

Cloaking – Kann man sich wirklich unsichtbar machen?

Volker Perlick (ZARM, Universität Bremen)



Bremen, Physikalisches Kolloquium, 16. Mai 2013

1. Was heisst “Cloaking” ?

Welche prinzipiellen Möglichkeiten gibt es?

2. Maxwell'sche Gleichungen in Materie Metamaterialien

3. Cloaking mit Metamaterialien Stand der Forschung und Ausblick

Literatur:

Homepage von Ulf Leonhardt (St. Andrews University):

<http://www.st-andrews.ac.uk/~ulf/>

U. Leonhardt, D. R. Smith (eds): “Focus on Cloaking and Transformation Optics” *New Journal of Physics* 10, 115019(2008)

1. Was heisst "Cloaking" ?

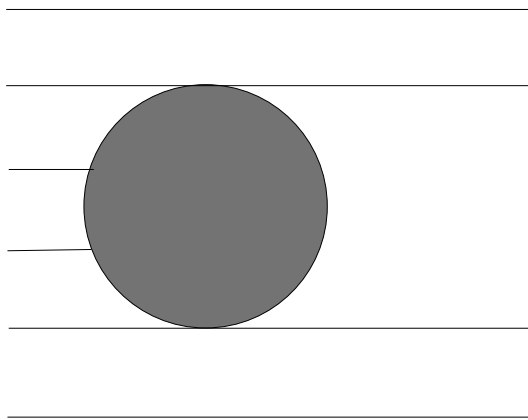


Stealth Plane F-117 Nighthawk
(Tarnkappenflugzeug)

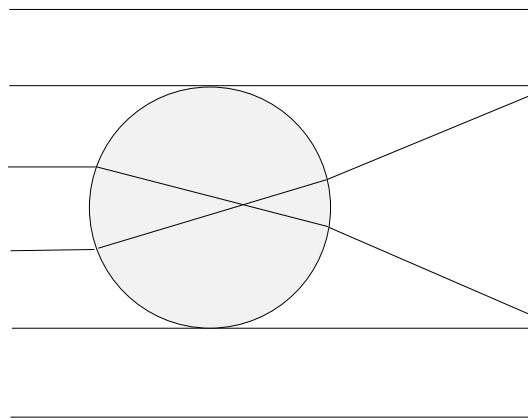
Das ist kein Cloaking!

"A stealth plane is black ... , not invisible." (Ulf Leonhardt)

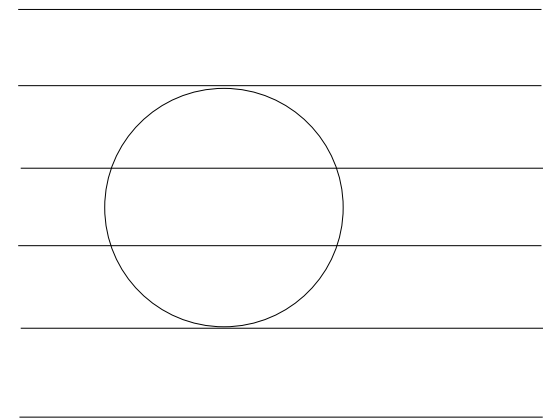
“Unsichtbar” ist ein Objekt, wenn Lichtstrahlen ungestört hindurch gehen:



Holzkuugel



Glaskugel

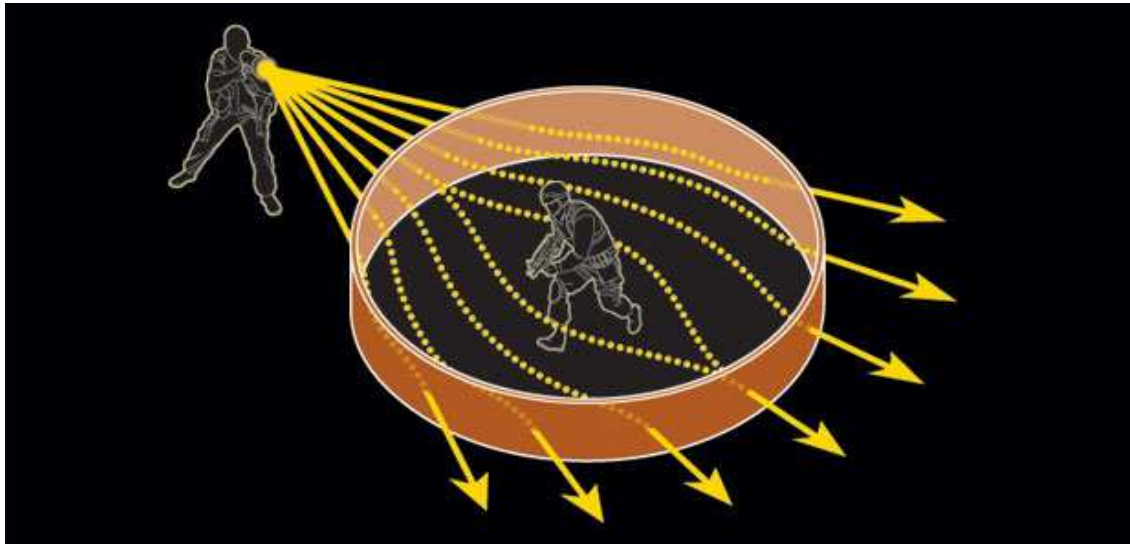


unsichtbare Kugel

Eine (theoretische) Möglichkeit, Dinge unsichtbar zu machen: Der Brechungsindex des Objekts muss gleich dem Brechungsindex von Luft werden.

Prinzip vom “Invisible Man” (H. G. Wells, 1897)

Lichtstrahlen müssen nicht wirklich ungestört durch das Objekt hindurch gehen.
Es muss für den Beobachter nur dieser Eindruck entstehen.



“Cloak” lenkt Licht um das Objekt herum.

(Abbildung aus “Discover”, The Magazine of Science,
Technology, and the Future, July/August 2012)

2. Maxwell'sche Gleichungen in Materie

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} &= \vec{0} & \nabla \times \vec{H} - \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} &= \vec{J} \end{aligned}$$

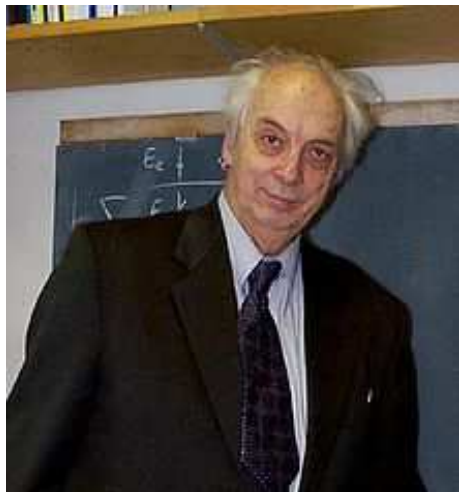
	traditioneller Name	Name nach Mie und Sommerfeld
\vec{E}	elektrische Feldstärke	elektrische Feldstärke
\vec{B}	magnetische Induktion	magnetische Feldstärke
\vec{D}	elektrische Verschiebung	elektrische Erregung
\vec{H}	magnetische Feldstärke	magnetische Erregung

Lineares, isotropes und homogenes Medium:

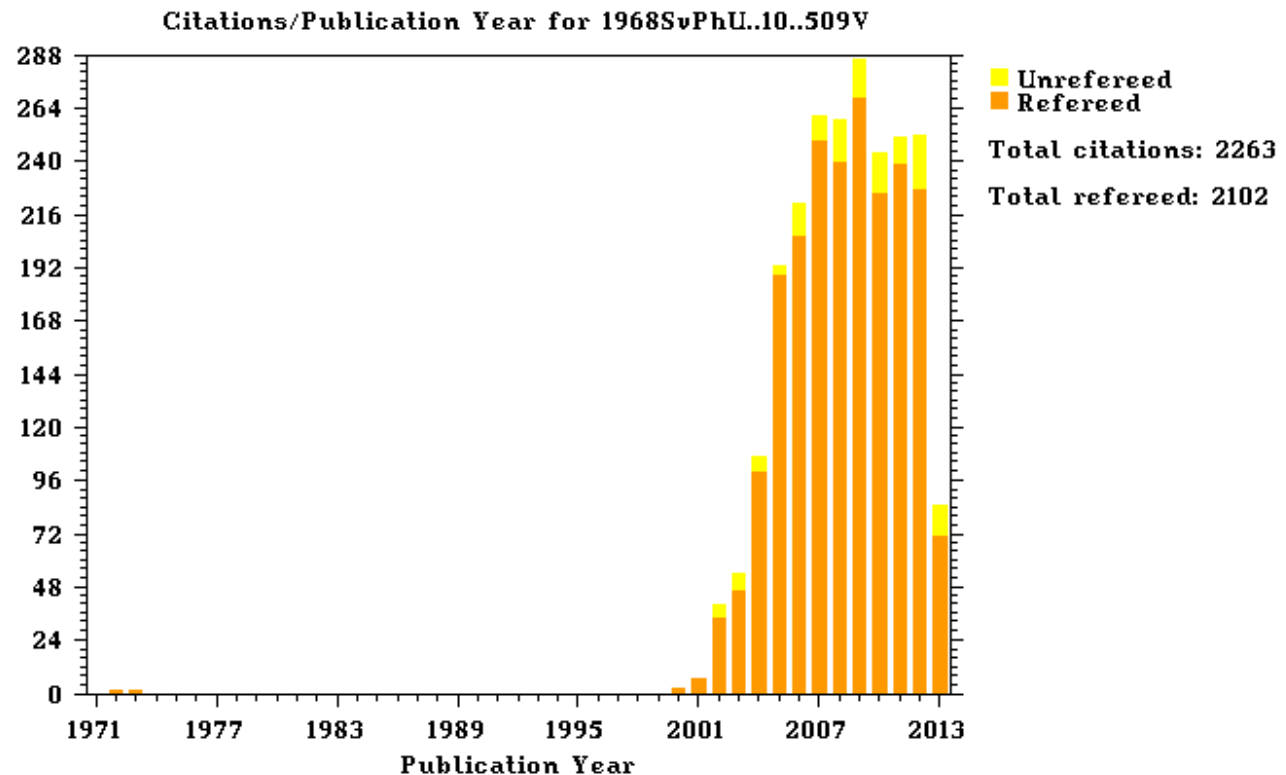
$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon \vec{E}(\vec{r}, t), \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu \vec{H}(\vec{r}, t)$$

Kann ε oder μ auch negativ sein?

V. G. Veselago: "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ ", Sov. Phys. Usp. 10, 509 (1967/68)



Viktor G. Veselago
(*1929)



Maxwellsche Gleichungen ohne Quellen:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \cdot \vec{D} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} &= \vec{0} & \nabla \times \vec{H} - \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} &= \vec{0}\end{aligned}$$

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon \vec{E}(\vec{r}, t), \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu \vec{H}(\vec{r}, t)$$

$$\Delta \vec{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = \vec{0}, \quad \Delta \vec{B} - \epsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} = \vec{0}$$

Maxwellsche Gleichungen ohne Quellen:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \cdot \vec{D} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} &= \vec{0} & \nabla \times \vec{H} - \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} &= \vec{0}\end{aligned}$$

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon \vec{E}(\vec{r}, t), \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu \vec{H}(\vec{r}, t)$$

$$\Delta \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = \vec{0}, \quad \Delta \vec{B} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} = \vec{0}$$

Existieren wellenförmige Lösungen, d.h., Lösungen der Form $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$ und $\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$ mit reellem ω und reellem \vec{k} ?

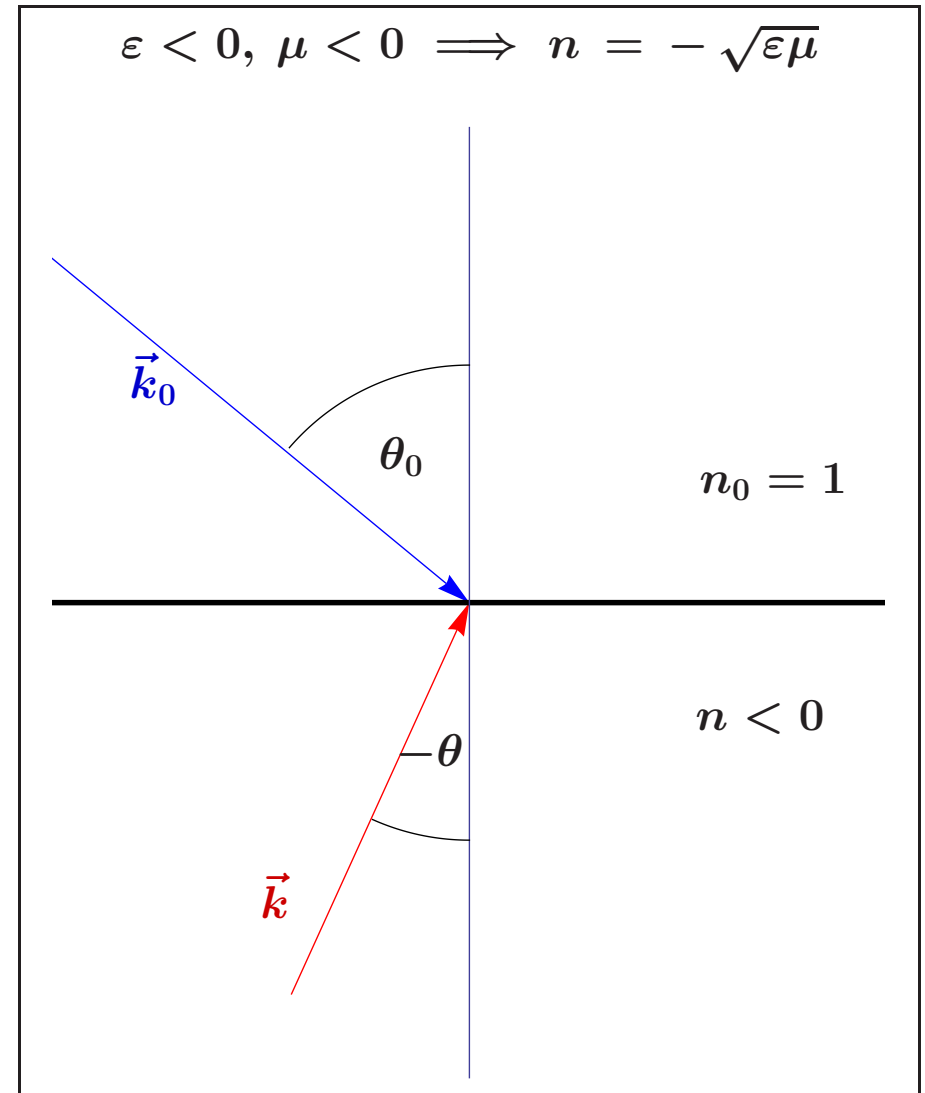
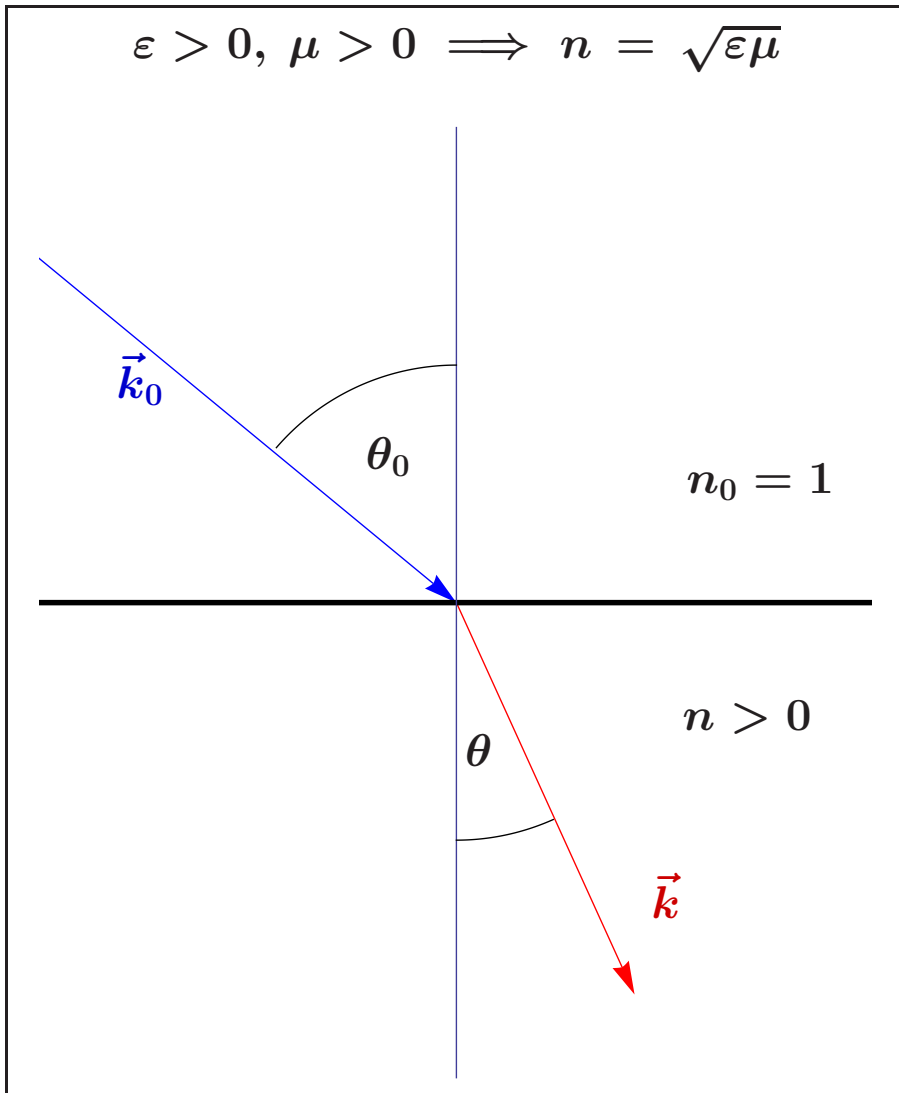
$\varepsilon \mu < 0$: keine Wellenlösungen

$\varepsilon \mu > 0$: Wellenlösungen mit Phasengeschwindigkeit $v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$

Aus Maxwell-Gleichungen: $\varepsilon \mu \vec{E}_0 = -\vec{k} \times \vec{B}_0$ und $\vec{B}_0 = \frac{1}{\omega} \vec{k} \times \vec{E}_0$.

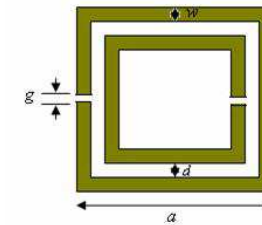
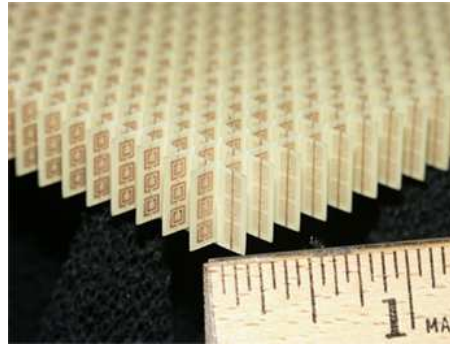
Poynting vector: $\vec{S}_0 = \vec{E}_0 \times \vec{H}_0 = \frac{\mu}{\omega} \vec{k}$

Brechungsgesetz: $n_0 \sin \theta_0 = n \sin \theta$



Metamaterial mit negativem Brechungsindex für Mikrowellen (GHz):

D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz: “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity” Phys. Rev. Lett. 84 (2000)



“split-ring resonator”

J. B. Pendry: “Negative refraction makes a perfect lens” Phys. Rev. Lett. 85, 3966 (2000)



David R. Smith (*1964)



John B. Pendry (*1943)

3. Cloaking

U. Leonhardt: “Optical conformal mapping”, Science 312, 1777 (2006).

J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith: “Controlling electromagnetic fields” Science 312, 1780 (2006)

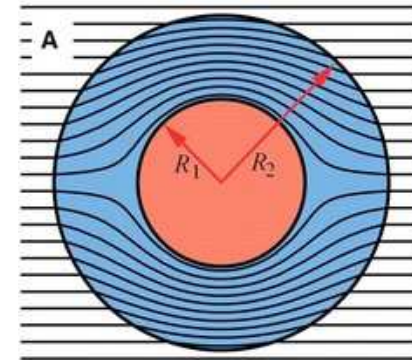
D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith: “Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies” Science 314, 977 (2006).



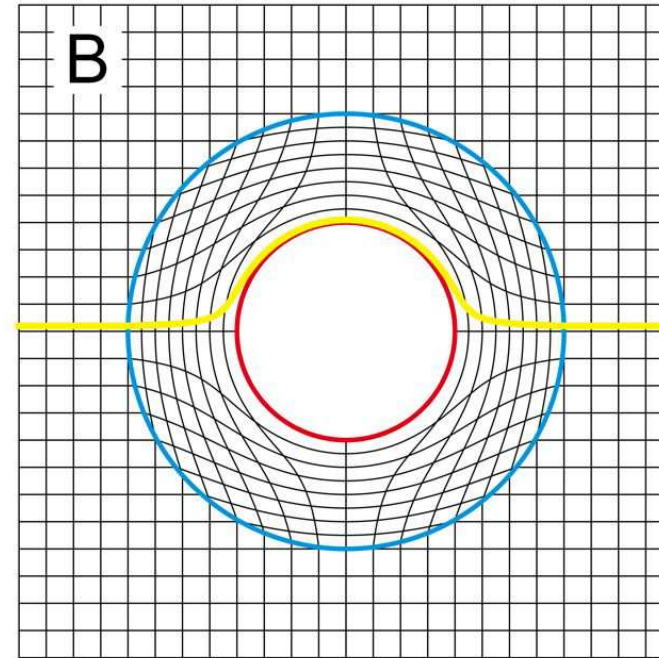
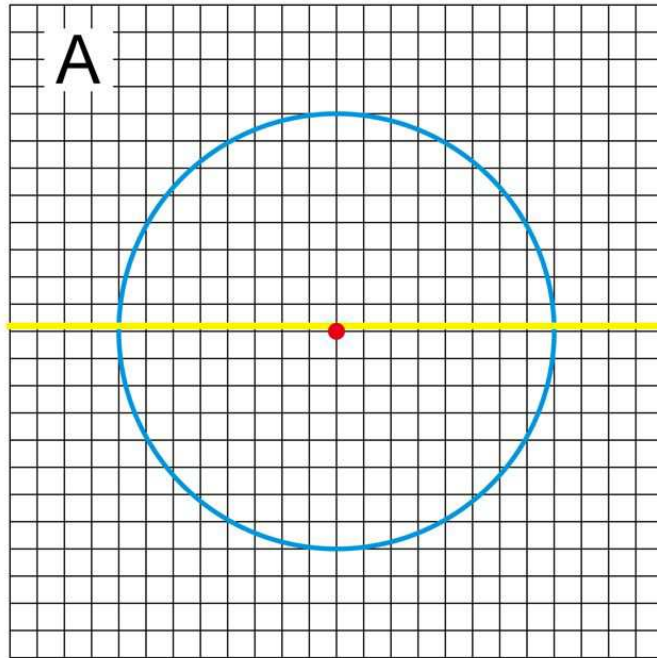
Ulf Leonhardt
(*1965)



David Schurig

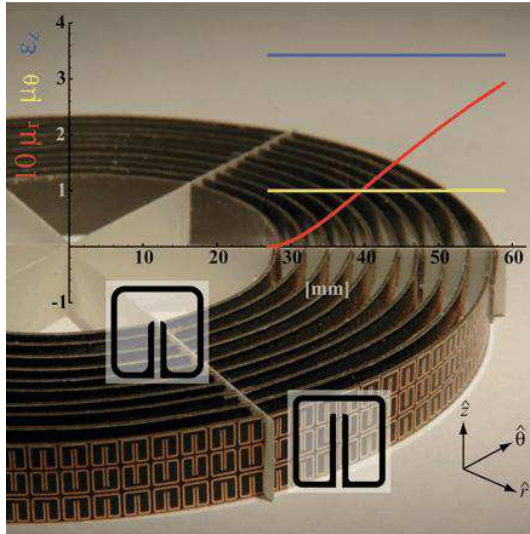


Konstruktion von Pendry, Schurig und Smith:



$$0 < r < R_2 : \quad r' = R_1 + \frac{r}{R_2} (R_2 - R_1)$$

$$\varepsilon'_r = \mu'_r = \frac{R_2}{(R_2 - R_1)} \frac{(r' - R_1)^2}{r'}, \quad \varepsilon'_\theta = \mu'_\theta = \frac{R_2}{(R_2 - R_1)}.$$



$$R_1 = 27,1 \text{ mm}$$

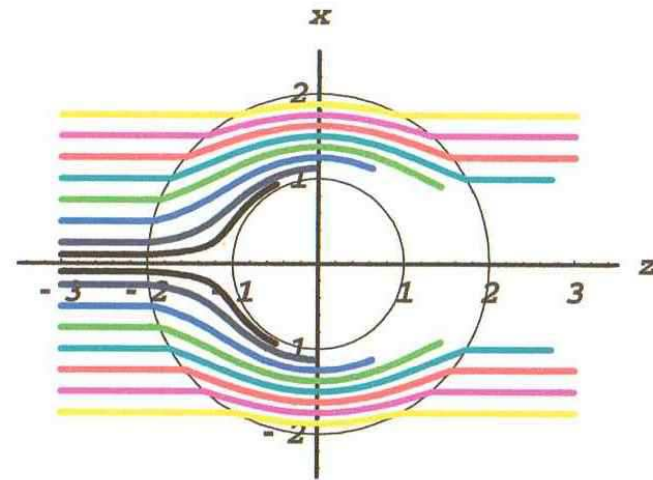
$$R_2 = 58,9 \text{ mm}$$

Frequenz: 8,5 GHz

Vakuumwellenlänge: 3,5 cm.

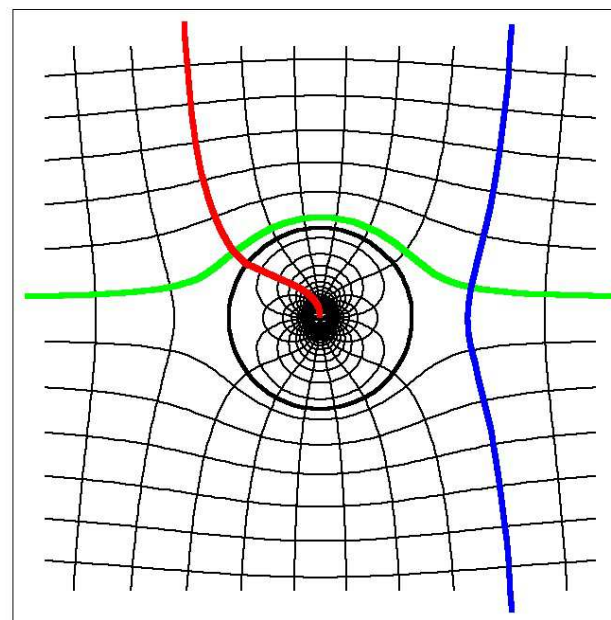
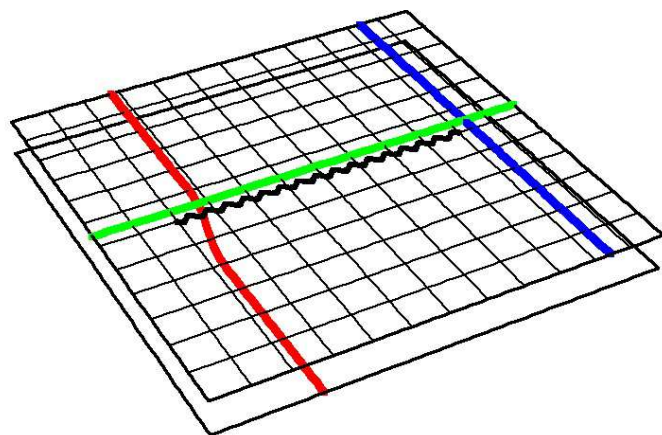
Laufzeitunterschied:

Abbildung aus H. Chen and C. T. Chan: "Time delays and energy transport velocities in three dimensional ideal cloaking devices" J. Appl. Phys. 104, 033113 (2008)



Zusammenfassung: Der Cloak von Pendry, Schurig und Smith funktioniert nur für eine Frequenz und nur für statische Situationen.

Konstruktion von Leonhardt:



Ausblick:

Es gibt mittlerweile auch Metamaterialien

- **für elektromagnetische Wellen im optischen Frequenzbereich**
- **für Schallwellen (“akustische Metamaterialien”)**
- **für Wärmestrahlen**

Ausblick:

Es gibt mittlerweile auch Metamaterialien

- für elektromagnetische Wellen im optischen Frequenzbereich
- für Schallwellen (“akustische Metamaterialien”)
- für Wärmestrahlen

Zum Abschluss:

Video “Romulan Stormhawk Cloaking”

(Quelle: Youtube, conceptman08):