

Periodische Helmholtz-Solver in der elektromagnetischen Optik

Zentralbereich Forschung und Technologie

Optik-Design

Bernd Kleemann



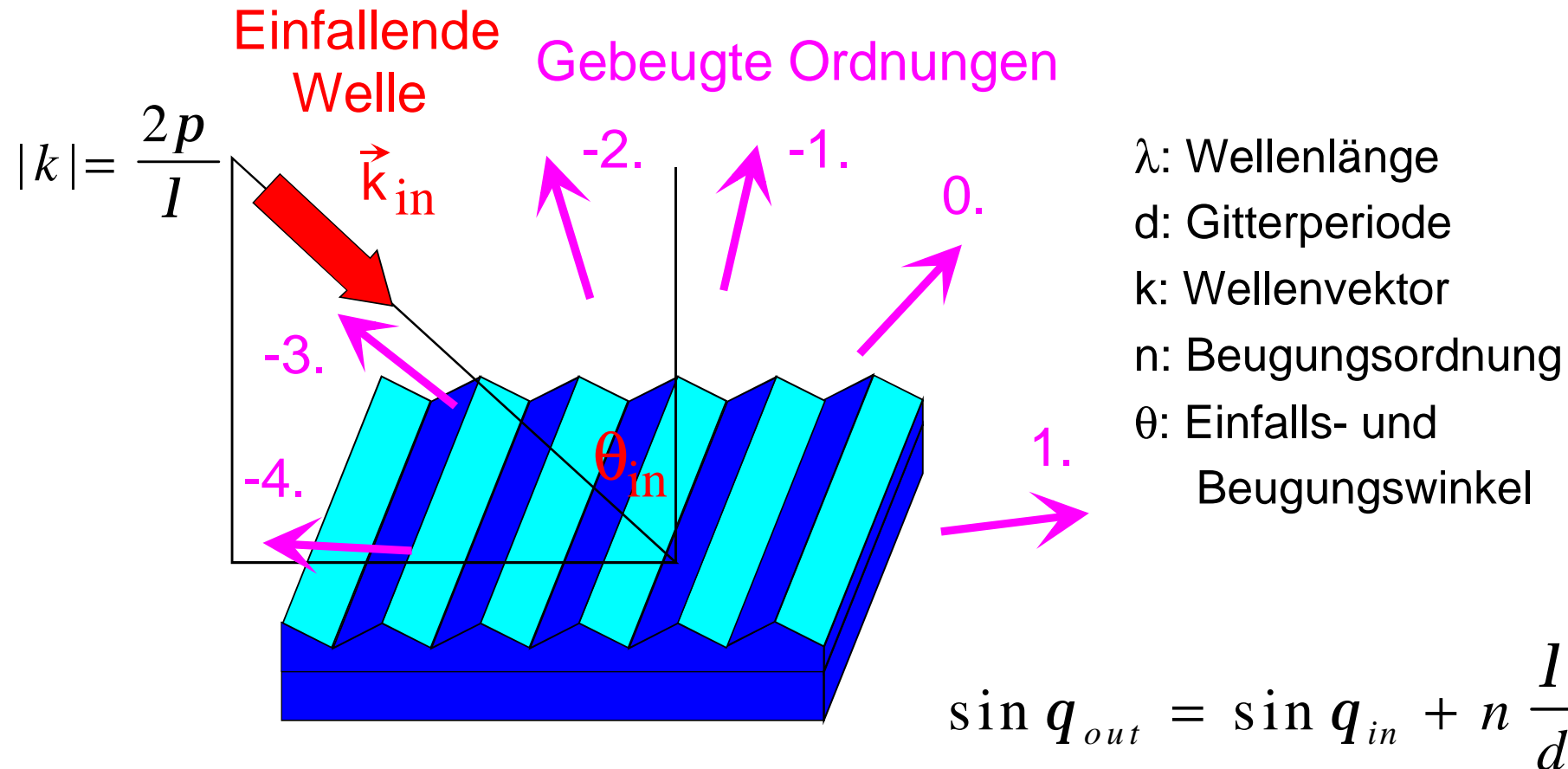
Übersicht der Themen:

- Helmholtz-Gleichung
- Überblick über elektromagnetische Beugungsmethoden

Beispiele:

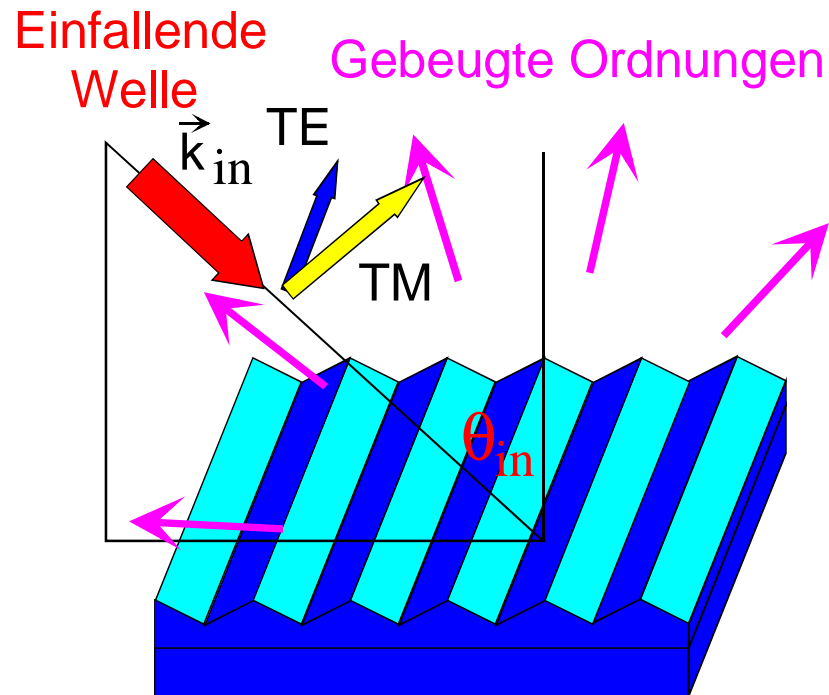
1. Nachoptimierung eines skalaren 1:43 Strahlteilers ($\lambda=670\text{nm}$)
2. Schichtoptimierung eines Echelle-Gitters für Excimer Laser ($\lambda=193\text{nm}$)
3. Gitter hoher Effizienz mit schmalen Stegen ($\lambda=193\text{nm}$)
4. EUV-Spectral Purity Filter Gitter ($\lambda=13.5\text{nm}$)
5. Diffraktive Linse in einem Projektionsobjektiv ($\lambda=248\text{nm}$)
6. Integration von EM Methoden in das Optik-Design mit geometrisch-optischem Raytrace ($\lambda = 400\text{nm}\dots800\text{nm}$)
7. Neue Gitterformen

Oberflächengitter geometrisch-optisch: Bezeichnungen



Gittergleichung beschreibt die **Richtungen** der gebeugten Ordnungen.

Gitter elektromagnetisch betrachtet: Helmholtz-Gleichung



Im Vergleich zur geometrisch-optischen Beschreibung kommen Größen hinzu:

- Polarisierung: TE- und TM-Pol.
- Gittermaterial
- Schichtmaterial
- Profilform der Periodenoberfläche
- [optischen Eigenschaften sind wellenlängenabhängig]
- Pseudoperiodizität des Feldes
- Transmissionsbedingungen durch Grenzfläche
- Zylindrisch in einer Richtung

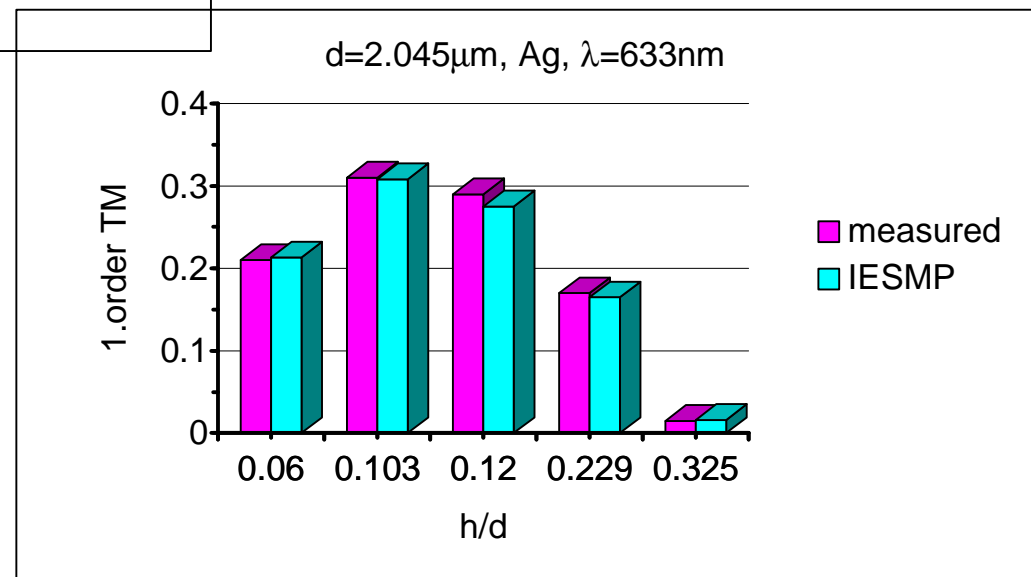
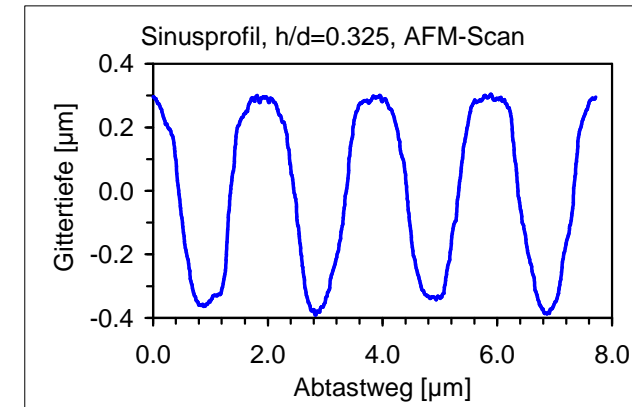
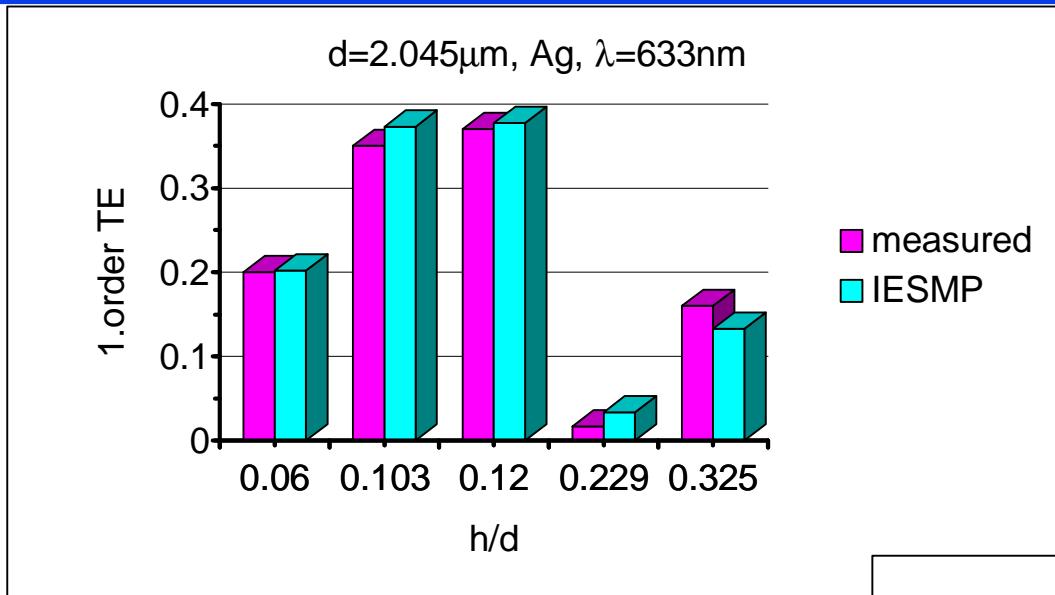
$$(\nabla^2 + k^2)U = 0, \quad k, U \text{ komplex}; \quad V(x, y, z, t) = U(x, y, z)e^{-i\omega t}$$

Skalare oder vektorielle **Helmholtzgleichung** beschreibt die **komplexen Amplituden** der gebeugten Wellen in den einzelnen Ordnungen.

Elektromagnetische Beugungsmethoden

- Numerische Modalmethoden (RCWA, BKK),
nach T.K.Gaylord, M.G.Moharam und Burckhardt, Kaspar, Knop sowie L.Li,
[Feldentwicklung und $\varepsilon(x,y)$ in Fourierreihen \rightarrow Eigenwertproblem]
- Koordinatentransformationsmethode nach J.Chandezon, L.Li,
[Transformation des Gitters auf eine Ebene \rightarrow Helmholtzgleichung in
krümmigen Koordinaten \rightarrow Eigenwertproblem]
- Differentialgleichungsmethode nach M.Nevière, E. Popov, L.Li,
[Feldentwicklung und $\varepsilon(x,y)$ in Fourierreihen \rightarrow System gewöhnlicher AW-Differentialgl.]
- Randintegralgleichungsmethode mit Parametrisierung nach
1) D.Maystre, E.Popov; 2) L.Goray (PC-Grate); 3) A.Pomp, J.Creutziger,
B.Kleemann (IESMP); 3a) G. Schmidt, A. Rathsfeld, Splinekollokation mit
Graduierung, GMRES mit Vorkonditionierung auch für beschichtete Gitter,
- Finite-Elemente Methode nach G.Bao, D.Dobson, J.Cox sowie
Verallgemeinerung von J.Elschner, G.Schmidt, A.Rathsfeld (DIPOG-1+2),
- Finite Difference Time Domain (FDTD) Methode,
- analytische Modalmethode nach L.C.Botten und M.Davidson,
- Legendrepolynommethode nach R.H.Morf,

IESMP: Vergleich mit Messungen für holographische Profile (AFM Scans)





Nach-Optimierung eines skalaren 1:43 Strahlteilers als binäres Gitter

(M. Ferstl, A. Hermerschmidt, D. Dias, R. Steingrüber,
2004, J. mod. Opt. **51**, 2125-2139)

Paraxialer 1:43 Strahlteiler

DBS = direct binary search

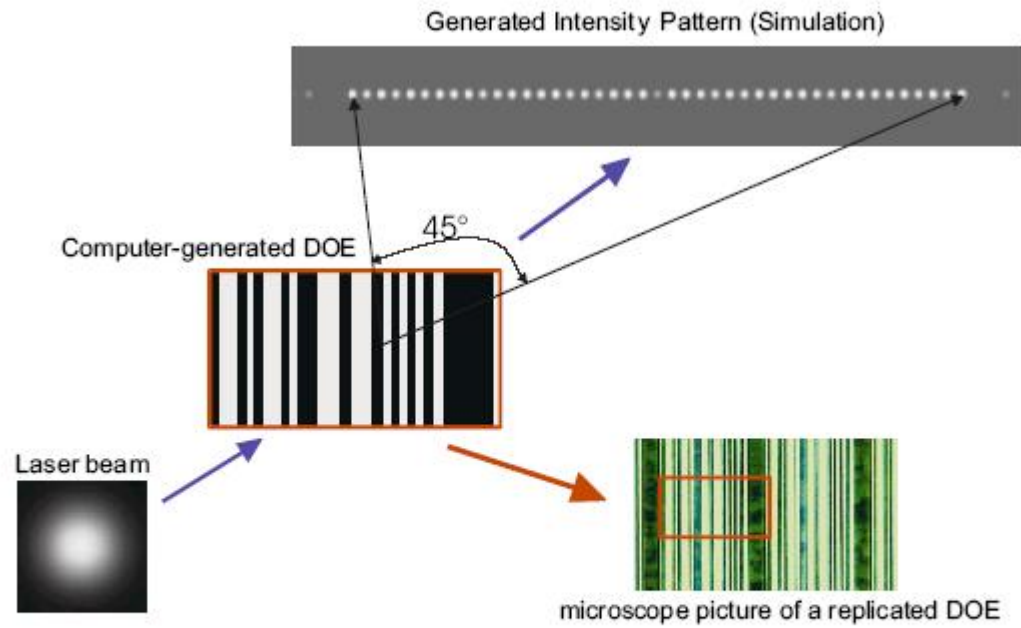
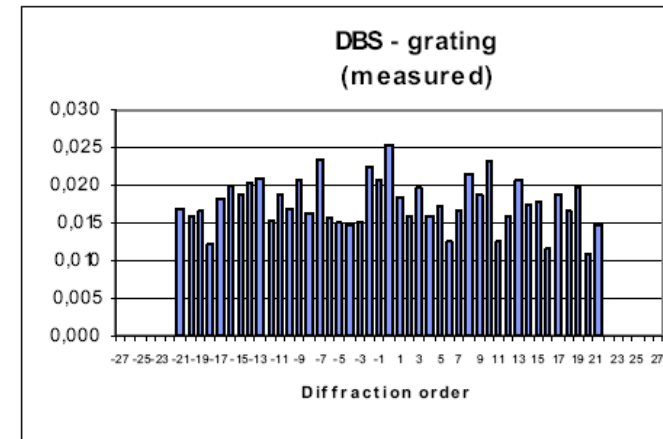
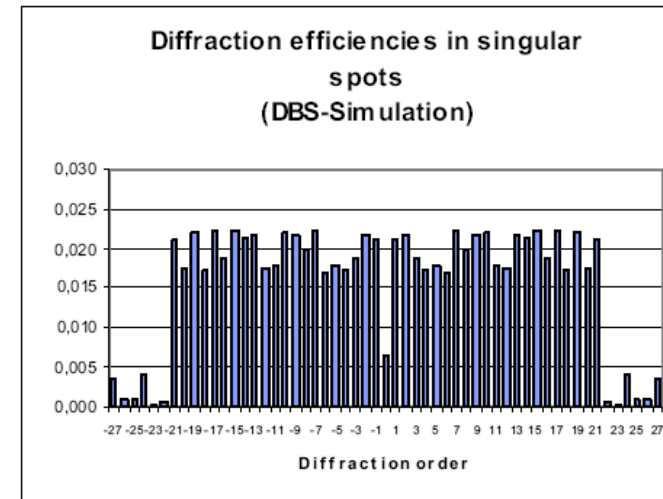


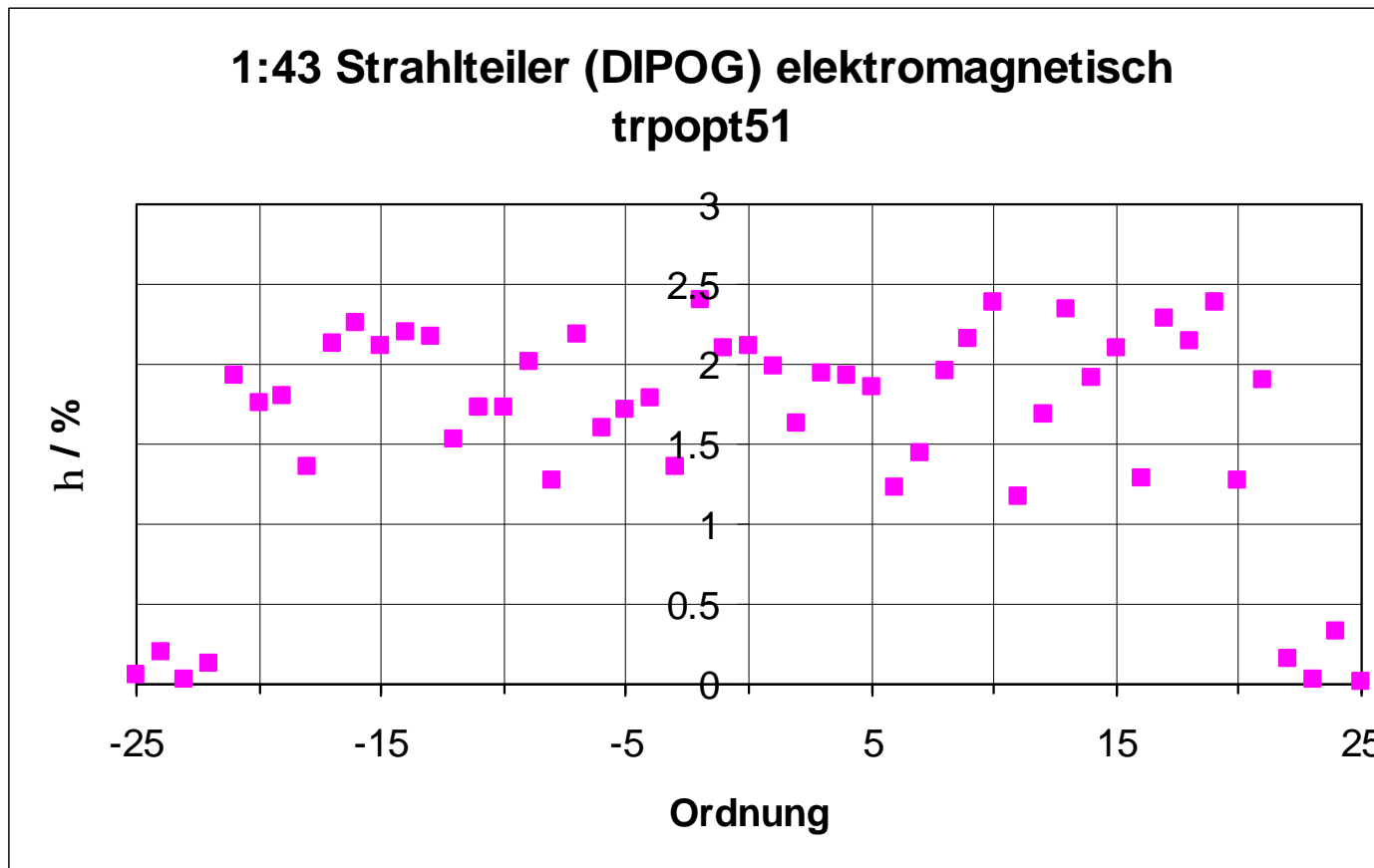
Figure 1: Generation of a linear 43-dot pattern by use of the binary beam splitter based on DBS-design



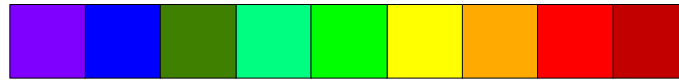


Paraxialer 1:43 Strahlteiler

DBS = direct binary search



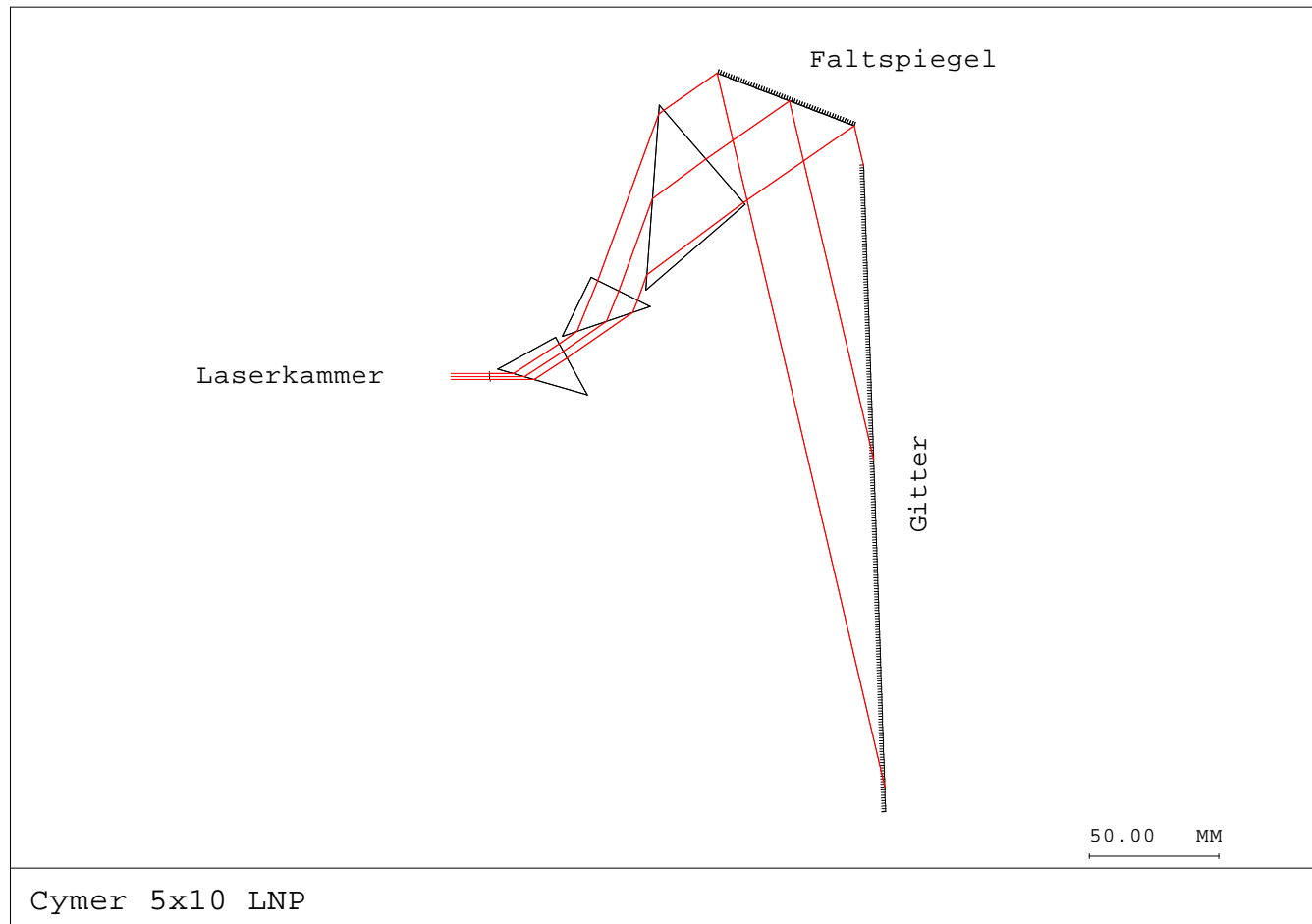
Verringerung des rms-Wertes der Homogenität der Einzelstrahlen auf 1/3 mittels elektromagnetischer Nachoptimierung mit DIPOG-1.



Optimierung der Schichtdicken auf den Blazeflanken von Echellegittern in Littrow-Konfiguration

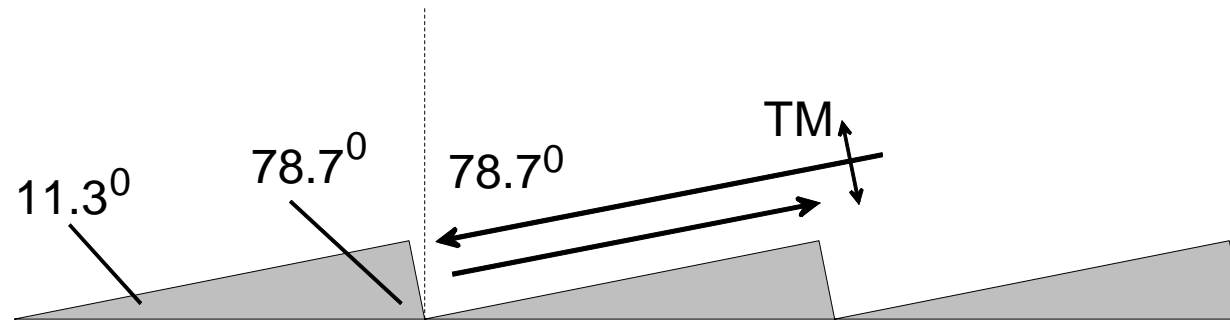
(B. Kleemann, J. Erxmeyer,
2004, J. mod. Opt. **51**, 2093-2110)

Einsatz des Laser-Gitters (Schema) in Littrow-Anwendung

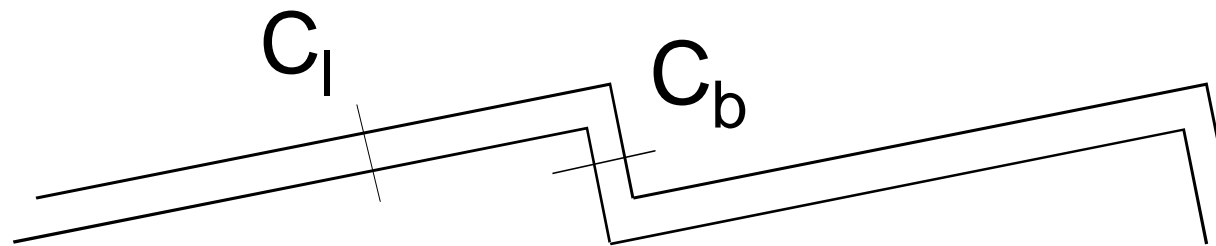




Echelle Gitter: 95. Ordnung, 12 μ m Periode



$kd = 860$
 $h/d = 0.2$



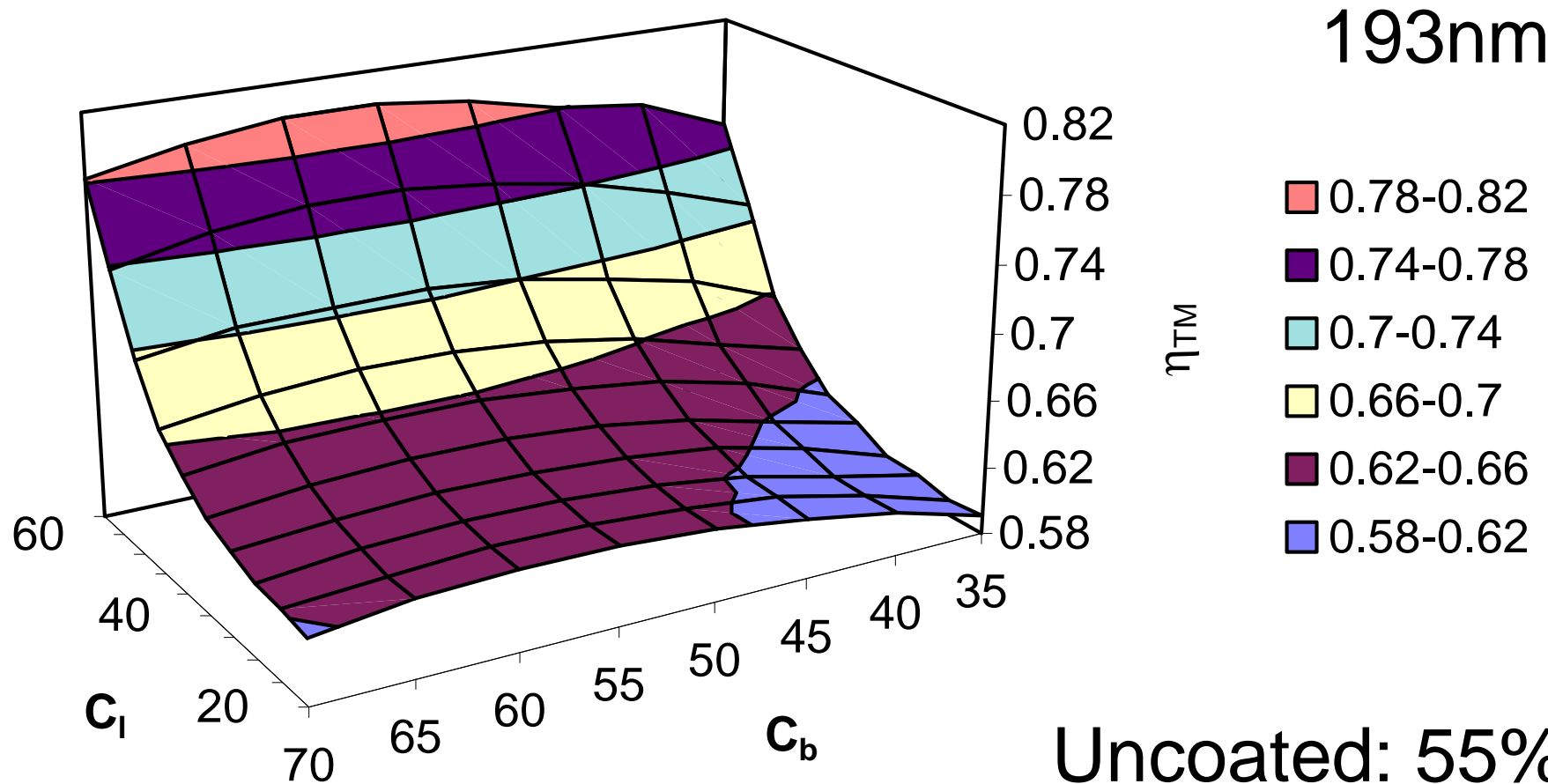
Nur mit
Integral-
gleichungs-
methode oder
DIPOG-2
berechenbar!

TM-efficiency dependence on thickness



C_b, C_l

Echelle Grating, 83.136 L/mm, $\lambda=193.35\text{nm}$, Littrow 78.7° ,
Al+MgF₂ Coating on the Facettes: C_b, C_l , TM-Polarization

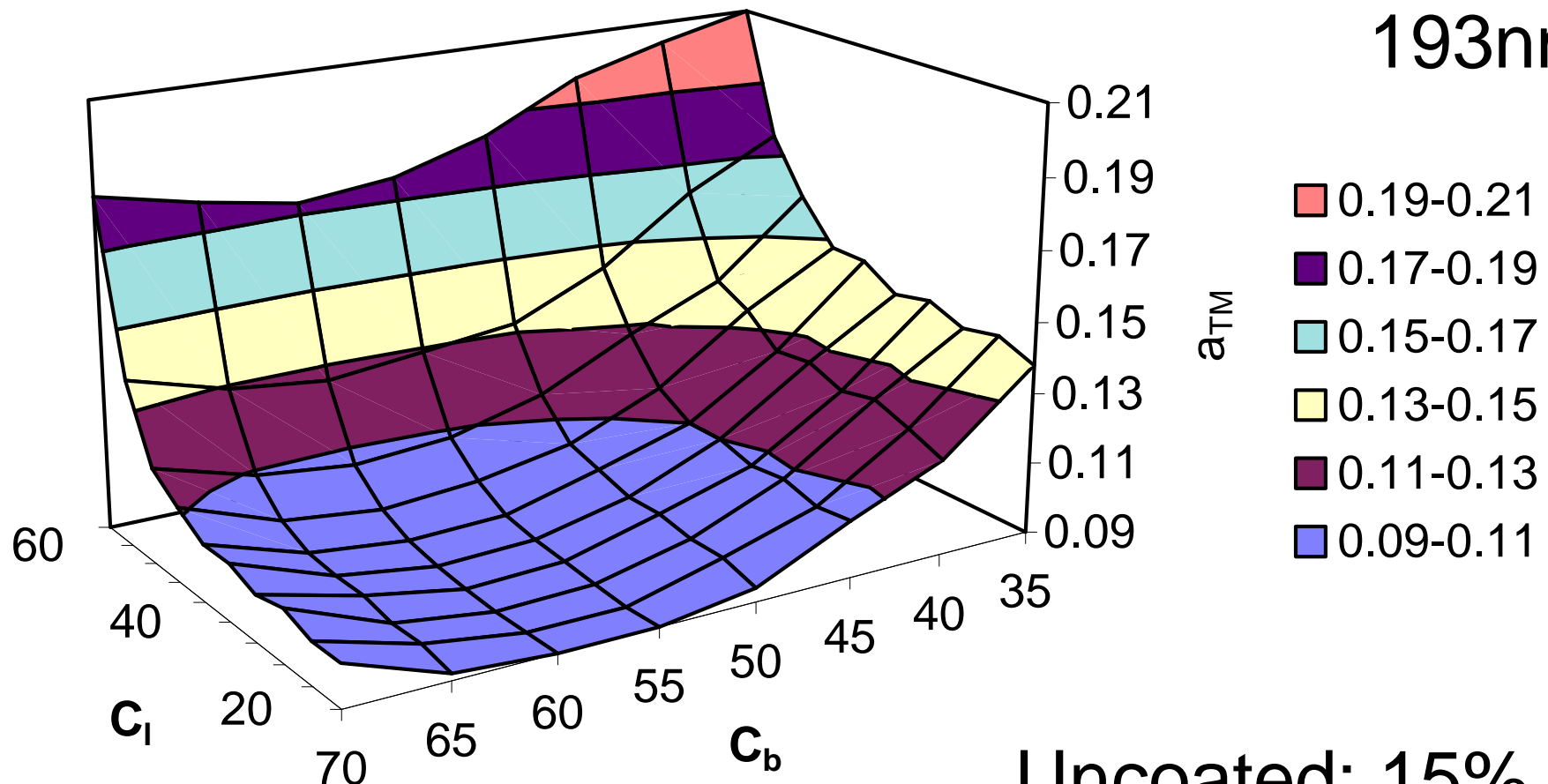


TM-absorption dependence on thickness



C_b, C_l

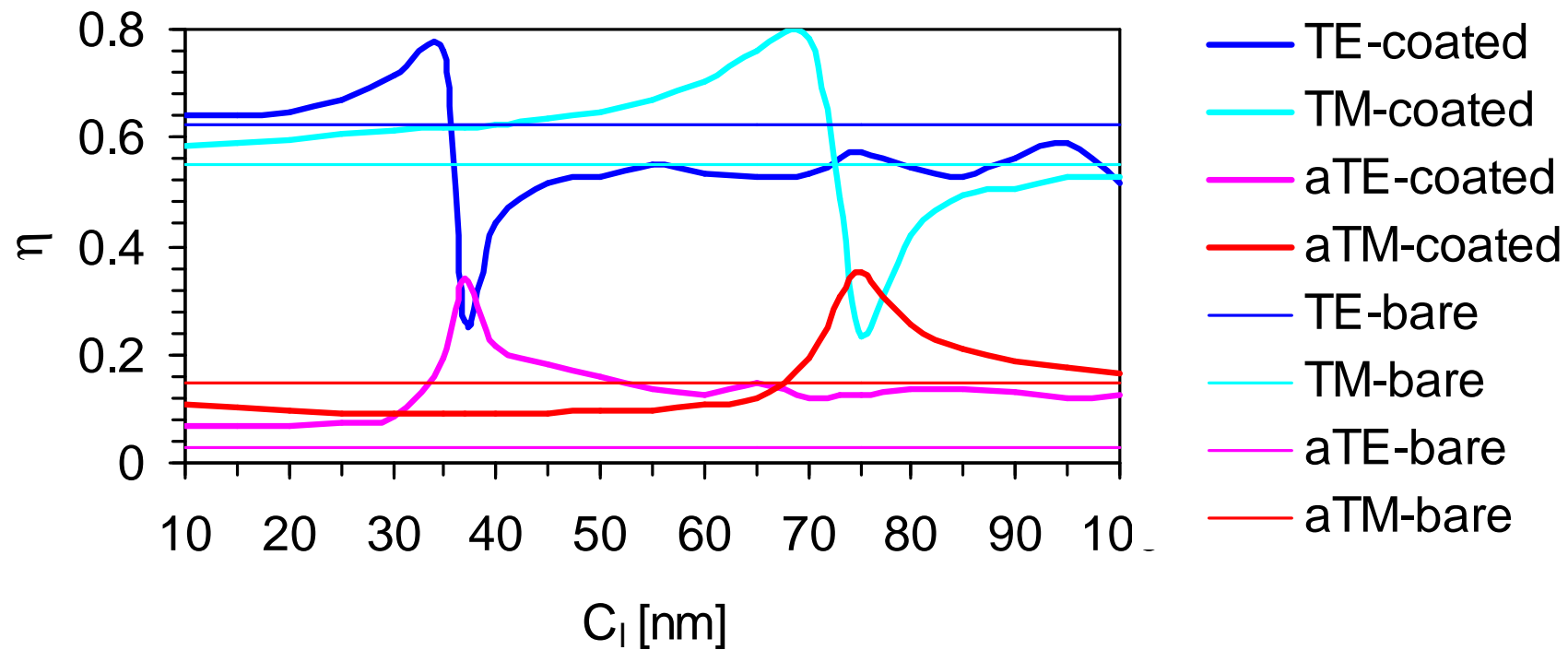
Echelle Grating, 83.136 L/mm, $\lambda=193.35\text{nm}$, Littrow 78.7° ,
Al+MgF₂ Coating on the Facettes: C_b, C_l , TM-Absorption



Efficiency and absorption dependence of thickness on anti-blaze facet



Echelle, 83.136 L/mm, $\lambda=193.35\text{nm}$, Littrow-122., Al+MgF₂,
Coating on blaze facet $C_b=60\text{nm}$ fixed, TE, TM and absorption



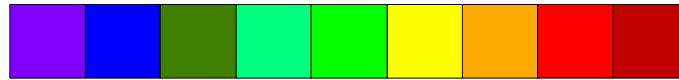


Optimale Schichtdicken

Optimale Schichtdicken mit minimaler Absorption oder maximaler Effizienz:

- auf der **Blazeflanke**: optische Dicke $\lambda/4$ **mit** Berücksichtigung des Materialindex des Gitters, und gemessen senkrecht zur Blazeflanke, sowohl für TE als auch TM,
- auf der **Gegenflanke**: optische Dicke $\lambda/4$ **ohne** Berücksichtigung des Materialindex des Gitters und gemessen senkrecht zur Gegenflanke. Damit wird die optimale Schichtdicke auf der Gegenflanke kleiner als auf der Blazeflanke. Das ist völlig neu verglichen mit allen früheren Untersuchungen.
- Die optimalen Schichtdicken lassen sich durch einfache Dünnschichtberechnungen für den Spiegel bei senkrechtem oder streifendem Einfall bestimmen.
- Damit lässt sich auch die Effizienz maximieren.

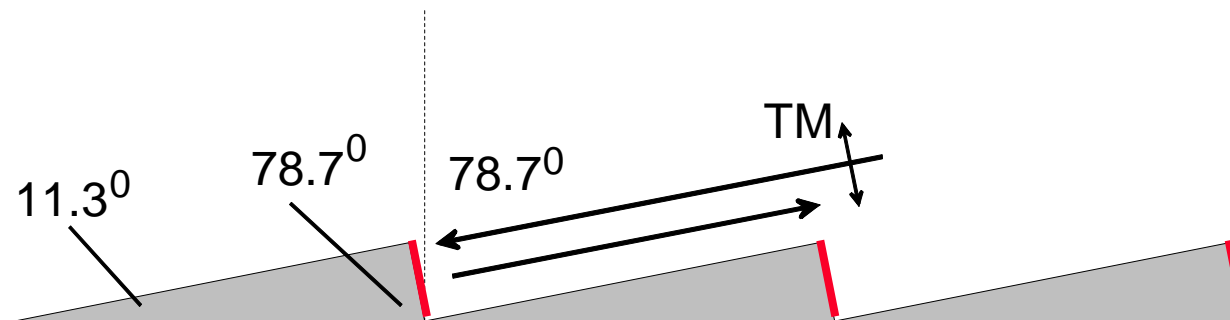
*In **allen bisherigen Arbeiten** dazu, wird nur von **einer** Schichtdicke gesprochen, auch wenn Echelles damit beschichtet werden. Es ist häufig nicht einmal ersichtlich, wo diese Dicke gemessen wird.*



Echellegitter mit nur einer metallisierten Flanke



Echelle Gitter: 95. Ordnung, 12 μ m Periode



$kd = 860$
 $h/d = 0.2$

Nur mit FEM
(DIPOG-2)
berechenbar!

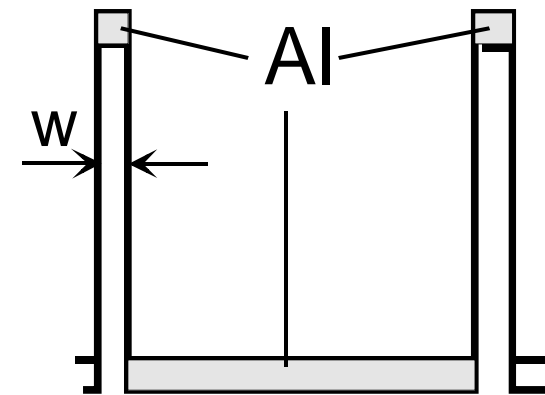
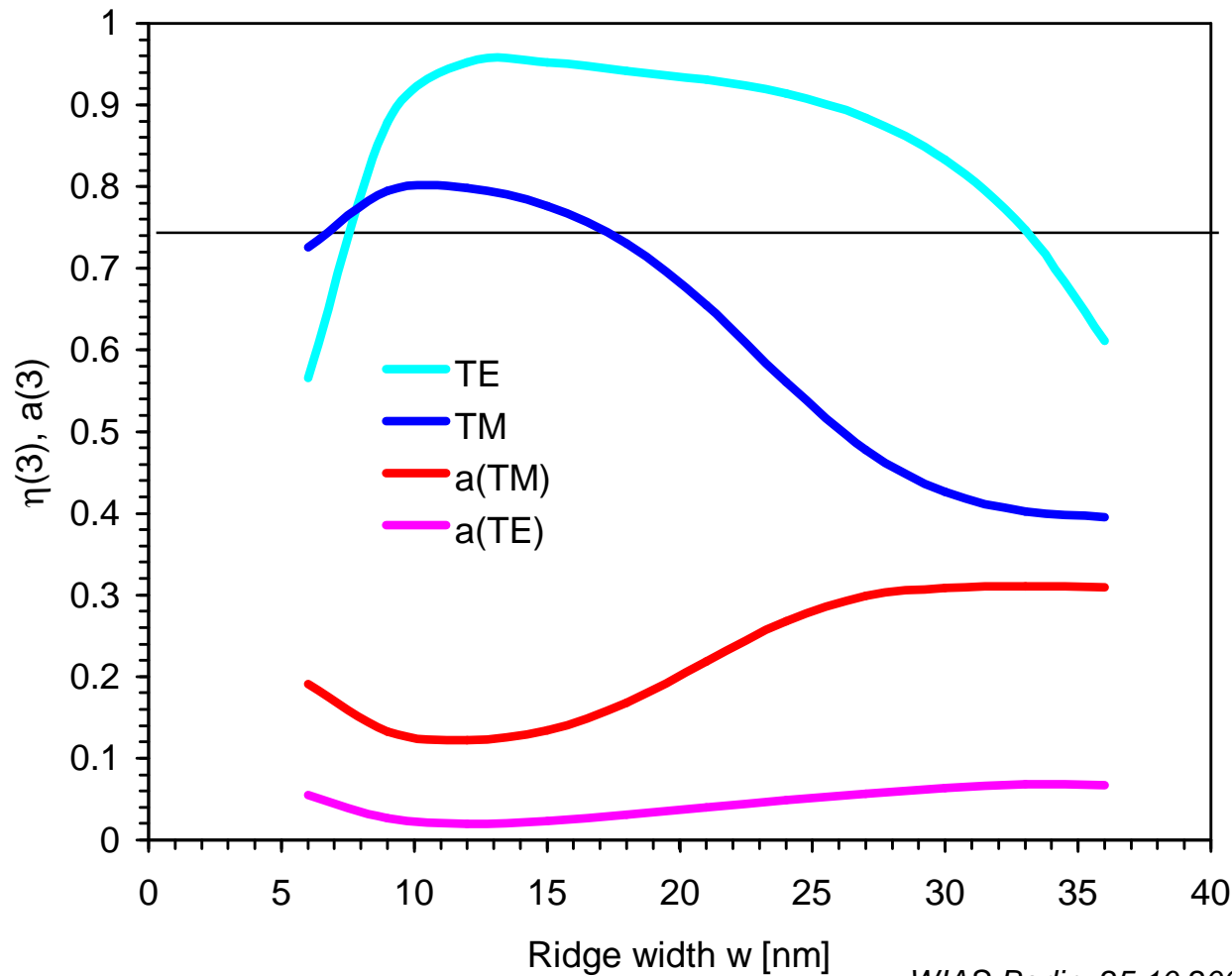


New high-efficiency gratings for DUV-Lithography (Optimization with DIPOG-1)

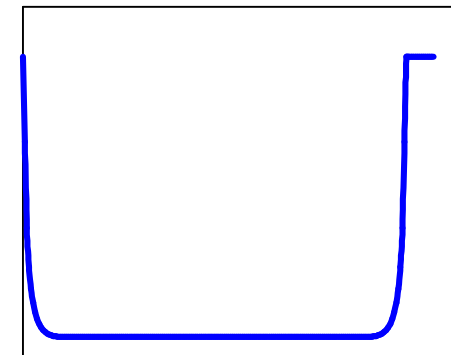
(B. Kleemann, K. Heidemann,
2003, Patent US 6,600,602 B2)

Rectangular Silica Grating + Al Coating

Silica ridge grating, 250nm deep, 20nm Al-coating,
 $d=295.8\text{nm}$, $\lambda=193.35\text{nm}$, $\theta=78.7^\circ$, 3. Littrow, Eff. and Abs.



Silica

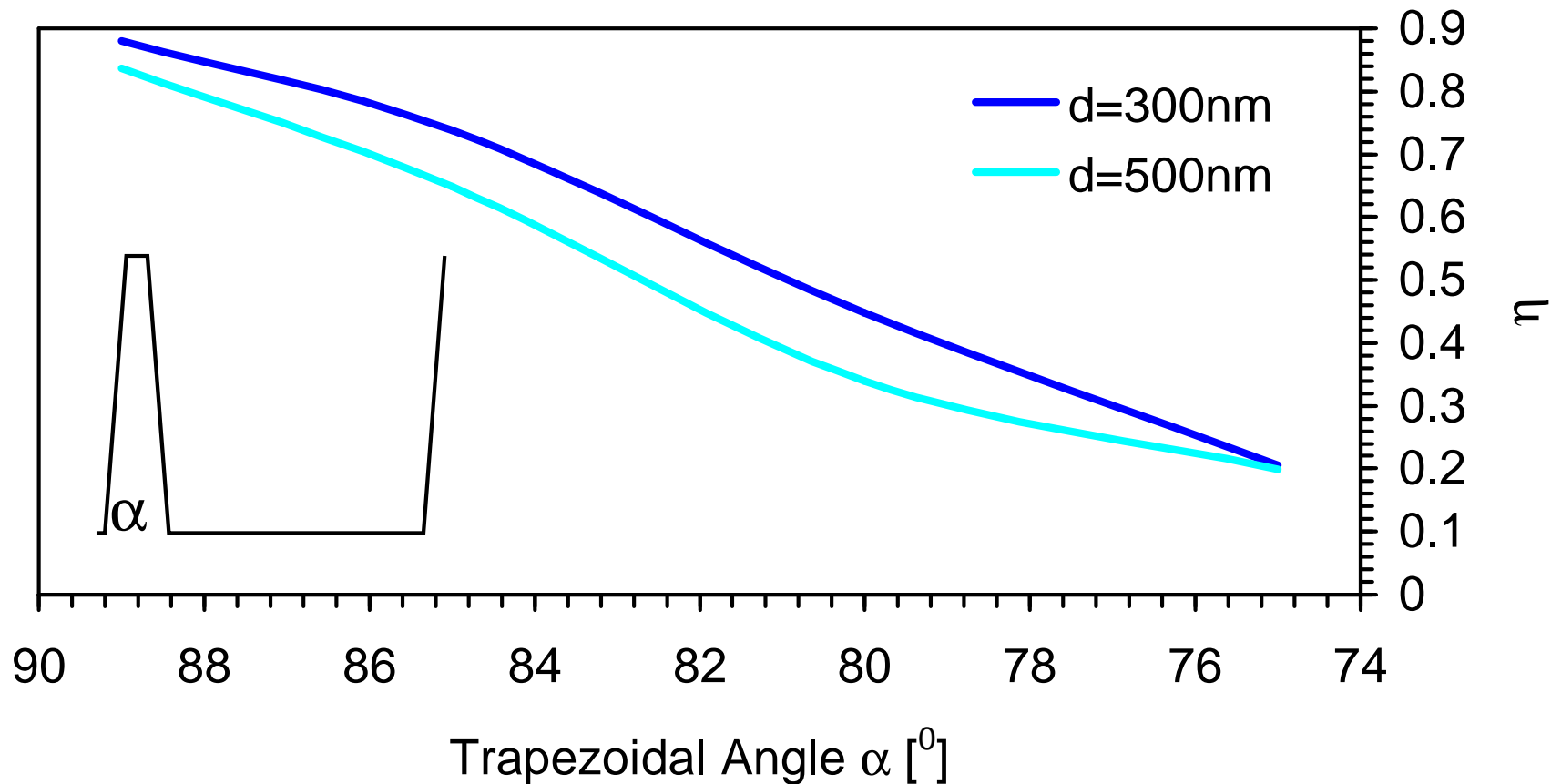




Trapezoidal Profile 3.+5. Littrow Order

Trapezoidal instead of Rectangular Profile,
Top Width 10nm, Maximum TE-Efficiency for Littrow -3.
($d=300\text{nm}$) and -5. Order ($d=500\text{nm}$)

193nm

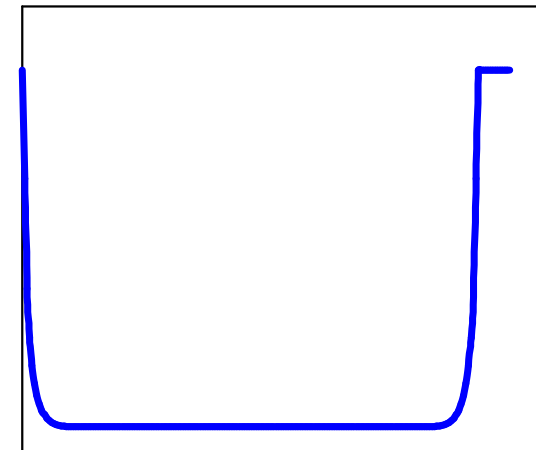
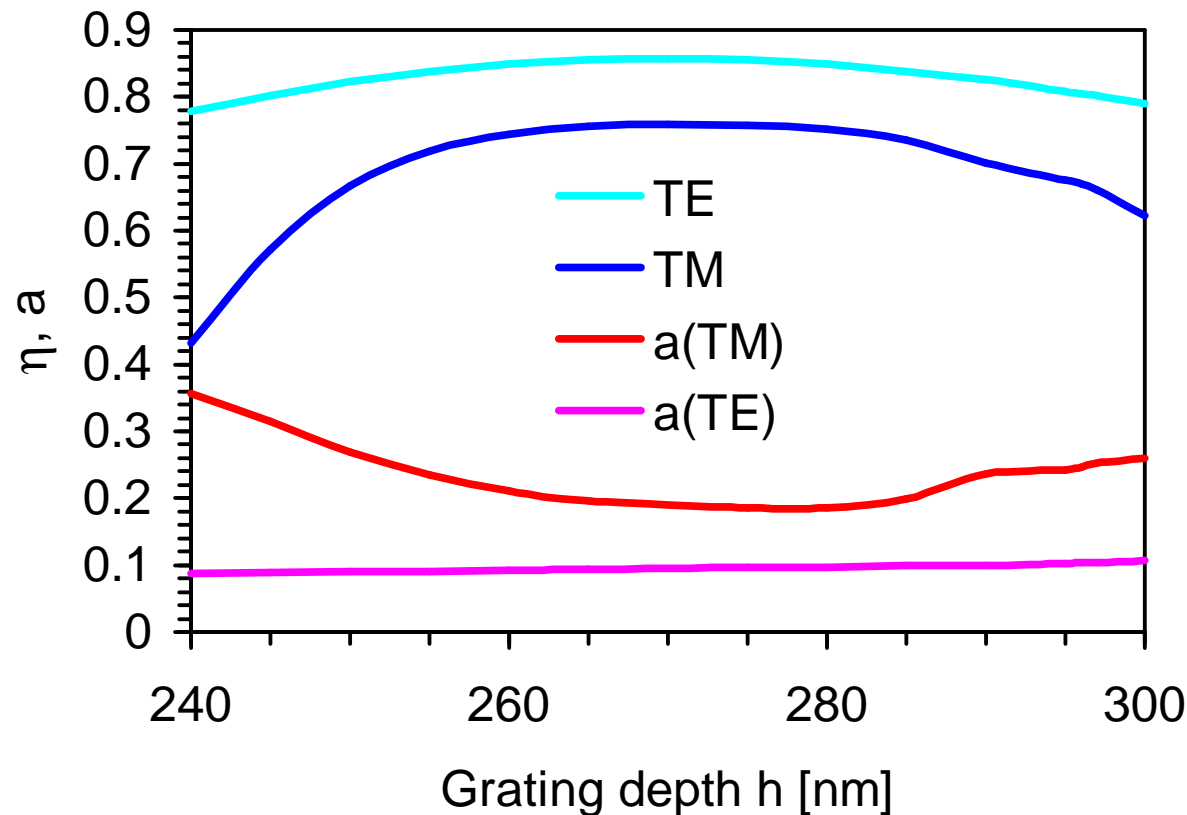




Rectang. IBE-Grating 3. Littrow Order

IBE-grating, CIMLAM20 (=90441),
 $d=299.7\text{nm}$, $\lambda=193.35\text{nm}$, Al, $\theta=75.39^\circ$
Littrow -3., TE, TM and Absorption

$kd = 22$
 $h/d = 0.8$





EUV -Gitter als Spectral Purity Filter (SPF)

(H.Kiersey, K. Heidemann, B.Kleemann, u.a.,
2003, Proc. SPIE **5193**, 70-78)

Wirkung des SPF-Gitters (Schema)

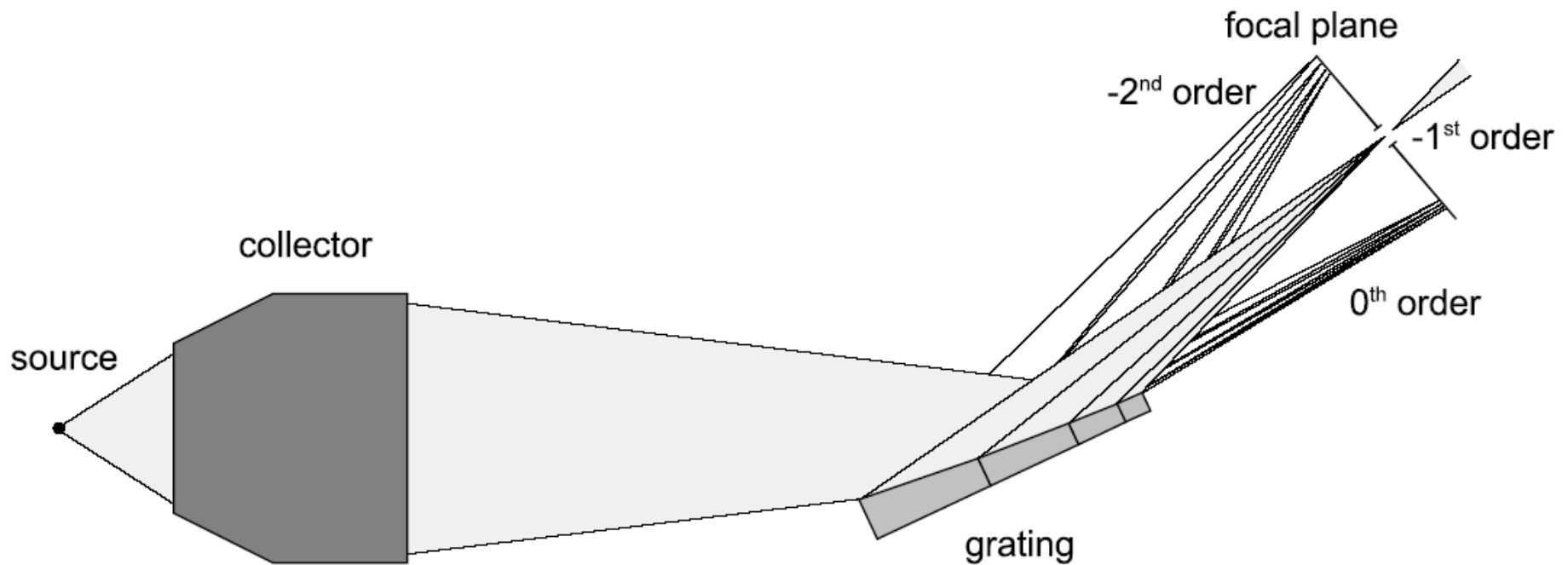


Figure 1. System layout for the EUV spectral purity filter and collector.



SPF-Gitter: Parameter

1. Gittergröße LxB 600x120 mm
 2. Gitterarray aus 9 Segmenten unterschiedlicher Breite
 3. Segmente liegen auf Polygonzug
 4. Gitterweite g variabel pro Segment und innerhalb der Segmente (Chirp) sowie Gitterlinien gekrümmt
 5. Ruthenium Beschichtung
1. $\lambda = 13.5\text{nm}$
 2. $0.85\mu\text{m} < g < 2.5\mu\text{m}$
 3. Blazewinkel: 1.2°
 4. mittlerer Einfallswinkel: $85^\circ < \theta < 70^\circ$
 5. Breite der Gitter: $25\text{mm} < b < 100\text{mm}$
 6. $kd = 1400$
 7. Wurde mit IESMP gerechnet – mit FEM DIPOG-2 vermutlich ebenfalls möglich.

Effizienz von Segment 1

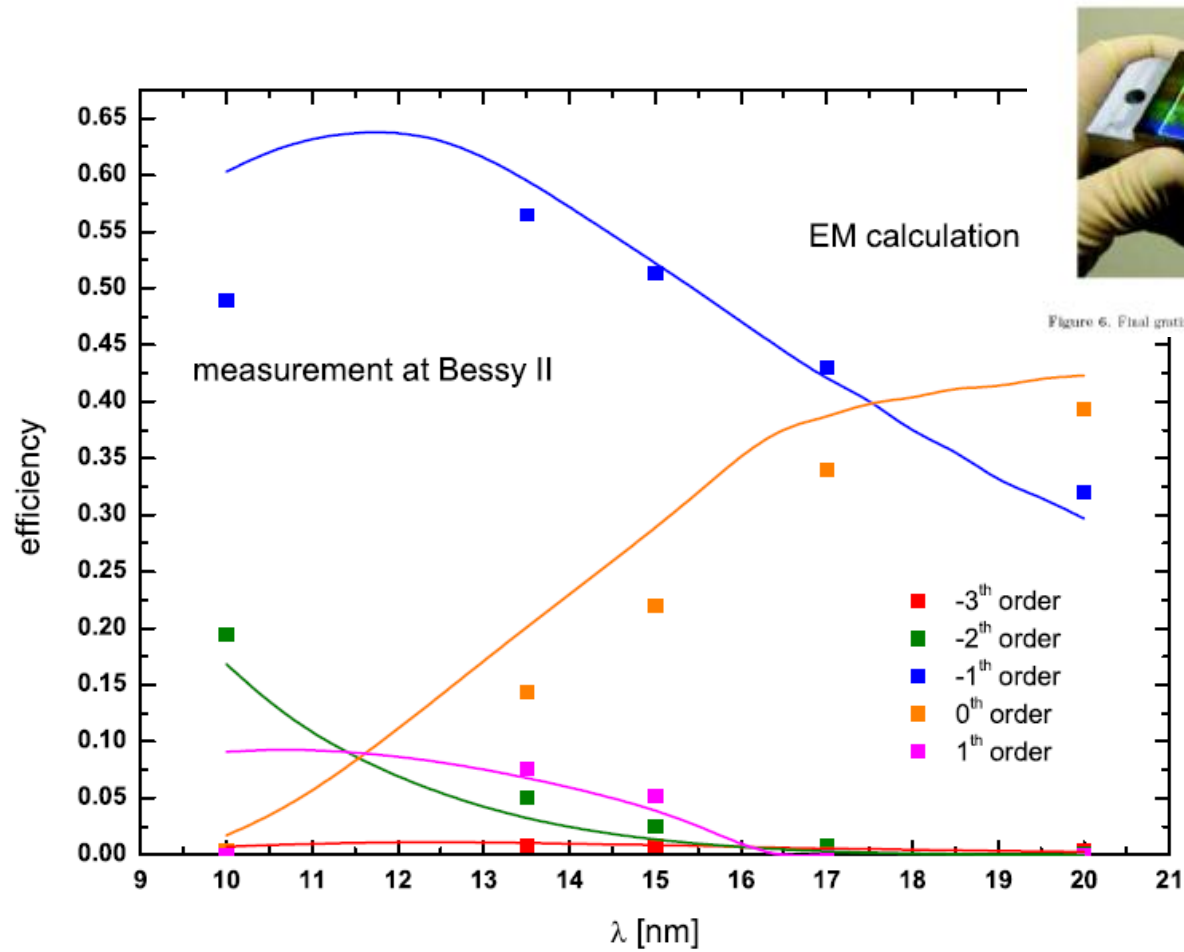


Figure 6. Final grating segment on the metallic substrate with ruthenium reflection coating.

Figure 10. Absolute diffraction efficiency for various diffraction orders of segment 1 calculated with rigorous theory (lines) and measured at BESSY II (boxes).
WIAS-Berlin, 25.10.2004



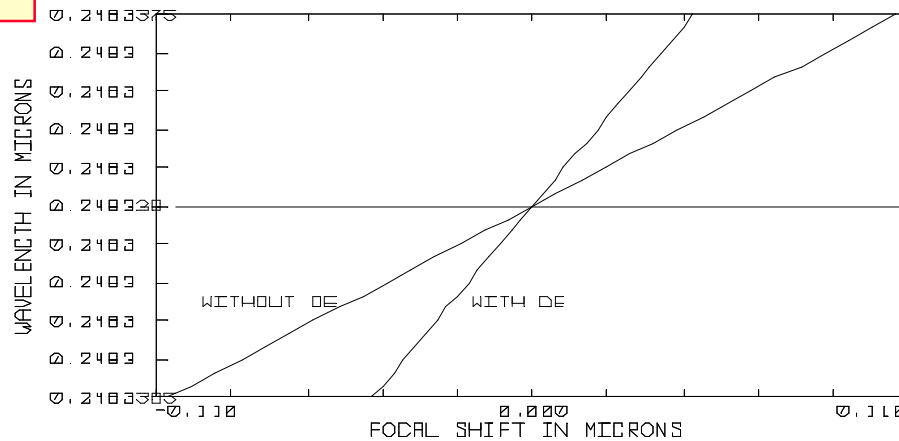
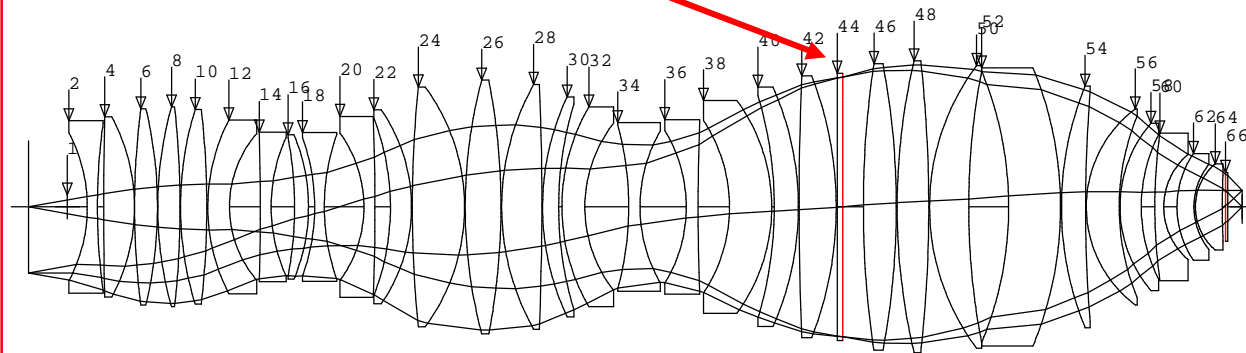
Einsatz diffraktiver Linsen zur Farbfehlerkorrektur in Projektionsobjektiven

Diffraktive Linse in einem Lithographie-Projektionsobjektiv



Objektiv mit Diffraktiver Linse (DL)

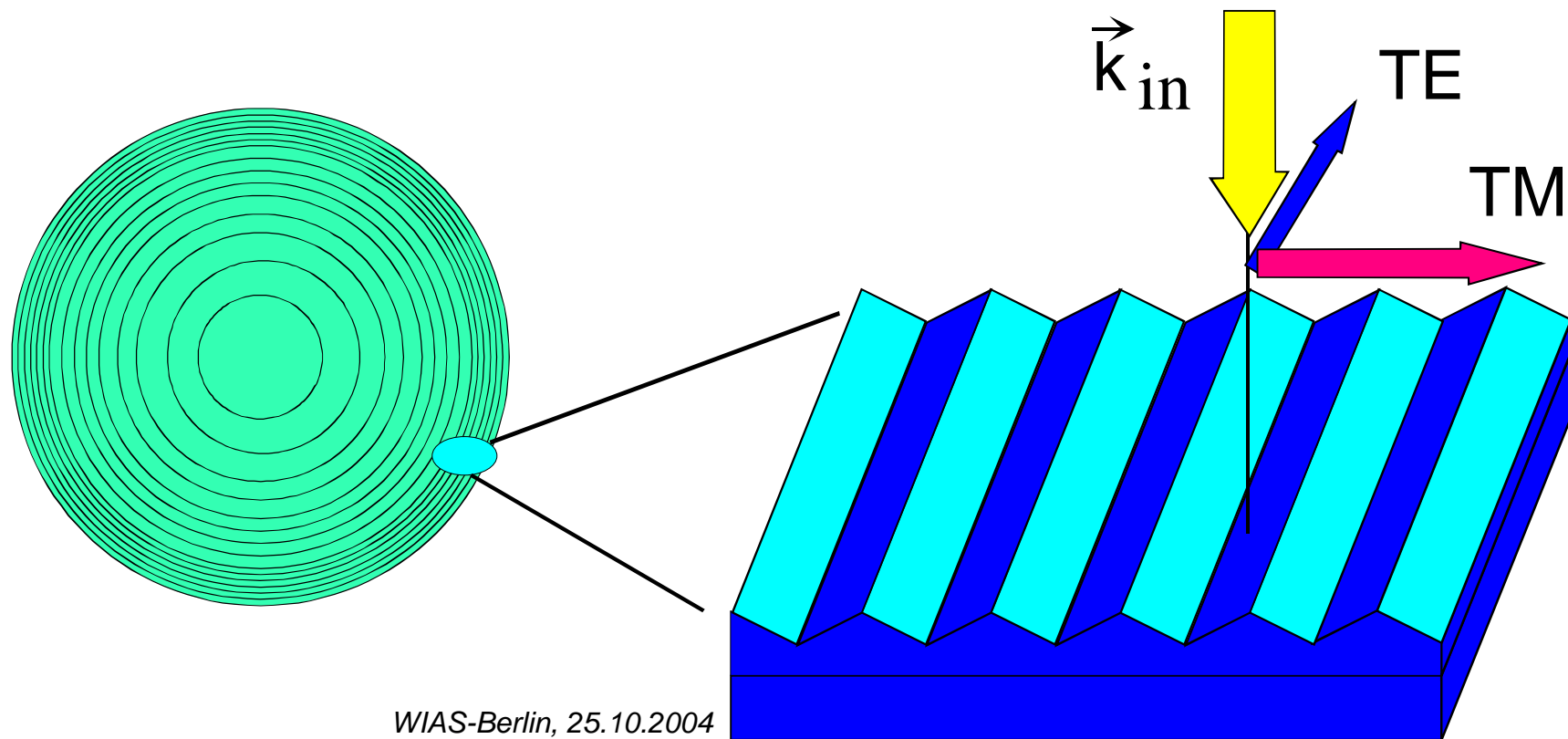
$\lambda = 248\text{nm} \pm 0.5\mu\text{m}$
 $\text{NA} = 0.7$
 $\text{Feld} = 26 \times 8\text{mm}^2$
 $\beta' = -0.25$
Material: Quarz
CHL = $0.2\mu\text{m}/\text{pm}$
Bandbreite $\sim 0.7\mu\text{m}$



Objektiv mit DL:
CHL = $0.1\mu\text{m}/\text{pm}$
Bandbreite $\sim 1.4\mu\text{m}$
 $f_{\text{DL}} = 1250\text{mm}$
 $d_{\text{min}} \sim 3\mu\text{m}$

Lokales Gitter einer Fresnel-Linse

Ausschnittsvergrößerung der Zonen einer Fresnel-Linse zeigt lokale Ähnlichkeit mit einem Gitter ==> “local linear grating approximation” = LLGA

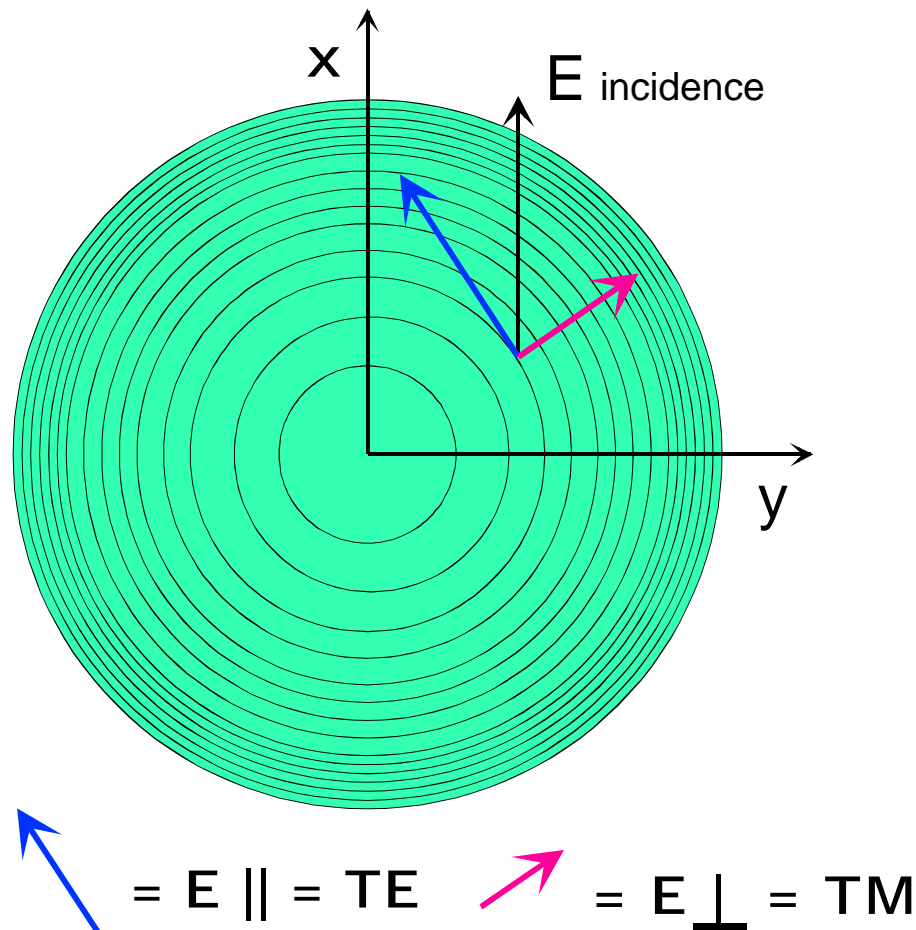


Zerlegung des einfallenden Lichts an einer Fresnel-Linse



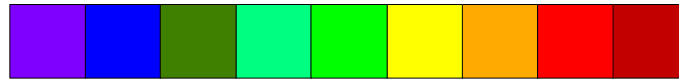
Polarisationsprojektionen

für die Berechnung der entsprechenden Jones Matrix



Vorgehensweise:

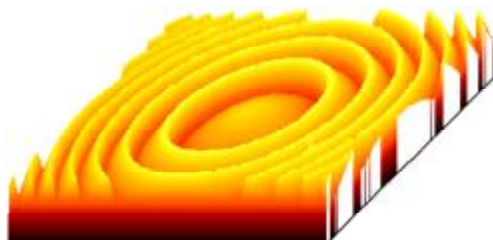
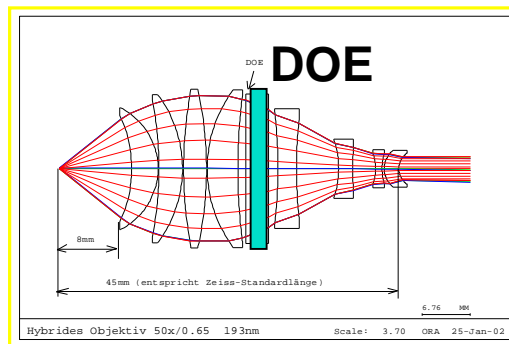
1. Zerlegung des elektrischen Feldvektors $E_{\text{incidence}}$ in das lokale Koordinatensystem
2. Beugung der Komponenten **parallel** und **senkrecht** zu den Gitterfurchen
3. Transformation zurück in das xy -Koordinatensystem
4. Berechnung der Punktbildfunktionen für beide Polarisationsfälle



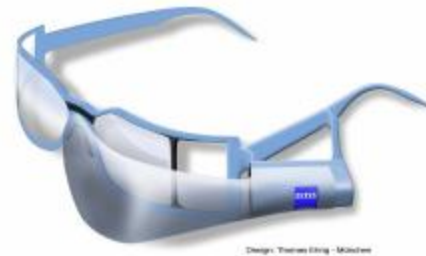
Integrated Optical Design and Modelling of Systems with Diffractive Elements

Optical Design with DOEs

Hybrid Lens Systems

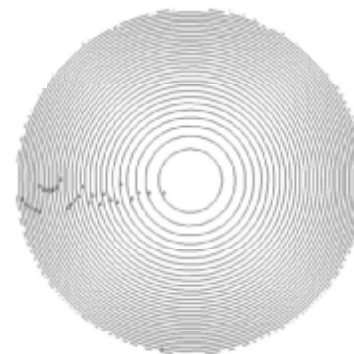


Head Mounted Display (HMD)

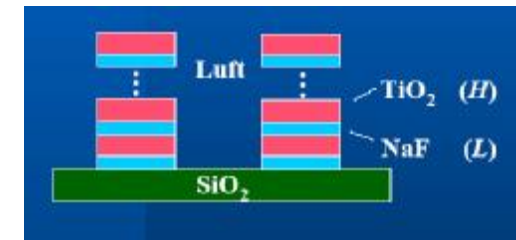


Design-Studie:
Datenbrille von
Carl Zeiss

Null-CGHs
for Aspheres



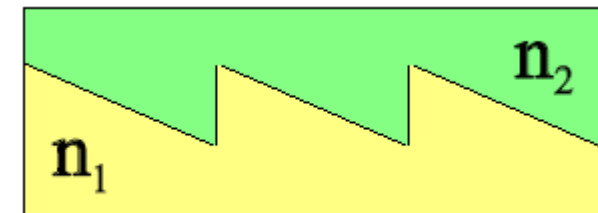
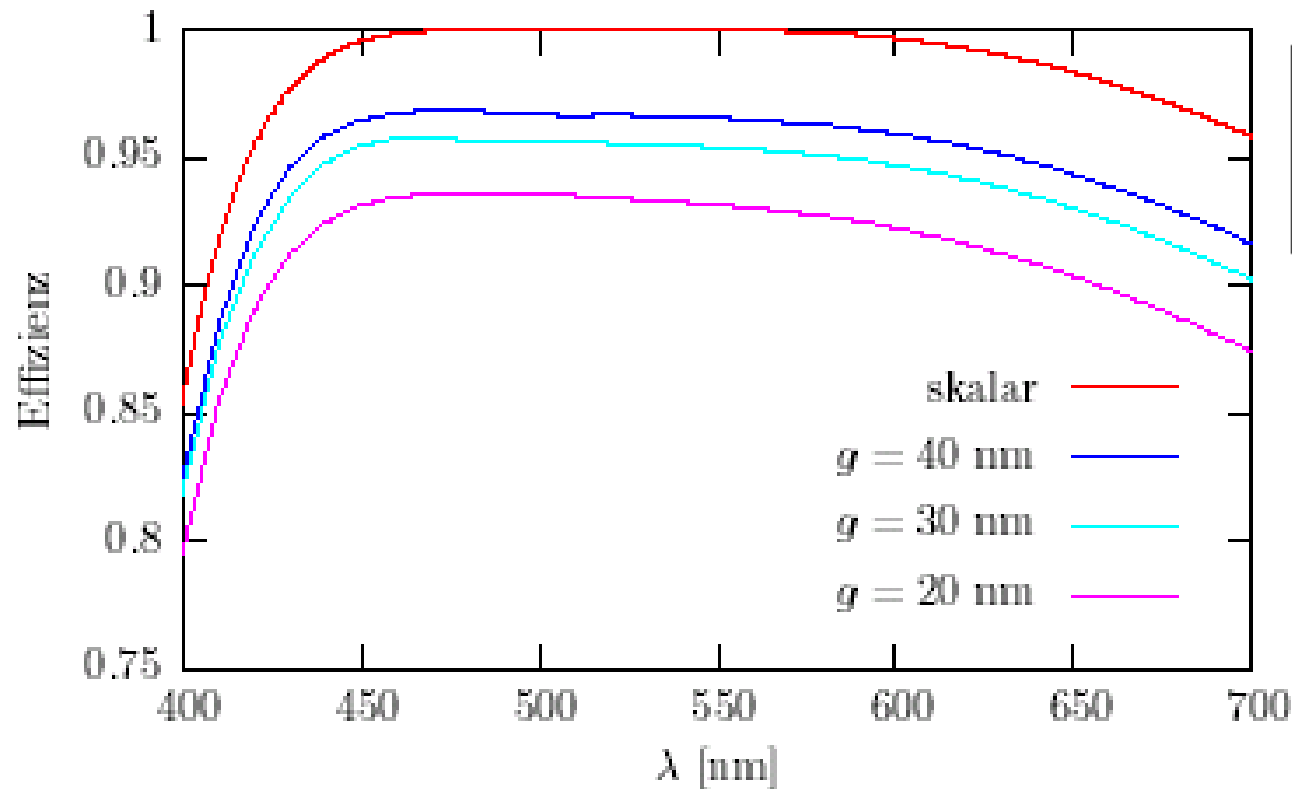
Polarisations-
elemente



Rigorous Modelling: Necessary Part of Optical Design

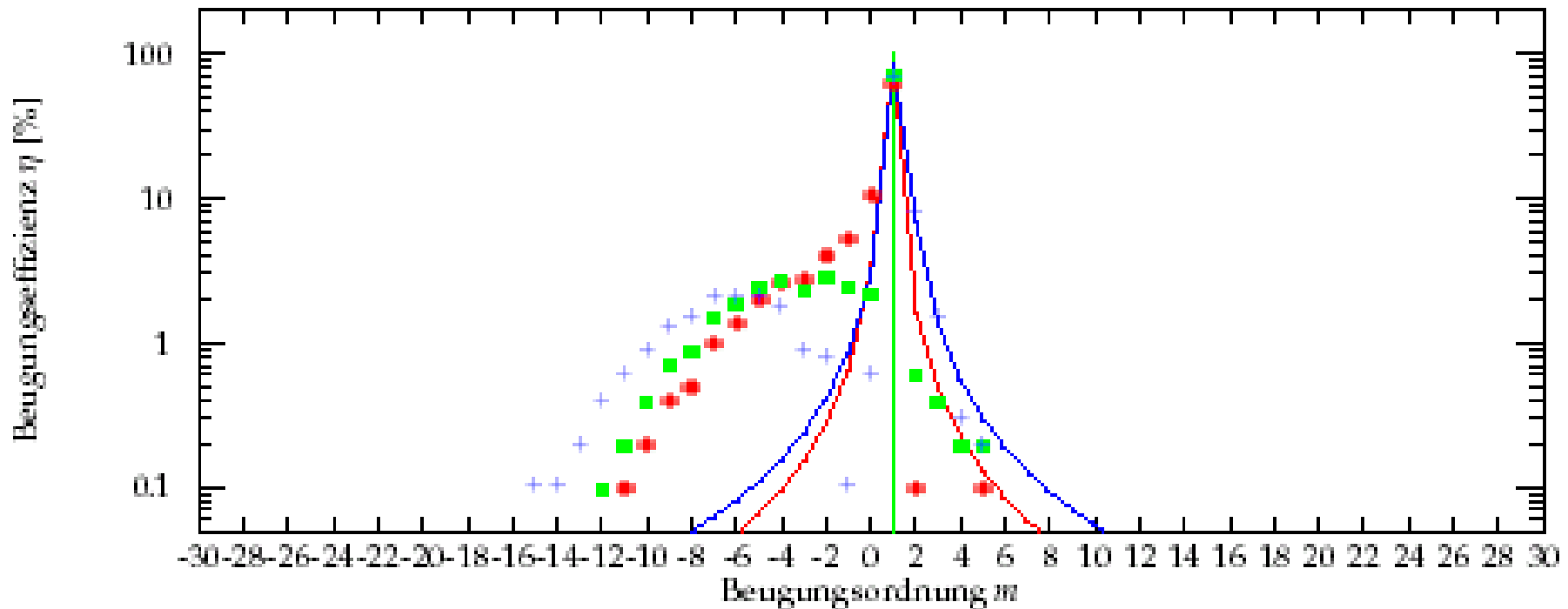
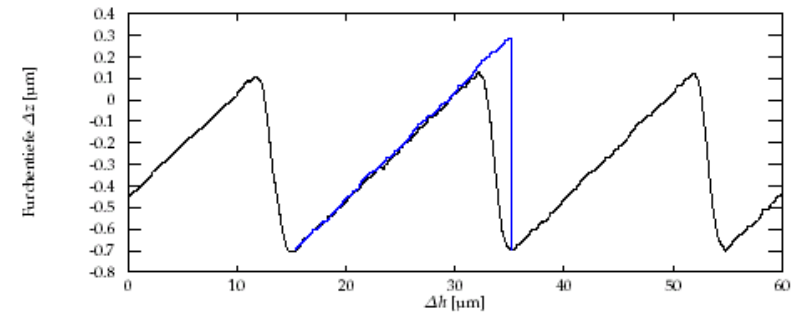
Untersuchungen von Anwendungen mit DOEs von Mitbewerbern

Near Index matched (NIM) DOE von Lexitek (Tiefe rund $10\mu\text{m}$):



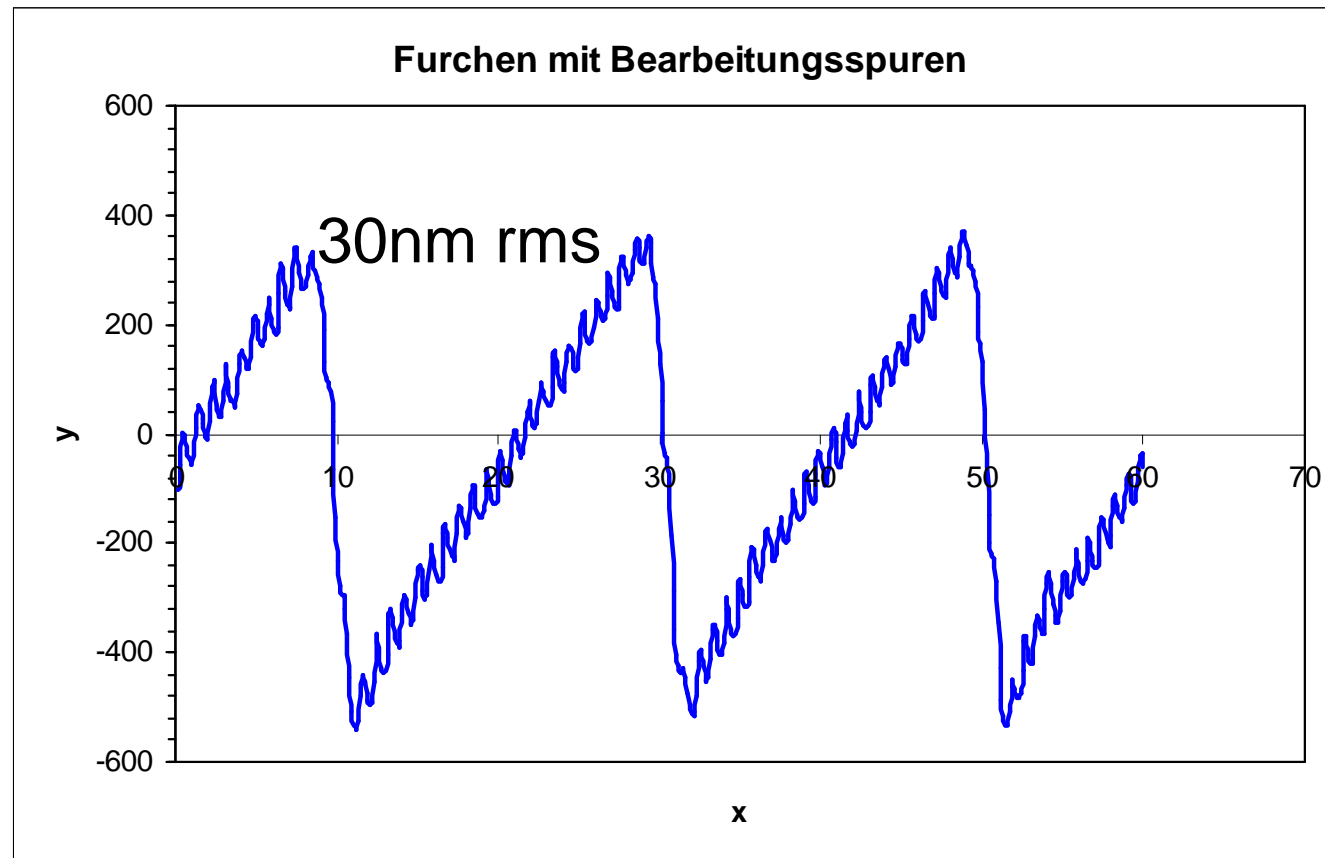
$kd=3770$,
jedoch rein
dielektrisch

Tolerierung von DOEs als Komponente:



Tolerierung von DOEs als Komponente:

5% Licht geht in die 24. Beugungsordnung bei 42° Ausfall



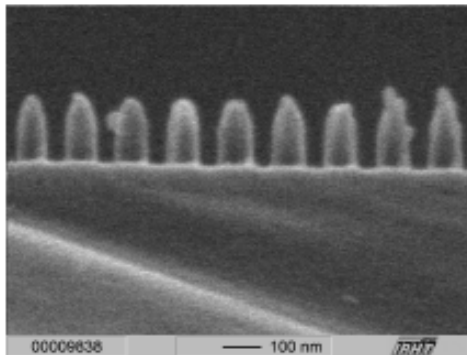
Carl Zeiss Jena: O. Sandfuchs, C. Nieten, J. Ruoff

3. Erzeugung von Jones-Matrix-Datenfiles mit Polarisationsinformationen unter Verwendung von DIPOG-1+2

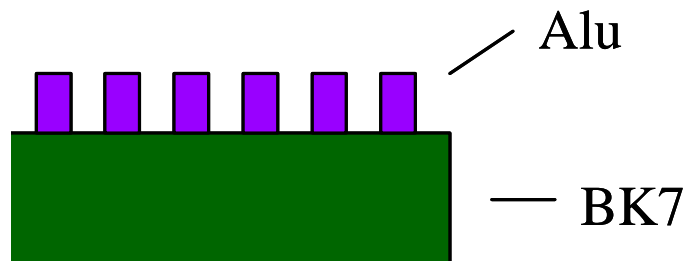
Anwendung bei der Untersuchung von polarisierenden Elementen
aus dem POLOS-Projekt.

Gitterperiode: $g = 140\text{nm}$
Steghöhe: $h = 180\text{nm}$
Füllfaktor: $f = 0.5$

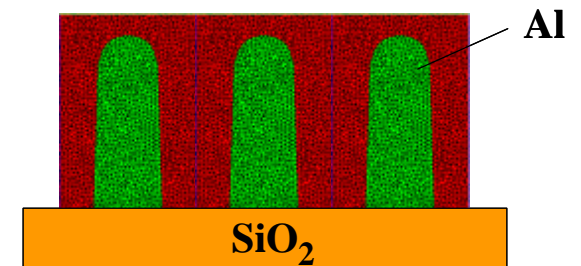
Strukturvermessung



Einfache Modellierung
durch ideale Rechtecke



Realistische Modellierung
durch Polynomfitting: DIPOG2



Definitionen Jones-Matrix

JONES MATRIX J

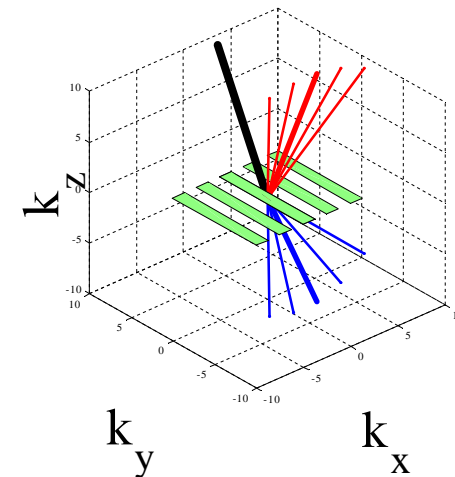
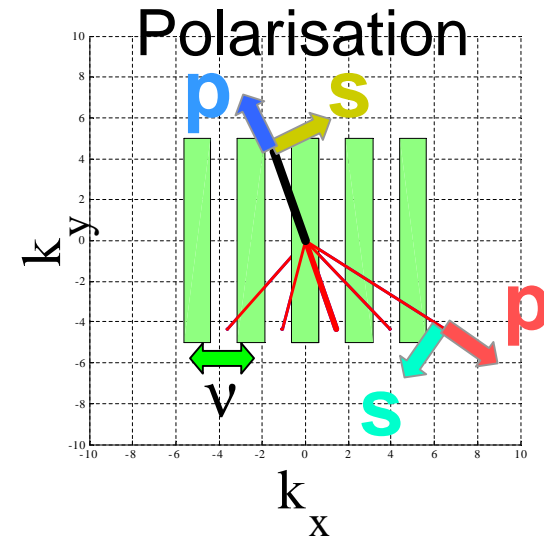
beschreibt für eine Beugungsordnung den Übergang des komplexen E-Feldvektors $\mathbf{E} = (E_s, E_p)$ zwischen einfallendem und ausfallendem Strahl .

$$\mathbf{E}_{out} = J \cdot \mathbf{E}_{in}$$

$$J(v, w_x, w_y) = \begin{pmatrix} ss & sp \\ ps & pp \end{pmatrix}$$

Jonesmatrix kann in verschiedenen Koordinatensystemen angegeben werden.

- $J_{sp,in/sp,out}$ jeweils im sp-System (OASE)
- J_{xy} im Gitterfesten xy-System (Datenbasis wegen Interpolation)

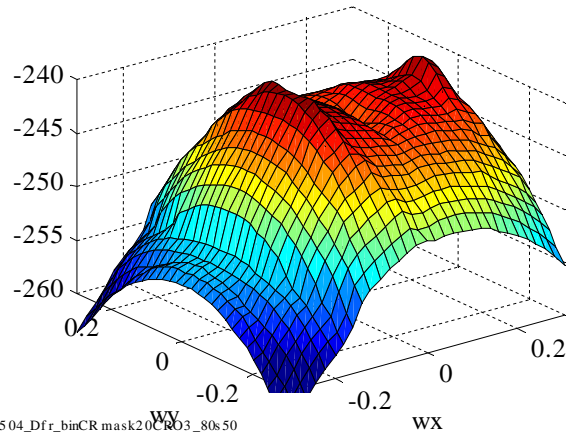




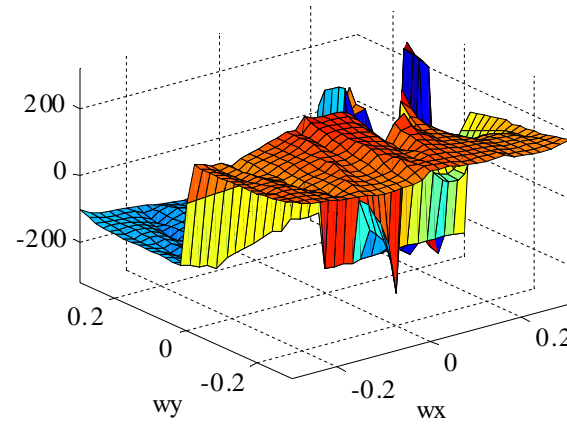
Chromgitter - Pupille

M140702_014504_Dfr_binCRmask20CRO3_80s50 d = 2.778um (360mm⁻¹)

Pol:in x, out x

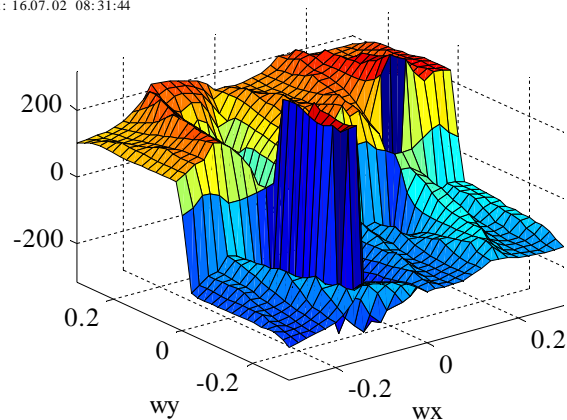


Pol:in x, out y

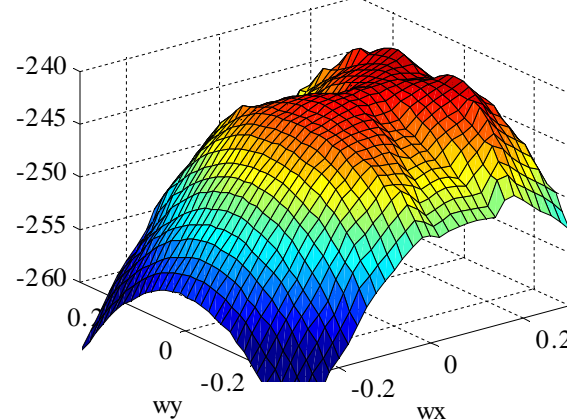


M140702_014504_Dfr_binCR mask20CRO3_80s50
Rig Modenzahl M0 = 150
Gitterperiode nue: 300 .. 360 mm⁻¹
wx=0 .. 0.3
wy=0 .. 0.3
MicroSim (M Totzeck)
Daten erzeugt: 16.07.02 08:31:44

Pol:in y, out x

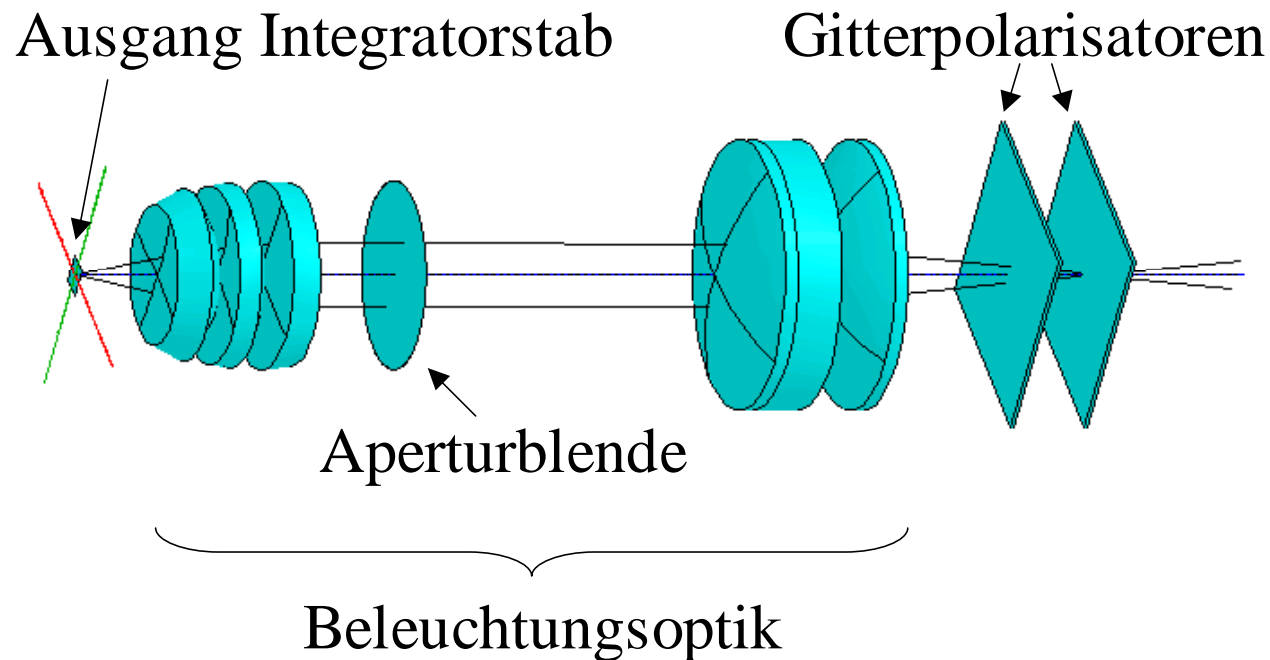


Pol:in y, out y



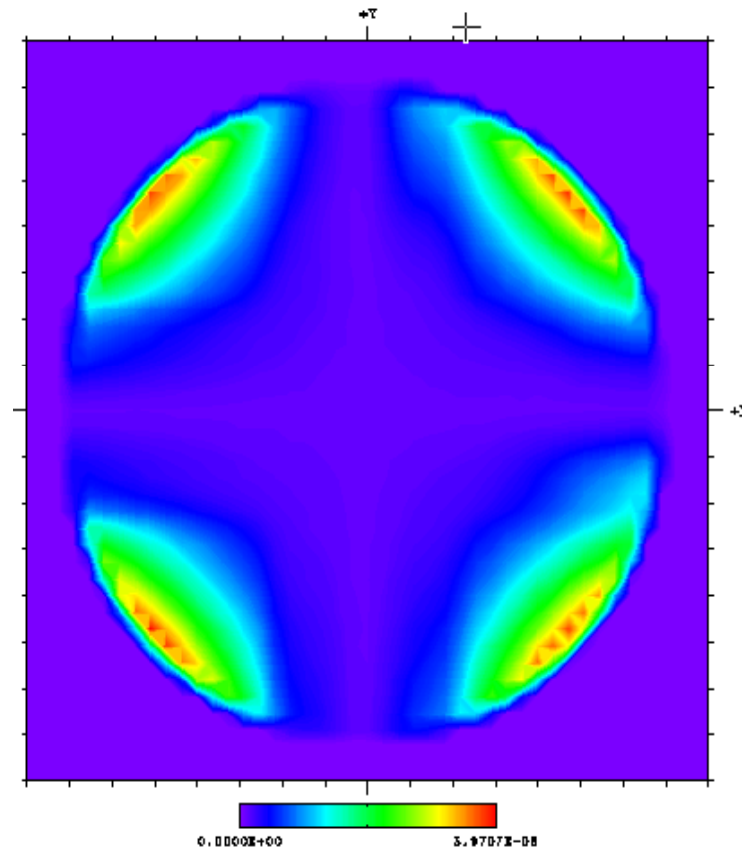
3. Erzeugung von Jones-Matrix-Datenfiles mit Polarisationsinformationen unter Verwendung von DIPOG-1+2

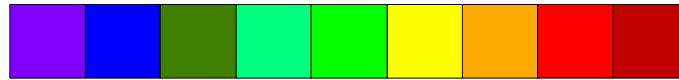
Linsenschnitt: Erzeugung von unpolarisiertem Licht → Kollimation → Blende →
Fokussierung → gekreuzte Gitterpolarisatoren → Pupillenbild



3. Erzeugung von Jones-Matrix-Datenfiles mit
Polarisationsinformationen unter Verwendung von DIPOG-1+2

Erwartete Malteser-Kreuz Struktur

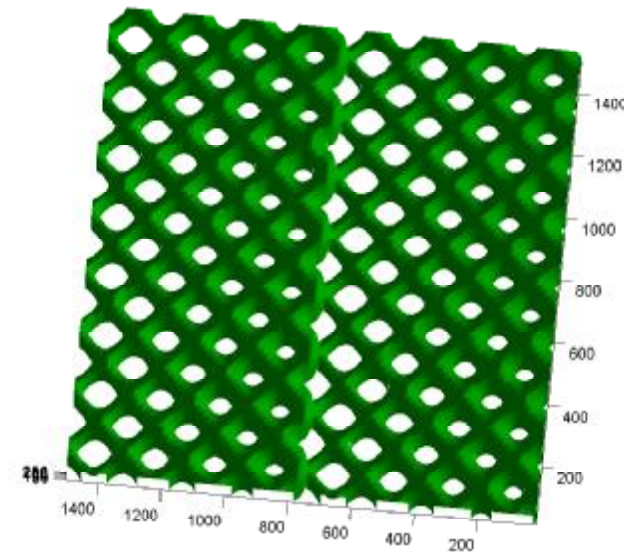
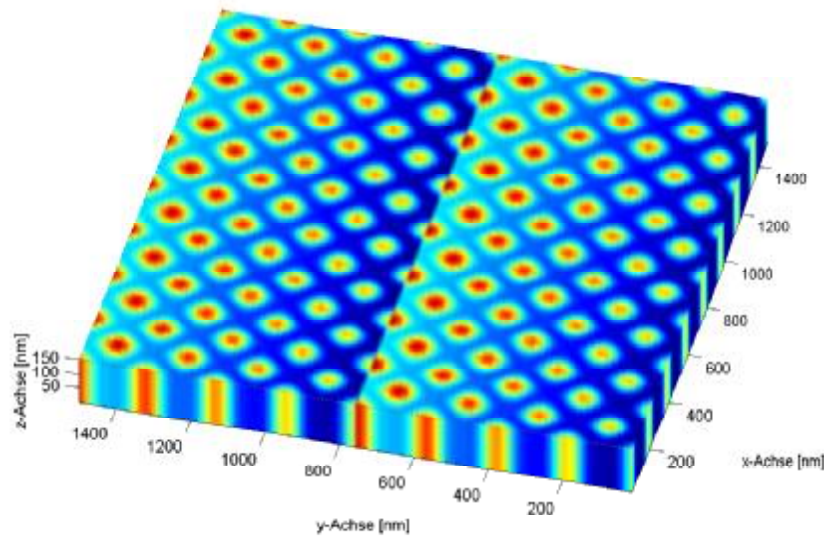




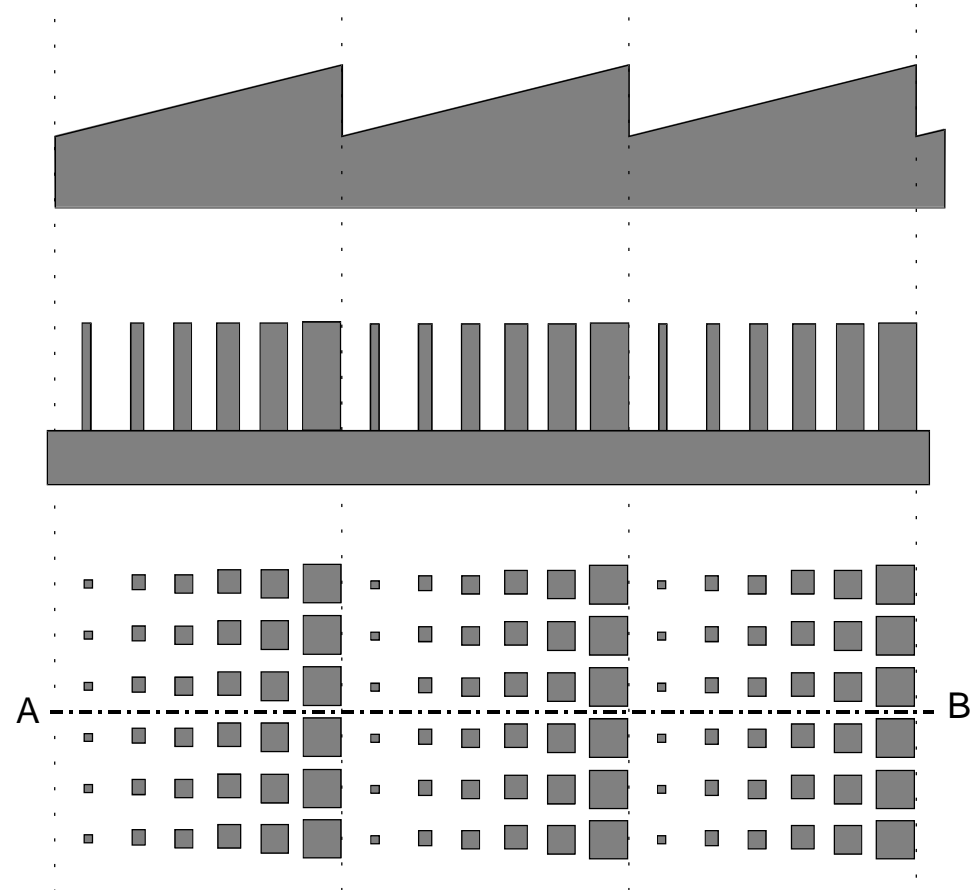
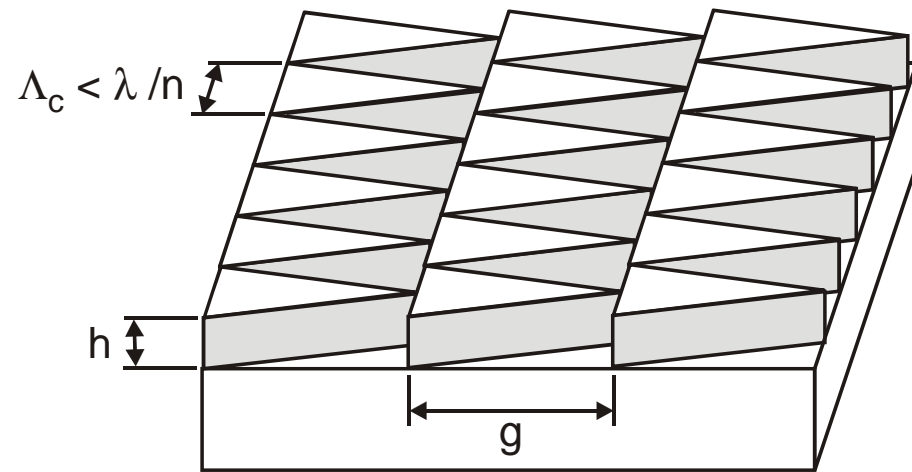
Neue Profilformen (Modellierung schwierig oder noch offen)

Sub- λ Blazegitter 1

Kreuzgitter nach Mehrfachbelichtung durch 4-Wellen Überlagerung:
Simulation Labor R. Brunner (CZJ)



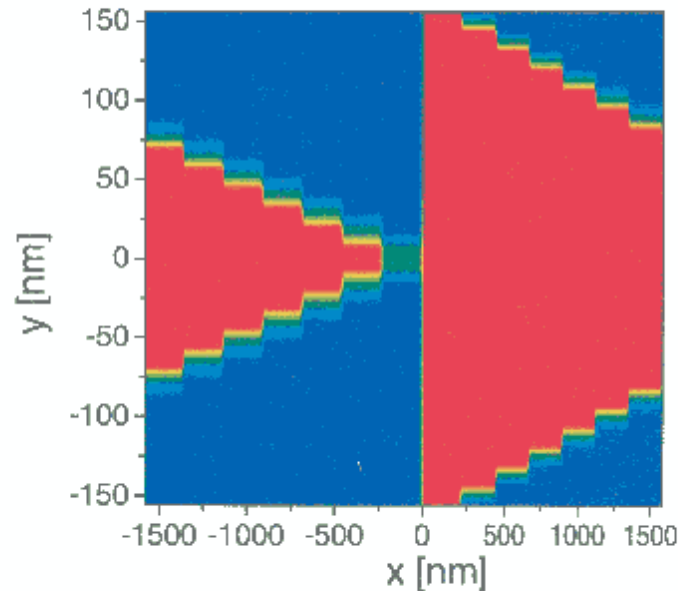
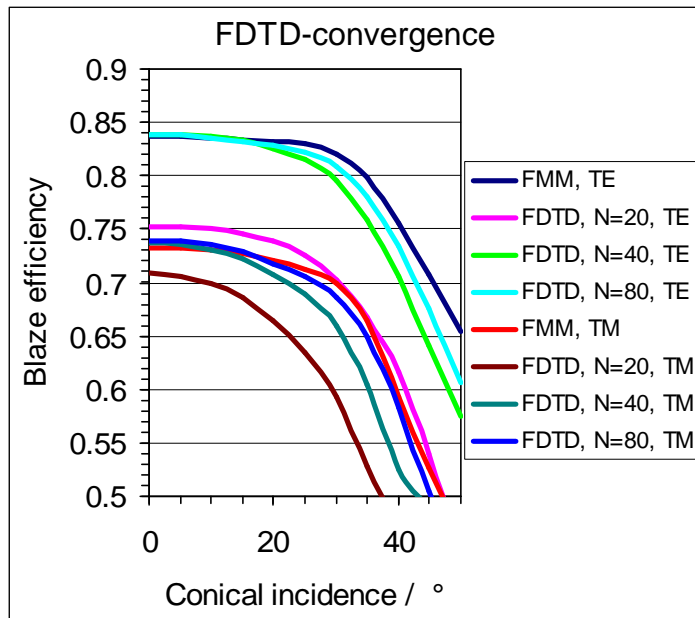
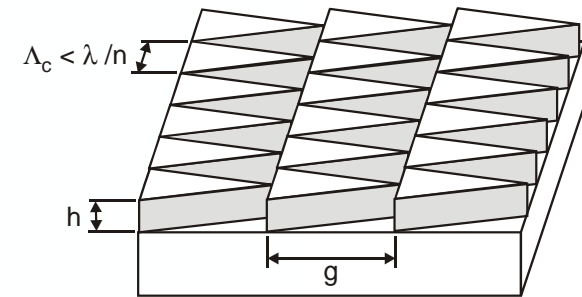
Sub- λ Blazegitter 2



FDTD modelling of Blazed ACES

Blazed Gratings: 2D-case

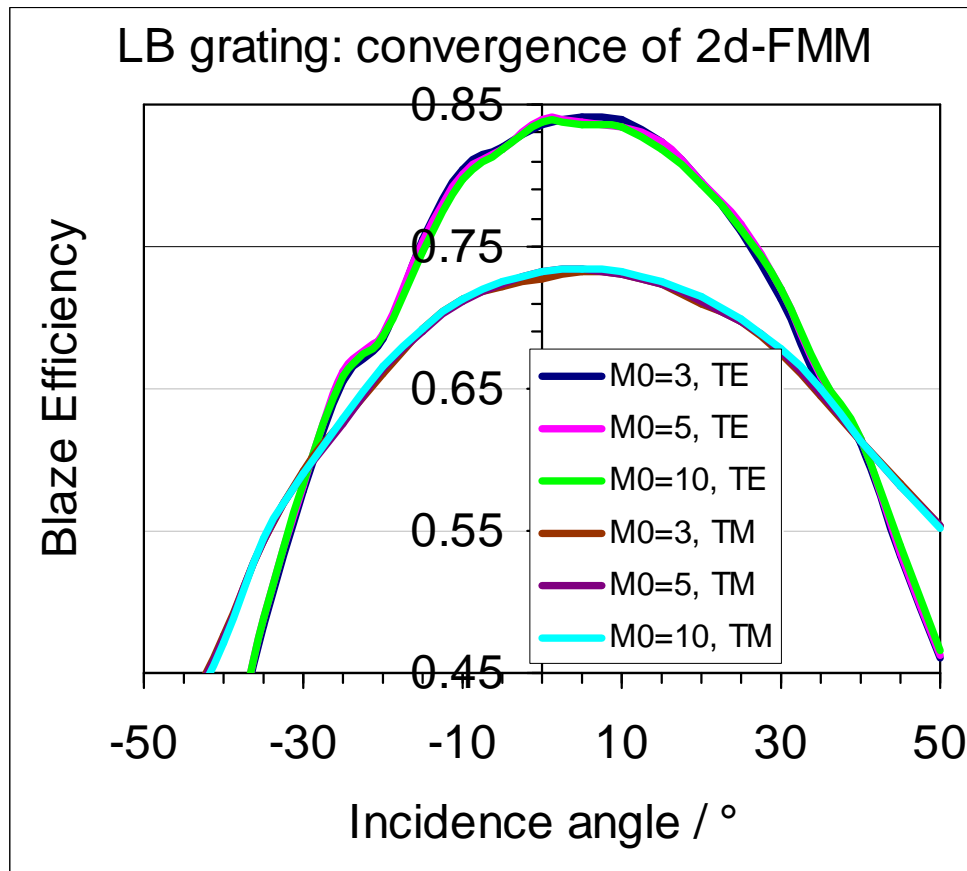
geometry: Fig. 1d from document
 $n=1.4567$, $h=1386\text{nm}$, $p=316\text{nm}$, $g=3164\text{nm}$
 $\lambda=633\text{nm}$, vertical incidence, E-field vector parallel with respect to the grating vector of the fine grating



FDTD-convergence for a blazed ACE grating with $g=5l$, $L_c=l/2$, $n=1.46$, $l=633\text{nm}$.



FMM-modelling and convergence



MicroSim by Michael Totzeck,
Improvement by
Johannes Ruoff according to:

Lifeng Li, "New formulation of the
Fourier modal method for
crossed surface-relief gratings,"
J. Opt. Soc. Am. A **14**, 2758-
2767 (1997).

FMM-convergence for a blazed
ACE-grating: $g=5l$, $L_c=l/2$,
 $n=1.46$, $l=633\text{nm}$.

$M_0 = 5 \Rightarrow 11 \times 11$ modes



Zusammenfassung

- Periodische Helmholtz-Solver sind wichtige Bausteine zur vektoriellen Modellierung von diffraktiven Komponenten
- Es beginnt die Integration der EM Verfahren in vorhandene Optik-Design Software → Systeme
- Gibt viele EM Beugungsmethoden
- Bisher international zu wenig Aufmerksamkeit auf Effizienz der Methoden gelegt
- Besonders im 2d- und 3d-Fall spielt Komplexität der Methoden große Rolle zur Verringerung der Rechenzeit.