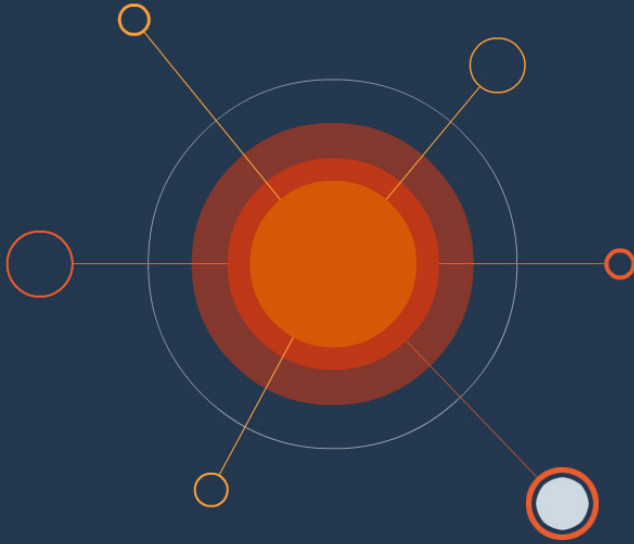


materials valley workshop "Metallische Massivgläser"

28. April 2011



# Amorphe metallische Folie als weichmagnetisches Material

**VAC**  
VACUUMSCHMELZE

Dr. Joachim Gerster  
*Vacuumschmelze GmbH & Co. KG*



# Historie

## Meilensteine in der Unternehmensgeschichte

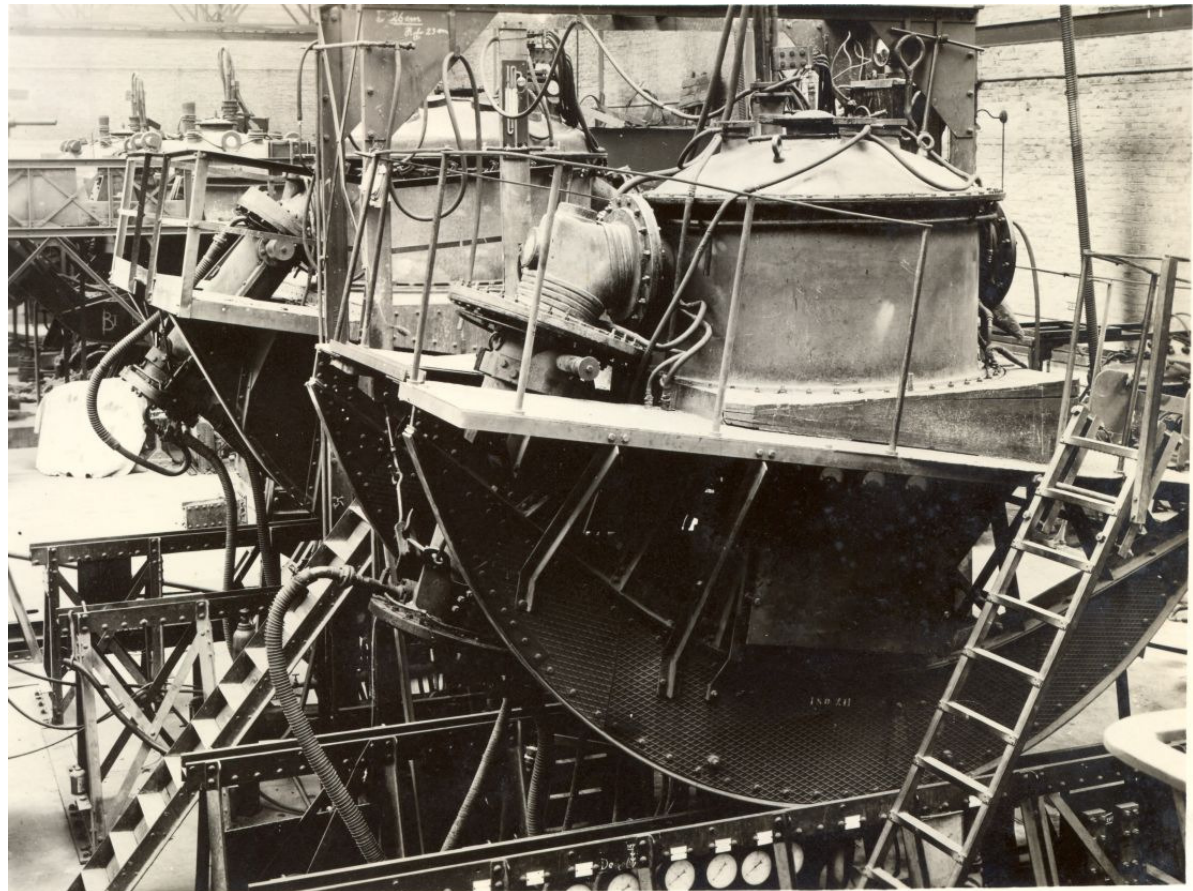


**1914-1922** Erste Versuche und Patentanmeldungen, „Erschmelzen unter Vakuum“ bei W.C. Heraeus GmbH

**1923** Gründung der Heraeus-Vacuumschmelze AG

**1933** Siemens & Halske AG übernimmt die Aktienmehrheit

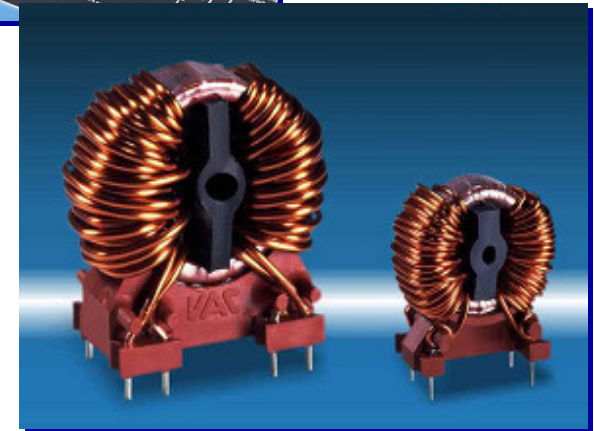
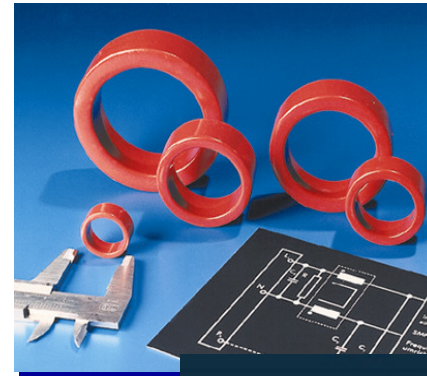
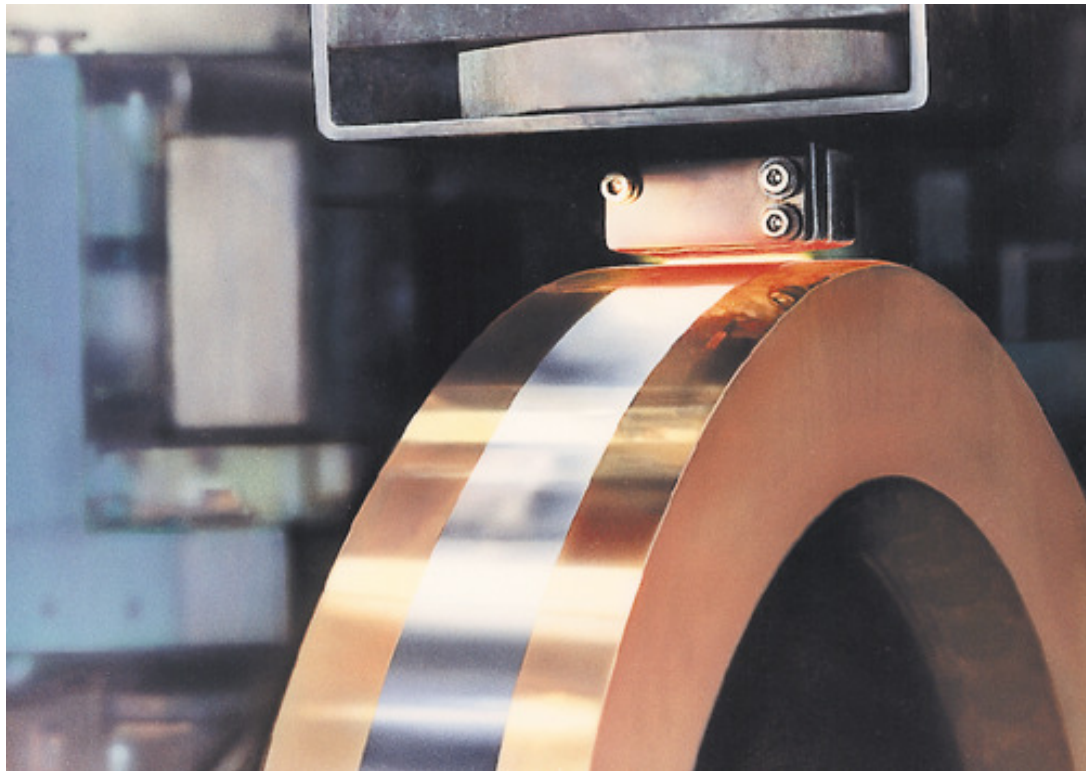
**1941** Erste 50% FeNi Kerne Textur





# Historie

## Meilensteine in der Unternehmensgeschichte

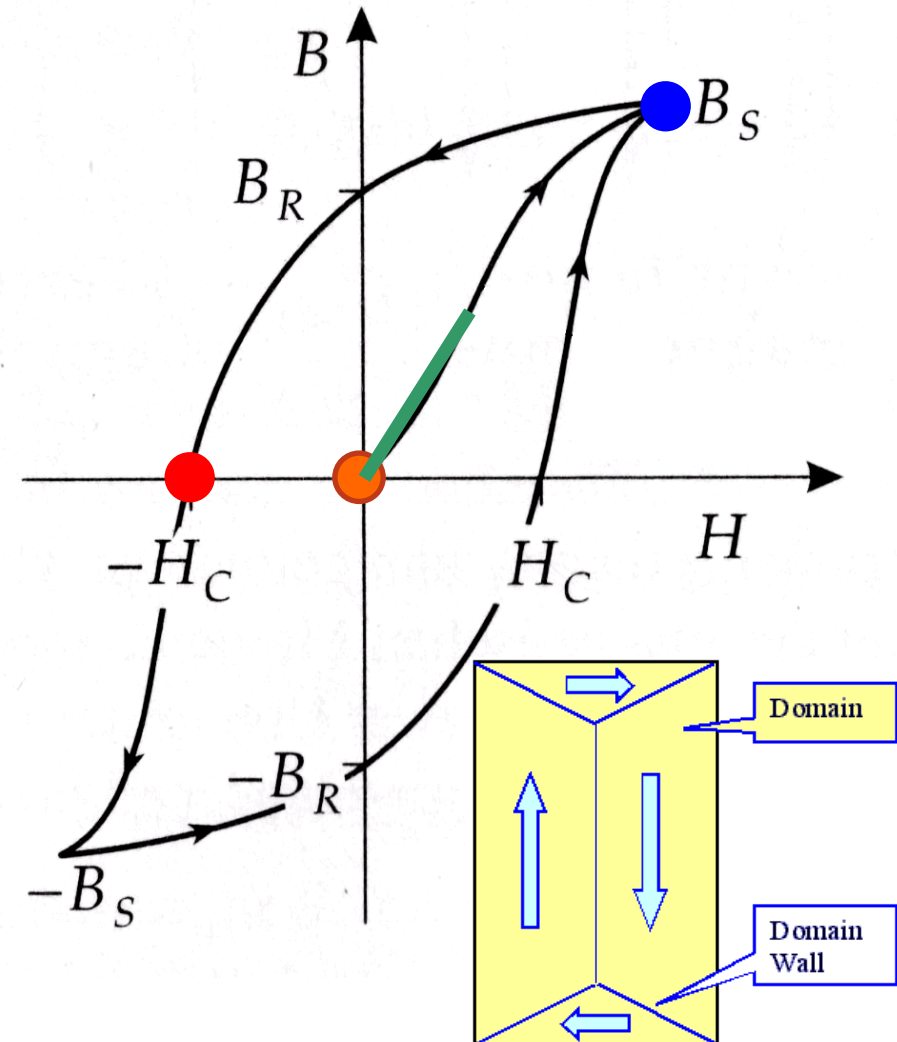


- 1973** Markteinführung der Selten-Erd-Dauermagnete VACOMAX®
- 1979** Markteinführung der amorphen Metalle VITROVAC®
- 1992** Markteinführung der nanokristallinen Legierung VITROPERM®
- 2000** Weltrekord des Abschirmfaktors für magnetisch supergeschirmte Kabine (PTB)
- 2005** dc tolerante Stromtransformatoren aus nanokristallinem VITROPERM für elektronische Energiezähler



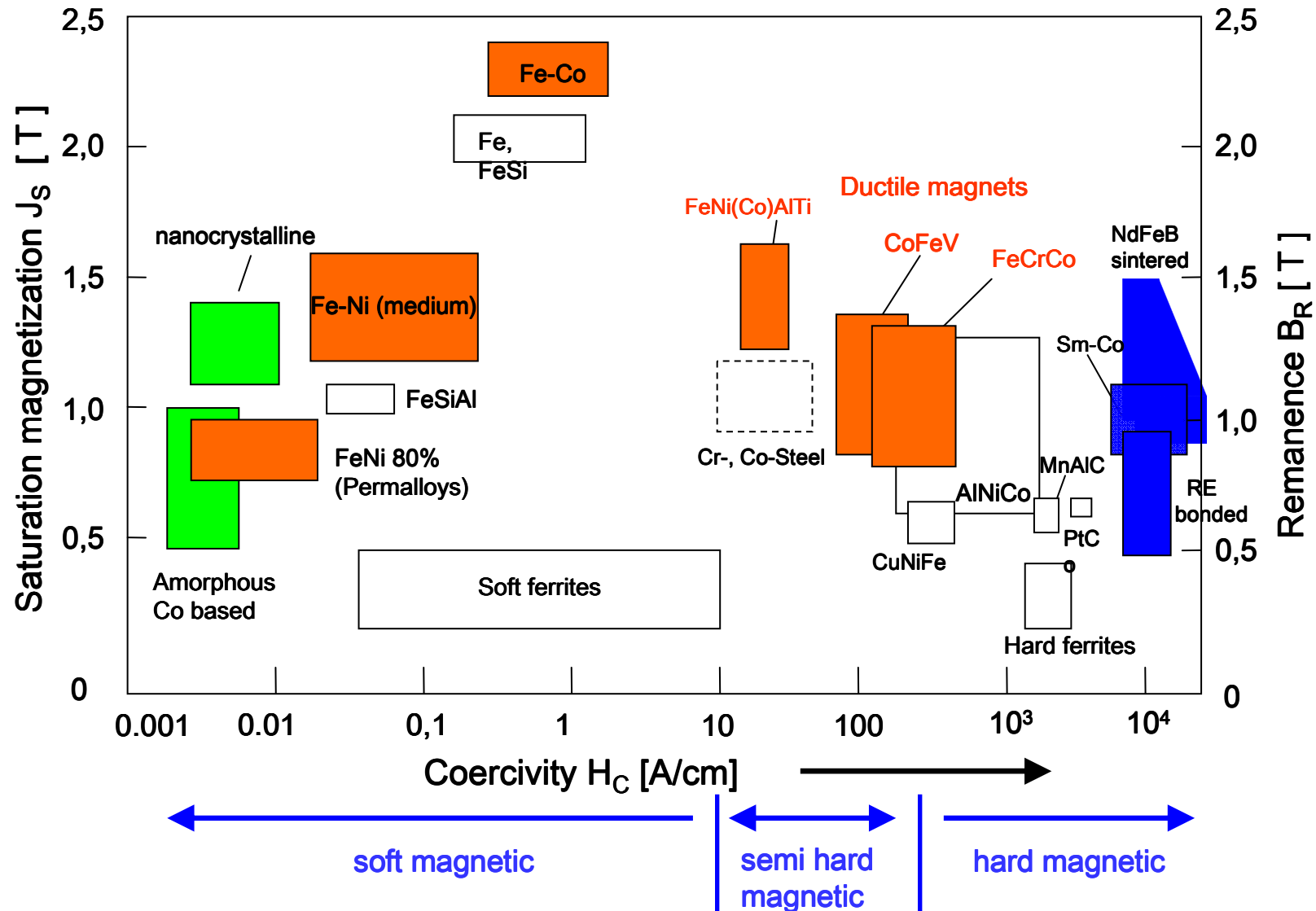
## Kenngrößen weichmagnetischer Materialien

- Induktion (B) vs. Feldstärke (H)
- Neukurve / Hystereseschleife
- Permeabilität  $\mu = B / (\mu_0 H)$
- Sättigung  $B_s$
- Remanenz  $B_r$
- Koerzitivfeldstärke  $H_c$
  
- Ummagnetisierungsverluste  $P_{Fe}(B, f)$



# Zoo der magnetischen Materialien

■ Rapid Solidification    
 ■ Rolling Process    
 ■ Powder Route





- **Basics**
- **Weichmagnetische Legierungen:  
kristallin → amorph → nano-kristallin**
- **Rundschau**



## Anforderungen an ein weichmagnetisches Material:

- 1) hohe Sättigungspolarisation  $J_s$
- 2) hohe Permeabilität  $\mu$  bzw. einstellbare Hystereseschleife
- 3) niedrige Koerzitivfeldstärke  $H_c$
- 4) niedrige Ummagnetisierungsverluste  $p_{\text{tot}}$



## 1) hohe Sättigungspolarisation

Beispiel: kristallines binäres Legierungssystem FeCo

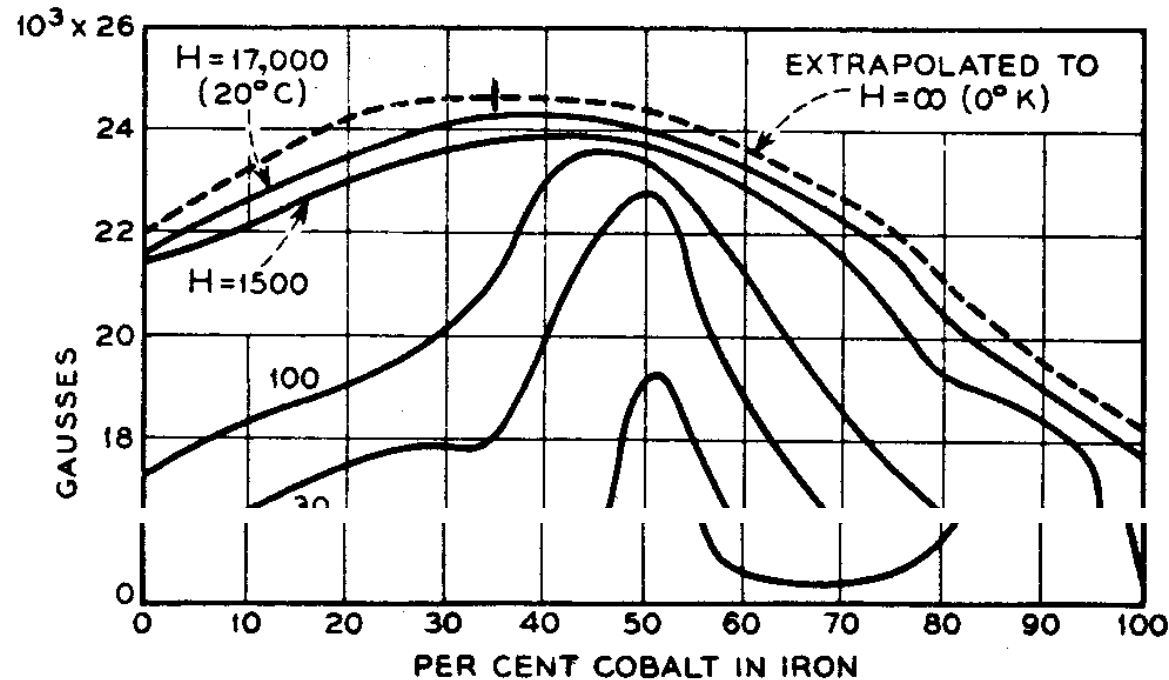


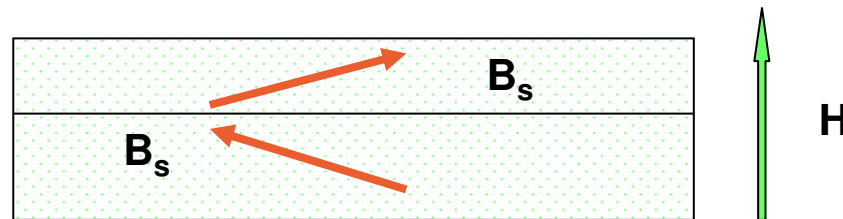
FIG. 6-4. Intrinsic induction of annealed iron-cobalt alloys at various field-strengths.

R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*

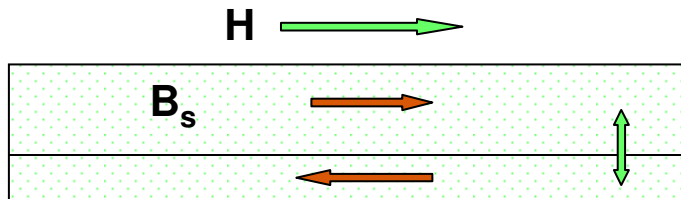


2) hohe Permeabilität  $\mu$ ; 3) niedrige Koerzitivfeldstärke  $H_c$

**easy rotation of magnetization**



**easy domain wall motion**



**=> material isotropic and homogeneous**

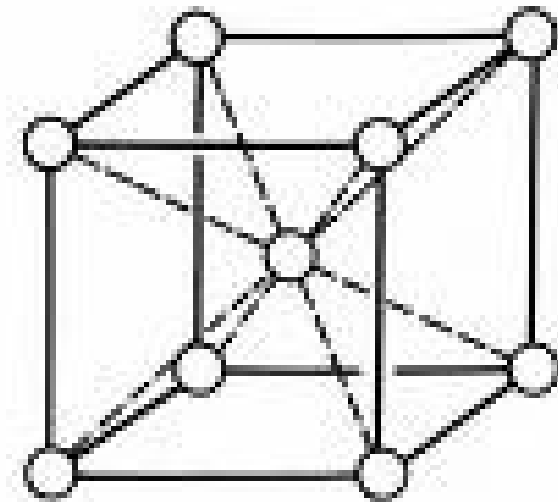
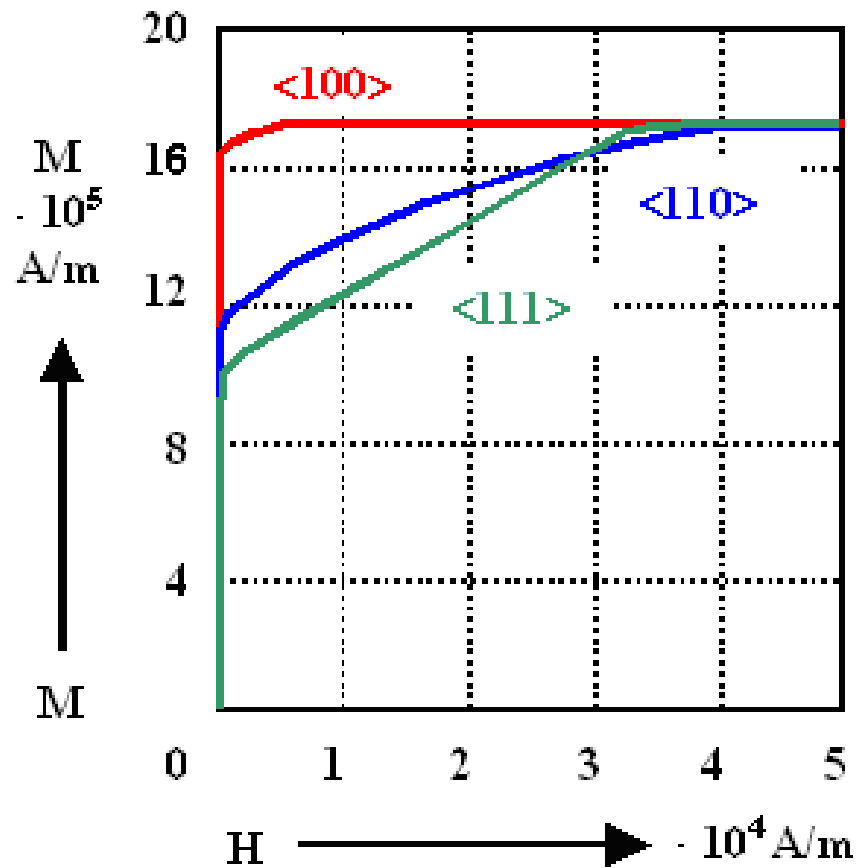
**=> low magnetocrystalline anisotropy**

$K_1$

**=> low magnetoelastic energy**

$3/2 \lambda_s \sigma$

## Kristall-Anisotropie von Eisen



⇒ optimale Legierungszusammensetzung, damit Kristall-Anisotropie-Energie  $K_1 = 0$



#### 4) niedrige Ummagnetisierungsverluste $p_{tot}$

$$P_{tot} = P_{hyst} + P_{ed} + P_{excess}$$

$$P_{hyst} \approx 4 \cdot H_c \cdot B_r \cdot f$$

bei Z-Schleife

$$P_{ed} = \frac{\pi^2}{6 \cdot \rho_{el}} \cdot d^2 \cdot B_{max}^2 \cdot f^2$$

$H_c$  = Koerzitivfeldstärke

$B_r$  = Remanenz

$f$  = Ummagnetisierungsfrequenz

$\rho_{el}$  = Widerstand

$d$  = Blechdicke

G.Bertotti, *General properties of power losses in soft ferromagnetic materials*, IEEE Trans. Mag. MAG-24, No.1 (1988), p.621-630

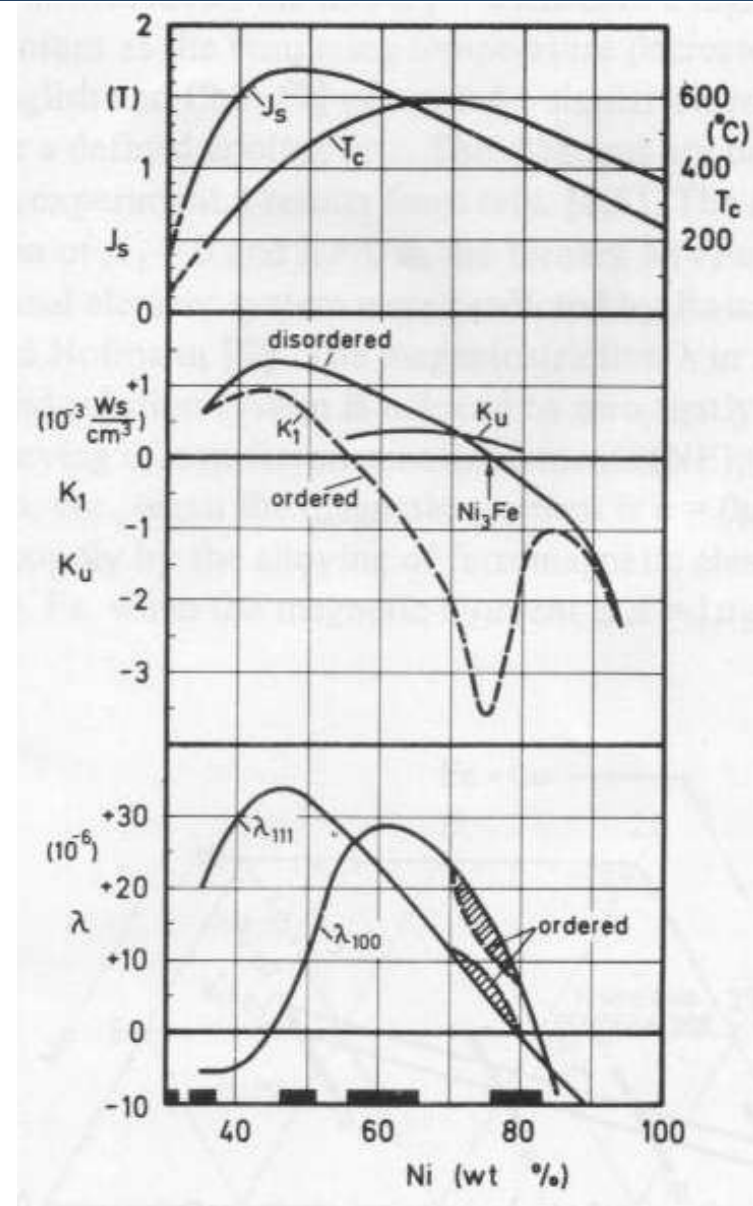
Robert C. O`Handley, *Modern magnetic materials-Principles and applications*, Wiley Interscience, ISBN 0-471-15566-7



# kristallin



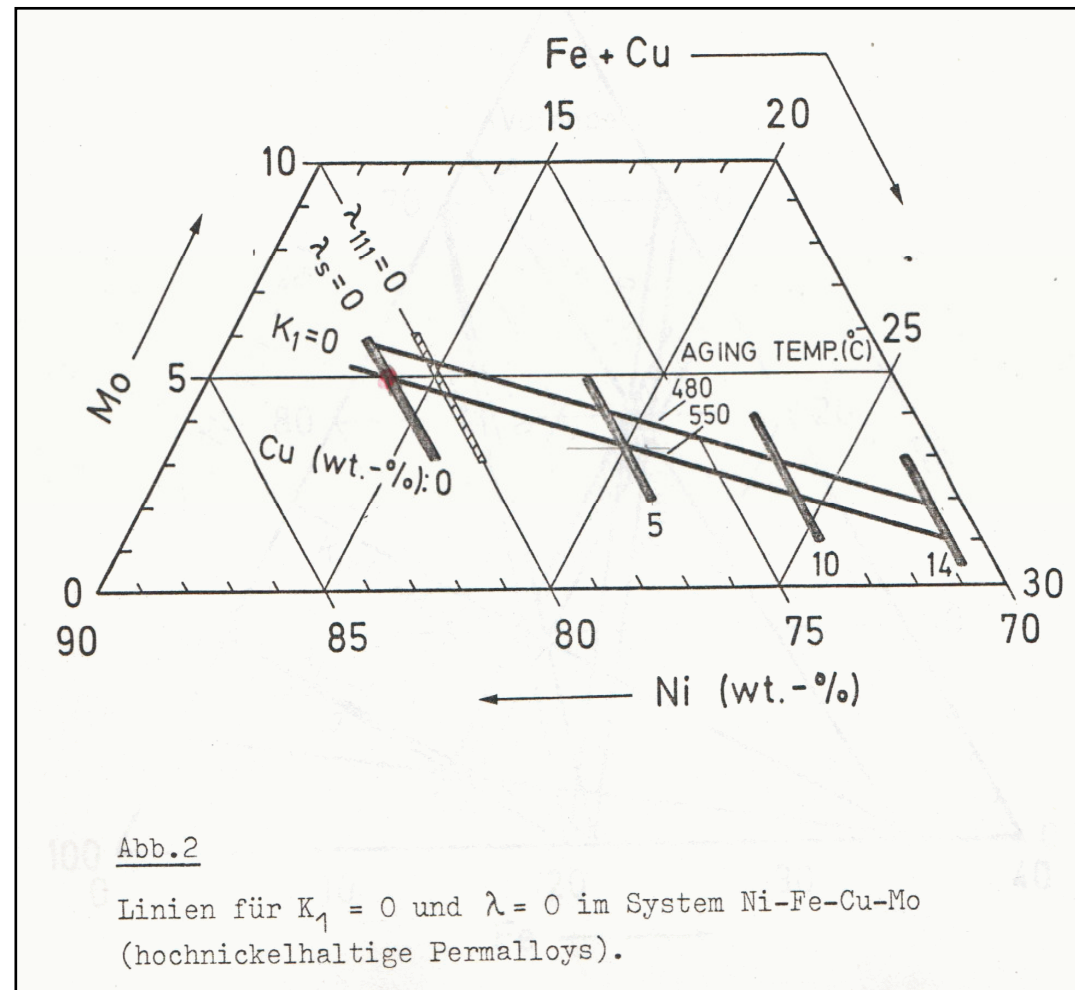
## Kristalline Legierungen am Beispiel 80Ni-Fe



F. Pfeifer and C. Radeloff  
Soft Magnetic NiFe and CoFe Alloys - Some Physical and Metallurgical Aspect  
Journal of Magnetism and Magnetic Materials JMMMM 19 (1980) 190-207



## Mo/Cu in Abhängigkeit vom Ni/Fe-Gehalt für $\lambda = 0$ und $K_1 = 0$ ( $20^\circ\text{C}$ )



F. Pfeifer and C. Radloff  
Soft Magnetic NiFe and CoFe Alloys - Some Physical and Metallurgical Aspect, Journal of Magnetism and Magnetic Materials JMMMM 19 (1980) 190-207



# amorph



## Herstellung amorpher Legierungen

Rascherstarrung

Induktionsschmelzofen

Schmelze  
(1300°C)

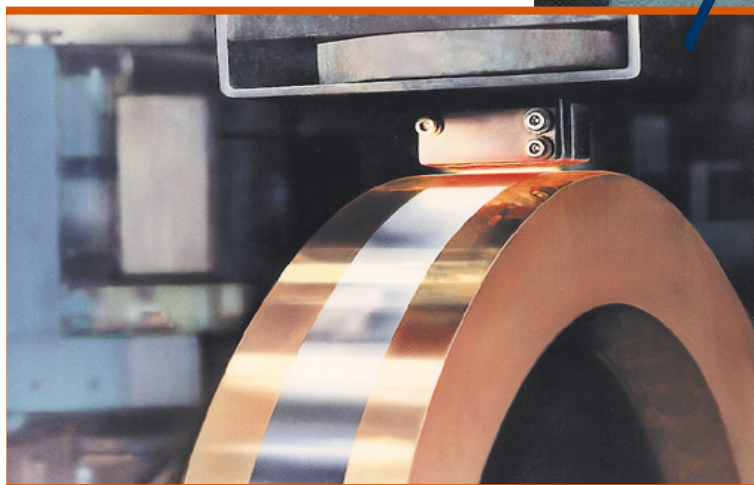
Keramikdüse

Kühlwalze  
10°C

amorphe Metallfolie  
100 km/h

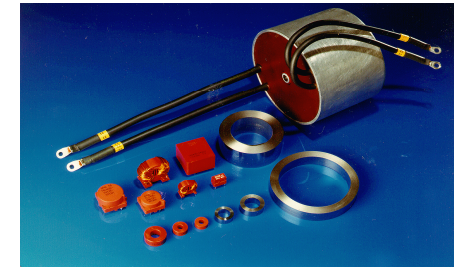
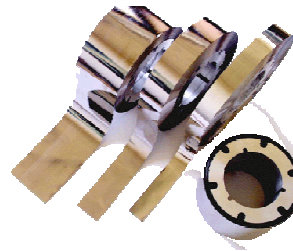
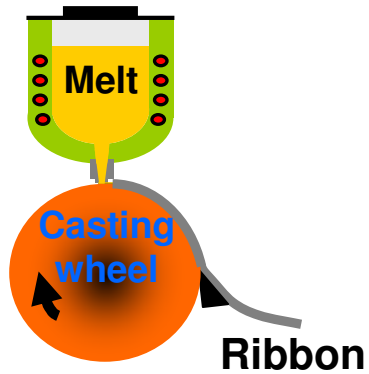
Abkühlrate  
1.000.000 K/s

20 µm dünn





# Manufacturing of VITROVAC + VITROPERM amorph nano



Rapid solidification

Slitting

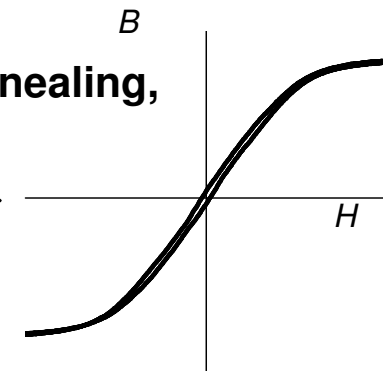
Winding + Magnetic Annealing,

Casting

Amorphous metal ribbon

Magnetic Core

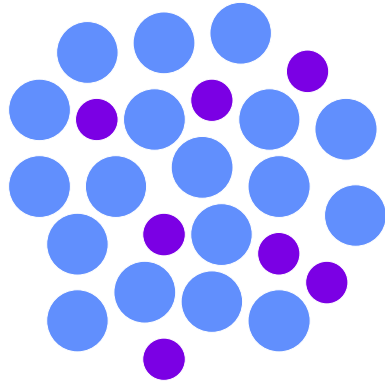
Thickness: ~ 20 $\mu$ m



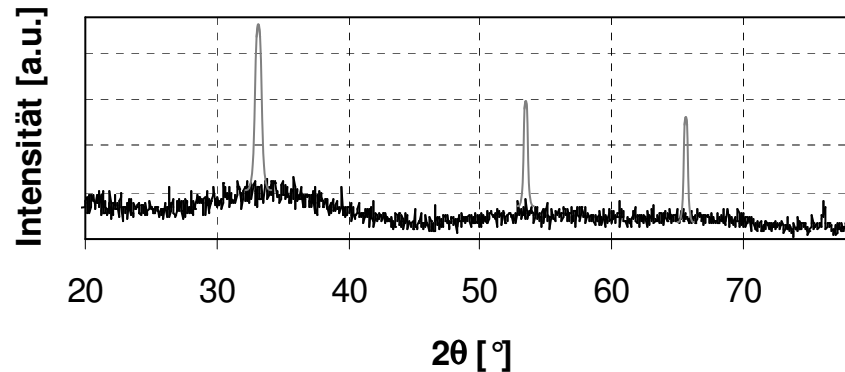
Magnetic Application



## Amorphe Struktur



Keine Fernordnung



Röntgenbeugungsbild

**=> Kristallanisotropie  $K1 \approx 0$**

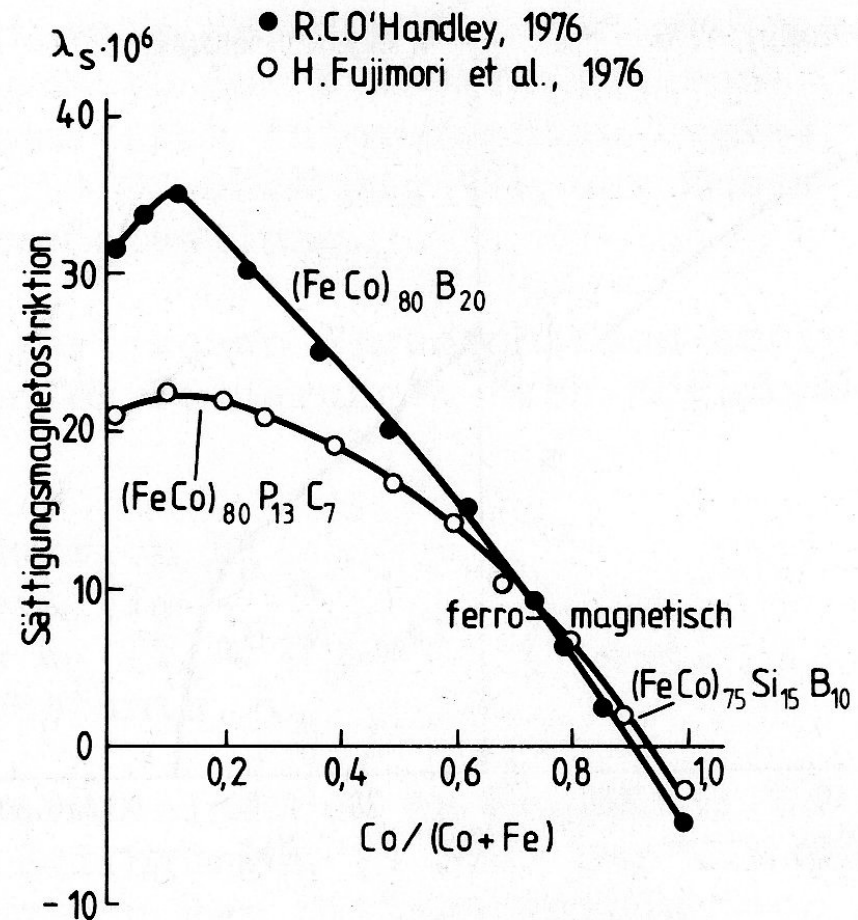
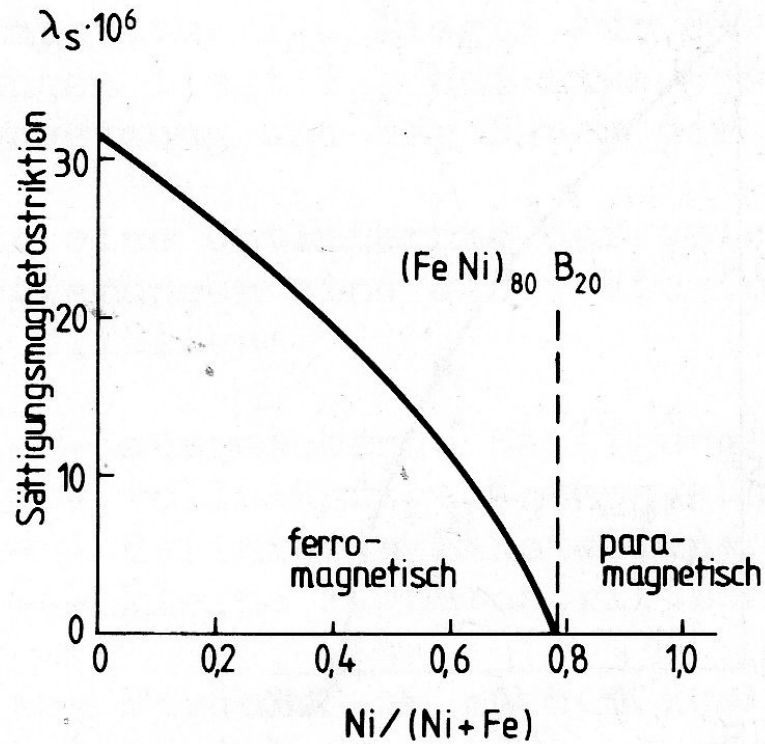
Typische Basiszusammensetzung:  $(\text{FeCoNi})_{80}(\text{SiB})_{20}$

**Eigenschaften:** hohe mechanische Festigkeit  
weichmagnetisch  
hoher elektrischer Widerstand  
dünnes Band



# Magnetostriction $\lambda_s$ in amorphous alloys

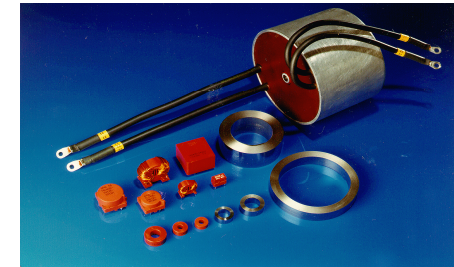
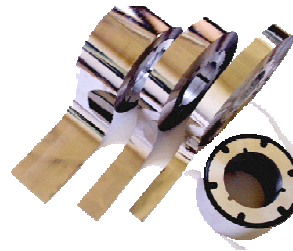
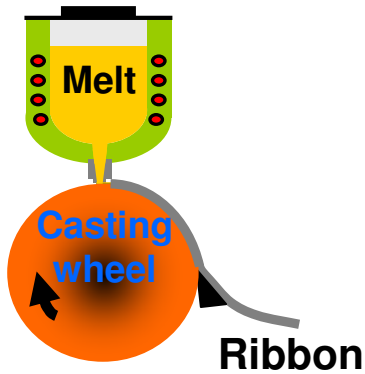
R.C.O'Handley, 1976





# nano-kristallin

# Manufacturing of VITROVAC + VITROPERM amorph nano



Rapid solidification

Slitting

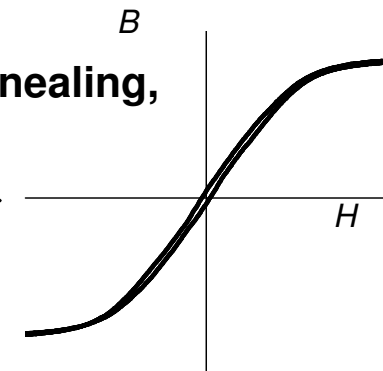
Winding + Magnetic Annealing,

Casting

Amorphous metal ribbon

Magnetic Core

Thickness: ~ 20 $\mu$ m

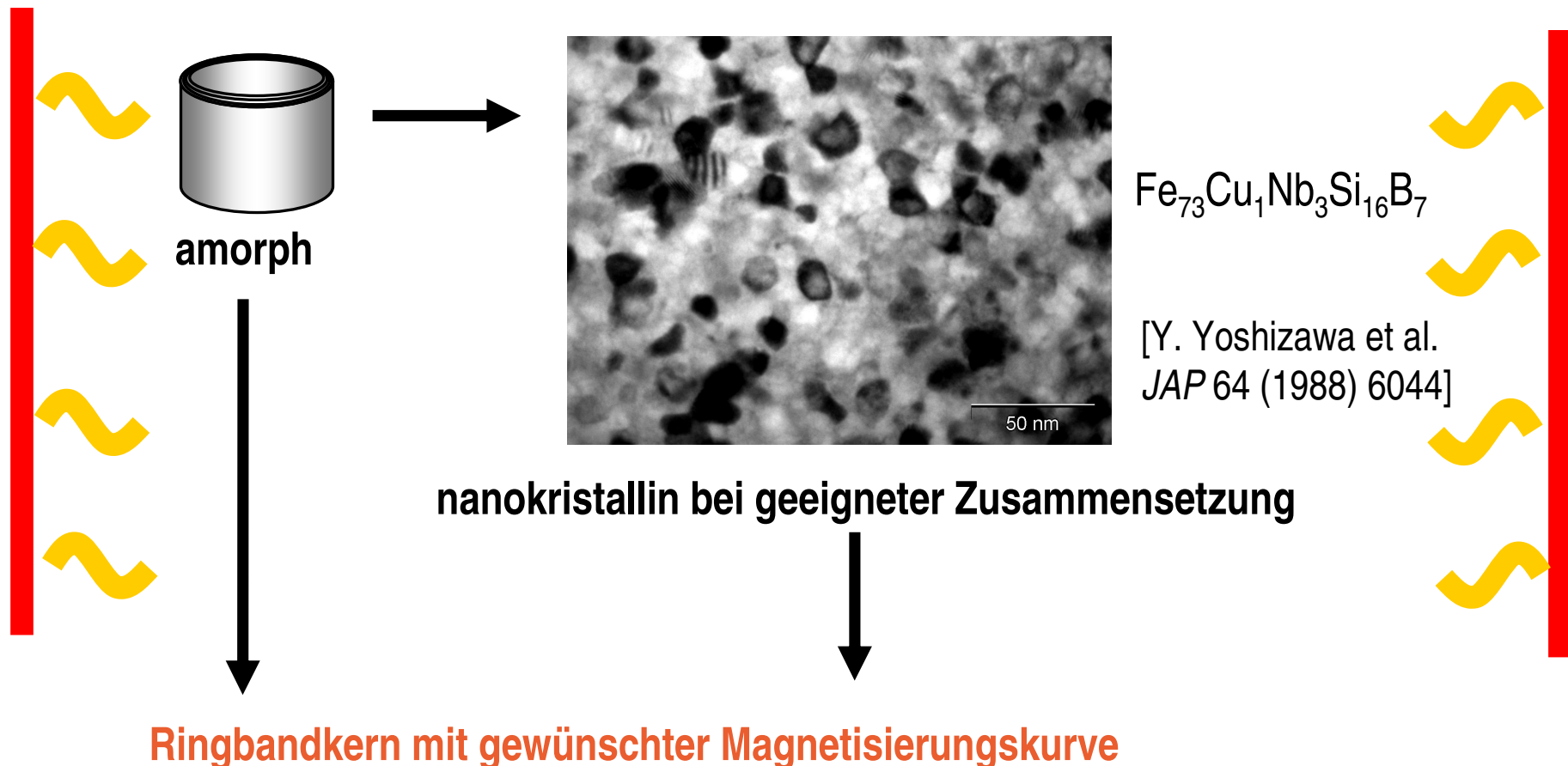


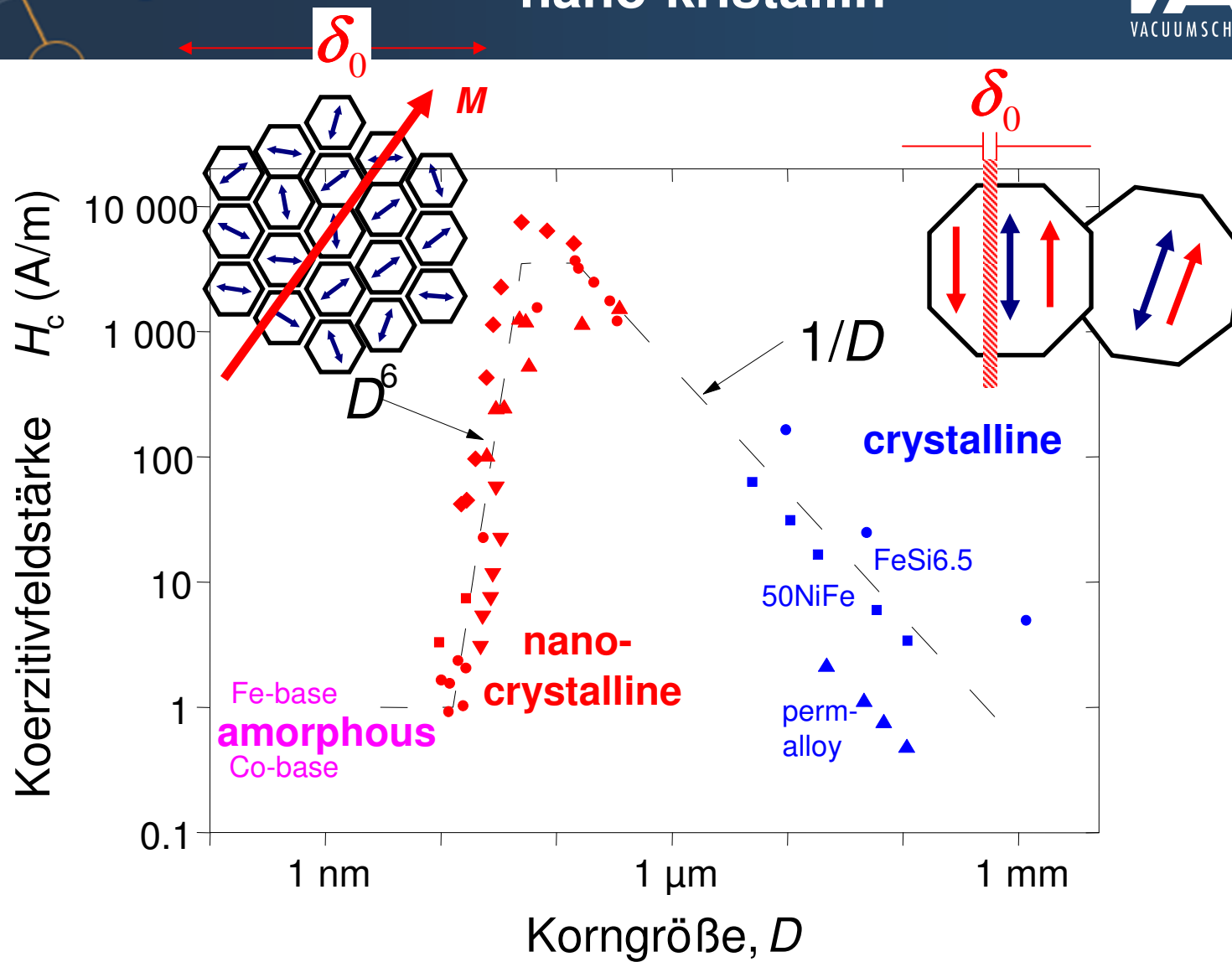
Magnetic Application



## Wärmebehandlung

Einstellung des Gefüges und Optimierung der weichmagnetischen Eigenschaften





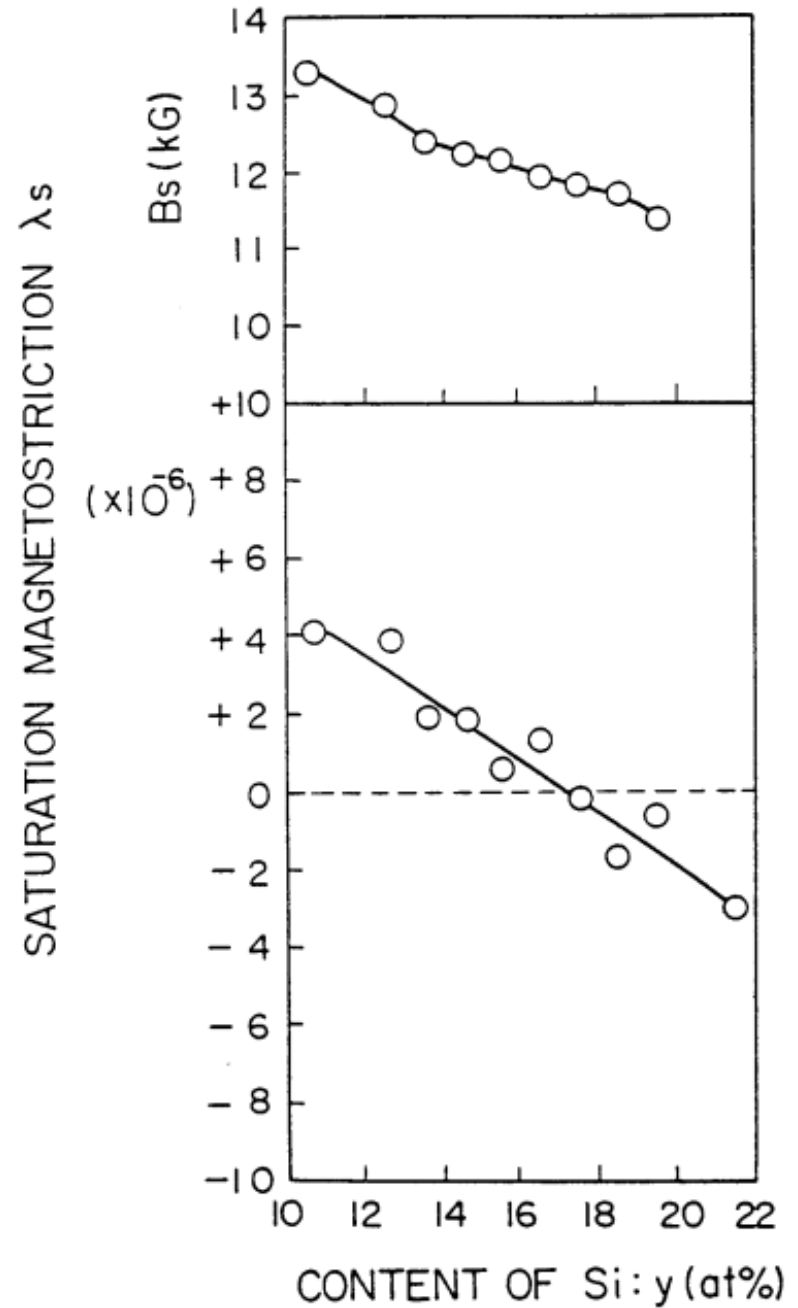
**=> Kristallanisotropie  $K_1 \approx 0$**

G. Herzer *IEEE Trans Magn* 26 (1990) 1397



nano-kristalline Legierung:  
 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_y\text{B}_{22.5-y}$

Y. Yoshizawa et al., EP0271657B1







# Rundschau

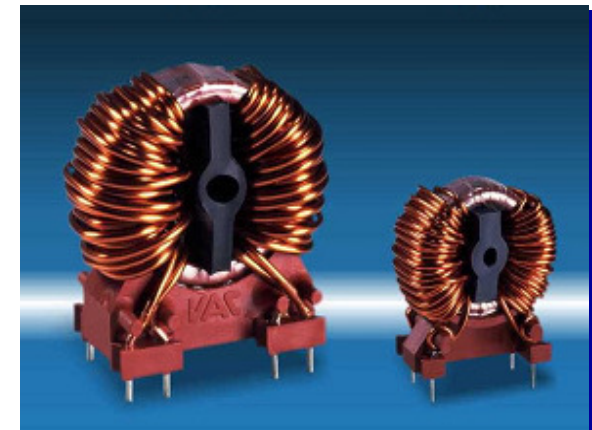


# Vergleich der weichmagnetischen Materialeigenschaften

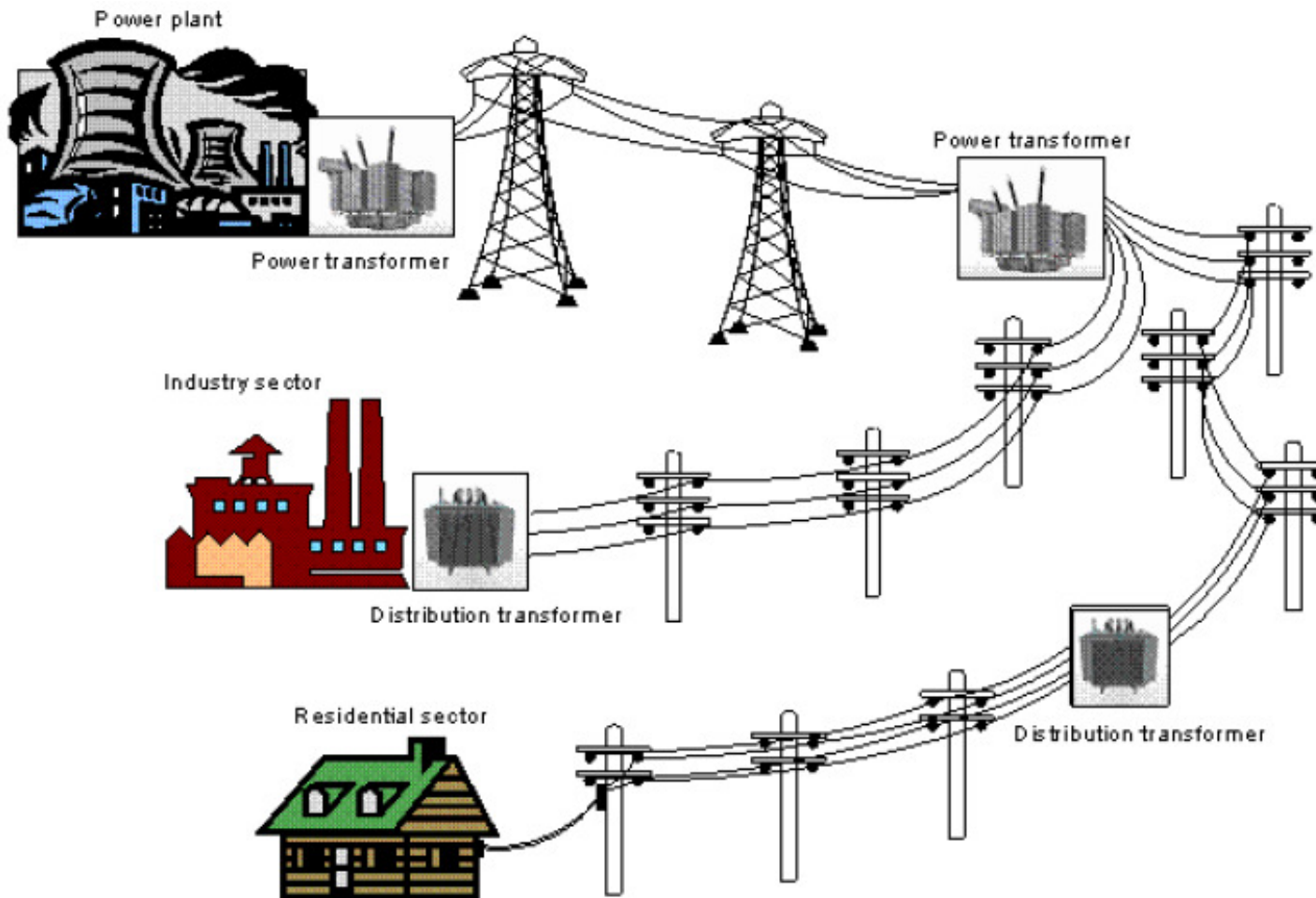
	grundlegende physikalische Eigenschaften			$\rho_{el} / [\mu\Omega m]$	Dimension (Blechdicke)
	$J_s / [T]$	$K_1 / [J/m^3]$	$\lambda_s / 10^{-6}$		
kristallin	0,8 (80NiFe) 2,4 (50CoFe)	< 100	< 1 (80NiFe) 70 (50CoFe)	0,6 (80NiFe) 0,4 (50CoFe)	10 $\mu m$ – 1 m
amorph	0,6 (Co) 1,6 (Fe)	0	< 1 (Co) ~30 (Fe)	~ 1,3	~ 20 $\mu m$
nano-kristallin	1,2 new 1,8 ?	~1	< 1	~ 1,2	~ 20 $\mu m$

→ Anwendungsbeispiel:  
Ringbandkern/Induktivität

meist ideale Lösung mit Nano!



# Anwendung amorph



In 2005 Verbrauch an el. Energie in der EU = 2800 TWh

→ 7,2 % Verlust durch Energie Verteilung

→ 2,4 - 2,8 % Trafoverlust (70 TWh)

Quelle: Study for European Commission; [www.ecotransformer.org](http://www.ecotransformer.org)



## Verteilertrafos

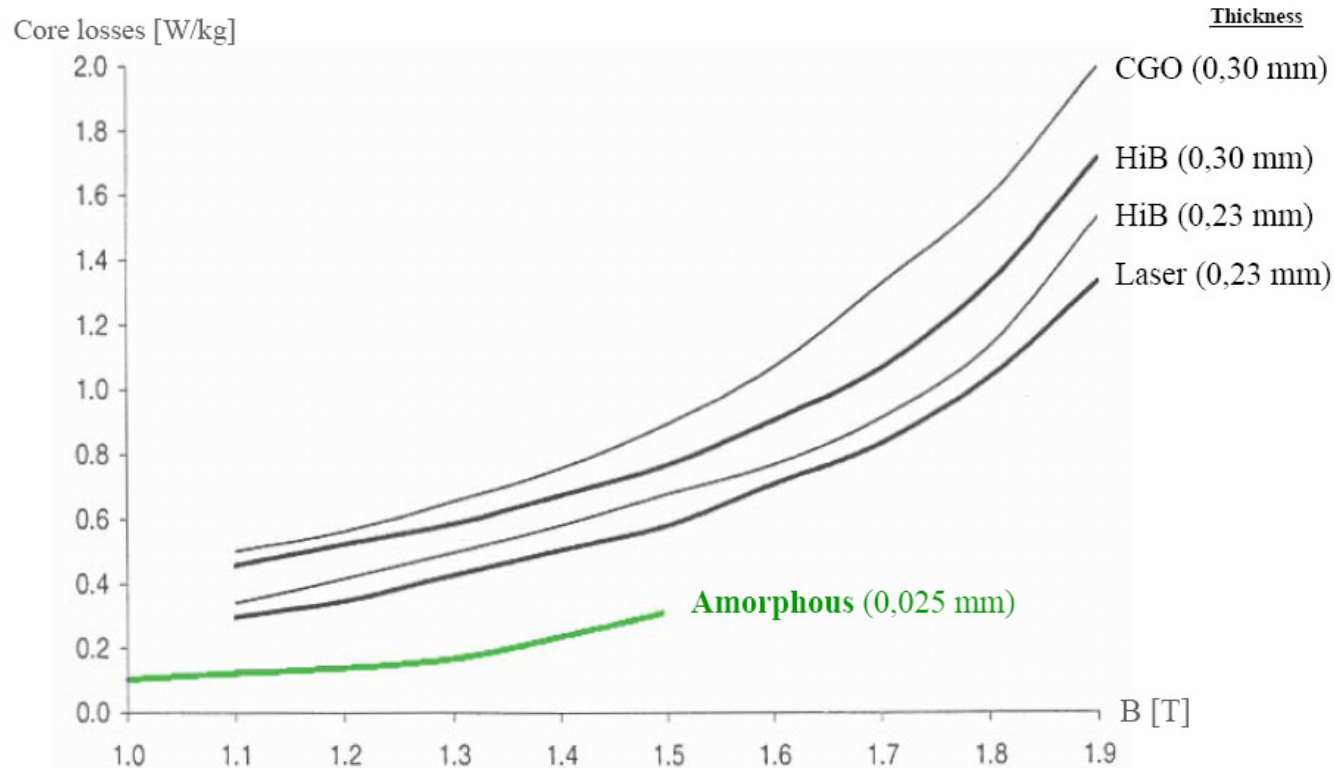


alte Verteilertrafos

hohe Blindleistung

schlechte Energieeffizienz,  
v.a. bei nicht idealem Sinus – höhere Harmonische

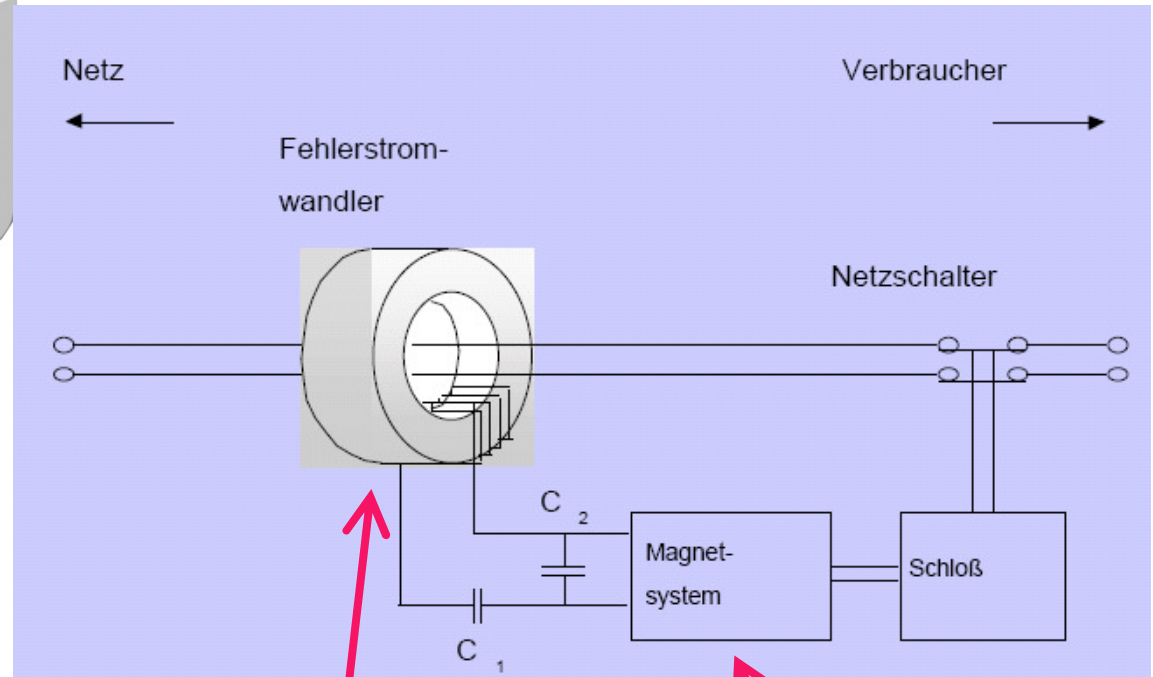
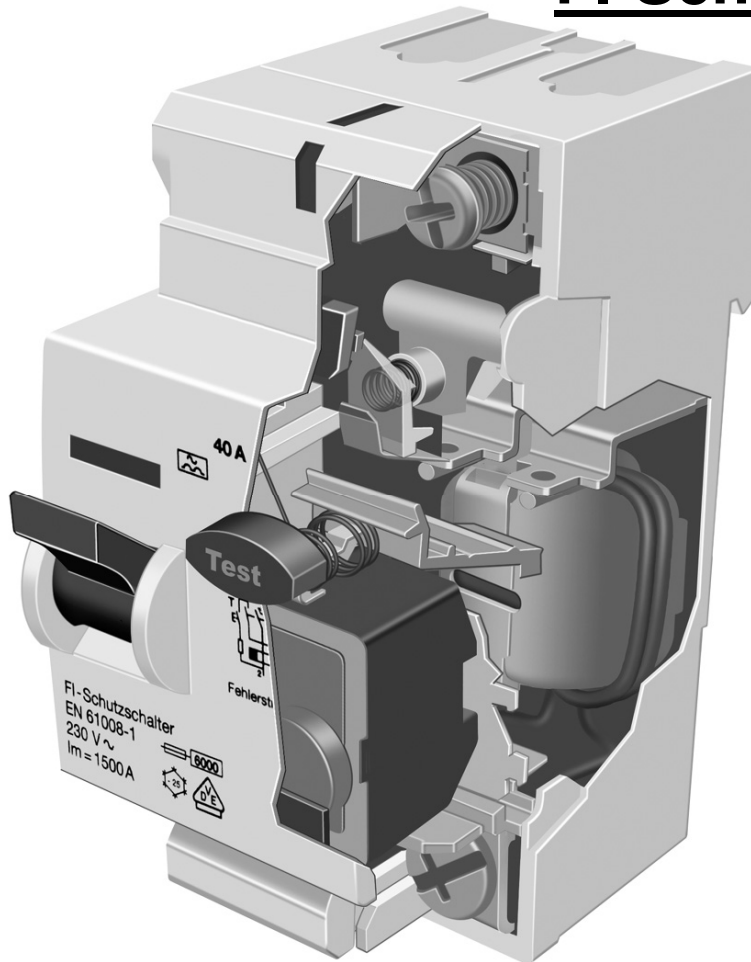
häufig im Niedriglastbereich



Durch Trafos aus amorphem  
weichmagnetischen  
Material werden die Verluste  
deutlich gesenkt.

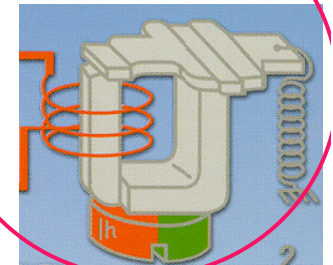


## FI-Schutzschalter



nano-kristallin

kristallin



Symbiose von amorphen/nano  
und kristallinen Werkstoffen:

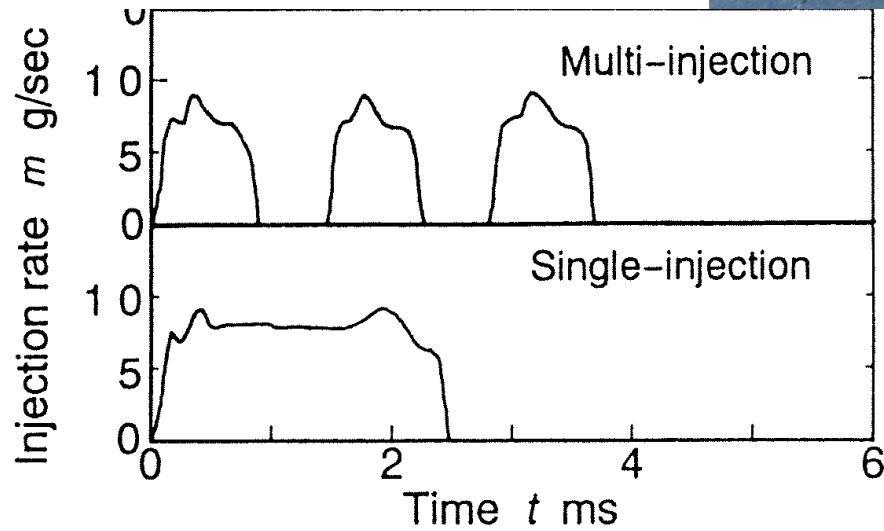
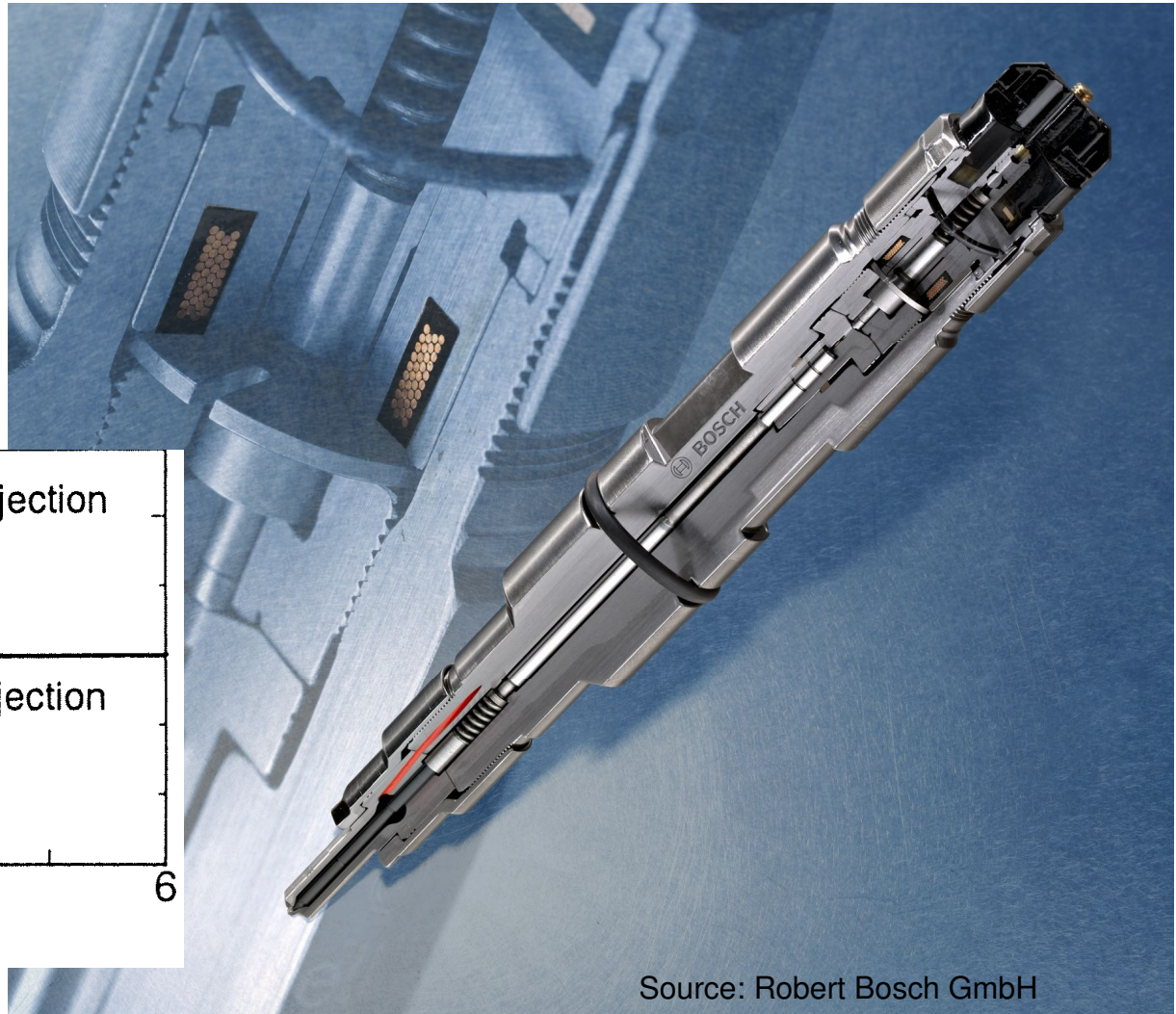


## multiple injection strategies in diesel combustion

### Anforderung:

- hohes  $B_s$   
→ kristallin
- hoher elektrischer Widerstand  
→ amorph

Bis heute ist der Aktor kristallin.



COMODIA 94, M. Arai et al.

Source: Robert Bosch GmbH



## Summary

- ❑ amorphe und nano-kristalline Werkstoffe als dünnes Band besitzen überragende weichmagnetische Eigenschaften (f- und z-Schleifen einstellbar, extrem niedrige Verluste, hohe f, ...)
- ❑ kristalliner Weichmagnet hat mehr Freiheitsgrade bei der Geometrie und bei der Kombination aus Formgebung und Magnetik (keine Beschränkung auf dünnes Band, dünne Bänder bis zu Massivmaterial sind herstellbar), Vielzahl von duktilen Werkstoffen für Formgebung vorhanden
- ❑ Symbiose von amorph/nano und kristallin → FI-Relais





**Vielen Dank  
für ihre  
Aufmerksamkeit!**