

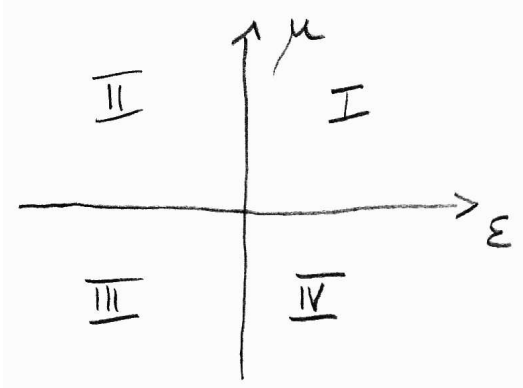
Wiederholung vom 18.11.2004

Negativer Brechungsindex (Veselago 1964)

Wellengleichung in Materie: $\Delta \vec{E} = \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$

Normalfall

$$\varepsilon > 0, \mu > 0$$



interessanter Fall: $\varepsilon < 0, \mu < 0 \Rightarrow$ negativer Brechungsindex

$$n = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\mu} = i\sqrt{|\varepsilon|} \cdot i\sqrt{|\mu|} = -\sqrt{|\varepsilon||\mu|}$$

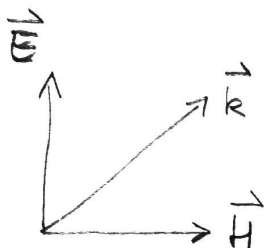
$n^2 > 0 \Rightarrow$ normale Wellenpropagation, ebene Wellen

Eigenschaften von Ebenen Wellen in einem Medium mit negativem Brechungsindex im Vergleich:

$$\varepsilon > 0, \mu > 0$$

$$\vec{k} \times \vec{E} = +\frac{\omega}{c} |\mu| \vec{H}$$

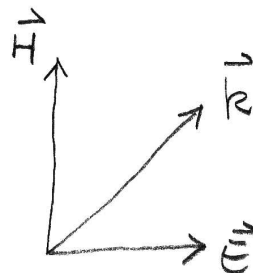
$$\vec{k} \times \vec{H} = -\frac{\omega}{c} |\varepsilon| \vec{E}$$



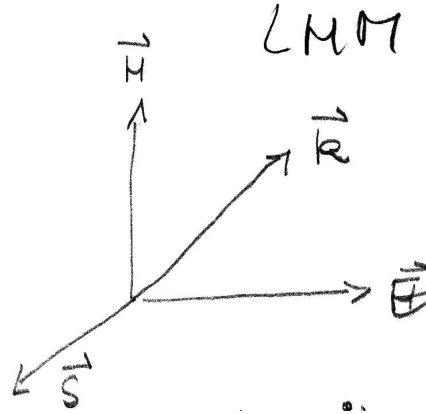
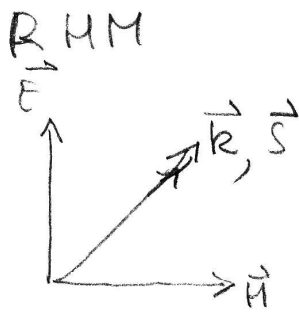
$$\varepsilon < 0, \mu < 0$$

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\frac{\omega}{c} |\mu| \vec{H}$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = +\frac{\omega}{c} |\varepsilon| \vec{E}$$



Energiefluss entgegengesetzt der Ausbreitungsrichtung



Interessante Eigenschaft bei der Brechung:

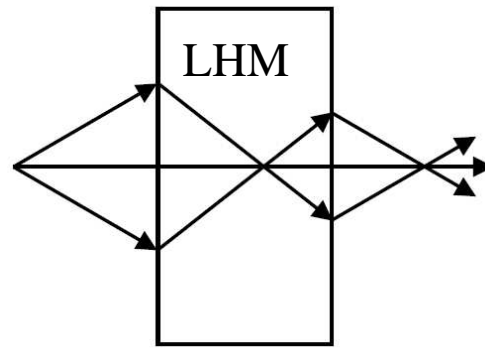
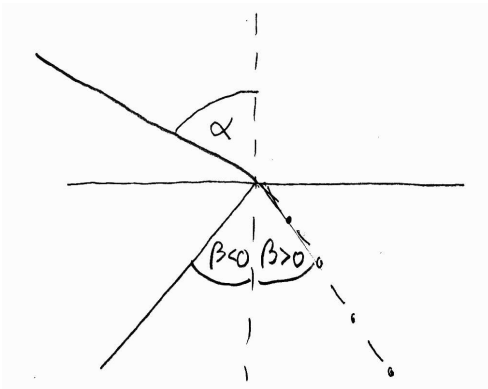


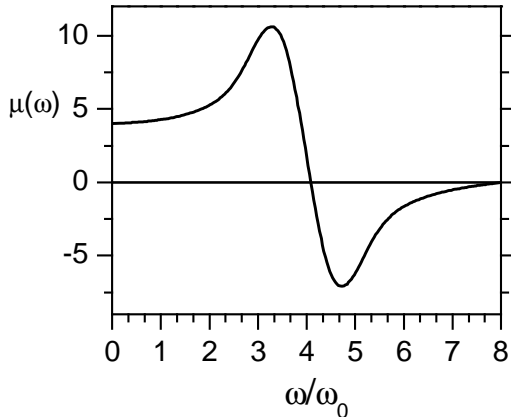
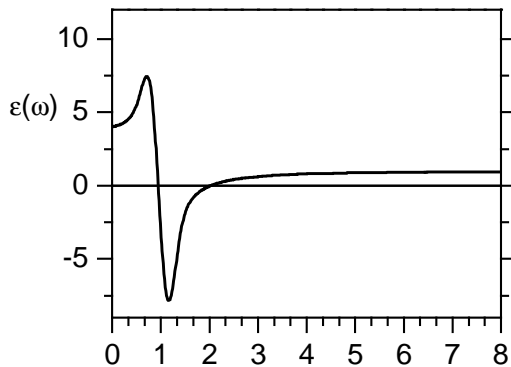
FIG. 1. A negative refractive index medium bends light to a negative angle with the surface normal. Light formerly diverging from a point source is set in reverse and converges back to a point. Released from the medium the light reaches a focus for a second time.

Wie realisiert man einen negativen Brechungsindex (kein natürliches Material vorhanden)

Idee: Resonanzabsorption für magnetisches Feld analog zu elektrischem Feld

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^{E^2} - \omega_o^{E^2}}{\omega^2 - \omega_o^{E^2} + i\gamma\omega}$$

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^{H^2} - \omega_o^{H^2}}{\omega^2 - \omega_o^{H^2} + i\gamma\omega}$$



Material konstruieren, bei dem die Resonanzfrequenzen übereinstimmen

$$\Rightarrow \epsilon < 0, \mu < 0$$

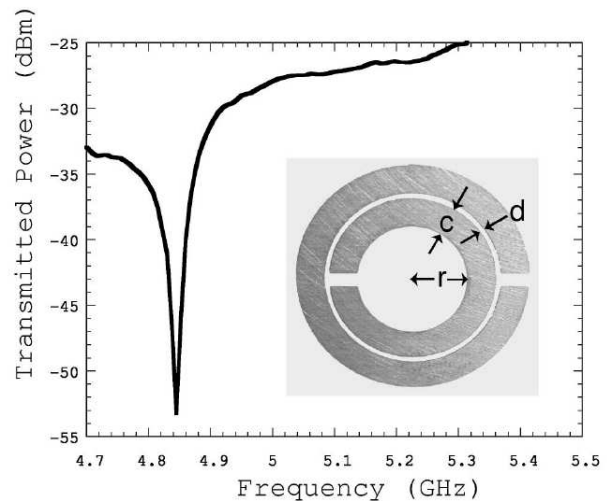
split-ring Resonatoren:

$$c = 0,8 \text{ mm}$$

$$d = 0,2 \text{ mm}$$

$$r = 1,5 \text{ mm}$$

Resonanz im Mikrowellenbereich



„Metamaterial“

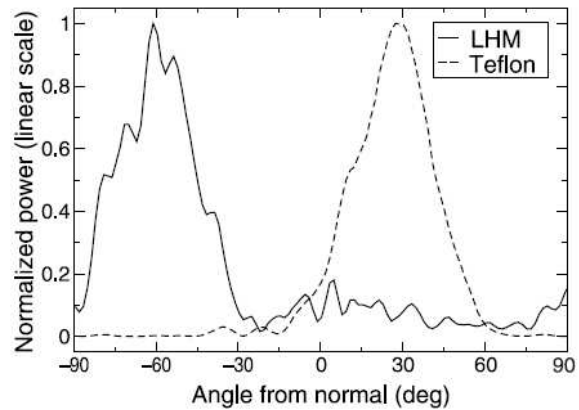
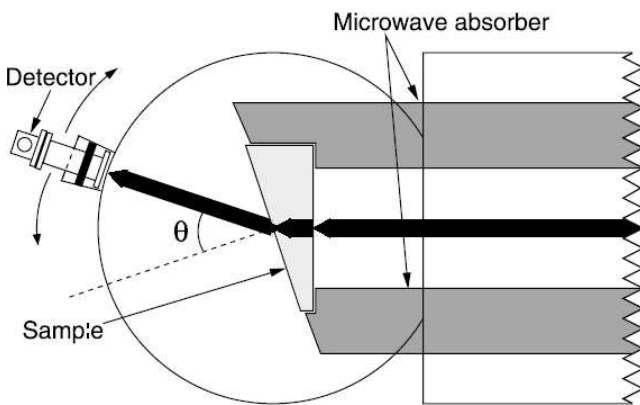


Experimental Verification of a Negative Index of Refraction

R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz

SCIENCE VOL 292 6 APRIL 2001

77



Alternative Realisierung: „Photonische Kristalle“

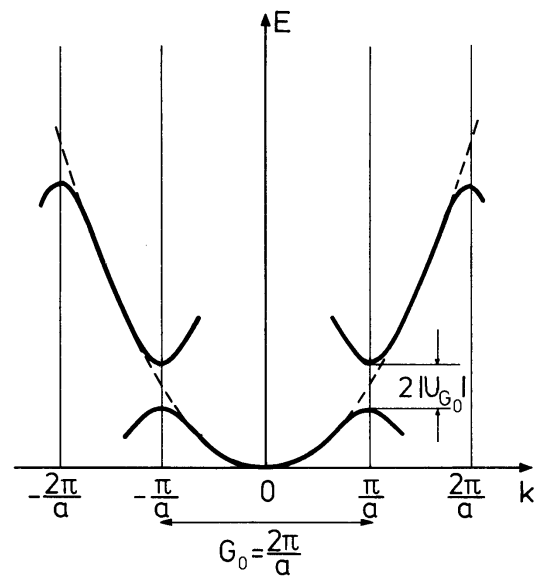
Idee: Wellenausbreitung in periodischen Strukturen

Freie Elektronenparabel $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$

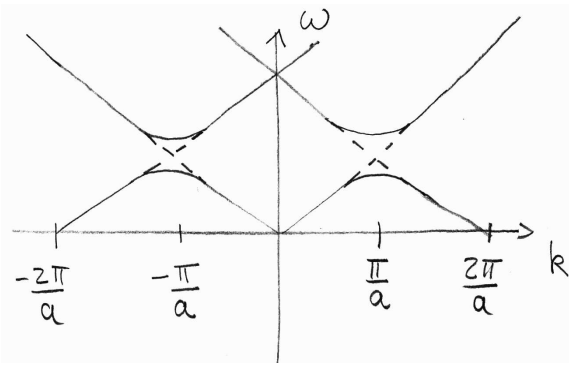
wird modifiziert - schon lange bekannt aus der Festkörperphysik: Elektronenwellen im periodischen Potential eines Kristalls (Gitterperiode a)

- Öffnen einer Bandlücke,

- Bereiche mit $\frac{dE}{dk} < 0$



Analog bei elektromagnetischen Wellen:



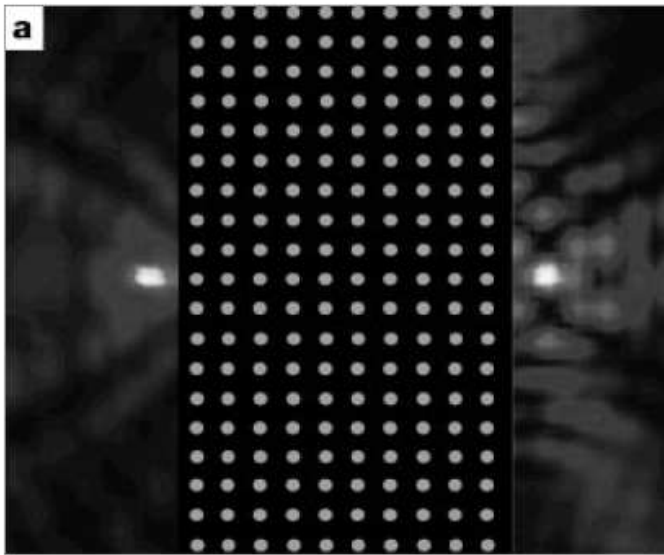
Material mit periodisch moduliertem Brechungsindex
 Modifikation der Dispersionsrelation (im Vakuum $\omega = ck$)

Bereiche mit $\frac{d\omega}{dk} < 0$, d.h.

Gruppengeschwindigkeit

entgegengesetzt zu k , linkshändiges Medium.

Nachweis der Punktabbildung durch eine „parallele Platte“:



Photonic crystals

Imaging by flat lens using negative refraction

Patanjali V. Parimi, Wentao T. Lu, Plarenta Vodo, Srinivas Sridhar

NATURE | VOL 426 | 27 NOVEMBER 2003 |

404

Photonische Kristalle in zwei und drei Dimensionen:

2D-PhC

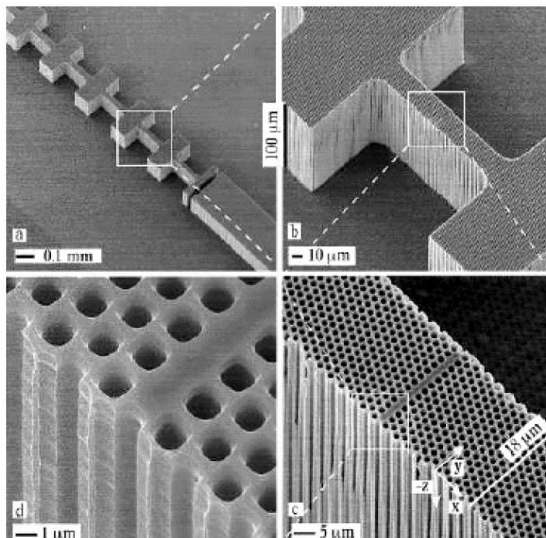


Fig. 18: Makroporöses Silizium; Bandlücke bei 3 - 4,5µm (nahes IR)

3D-PhC

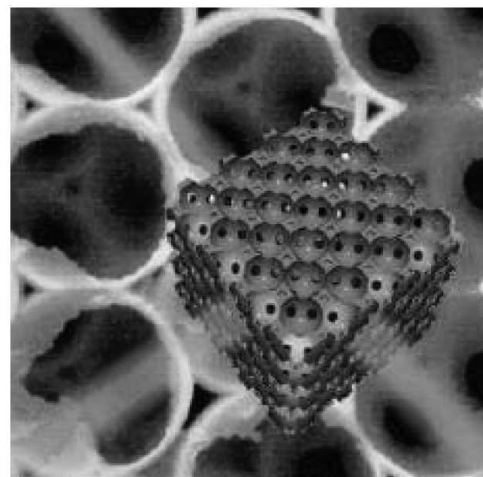


Fig. 19: sog. Invertierter Opal aus Silizium mit 'leeren' kugelförmigen Zwischenräumen Bandlücke bei 1,4 - 1,5 µm