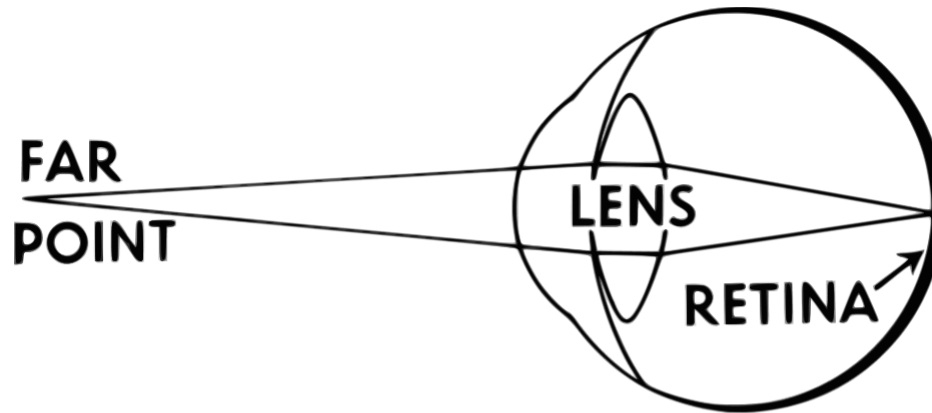


Fokussieren im Auge



Keine Verschiebung der Linse, sondern Veränderung ihrer Brechkraft!

Fokussieren im Auge

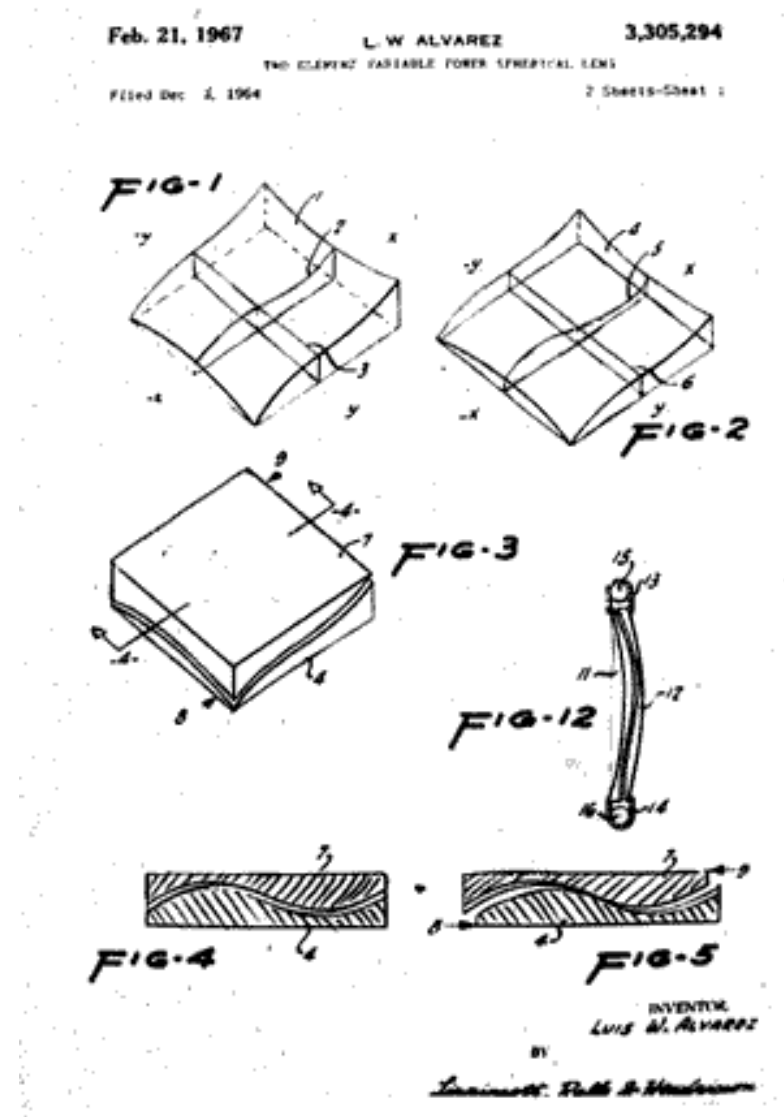


Verstellbare Linsen: Alvarez Linse

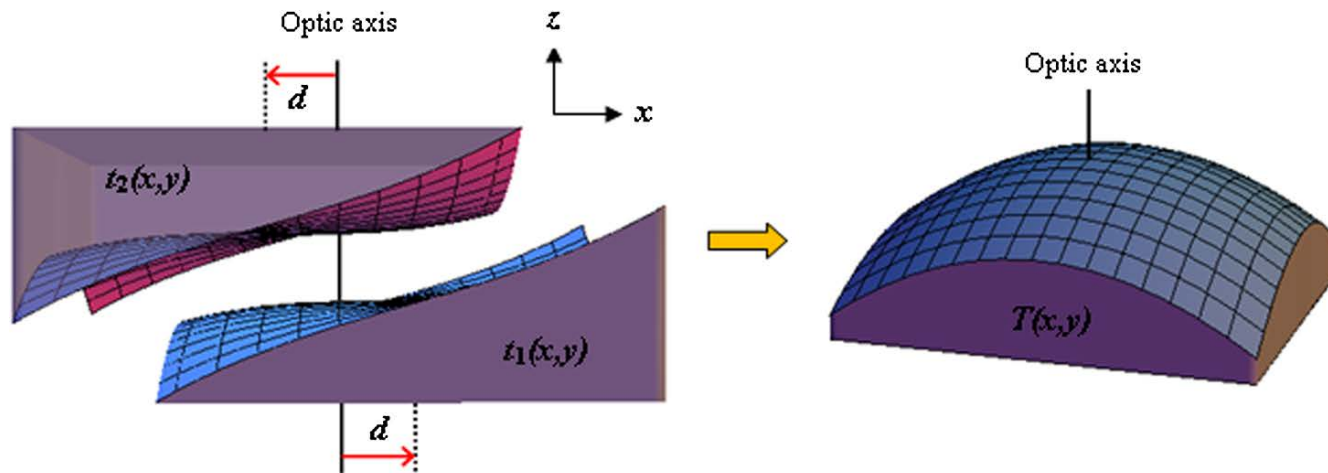


Luis Walter Alvarez

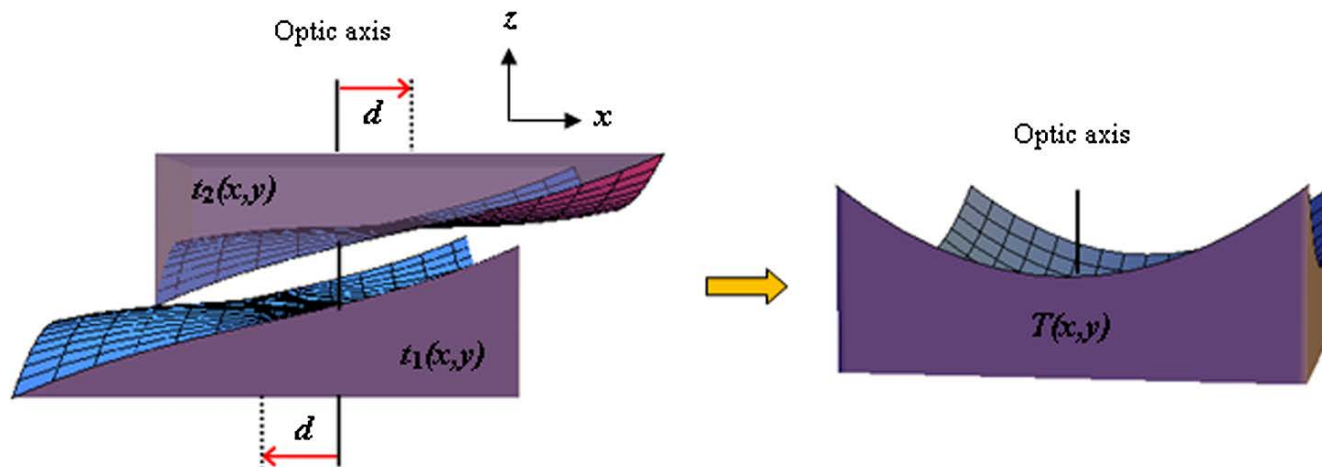
Nobelpreis 1968



Alvarez Linse



(a)



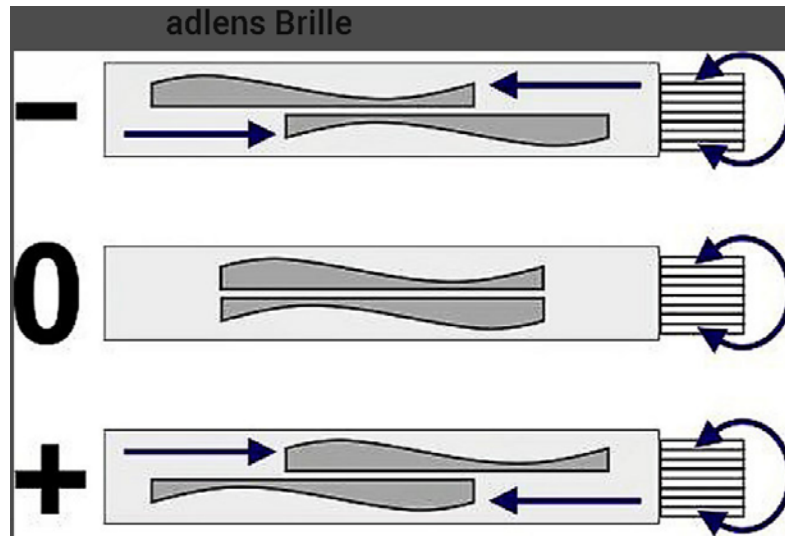
(b)

Funktionsweise: Verschieben zweier refraktiver ("brechender") Plättchen mit speziell berechneter Oberfläche

Alvarez Linse (Kommerzielle Anwendung)

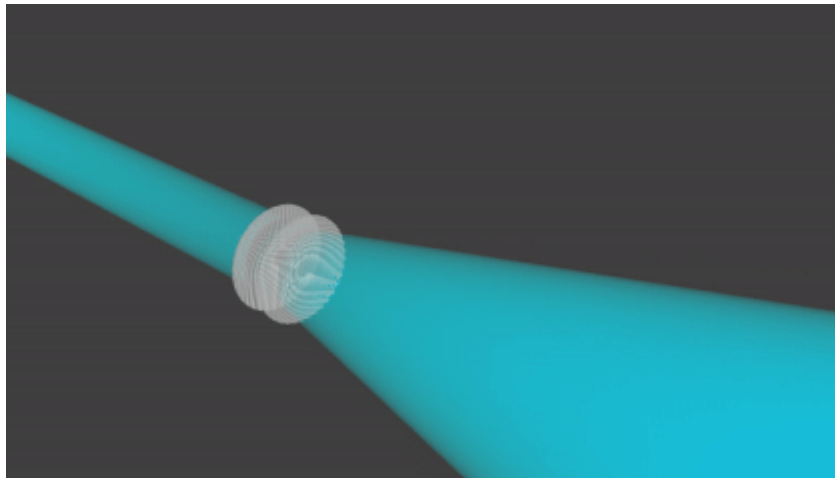
adlens®

Variable Focus Eyewear | A Different Way To See The World™



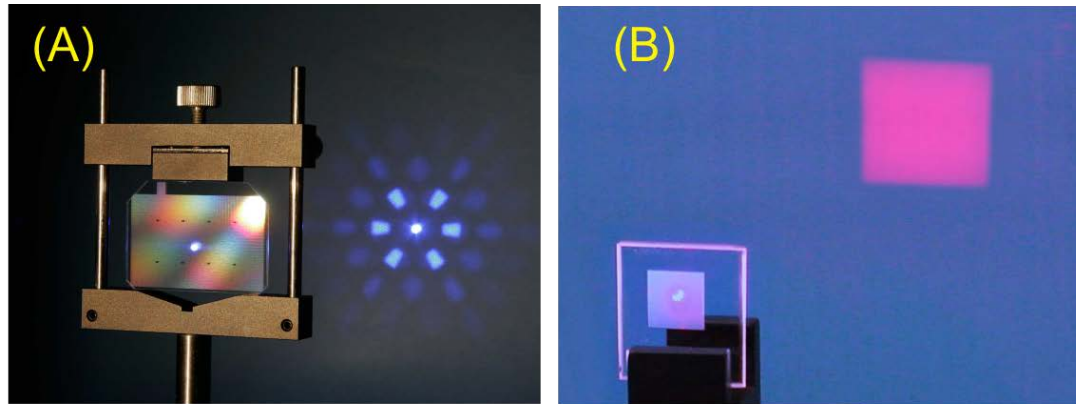
Unser Ansatz: Rotierende diffraktive Moiré Linse

Rotierende und diffraktive Version einer Alvarez Linse (Moiré-Prinzip)



Was sind diffraktive ("beugende") Elemente überhaupt?

Diffraktive optische Elemente (DOEs)



Images from Jenoptik-Webpage:

<https://www.jenoptik.com/products/optical-systems/optical-precision-components/diffractive-optical-elements-doe-microoptics>

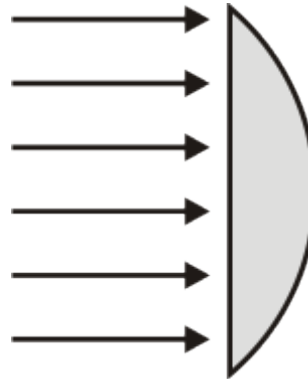
Feinste Oberflächenstrukturen in Glas- oder Plastikträgern (Tiefe ca. 1 μm)

Funktionsweise einer Linse

SLM

Einfallende ebene Welle

Linse



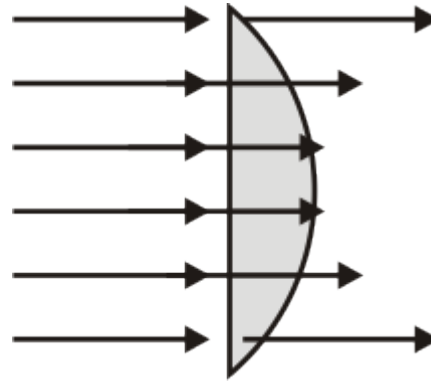
Funktionsweise einer Linse

SLM

Einfallende ebene Welle

Linse

Verzögerte Welle



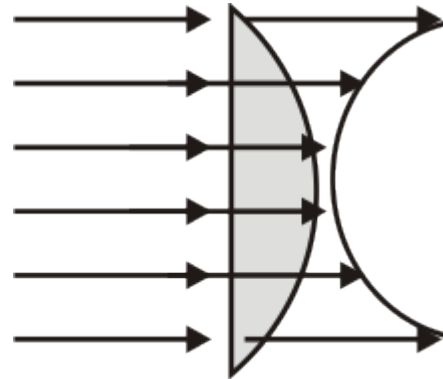
Funktionsweise einer Linse

SLM

Einfallende ebene Welle

Linse

Verzögerte Welle



Kugelförmige Wellenfront

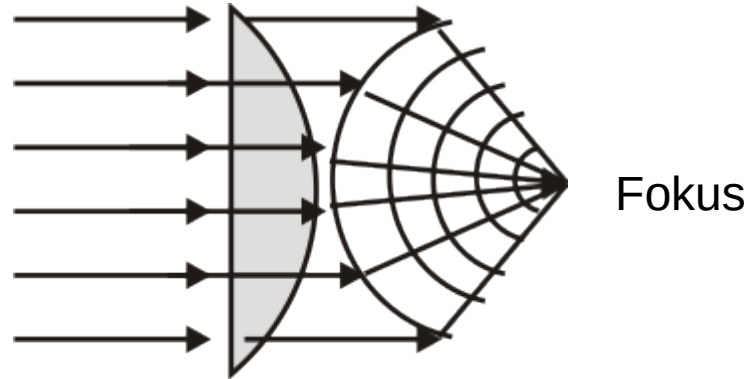
Funktionsweise einer Linse

SLM

Einfallende ebene Welle

Linse

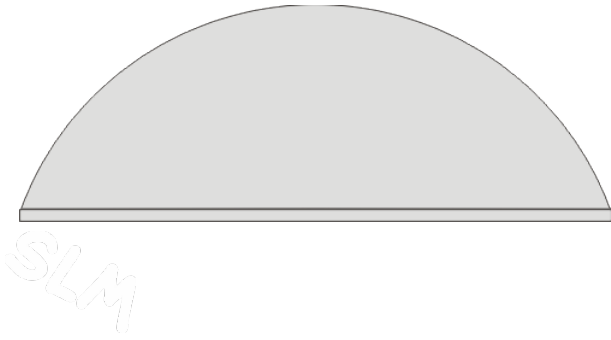
Verzögerte Welle



Fokus

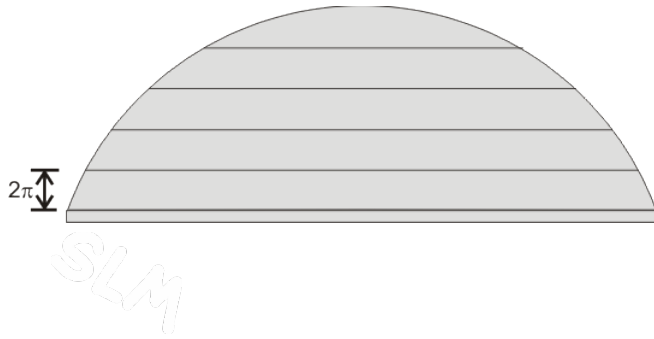
Kugelförmige Wellenfront

Difffraktive Optik: Prinzip



Man beginnt mit einer klassischen Linse...

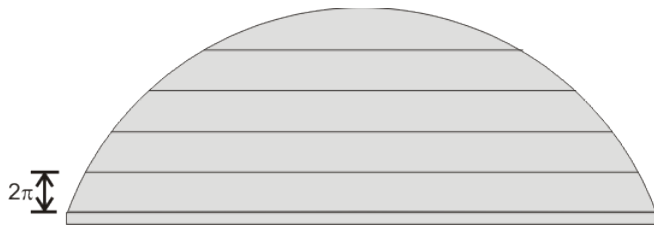
Diffraktive Optik: Prinzip



Die Linse wird in Schichten unterteilt, die die Phase jeweils um 2π verschieben.

Diese Schichten werden sukzessive abgetragen, entsprechend einer Modulo- 2π Operation.

Diffraktive Optik: Prinzip



Die Linse wird in Schichten unterteilt, die die Phase jeweils um 2π verschieben.

Diese Schichten werden sukzessive abgetragen, entsprechend einer Modulo- 2π Operation.

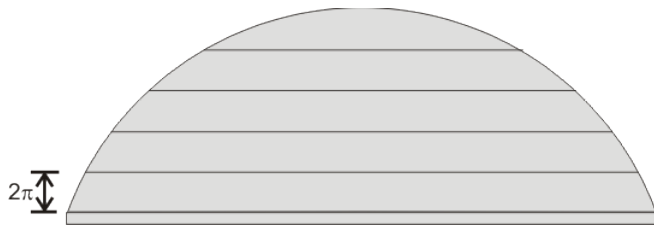
Resultat: Fresnel Linse („Kinoform“)



Hat die gleiche Brennweite wie die ursprüngliche Linse, allerdings nur bei der vorgegebenen Wellenlänge.

100% Effizienz.

Difffraktive Optik: Prinzip



Die Linse wird in Schichten unterteilt, die die Phase jeweils um 2π verschieben.

Diese Schichten werden sukzessive abgetragen, entsprechend einer Modulo- 2π Operation.

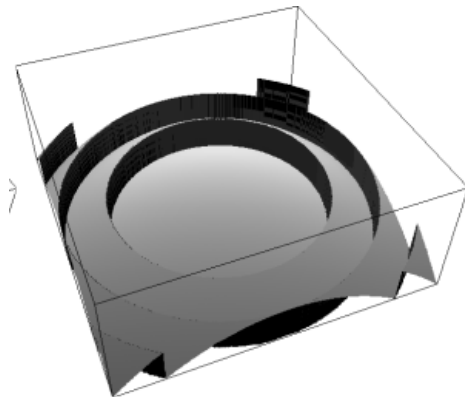
Resultat: Fresnel Linse („Kinoform“)



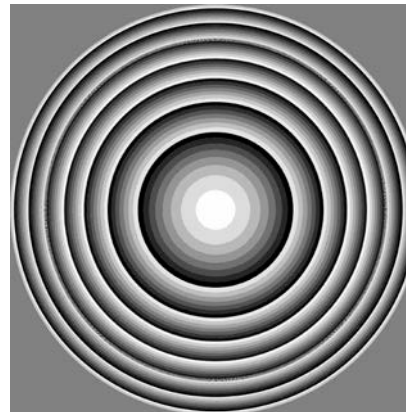
Hat die gleiche Brennweite wie die ursprüngliche Linse, allerdings nur bei der vorgegebenen Wellenlänge.

100% Effizienz.

3D-Ansicht:

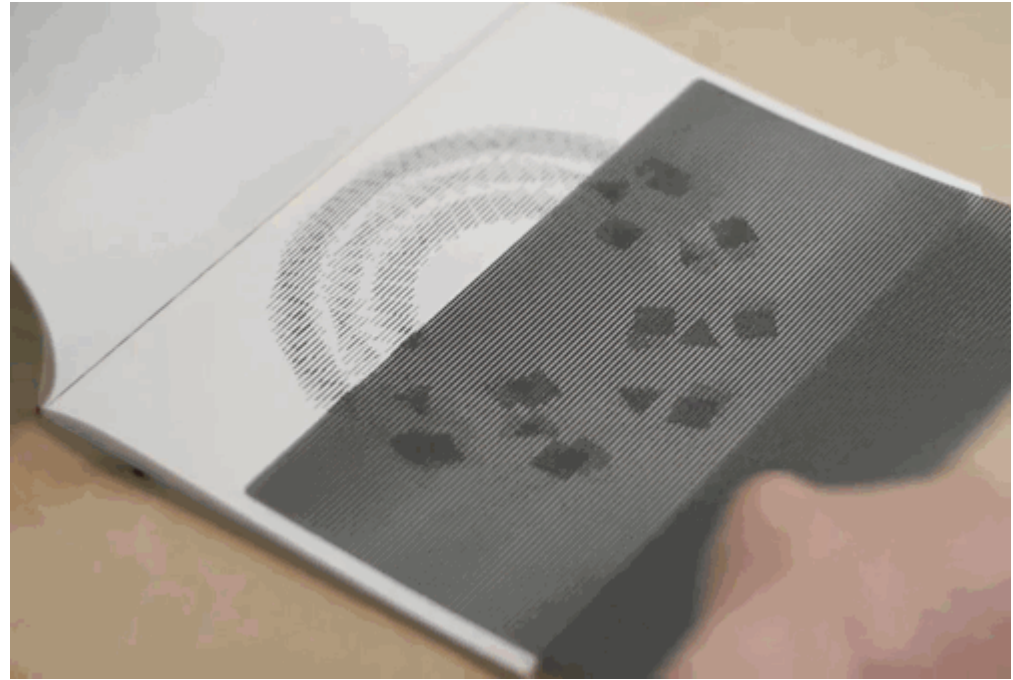
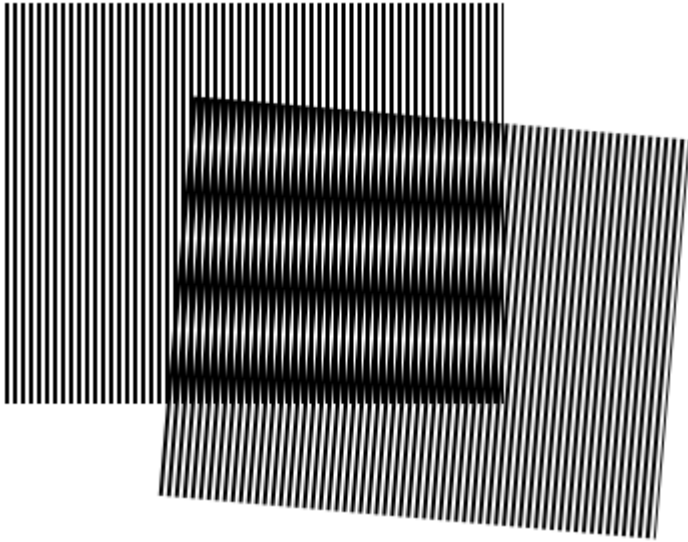


"Phasenbild"



DOE
(Diffraktives
optisches
Element)

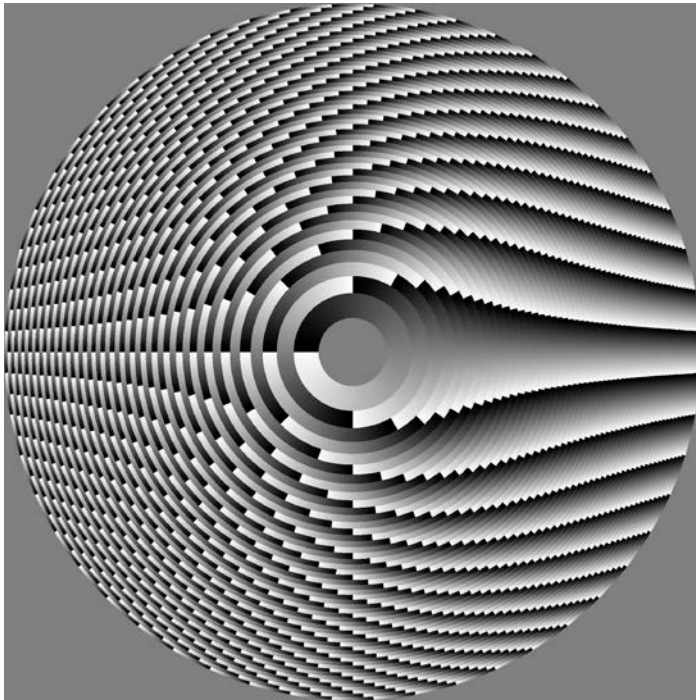
Moiré Effekt



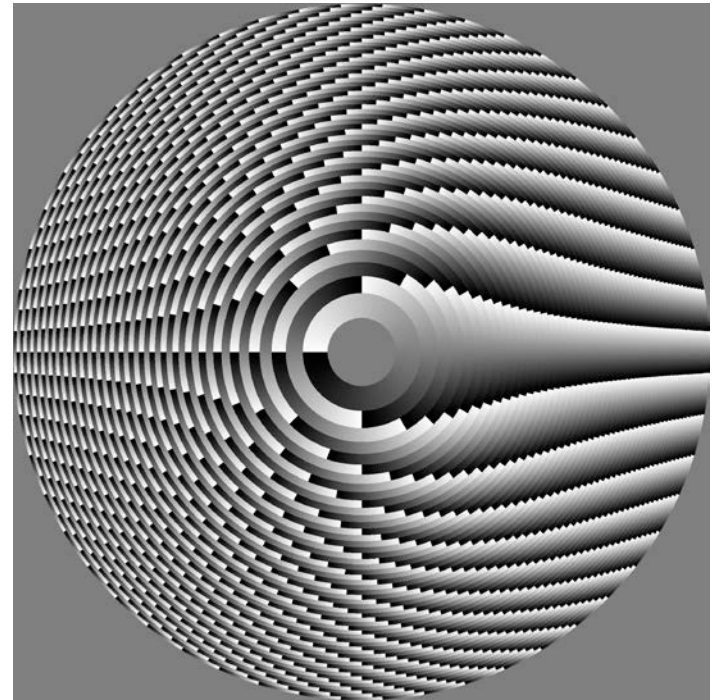
Überlagerung von periodischen Strukturen mit ähnlicher Periode produziert erstaunliche Effekte!

Unsere Entwicklung: Einstellbare Moiré Linse

$$T_{DOE\ 1} = \exp[i \cdot \text{round}\{ar^2\}\varphi]$$

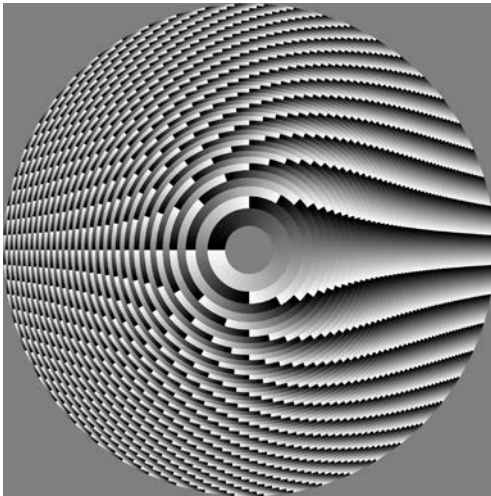


$$T_{DOE\ 2} = \exp[-i \cdot \text{round}\{ar^2\}\varphi]$$



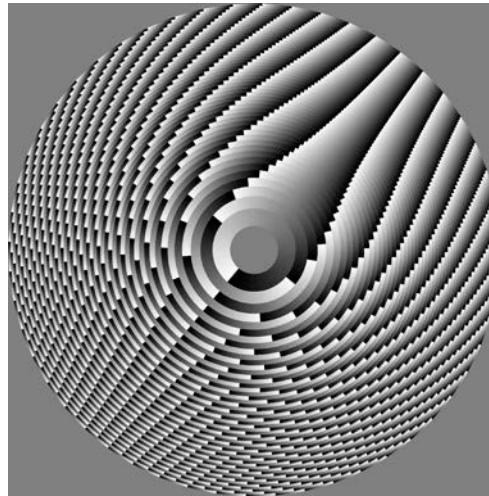
Einstellbare Moiré Linse

$$\exp[i \cdot \text{round}\{ar^2\}\varphi]$$



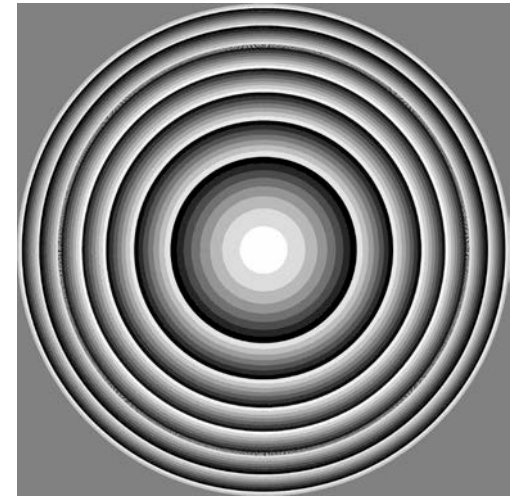
$$\exp[-i \cdot \text{round}\{ar^2\}(\varphi - \theta)]$$

x



=

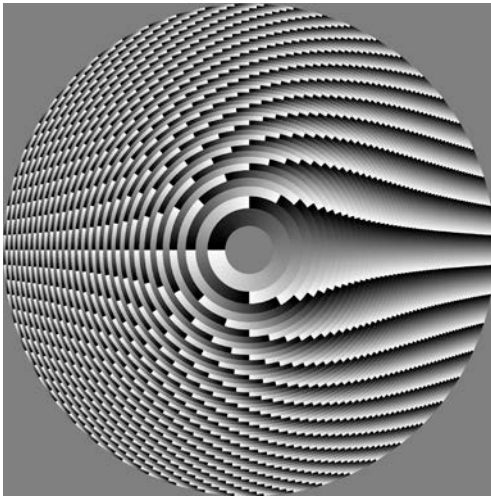
$$\exp[i \cdot \text{round}\{ar^2\}\theta]$$



$$f^{-1} = a \theta \lambda / \pi$$

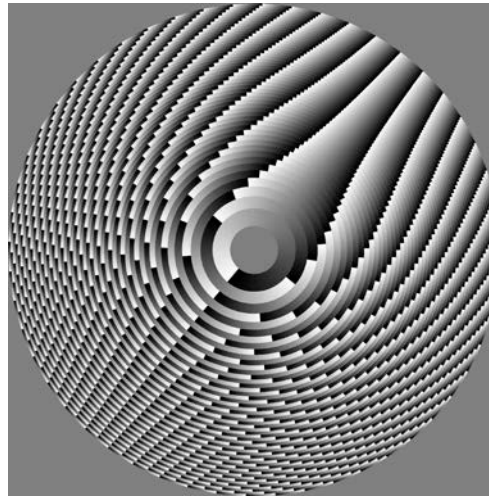
Einstellbare Moiré Linse

$$\exp[i \cdot \text{round}\{ar^2\}\varphi]$$



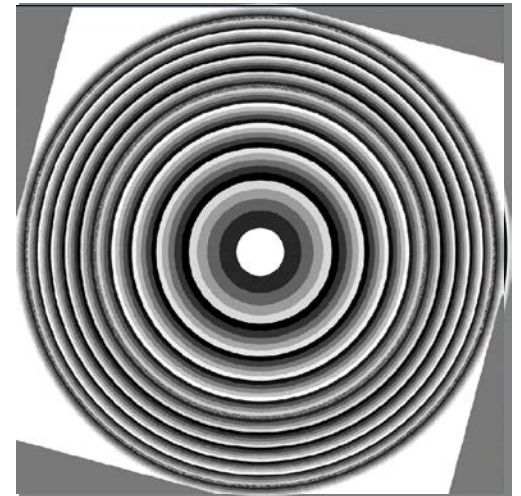
$$\exp[-i \cdot \text{round}\{ar^2\}(\varphi - \theta)]$$

x



=

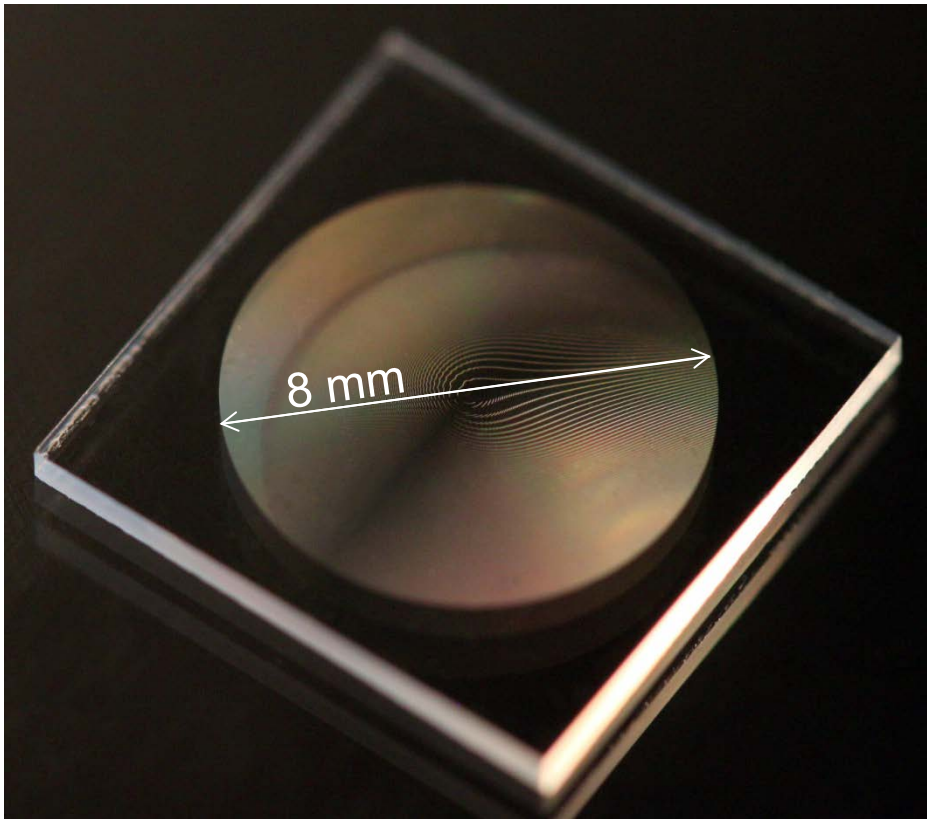
$$\exp[i \cdot \text{round}\{ar^2\}\theta]$$



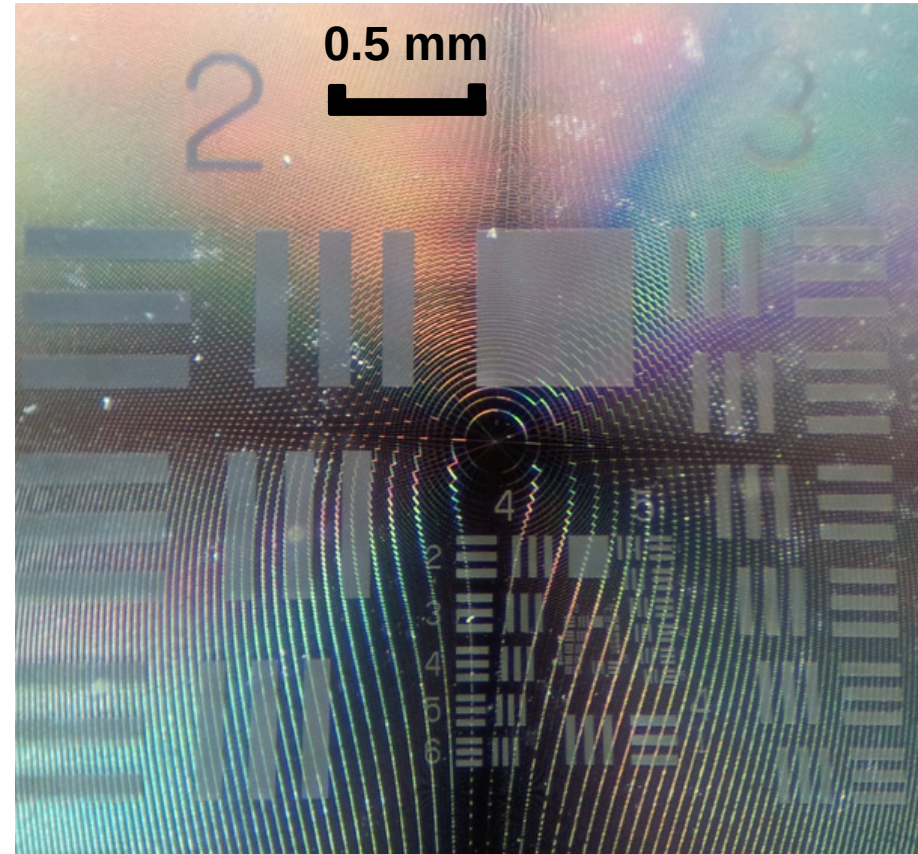
$$f^{-1} = a \theta \lambda / \pi$$

Herstellung der diffraktiven Moiré-Elemente

Lithographie, ähnlich wie Halbleiterstrukturierung

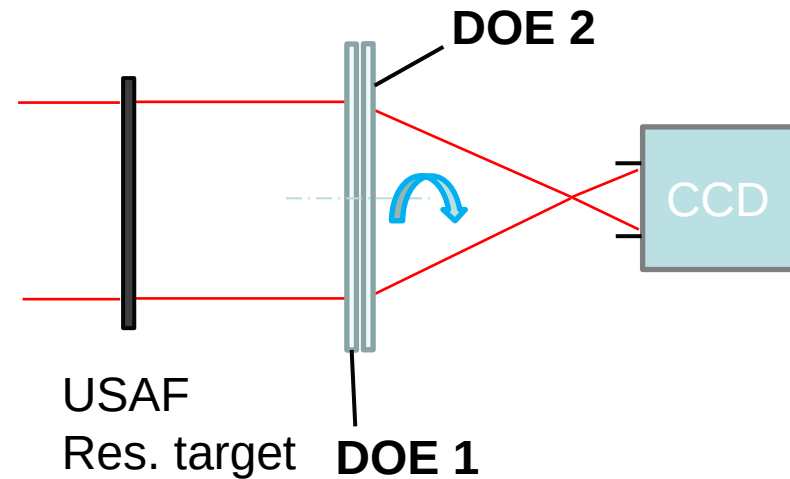


Array size 4000 x 4000 Pixels
Pixelsize: 2 μm
Thickness: 0.75 mm

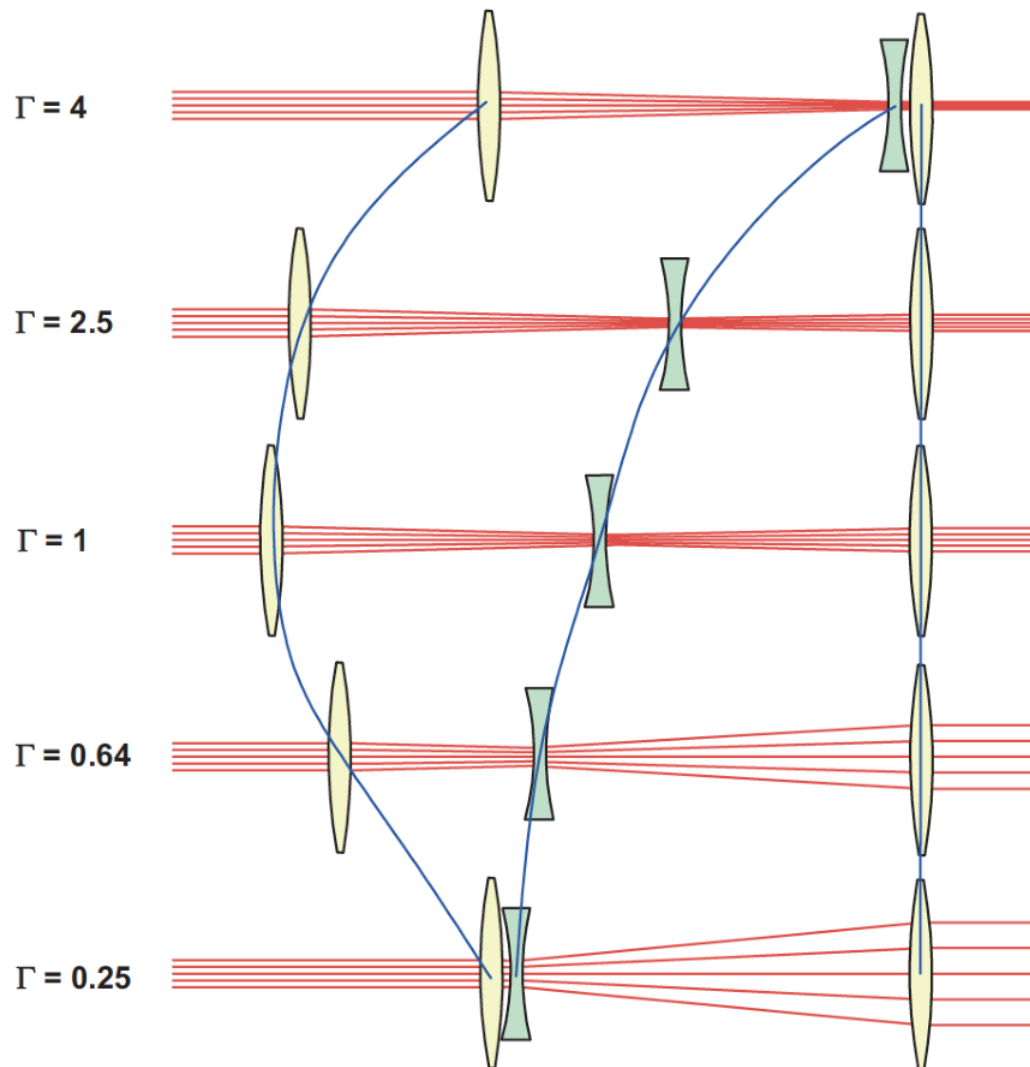


Testergebnisse

Abbildungsqualität: "Beugungslimitiert" (optimal)



Klassisches Zoom-Objektiv (Teleskop)

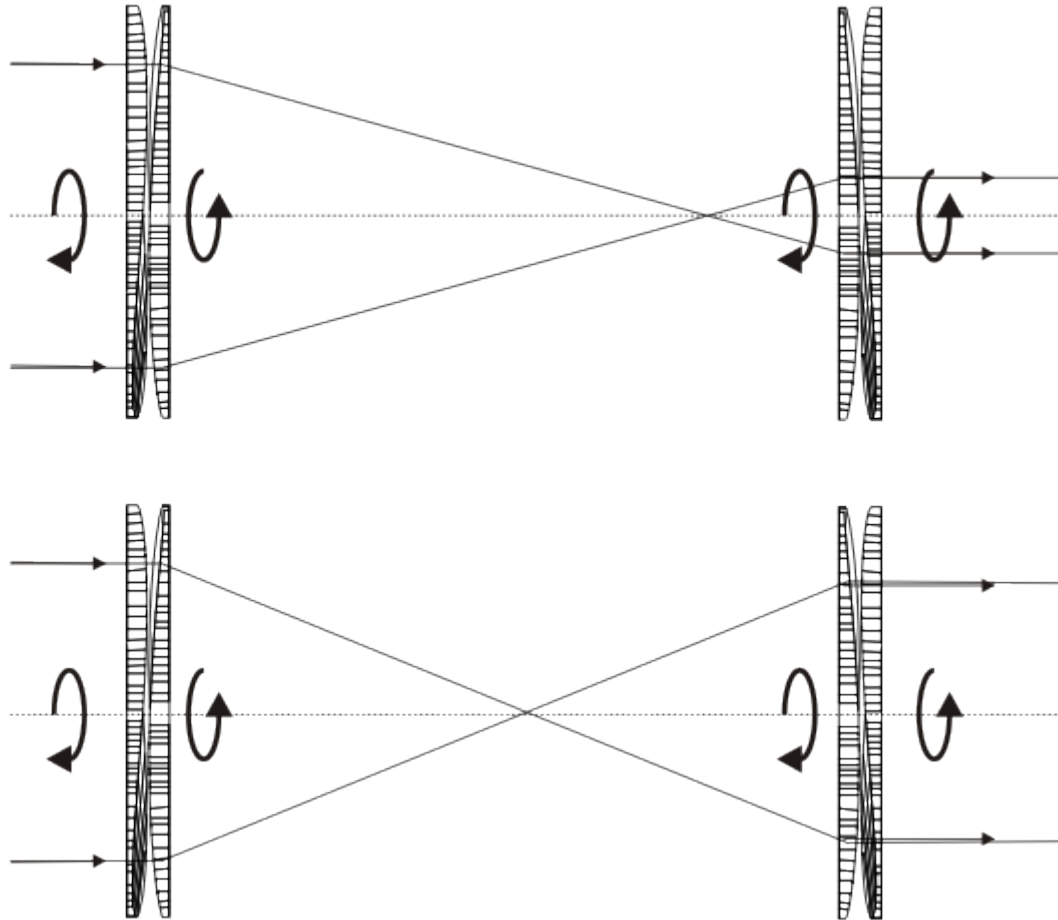


Verschiebung von mindestens 2 Linsen nötig!

Zoom-Objektiv (Teleskop) mit verstellbaren Linsen

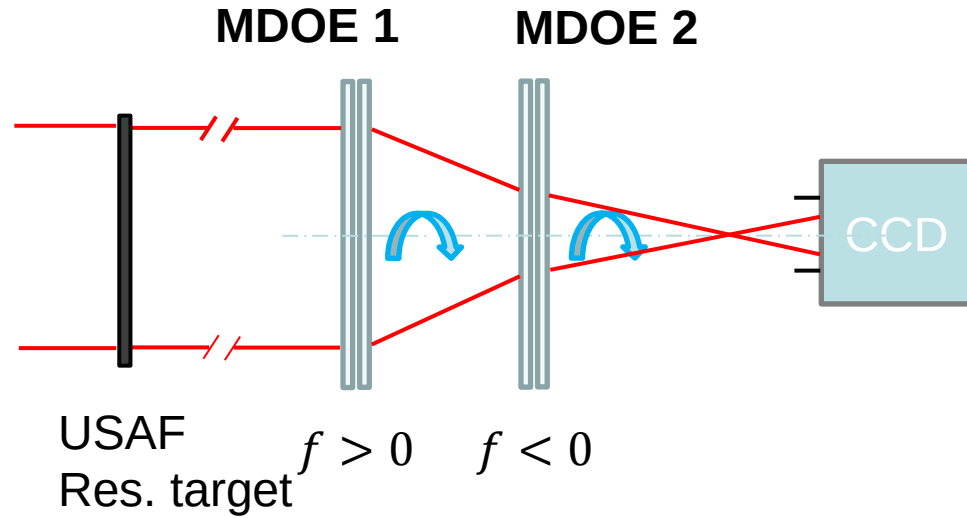
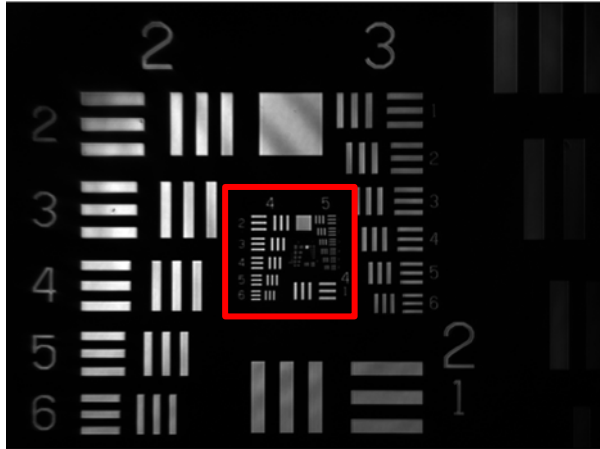
Verstellbare Linse 1

Verstellbare Linse 2

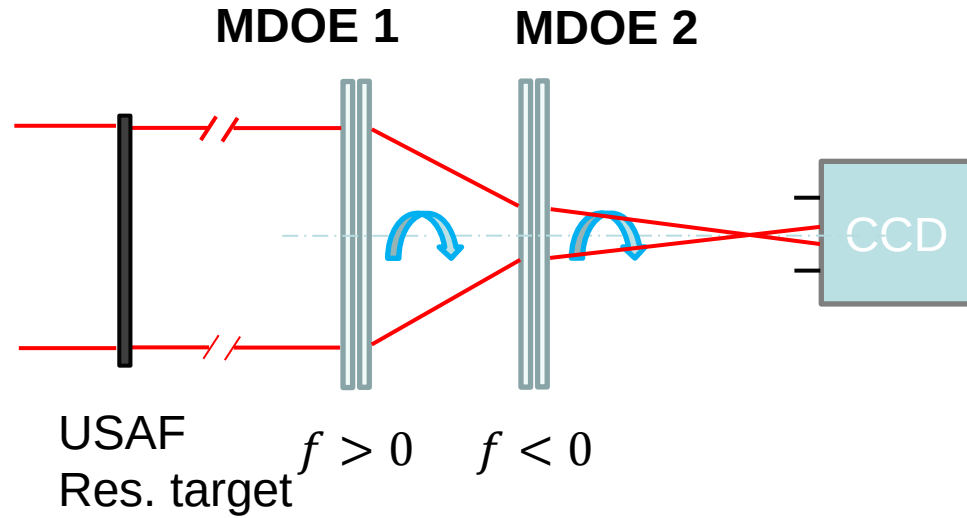
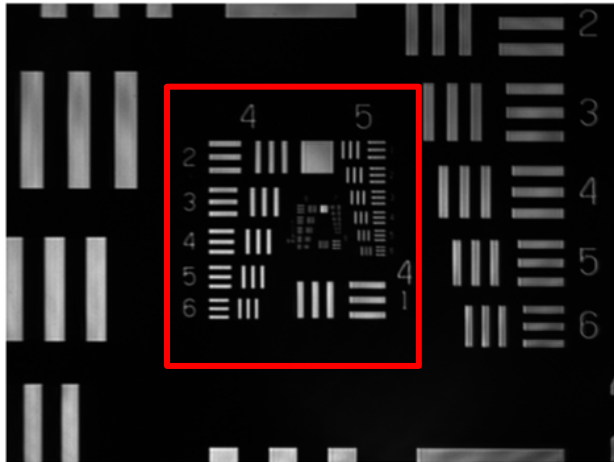


Keine Verschiebung von Linsen erforderlich!

Zoom Mikroskopie

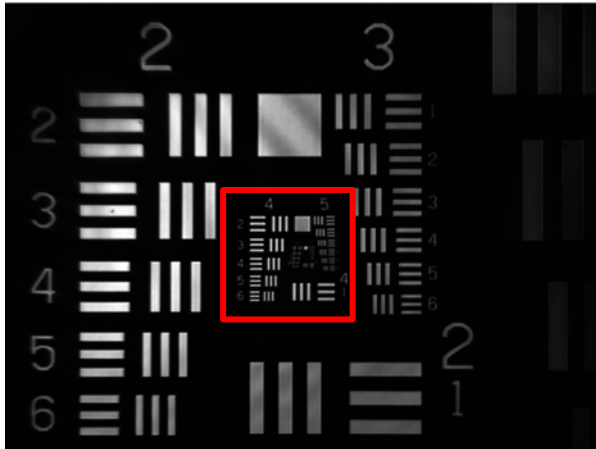


Zoom Mikroskopie

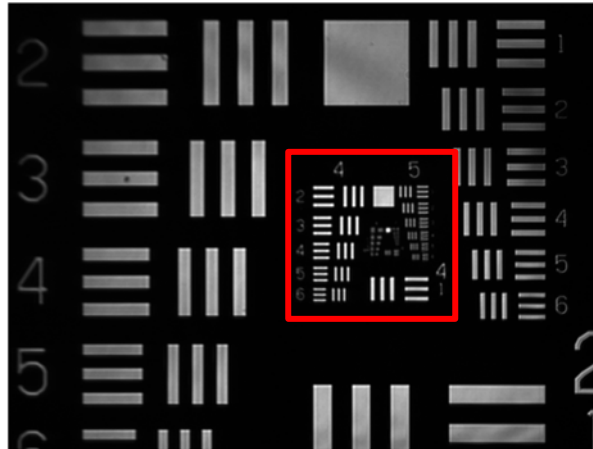


Zoom Mikroskopie

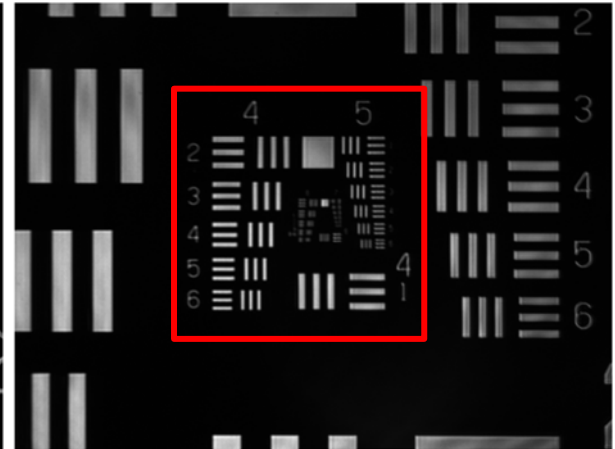
$M = 1.35$



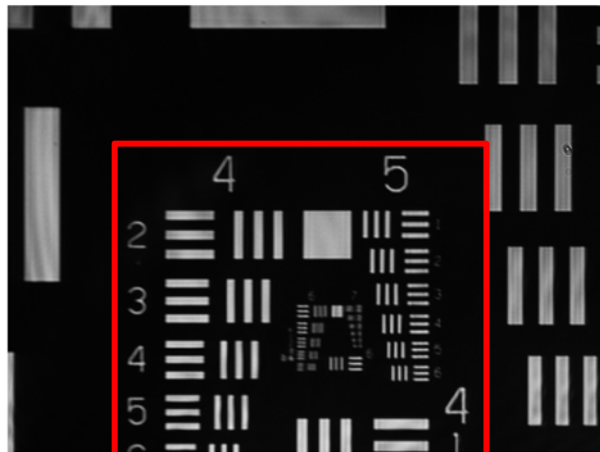
$M = 1.83$



$M = 2.71$



$M = 4.11$



$M = 6.92$

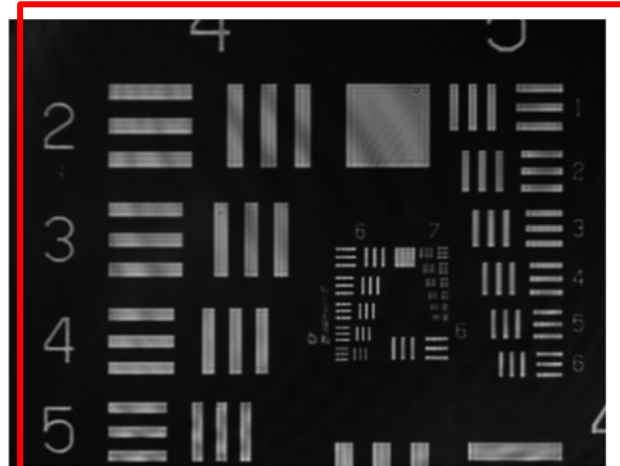
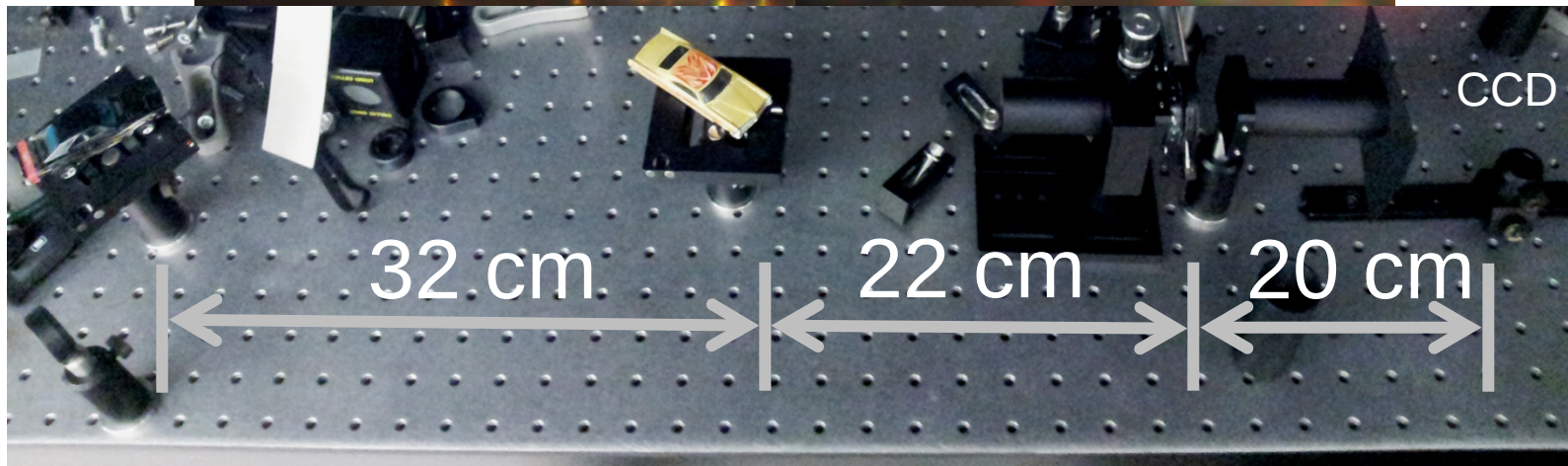
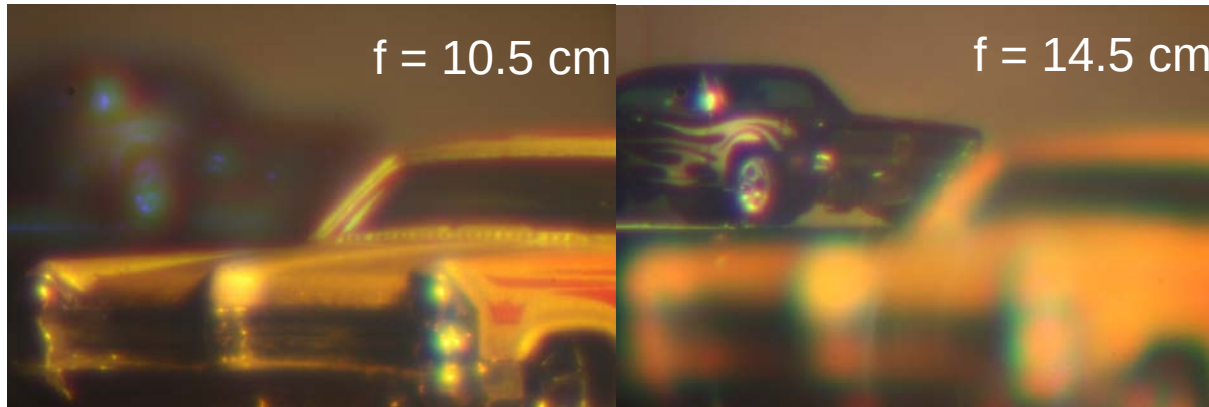


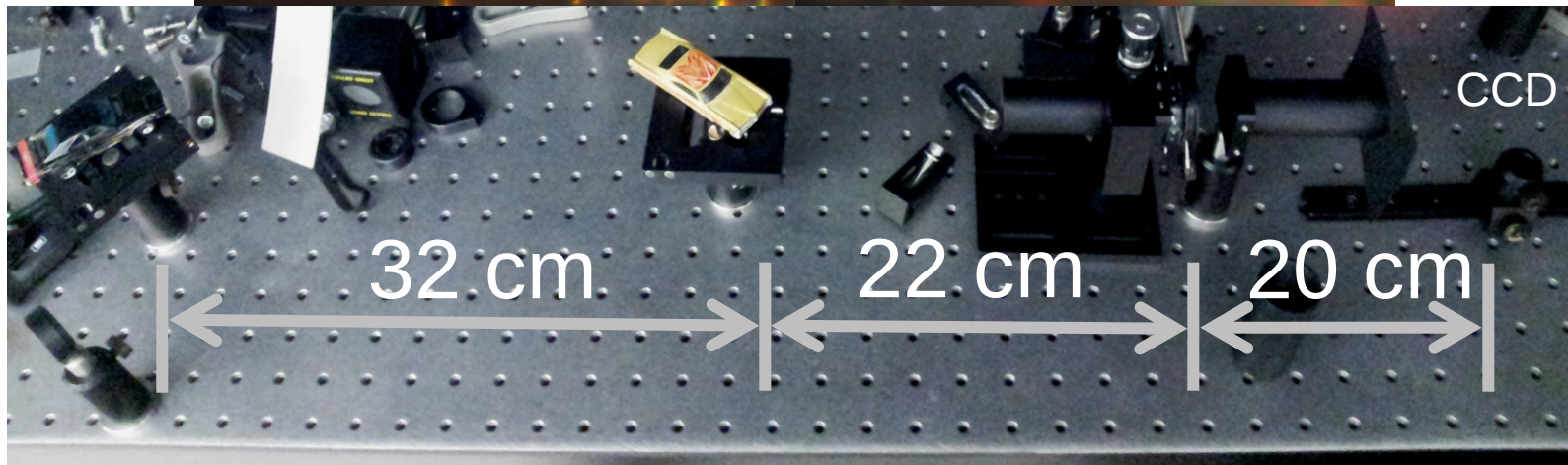
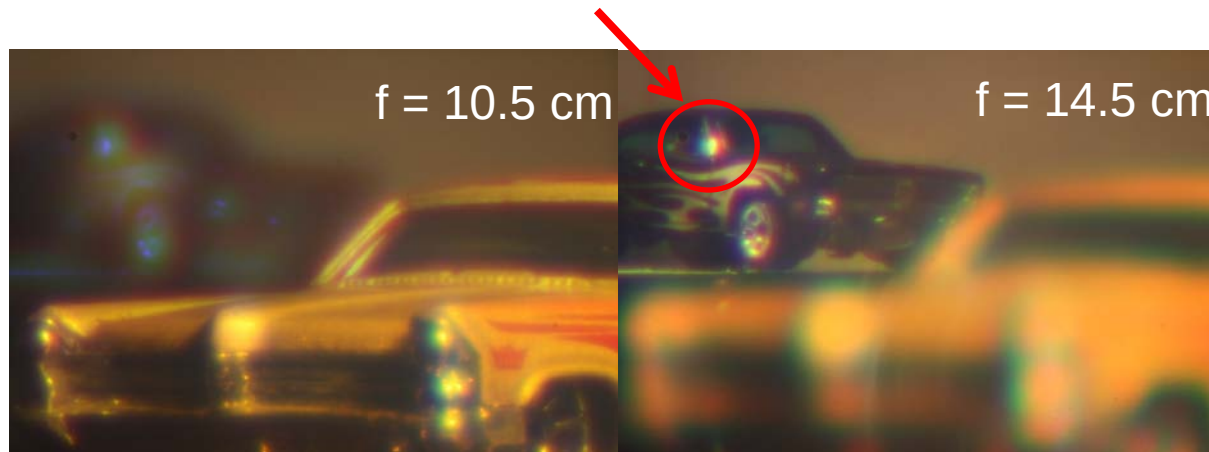
Abbildung mit Weißlicht



Beleuchtung: Halogenlampe Kamera: Canon EOS 1000D

Abbildung mit Weißlicht

Farbwiedergabe nicht optimal



Beleuchtung: Halogenlampe Kamera: Canon EOS 1000D

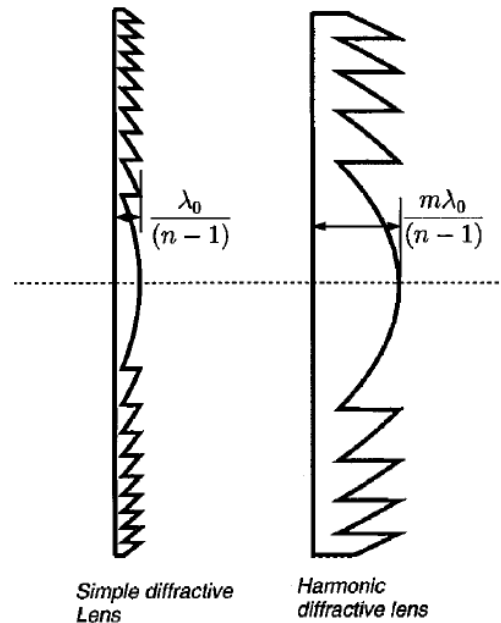
Achromatische Moiré-Linsen?



Diffraktive optische Elemente höherer Ordnung

- „Harmonic diffractive lenses“
 - Haben gleiche Brennweite für mehrere Lichtwellenlängen gleichzeitig

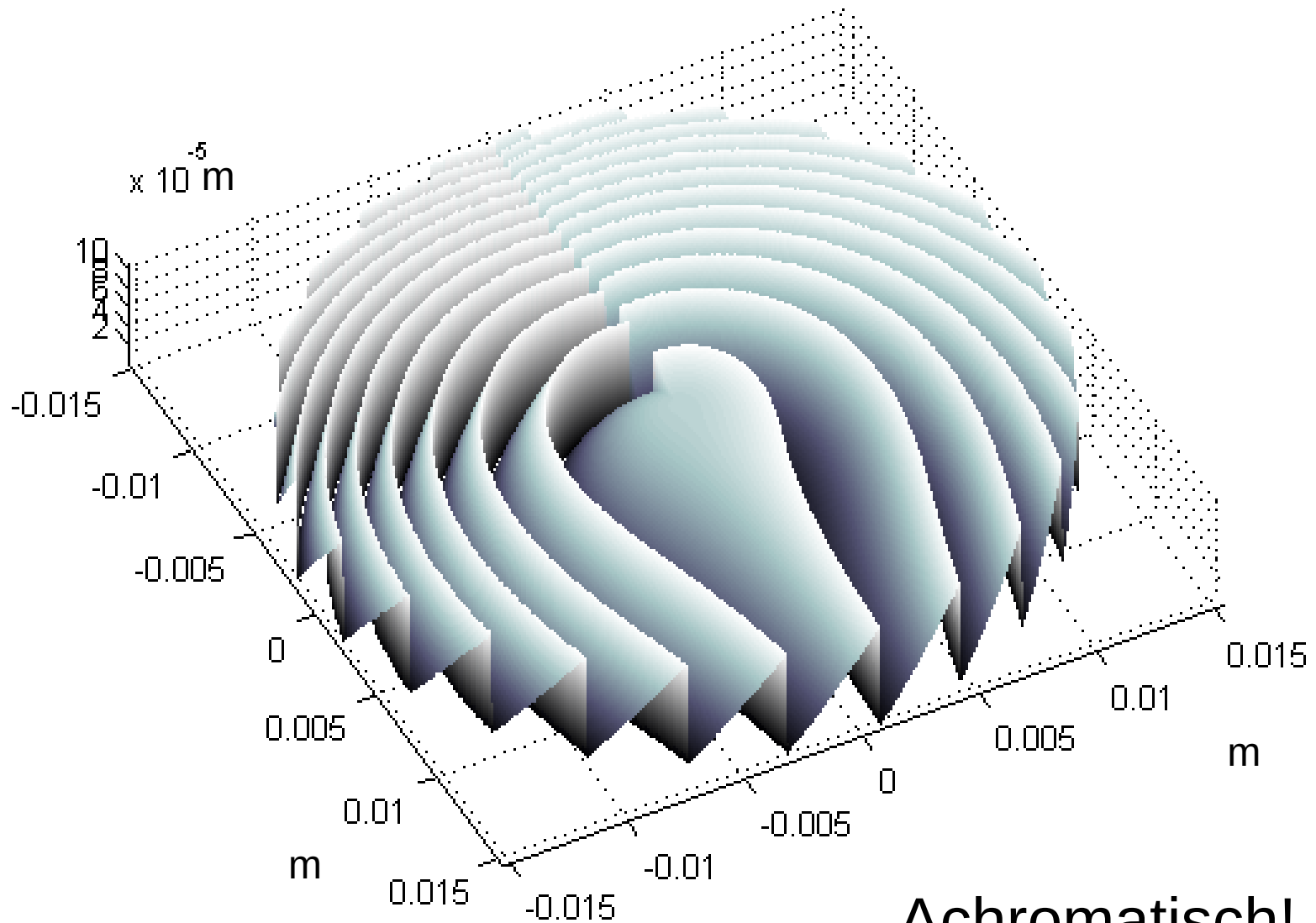
Sweeney et al. Appl. Opt. 34(14),1995.



Kann dieses Prinzip auf Moiré-Linsen übertragen werden?

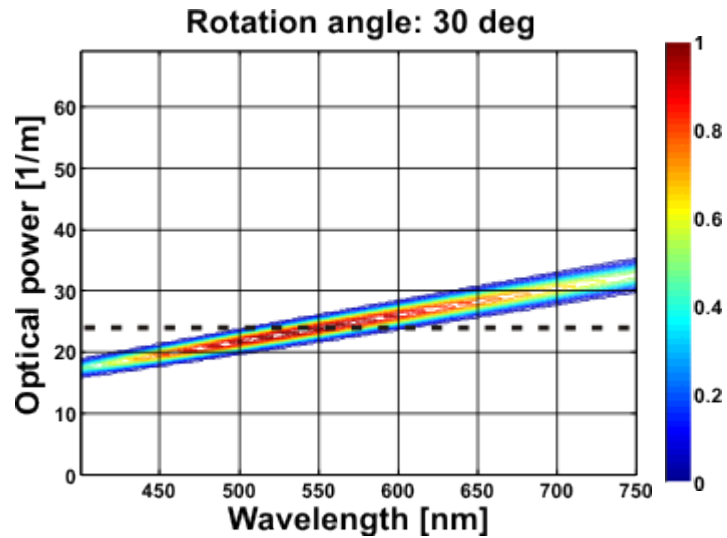
Ja!

Higher order Moire-lenses



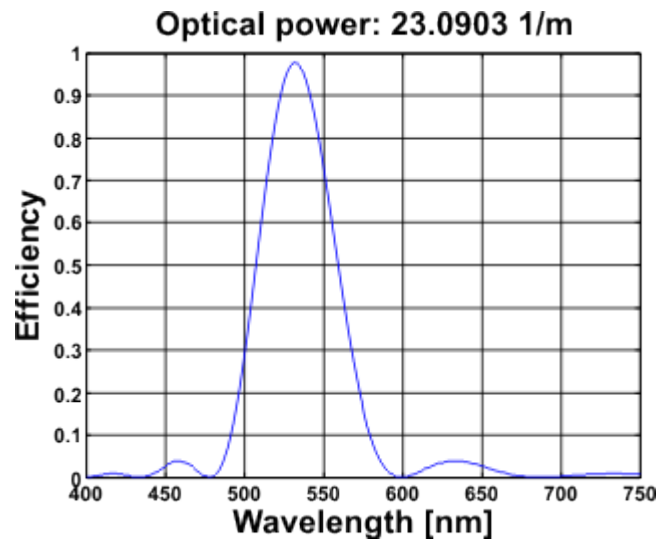
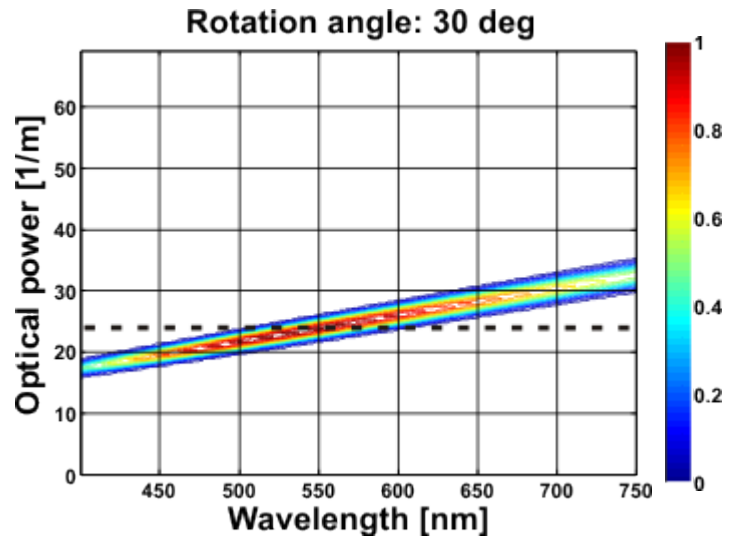
Achromatische Moiré-Linsen (numerisch berechnet)

MDOE 1.ter Ordnung:



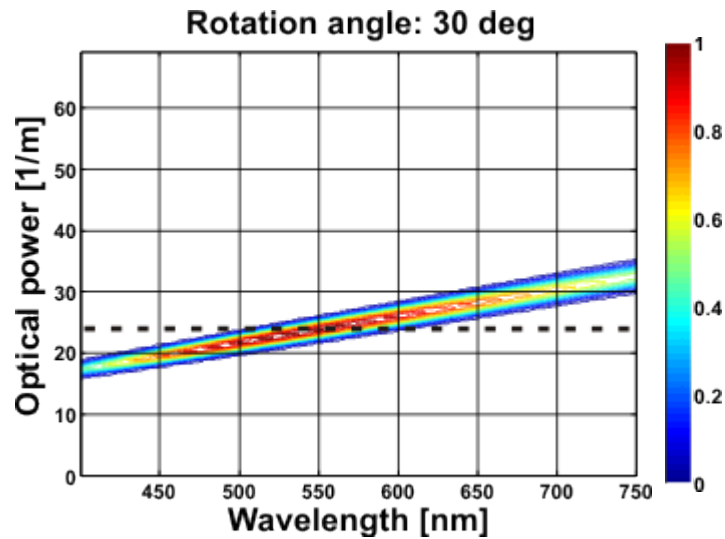
Achromatische Moiré-Linsen

MDOE 1.ter Ordnung:

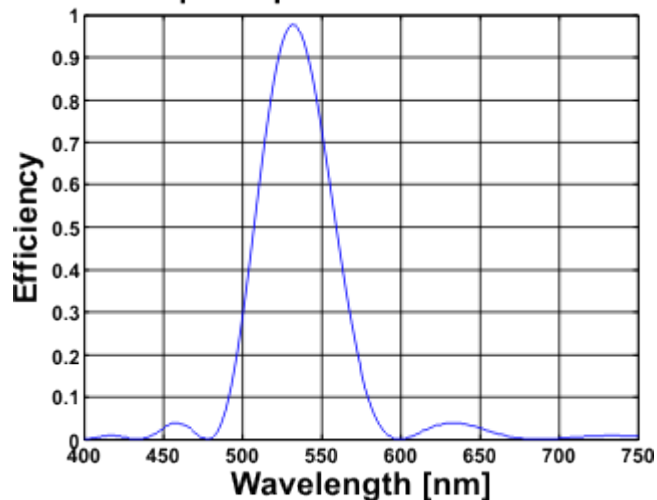


Achromatische Moiré-Linsen

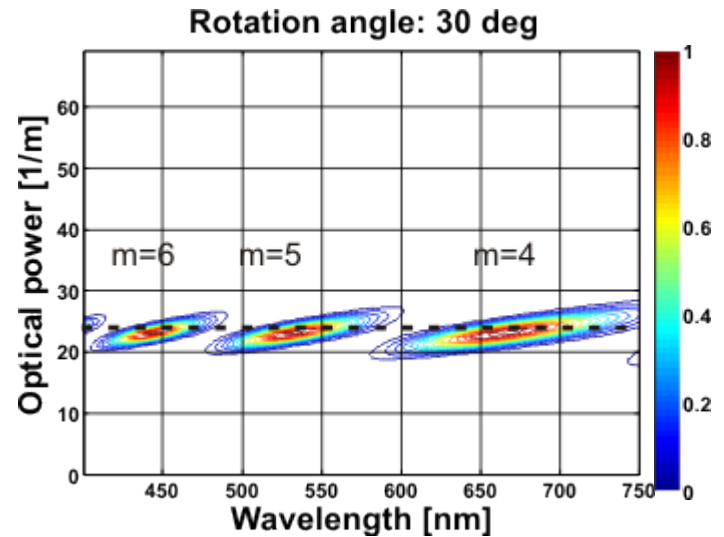
MDOE 1.ter Ordnung:



Optical power: 23.0903 1/m

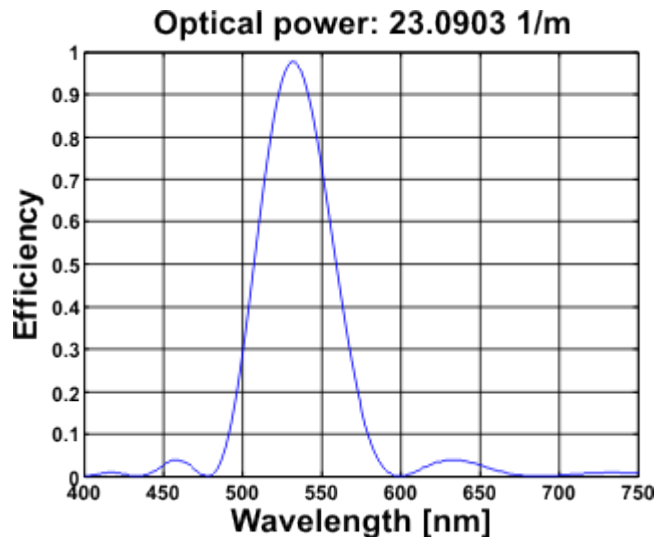
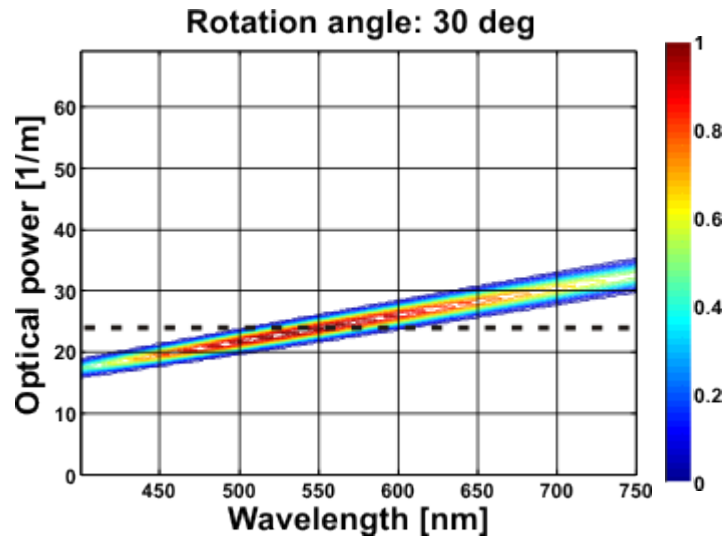


MDOE 5.ter Ordnung:

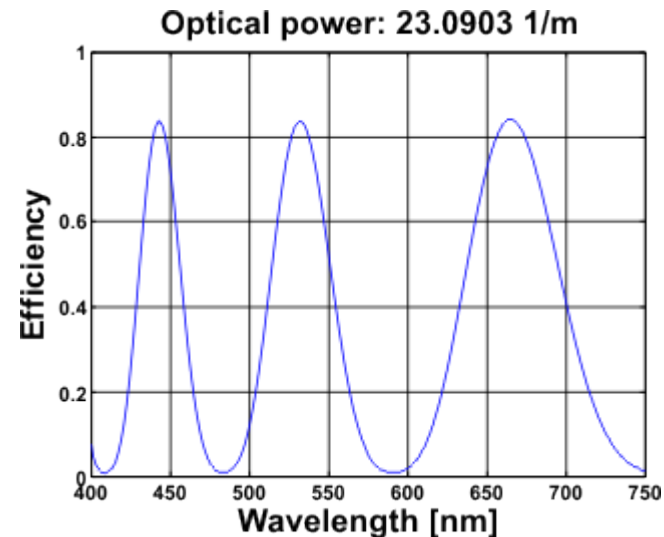
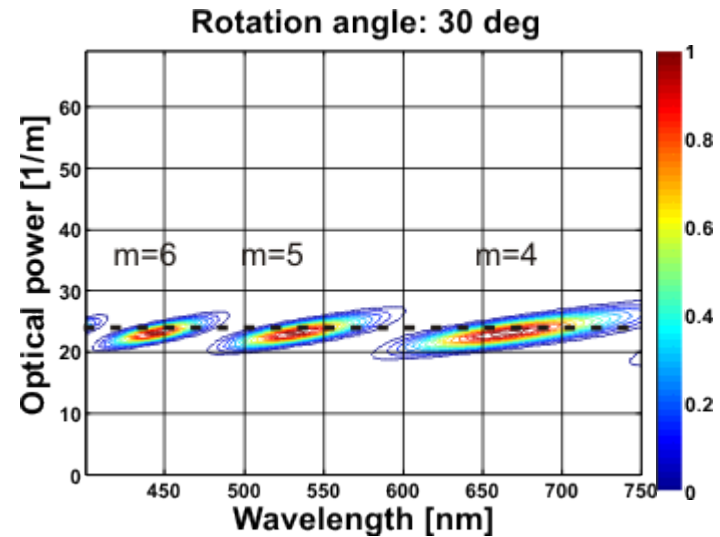


Achromatische Moiré-Linsen

MDOE 1.ter Ordnung:

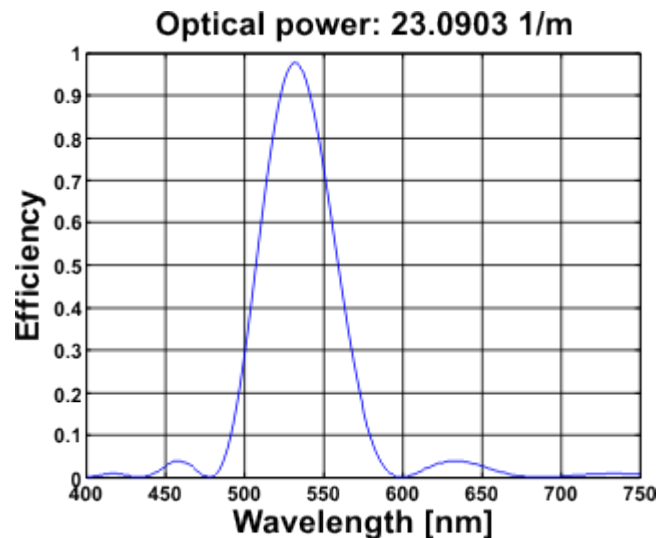
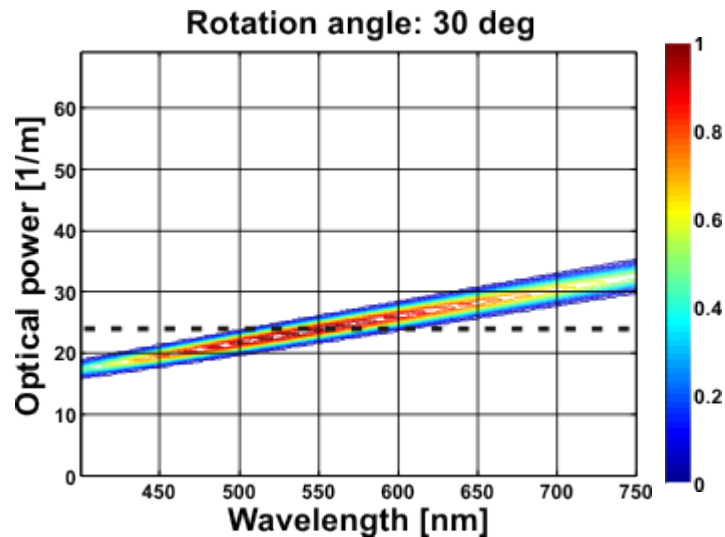


MDOE 5.ter Ordnung:

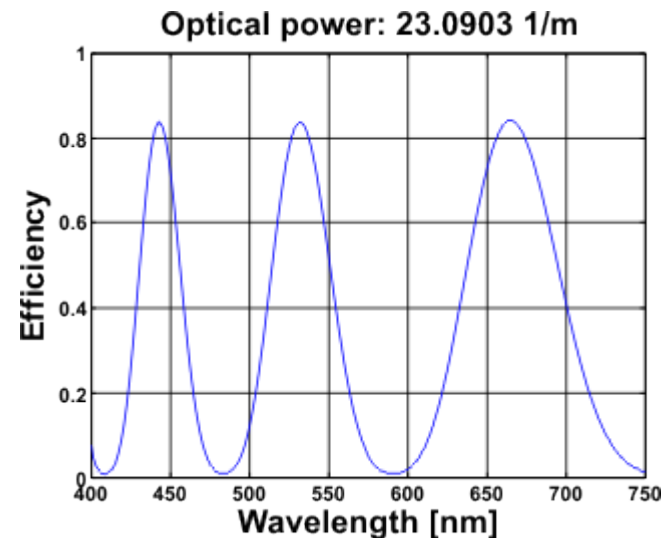
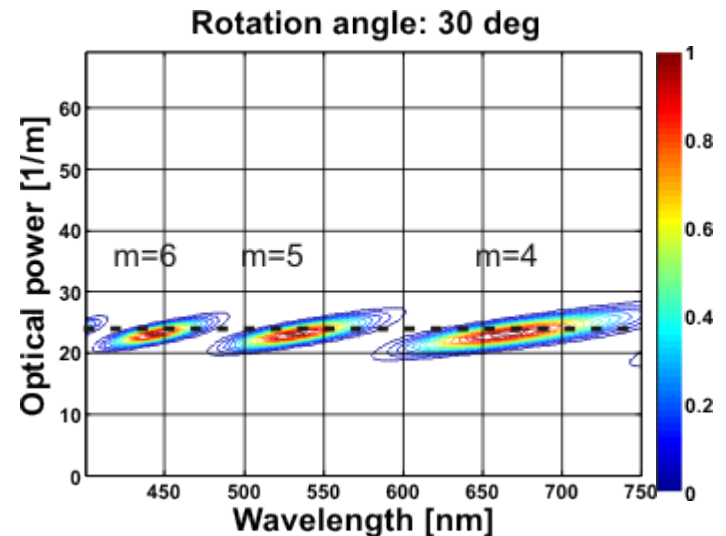


Achromatische Moiré-Linsen

MDOE 1.ter Ordnung:



MDOE 5.ter Ordnung:



Passt!

Vor- und Nachteile der verstellbaren Moiré-Linsen

- Vorteile

- Hoher Einstellbereich der Brechkraft, sehr genaue Einstellung möglich
- Hohe optische Auflösung ("Schärfe" des Bildes)
- Keine Verschiebung von optischen Komponenten nötig
- Robust gegen Temperatur, Vibration, Druck, hohe Lichtintensität
- Elektronische Regelung in elektrisch angesteuerten Rotationshalterungen möglich

- Nachteile

- Leicht reduzierte Lichteffizienz: Einige Prozent ungenutztes Licht (diffuses Streulicht, Kontrastverminderung)
- Wellenlängenabhängigkeit der Brechkraft ("Dispersion")

Vor- und Nachteile der verstellbaren Moiré-Linsen

- Vorteile

- Hoher Einstellbereich der Brechkraft, sehr genaue Einstellung möglich
- Hohe optische Auflösung ("Schärfe" des Bildes)
- Keine Verschiebung von optischen Komponenten nötig
- Robust gegen Temperatur, Vibration, Druck, hohe Lichtintensität
- Elektronische Regelung in elektrisch angesteuerten Rotationshalterungen möglich

- Nachteile

- Leicht reduzierte Lichteffizienz: Einige Prozent ungenutztes Licht (diffuses Streulicht, Kontrastverminderung)
- Wellenlängenabhängigkeit der Brechkraft ("Dispersion")



Lösung des Problems bereits in Sicht!

Wie geht es weiter?



- Start-up Firma Diffratec (gegründet durch Martin Bawart)
- Herstellung der ersten achromatischen Moiré-Linsen demnächst geplant
- Weitere interessante optische Komponenten, die auf dem Moiré-Prinzip basieren sind/werden patentiert (Patenthalter: Medizinische Universität) :
 - Strahlablenkungssystem (2D-Scanner)
 - Neuartiges Zoomsystem
 - Fokussiersystem im kHz-Bereich
 - Anwendung als Linse im Infrarot- (Terahertz-) Bereich

Wie geht es weiter?



- Start-up Firma Diffratec (gegründet durch Martin Bawart)
- Herstellung der ersten achromatischen Moiré-Linsen demnächst geplant
- Weitere interessante optische Komponenten, die auf dem Moiré-Prinzip basieren sind/werden patentiert (Patenthalter: Medizinische Universität) :
 - Strahlablenkungssystem (2D-Scanner)
 - Neuartiges Zoomsystem
 - Fokussiersystem im kHz-Bereich
 - Anwendung als Linse im Infrarot- (Terahertz-) Bereich

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Varifocal Fresnel lens

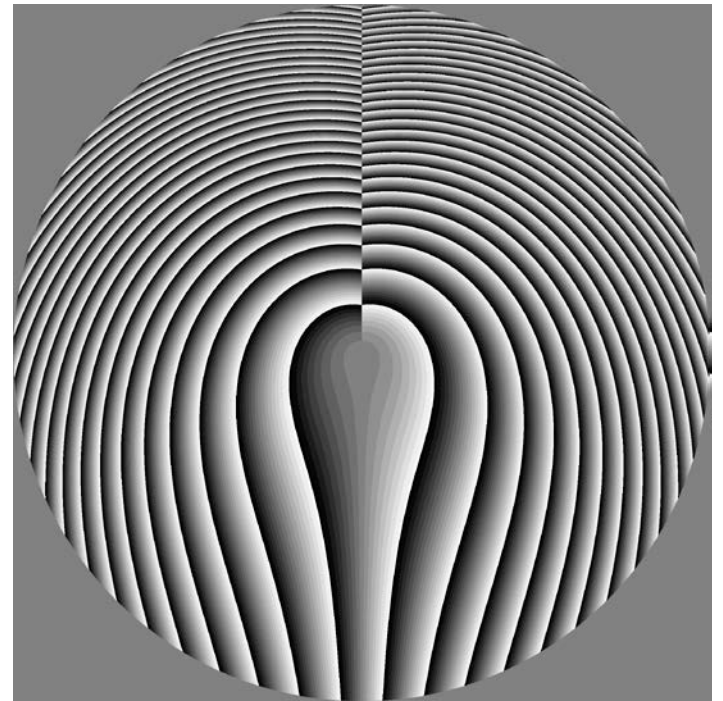
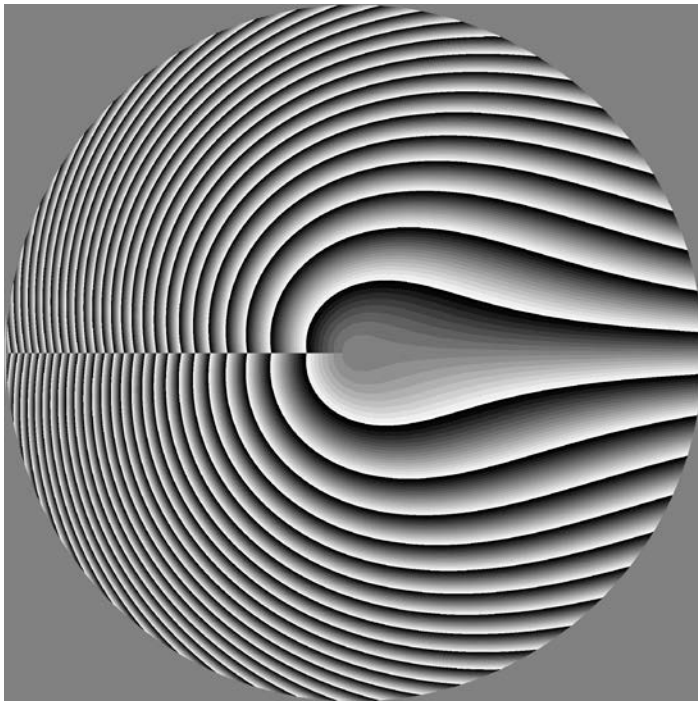
$$T_{Lens} = \exp[i \frac{\pi r^2}{\lambda f}]$$

$$T_{DOE\ 1} = \exp[iar^2\varphi]$$

$$T_{DOE\ 2} = \exp[-iar^2(\varphi - \theta)]$$

$$T_{DOE\ 1} = \exp[iar^2\varphi]$$

$$T_{DOE\ 2} = \exp[-iar^2(\varphi - \theta)]$$



Varifocal Fresnel lens

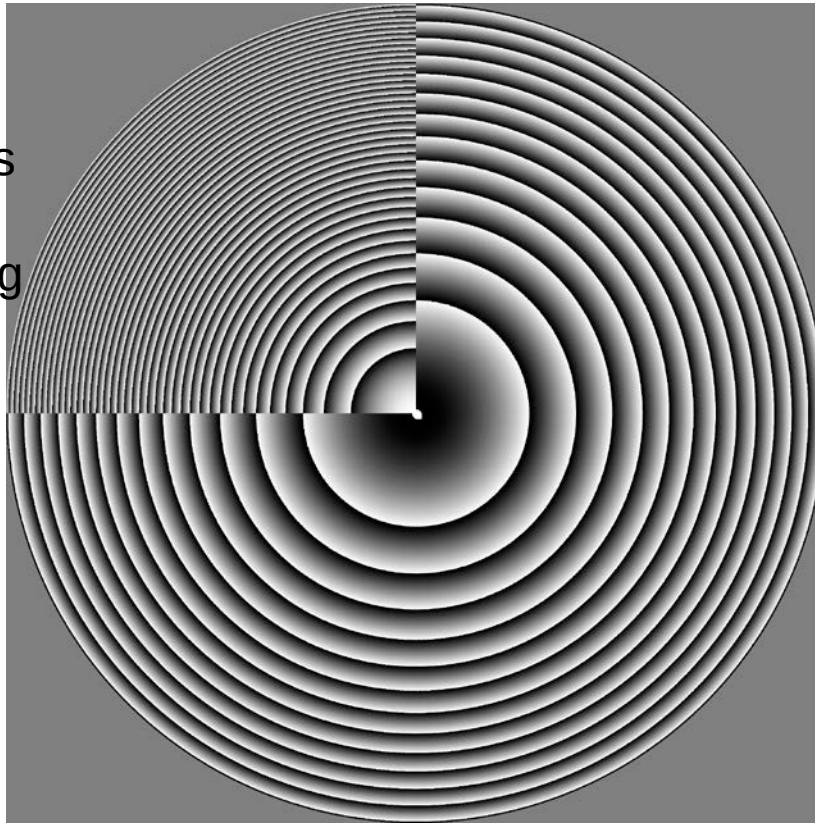
$$T_{Joint} = T_{DOE\ 1} \cdot T_{DOE\ 2}$$

$$T_{Lens} = \exp\left[i \frac{\pi r^2}{\lambda f}\right]$$

$$T_{Joint} = \exp[iar^2\theta] \quad \text{for } \varphi > \theta$$
$$= \exp[iar^2(\theta - 2\pi)] \quad \text{for } \varphi < \theta$$

Moiré effect:

Two similar gratings lead to a structure with a larger beating period.

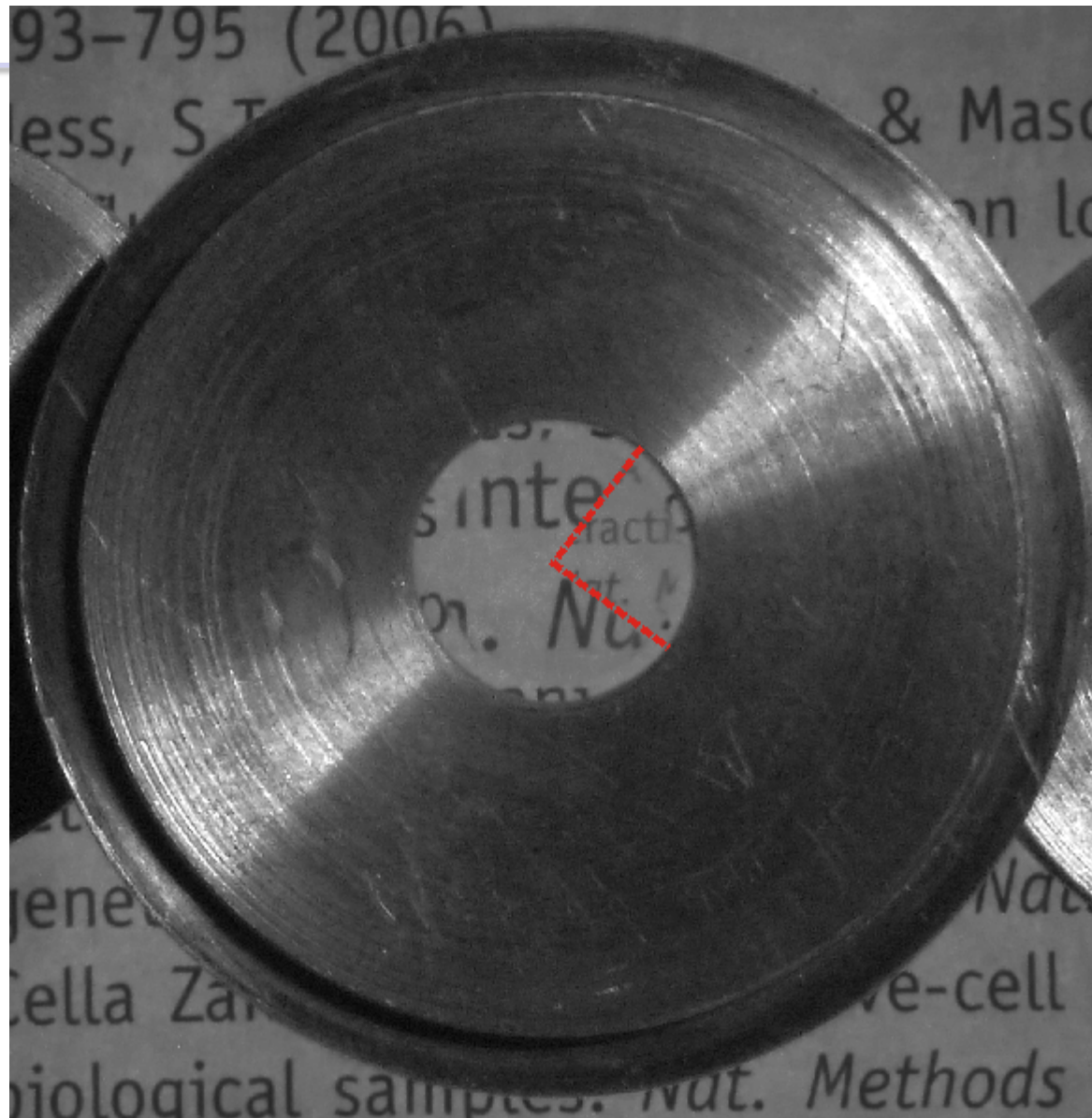


Sector formation:

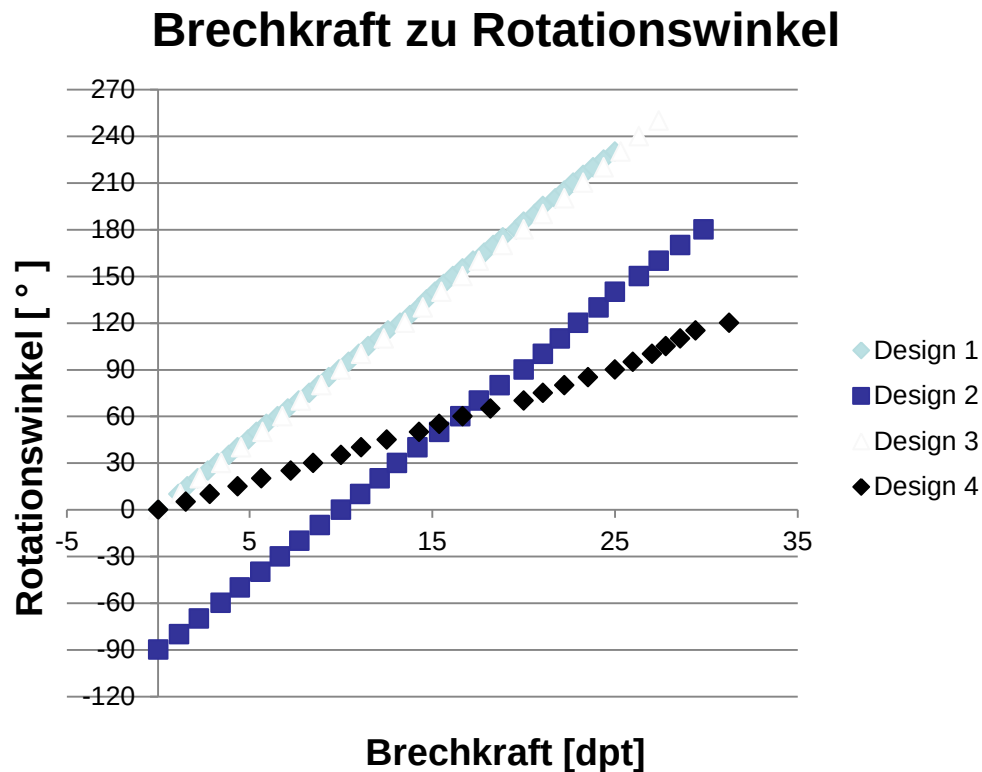
Ambiguity of rotational angle θ

$$f_1^{-1} = a|\theta|\lambda/\pi$$

$$f_2^{-1} = -a(2\pi - |\theta|)\lambda/\pi$$

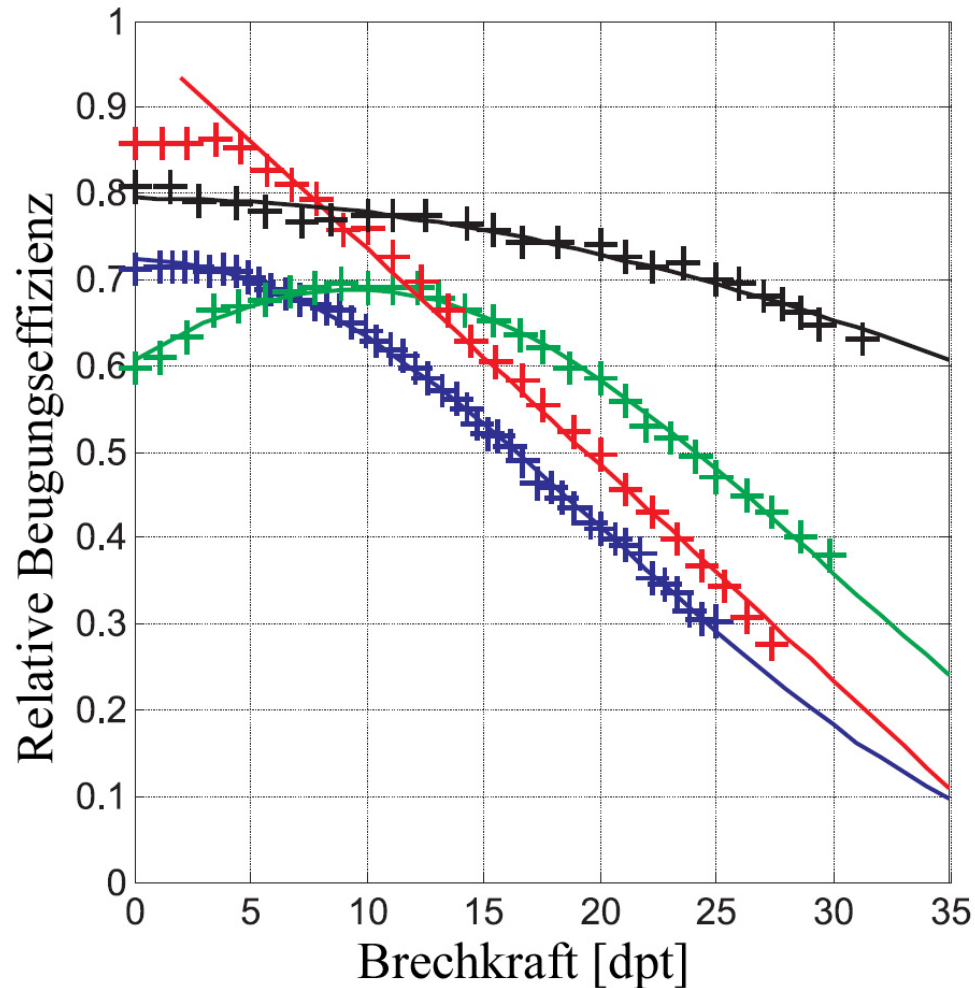


Messung der variablen Brennweiten



- Bestimmung von $\phi = 0^\circ$ mit Shear-plate (für Design 2 konvergenter Strahl bei $\phi = -90^\circ$)
- Bestimmung der variablen Brennweiten durch axiales Verschieben der PCO Kamera in Livebild-Modus.

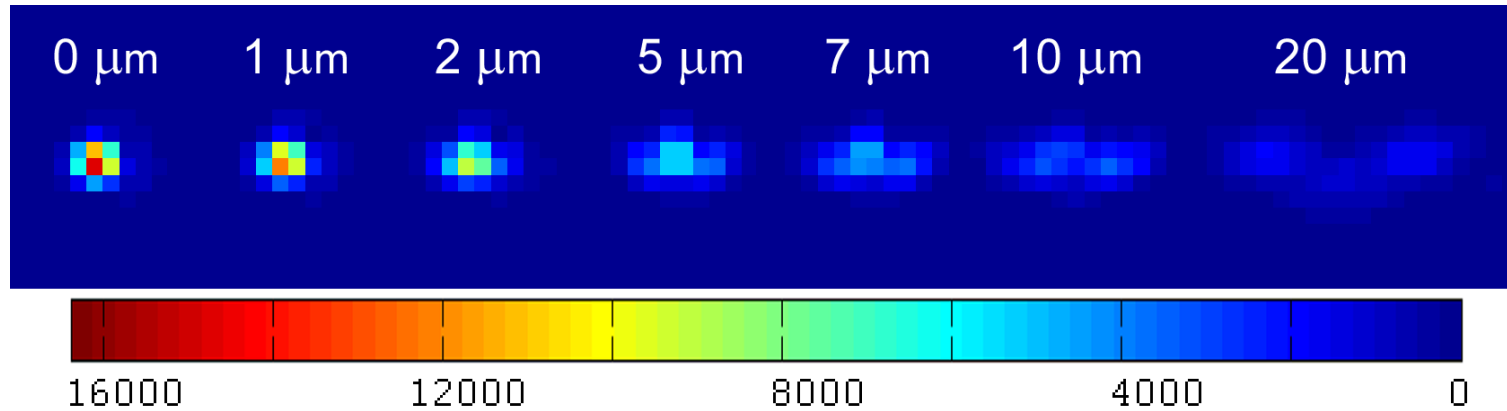
Bestimmung rel. Beugungseffizienz



Design 1
Design 2
Design 3
Design 4

- Iris-Blende 0.5 mm in Fokusebene
- Beleuchtung 633 nm
- Messung der Lichtintensität im Abstand 1cm hinter MDOE und 10 cm hinter Iris-Blende

PSF bei Dejustage

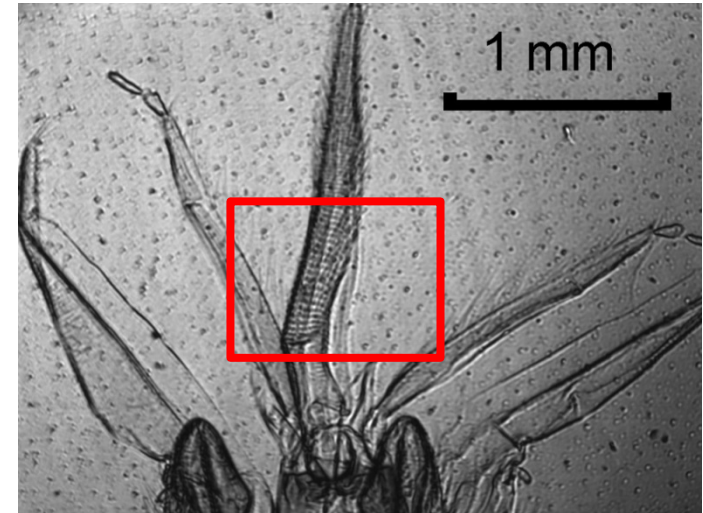
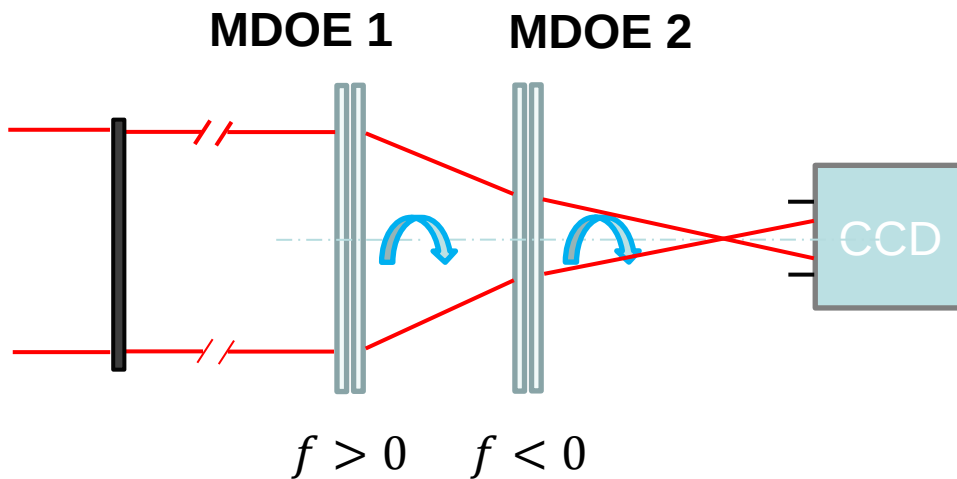


Beleuchtung: HeNe-Laser

Kamera: PCO 4000s

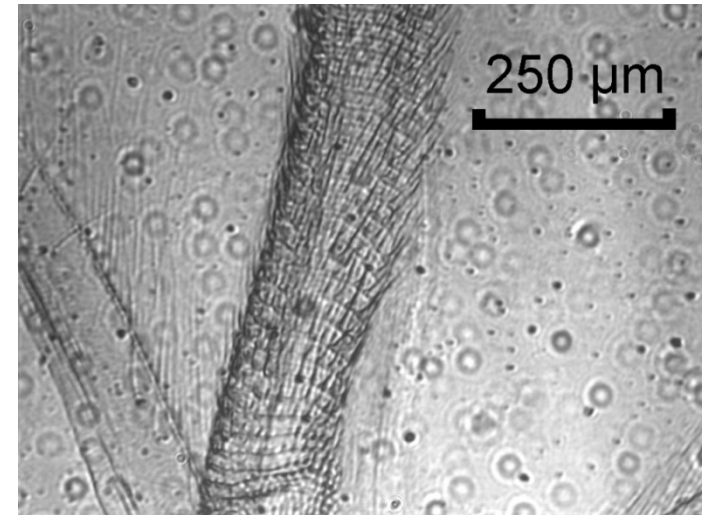
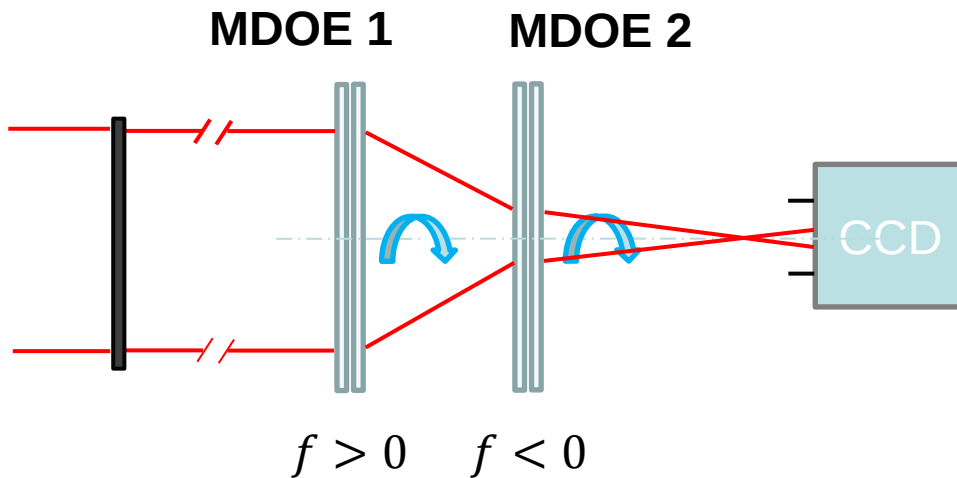
Pixelgröße: 9 μm

Zoom Mikroskopie



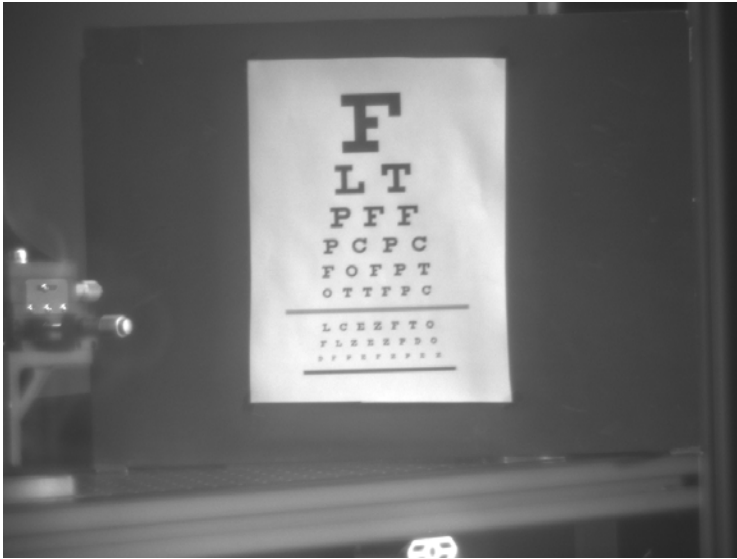
Mouth parts of a honey bee

Zoom Mikroskopie



Mouth parts of a honey bee

Fokussieren auf unterschiedliche Entfernungen



Entfernung: 3 m



Entfernung: 6 cm
(Armbanduhr)

Beleuchtung: Halogenlampe mit Rotfilter (Bandbreite 30 nm)

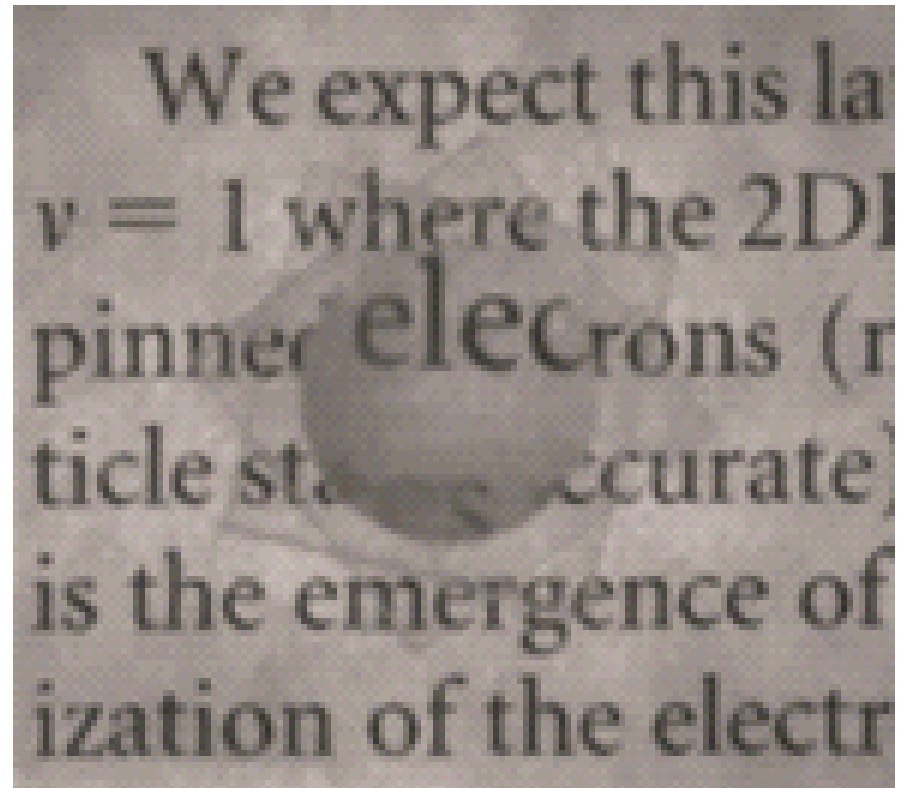
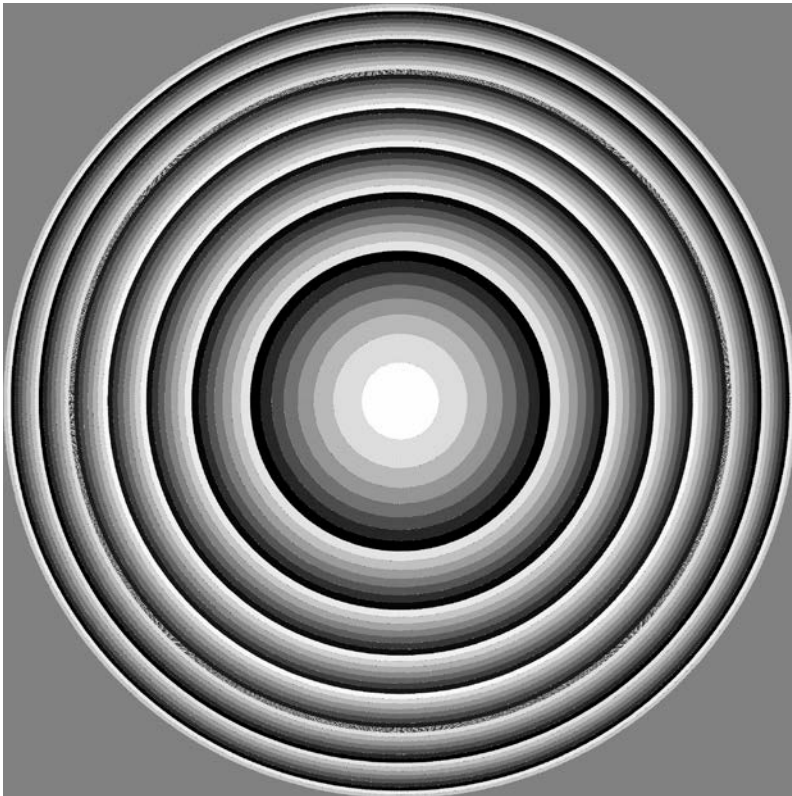
Kamera: Bluefox

Einstellbare Moiré Linse

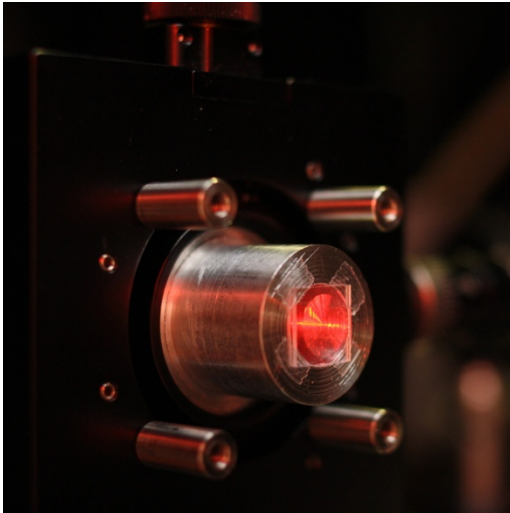
$$T_{Joint} = \exp(i \cdot \text{round}\{ar^2\}\theta)$$

$$\text{round}\{ar^2\} = 0, 1, 2, \dots, 500$$

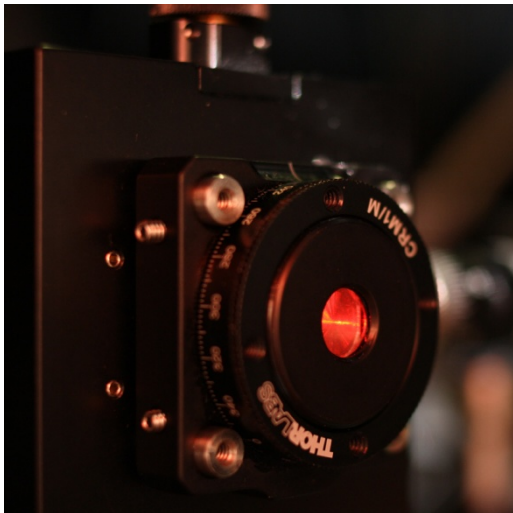
Resulting lens



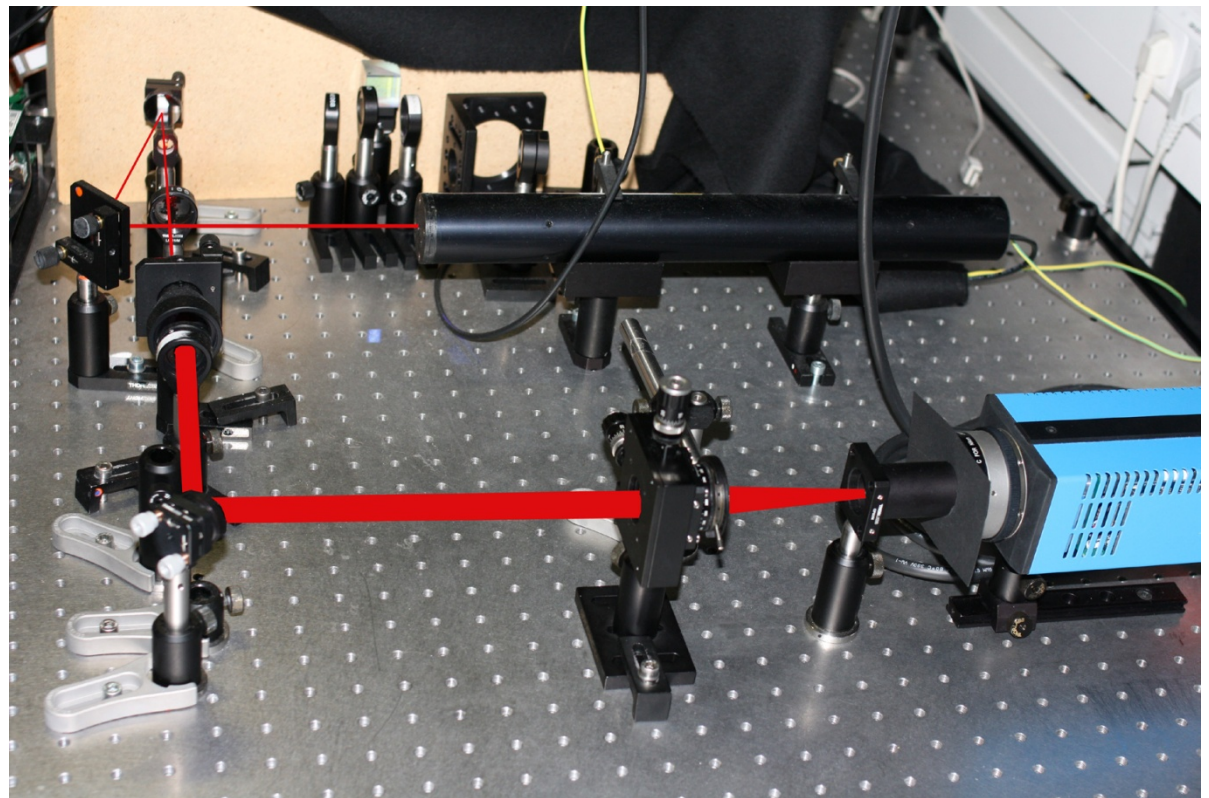
Impressionen aus dem Labor



Halterung des rotationsstarren diffraktiven Elements an xy-Translationsvorrichtung.



Halterung des zweiten diffraktiven Elements an Rotationsvorrichtung.



Nebenbei...

Luis Walter Alvarez
1911 - 1988



Nobelpreis 1968

- Entdecker des Ost/West Effekts der kosmischen Strahlung (1935)
- Entdecker des Elektronen-Einfang Effekts (Yukawa, 1937)
- Messung des magnetischen Moments des Neutrons (Bloch, 1939)
- Entdecker von Tritium (1939)
- Konstrukteur neuartiger Radarsysteme (1940)
- Konstruiert den Berkeley Protonen Linearbeschleuniger (1947)
- Entdeckt Resonanzzustände von Elementarteilchen (1950)
- Entdeckt das Omega-Meson (1961)
- Untersucht Chephren Pyramide mit kosmischen Myonen (1965)
- Untersucht Mord an US Präsidenten Kennedy (1963)
- Elektronische „in door“-Golfmaschine für Präsident [Eisenhower](#).
- Entwickelt Quecksilberbogenlampe als künftigen NIST Standard
- Entwickelt und untersucht Meteoriten-Einschlagstheorie als Ursache für das Aussterben der Dinosaurier
- Erfindet Linse mit veränderlicher Brechkraft (1967)