

Magnetic Particle Mover (MPM) – wie funktioniert das?

Peter Blümler

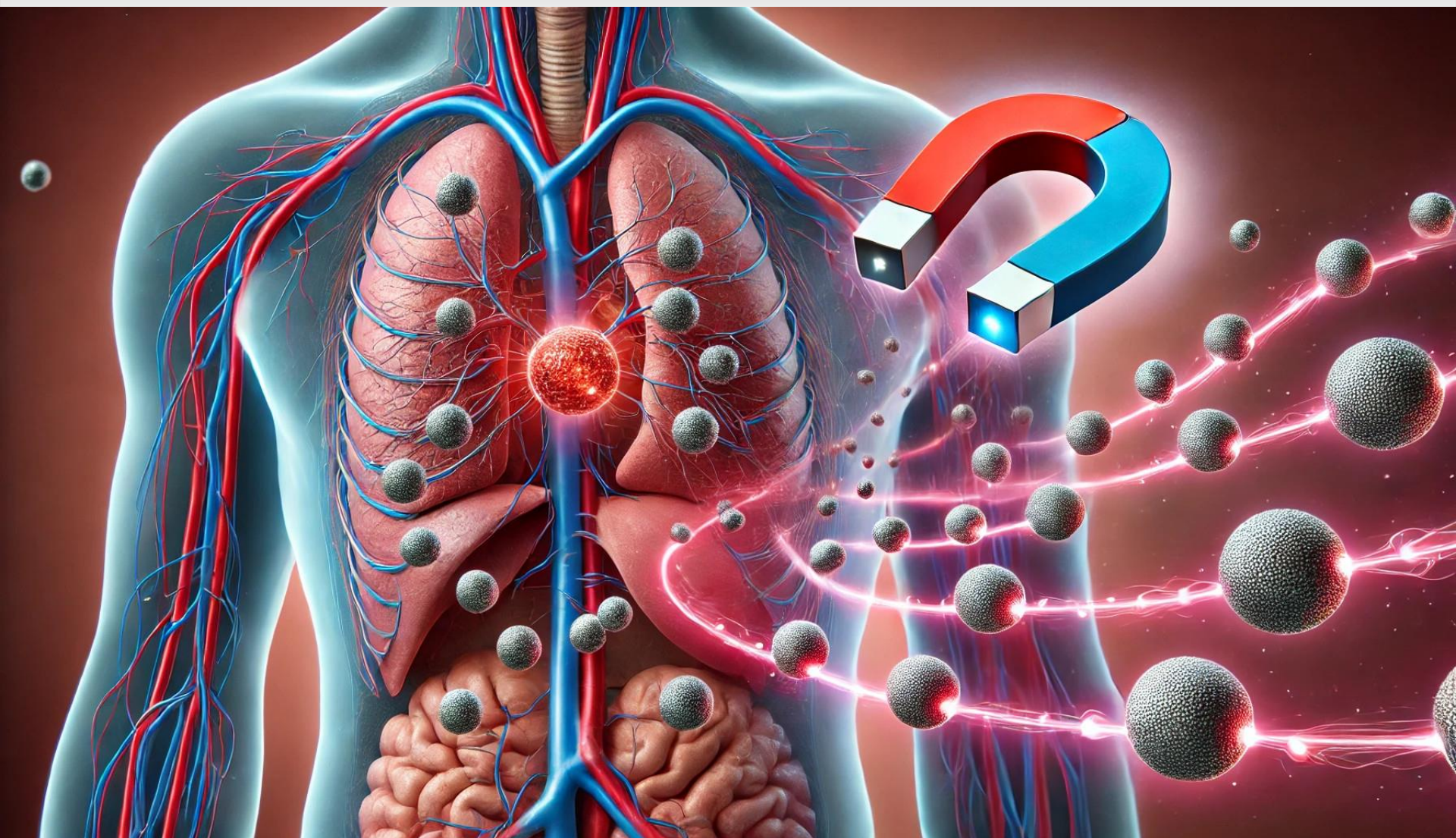
Institut für Physik, Universität Mainz

P. Blümler, *Cells* **10** (2021) 2708 (31 pages)

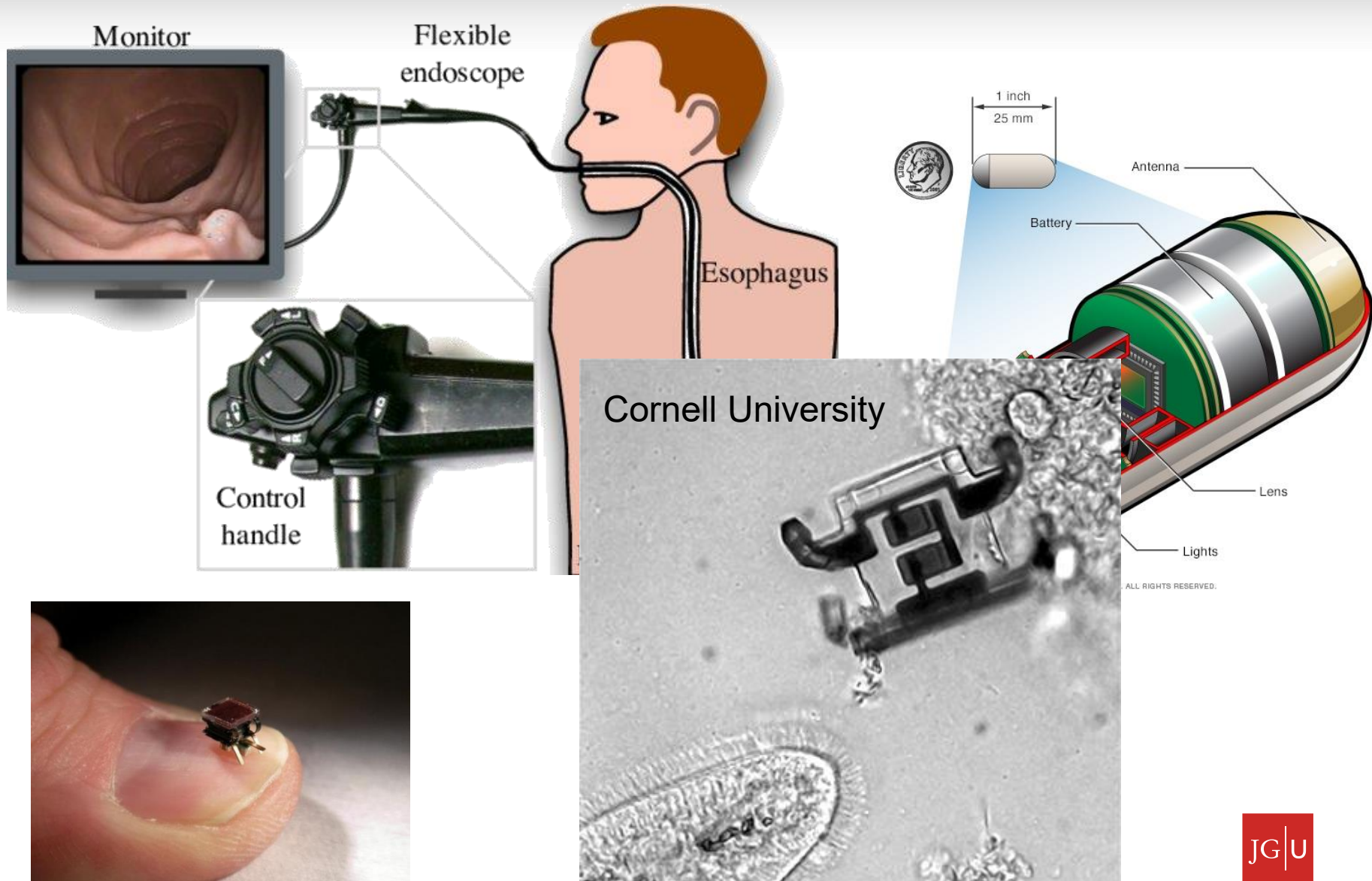
O. Baun, P. Blümler, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **439** (2017) 294-304

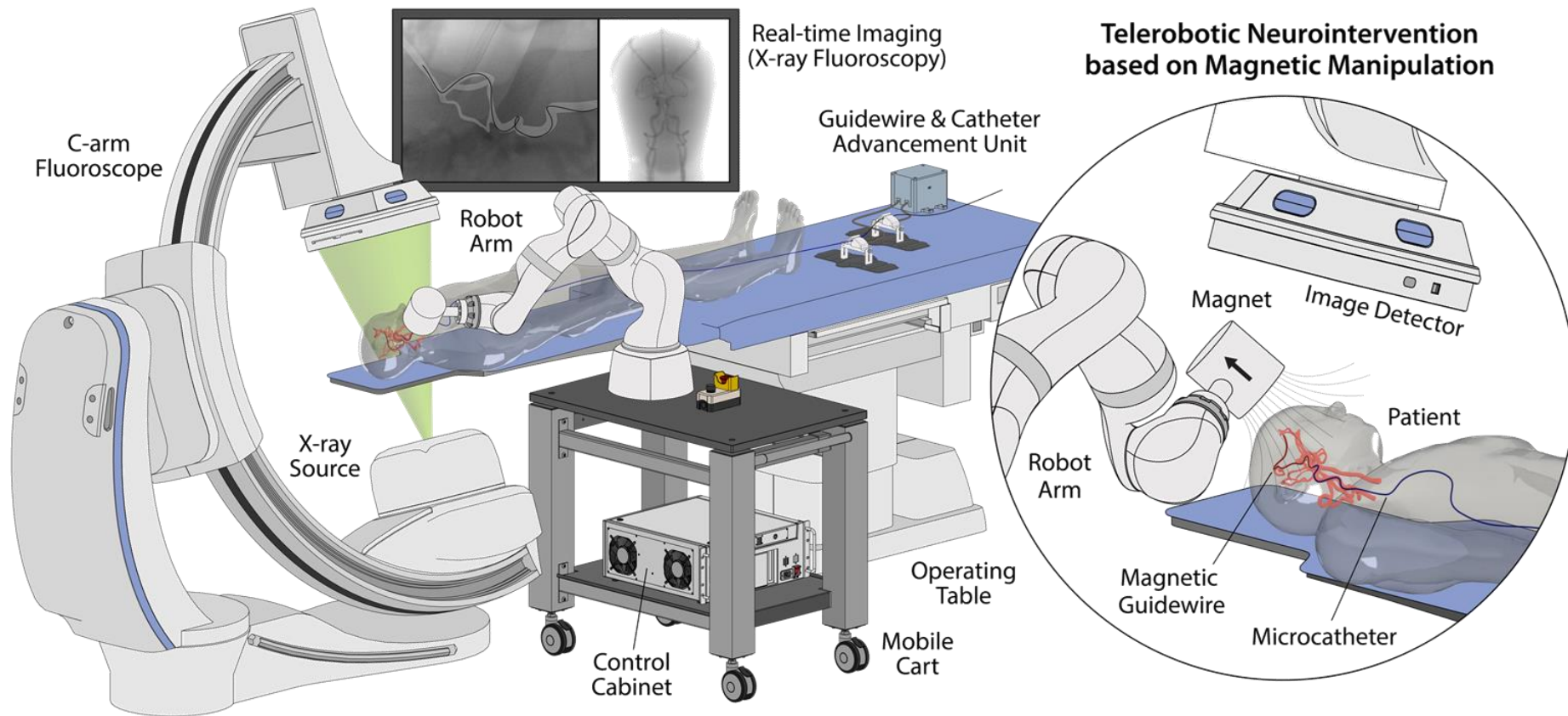


JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ



Nanopartikel oder makroskopische Objekte





Y. Kim et al. Science Robotics 7(65) (2022) Doi: [10.1126/scirobotics.abg9907](https://doi.org/10.1126/scirobotics.abg9907)

Kommerzielle Produkte

A



B



C



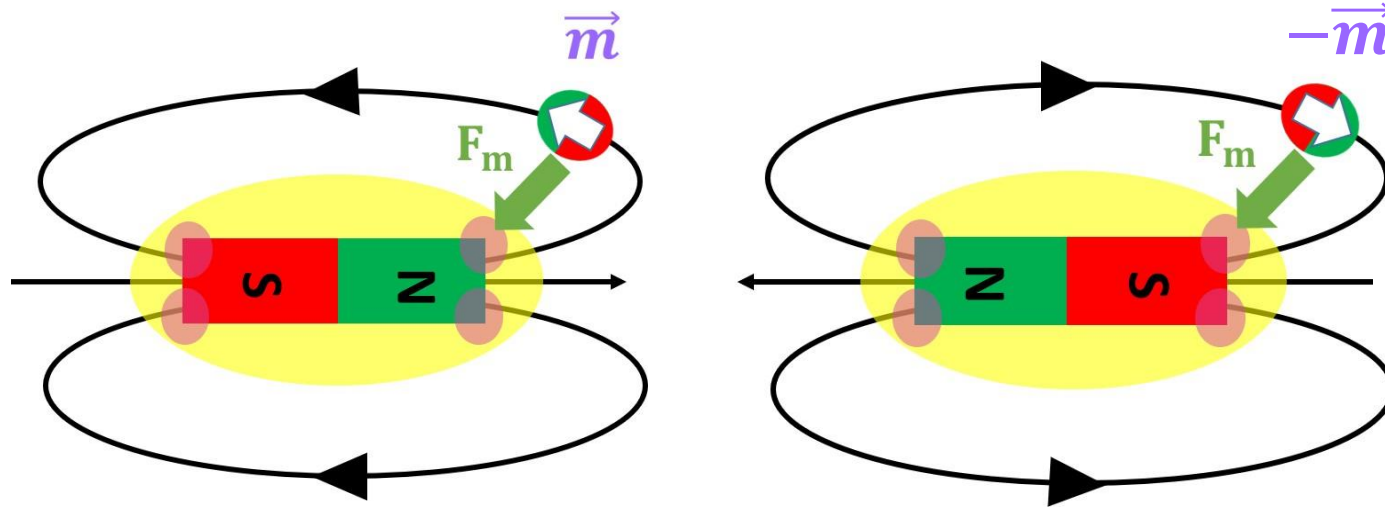
D



T. Kong et al. Micromachines 16(5) (2025) 561 <https://doi.org/10.3390/mi16050561>



Ein einzelner Magnet kann Ferromagnete nur anziehen



$$\vec{F}_m = \vec{\nabla} (\vec{m} \cdot \vec{B}) \quad \vec{m} \parallel \vec{B}$$

$$\vec{F}_m(\vec{r}) = |\vec{m}| \cdot \vec{\nabla} |\vec{B}|$$

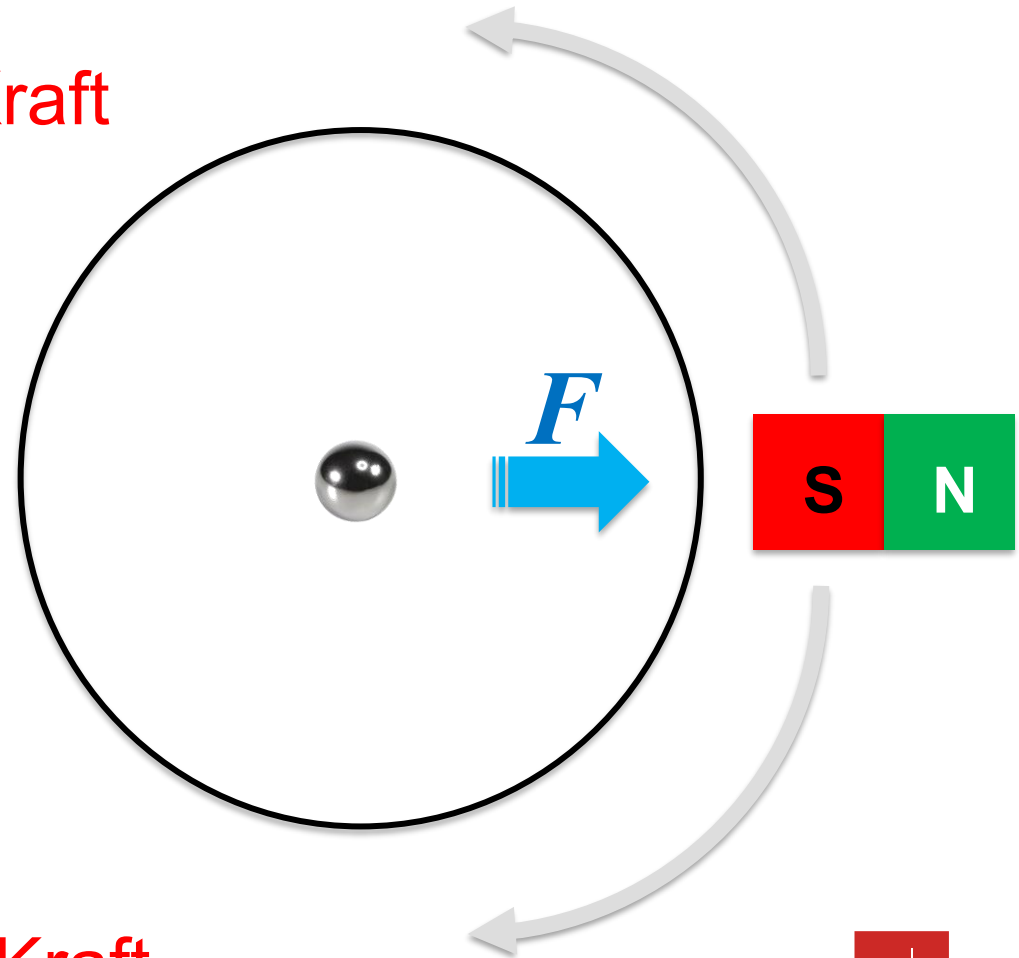


Vorzeichenverlust = keine eindeutige Richtung

Permanetmagnete

Nicht schaltbar

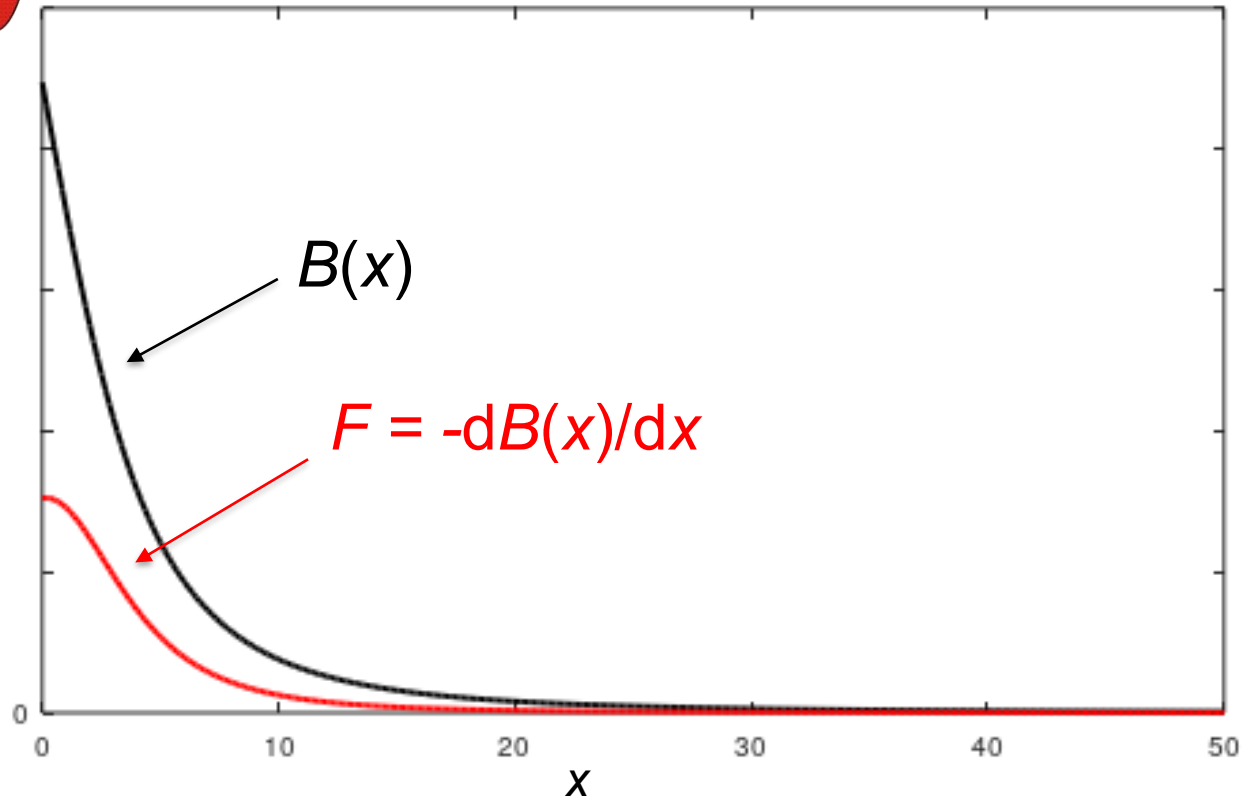
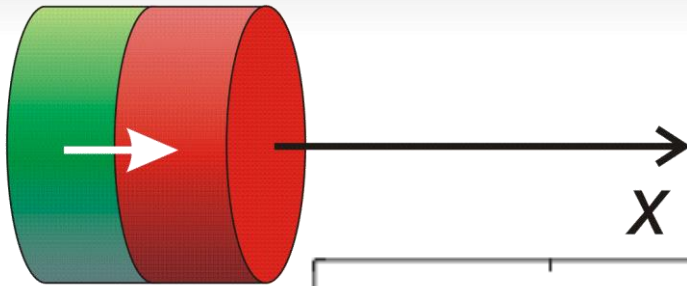
Einseitig: nicht lineare Kraft



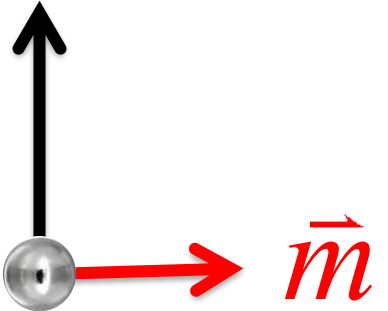
Spulen:

Schwach

Einseitig: nicht lineare Kraft



$$\vec{F}_{\text{mag}} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{m} \cdot \vec{B}) \quad \text{aber kleinere, bewegliche Objekte werden sich entlang } \vec{B} \text{ orientieren}$$

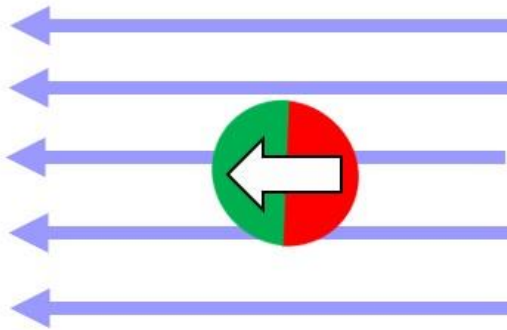
$$\Rightarrow \vec{m} \parallel \vec{B} \quad \text{or} \quad \vec{m} \cdot \vec{B} \geq 0$$


F_{mag} hat kein Vorzeichen mehr, $\propto B$!



Überlagerung eines homogenen Feldes B_0

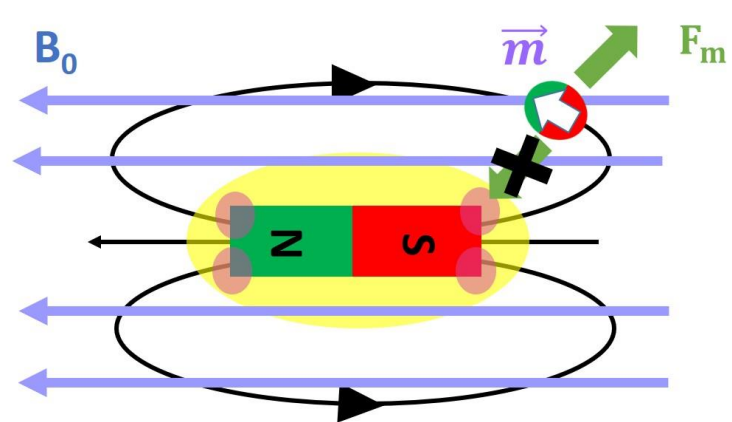
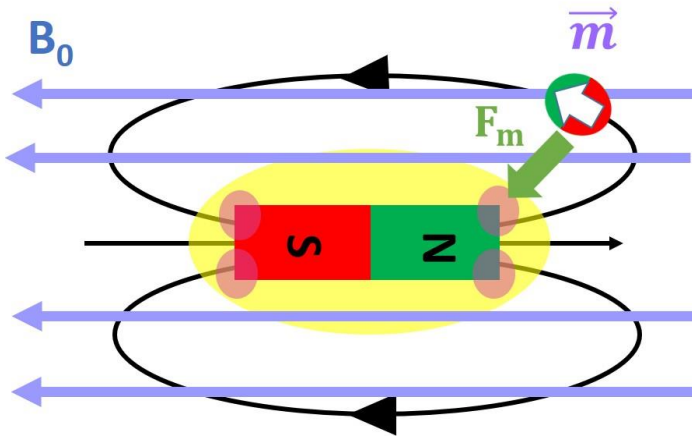
→ m ist permanent ausgerichtet



für $B_0 \gg \vec{\nabla} \vec{B}$

Orientierung von m bleibt erhalten

zusätzliches $\vec{\nabla} \vec{B}$ kann nun anziehende/abstoßende Kräfte $\vec{F}_m$ erzeugen



Alle Nachteile beseitigt!

Bewegliche permanente Magnete umgeben
gleichmäßig das Objekt

→ **konstante Kraft** über inneres Volumen

Erzeugen **sehr starke** Kräfte, die dennoch
mechanisch geregelt/ausgeschaltet werden können

→ kink-moves, U-turns

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Zugabe: Was ist ein Halbach Magnet?

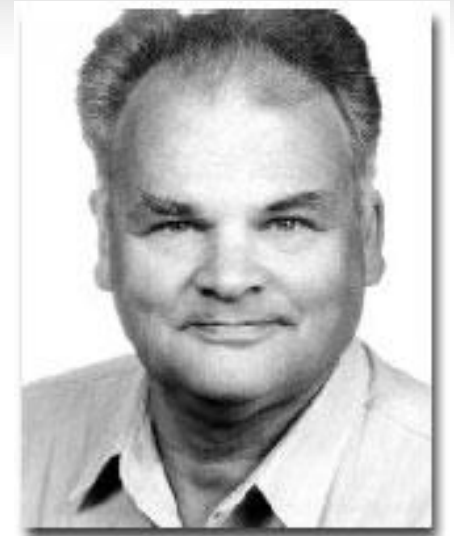


Pros:

Stärkstes B-Feld / Magnetmasse

Keine Streufelder

Ohne Joch (einfach zu rechnen/reproduzieren)



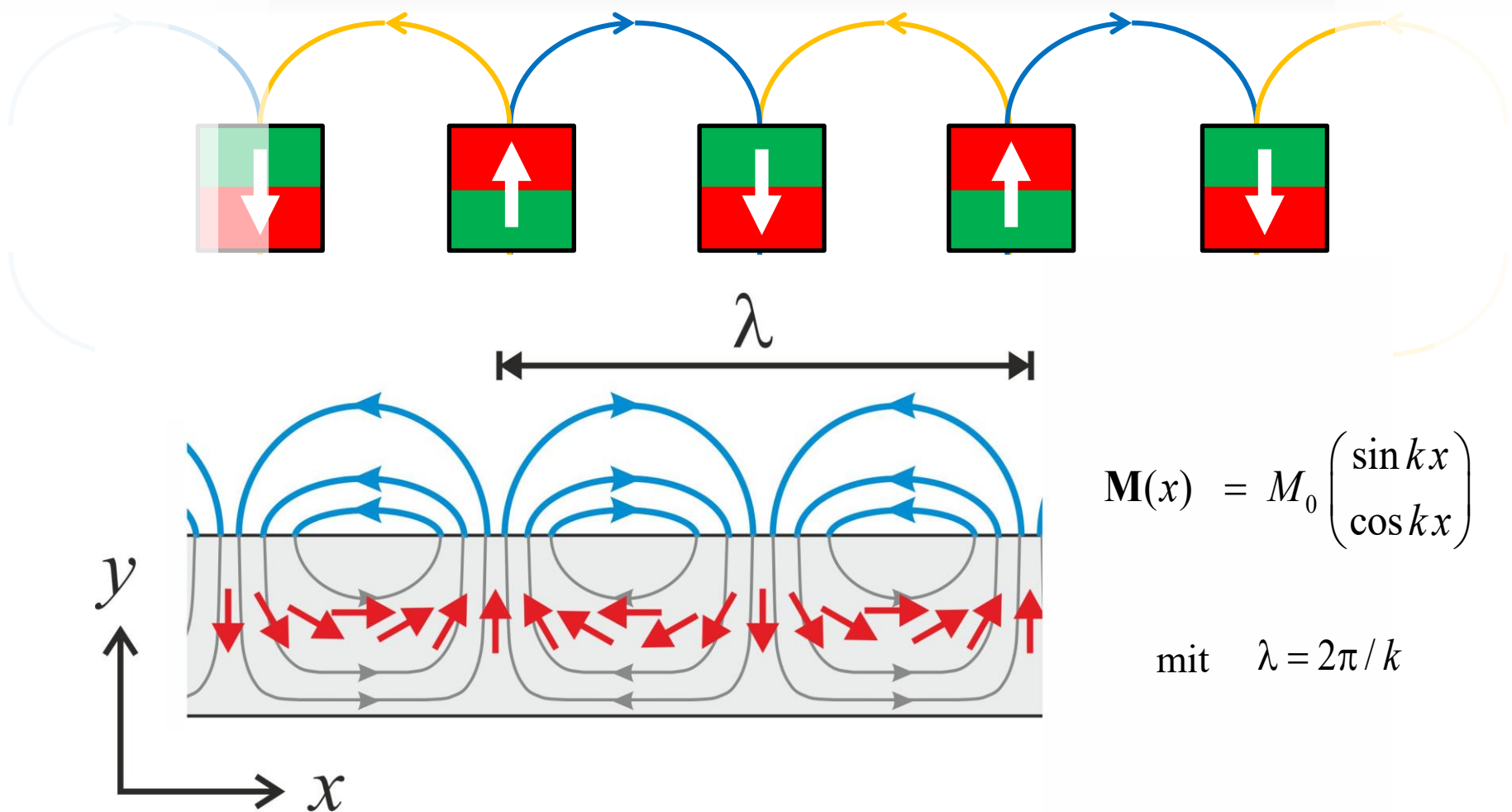
Klaus Halbach
(1925 – 2000)

Cons:

Etwas komplizierter (viele Magnete)

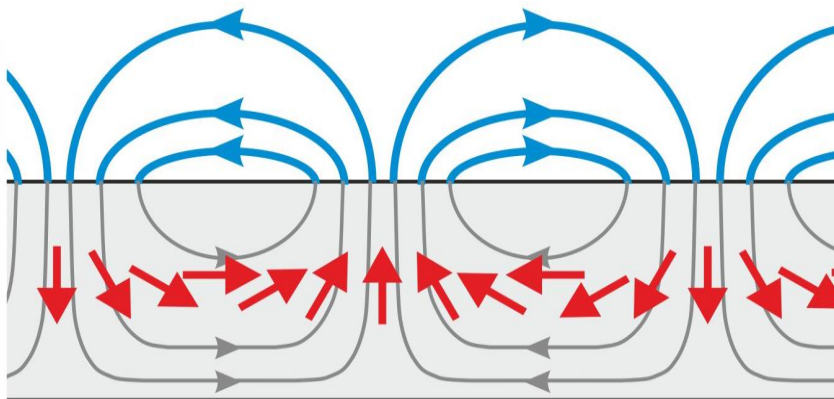
K. Halbach: "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Materials" *Nucl. Instr. Meth.* **169** (1980) 1-10.

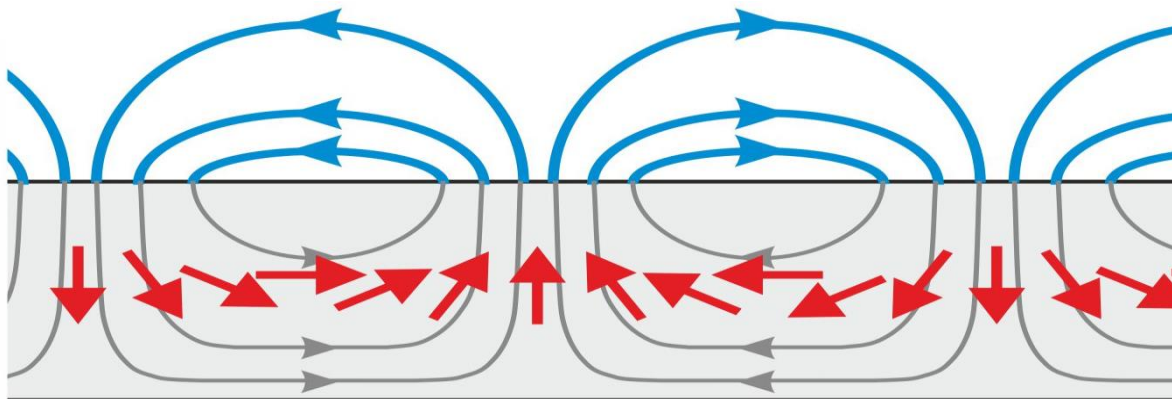
Lineares Halbach Array

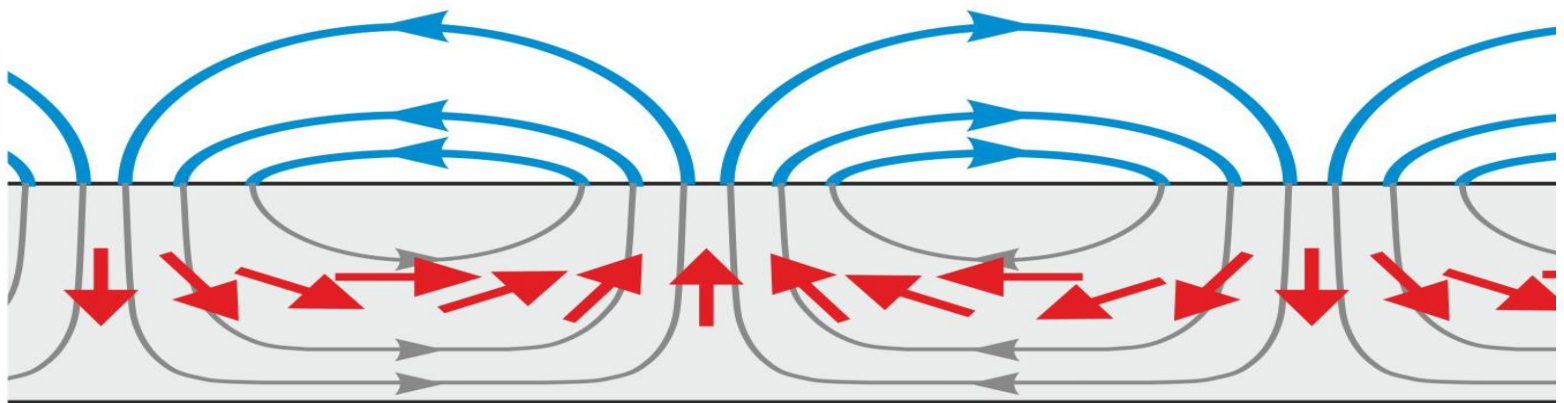


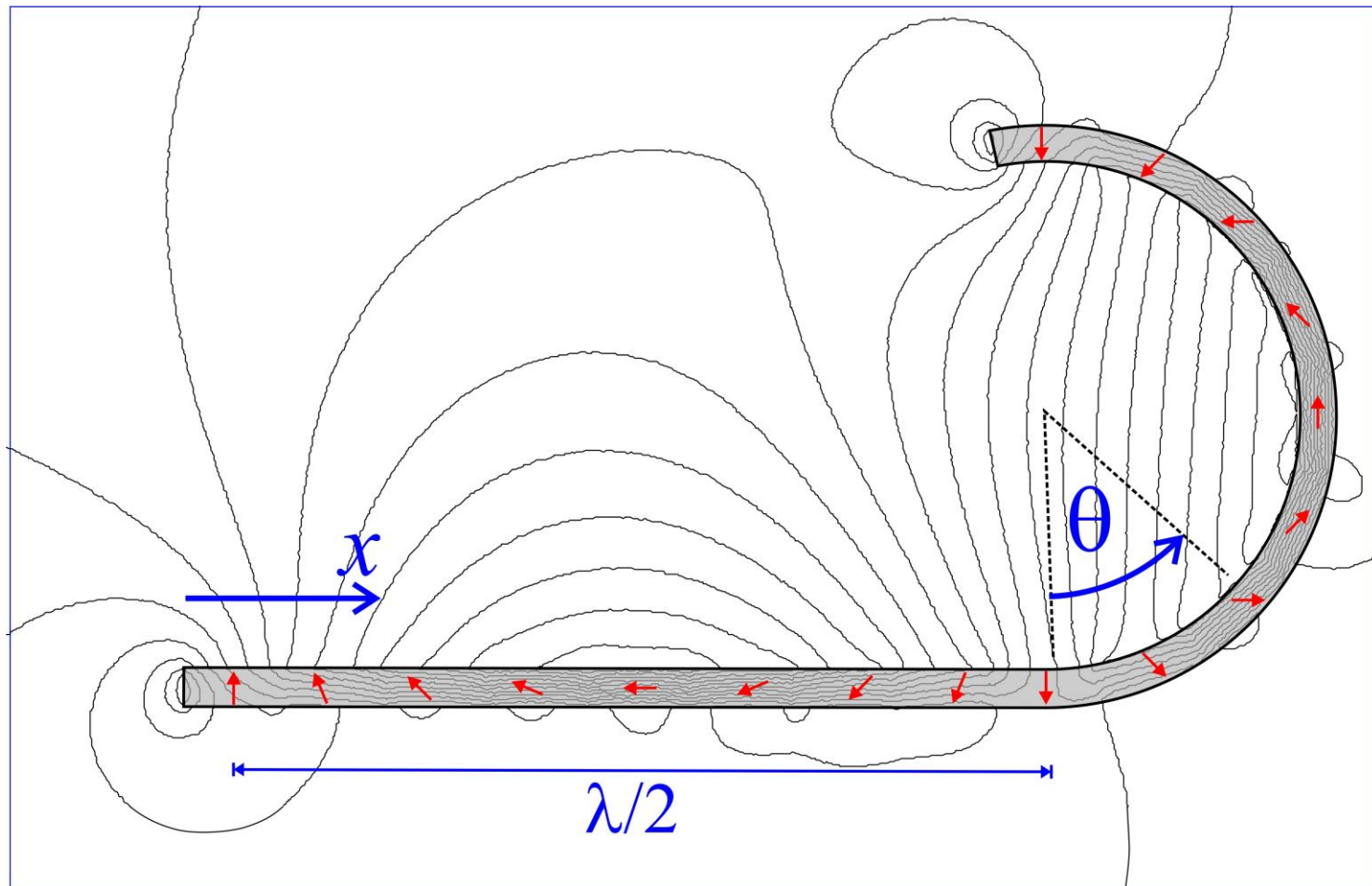
$$\mathbf{M}(x) = M_0 \begin{pmatrix} \sin kx \\ \cos kx \end{pmatrix}$$

mit $\lambda = 2\pi / k$

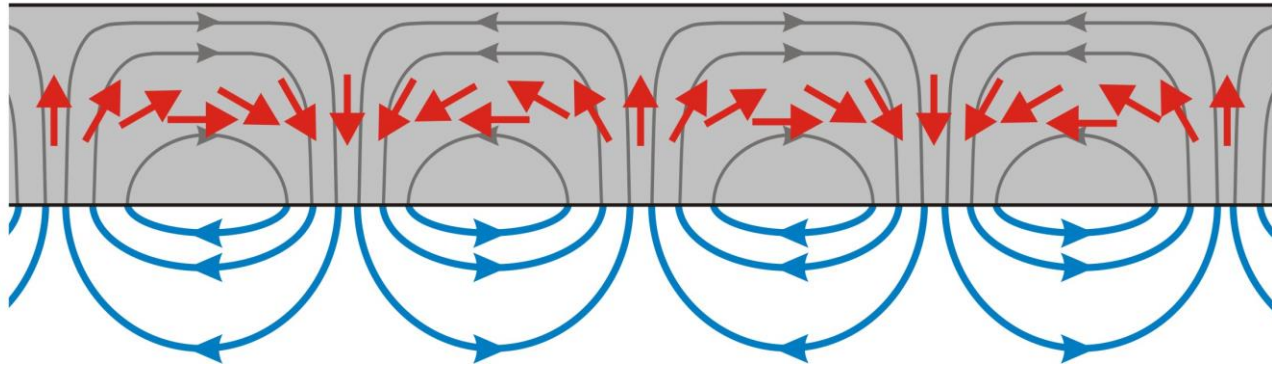




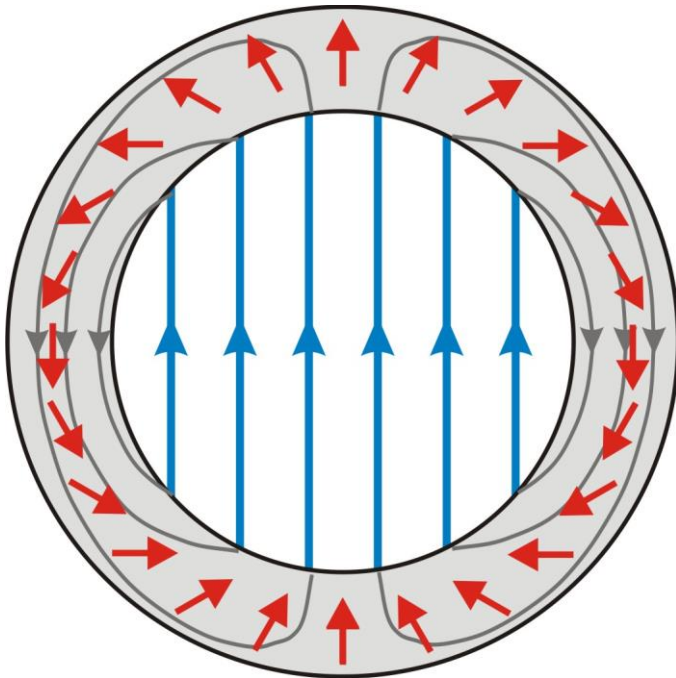




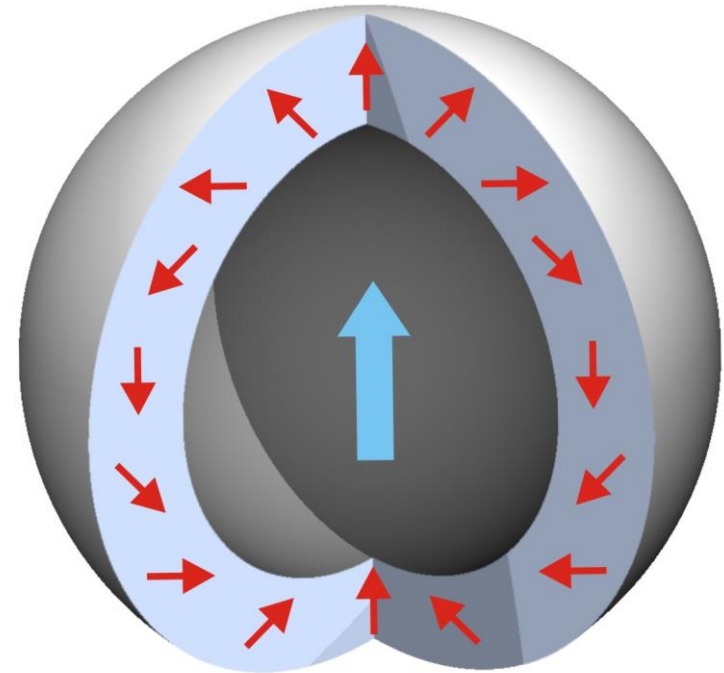
1D



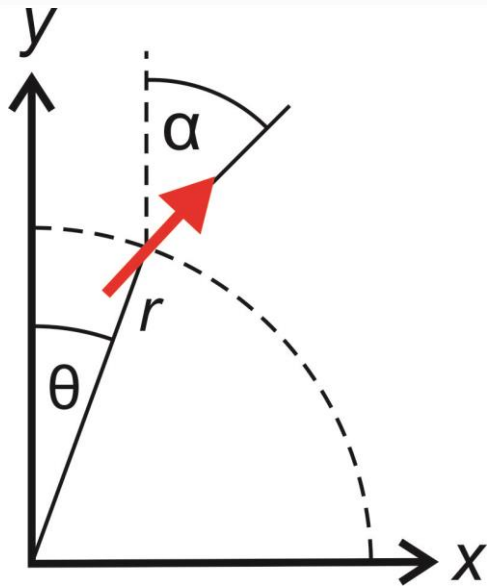
2D



3D



Generalisierung

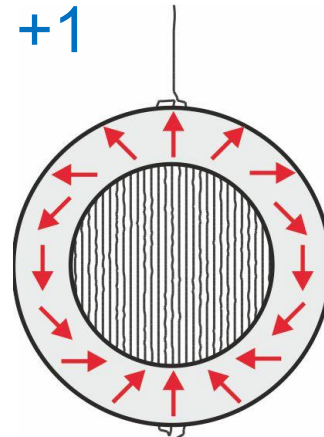


Magnetisierungswinkel, α ,
an Positionswinkel θ

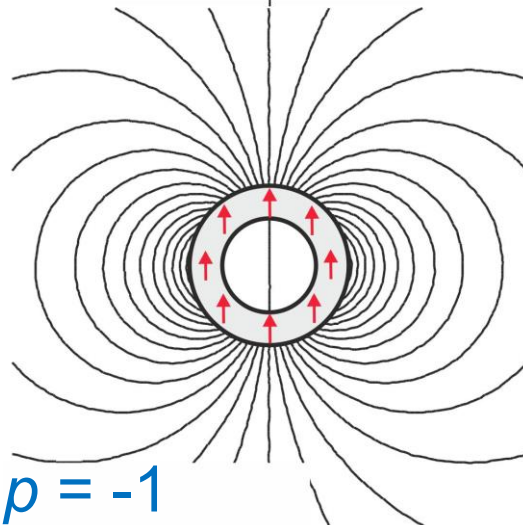
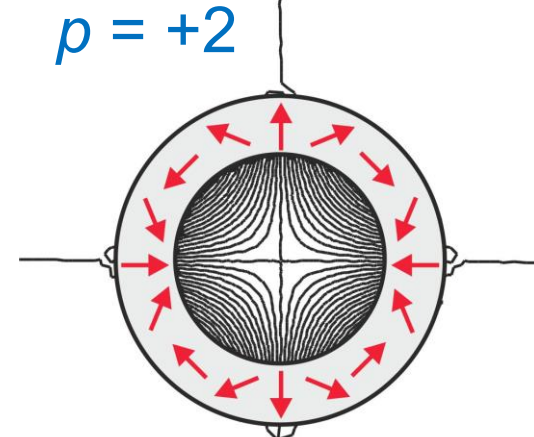
$$\alpha \equiv (1 + p) \theta$$

$2p$ = Anzahl der Pole
 $\text{sgn}(p)$ = innen/außen

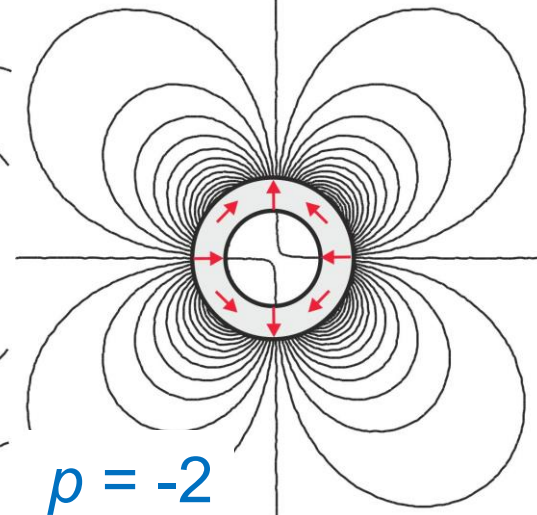
$p = +1$



$p = +2$

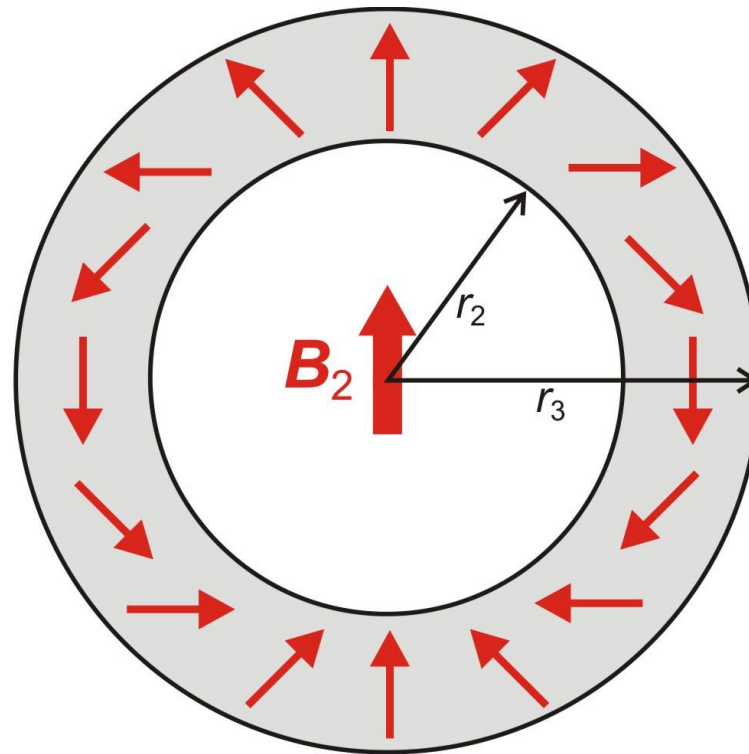
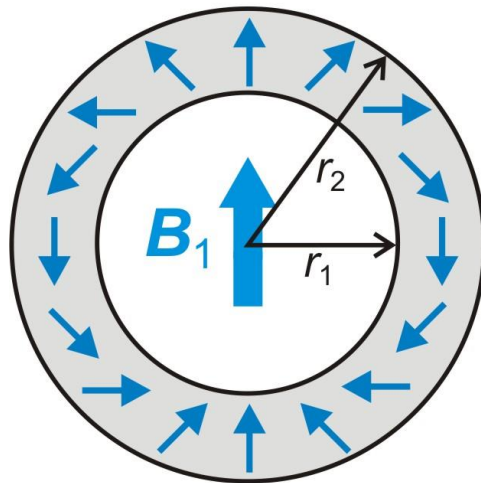


$p = -1$

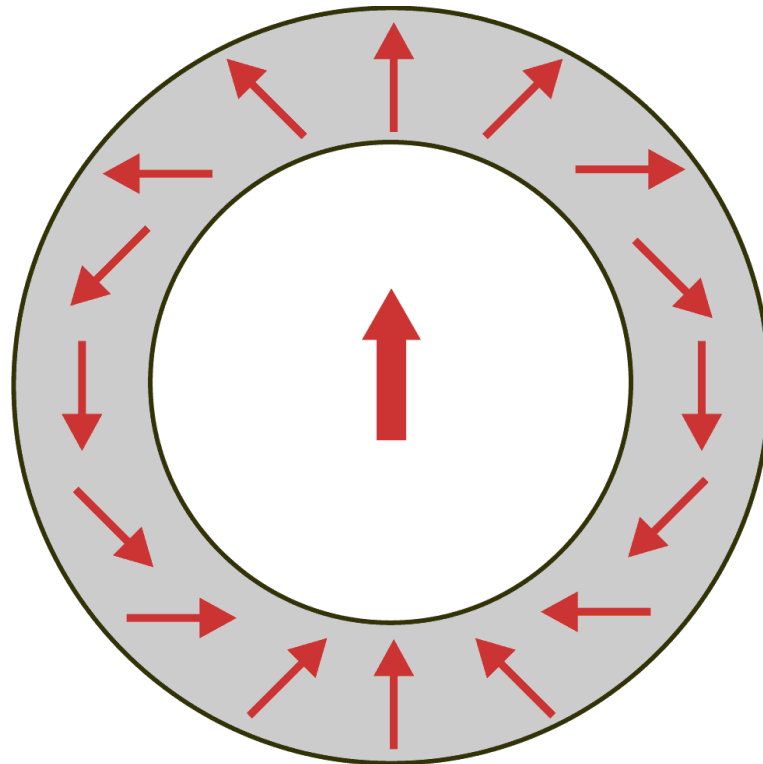
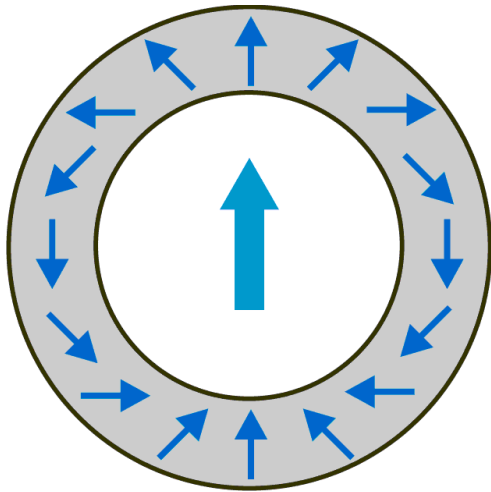


$p = -2$

Rotierende Halbach Zylinder



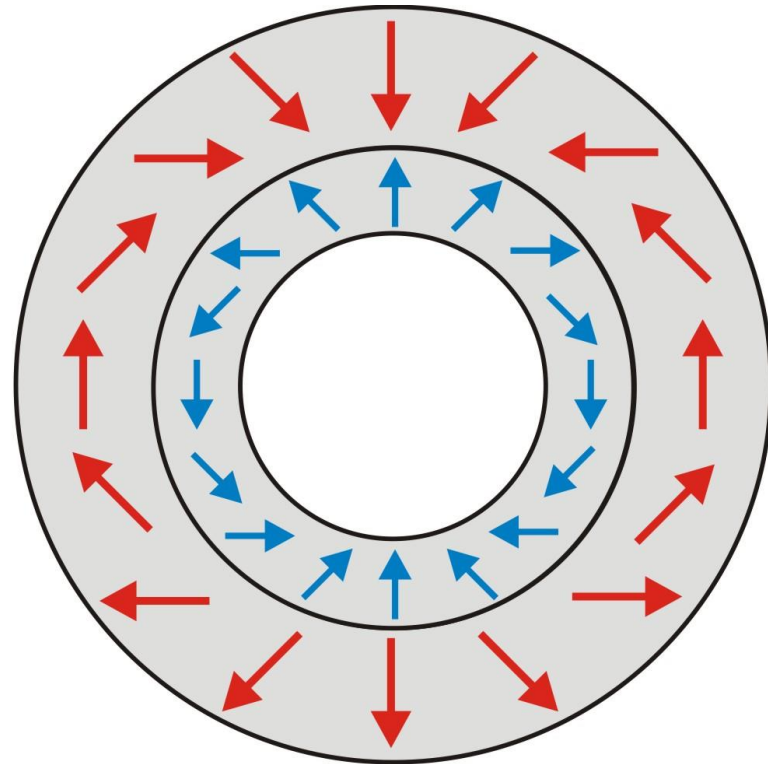
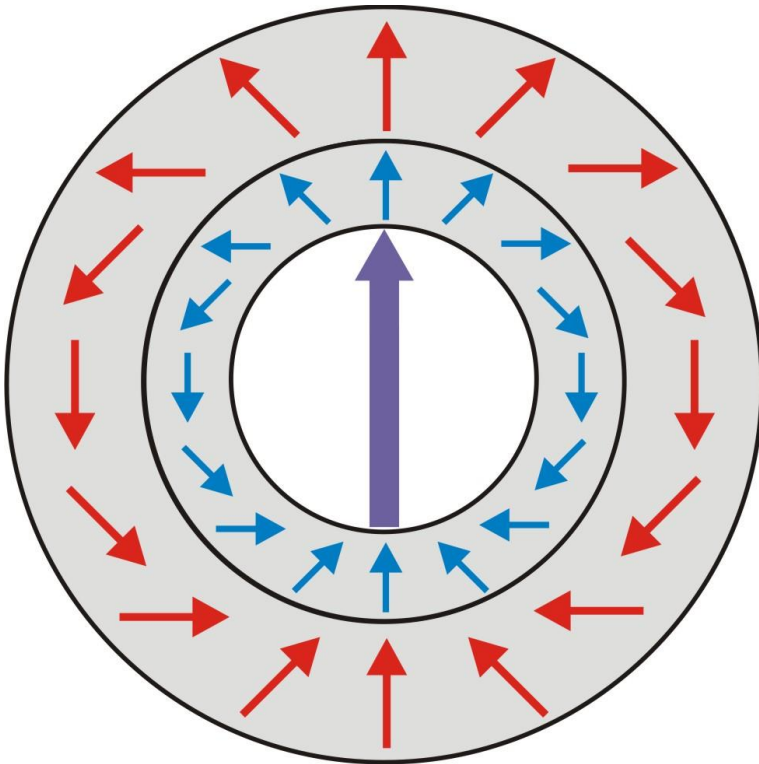
Zwei Ringe mit gleichem Radienverhältnis: $r_1 : r_2 = r_2 : r_3$



Rotierbare Halbach Zylinder

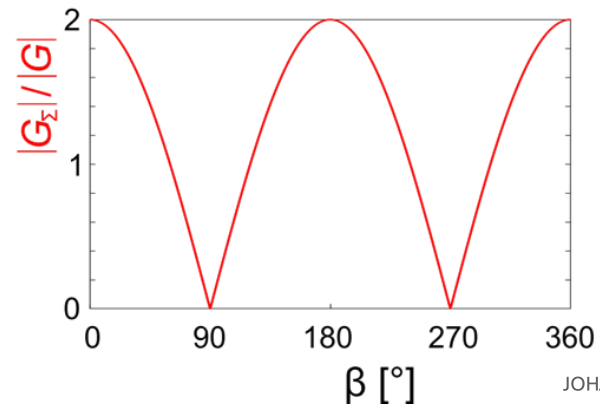
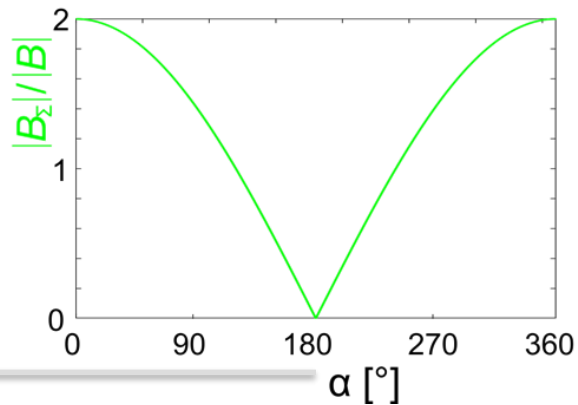
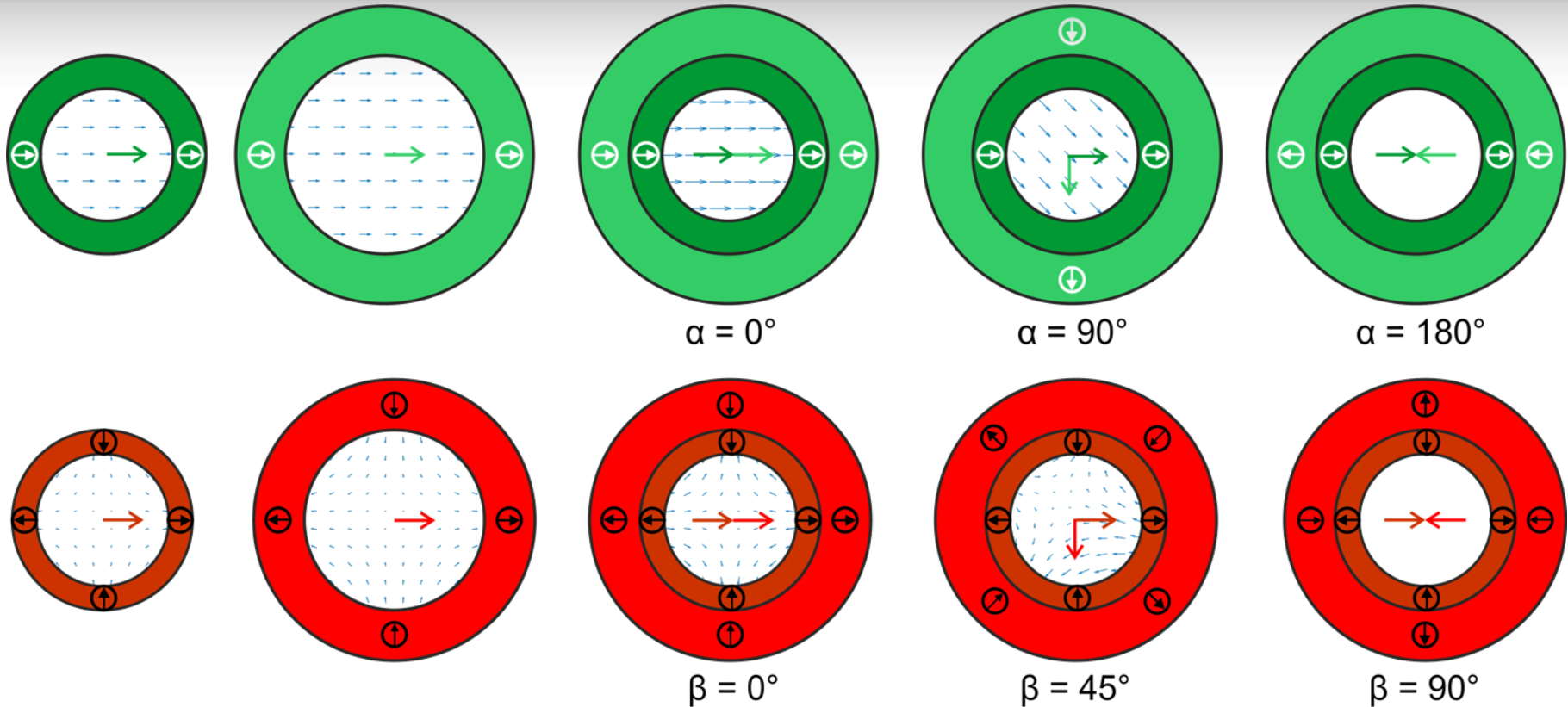
$$B_{\text{res}} = B_1 + B_2 = 2 B_{1/2}$$

$$B_{\text{res}} = B_1 - B_2 = 0$$



H.A. Leupold, E. Potenziani II, and M.G. Abele *J. Appl. Phys.* **64** (1988) 5994-5996
C. Bauer et al. *J. Magn. Reson.* **198** (2009) 222-227

Rotation von Halbach Di- und Quadrupolen



Das wars!



DANKE FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

(© Warner Bros. „Contact“ 1997)