



Physik und Anwendungen von Seltenerd-Dauermagneten

M. Katter
20.1.2011

Gliederung

- Einleitung
- physikalische Wirkung der Seltenen Erden in Dauermagneten
- industrielle Herstellung von Nd-Fe-B Sintermagneten
- Entwicklungstrends zur Einsparung von Dy
- Anwendungen

Vacuumschmelze, das Unternehmen

einer der weltweit führenden Hersteller von magnetischen Spezialwerkstoffen und daraus weiterveredelten Produkten

1914: erster Vacuumschmelzofen

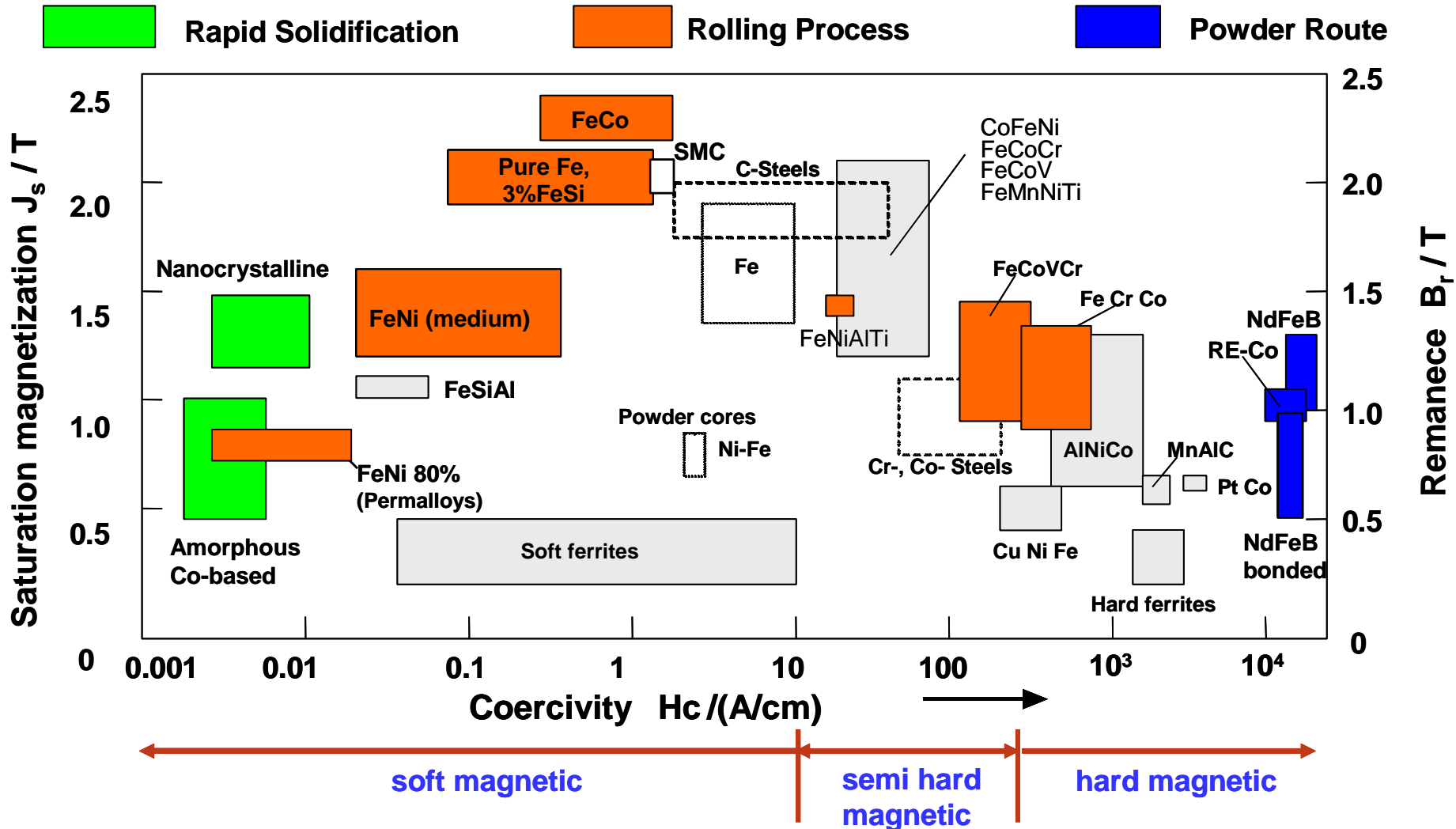
1923: Gründung der heutigen
 VACUUMSCHMELZE

ausgehend von Hanau, kontinuierliches Wachstum zu einem weltweit tätigen Unternehmen:

- ca. 4 500 Mitarbeiter
- in mehr als 40 Ländern
- jährlicher Umsatz ca. 320 Millionen Euro

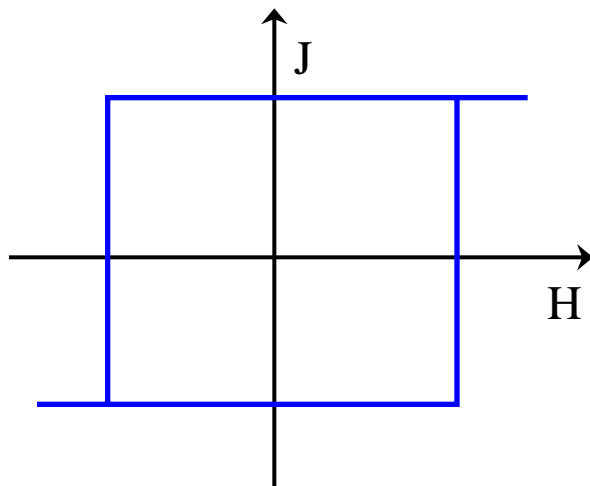
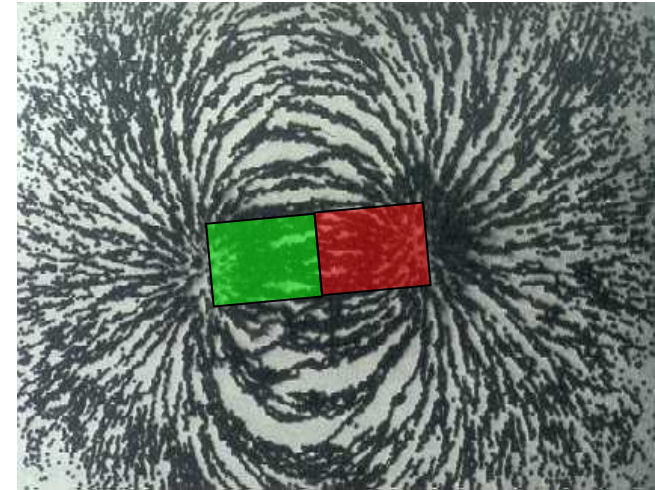


Überblick magnetische Materialien



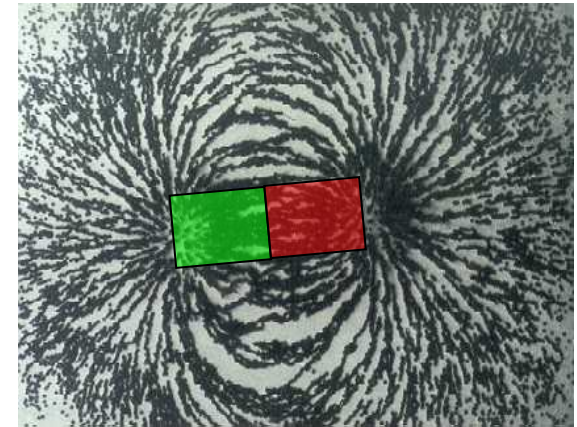
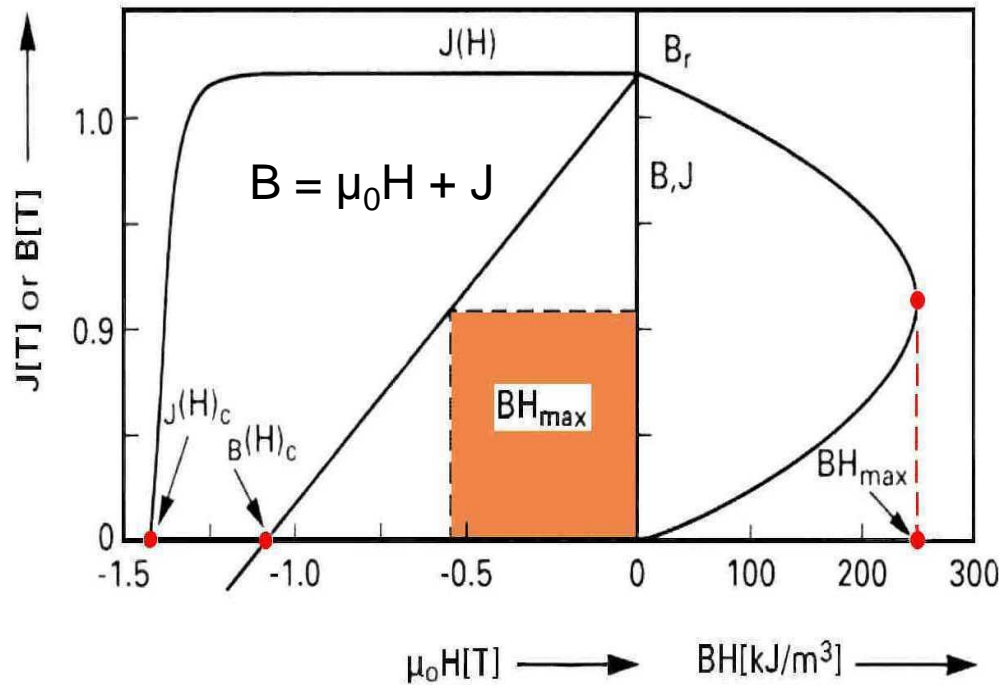
Anforderungen an einen Dauermagneten

- Starkes Streufeld:
 - hohe Sättigung J_s
 - hohe Remanenz J_R



- Keine Ummagnetisierung bei starken Gegenfeldern:
 - möglichst „rechteckige“ Hysterese-Schleife
 - hohe Koerzitivfeldstärke H_{CJ}

Kennzahl „Energieprodukt“



Energie im Dauermagneten
= Energie im Streufeld

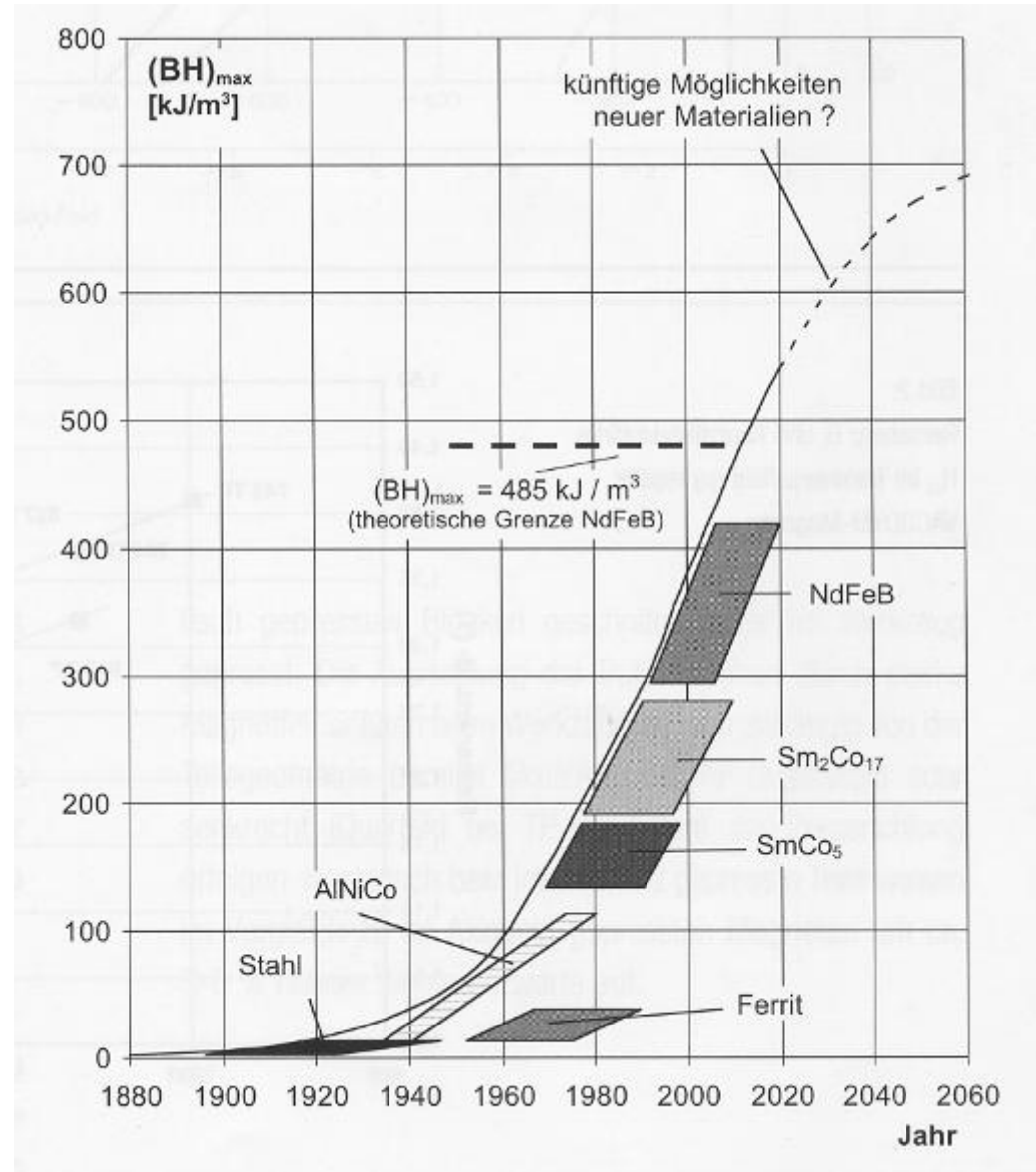
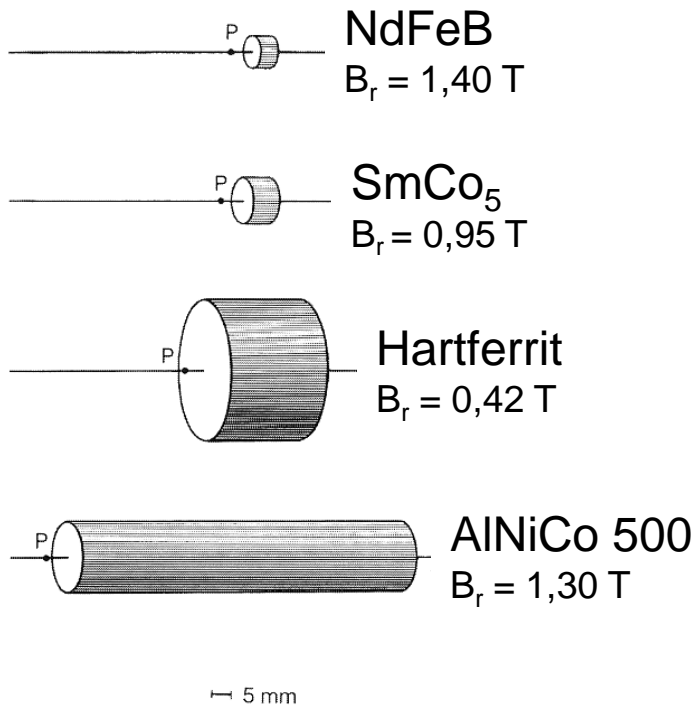
Energiedichte im
magnetischen Feld

$$\sim BH$$

$$(BH)_{\max} \propto B_r^2$$

BH_{\max} ist ein Maß für die „Stärke“
des Dauermagnet-Werkstoffs

Entwicklung des Energieprodukts

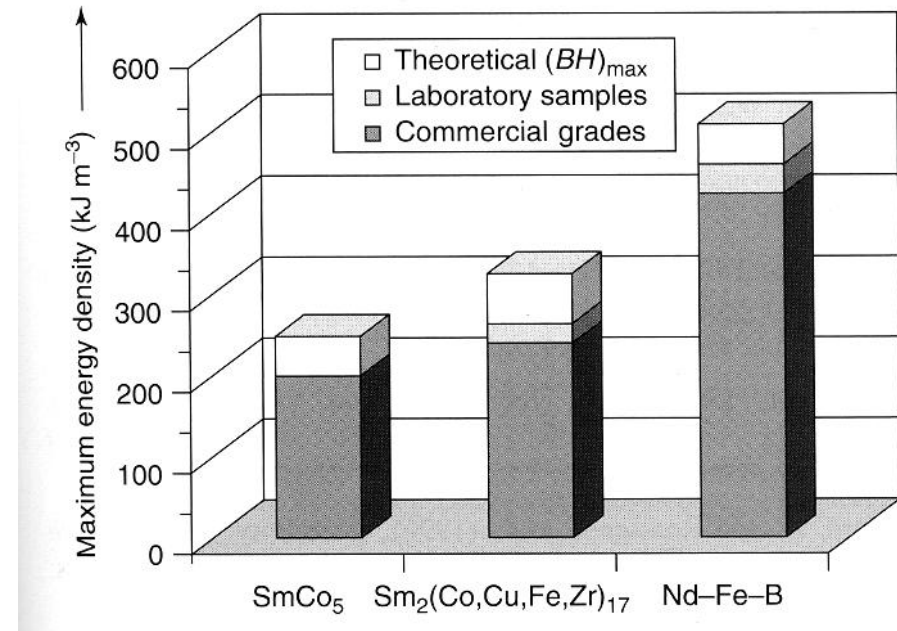


Einflußgrößen für $(BH)_{\max}$

$$B_r = \alpha J_s$$

$$(BH)_{\max} = \alpha B_r^2$$

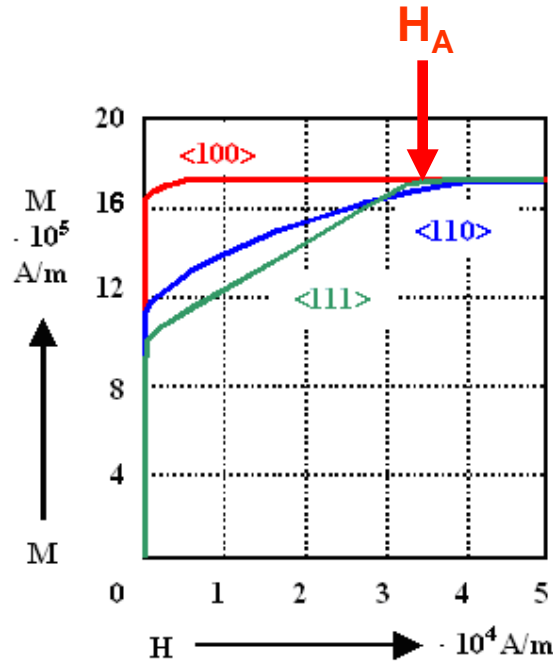
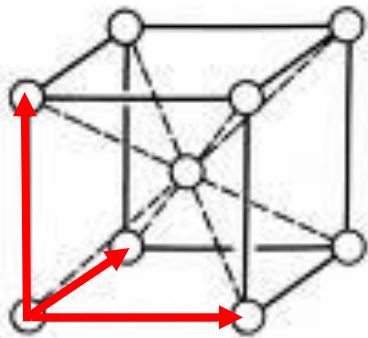
falls H_{cJ} groß genug



Hard phase	K_1 (MJ m ⁻³)	J_s (T)	$(BH)_{\max}^{\text{th}}$ (kJ m ⁻³)	T_C (°C)
Nd ₂ Fe ₁₄ B	4.9	1.61	516	310
Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	8.9	1.54	472	477
SmCo ₅	17.0	1.05	219	727
Sm ₂ Co ₁₇	3.9	1.30	336	916

J. Fidler et al. (2007)

Magnetokristalline Anisotropie



Fe:

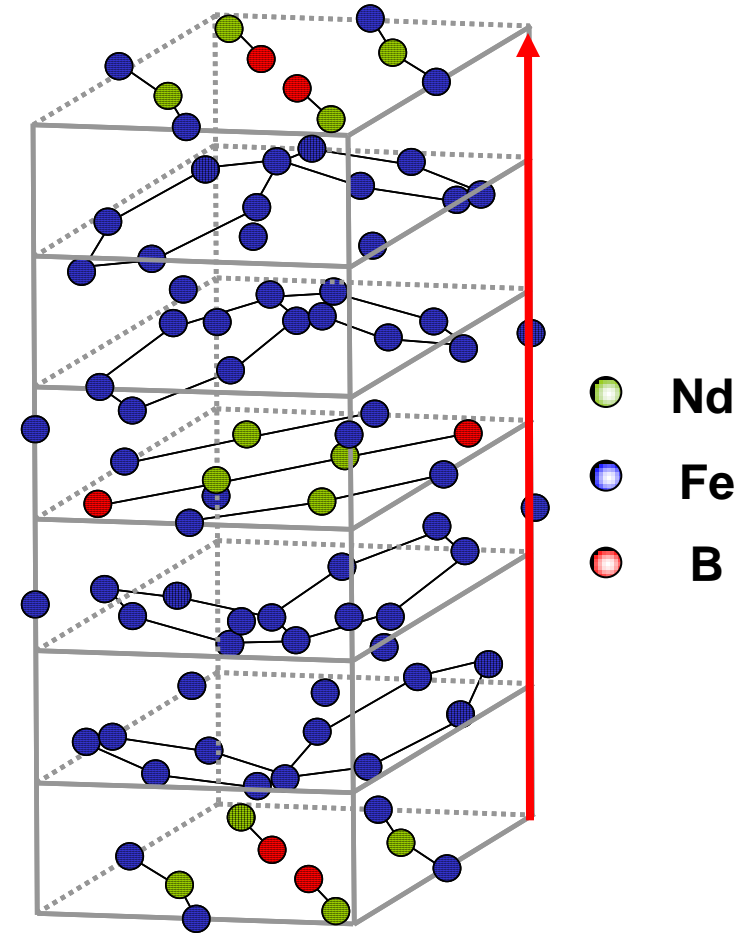
$$H_A = 35 \text{ kA/m}$$

$$H_A = 2K_1/M_s$$

$$H_{cJ} = \alpha H_A - N_{eff} M_s$$

(Kronmüller)

uniaxiale Struktur



$Nd_2Fe_{14}B: H_A = 6000 \text{ kA/m}$

Für SE-Dauermagnete relevante Elemente

SmCo_5
 $\text{Sm}_2(\text{Co,Fe,Cu,Zr})_{17}$
 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

H ·																	He ·
Li 1,55	Be 1,12	3d Elemente										B 0,98	C 0,914	N 0,92	O ·	F ·	Ne ·
Na 1,90	Mg 1,60											Al 1,43	Si 1,32	P 1,28	S 1,27	Cl ·	Ar ·
K 2,35	Ca 1,97	Sc 1,62	Ti 1,47	V 1,34	Cr 1,27	Mn 1,26	Fe 1,26	Co 1,25	Ni 1,24	Cu 1,28	Zn 1,38	Ga 1,41	Ge 1,37	As 1,39	Se 1,40	Br ·	Kr ·
Rb 2,48	Sr 2,15	Y 1,80	Zr 1,60	Nb 1,46	Mo 1,39	Tc 1,36	Ru 1,34	Rh 1,34	Pd 1,37	Ag 1,44	Cd 1,54	In 1,66	Sn 1,62	Sb 1,59	Te 1,60	J ·	Xe ·
Cs 2,67	Ba 2,22	La 1,87	Hf 1,58	Ta 1,46	W 1,39	Re 1,37	Os 1,35	Ir 1,36	Pt 1,38	Au 1,44	Hg 1,57	Tl 1,71	Pb 1,75	Bi 1,7	Po 1,76	At ·	Rn ·
Fr	Ra	Ac															

4f	Ce 1,81	Pr 1,82	Nd 1,82	Pm ·	Sm 1,66	Eu 2,04	Gd 1,79	Tb 1,77	Dy 1,77	Ho 1,76	Er 1,75	Tm 1,74	Yb 1,92	Lu 1,74
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Atomradien (KZ12) nach E. Hornbogen, H. Warlimont, Metallkunde

Anisotropie der 4f Ladungsverteilung

4f-Orbitale „verhaken“ sich in komplexer Kristallstruktur, Richtung des magnetischen Moments der SE-Ionen überträgt sich auf Fe/Co Atome

Element	J_s (T)	T_C (°C)	H_A (kOe)
$Nd_2Fe_{14}B$	1,60	313	67
$Sm_2Fe_{14}B$	1,52	347	plane
$Tb_2Fe_{14}B$	0,70	347	220
$Dy_2Fe_{14}B$	0,71	325	150



Ce



Pr



Nd



Sm



Gd



Tb



Dy



Ho



Er



Tm



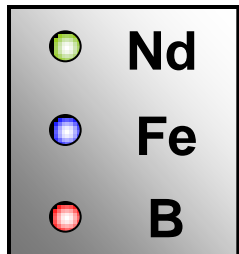
Yb



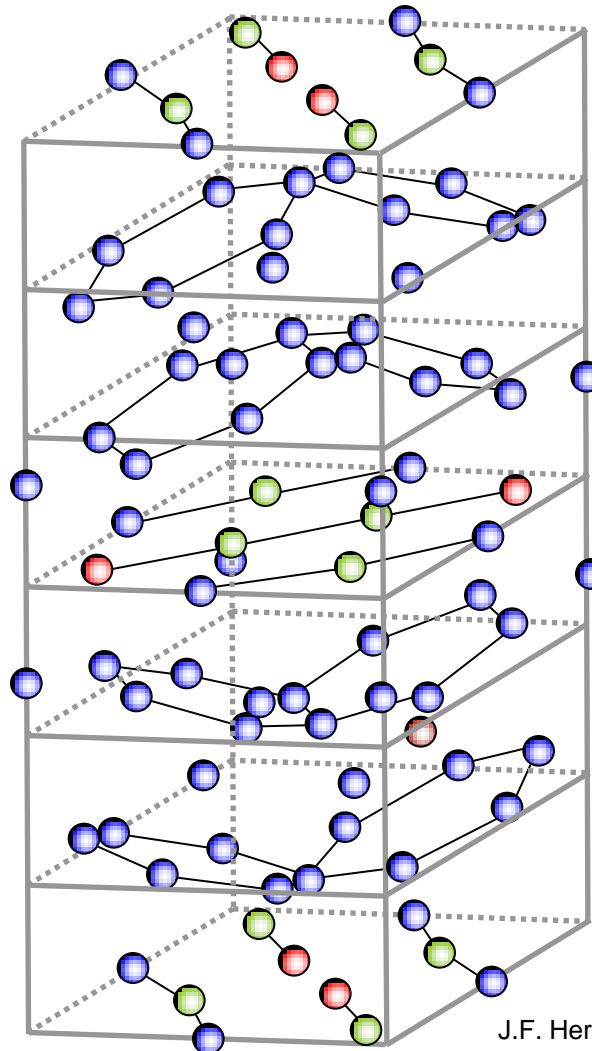
Lu

J.M.D. Coey (1996)

Kristallstruktur der intermetallischen $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Verbindung



Magnetisierungsrichtung



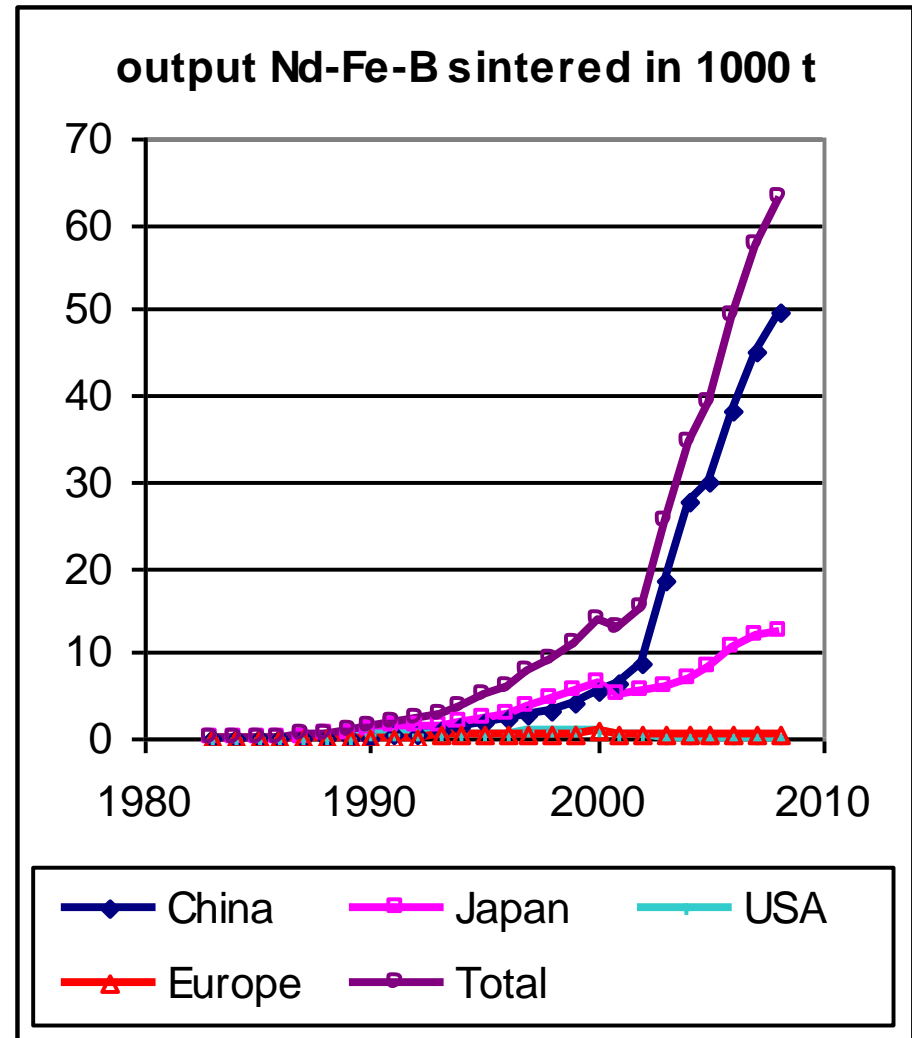
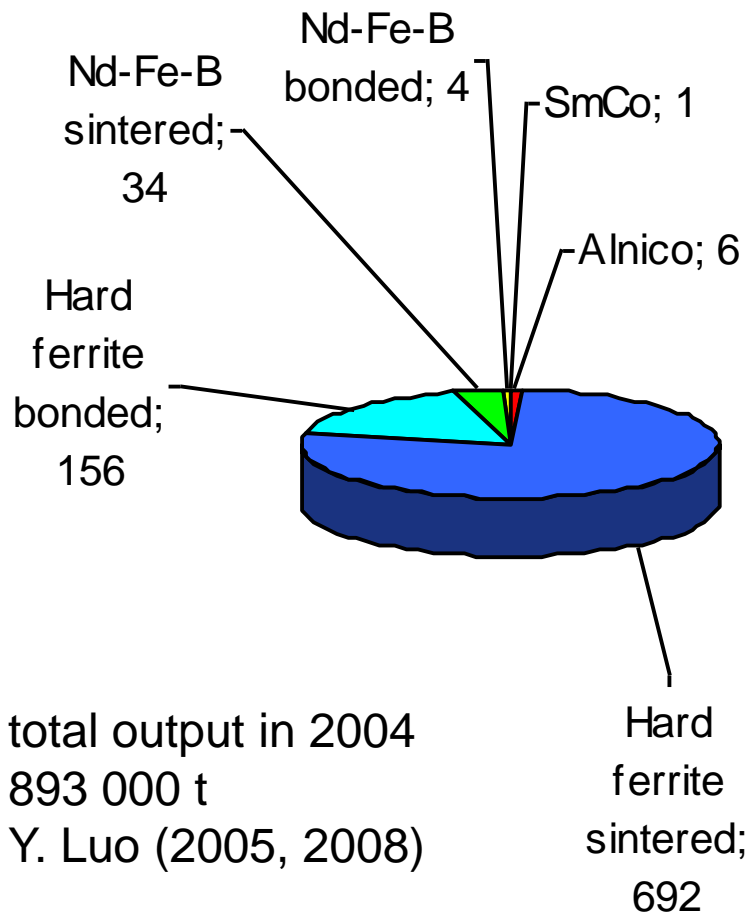
$J_s = 1,6 \text{ T}$

Nd ↔ Dy, Tb, Pr,
zur Erhöhung von H_{cJ}

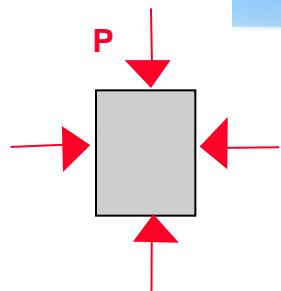
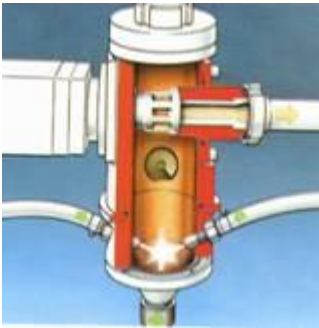
Fe ↔ Co
zur Erhöhung von T_C
und Verbesserung der
Korrosionsstabilität

J.F. Herbst and W.B. Yelon, J. Appl. Phys. **60** (1986) 4224

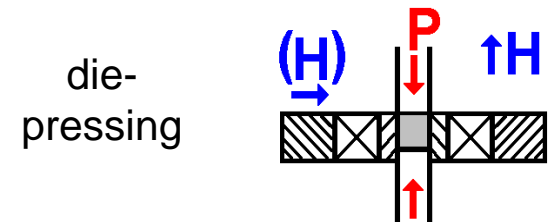
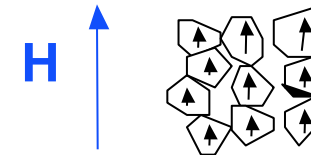
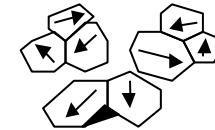
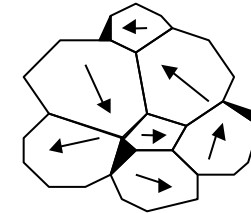
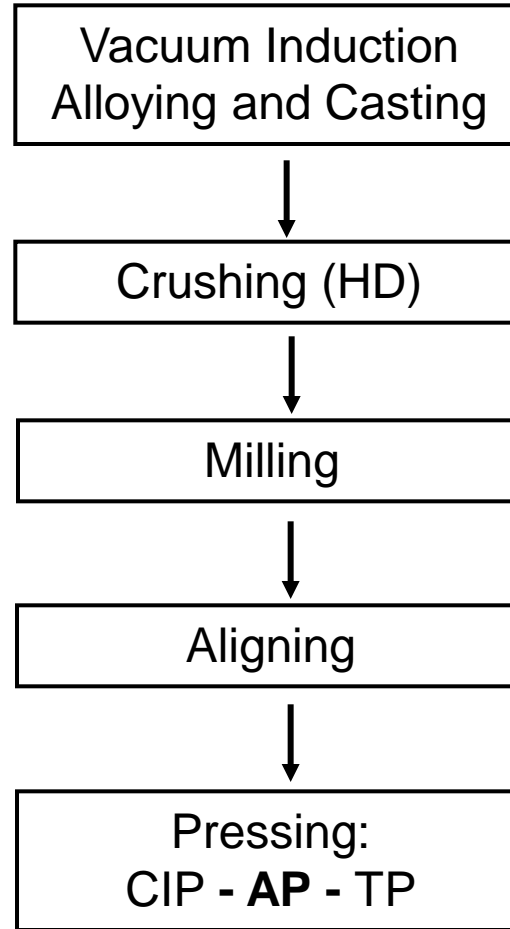
Weltproduktion von industriellen Dauermagneten



Powder Metallurgical (PM) Processing of Rare Earth Magnets

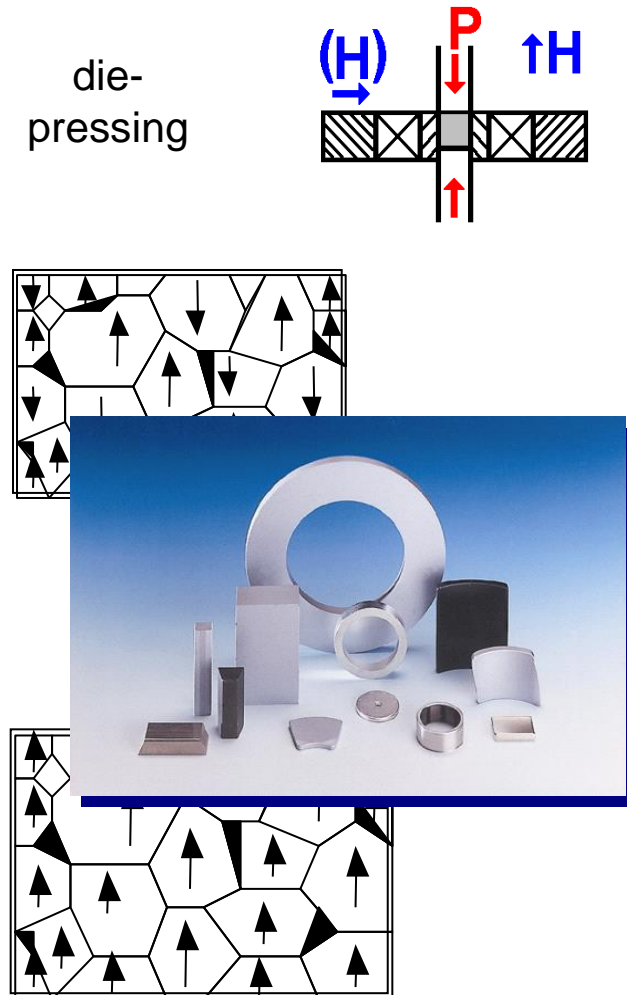
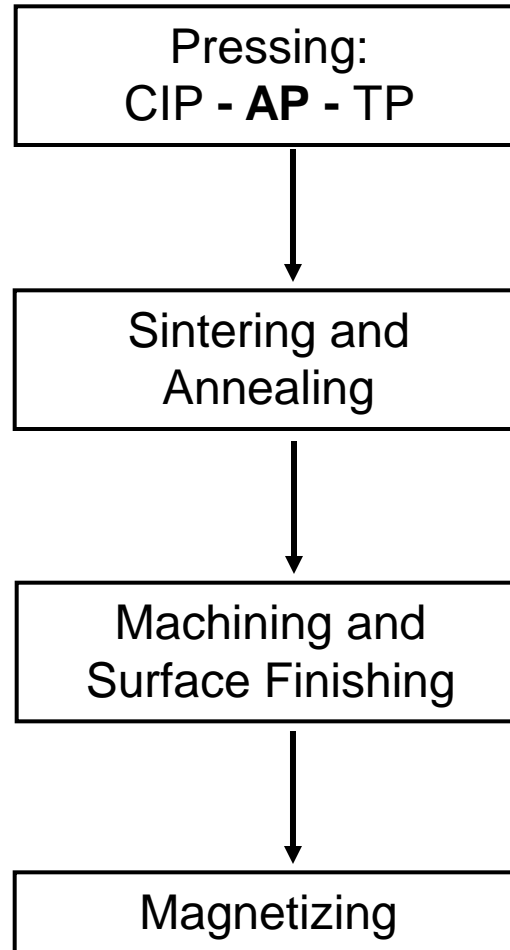
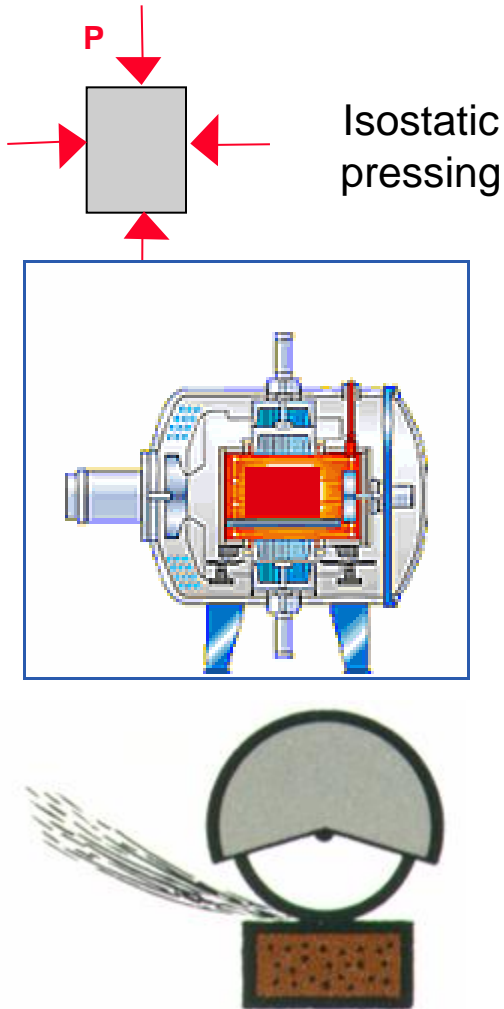


isostatic
pressing

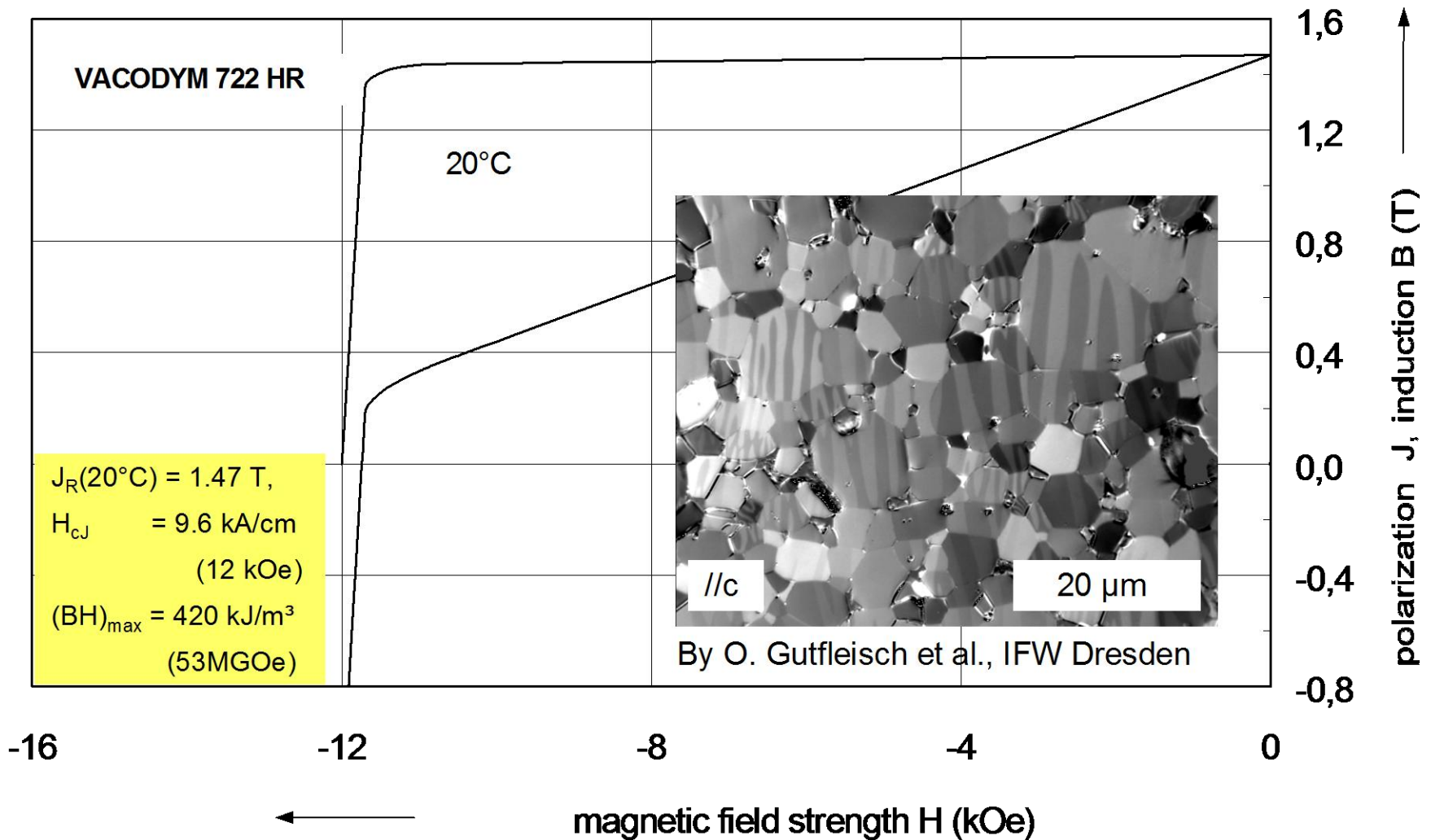


die-
pressing

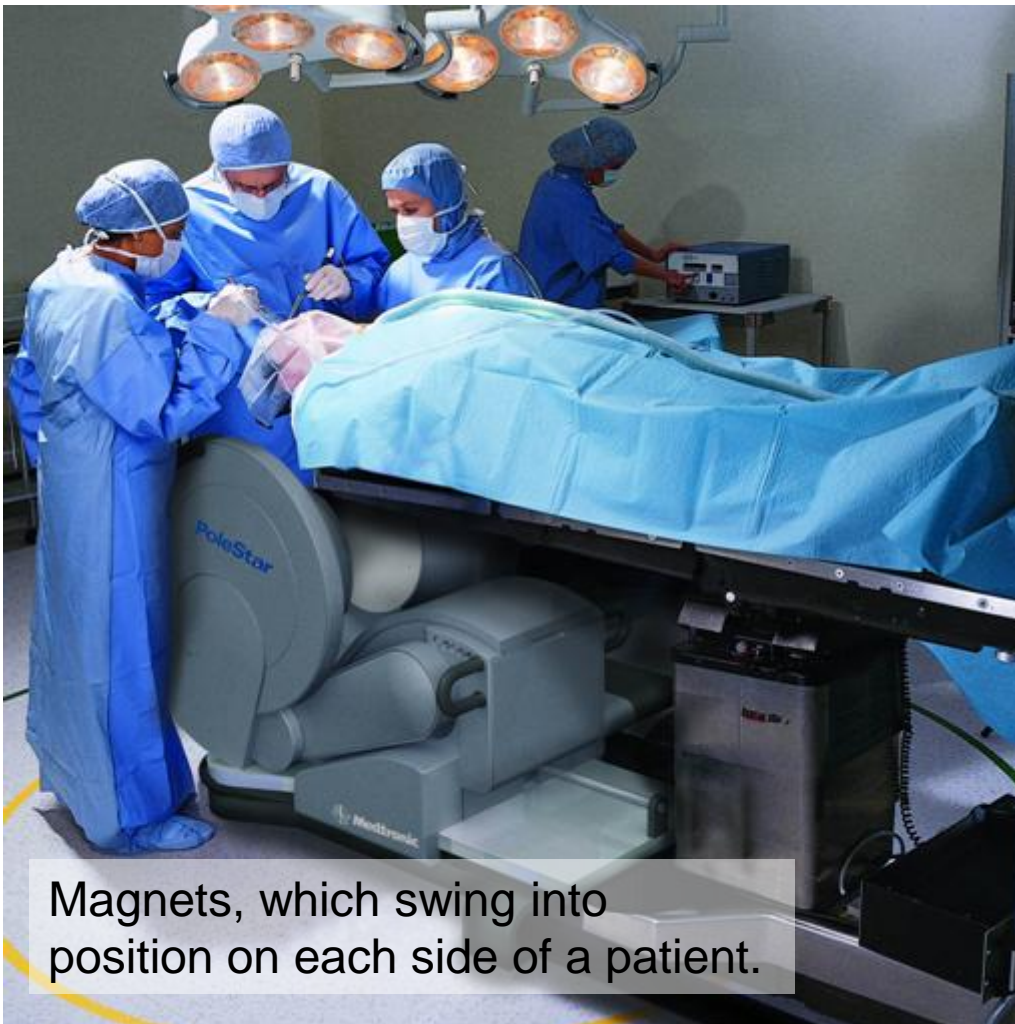
Powder Metallurgical (PM) Processing of Rare Earth Magnets



Eigenschaften und Gefüge von VACODYM 722 HR



Intraoperativ Magnetic Resonance Imagine

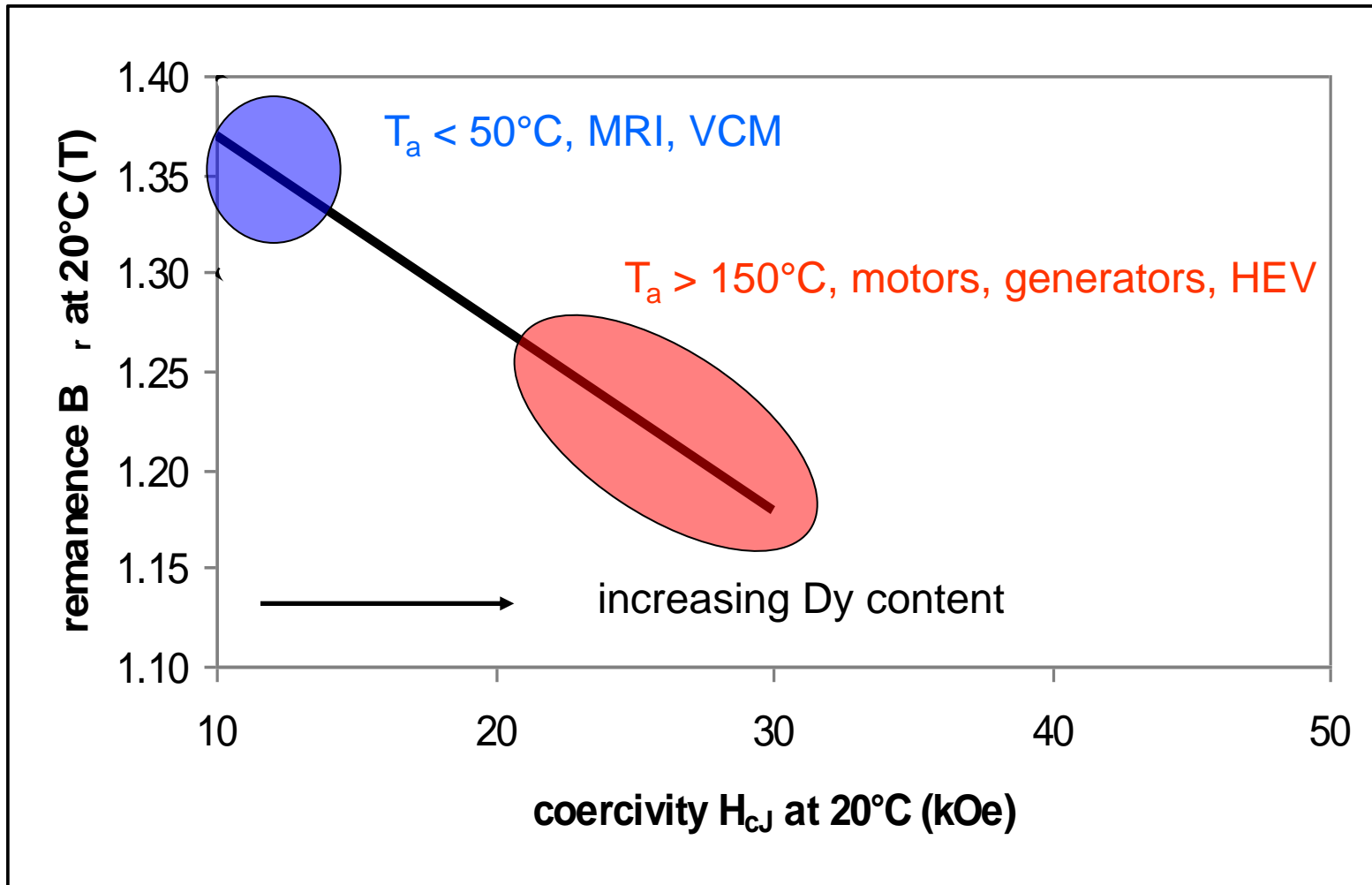


Magnets, which swing into position on each side of a patient.

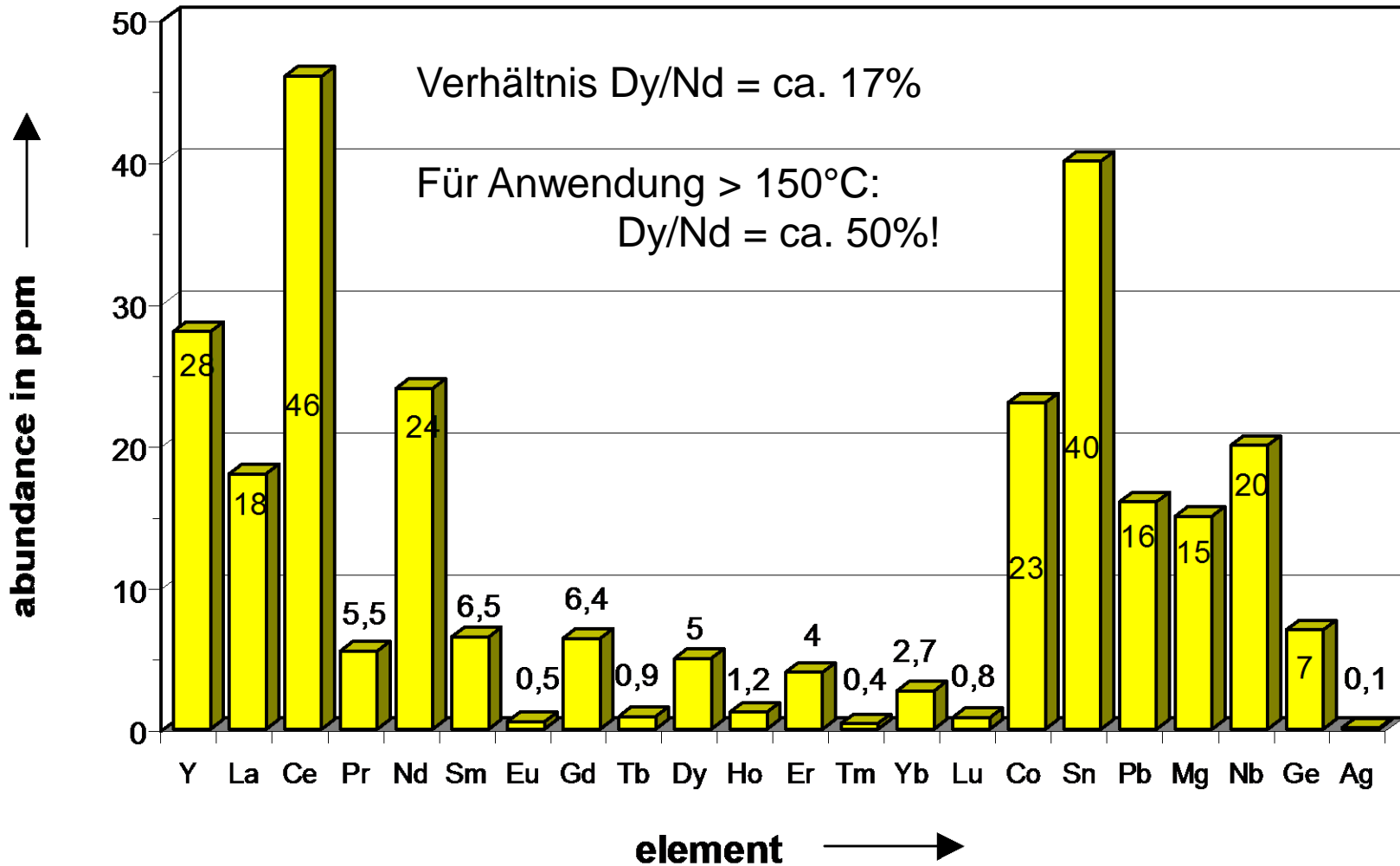


www.odinmed.com

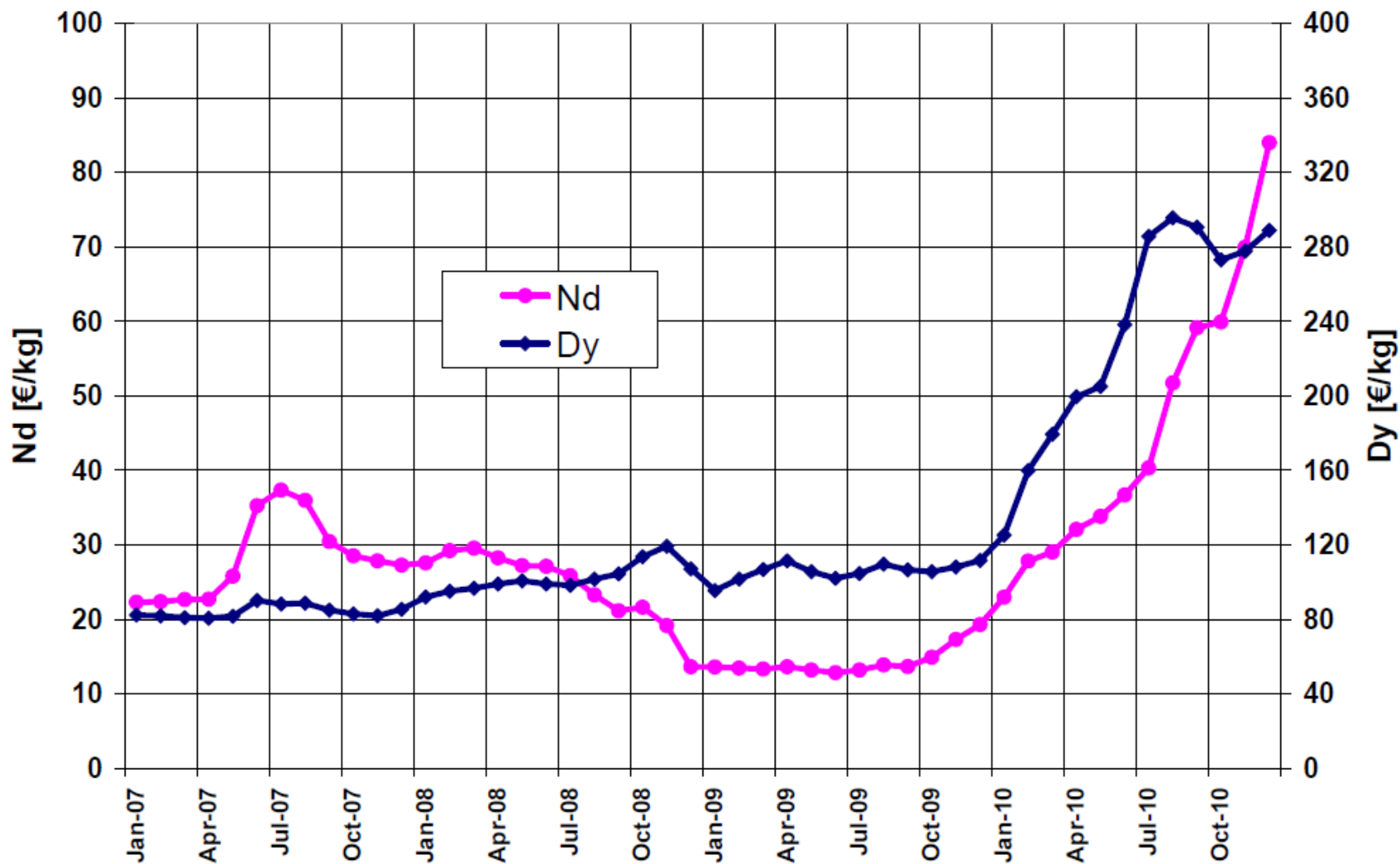
Hoher Dy-Gehalt für hohe Anwendungstemperatur



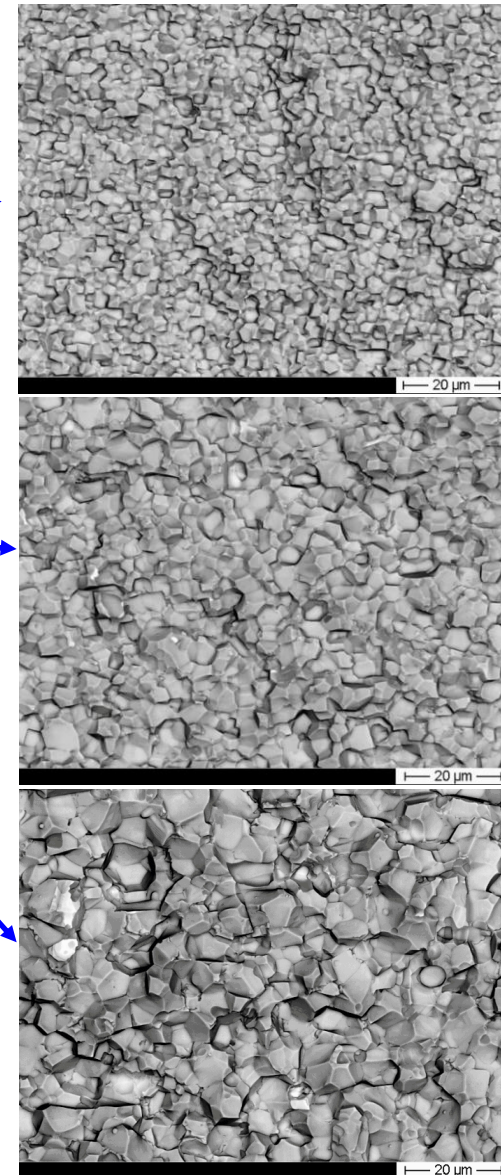
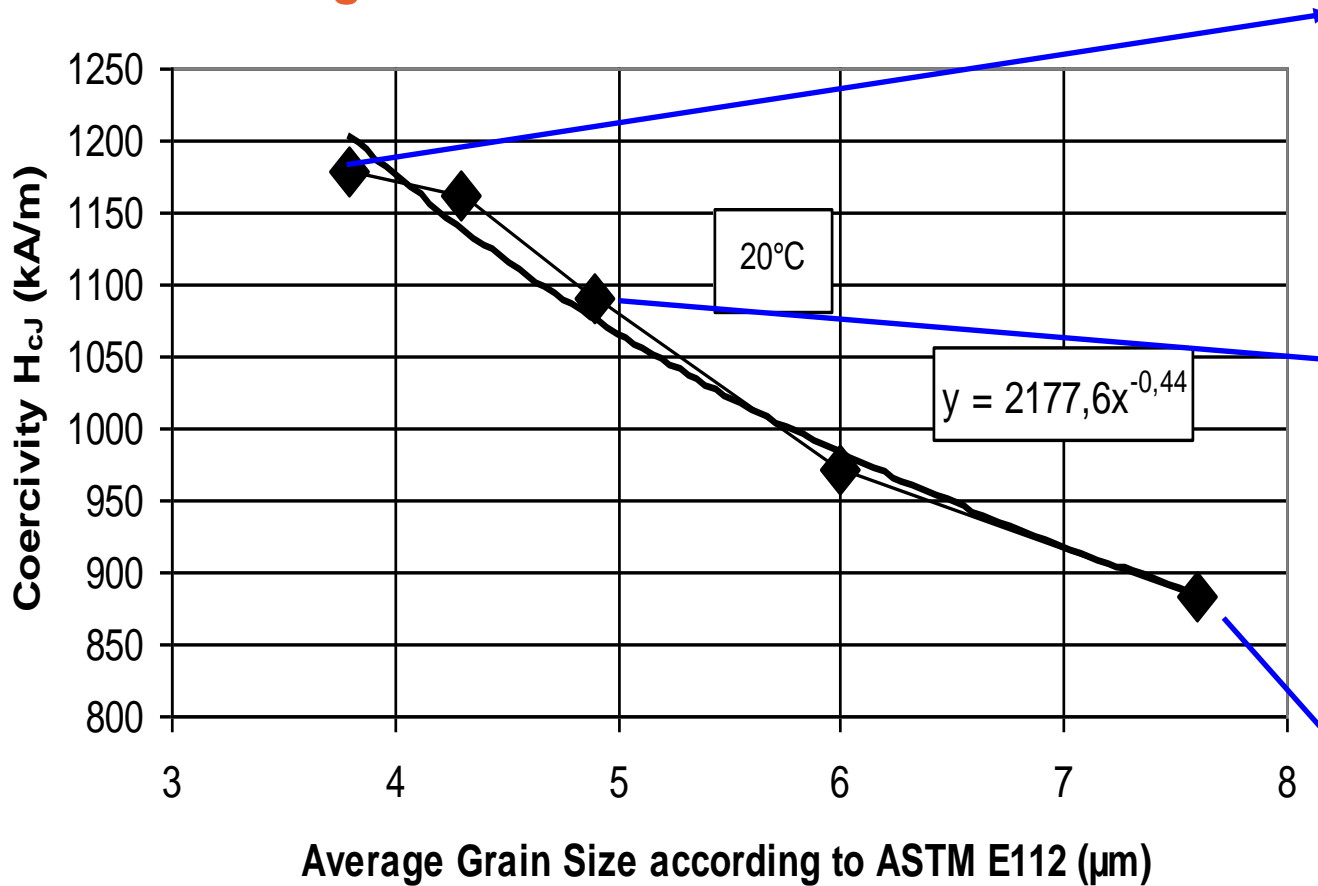
Anteil in der Erdkruste



Rohstoffpreise für Nd und Dy

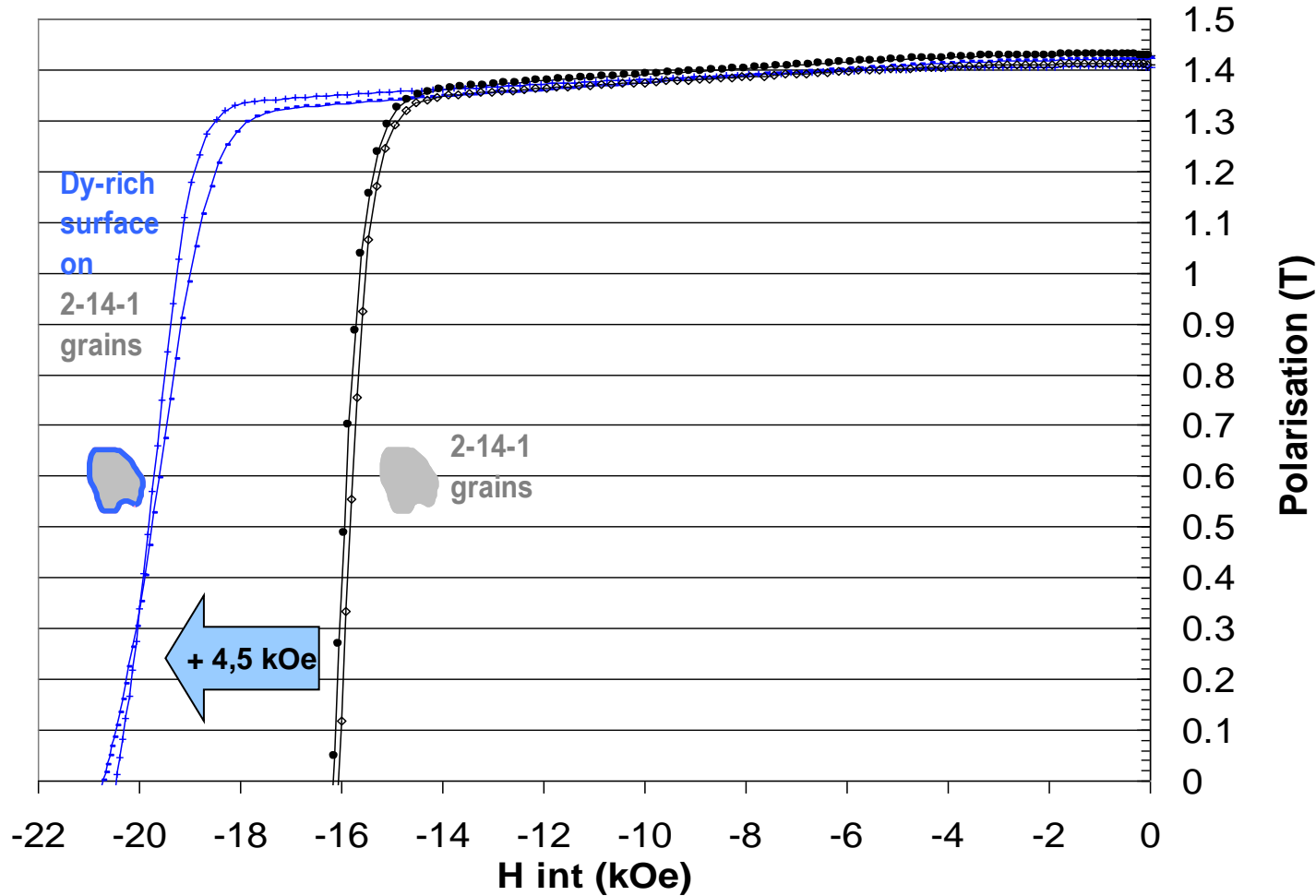


Coercivity of $\text{Nd}_{14.3}\text{Fe}_{78.9}\text{TM}_{1.2}\text{B}_{5.6}$ (TM = Co, Cu, Al, Ga) for various grain sizes

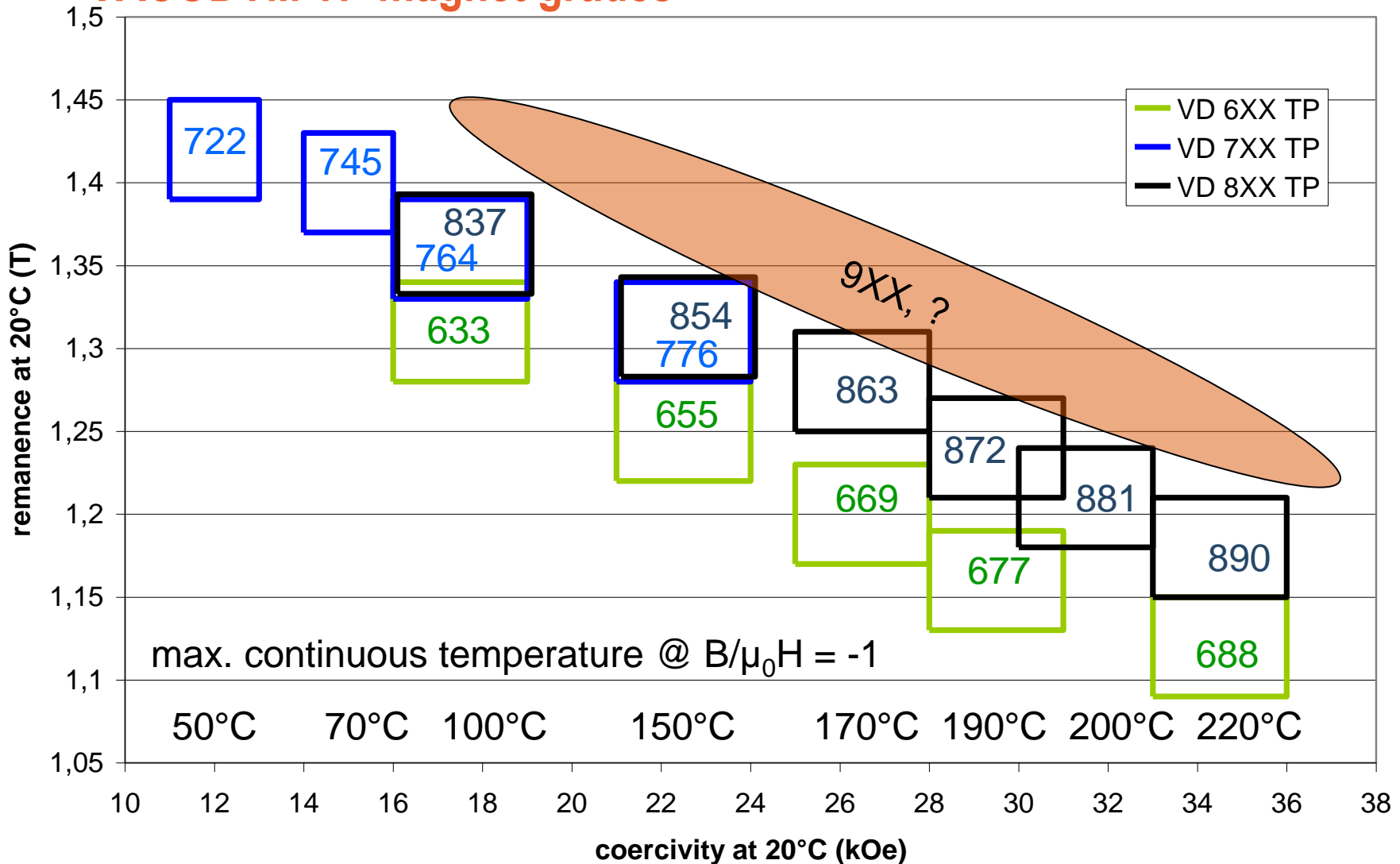


K. Üstüner, Intermag 2006

Improvement of H_{cJ} by Dy-diffusion



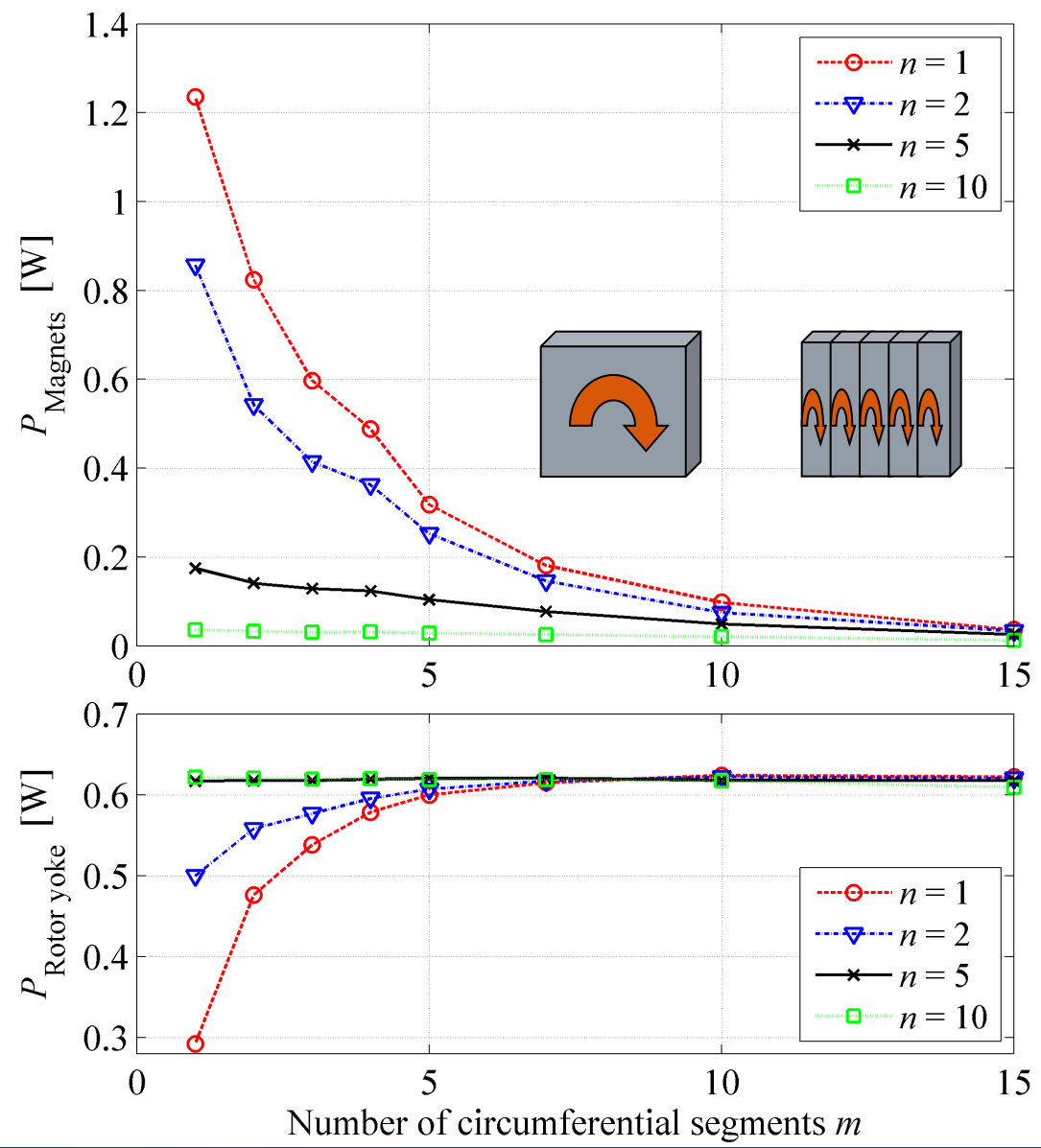
VACODYM TP magnet grades



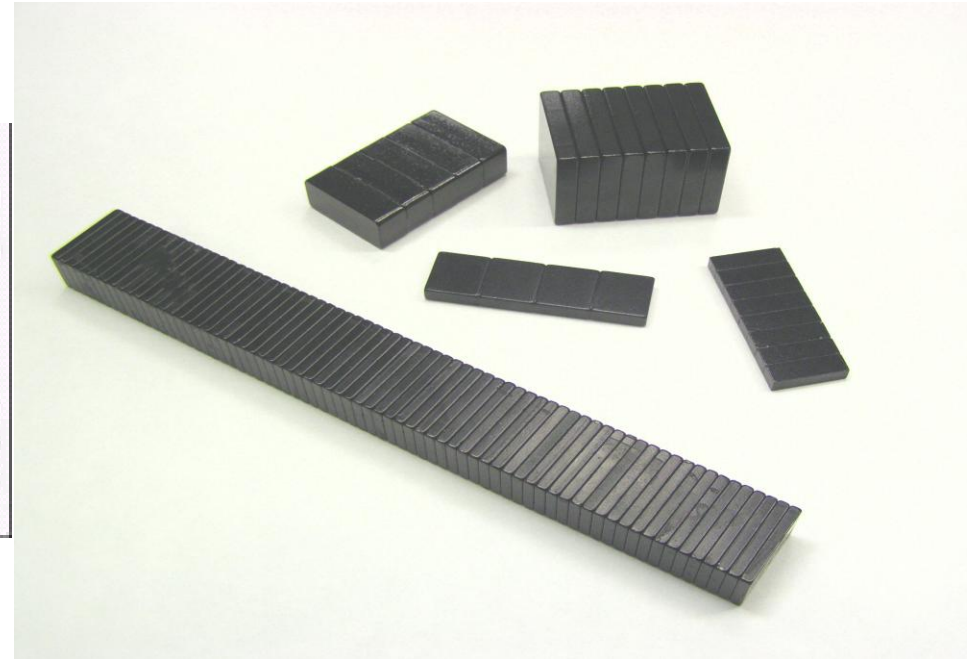
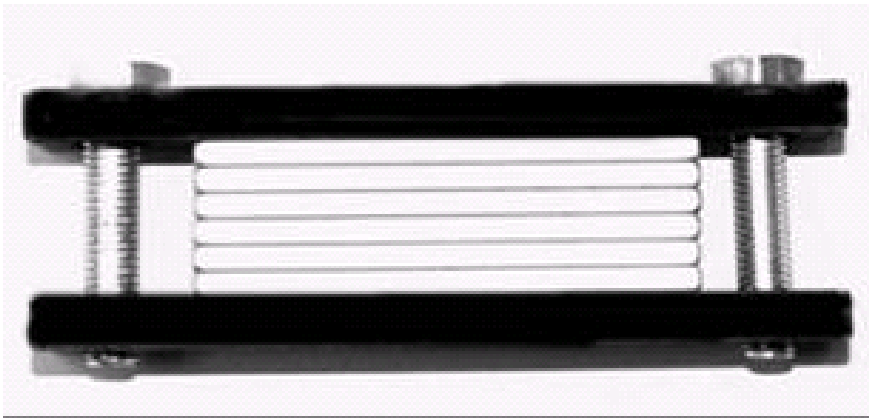
reduction of eddy current losses due to segmentation

- ➔ lower temperature
- ➔ less Dy required
- ➔ higher remanence
- ➔ smaller magnets
- ➔ higher efficiency

P. Sergeant,
 A. Van den Bossche
 University of Gent, 2008



new process: bonding with coat

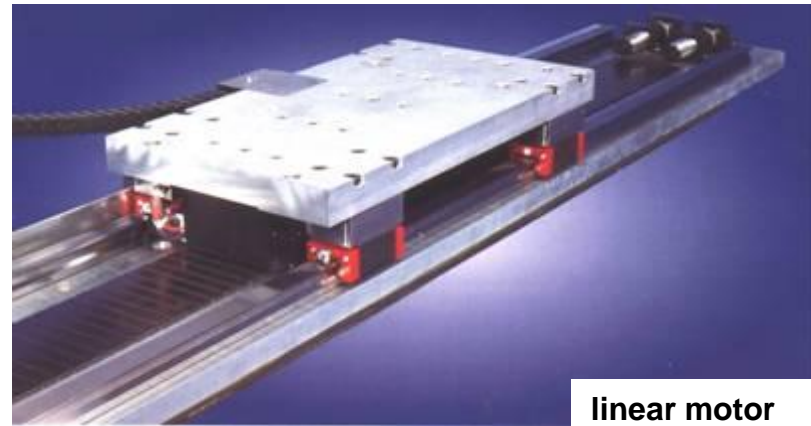
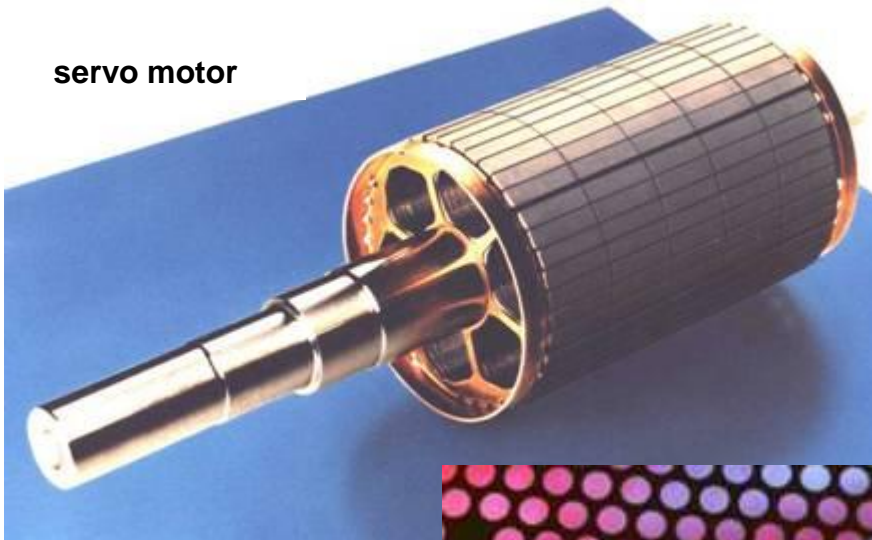


Vacuumschmelze's newly developed and patented coating and gluing process:

- VACCOAT 20011 simultaneously acts as:
1. corrosion protective coating
 2. glue
 3. electrical insulation

Motors and Actuators

servo motor



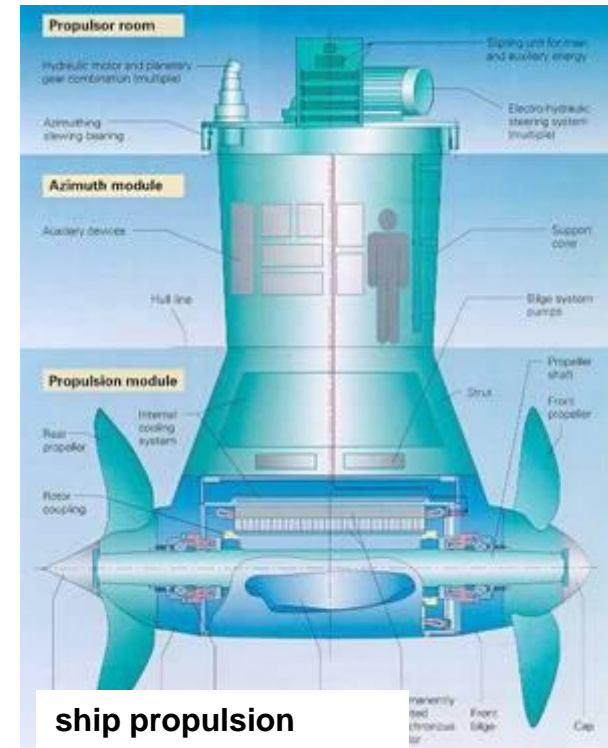
linear motor



mini motor



Disk-Drive



Marktentwicklung für Nd-Fe-B Mangete

Toyota
Prius

Hybrid Electric Vehicles (HEV)



Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010
WW demand [Tons]	825	1305	1515	1770	2700	3375

application: generators for wind mills



- No gearbox
- Diameter of 5 MW-generator ring: ~8.0m
- Permanent magnet and electrical excitation in competition (superconducting up to 10 MW)
- + Reliability (gearbox is completely eliminated)
- + Less maintenance
- Weight (heaviest solution with electric excitation)
- Electric excitation with brushes

Zusammenfassung

- magnetische Anisotropie der Seltenerd-Atome ist für hohe Gegenfeldstabilität moderner Dauermagnete verantwortlich und unabdingbar
- Dy und Tb erhöhen die Gegenfeld- und damit die Temperaturstabilität von $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
- in 2008 ca. 60,000 t Nd-Fe-B Sintermagnete und 1,000 t Sm-Co produziert
- Rohstoffpreise für Nd und Dy seit 2007 um Faktor 4 gestiegen
- Entwicklungstrends zur Einsparung von Dy:
 - feines Gefüge, Dy-Diffusion, segmentierte Magnete
- Hauptanwendung: Motoren und Generatoren aller Art
- Windkraft und HEV/EV mit steigender Tendenz