

# Seminarvortrag

# Photonische Kristalle

Von Alexandra Dombrowa

# Überblick

## **Theoretische Beschreibung**

- Mastergleichung, Vergleich mit HL, Bandlücken, Kontrast, Bandschema, TE-TM-Moden, Defekte

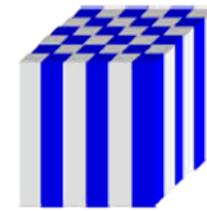
## **1D-, 2D-, 3D-Kristalle**

- 2D +3D : Herstellungsverfahren (Vorteile/Nachteile)
- 2D-Membranstrukturen (Quasi-3D) u. Anwendungen

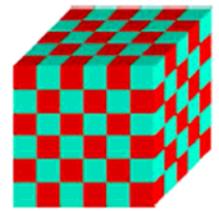
# Einführung



1D

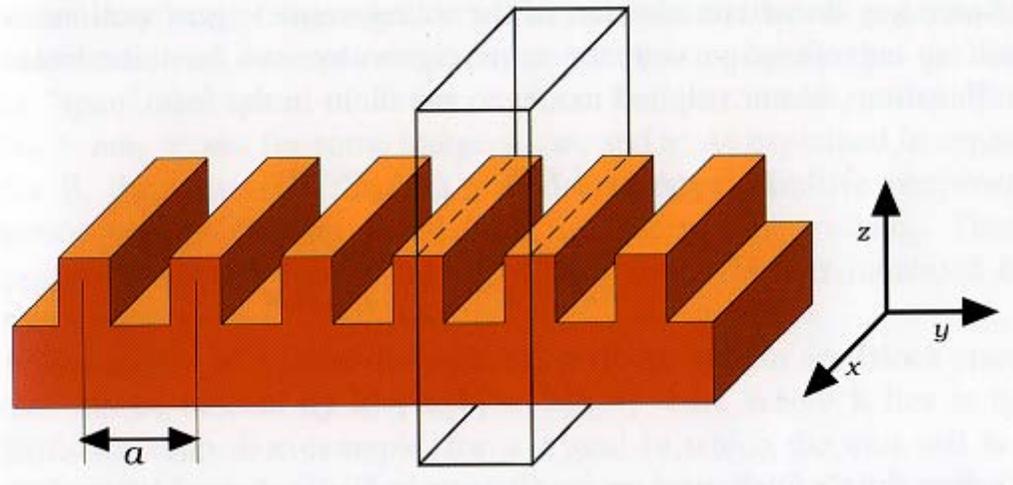


2D



3D

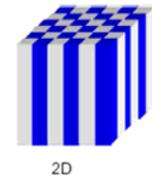
- Räumliche Variation des Brechungsindex mit Periodenlänge  $\cong$  Wellenlänge des Lichtes
- durch periodische Anordnung verschiedener Dielektrika meist jedoch ein Material mit hohem Brechungsindex und Luft



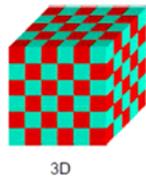
# Die Mastergleichung



1D



2D



3D

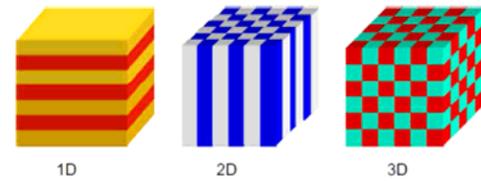
$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) \right] = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r})$$

$$\ominus \vec{H}(\vec{r}) = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r})$$

- Operator translationsinvariant und hermitesch  $\Rightarrow$  reelle Eigenwerte, EF bilden orthogonales FS
- Skalierbarkeit der Eigenwert-Gleichung führt zur Übertragbarkeit der Lösungen auf andere Maße und Frequenzen bei gleicher Geometrie und gleichem  $\Delta n$

$$\varepsilon(r) \rightarrow \varepsilon\left(\frac{r'}{s}\right) \quad \longrightarrow \quad \nabla' \times \left[ \frac{1}{\varepsilon'(\vec{r}')} \nabla' \times \vec{H}\left(\frac{\vec{r}'}{s}\right) \right] = \left( \frac{\omega}{cs} \right)^2 \vec{H}\left(\frac{\vec{r}'}{s}\right)$$

# „HL“ für Photonen



Separierbar falls :

$$V(r) = V_x \cdot V_y \cdot V_z$$

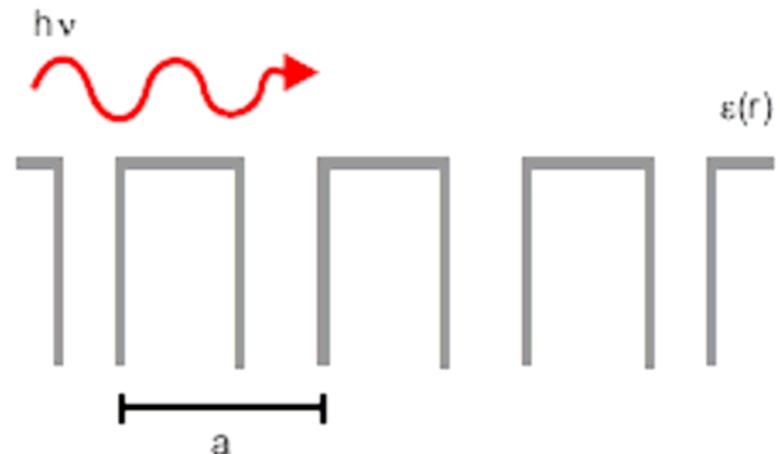
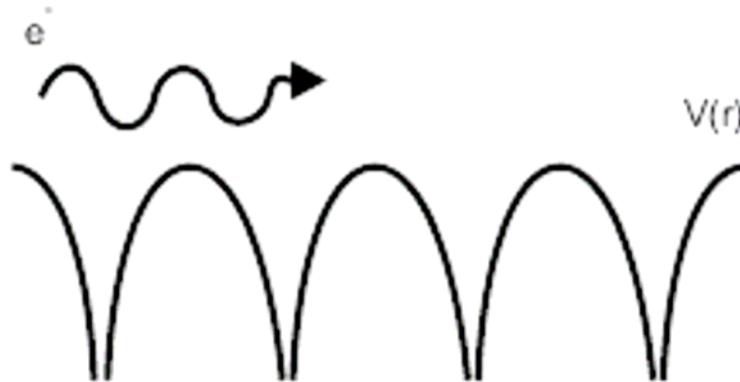
$$\Psi(r, t) = \Psi(r) e^{i\omega t}$$

$$H\Psi = E\Psi$$

Verschiedene Richtungen gekoppelt  $\rightarrow$  FDTD

$$H(r, t) = H(r) e^{i\omega t} \quad H(r) = u(r) e^{ikr}$$

$$\Delta H = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 H \quad u(r) = u(r + R)$$



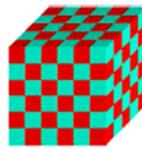
# Vergleich



1D



2D



3D

HL

Schrödinger Gl.

$$V(r) = V(r+R)$$

Donatoren drücken  
Zustände in die  
Bandlücke,  
Akzeptoren heben  
Zustände in die  
Bandlücke

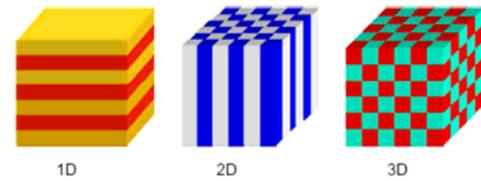
Photonische  
Kristalle

Mastergleichung

$$\varepsilon(r) = \varepsilon(r + R)$$

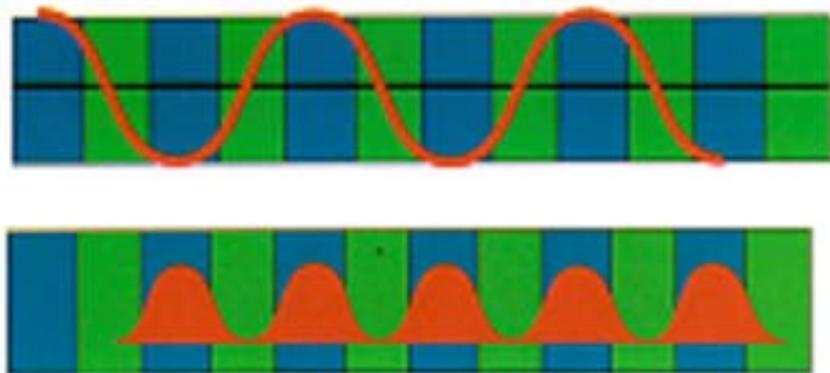
$\varepsilon \uparrow$  -Bereiche  
drücken Zustände in  
die Bandlücke,  
 $\varepsilon \downarrow$  -Bereiche heben  
Zustände in die  
Bandlücke

# Bandlücken

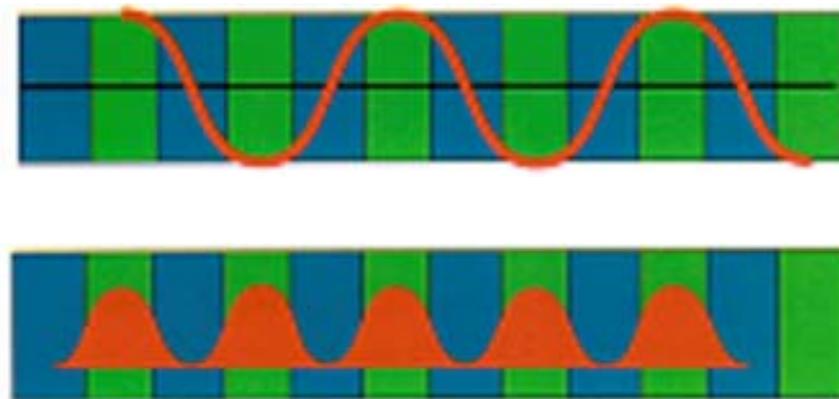


- bei  $k=\pi/a$ : Ausbildung stehender Wellen mit Energie-maxima in Bereichen mit  $\uparrow n$  (blau) oder  $\downarrow n$  (grün) führt zur energetischen Aufspaltung der erlaubten Moden
- bei gleichem k-Vektor unterschiedliche Energien / Frequenzen für die verschiedenen Bänder

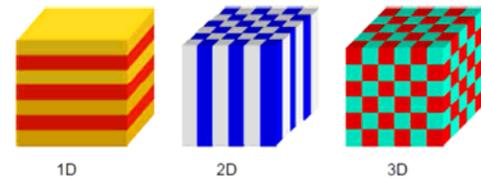
Band 1



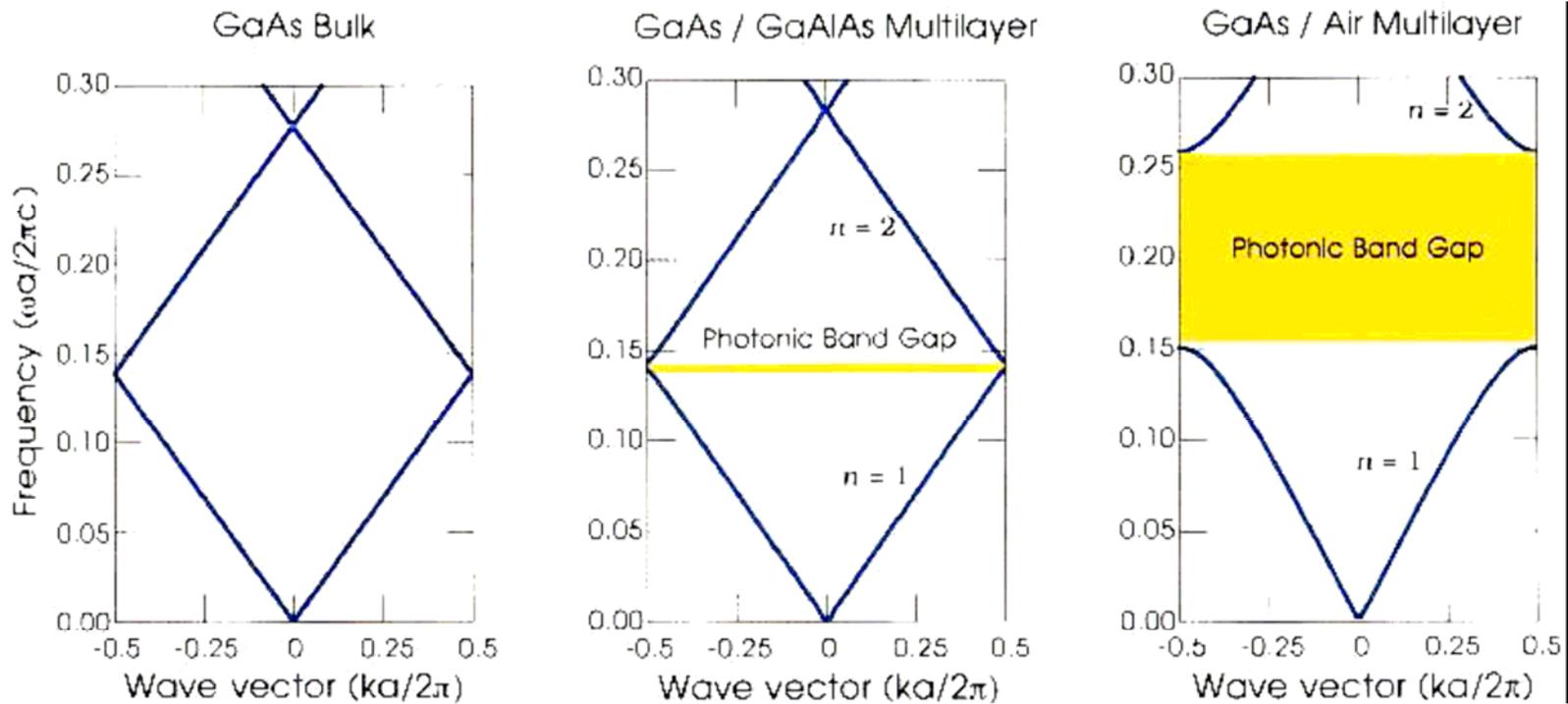
Band 2



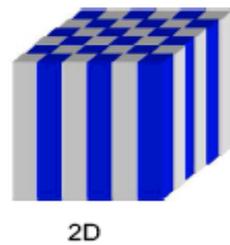
# Kontrast $\Delta n = \frac{n_1}{n_2}$



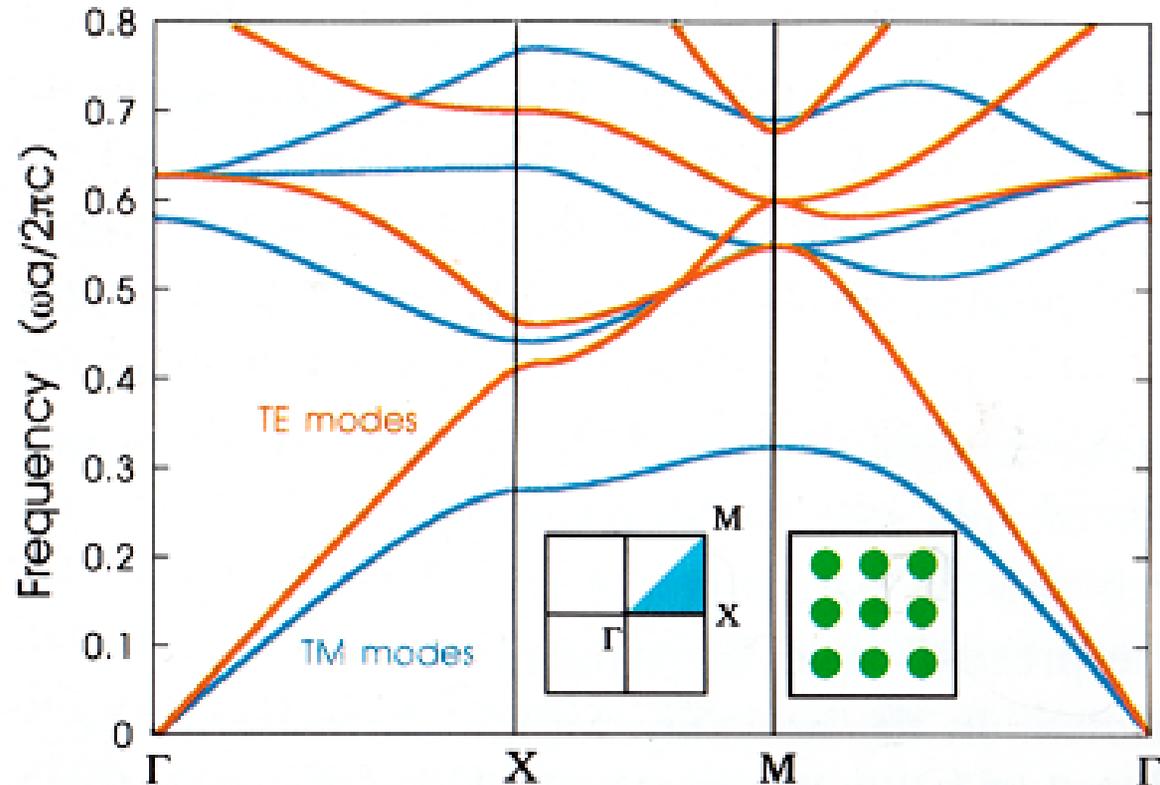
- Bandlücke umso größer je größer  $\Delta n$  ist (ca. 3.0)
- Kontrast groß  $\Rightarrow$  Überlagerung der Stoppbänder bei 2D und 3D zu einer vollständigen photonischen Bandlücke



# TE- und TM-Moden

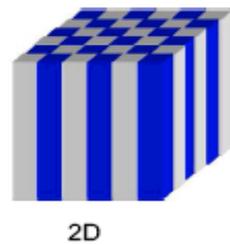


- Entkopplung für k-Vektor in Ebene möglich
- TE/ TM haben verschiedene Bandstruktur
- direkte und inverse Struktur
- Füllfaktor

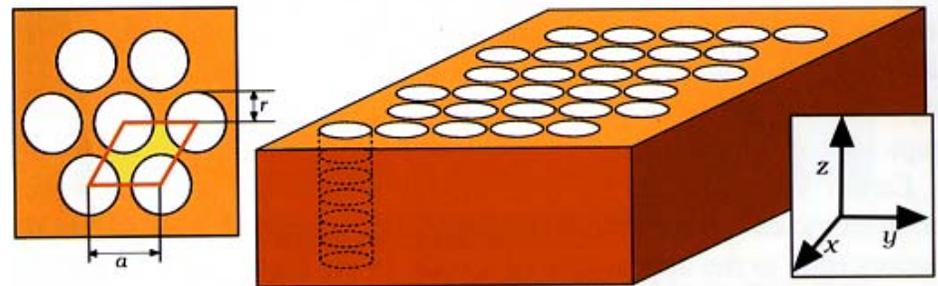
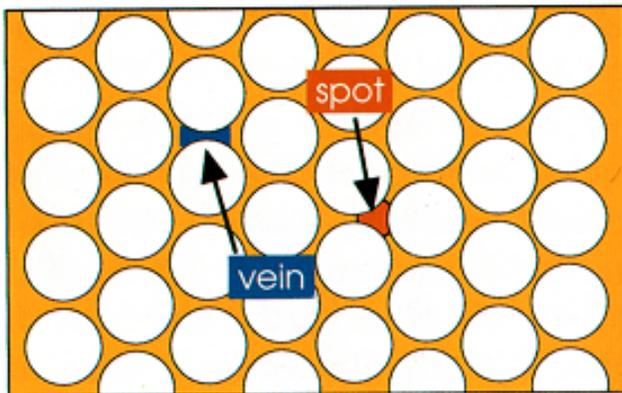
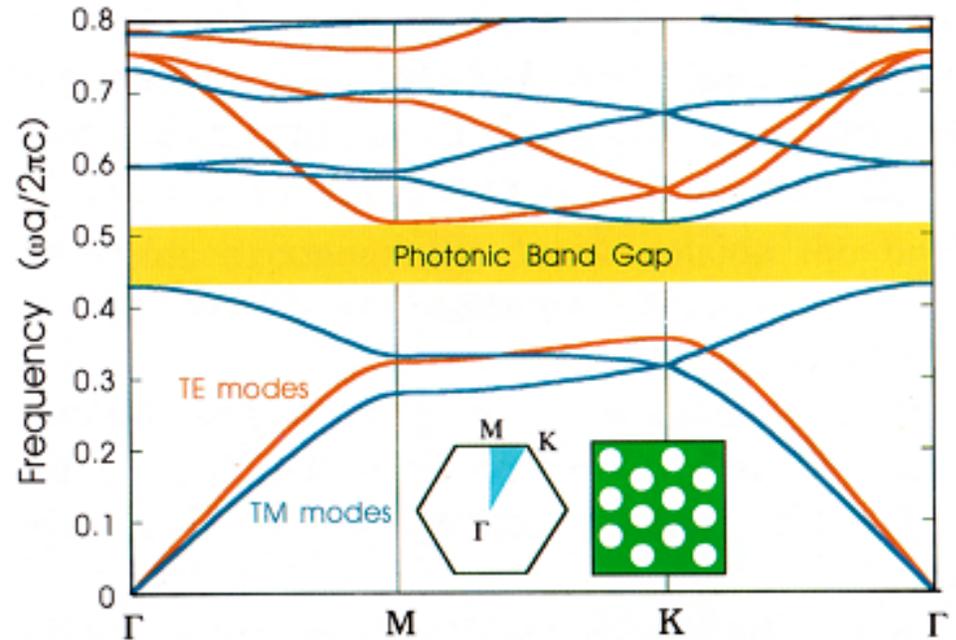


Bildquelle: Photonic Crystals (Joannopoulos/Meade/Winn)

# Überlappende Bandlücken



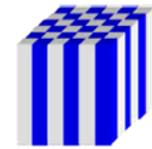
- Kompromiss: dünne Verbindungen der Spots
- $r/a=0.48$ ,  $\epsilon(r)=13$



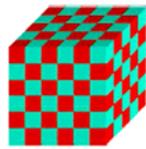
# Bandschema für 3D



1D

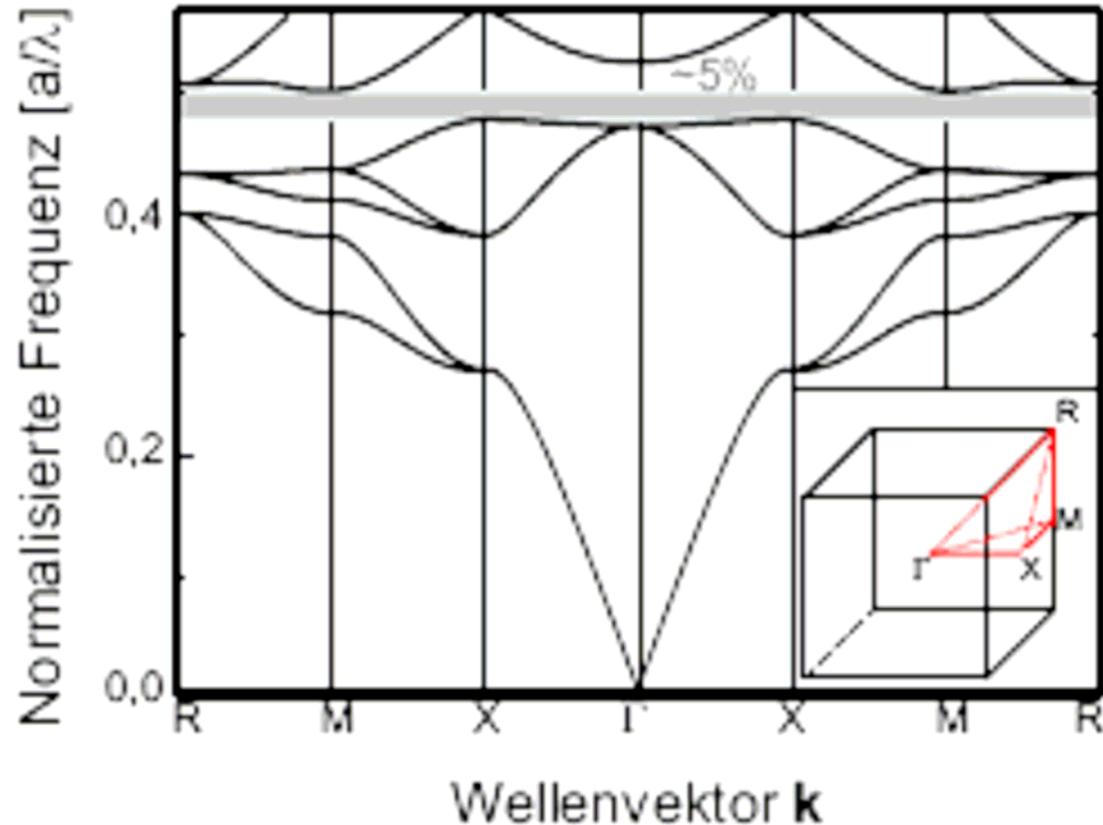


2D



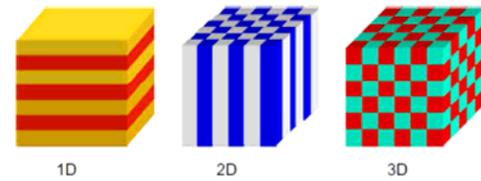
3D

- gap-midgap-ratio:  $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}$  (sinnvoll wegen Skalierbarkeit)
- irreduzierbare Brillouinzone

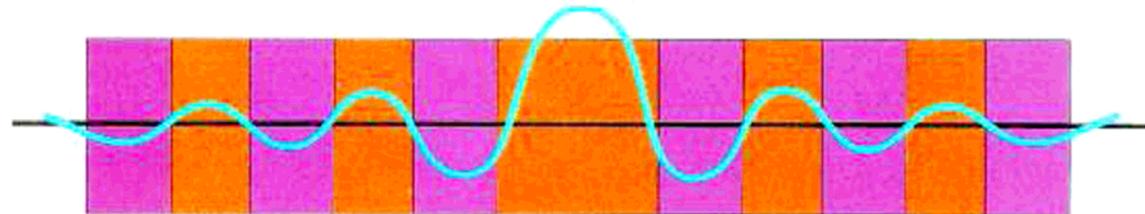
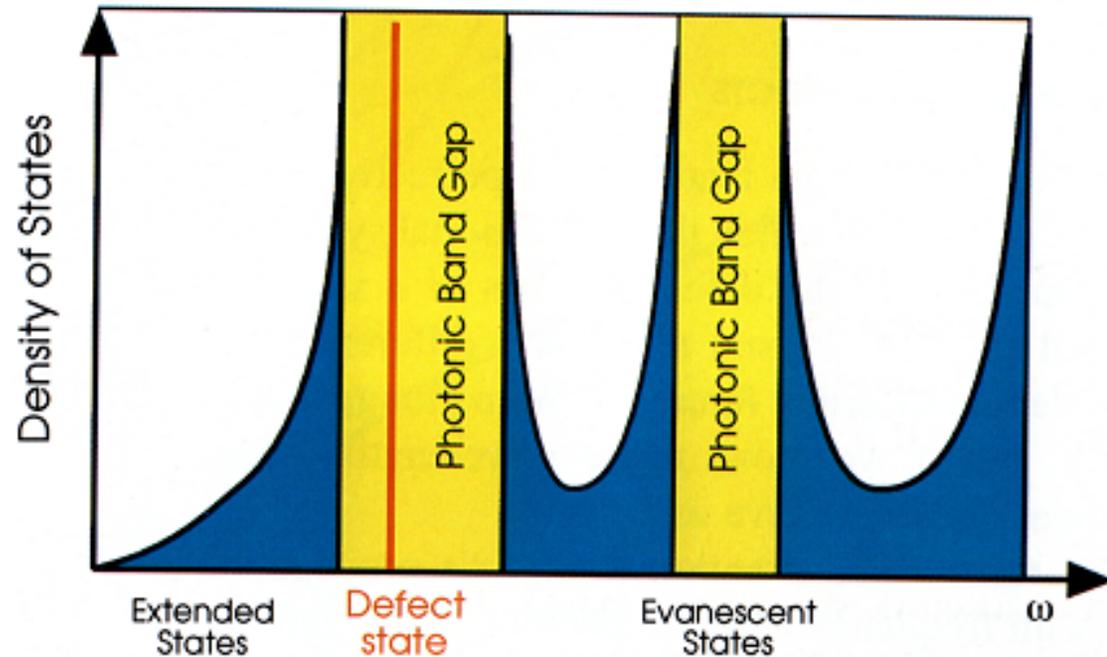


Bildquelle: Dissertation von  
Sven Matthias (2005)

# Defekte in 2D+3D



- Linien/Punktdefekte
- Lichtleitung
- DOS (Density of States)
- lokalisierte Moden
- Oberflächenmoden



# Überblick

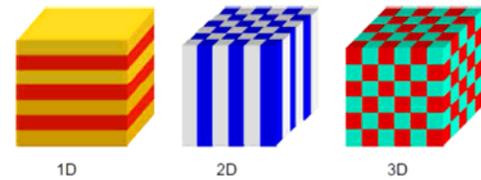
## Theoretische Beschreibung

- Mastergleichung, Vergleich mit HL, Bandlücken, Kontrast, Bandschema, TE-TM-Moden, Defekte

## 1D-, 2D-, 3D-Kristalle

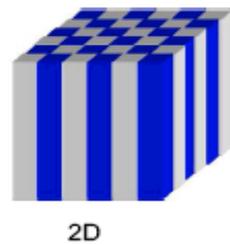
- 2D +3D : Herstellungsverfahren (Vorteile/Nachteile)
- 2D-Membranstrukturen (Quasi-3D) u. Anwendungen

# Anwendungen

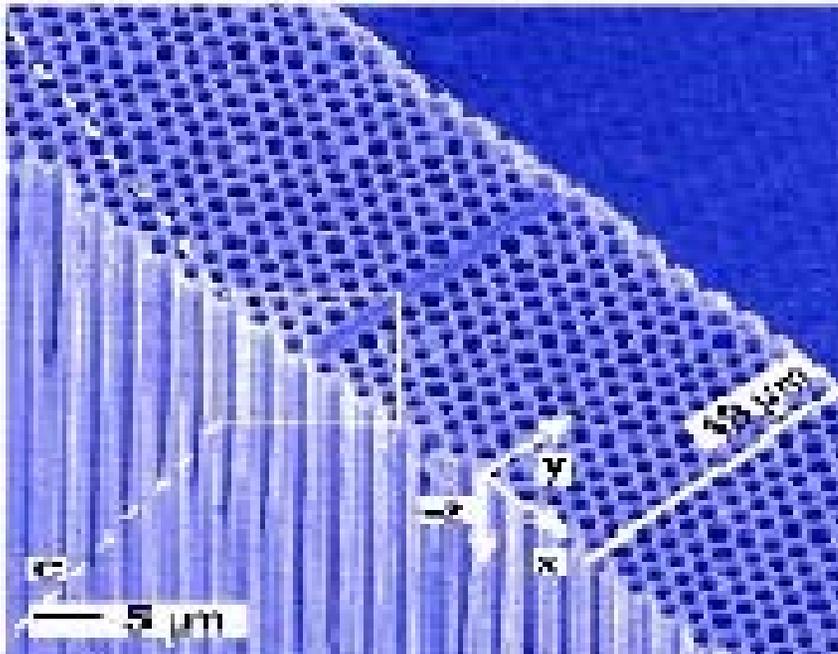


- **1D**: Spiegel, Filter, Antireflexschichten...
- **2D**: Wellenleiter bes. 1.5 und 1.3 $\mu\text{m}$  und sichtbares Licht, photonische Schaltungen, Add-Drop-Filter, photonische Kristall-LASER, PC...
- **3D**: Wellenleiter, mit eingebrachten (aktiven) Materialien auch frozen light bzw. lokalisierte Moden möglich, Monomodens-LASER, Quantenkryptographie, Forschung...

# 2D-Strukturen

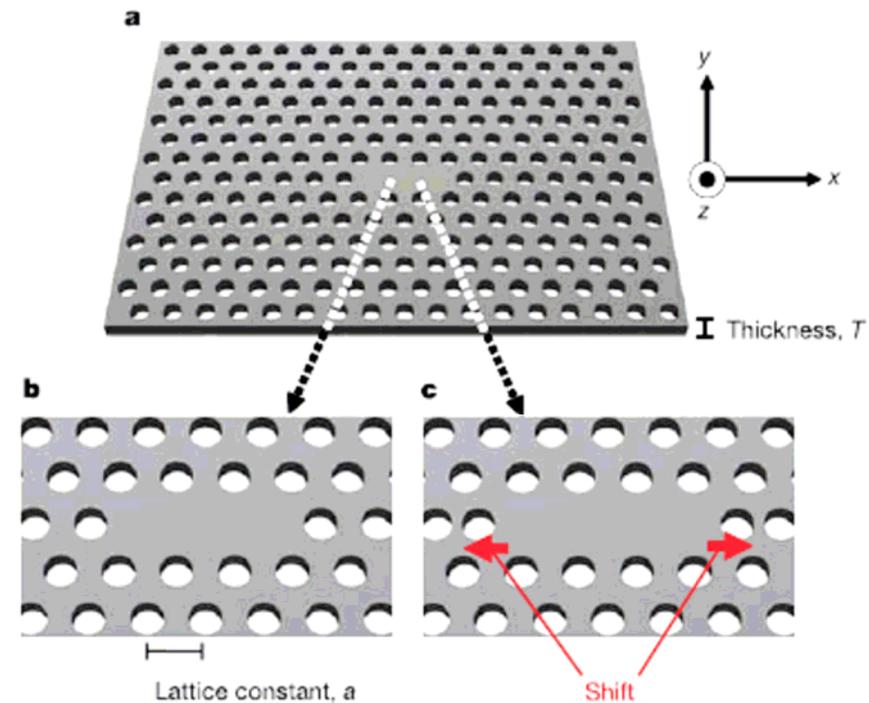


## Makroporen



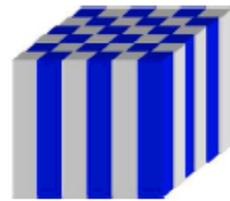
Bildquelle: Gösele; Max-Plank-Institut; Halle

## Membrane



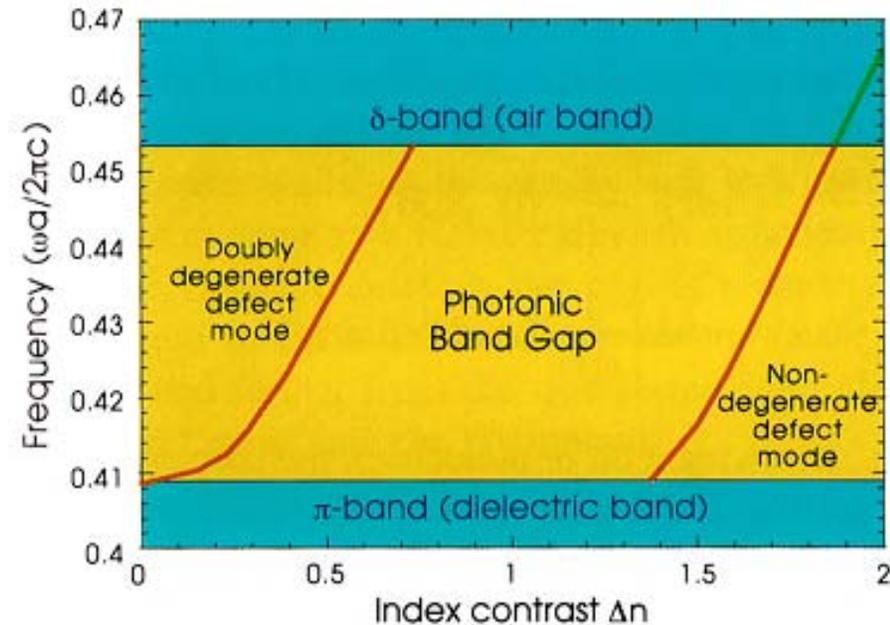
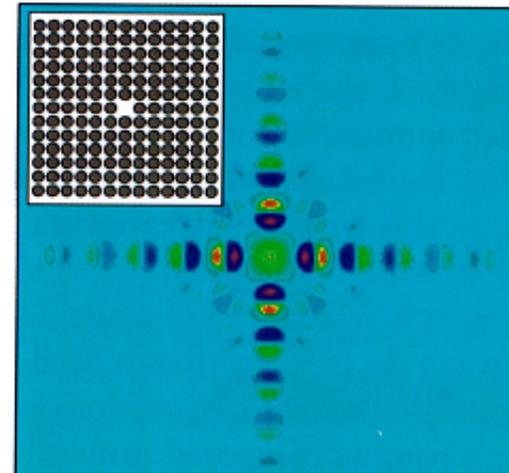
Bildquelle: Akahane/Asano/Song/Noda  
(Nature Vol.425;2003)

# Defekte in 2-D-Kristallen

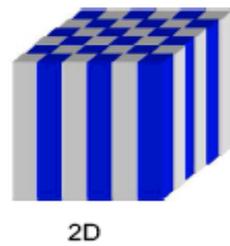


2D

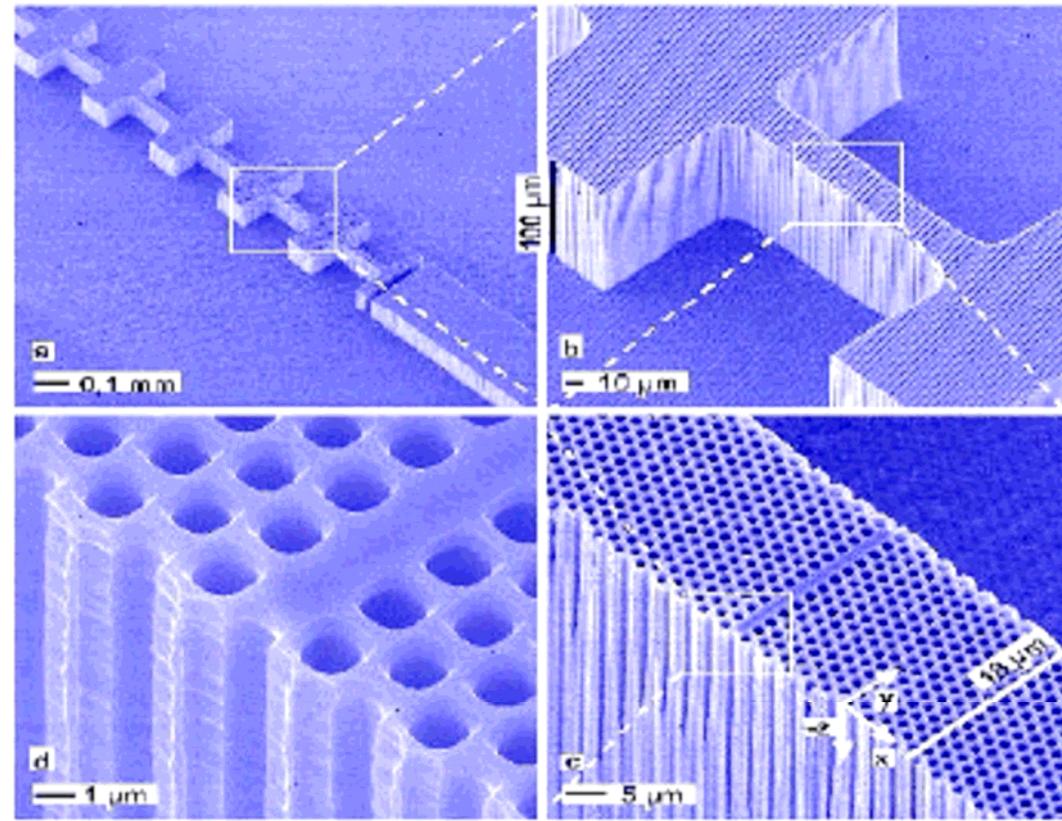
- Defekte: Schicht, Reihe
- führen zu erlaubtem Zustand in der Bandlücke
- Reflektoren/Resonatoren
- Lichtleiter



# Wellenleiter mit Ein/Auskopplung



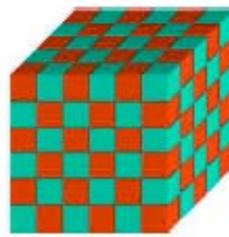
- Polarisation parallel zu den Poren fixiert
- Aspektverhältnis =Tiefe/a =200:1
- Photoelektronisches Aufwachsen von Makroporen in Si
- für Wellenl. 1.3-1.5 $\mu\text{m}$  erreicht
- hexagonales Gitter mit  $r_{\text{Pore}} > 0.4a$



Defekt, Faseranschluss

Bildquelle: Gösele; Max-Plank-Institut; Hälfe

# Übersicht 3D-Kristalle

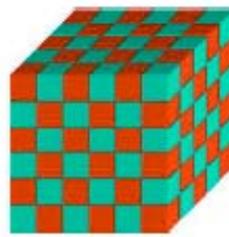


3D

Struktur	Bandlücke	Frequenzb.
Invertierte Opale `97	6%	NIR/VIS
Yablonovite `91	19%	GHz
Holzstapel `98	26%	IR
Spiralstrukturen `01	15%-24%	NIR
Diamant `99/ `02	27%-29%	NIR/VIS

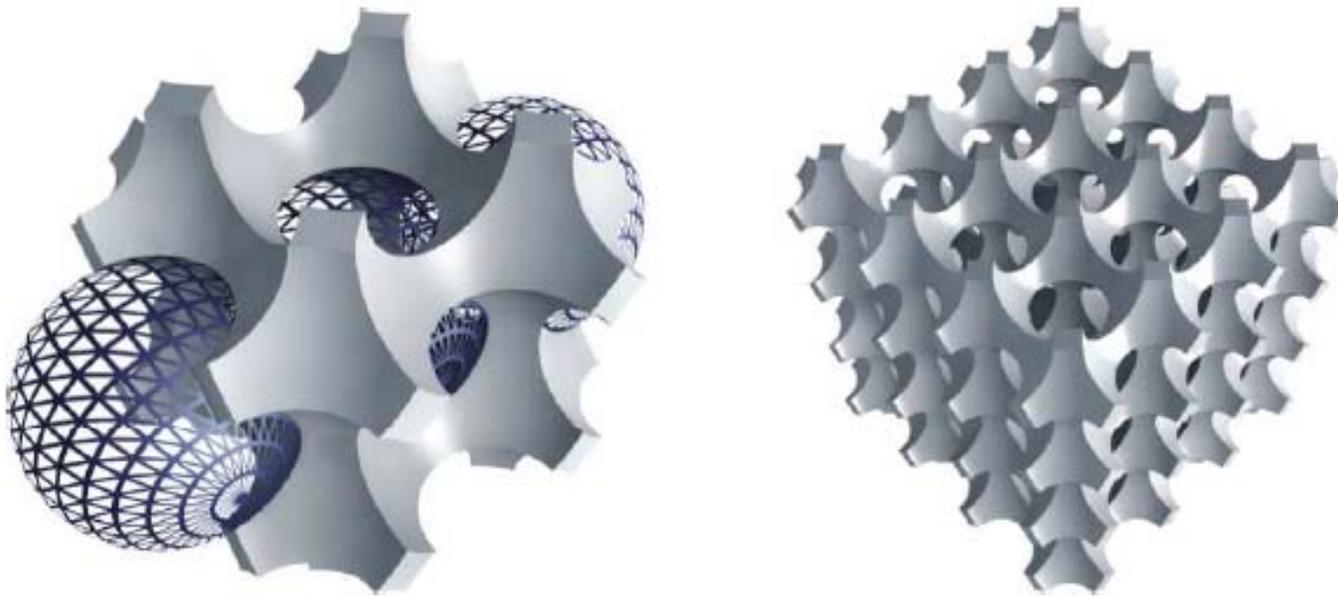
Quelle: Dissertation von Sven Matthias (2005)

# Invertierte Opale

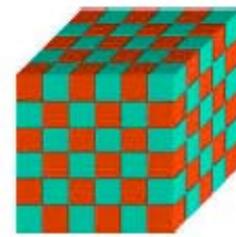


3D

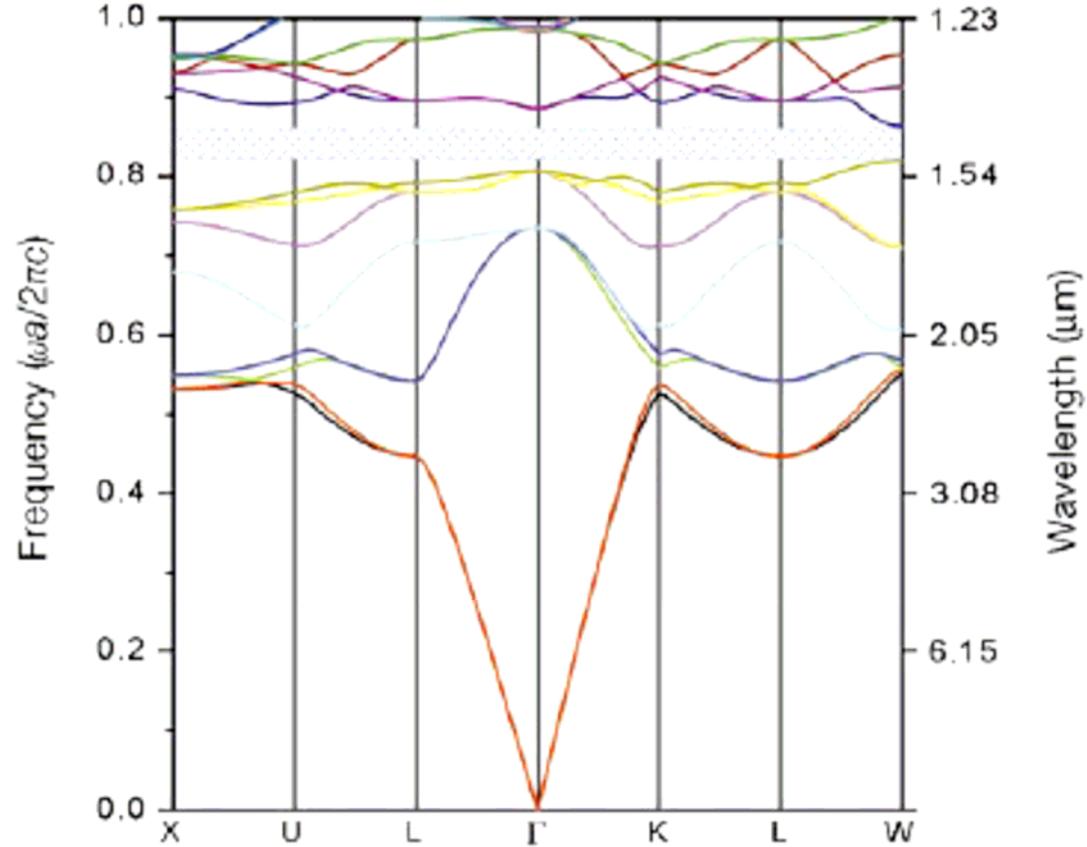
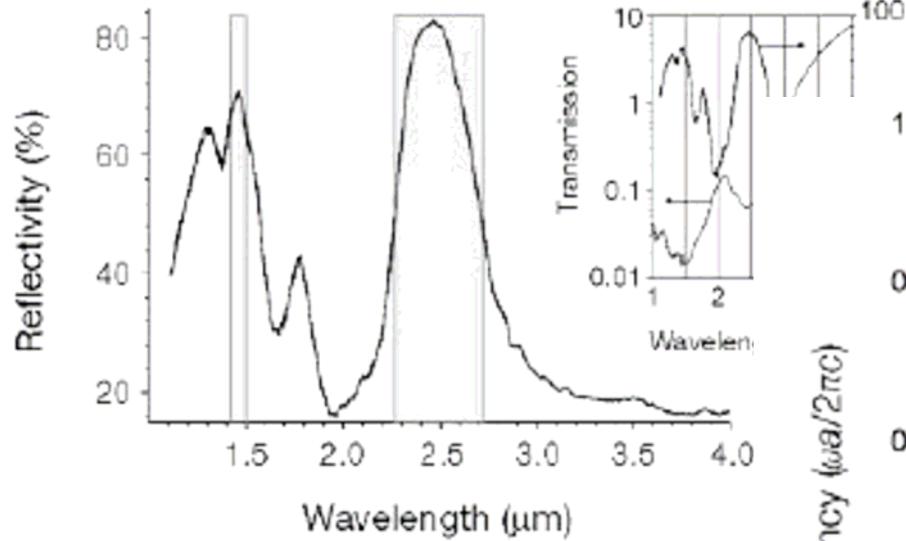
- Selbstorganisation: Glas oder Polymerkugeln in Lösung, Austrocknung, Füllung der Hohlräume, Kugeln mit Lösemittel entfernen, gap: 6%
- kein Einarbeiten von gezielten Defekten möglich



# Invertierte Opale



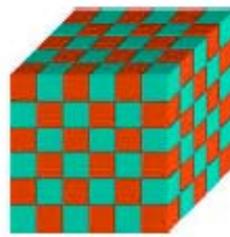
3D



Bildquelle.:Blanco u.a.(Nature Vol.405 ;2000)

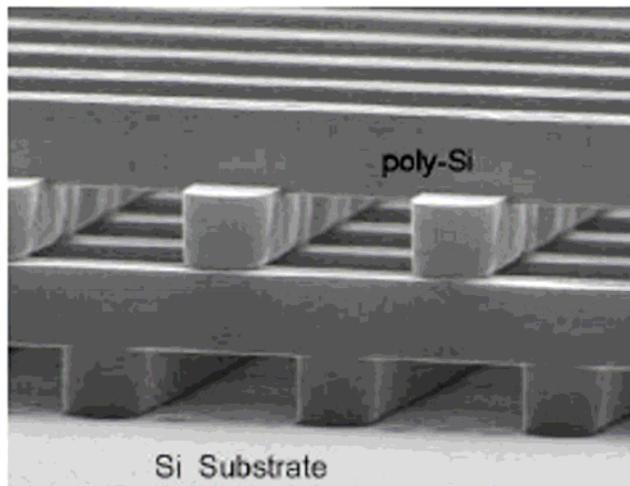


# Woodpile-Struktur



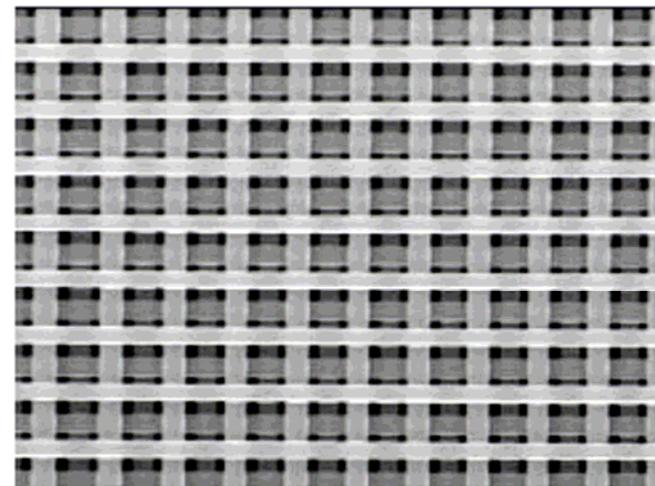
3D

- 4 Lagen von Stegen ergeben eine Einheitszelle
- Herstellung aufwendig: Lithographie u. Trockenätzen  
⇒ Siliziumdioxid aufdampfen u. polieren etc.  
schwierige Justage der Lithomaske
- gezielter Einbau von Defekten möglich



a

5.4 μm

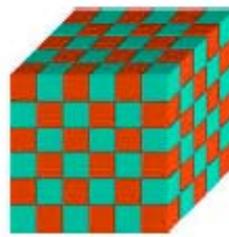


b

10.8 μm

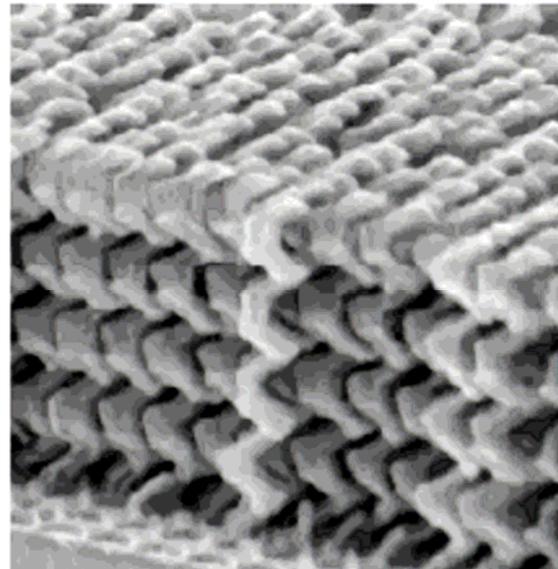
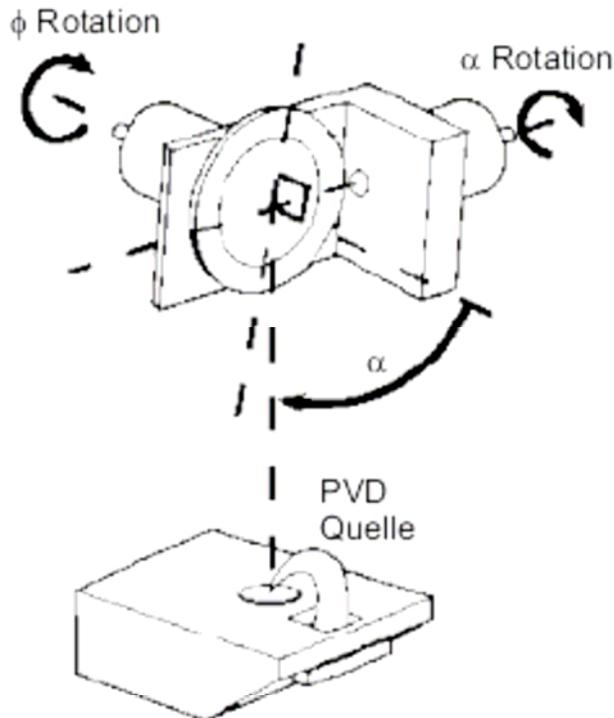
Bildquelle: Dissertation von Sven Matthias (2005)

# Spiralstruktur



3D

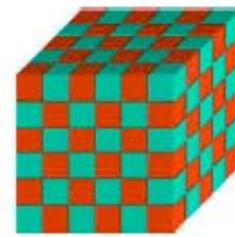
- Tetragonale Struktur
- Gitter mit kleinen Erhebungen wird mit Materiestrahl gestreift  $\Rightarrow$  gerichtete Abscheidung bei Drehung um 2 Winkel (glancing-angle-deposition)



1  $\mu$ m

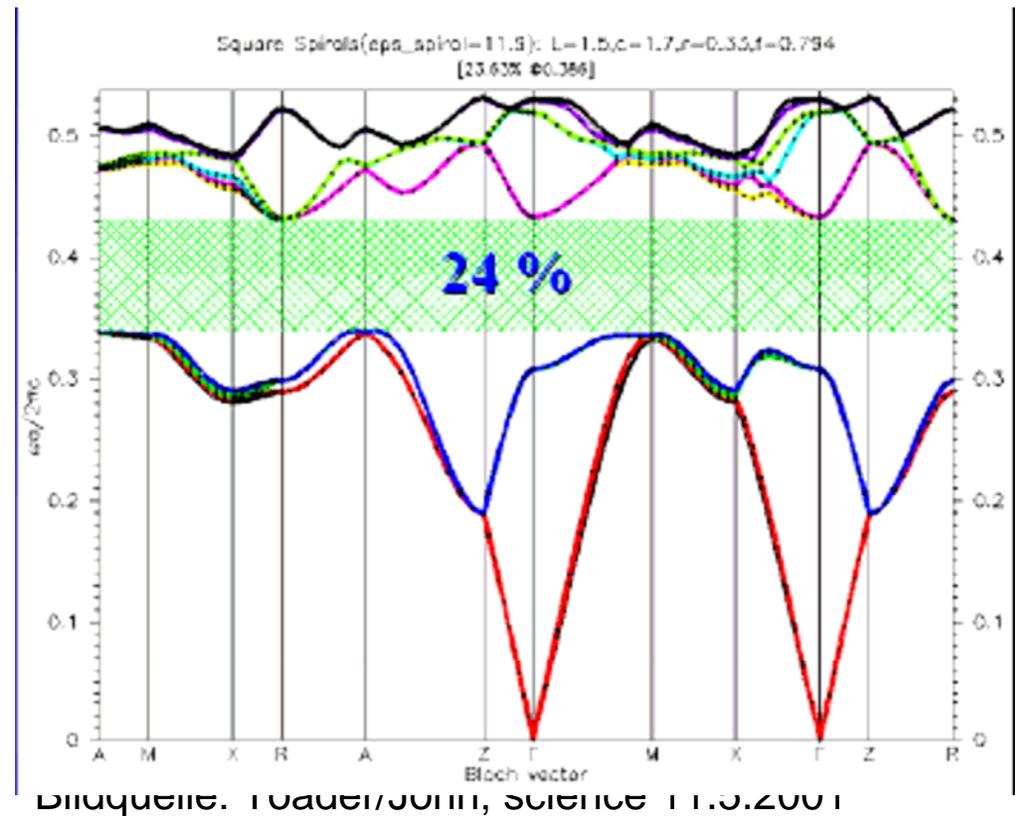
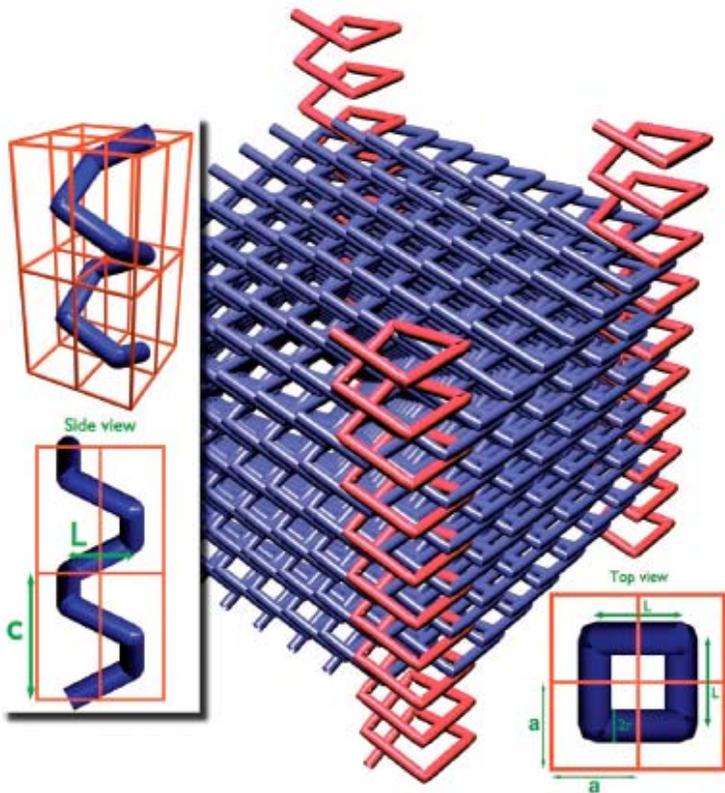
Bildquelle: Dissertation  
von Sven Matthias  
(2005)

# Spiralstruktur

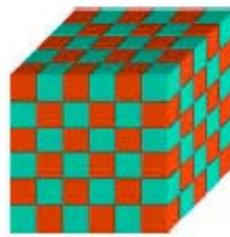


3D

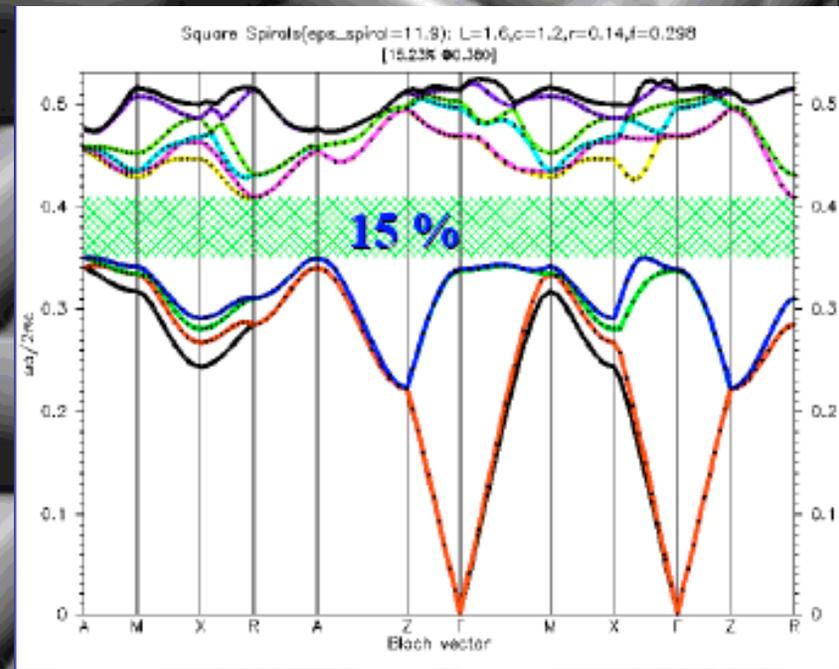
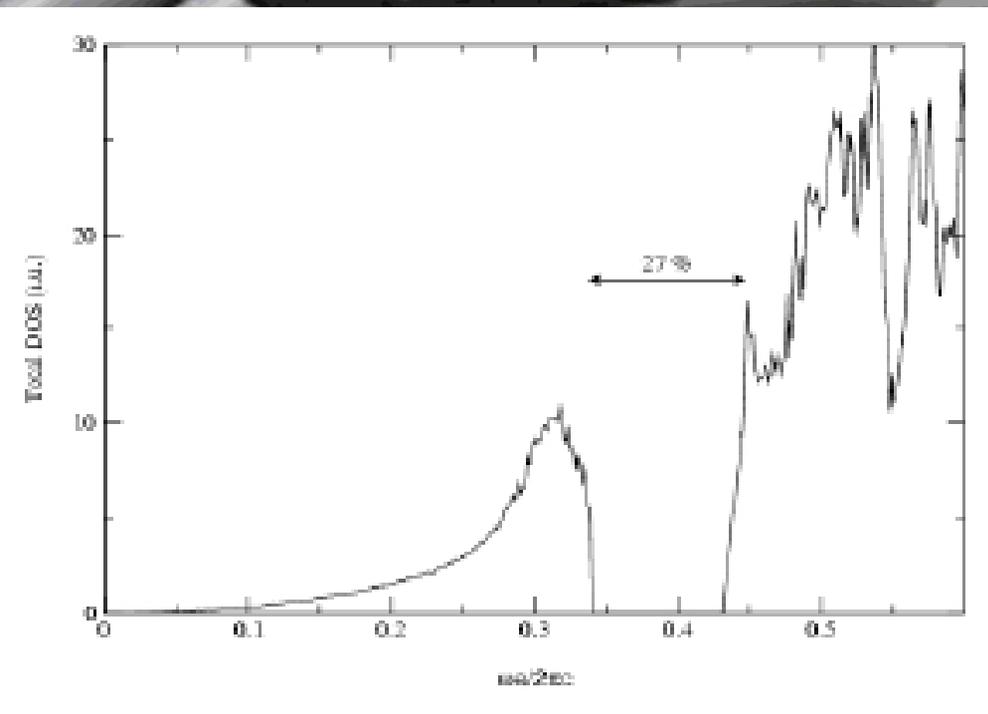
- große Bandlücke aber bisher nur wenige Gitterkonstanten realisiert
- Invertierte Struktur hat größere Bandlücke



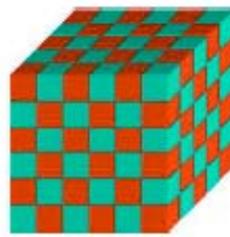
# DOS und Pseudogap



Nicht invertierte Struktur

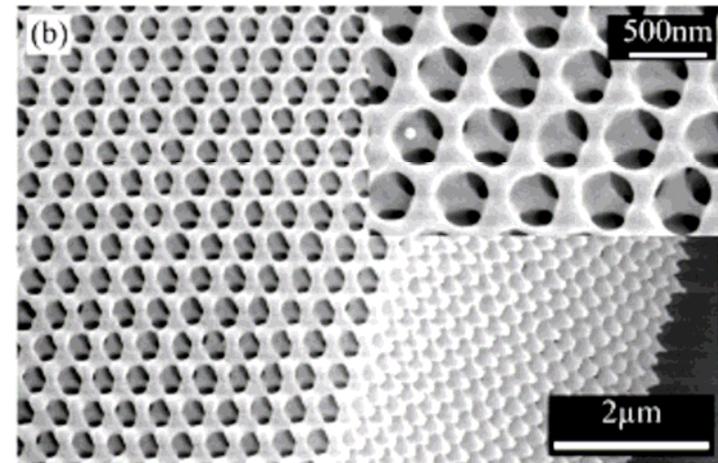
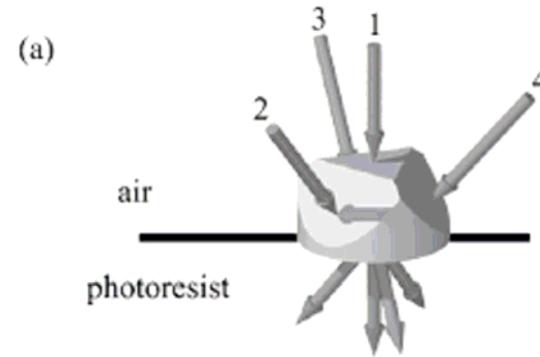
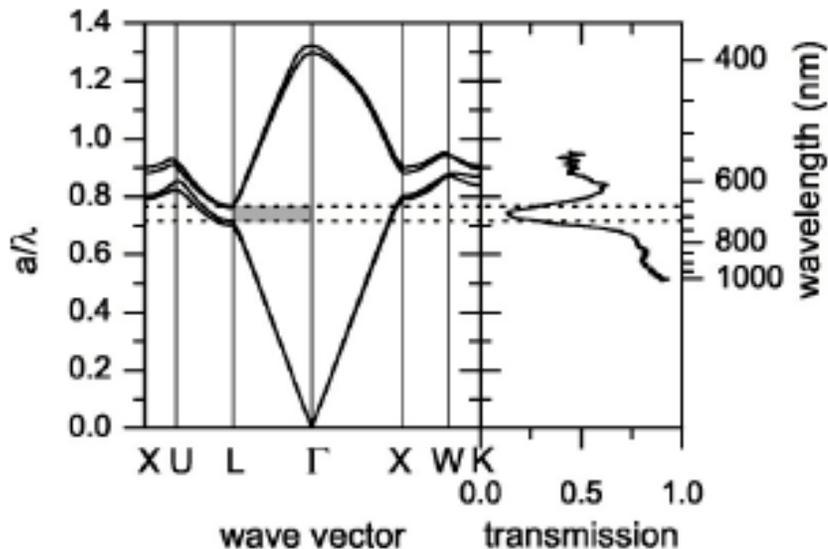


# Interferenzlithographie und direktes Laserschreiben



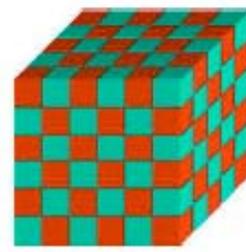
3D

- Auflösung: 100-200nm
- Schwierigkeiten durch Schrumpfung, Laserprofil



# Zusammenfassung

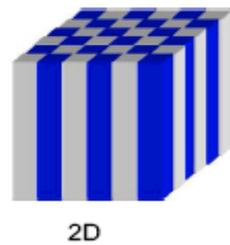
## Produktionsschwierigkeiten



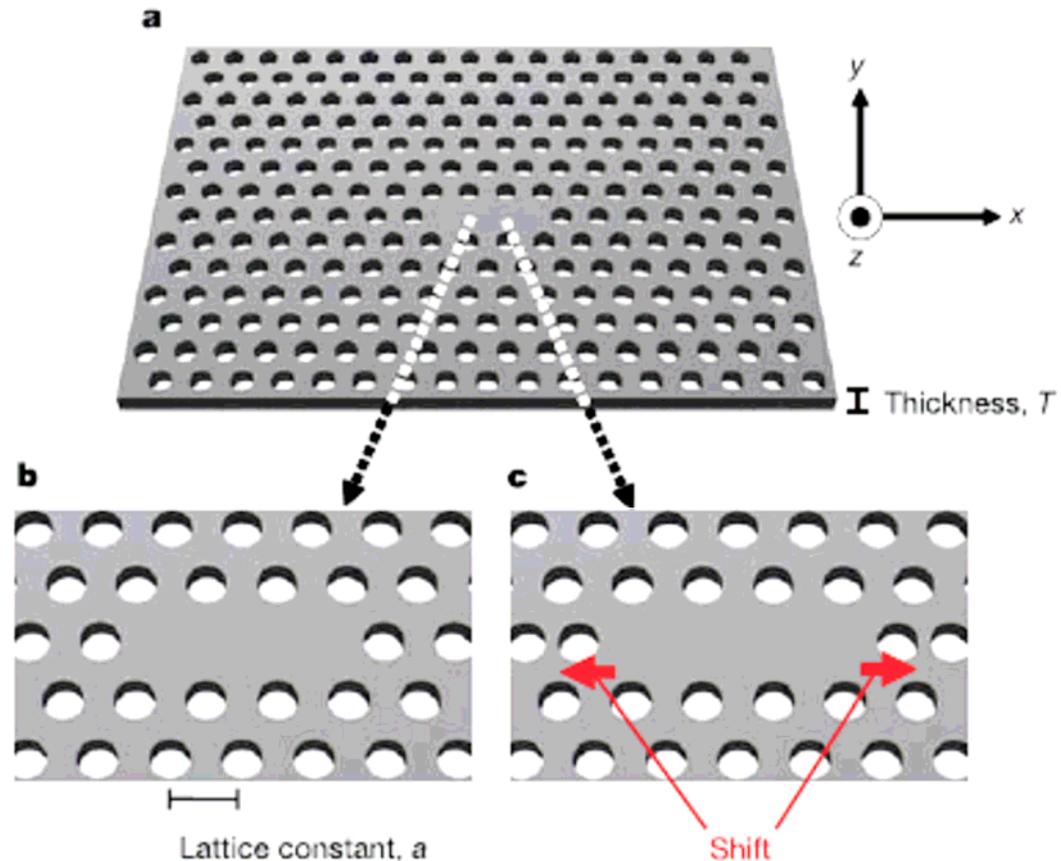
3D

- Große Materialreinheit (Si, Ge, GaAs, InP)
- Genauigkeit der Positionierung/Größe
- Dauer der Fertigung
- Einbringen von gezielten Defekten
- ausgereifte Techniken aus der HL Industrie für 2D-Strukturen vorhanden 
- Quasi-3D-Kristalle: Membrane, die Totalreflexion an der Oberfläche ausnutzen

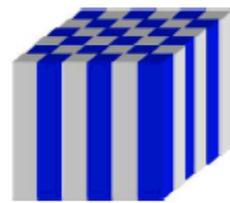
# Membranstrukturen



- Lichtausbreitung in 3D eingeschränkt außer bei internen Emittern
- Aspektverhältnis: 5:1
- Herstellung mit Plasmaätzen oder Elektronenstrahl-lithographie

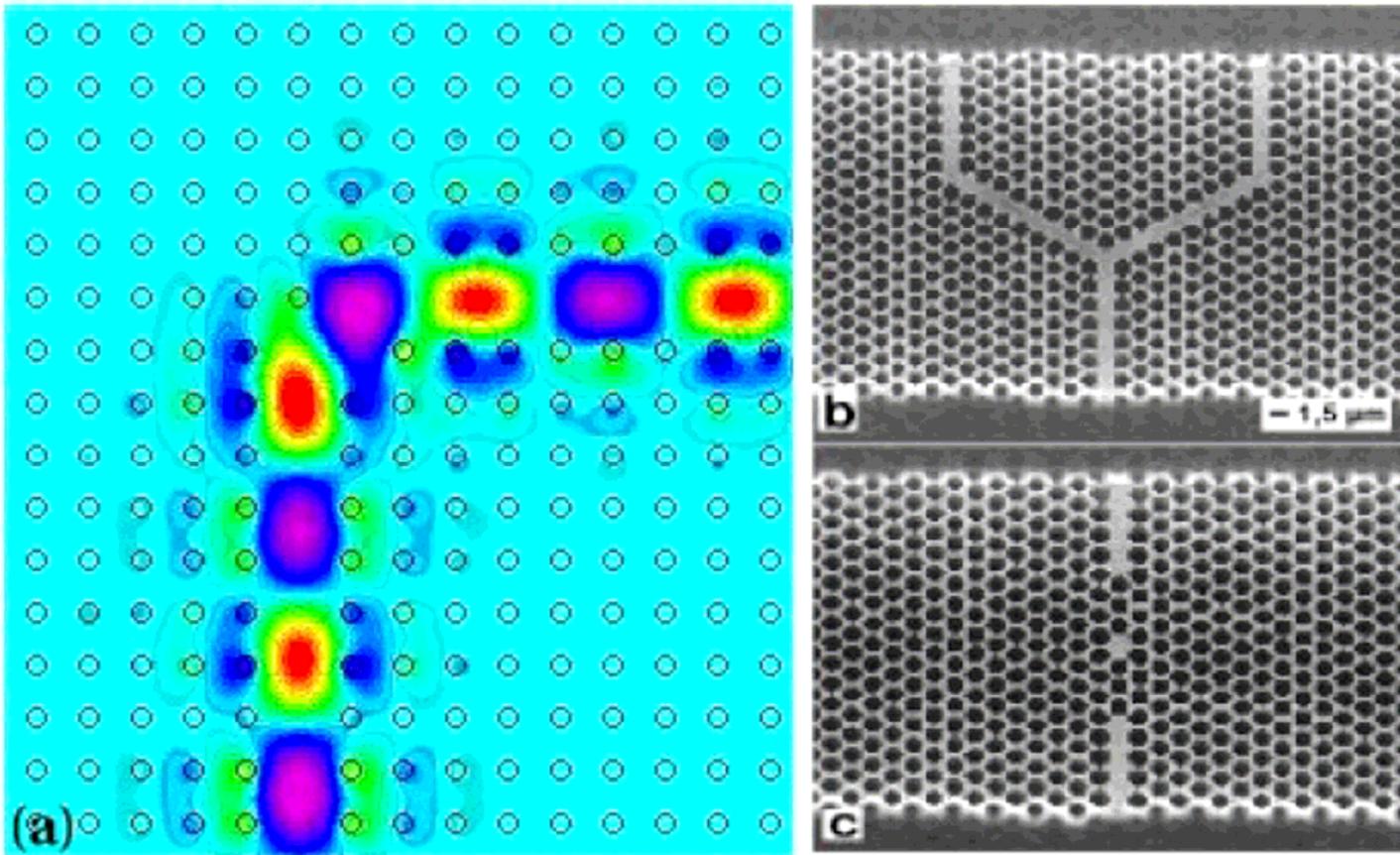


# Wellenleiter/Wellenteiler

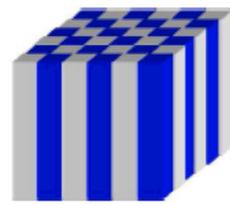


2D

optisches Interferometer, Bragg-Spiegel mit Resonator­kavitat



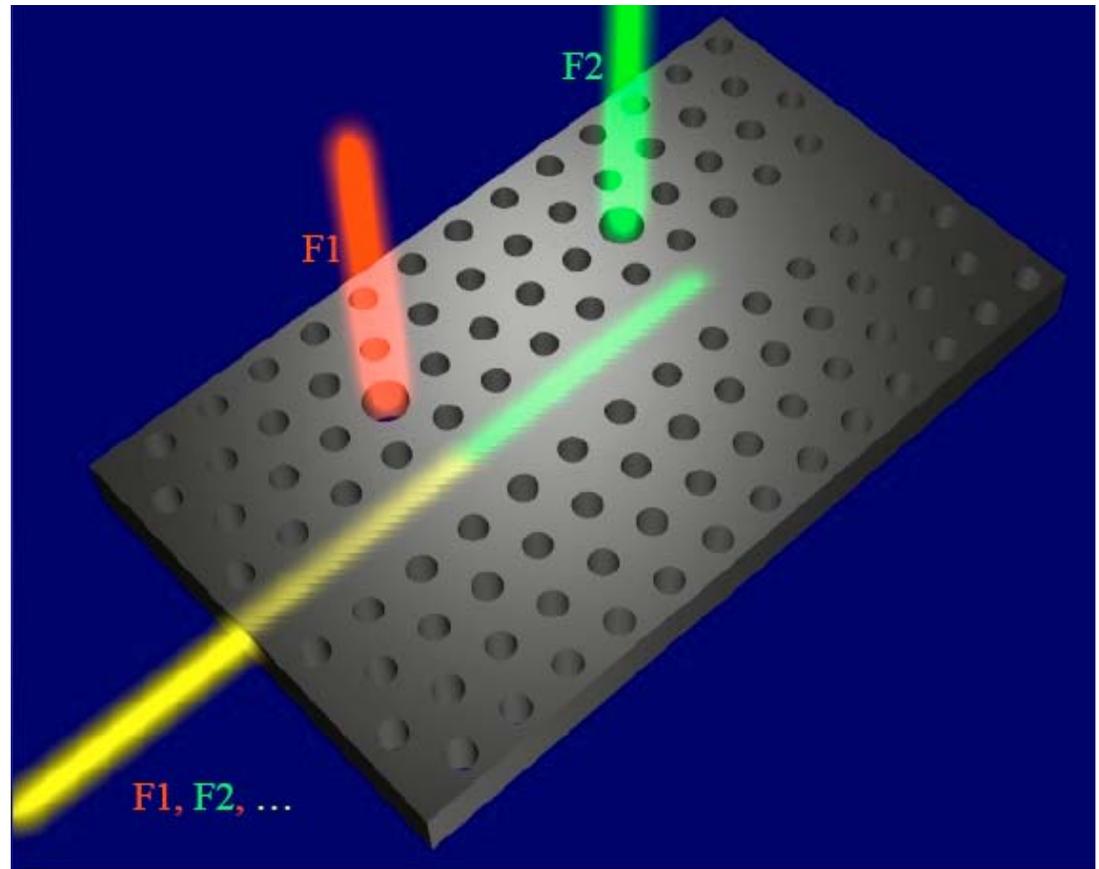
Bildquelle: a) Joannopoulos; MIT; b)+c) Max-Plank-Institut; Halle



2D

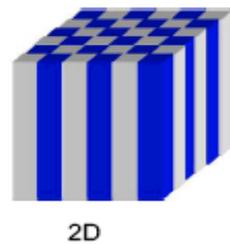
# Add-Drop-Filter

- Für WDM (wavelength division multiplexed) communication
- F1, F2 liegen im PBG
- Löcher anderer Dim. können als Resonator dienen und eine bestimmte Frequenz isolieren

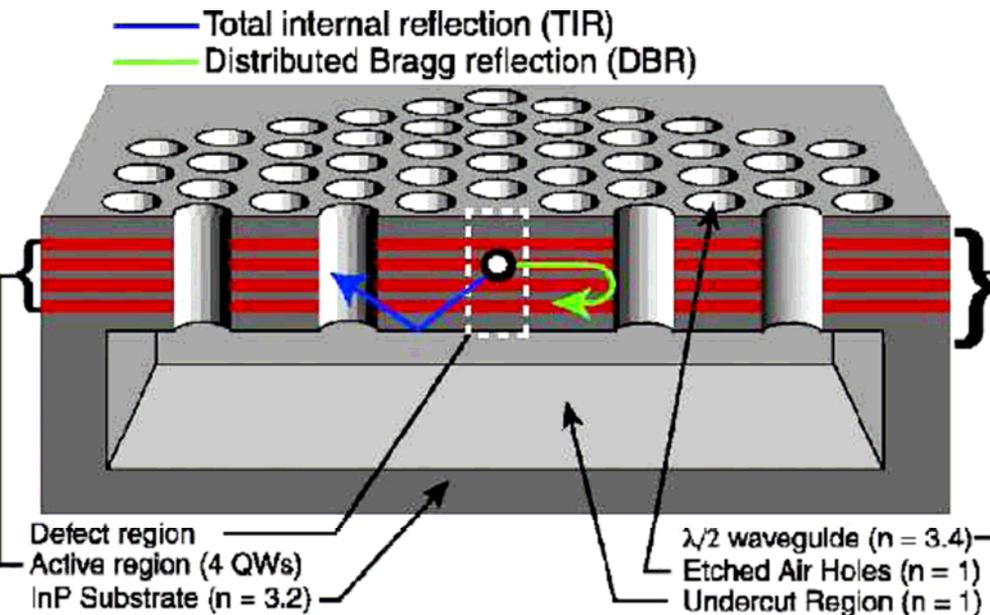


Bildquelle: John/Toader/Busch

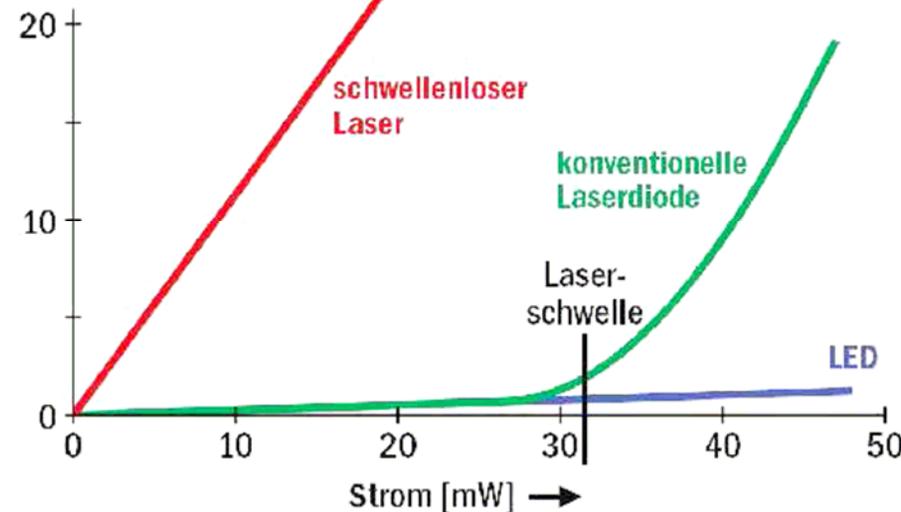
# PCD - LASER: (Photonic Crystal Defect)



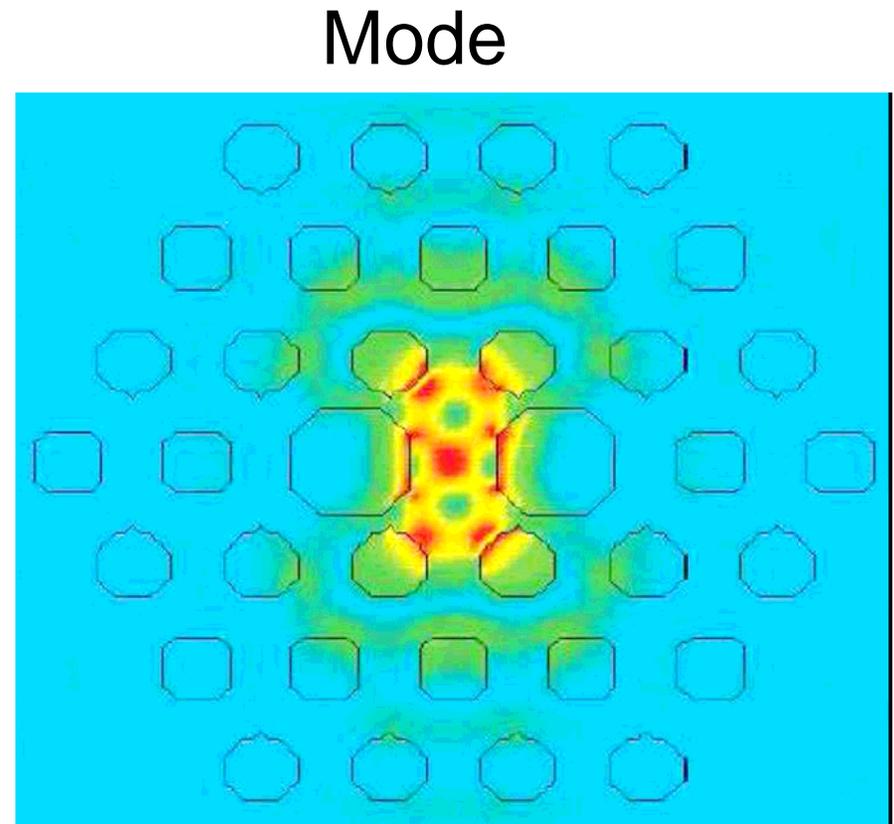
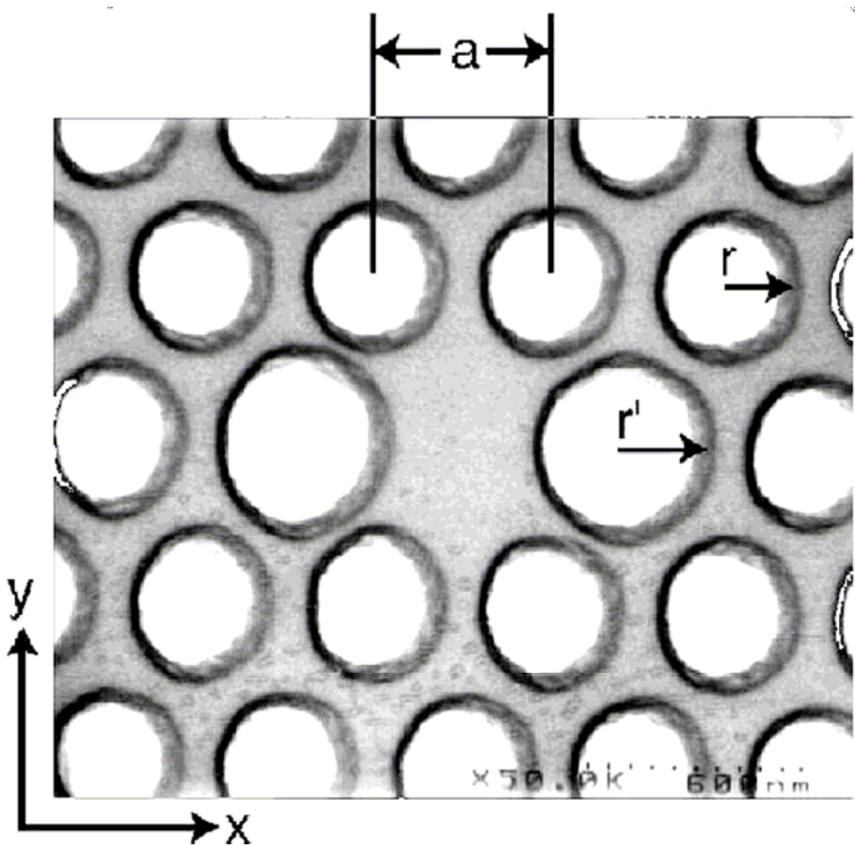
- Dielektrikum ist VCSEL-gepumpter HL
- Störstelle ist Resonator für Mode des HL-Übergangs



## low-threshold-LASER



# PCD - LASER: (Photonic Crystal Defect)



# Quellen/Literatur

- Photonic Crystals (Joannopoulos/Meade/Winn 1995)
- Joannopoulos; MIT
- Dissertation von Sven Matthias (2005)
- Gösele; Max-Planck-Institut Halle
- Blanco u.a.(Nature Vol.405; 2000)
- Toader/John (Science; 11.5.2001)
- Miklyaev (Appl.Phys.Lett. Vol.82; 2003)
- Akahane/Asano/Song/Noda (Nature Vol.425; 2003)
- Moritz Bommer; Uni Stuttgart (Seminar 2005)