TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

ESEA
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

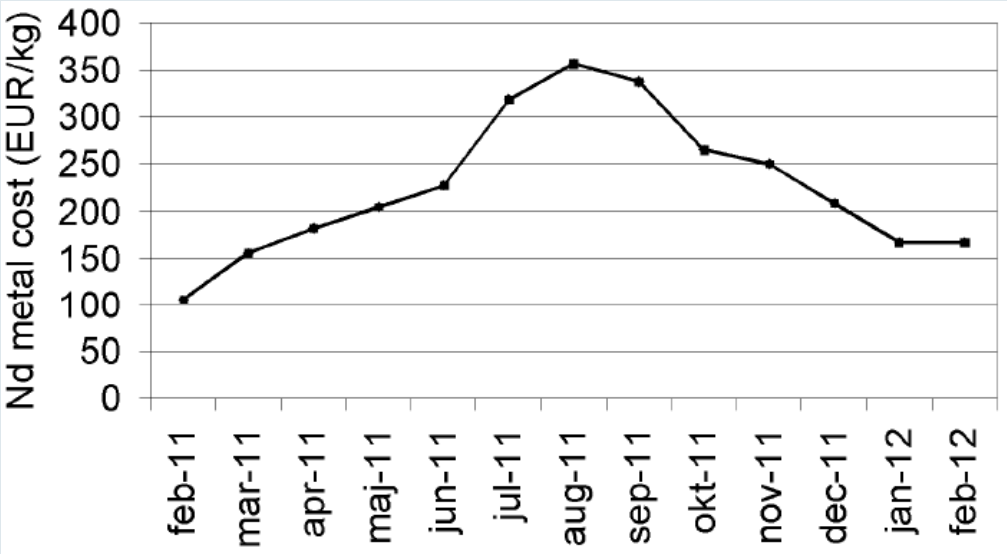
Vergleich von PM-Synchronmotoren mit Neodym- und Ferritmagneten für Traktionsantriebe

Florian Demmelmayr, Dipl-Ing.; Bernhard Weiss, BSc; Markus Troyer;
Manfred Schrödl, O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., OVE, IEEE

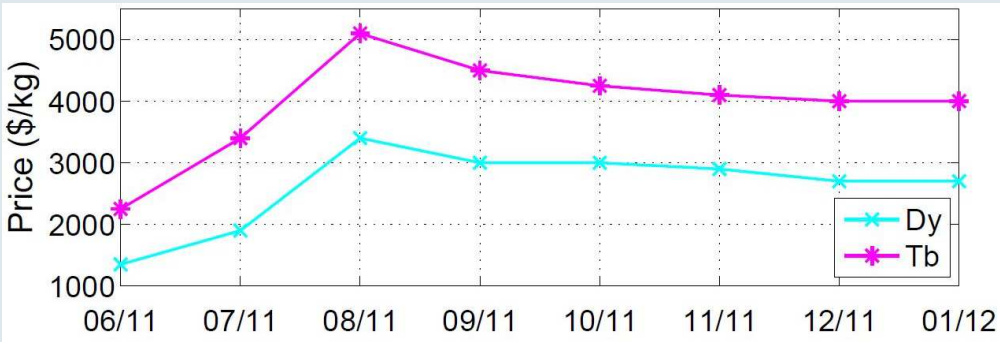
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, TU Wien

Preisentwicklung Magnetmaterialien

- NdFeB (N40H): 70 €/kg
- Ferrite (Y30): 2,17 €/kg



Preisentwicklung Neodym (Nd) [2]



Preisentwicklung Terbium (Tb) Dysprosium (Dy) [3]

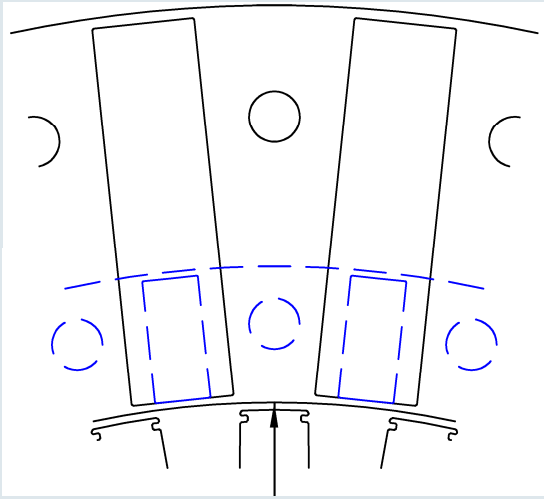
Überblick

- **NdFeB und Ferrit - Maschine**
- Vergleich Magnetmaterialien - Irreversible Abmagnetisierung
- Performancevergleich der beiden Rotorvarianten
- Sensorlose Regelung
- Erkenntnisse

NdFeB und Ferrit - Maschine

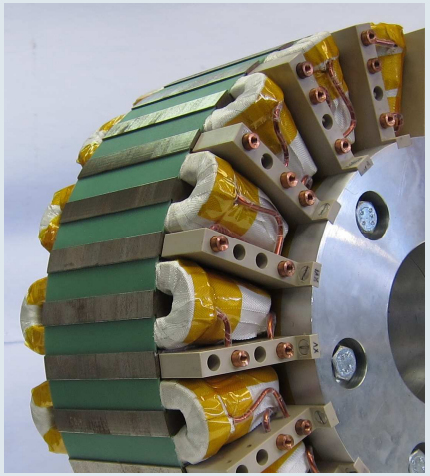
- Prototyp einer Traktionsmaschine
- Außenläufer - Radnabenantrieb
- Zahnspulenwicklung
- Permanentmagnete in Flusskonzentration
- 1 Stator – 2 verschiedene Rotoren
- (Positions-) Sensorlose Regelung

NdFeB

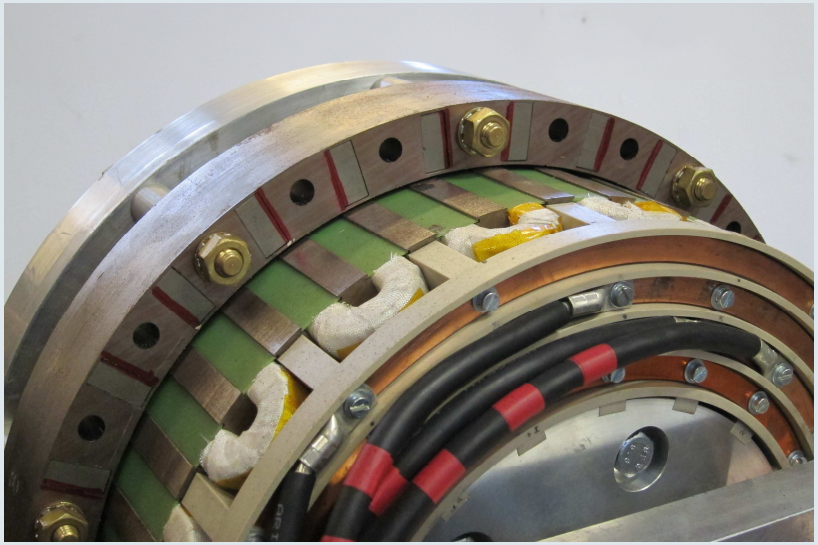


Blechschnitt

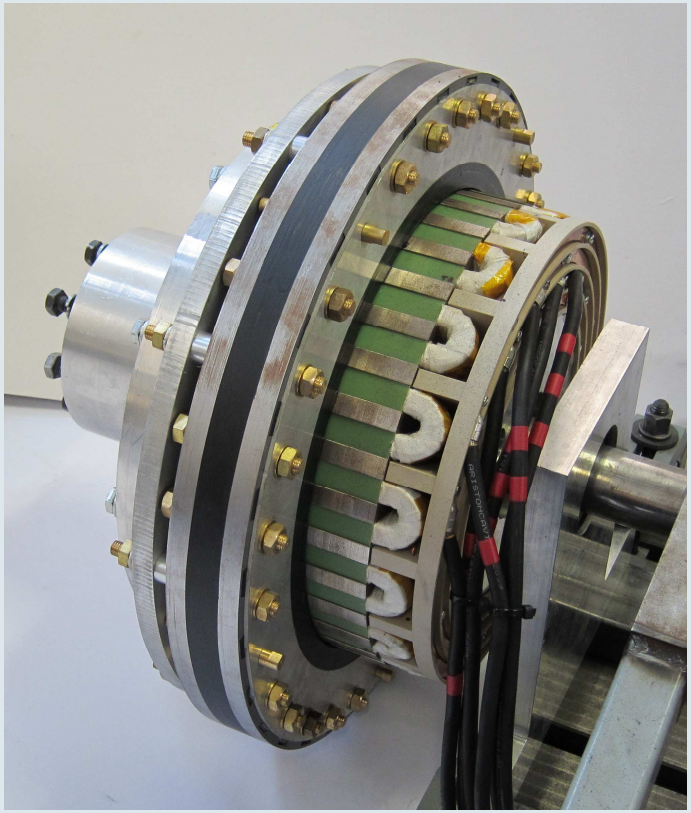
NdFeB und Ferrit - Maschine



Stator



NdFeB

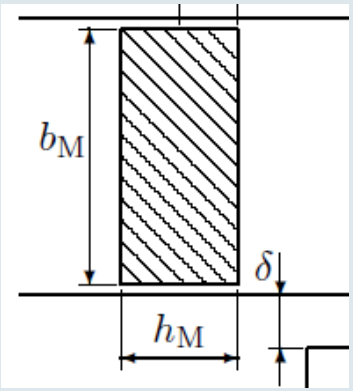


Ferrit

Überblick

- NdFeB und Ferrit - Maschine
- **Vergleich Magnetmaterialien - Irreversible Abmagnetisierung**
- Performancevergleich der beiden Rotorvarianten
- Sensorlose Regelung
- Erkenntnisse

Magnetischer Kreis bei $\Theta = 0$



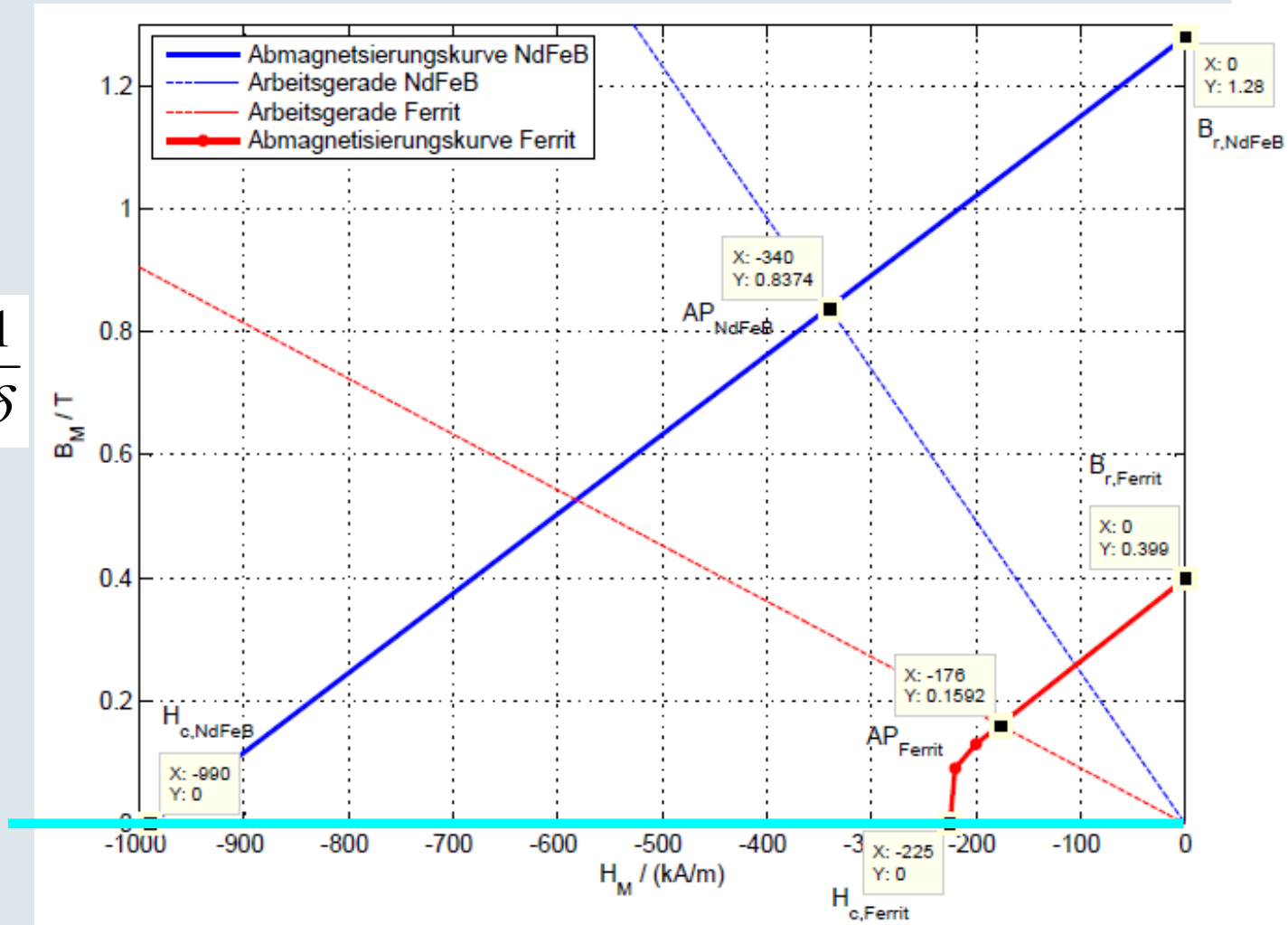
$$B_M(H_M) \sim -\frac{h_M}{b_M} \cdot \frac{1}{\delta}$$

$$B_{\delta,\,\mathrm{Ferrit}} = 1{,}47\,\mathrm{T}$$

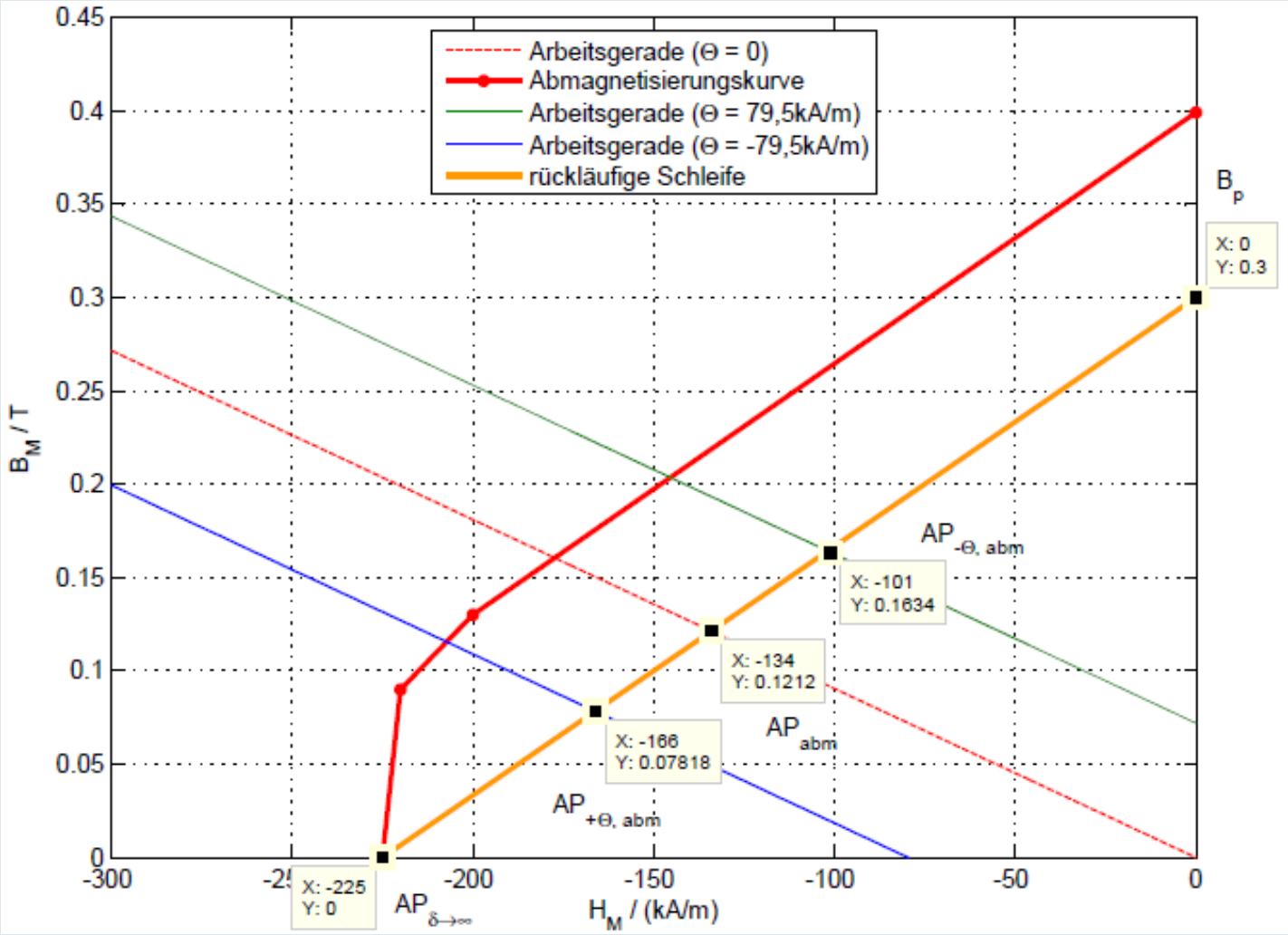
$$\updownarrow$$

$$B_{\delta,\,\mathrm{NdFeB}} = 1{,}57\,\mathrm{T}$$

$$\delta \to \infty$$

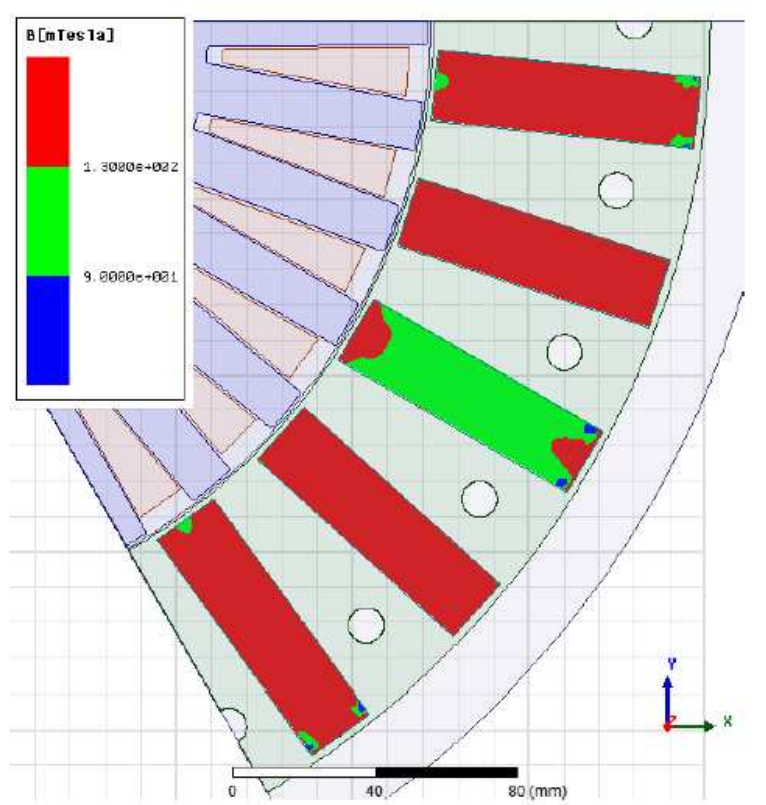


Ferrit: Magnetischer Kreis bei $\Theta \neq 0$

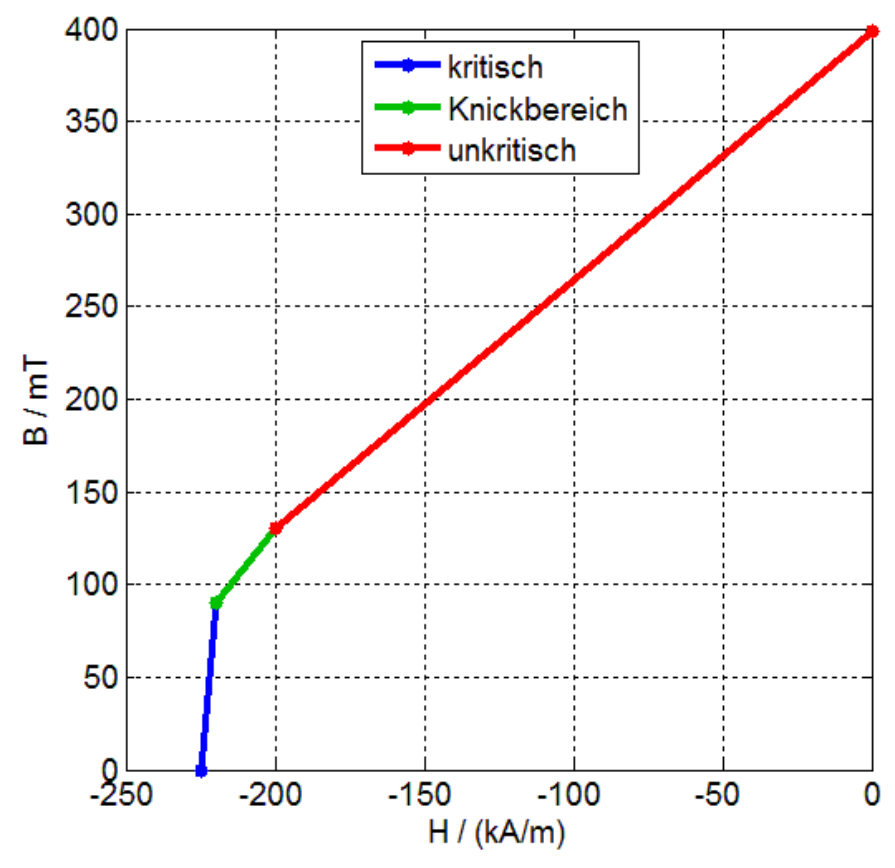


Lokale irreversible Abmagnetisierung

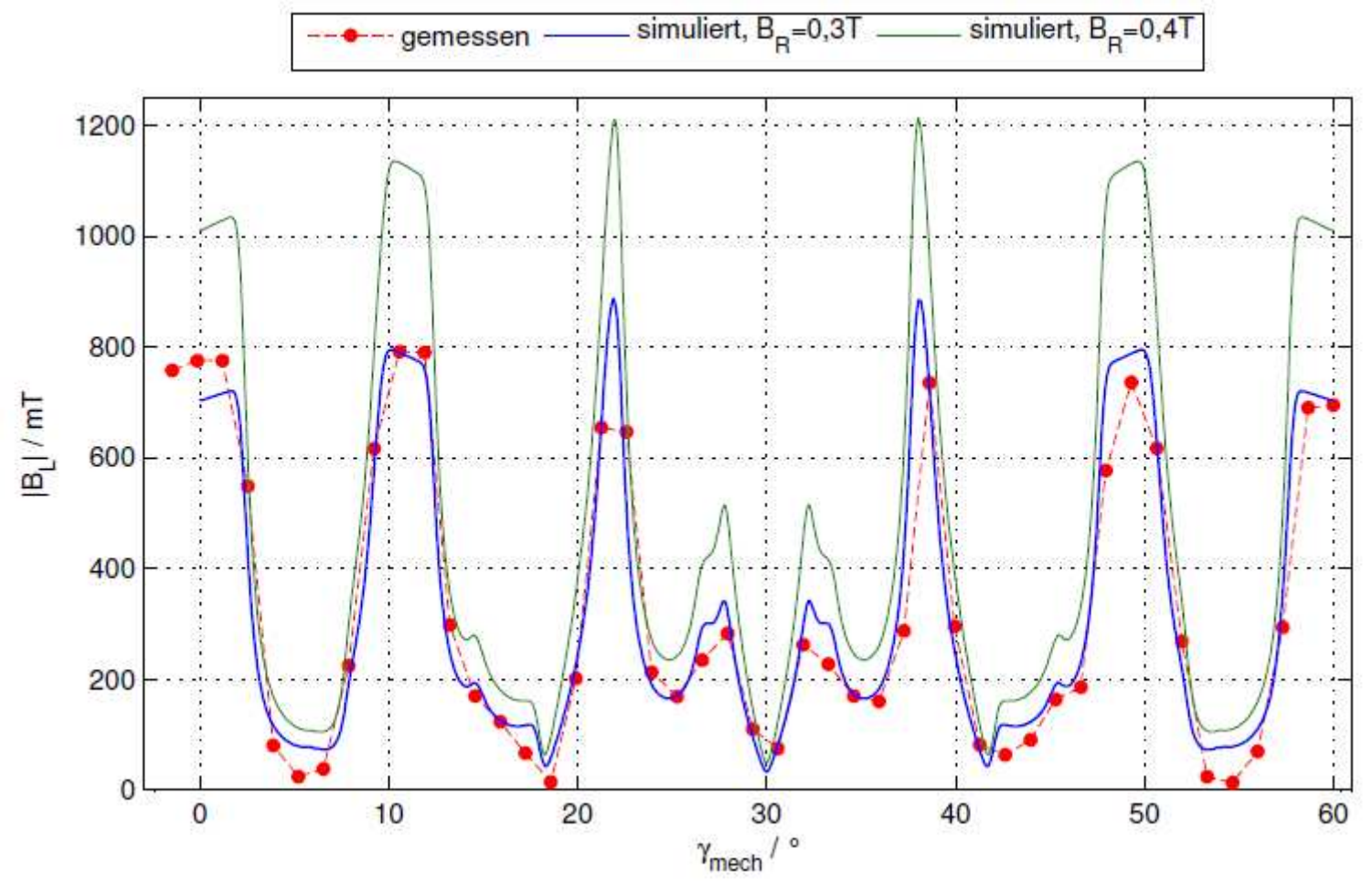
- Simulation der magn. Flussdichte in den Ferritmagneten



(c) $i_q = 0;\ i_d = -1{,}9$



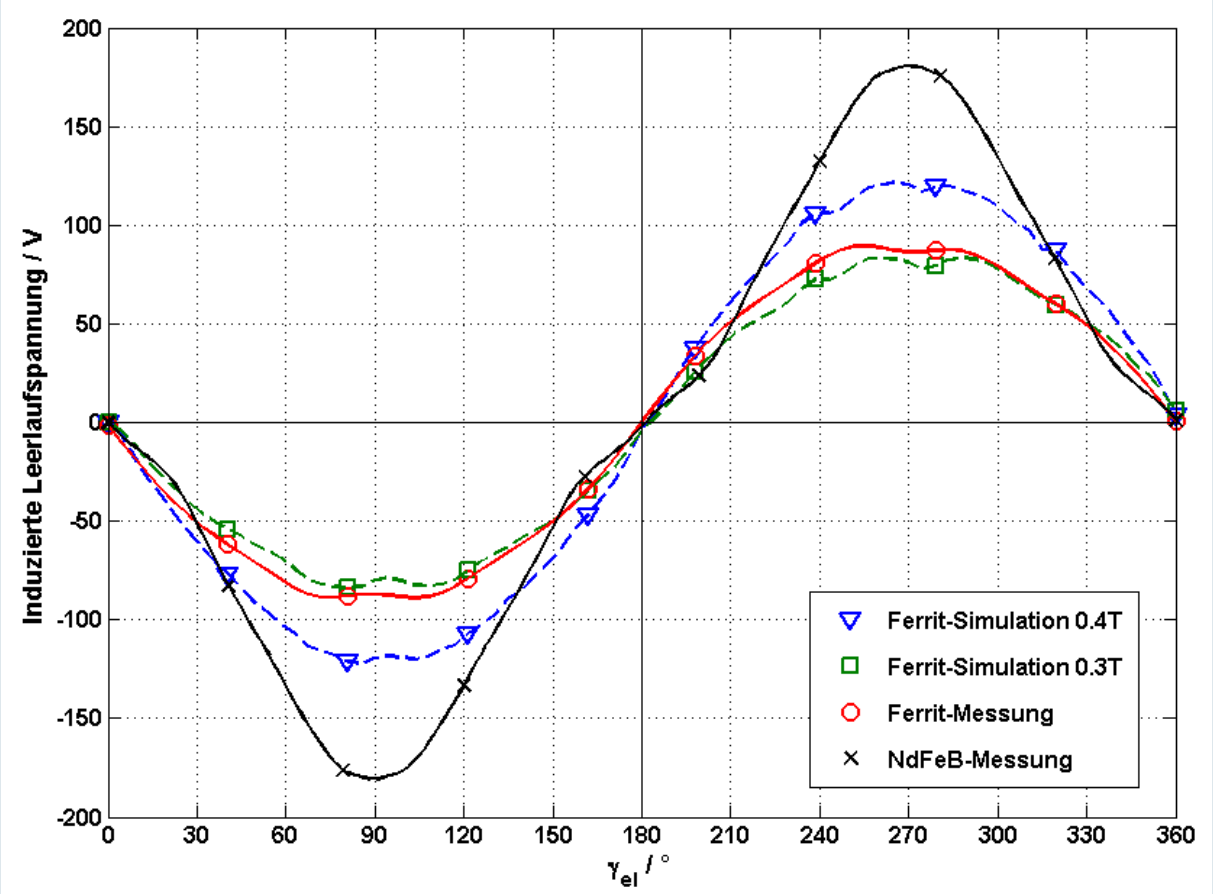
Luftspaltflussdichte



Überblick

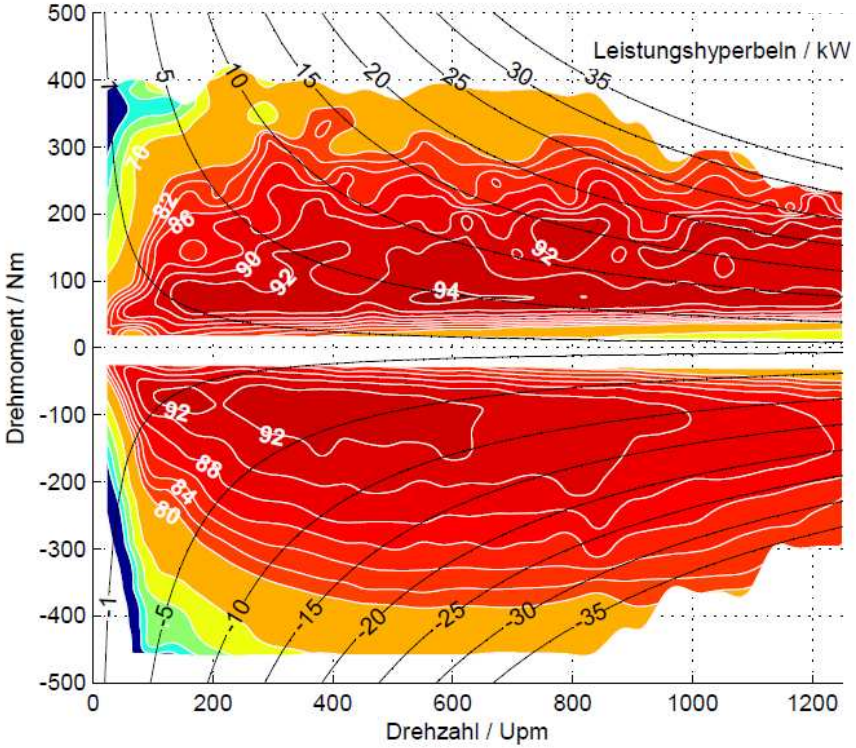
- NdFeB und Ferrit - Maschine
- Vergleich Magnetmaterialien - Irreversible Abmagnetisierung
- **Performancevergleich der beiden Rotorvarianten**
- Sensorlose Regelung
- Erkenntnisse

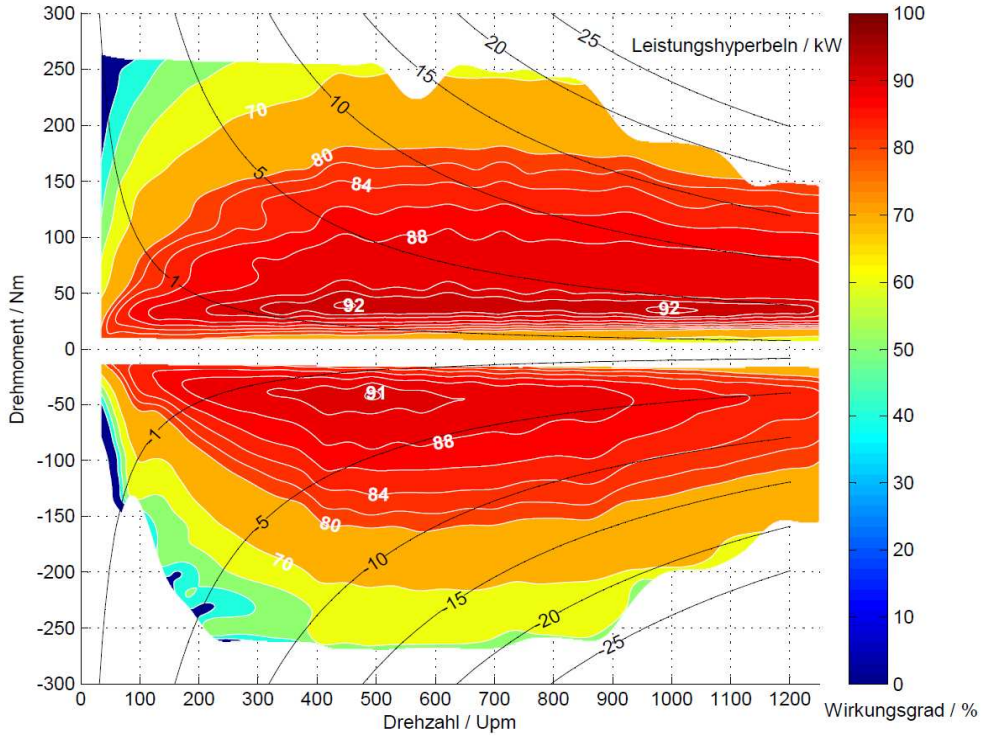
Induzierte Leerlaufspannung



- Gemessene LL-Spannung Ferrit ≈ Simulation B_r = 0,3T
- Verhältnis $\hat{U}_{NdFeB} / \hat{U}_{Ferrit} \approx 2$

Muschelkurve





NdFeB

Ferrit

Vergleich der Rotorvarianten

	Simulation (Ferrit)	Messung (Ferrit)	Messung (NdFeB)
Außendurchmesser (Rotor)	-	50,4cm (+26%)	40cm
Magnetvolumen	-	570%	100%
Rotormasse	-	55kg	22kg
max. Kurzschlussstrom	-	45A	95A
Moment @ Nennstrom	126,43Nm	118Nm	(215Nm)
Kurzschlussmoment	-	28,6Nm	105Nm
Leerlaufspannung	92%	100%	202%
Wirkungsgrad	-	< 92%	< 94%

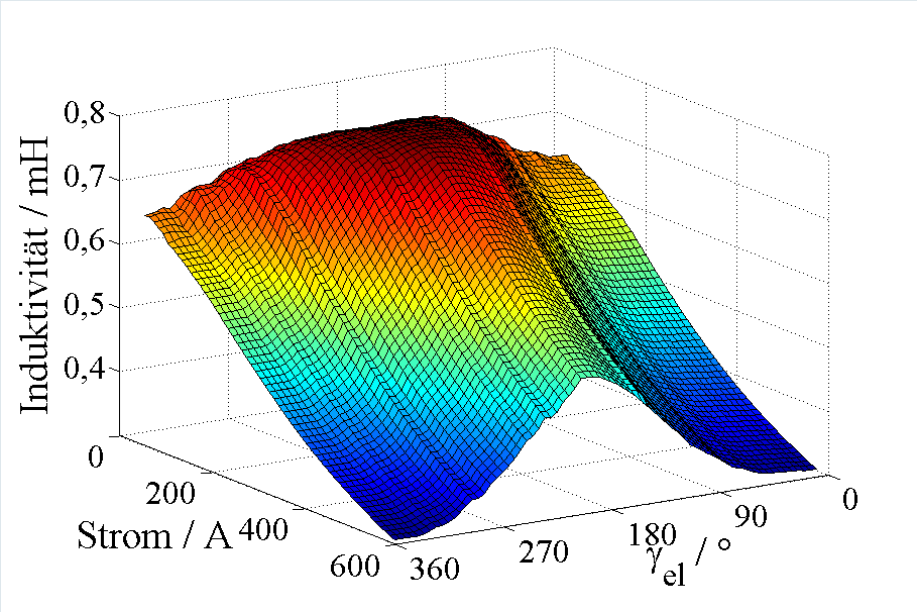
Überblick

- NdFeB und Ferrit - Maschine
- Vergleich Magnetmaterialien - Irreversible Abmagnetisierung
- Performancevergleich der beiden Rotorvarianten
- **Sensorlose Regelung**
- Erkenntnisse

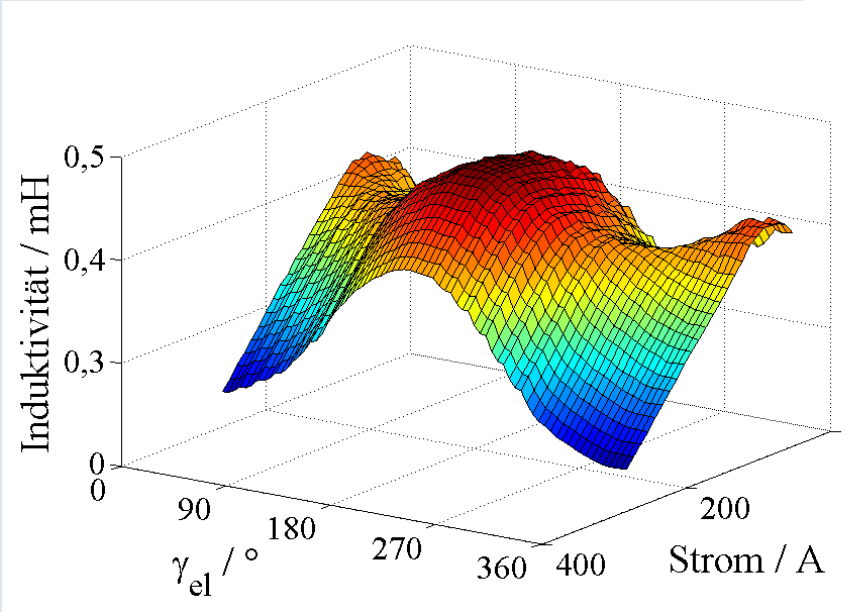
Sensorlose Regelung

- PM-Synchronmaschinen: Kenntnis der Rotorposition für die Regelung erforderlich
  - Positionssensor
    - Kosten durch Sensor, Anbindung
    - zusätzliche Hardwarkomponente (Erhöhung der Ausfallswahrscheinlichkeit)
  - Sensorlose Verfahren
    - Auswertung von Anisotropie-Effekte (INFORM)
    - Auswertung der induzierten Spannung (EMK)
    - Wahl ist abhängig von der Drehzahl
- INFORM
  - Auswertung unterschiedlichen Induktivitäten (abhängig von der Rotorposition) :
    - magnetische Sättigung
    - magnetische Achsichkeit

Induktivität



NdFeB

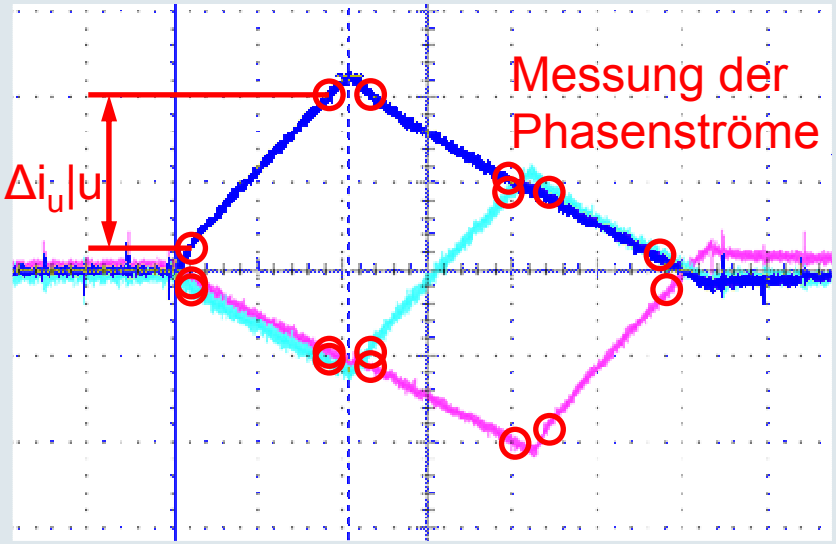


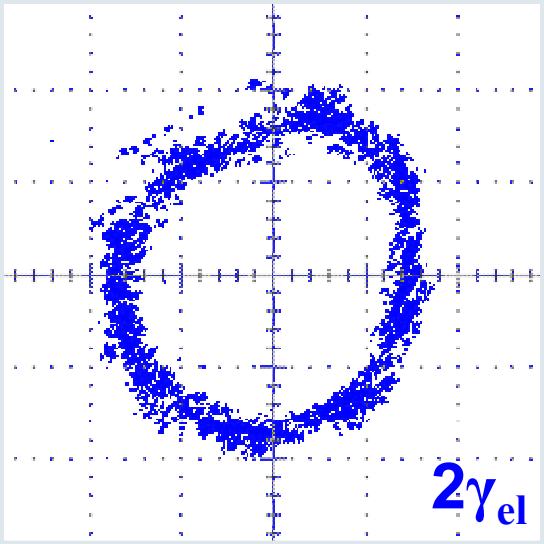
Ferrit

- Induktivität hängt stark vom Arbeitspunkt (Strom) ab
- 180° Symmetrie bei Ferrit bei kleinen Strömen

Sensorlose Regelung - INFORM

Spannungssprünge





INFORM-Auswertung

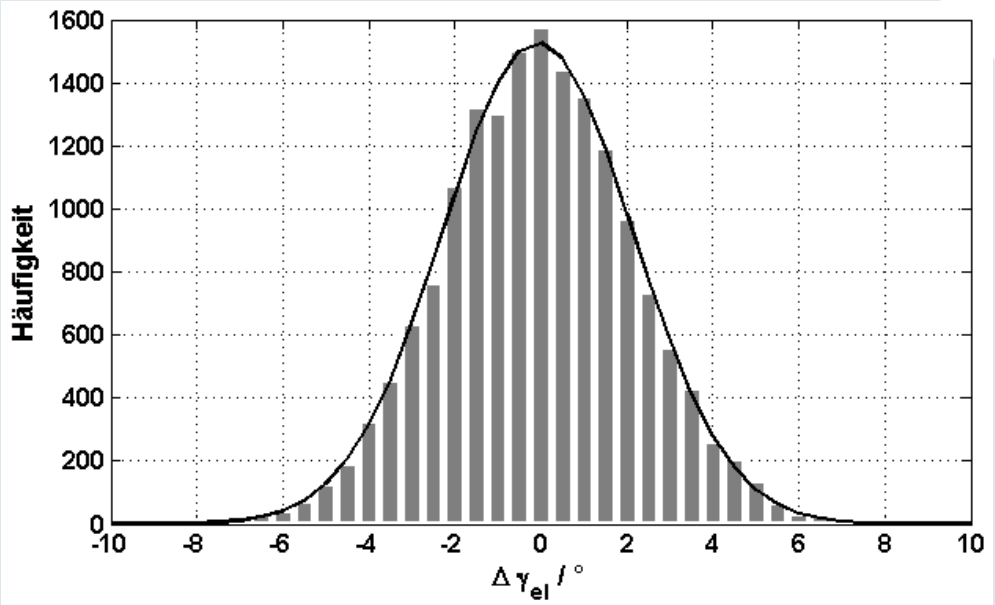
Elimimination der 180° Unsicherheit

Elimination der 180°-Unsicherheit

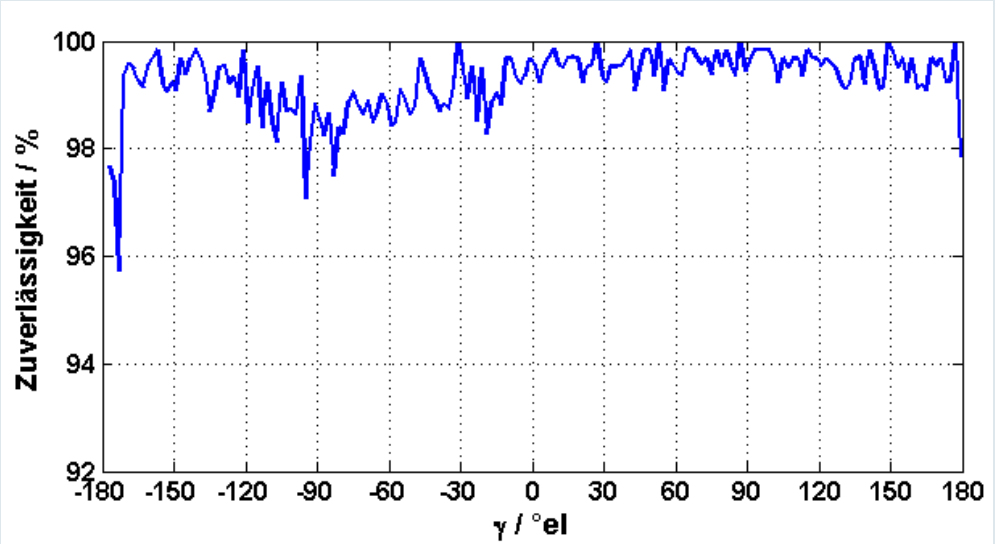
- Großssignal-INFORM
  - Hohe Ströme ($\underline{i}_s \geq 1$)
  - Verschiebung des magnetischen Arbeitspunkt
  - Bestimmung der absoluten Lage: Elimination der 180° Unsicherheit
  - Hohe Ströme in (–d)- Richtung → ungeeignet für Ferrit-Maschine
- Sektor Detektion
  - Bestimmung des Vorzeichens der d-Achse
  - geeignet für Ferrit-Maschine

Qualität der sensorlosen Regelung

- Großsignal-INFORM
  - NdFeB-Maschine
  - Standardabweichung: 2,28°el



- Sektor Detektion
  - Zuverlässigkeit >96%



Überblick

- **NdFeB und Ferrit - Maschine**
- Vergleich Magnetmaterialien
- Irreversible Abmagnetisierung
- Performancevergleich der beiden Rotorvarianten
- Sensorlose Regelung
- **Erkenntnisse**

Erkenntnisse

- bestimmende Größe für Auswahl eines Magnetmaterials: $(BH)_{max}$
  - $(BH)_{max,\ NdFeB} / (BH)_{max,\ Ferrit} \approx 12$
- Empfehlung: $B_r/2 < B_{AP} < B_r$
  - beugt irreversible Abmagnetisierung vor
- Lagerung von Ferrit-Magneten entscheidend
  - ständiger ferromagnetischer Rückschluss
- Gute sensorlose Fähigkeit beider Rotorvarianten
- Entwickelter Ferritrotor für Traktionsanwendung wenig geeignet
  - mögliche Anwendung: Windkraftwerke

Quellenangaben

- [1] Weiss, Bernhard „*Vergleich von Permanentmagnet-Synchronmotoren mit Neodym- und Ferritmagneten*“, Diplomarbeit, TU Wien, 2012
- [2] Eriksson, Sandra; Bernhoff, Hans “*Rotor design for PM generators reflecting the unstable neodymium price“, ICEM 2012, Marseille, France*
- [3] Barcaro, Massimo; Bianchi, Nicola, „*Interior PM Machines using Ferrite to Substitute Rare-Earth Surface PM Machines*“, *ICEM 2012, Marseille, France*

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

ESEA
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!