

DEGRADATION OF MAGNETIC PROPERTIES OF ELECTRICAL STEEL SHEETS DUE TO DIFFERENT CUTTING TECHNIQUES

Madeleine Bali

Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen
Technische Universität Graz

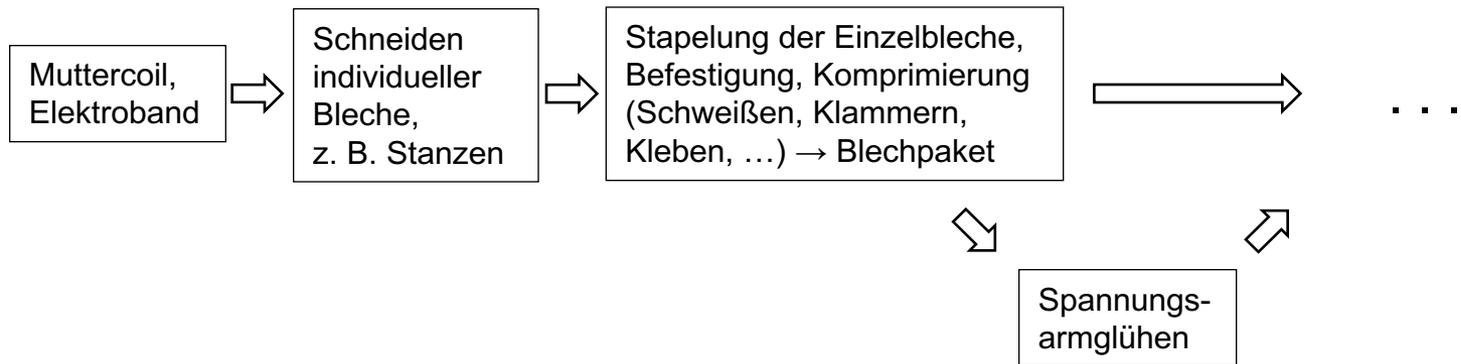
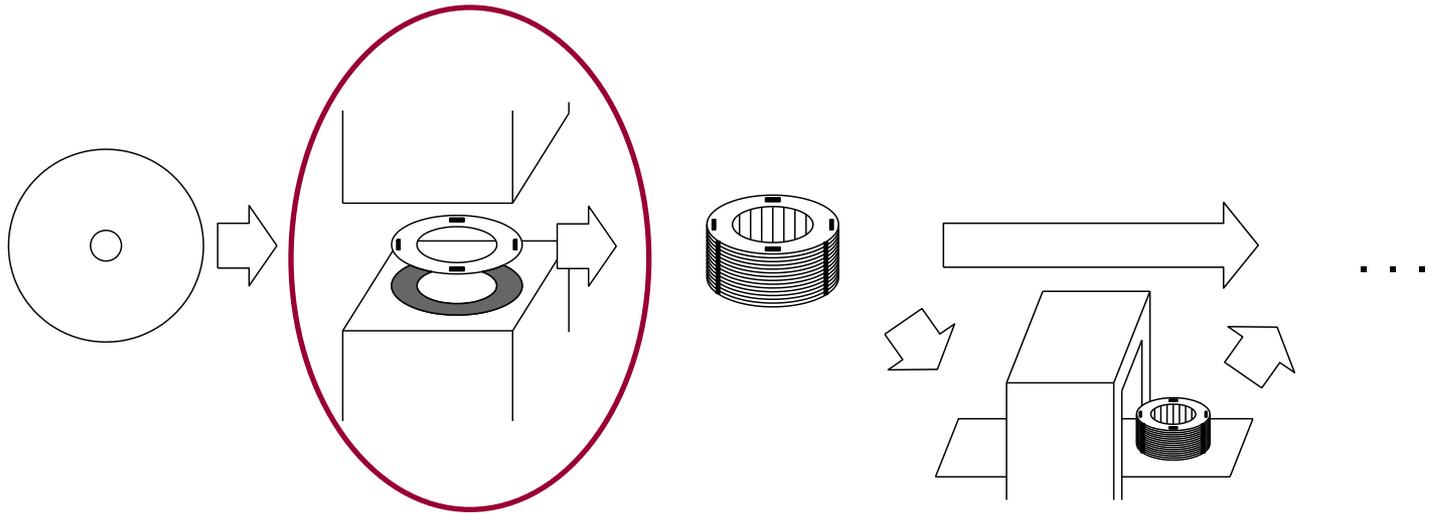
14. Februar 2018

Überblick

- Einführung
- Forschungsprogramm
- Experimentelle Ergebnisse
- Modellierung des Schneideffekts
- Simulationsergebnisse
- Zusammenfassung

[1] M. Bali, *Magnetic material degradation due to different cutting techniques and its modeling for electric machine design*, Ph.D. dissertation, Graz University of Technology, 2016.

Ausschnitt Fertigungsprozess



Motivation

- Das Schneiden induziert mechanische/thermische Spannungen im Material



- führt zu Gitterversetzungen, Gitterverzerrungen → **Gitterfehler/-defekte**



- Einfluss auf Domänenwandbeweglichkeit, Domänenwachstum



- Veränderung der magnetischen Eigenschaften



- Einfluss auf Wirkungsgrad der Maschine

Welche Schneidverfahren gibt es?

- Mechanisches Schneiden 
 - Schlagschere
 - Stanzen

- Laserschneiden 
 - Kohlendioxidlaser (CO₂-Laser)
 - Festkörperlaser (FKL-Laser)

- Drahterodieren

- Wasserstrahlschneiden

Überblick

Einführung

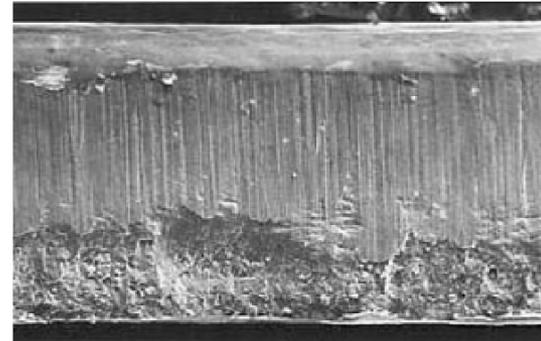
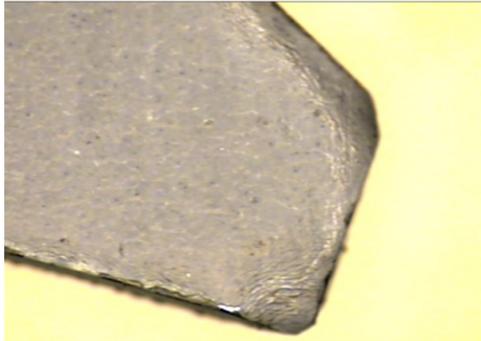
Programm

Ergebnisse

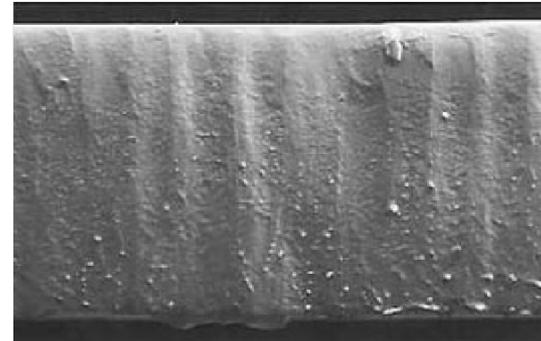
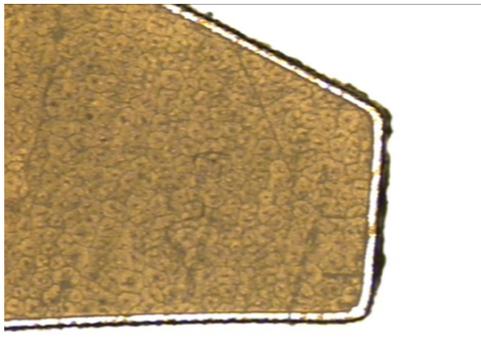
Modell

Simulation

Illustration



gestanzt



lasergeschnitten

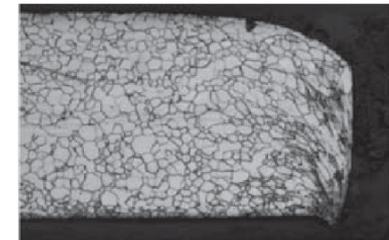
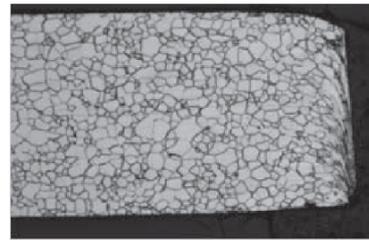
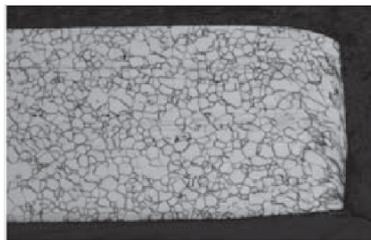
[2] Y. Kurosaki, H. Mogi, H. Fujii, T. Kubota, and M. Shiozaki, *Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheets*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 (2008), 2474–2480.

[3] Y. Demir, O. Ocak, Y. Ulu, and M. Aydin, *Impact of lamination processing methods on performance of permanent magnet synchronous motors*, Proceedings of ICEM 2014, XXIst International Conference on Electrical Machines, pp. 1218–1223.

Einfluss der Schneideinstellungen

- Stanzen:
Schneidspaltgröße, Schneidgeschwindigkeit, Abnutzung
Werkzeug
- Laserschneiden:
Laserleistung, Schneidgeschwindigkeit, Gasdruck,
Gasreinheit, Betriebsart: gepulst, kontinuierlich

Schneidspalterhöhung



[4] S.-K. Kuo, W.-C. Lee, S.-Y. Lin, and C.-Y. Lu, *The influence of cutting edge deformations on magnetic performance degradation of electrical steel*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 4357–4363, 2015.

Forschungsprogramm

- Materialien:
 - M270-35A
 - M400-50A
 - M800-65A
- Schneidtechnologien:
 - Mechanisches Schneiden
 - CO₂-Laser
 - FKL-Laser
- Proben:
 - Blechstreifen (LL, QQ, Mix)
 - Blechstreifenbreiten:
 - 30 mm (SS, CO₂, FKL),
 - 7.5 mm (SS, FKL), bzw. 7 mm (CO₂)
 - Ständerpakete mit einer Jochhöhe von 12 mm

Insgesamt über 350
unterschiedliche
Messungen

Wichtig: Alle Bleche eines Materials stammen von der gleichen Muttercoil.

Forschungsprogramm

- **Permeameter (IEC 60404-4)**
 - Ermittlung der quasi-statischen Hysteresekurven

- **Epsteinrahmen (IEC 60404-2) & Ständerpaketmessungen (IEC 62044-3)**
 - Ermittlung magnetischer Eigenschaften bei verschiedenen Frequenzen: 50 Hz, 250 Hz, 500 Hz

Zusätzlich:

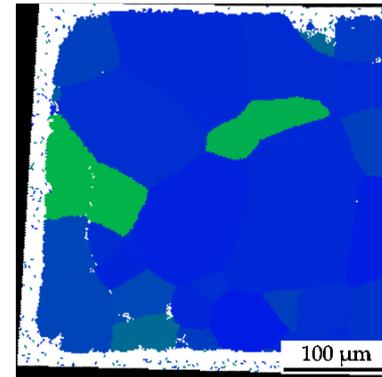
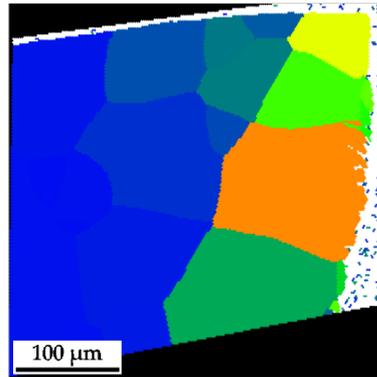
- **Optische Emissionsspektroskopie & Electron Backscatter Diffraction**
 - Ermittlung chemische Zusammensetzung und Korngröße

Korngrößen

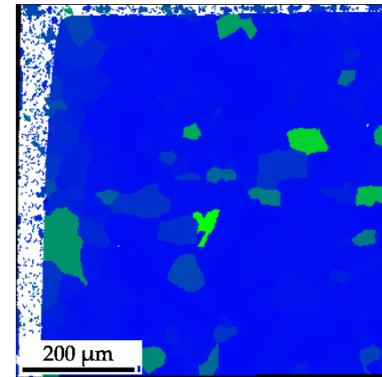
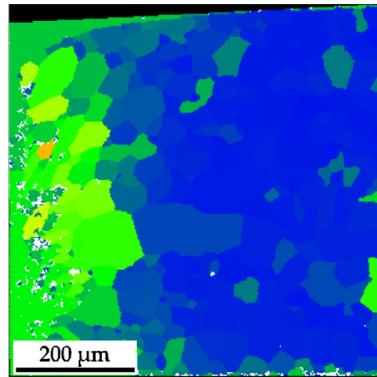
Schlagschere

FKL-Laser

M270-35A



M800-65A



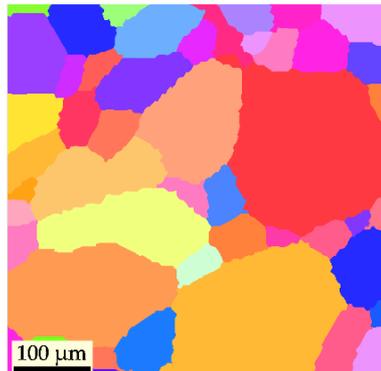
grain orientation spread  Min: 0; Max: 16

Korngrößen

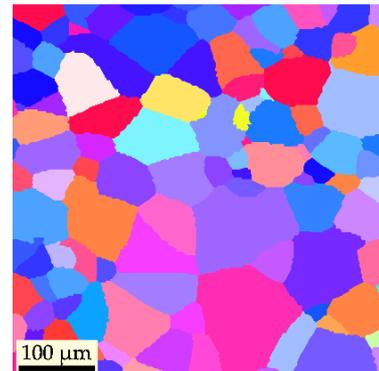
- Korngrößendurchmesser des unbeschädigten Materials:

	M270-35A	M400-50A	M800-65A
Mittlerer Korngrößendurchmesser in μm	81	54	27

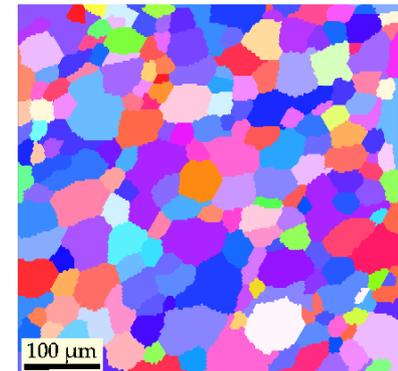
M270-35A



M400-50A

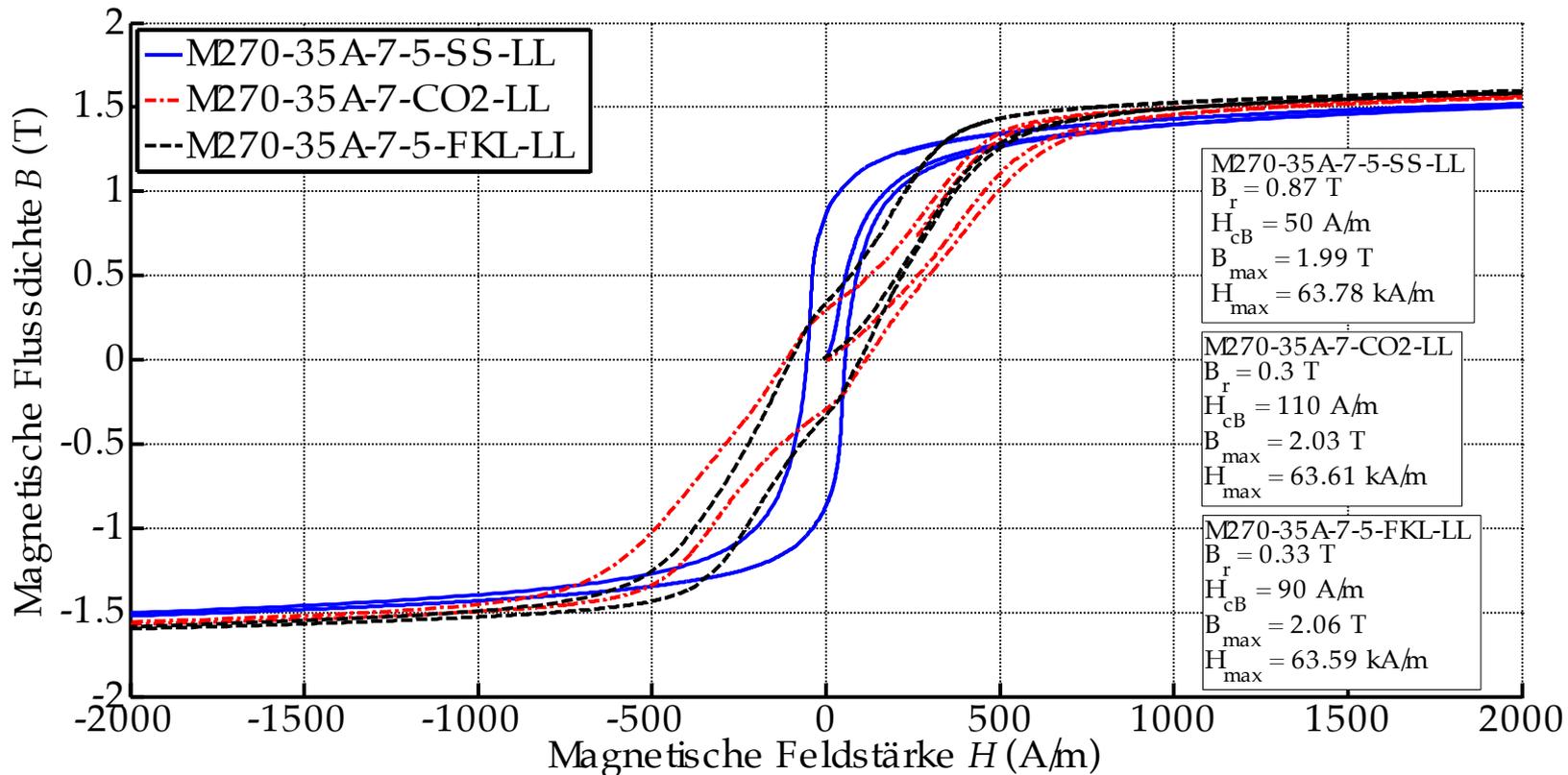


M800-65A



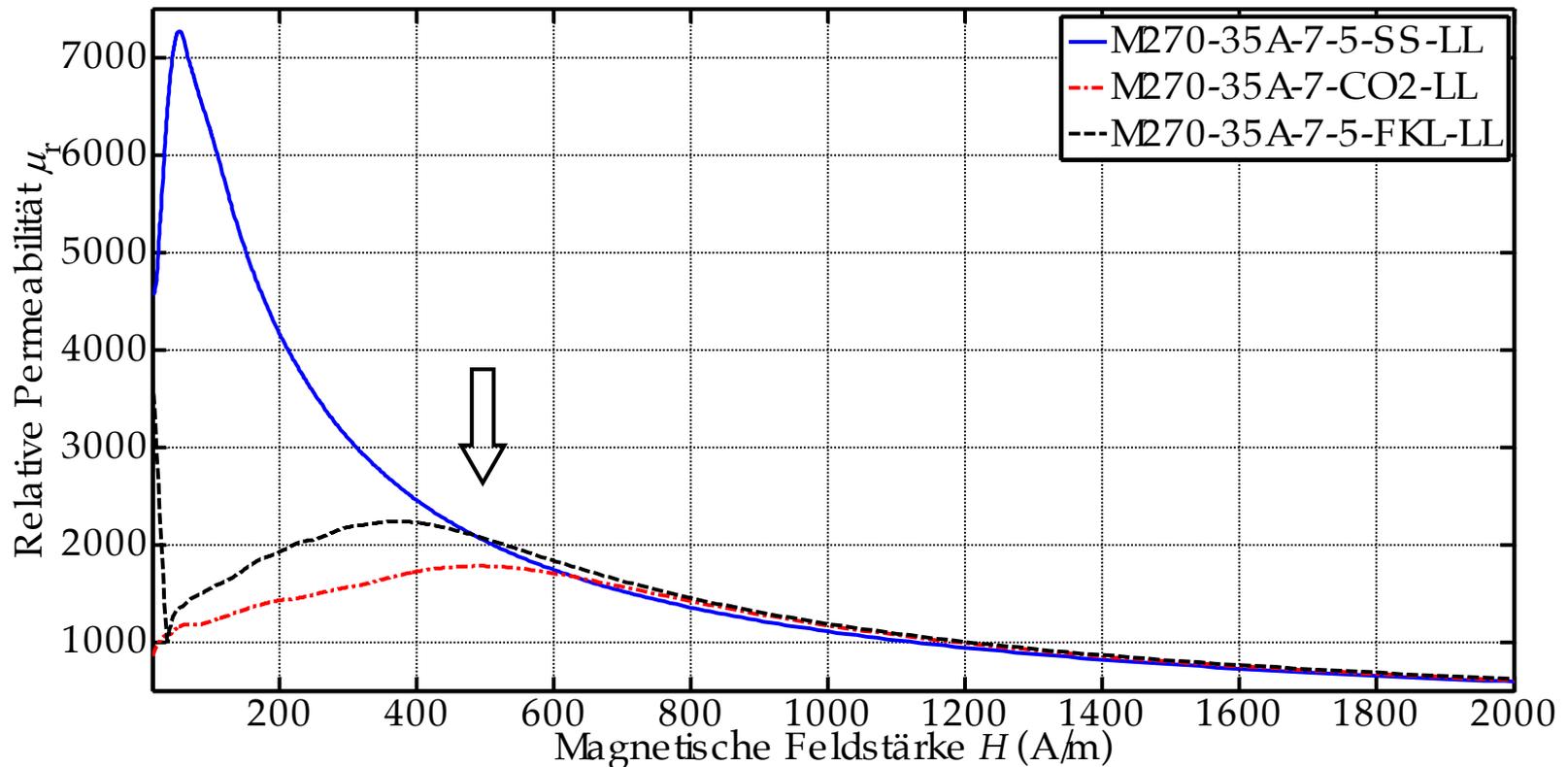
Permeameter - Schneidart

Hysteresekurve



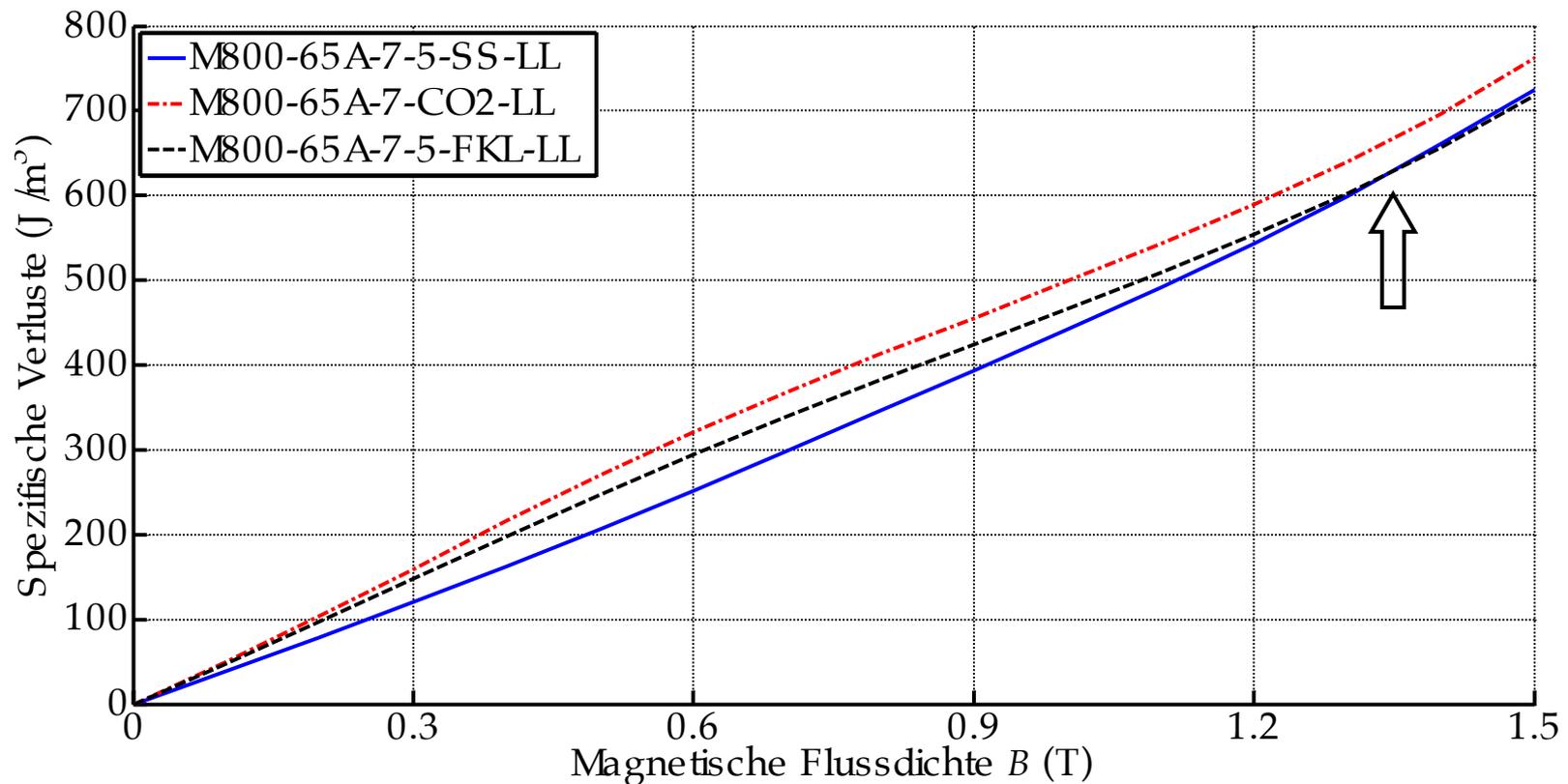
Permeameter - Schneidart

Relative Permeabilität



Permeameter - Schneidart

Spezifische Verluste

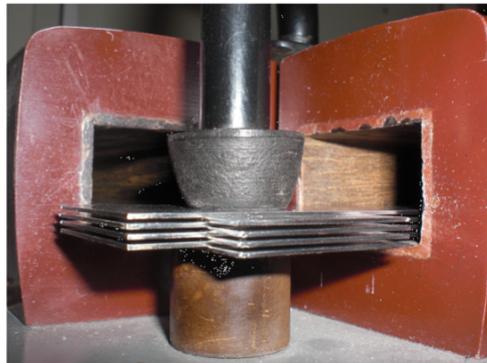


Zusammenfassung: Permeameter

- Hysteresekurven, schmale Proben:
 $\text{Bauch}_{\text{Laser}} > \text{Bauch}_{\text{Schlagschere}}$ und stärker gesichert
- Spezifische Verluste, schmale Proben:
Schnittpunkt $p_{\text{Laser}} > p_{\text{Schlagschere}}$ vs. $p_{\text{Laser}} < p_{\text{Schlagschere}}$
- Relative Permeabilität:
 $\mu_{\text{max,Laser}} < \mu_{\text{max,Schlagschere}}$

Epsteinrahmen

- Ermittlung der Magnetisierungskurve, relativen Permeabilität, spezifischen Verluste
- Unterschied zu Permeametermessungen:
 - Frequenz (50, 250, 500 Hz)
 - ‚Mix‘-Anordnung

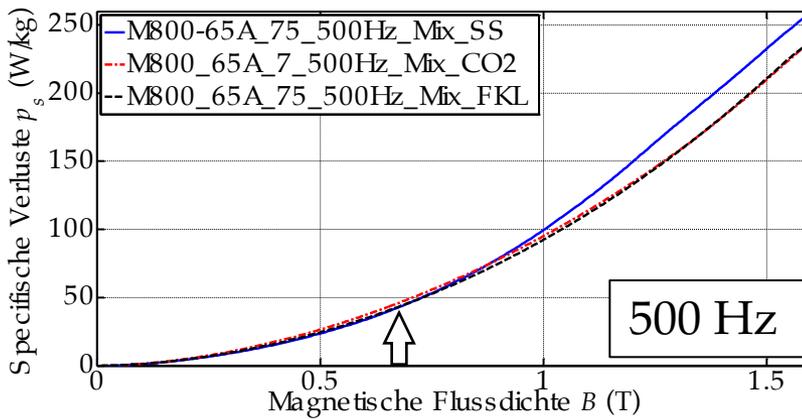
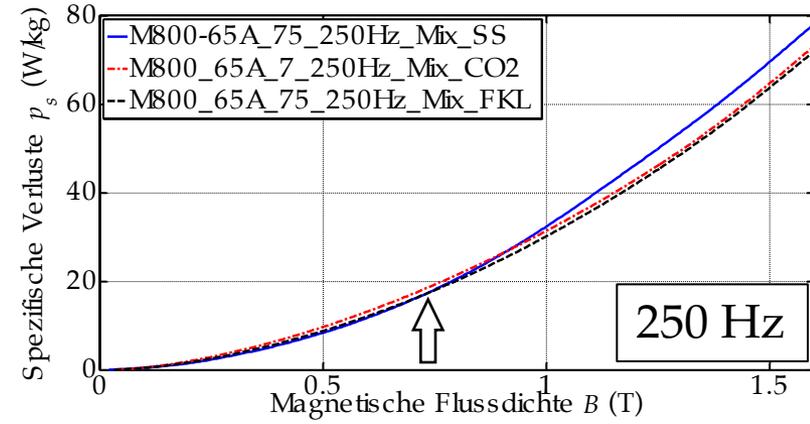
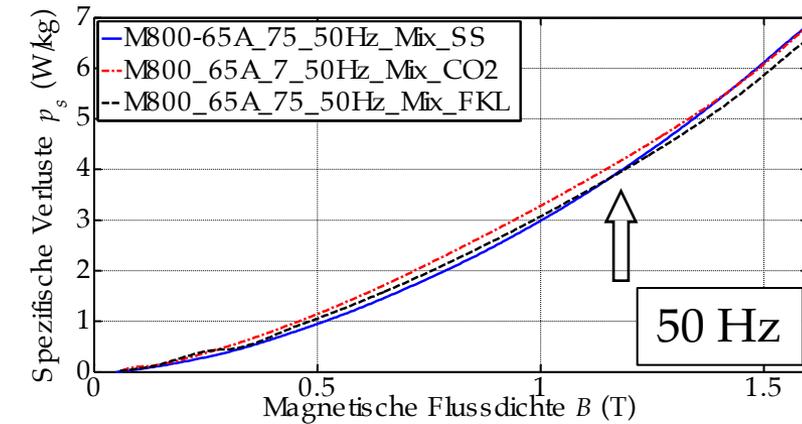


Zusammenfassung: Epsteinmessungen vs. Permeameter

- Magnetisierungskurven, schmale Proben, Laser:
stärker gesichert ✓
- Spezifische Verluste, schmale Proben:
Schnittpunkt $p_{\text{Laser}} > p_{\text{Schlagschere}}$ vs. $p_{\text{Laser}} < p_{\text{Schlagschere}}$
verschiebt sich zu kleinerem B mit steigender Frequenz und
Material mit kleinerem Korngrößendurchmesser ✓
- Relative Permeabilität:
 $\mu_{\text{max,Laser}} < \mu_{\text{max,Schlagschere}}$
 $\mu_{\text{max,Laser}} \rightarrow$ Plateaucharakteristik, je schmaler die Probe ✓

Epsteinrahmen - Schneidart

Schnittpunkt bei den spezifischen Verlusten



Schnittpunkt verschiebt sich zu kleineren magnetischen Flussdichten mit steigender Frequenz (und Material mit kleinerem Korngrößendurchmesser).

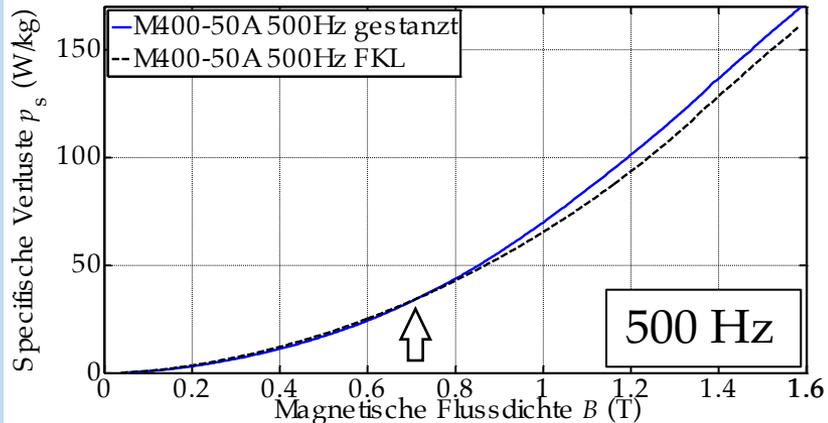
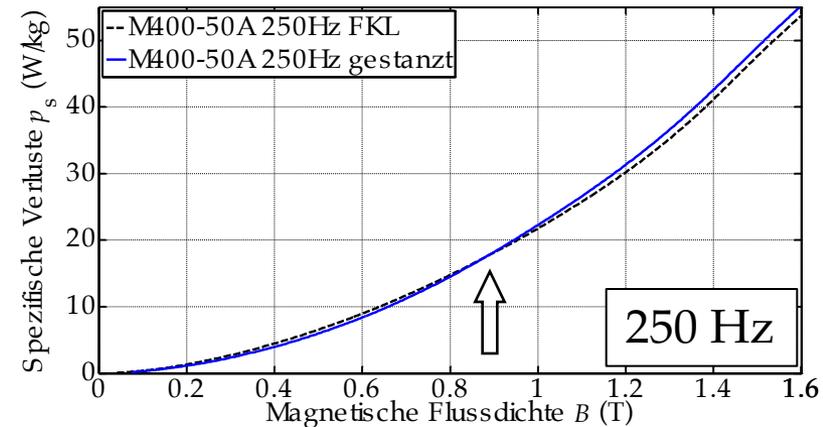
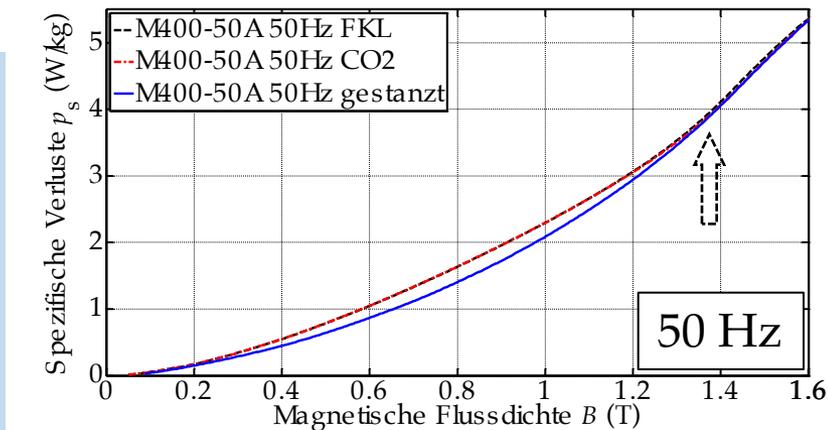
Ständermessungen

- Ermittlung der Magnetisierungskurve, relativen Permeabilität, spezifischen Verluste
- Unterschied zu Epsteinmessungen:
 - Geometrie
 - Bleche geklebt und verpresst



Ständermessungen - Schneidart

Spezifische Verluste

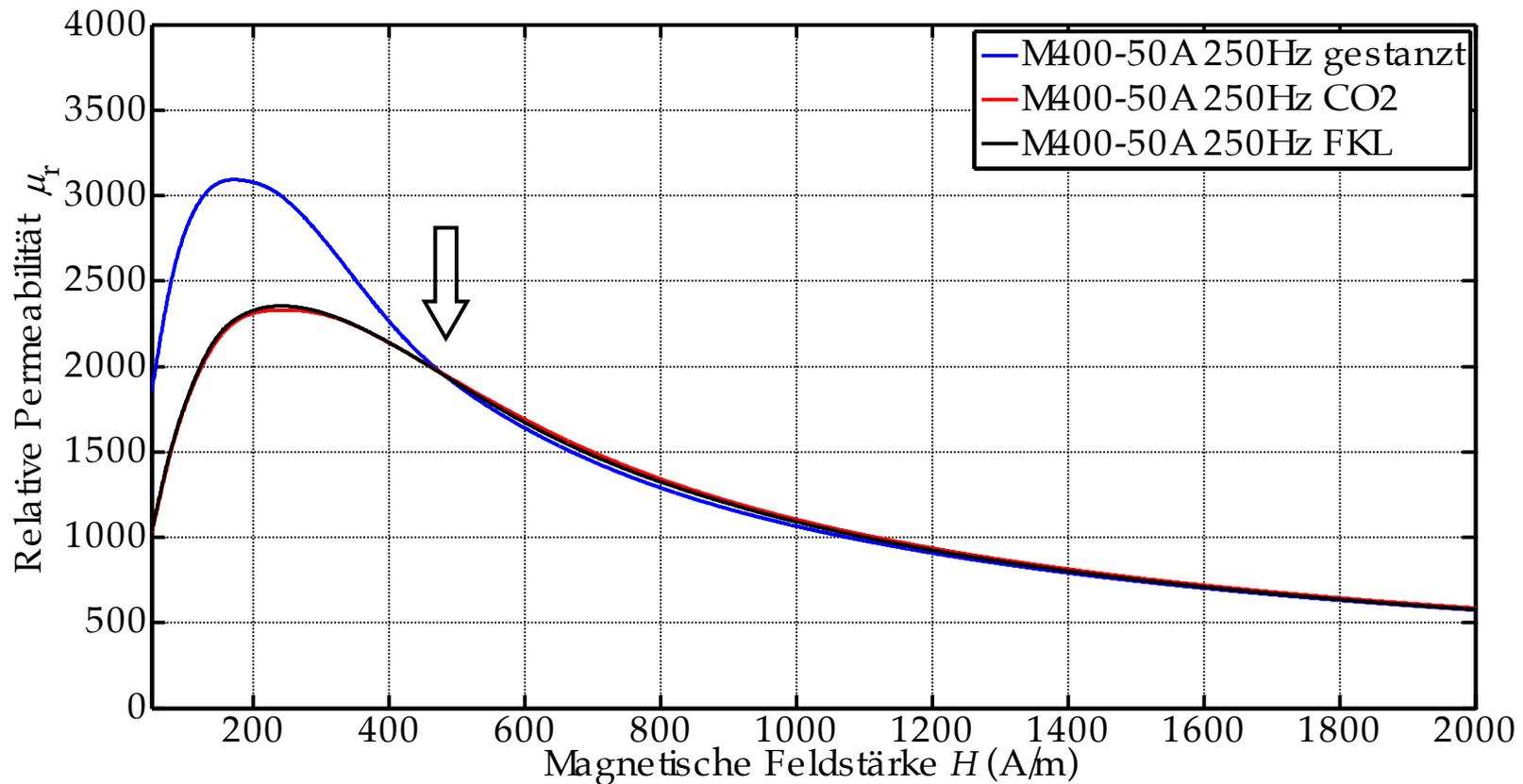


Schnittpunkt:

- verschiebt sich zu kleinerem B mit steigender Frequenz und Material mit kleinerem Korngrößendurchmesser
- Schnittpunkte treten bei kleineren Flussdichten auf als bei Epsteinproben

Ständermessungen - Schneidart

Relative Permeabilität: $\mu_{\max, \text{Laser}} < \mu_{\max, \text{gestanzt}}$

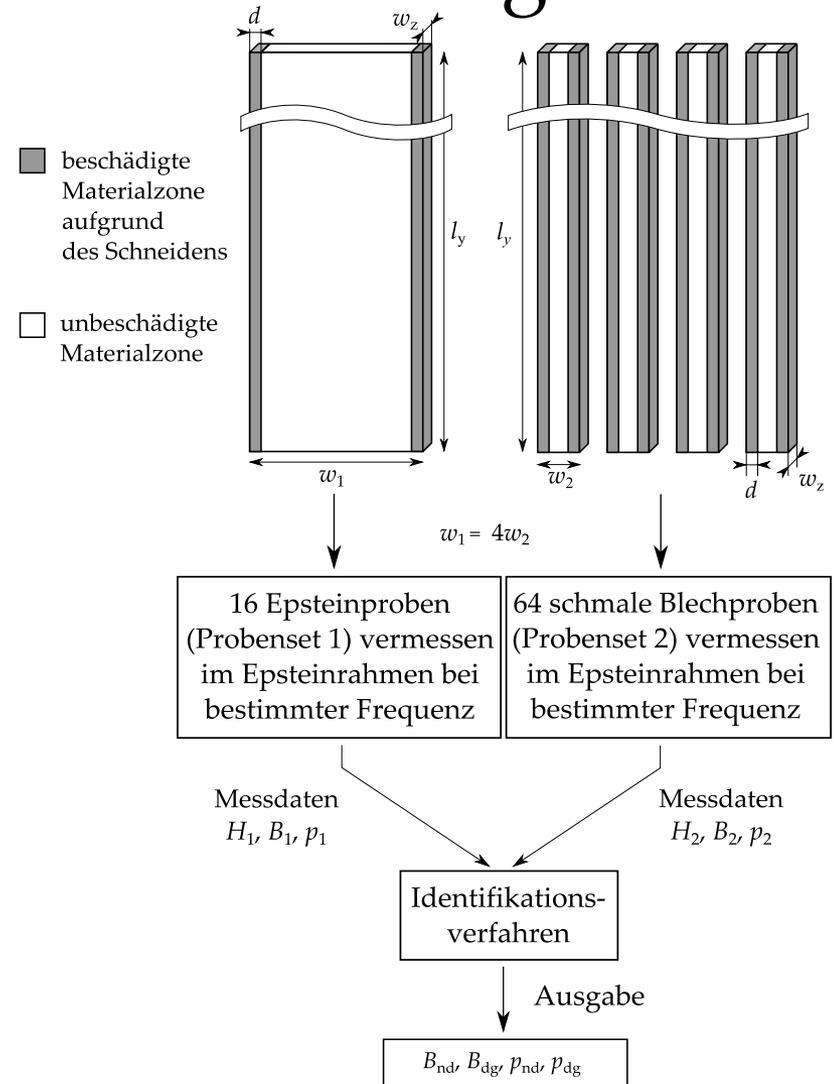


Überblick

- Einführung
- Forschungsprogramm
- Experimentelle Ergebnisse
- Modellierung des Schneideffekts
- Simulationsergebnisse
- Zusammenfassung

Annahmen & Vereinfachungen

- Geschnittene Proben bestehen aus einer *beschädigten* Materialzone mit der Zerstörungstiefe d und einer *unbeschädigten* Materialzone.
- $d \ll l_y$
- Beide Zonen haben homogene Eigenschaften.

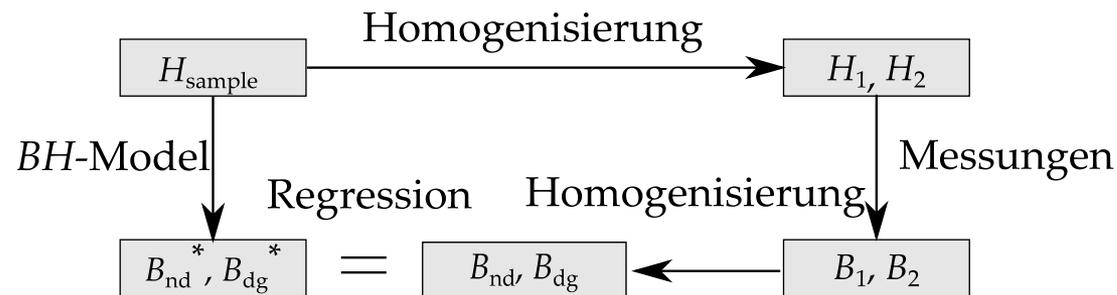


Identifikation der (un)beschädigten *BH*-Charakteristiken

- Messdaten $(H_1, B_1), (H_2, B_2)$: unabhängig voneinander ermittelt (\rightarrow schmale und breite Epsteinproben)
- Homogenisierung: $H_{\text{sample}} = H_1 = H_2 = H$
- Datenpunkte (H, B_{nd}) und (H, B_{dg}) werden berechnet von:

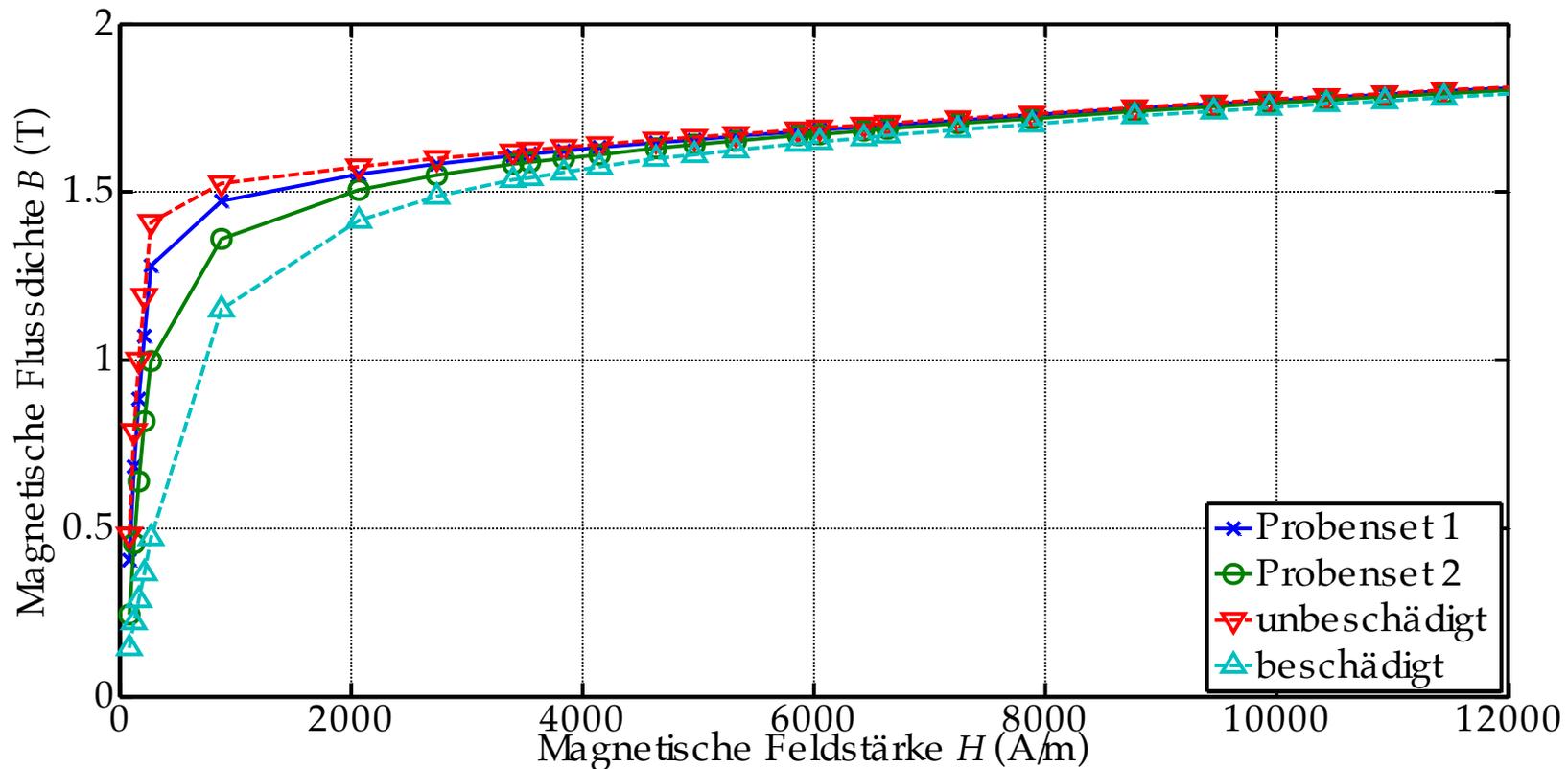
$$\begin{bmatrix} 1 - \gamma_1 & \gamma_1 \\ 1 - \gamma_2 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{\text{nd}} \\ B_{\text{dg}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad \text{with } \gamma_1 = \frac{2d}{w_1} \text{ und } \gamma_2 = \frac{8d}{w_1}$$

- $B_1, B_2, B_{\text{nd}}, B_{\text{dg}}$ gehören alle zur gleichen magnetischen Feldstärke H .



Gemessene und identifizierte BH -Kurven

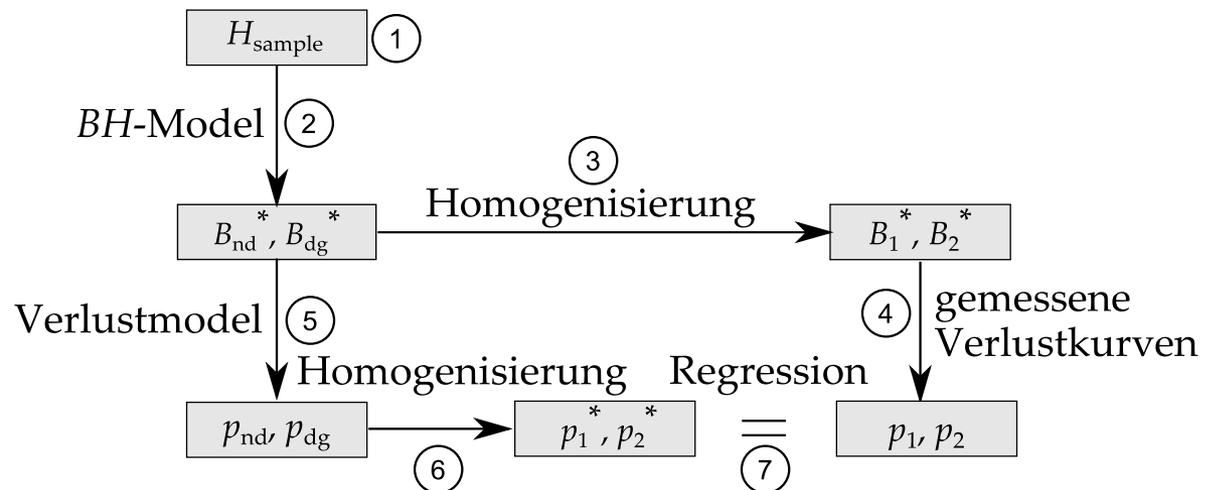
- Beispiel: M400-50A, 250 Hz, mechanisch geschnitten
- $B_{nd} > B_1 > B_2 > B_{dg}$ ist erfüllt für die gleiche Feldstärke



Identifikation der (un)beschädigten Verlustkurven

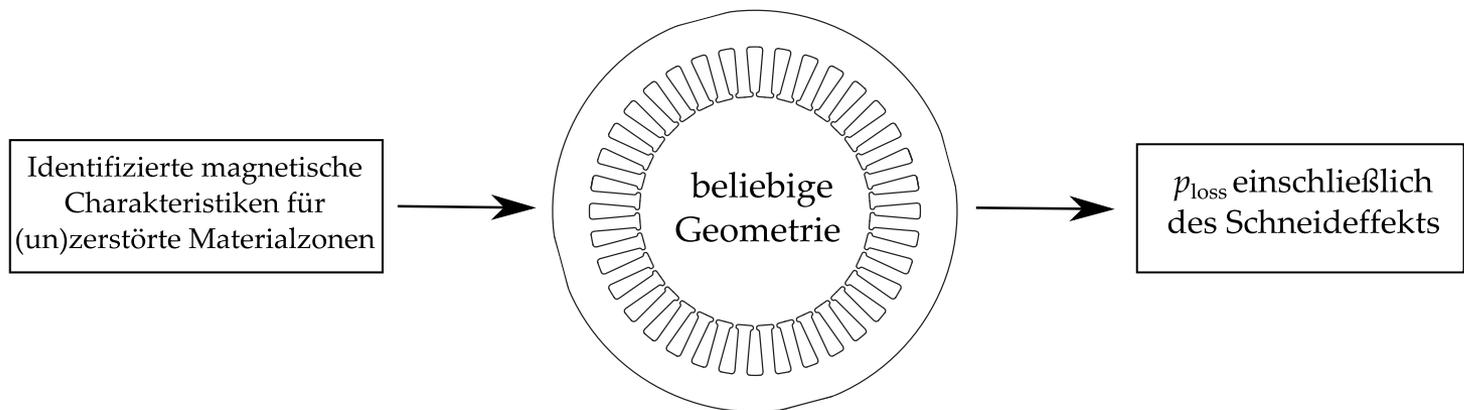
$$\text{Verlustmodell: } p_{\text{loss}} = c_1 B + c_2 B^2$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \gamma_1 & \gamma_1 \\ 1 - \gamma_2 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{nd} \\ p_{dg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1^* \\ p_2^* \end{bmatrix}$$



Implementierung der identifizierten magnetischen Charakteristiken für andere Geometrien

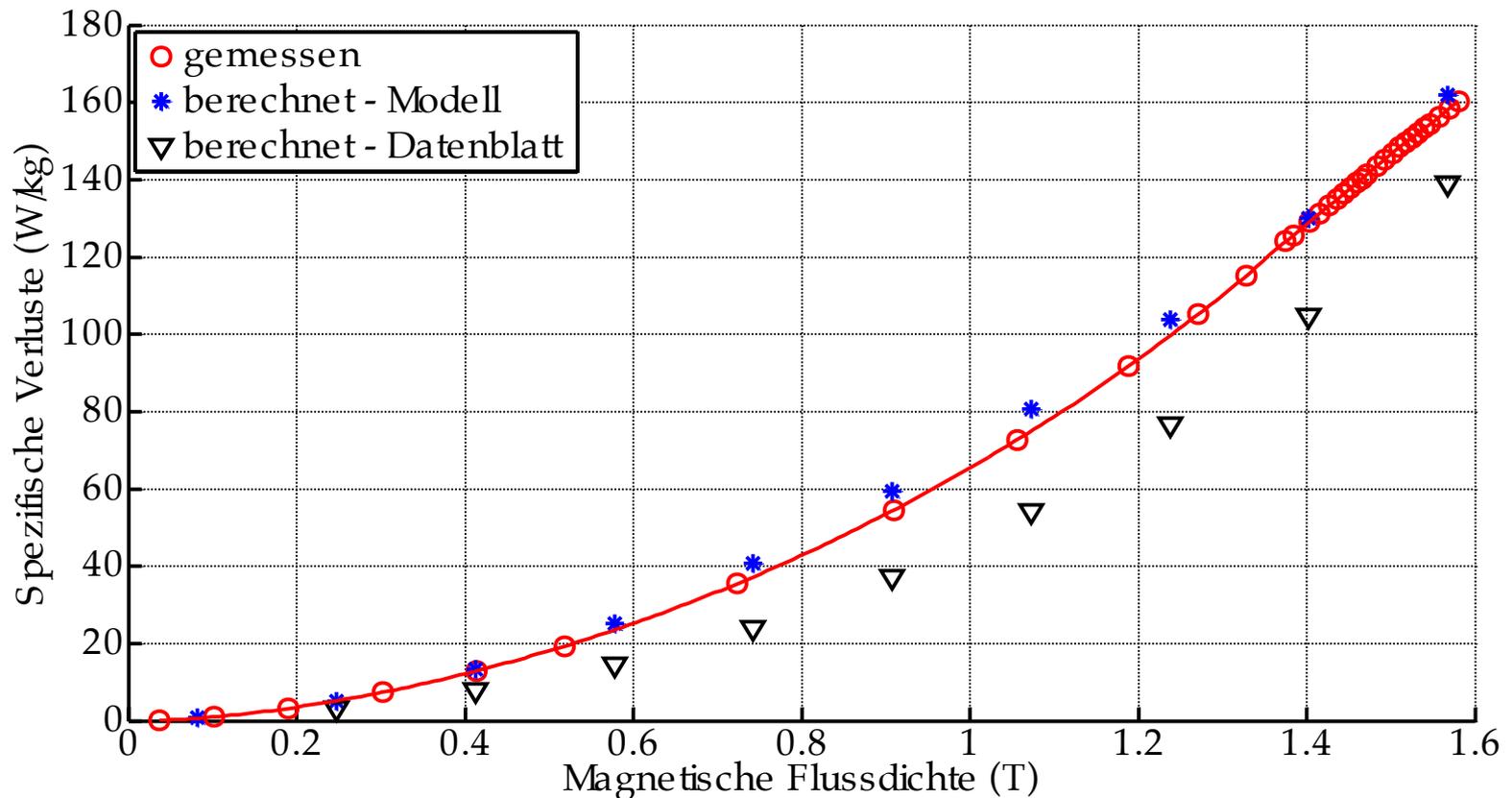
- Implementierung der vermessenen Ständergeometrie in eine FE Simulation
- Gleiche Zerstörungstiefe d wie für die Epsteinproben wird angenommen
- Zusätzlicher Einfluss des Pressens und Verklebens wird mitberücksichtigt



- Zusätzlich Simulation mit Herstellerangaben

Gemessene und simulierte Verlustkurven der Ständergeometrie

Ständerpaket: M400-50A, 250 Hz, mechanisch geschnitten



Zusammenfassung: Simulationsmethode

- Verifikation für: drei Materialien, drei Frequenzen, mechanisches und Laserschneiden.
- Die berechneten Verluste sind viel genauer, als die Simulation basierend auf den Herstellerangaben.
- Vorteile:
 - Schnelle und einfache Ermittlung der Eingangsparameter: standardisiertes, weitverbreitetes Messverfahren; nur zwei Messungen notwendig. ✓
 - Angenommene Zerstörungstiefe d muss nicht mit tatsächlicher Zerstörungstiefe übereinstimmen. ✓
 - Anwendbarkeit für verschiedene Geometrien, Materialien, Frequenzen und unterschiedliche Schneidverfahren verifiziert. ✓

Weitere Referenzen:

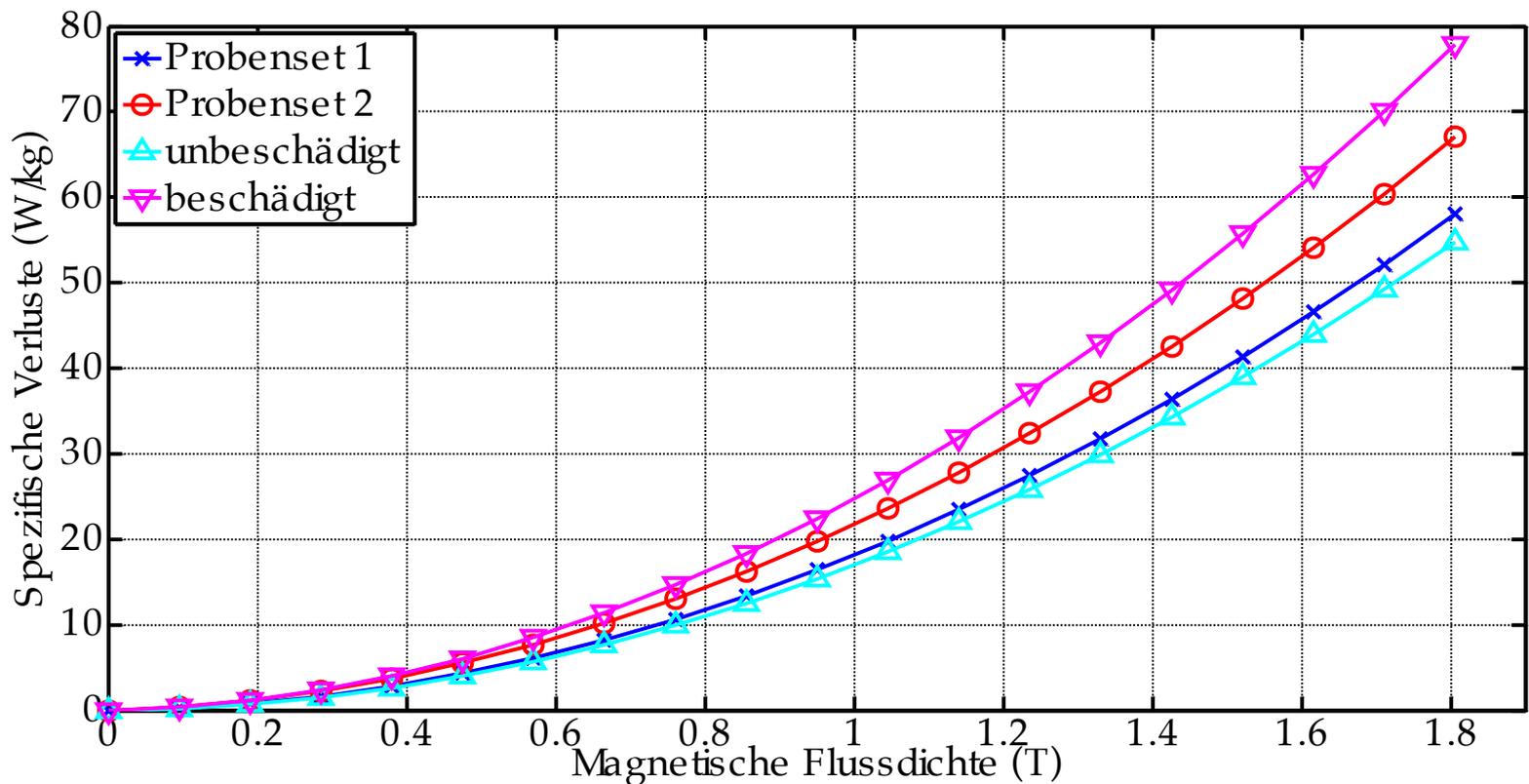
- [5] M. Bali, H. De Gerssem, A. Muetze, *Determination of Original Nondegraded and Fully Degraded Magnetic Characteristics of Material Subjected to Laser Cutting*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 4242 - 4251, 2017.
- [6] M. Bali, A. Muetze, *Modeling the Effect of Cutting on the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 3, pp. 2547 - 2556, 2017.
- [7] M. Bali, A. Muetze, *Influence of Different Cutting Techniques on the Magnetic Characteristics of Electrical Steels Determined by a Permeameter*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 971 - 981, 2017.
- [8] M. Bali, H. De Gerssem, A. Muetze, *Determination of Original Nondegraded and Fully Degraded Magnetic Characteristics of Material Subjected to Mechanical Cutting*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 3, pp. 2297 - 2305, 2016.
- [9] M. Bali, A. Muetze, *Influences of CO₂ Laser, FKL Laser, and Mechanical Cutting on the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 4446 - 4454, 2015.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Gemessene und identifizierte Verlustkurven

- Beispiel: M400-50A, 250 Hz, mechanisch geschnitten
- $p_{nd} > p_1 > p_2 > p_{dg}$ ist erfüllt für die gleiche Flussdichte

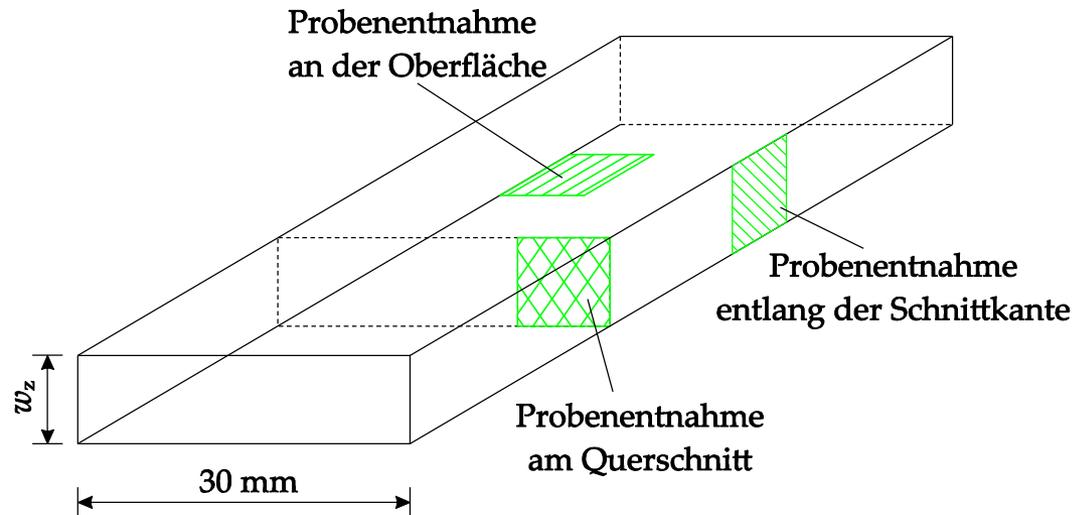


Optische Emissionsspektrometrie

- Ausgewählte 30 mm Blechproben wurden an 3-4 Stellen in der Mitte entfettet und geschliffen und anschließend mit OES untersucht.
- Wieso notwendig: Hersteller sind nur dazu verpflichtet die Angaben, z. B. der Verluste, einzuhalten. Die chemische Zusammensetzung bleibt ihr Geheimnis.
- Die chemische Zusammensetzung beeinflusst die mittlere Korngröße und somit das Verlustverhalten.

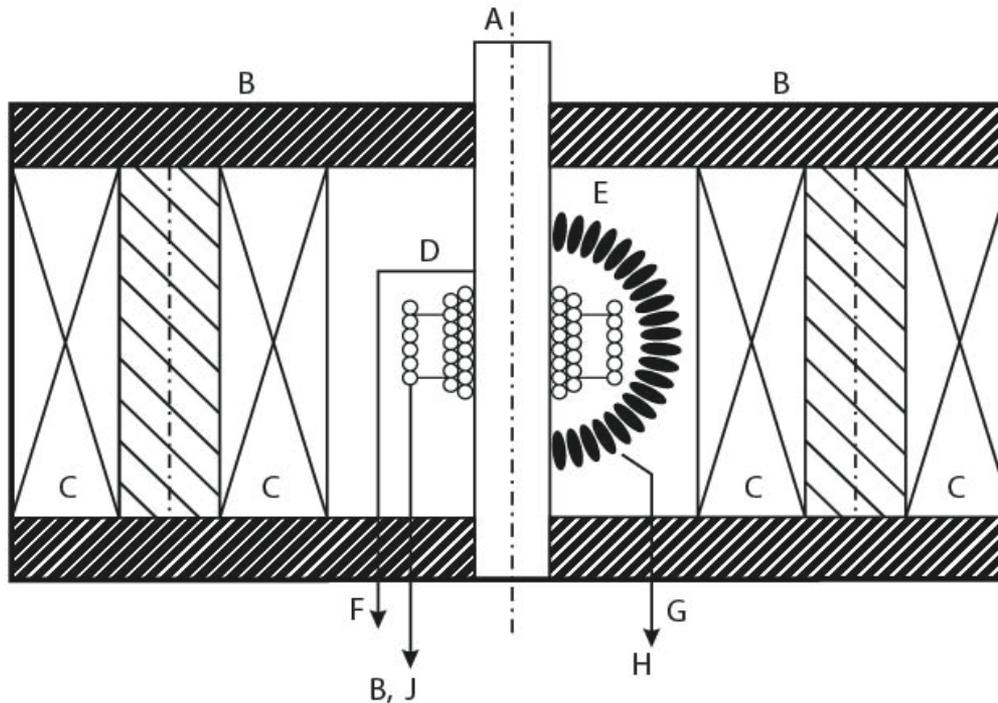
Electron backscatter diffraction

- Ermittlung des mittleren Korngrößendurchmessers
- 3 unterschiedliche Probenentnahmen:



Remagraph

- Bestimmung der quasistatischen Hysteresekurven



- A: Materialprobe
- B: Joch
- C: Feldspulen
- D: J-compensated surrounding coil
- E: Potentialspule für H
- F: Verbindung zum J-Fluxmeter
- G: Verbindung zum H-Fluxmeter

Ergebnisse: Remagraph

- Einfluss der Schneidart: Hysteresekurve
Laser- vs. mechanisches Schneiden

Remanenzflussdichten

B_{r_RD}	M270-35A_SS 0.895 T	M400-50A_SS 0.935 T	M800-65A_SS 0.84 T
B_{r_RD}	M270-35A_CO ₂ 0.285 T	M400-50A_CO ₂ 0.375 T	M800-65A_CO ₂ 0.49 T
B_{r_RD}	M270-35A_FKL 0.33 T	M400-50A_FKL 0.435 T	M800-65A_FKL 0.555 T

Ergebnisse: Remagraph

- Einfluss Schneidrichtung: Remanenzflussdichte
Laser- vs. mechanisches Schneiden

Remanenzflussdichte - Schlagschere

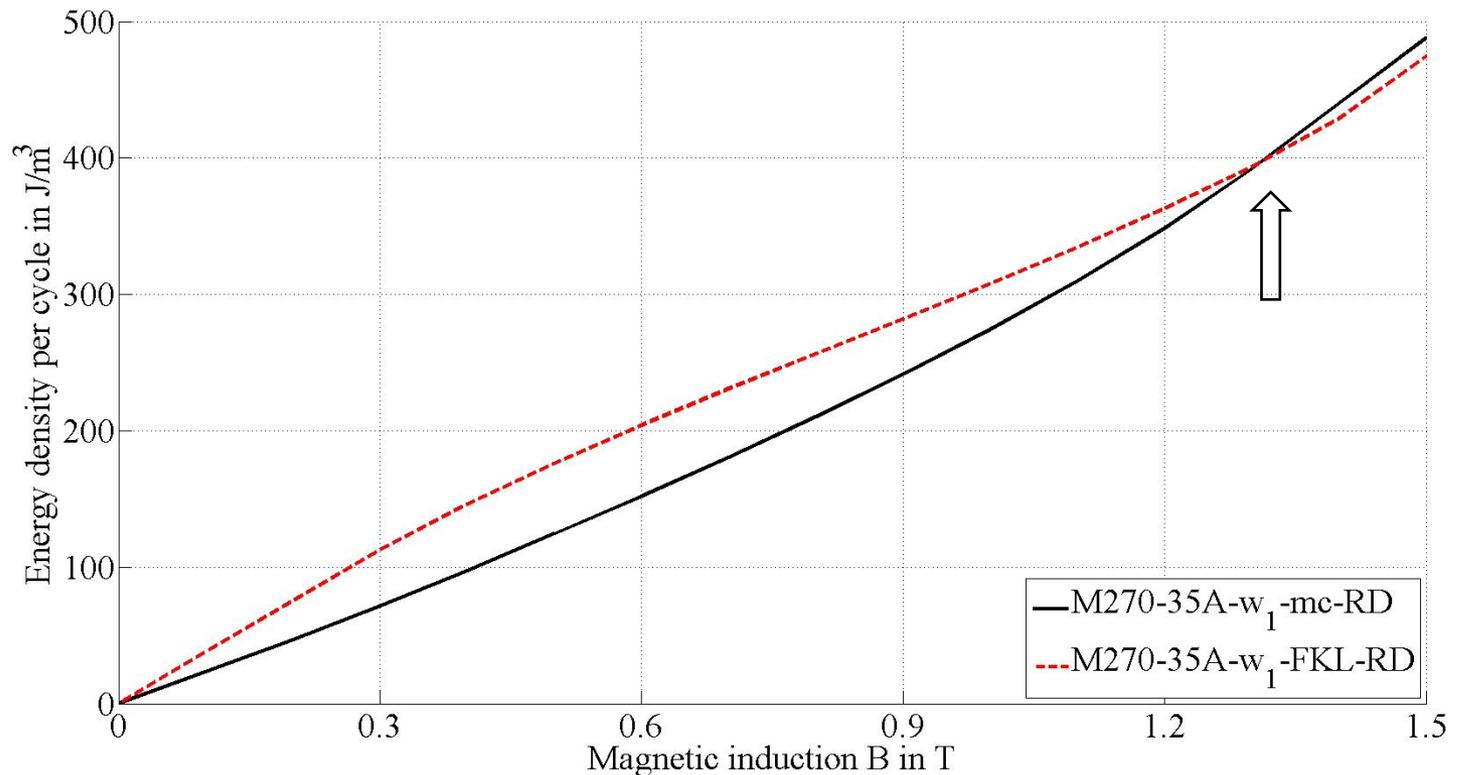
SS	M270-35A	M400-50A	M800-65A
B_{r_RD}	0.895 T	0.935 T	0.84 T
B_{r_TD}	0.46 T	0.575 T	0.655 T

Remanenzflussdichte – FKL-Laser

FKL-laser	M270-35A	M400-50A	M800-65A
B_{r_RD}	0.33 T	0.435 T	0.555 T
B_{r_TD}	0.3T	0.43 T	0.5T

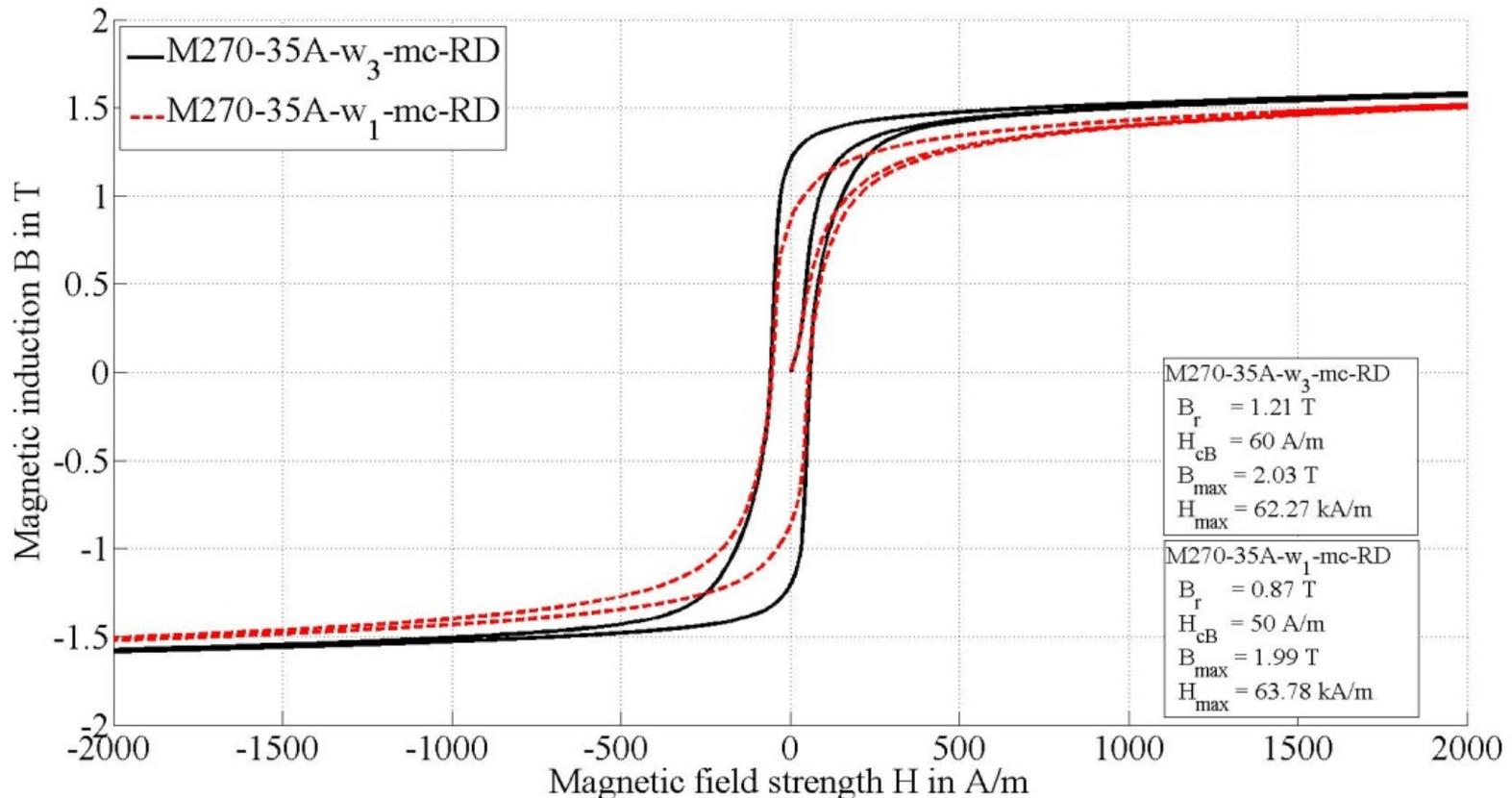
Remagraph - Schneidart

Spezifische Verluste: Laser- vs. mechanisches Schneiden



Remagraph - Probengröße

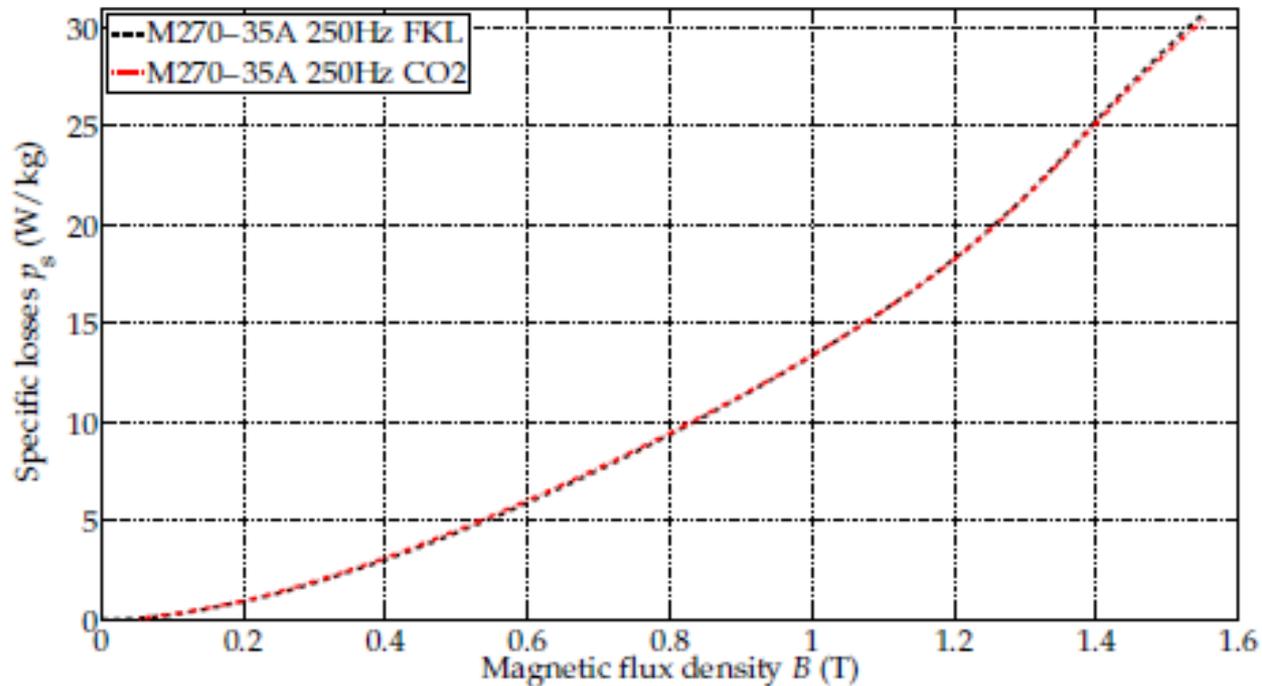
Hysteresekurve: mechanisches Schneiden



Ständermessungen - Schneidart

Spezifische Verluste

- Keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den beiden Laserschneidarten

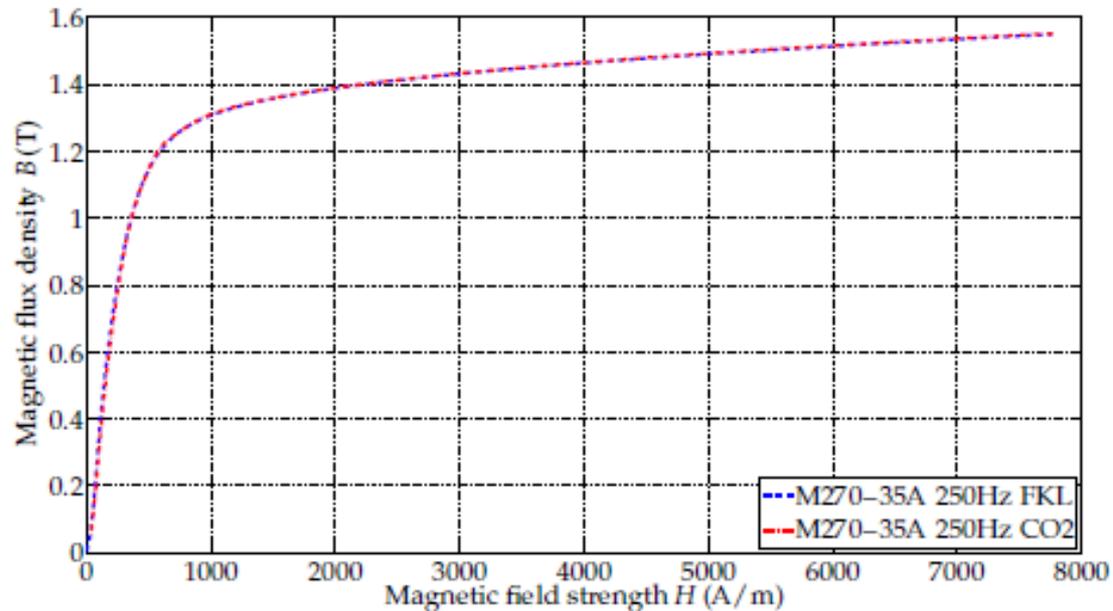


(a) Specific losses

Ständermessungen - Schneidart

Magnetisierungskurve

- Keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den beiden Laserschneidarten



(b) Magnetization curve

Zusammenfassung: Ständermessungen

- Magnetisierungskurven, Laser:
weniger stark aber immer noch stärker geschert,
 $B \text{ (Kniepunkt)}_{\text{Laser}} > B \text{ (Kniepunkt)}_{\text{Schlagschere}}$.
- Spezifische Verluste:
Bei kleinem B : $p_{\text{Laser}} > p_{\text{Schlagschere}}$
Bei mittlerem oder hohem B :
 $p_{\text{Laser}} \approx p_{\text{Schlagschere}}$ oder $p_{\text{Laser}} < p_{\text{Schlagschere}}$
Schnittpunkt verschiebt sich zu kleinerem B mit steigender
Frequenz und dickerem Material
 $B_{\text{Schnittpunkt, Ständer}} < B_{\text{Schnittpunkt, Epsteinproben}}$
- Relative Permeabilität:
 $\mu_{\text{max, Laser}} < \mu_{\text{max, Schlagschere}}$
 $\mu_{\text{max, Laser}} \rightarrow$ Plateaucharakteristik entfällt
- Beide lasergeschnittenen Proben sind ähnlich im Verlauf, aber:
 $p_{\text{FKL-Laser}} = p_{\text{CO2-Laser}}$
 $\mu_{\text{max, FKL-Laser}} = \mu_{\text{max, CO2-Laser}}$

Zusammenfassung: Epsteinmessungen

- Magnetisierungskurven, schmale Proben, Laser:
stärker gesichert,
 $B \text{ (Kniepunkt)}_{\text{Laser}} > B \text{ (Kniepunkt)}_{\text{Schlagschere}}$



⇒ Übereinstimmung mit Ständerproben

- Spezifische Verluste, schmale Proben:

Bei kleinem B : $p_{\text{Laser}} > p_{\text{Schlagschere}}$

Bei mittlerem oder hohem B :

$p_{\text{Laser}} \approx p_{\text{Schlagschere}}$ oder $p_{\text{Laser}} < p_{\text{Schlagschere}}$

Schnittpunkt verschiebt sich zu kleinerem B mit steigender
Frequenz und dickerem Material



neu

⇒ Übereinstimmung mit Ständerproben

- Relative Permeabilität:

$\mu_{\text{max,Laser}} < \mu_{\text{max,Schlagschere}}$

$\mu_{\text{max,Laser}} \rightarrow$ Plateaucharakteristik, je schmaler die Probe



⇒ Teilweise Übereinstimmung mit Ständerproben

- Beide lasergeschnittenen Proben sind ähnlich im Verlauf, aber:

$p_{\text{FKL-Laser}} = p_{\text{CO2-Laser}}$

$\mu_{\text{max,FKL-Laser}} > \mu_{\text{max,CO2-Laser}}$

neu

⇒ Teilweise Übereinstimmung mit Ständerproben

Versetzungen

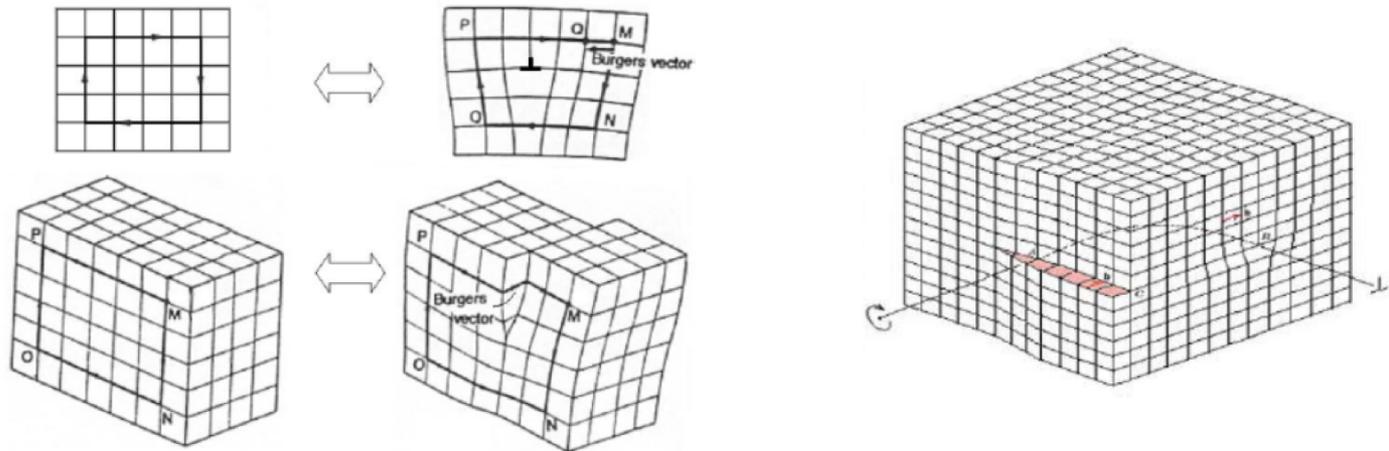


Abbildung 2.3 Bestimmung des Burgers-Vektors für eine Stufenversetzung (oben), und eine Schraubenversetzung (unten) [6]

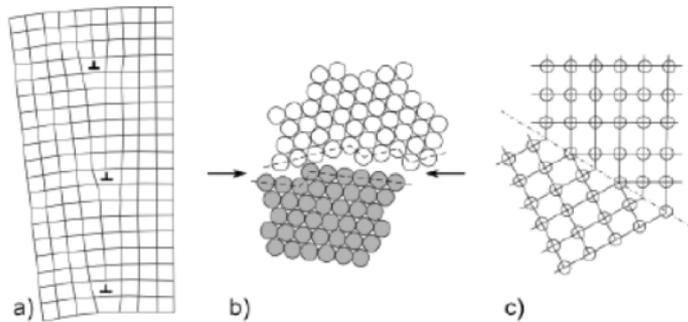


Abbildung 2.8 a) Kleinwinkelkorngrenze, b) Großwinkelkorngrenze, c) Zwillingsgrenze [15]

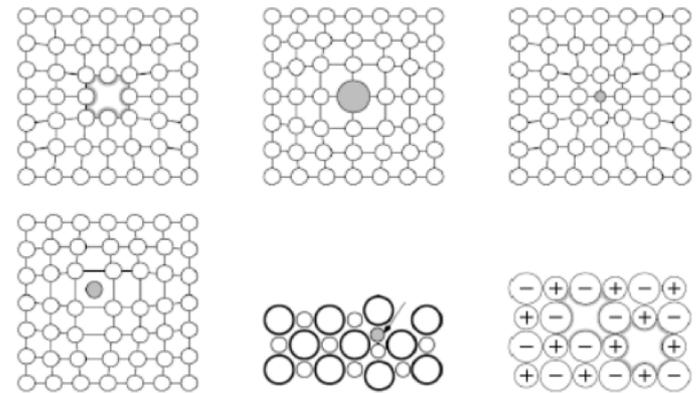


Abbildung 2.2 Überblick über die verschiedenen Typen von Punktdefekten. Leerstelle, großes Fremdatom, kleines Fremdatom, (obere Reihe), Zwischengitteratom, Frenkel-Defekt, Shottky-Defekt (untere Reihe) [3]

Remagraph - Schneidrichtung

Hysteresekurve

