



# Mikrooptik für die Schule: Das Educational Kit des EU-Verbundes NEMO

Norbert Lindlein

Institut für Optik, Information und Photonik  
(Max-Planck-Forschungsgruppe)  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Staudtstr. 7/B2, D-91058 Erlangen

## Gliederung:

- Der EU-Verbund NEMO
- Zweck des Educational Kits
- Beschreibung bzw. Demonstration des Educational Kits



# NEMO = European Network of Excellence on Micro- Optics

Beteiligung:

12 Länder

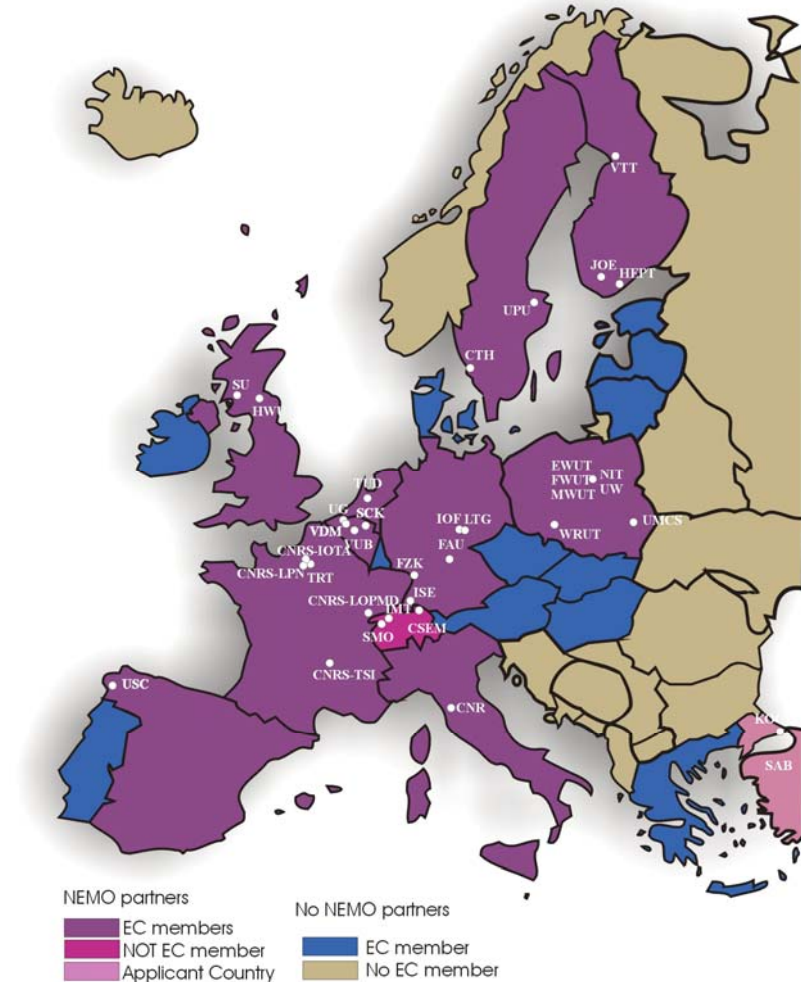
30 Forschungspartner

333 Wissenschaftler

6,4 MEuro (verteilt auf 4 Jahre)

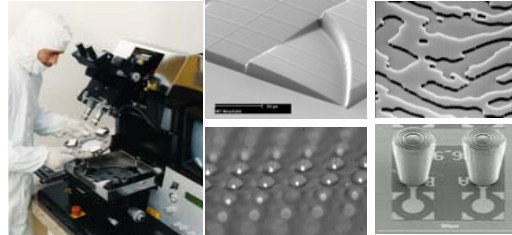
EU Förderung

## The NEMO Network 2004-2008

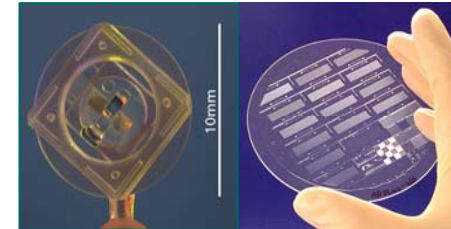




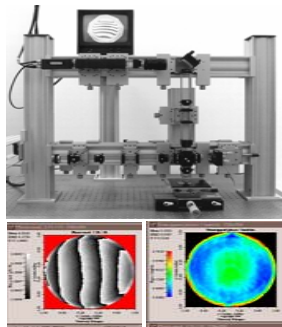
# Arbeitsgebiete von NEMO



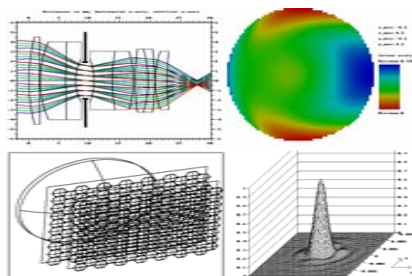
Herstellung von Prototypen



Preisgünstige Vervielfältigungsverfahren



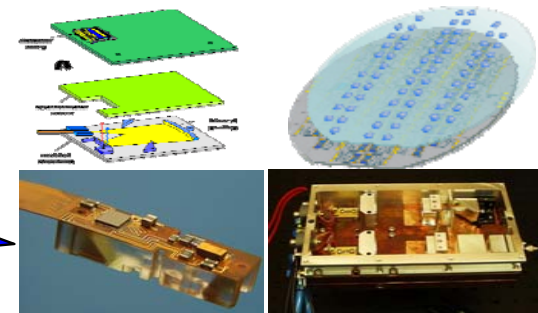
Messverfahren und mikrooptische  
Messgeräte



Modellierung und Design



Vorhandene  
Technologien  
und Know-how



Zusammenbau und Integrationsverfahren



Zuverlässigkeitstests und Normung



Ein Arbeitspaket (unter vielen) im Verbund NEMO war die Entwicklung eines einfachen mikrooptischen „Baukastens“, um Schüler für die Optik zu begeistern und ihnen auch einfache Grundkenntnisse zu vermitteln: Das **Educational Kit** (kurz: EduKit)

Partner im Verbund NEMO, die zum EduKit beigetragen haben:

- Vrije Universiteit Brussel
- Forschungszentrum Karlsruhe
- Heriot-Watt University Edinburgh
- LightTrans GmbH Jena
- University of Joensuu
- Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, Neuchatel
- Technical Research Centre of Finland (VTT)



## Zweck des Educational Kits:

- Anschauliche Vermittlung der Funktionsweise einfacher mikrooptischer Elemente/Systeme.
- Interesse an Optik, Physik und Naturwissenschaft/  
Ingenieurwissenschaft allgemein wecken.

## Zielgruppen:

Schüler der Jahrgangsstufen 10-12 (13), da zum Verständnis einfache wellenoptische Phänomene bekannt sein müssen.

**Das EduKit wird von NEMO kostenlos zur Verfügung gestellt !  
Einzige Bedingung: Sie müssen das EduKit auch im Unterricht einsetzen und den beigelegten Frage/Auswertungsbogen ausfüllen und zurückschicken.**



## Aufbau des Educational Kits: Laser

1 Laser mit  $\leq 1$  mW Ausgangsleistung, Wellenlänge 635 nm (rot)

Sicherheitsklasse 2: ungefährlich für das Auge bei unabsichtlichem Blick in den Strahl wegen Lidschlussreflex.

**Achtung:** Absichtliches „Starren“ in den Laser ( $\geq 1/4$  Sekunde) kann das Auge schädigen.

Ersatzweise kann zum Vorführen auch ein gängiger HeNe-Gaslaser verwendet werden (Wellenlänge 633 nm): bessere Sichtbarkeit wegen i.a. höherer Ausgangsleistung, aber auch höherer Sicherheitsstandard erforderlich (direkter Blick in den Strahl nicht erlaubt).



## Aufbau des Educational Kits: mikrooptische Elemente

2 identische Kunststoffplättchen mit abgeformten mikrooptischen Elementen:

- Diffraktive Elemente (physikalischer Effekt: Beugung von Licht)
- Refraktive Mikrolinsen (physikalischer Effekt: Brechung von Licht)





## Aufbau des Educational Kits: CD

CD zur Erklärung und zur Simulation:

EduKit.pdf: Beschreibung und Erklärung der Experimente in verschiedenen Sprachen (Englisch, Deutsch, Französisch, etc.)

EduKit.exe: interaktives Programm zur Simulation der Experimente bei Variation einiger Parameter (z.B. Wellenlänge oder Abstand zwischen Kunststoffplättchen und Wand/Schirm)

NEMO.exe: kurzer Film über den Verbund NEMO

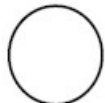
Evaluation form.doc: Fragebogen zum Einsatz des EduKits

**Bitte ausfüllen und an die angegebene Adresse in Brüssel (Koordinator von NEMO) schicken!**



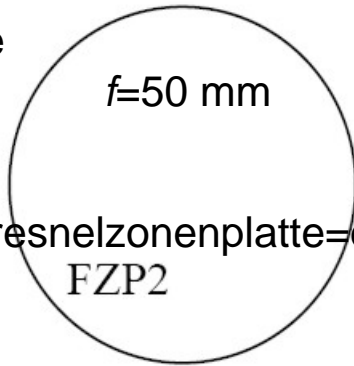
### beugende Elemente

Brennweite  
 $f=10\text{ mm}$



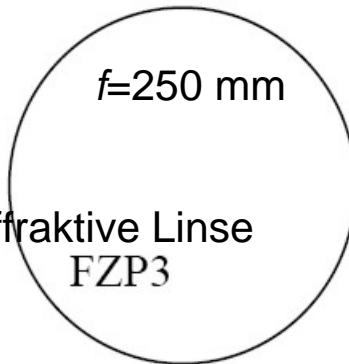
FZP=Fresnelzonenplatte=diffraktive Linse  
FZP1

$f=50\text{ mm}$



FZP2

$f=250\text{ mm}$



FZP3

### brechende Elemente

Quadratisch  
angeordnete  
sphärische  
Mikrolinsen

Zylinder-  
linsen

Hexagonal  
angeordnete  
sphärische  
Mikrolinsen

L1  
100  $\mu\text{m}$   $\varnothing$

L3  
100  $\mu\text{m}$   $\varnothing$

L5  
100  $\mu\text{m}$   $\varnothing$

L2  
50  $\mu\text{m}$   $\varnothing$

L4  
50  $\mu\text{m}$   $\varnothing$

L6  
50  $\mu\text{m}$   $\varnothing$

PF2 8x8 Strahlteiler	PF3 Kreis- fläche	PF4 Quadrat. Netz	PF5 NEMO Logo	PF6 EU Fahne
PF1 4x4 Strahlteiler	B2 30 Linien pro mm	B1 60 Linien pro mm	A2 30 Linien pro mm	A1 60 Linien pro mm

Kreuzgitter  
(Schachbrettmuster)

Lineare Gitter



## Ein wenig Theorie:

Alle beugenden Elemente des EduKits sind Phasenelemente:

Licht wird nicht wie bei Amplitudengitter teilweise absorbiert, sondern durch Stufen in der Oberfläche wird das Licht beeinflusst → höhere Beugungseffizienz als bei Amplitudengittern!

a) Amplitudengitter

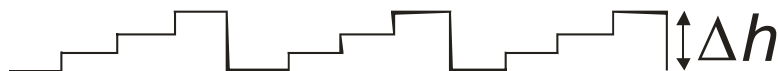


b) Binäres Phasengitter  $\Delta h = \lambda / (2(n-1))$



$\lambda$ : Wellenlänge,  $n$ : Brechzahl des Gitters,  $M$ : Anzahl der Stufen

c) Mehrstufiges Phasengitter  
 $\Delta h = (M-1)\lambda / (M(n-1))$

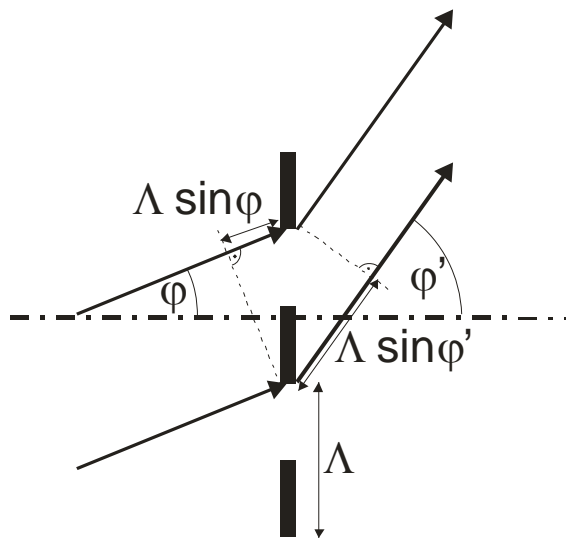


d) „Gebabztes“ Phasengitter  
 $\Delta h = \lambda / (n-1)$



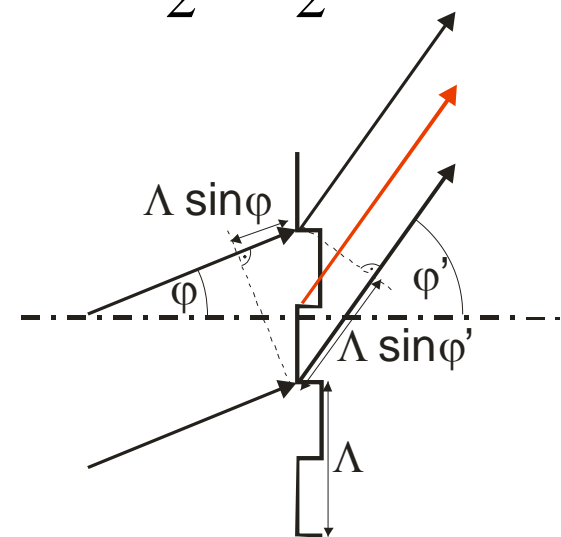
Erklärung der Beugungsordnungen  
 eines Gitters (Amplitudengitter):  
 Positive Interferenz der Wellen,  
 falls:  $\Lambda \sin \varphi' - \Lambda \sin \varphi = m\lambda$

$$\Rightarrow \sin \varphi' = \sin \varphi + m \frac{\lambda}{\Lambda}$$



Bei binären Phasengittern  
 interferiert auch der rote Strahl  
 positiv, da er wegen der Stufe  
 mit  $\lambda/2$  Gangunterschied wieder  
 in Phase ist (für  $m=1;3;5;\dots$ ):

$$\text{OPD} = \frac{m\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} = (m+1) \frac{\lambda}{2}$$





Bei einem binären Phasengitter interferieren also für ungerades  $m$  „doppelt so viele Strahlen“ wie bei einem Amplitudengitter positiv.

→ Die Amplitude der Welle in den ungeraden Ordnungen wird doppelt so groß. → Die Intensität dieser Ordnungen wird 4x so groß!

Anmerkung: Die Energieerhaltung ist natürlich erfüllt, denn beim Amplitudengitter werden 50% der Energie absorbiert und 25% sind in der nullten Beugungsordnung (bei unserem Phasengitter ist dagegen kein Licht in der 0. Ordnung, da dort negative Interferenz auftritt). → Beim binären Phasengitter ist 4x so viel Energie für die ungeraden Beugungsordnungen vorhanden.



**Anschauliche Berechnung** der Beugungseffizienz  $\eta_m$  der einzelnen Ordnungen  $m$  bei einem **binären Phasengitter** mit **Tastverhältnis 1:1** (d.h. Stegbreite = Grabenbreite) und Tiefe, die eine **optische Weglängendifferenz von  $\lambda/2$  zwischen Steg und Graben** erzeugt:

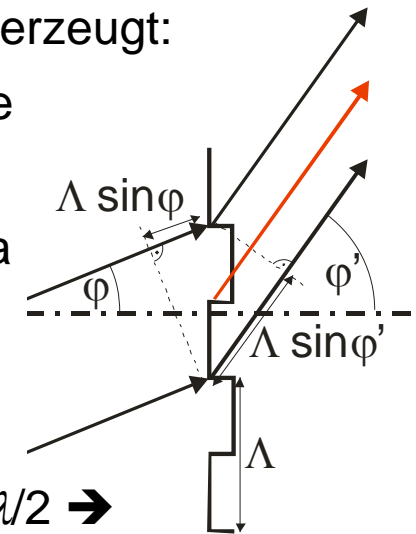
$\eta_0=0$ : destruktive Interferenz zwischen Licht von Steg und Graben bei Tiefe mit  $\lambda/2$  opt. Weglängendifferenz (OPD)

$\eta_{2n}=0$  ( $n=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ): alle geraden Ordnungen (ungleich  $m=0$ ) fallen aus, da OPD innerhalb von Steg und Graben zwischen Anfang und Ende je ganzzahliges Vielfaches von  $\lambda \rightarrow$  schon vollständige Auslöschung innerhalb von Steg und Graben

$\eta_{\pm 1}$ : innerhalb von Steg und Graben OPD zwischen Anfang und Ende nur  $\lambda/2 \rightarrow$  Amplituden addieren sich konstruktiv  $\rightarrow$  maximale Effizienz

$\eta_{\pm 3}=\eta_{\pm 1}/9$ : innerhalb von Steg und Graben OPD zwischen Anfang und Ende  $3/2 \lambda \rightarrow$  Amplituden addieren sich nur in einem Drittel des Bereiches konstruktiv, Rest löscht sich aus  $\rightarrow$  Effizienz nur  $1/9$  verglichen zu  $\pm 1$ . Ordnung (Intensität proportional zu Amplitudenquadrat !).

Analog:  $\eta_{\pm 5}=\eta_{\pm 1}/25$  bzw. allgemein  $\eta_{\pm(2n+1)}=\eta_{\pm 1}/(2n+1)^2$  für  $n=1, 2, 3, \dots$





## Effizienzen eines binären Phasengitters mit Tastverhältnis 1:1 und idealer Tiefe:

Summe der Effizienzen aller Ordnungen muss 1 sein wegen Energieerhaltung →

$$2\eta_{\pm 1} \underbrace{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}}_{=\pi^2/8} = 1 \Rightarrow 2\eta_{\pm 1} \frac{\pi^2}{8} = 1 \Rightarrow \eta_{\pm 1} = \frac{4}{\pi^2} = 0.405$$

$$\eta_{\pm 3} = \frac{1}{3^2} \frac{4}{\pi^2} = 0.045$$

$$\eta_{\pm 5} = \frac{1}{5^2} \frac{4}{\pi^2} = 0.016$$

...



**Mehrstufige oder geblazte Elemente:** Dort ist aufgrund der unsymmetrischen Einheitszelle die Beugungseffizienz in den positiven und negativen Ordnungen nicht mehr identisch. Im Idealfall gibt es bei einem geblazten Element (= lokales „zerschnittenes Prisma“) nur noch eine einzige sichtbare Beugungsordnung (wenn „Beugungswinkel = Brechungswinkel“).

Im NEMO EduKit sind die Fresnelzonenplatten, einfachen Gitter und Kreuzgitter binäre Phasenelemente. Die Strahlformer für die Logos, homogene Kreisflächenausleuchtung und Vielfach-Strahlteiler sind dagegen mehrstufige/geblazte Elemente. Durch kleine Fabrikationsfehler (Tiefe, laterale Abmessungen) gibt es aber auch andere Ordnungen als die +1. Ordnung.





## Mögliche Experimente mit dem EduKit:

Mit Laser und einem Element:

Gitter, Strahlformungselemente, Mikrolinsenfelder (wirken wie Gitter)

Mit Laser und Kombination zweier Elemente hintereinander:

z.B. Gitter + NEMO-Logo → viele NEMO-Logos

Ohne Laser: Fresnelzonenplatten als Lupe verwenden (ACHTUNG: die Fresnelzonenplatten sind sogenannte binäre diffraktive Linsen, d.h. sie erzeugen eine Sammellinse und eine Zerstreuungslinse in einem Element → wegen höherer Flächendichte sieht man zuerst nur das verkleinerte Bild der Zerstreuungslinse)

Moire-Muster zwischen Mikrolinsenfeldern