



Numerische Simulation von Eisenverlusten in Elektroblech

Francois Henrotte
IEM – RWTH Aachen



- Literaturrecherche zeigt, dass es viele verschiedene Eisenverlustberechnungsformeln gibt
- Diese können auf einer Achse (empirisch – physikalisch) angeordnet werden
- **Empirische Formeln** werden gefittet an gemessenen Daten



- Steinmetz $P_{Fe} = k f^x B^y$
- Howe $P_{Fe} = \left(\frac{f}{50}\right) P_{hyst}^{1.7} + \left(\frac{f}{50}\right)^2 P_{cw} B^2 + \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} P_{exc} B^{1.5}$
- Bertotti $P_{Fe} = k_h B^2 f + \frac{\pi^2 d^2}{6\rho\rho_e} B^2 f^2 + k_{ex} B^{1.5} f^{1.5}$

- **Physikalische Modelle** basieren auf einer physikalischen Begründung



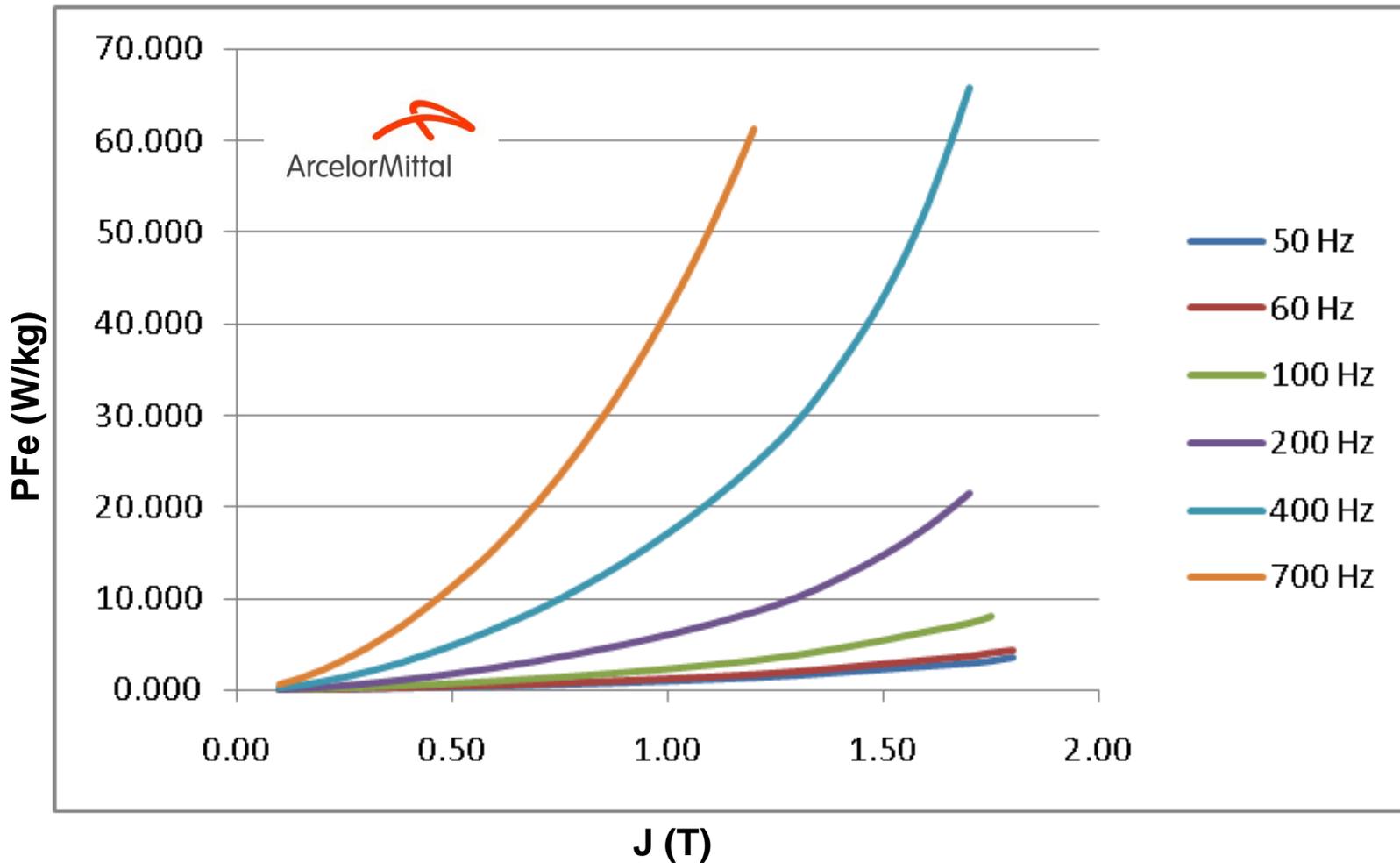
Hysterese

Klassische

Zusatz

$$P_{Fe} = k_h B^2 f + \frac{\pi^2 d^2}{6\rho\rho_e} B^2 f^2 + k_{ex} B^{1.5} f^{1.5}$$

- G. **Bertotti**, Hysteresis in Magnetism, San Diego, 1998
- Basiert auf
 - angemessenen Vereinfachungen
 - statistischer Analyse
 - „Loss separation“ Prinzip, das eine tiefe theoretische Begründung hat
- Bertotti schlägt theoretische Werte für die Koeffizienten vor



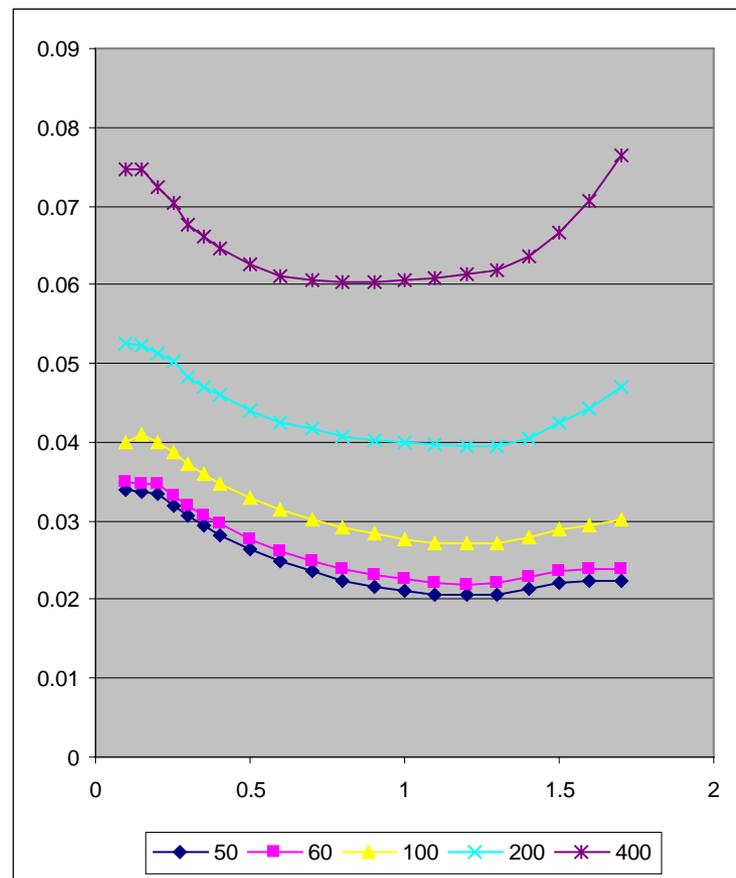
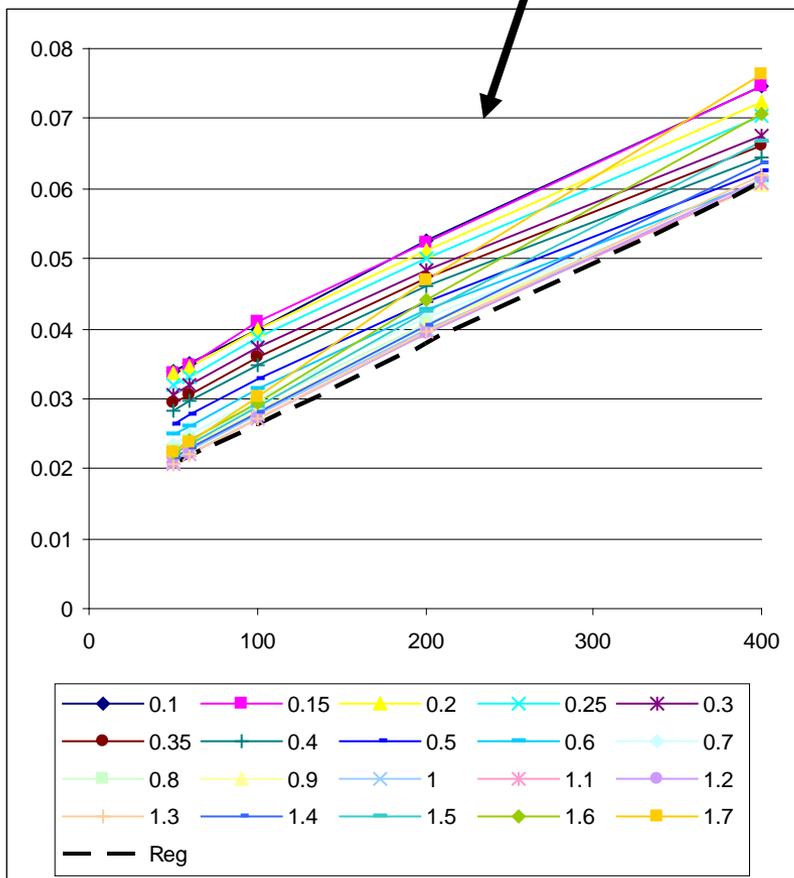
Passt das physikalische Modell zu Messungen?



$$P_{Fe} = k_h B^2 f + \frac{\pi^2 d^2}{6 \rho \rho_e} B^2 f^2 + k_{ex} B^{1.5} f^{1.5}$$

$$\frac{P_{Fe}}{B^2 f^1} = \alpha f + \beta + \gamma \sqrt{\frac{f}{B}}$$

eindeutig lineares Verhalten

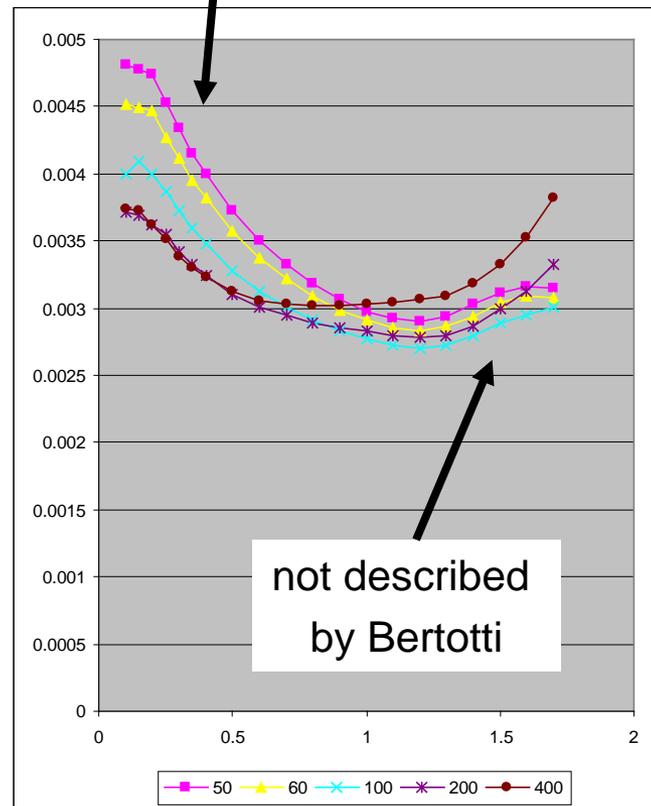
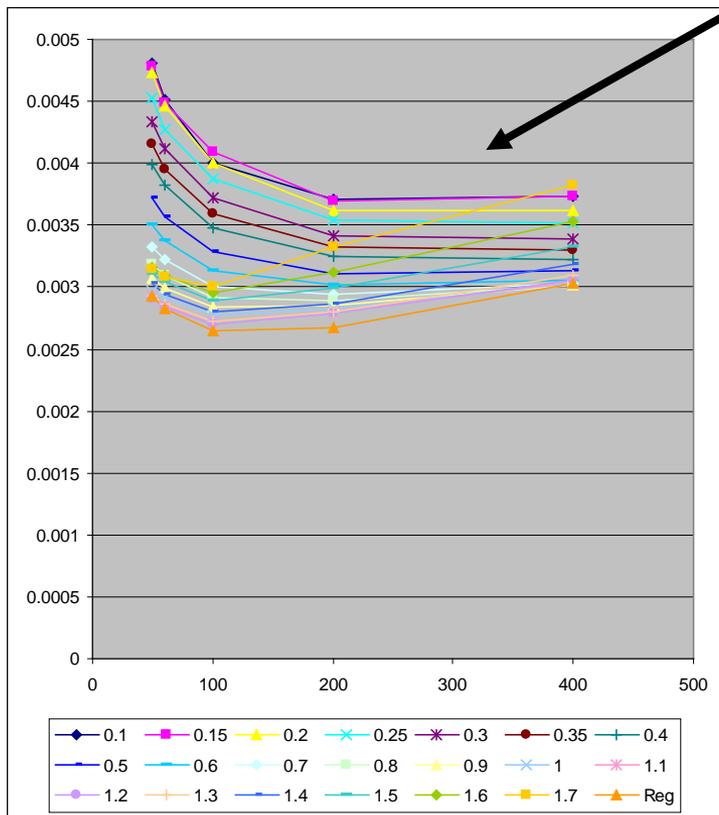




Das Modell von Bertotti

$$P_{Fe} = k_h B^2 f + \frac{\pi^2 d^2}{6 \rho \rho_e} B^2 f^2 + k_{ex} B^{1.5} f^{1.5}$$

$$\frac{P_{Fe}}{B^2 f^{1.5}} = \underbrace{\alpha \sqrt{f}}_{\text{not described by Bertotti}} + \frac{\beta}{\sqrt{f}} + \frac{\gamma}{\sqrt{B}}$$

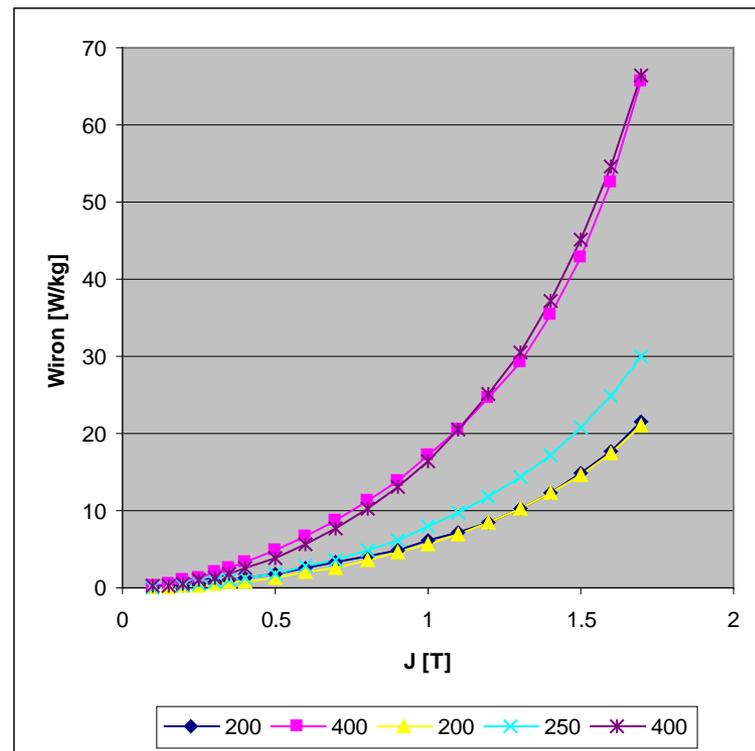
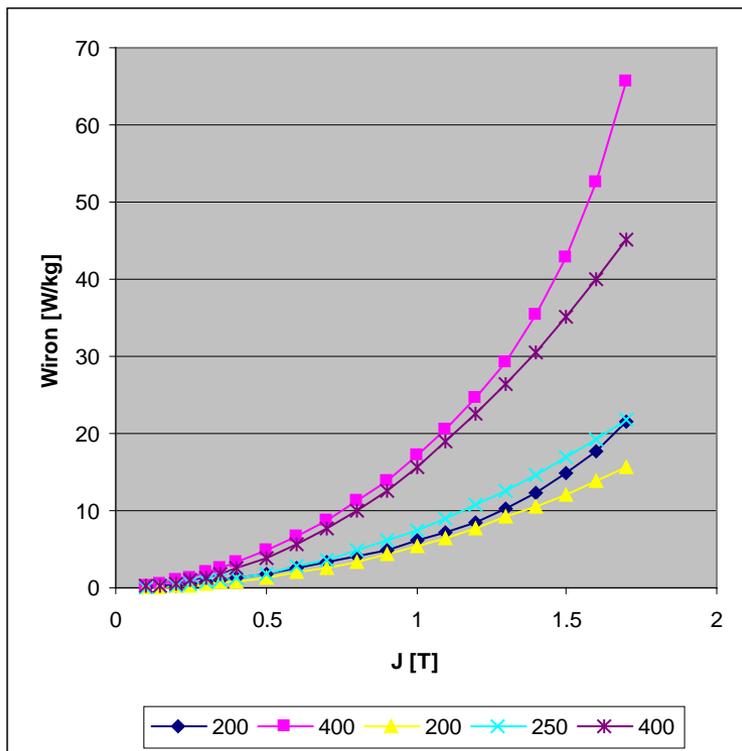




- Keine genaue Darstellung bei höheren Feldstärken durch den B^2 Term nach Bertotti
- Einfügen eines Terms höherer Ordnung (materialabhängig, hier $a_3=6$)
- Diese Verbesserung gilt für weite f- und B-Bereiche

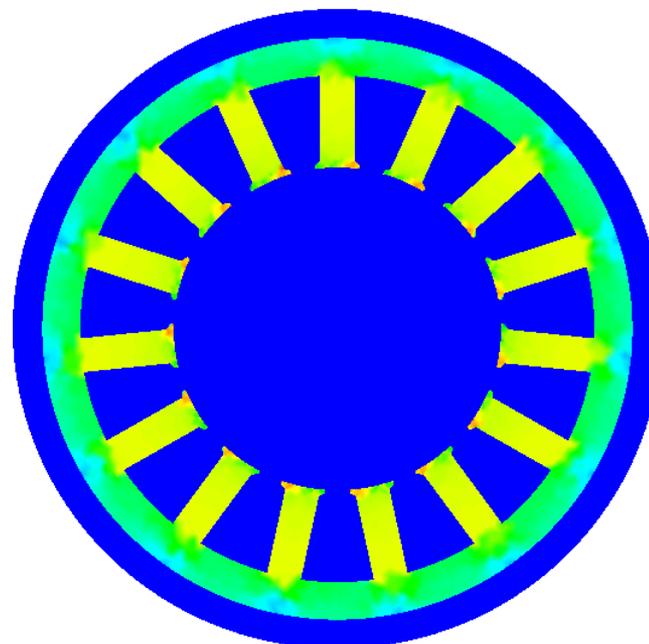
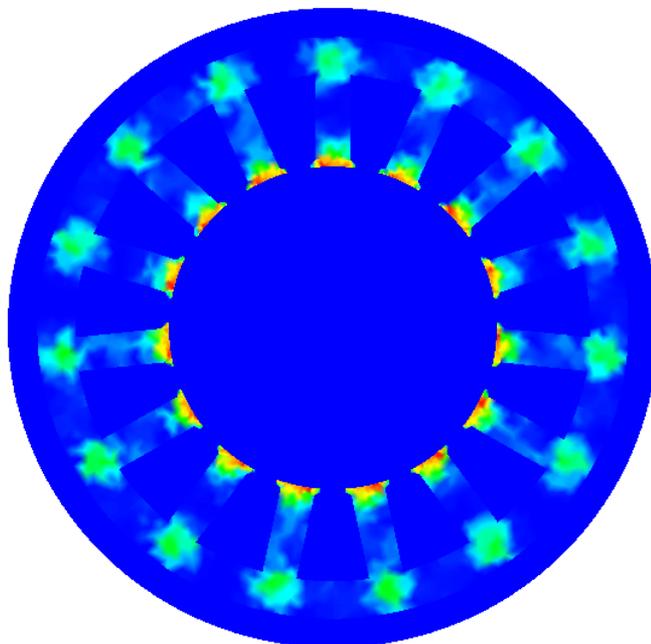
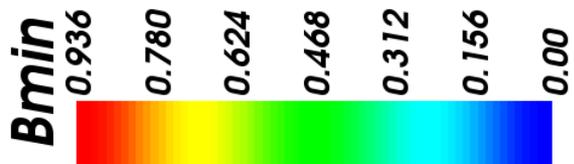
$$P_{Fe} = a_2 B^2 f + a_1 B^2 f^2$$

$$P_{Fe} = a_2 B^2 f + B^2 f^2 (a_1 + a_4 B^{a_3})$$





- Im Epstein Rahmen
 - Unidirektionales Feld (räumlich)
 - Sinusförmiges Feld (zeitlich)
- In der Realität
 - Vektorfelder (räumlich), rotatorische Hysterese
 - Oberwellen (zeitlich)
- Es müssen mehr Information aus dem FE Modell extrahiert werden
- B_{min} , B_{max} um festzustellen an welchen Stellen rotatorische Hysterese auftritt
- Fourier Analyse des B-Feldes um die Amplitude der Oberwellen zu identifizieren



Bmin liefert die Gebiete an denen rotatorische Hysterese auftritt



Hystereseverluste mit rotatorischen Verlusten (k_h):

$$p_h = k_h (1 + c(r-1)) B^2 f, \quad c = \frac{B_{\min}}{B_{\max}}$$

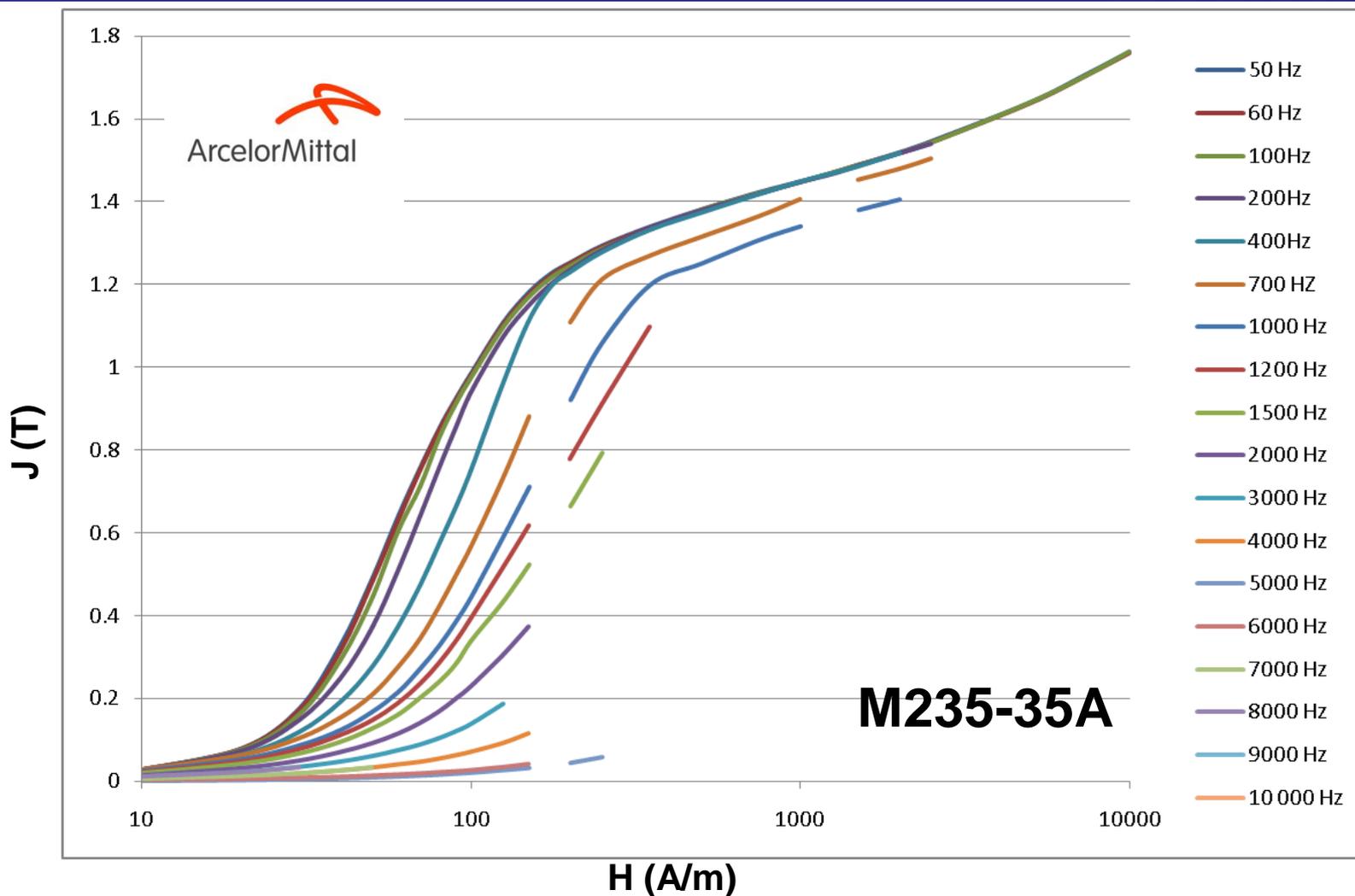
Klassische Wirbelstromverluste mit Oberwellen (k_{ec}):

$$p_{ec} = k_{ec} \sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 (nf)^2, \quad k_{ec} = \frac{\pi^2 d^2}{6\rho\rho_e}$$

Zusatz Wirbelstromverluste mit Oberwellen (k_{ex}):

$$p_{ex} = k_{ex} \sum_{n=1}^{\infty} B_n^{1.5} (nf)^{1.5}$$

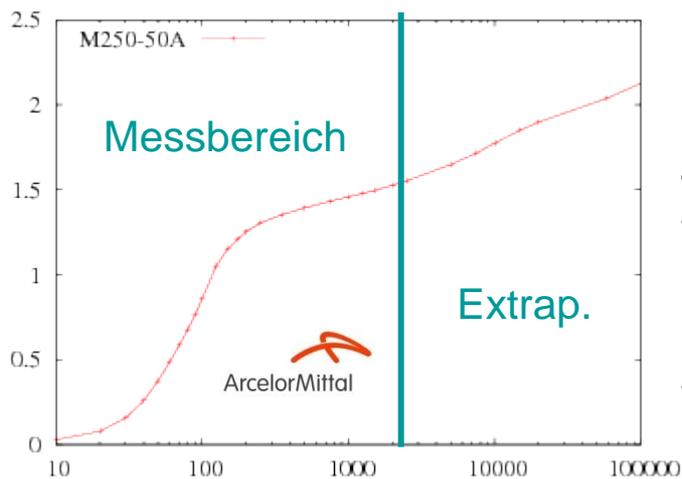
$$P_{Fe} = k_h (1 + 1.5c) B^2 f + \frac{\pi^2 d^2}{6\rho\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 (nf)^2 + k_{ex} \sum_{n=1}^{\infty} B_n^{1.5} (nf)^{1.5}$$



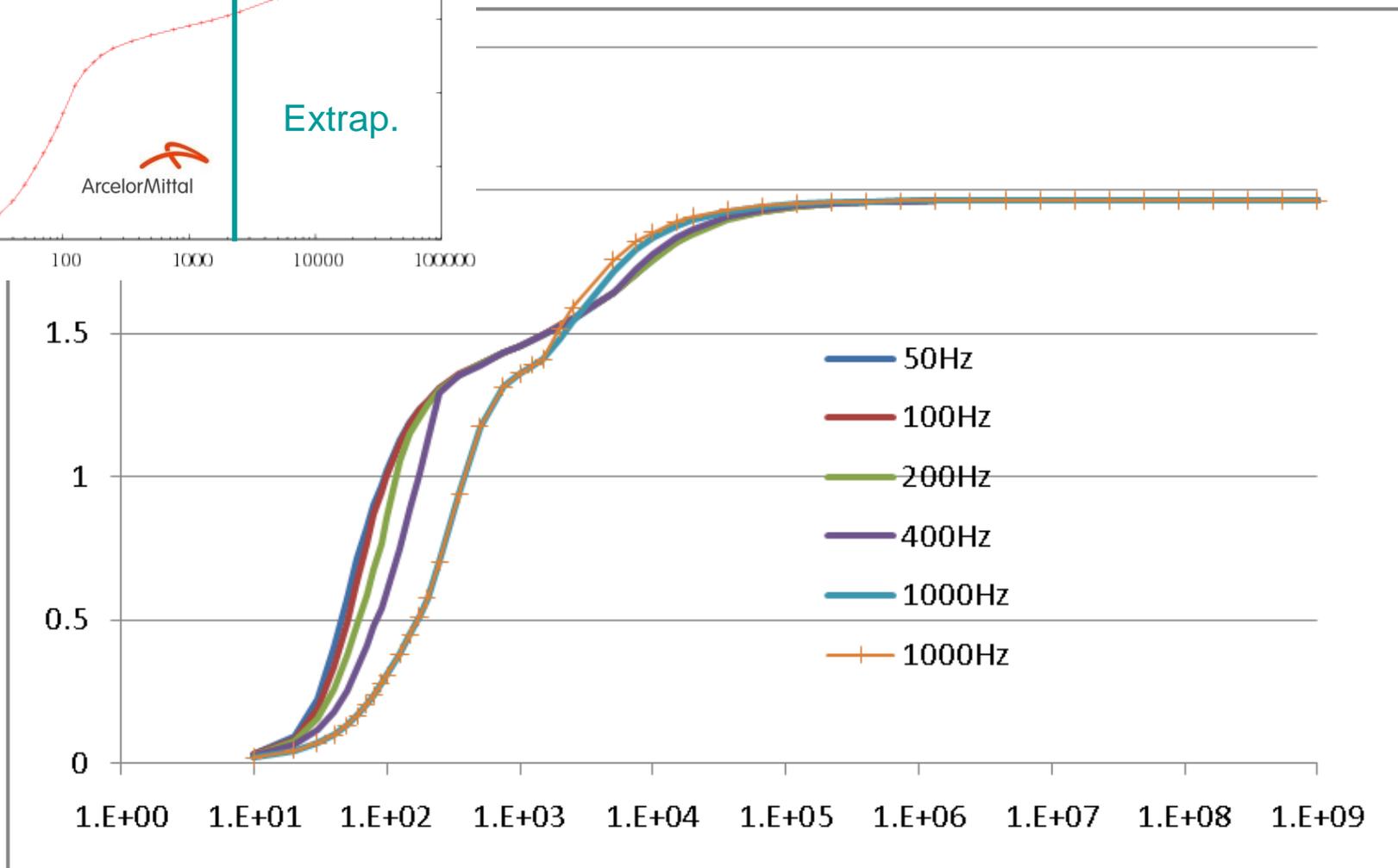
Die Frequenzabhängigkeit der B-H Kennlinie muss im FE Modell berücksichtigt werden



Extrapolation Messbereich -> Sättigung



Fröhlich-Kennely ist bis ~400Hz geeignet





- Bertotti + gefittete Koeffizienten an gemessenen Daten + 2 Verbesserungen (rotatorische Hyst., Oberwellen) + frequenzabhängige B-H Kennlinie ist „State of the Art“
- Analyse der individuellen Verlustkomponente
 - Hysterese (unidirektionale, rotatorische)
 - Wirbelströme (Klassische, Zusatz)
 - Grundwelle, Oberwelle
- Vergleich unterschiedlicher Materialien in einem gewissen Design ist möglich



- Die Berechnung liefert aber trotzdem nur **näherungsweise** die Größe der Eisenverluste
- Die Formel hat zumeist einen **eingeschränkten** Gültigkeitsbereich (NO Elektrobandsorte, Wertebereich von B und f, ...)
- Es gibt bislang **keine** Formel für die Berechnung der Eisenverluste, die alle relevanten Faktoren einschließt: räumliche Verteilung des Feldes, höhere Harmonische, nichtlineare Magnetisierungsvorgänge.

UND

- Umrichter gespeiste Maschinen haben **zunehmend mehr Oberwellen**
- Es gibt aufgrund des Umweltbewusstseins auch ein zunehmendes Interesse an der **Verlustreduktion** und an **besseren Wirkungsgraden**
- Dies hat eine wirtschaftliche und kommerzielle Bedeutung
- Eine **bessere Genauigkeit** der Eisenverlustberechnung ist nützlich



- „Alles Messen“ (mit allen möglichen Oberwellen) ist nicht machbar
- Die Eisenverluste sollen **genau** in solchen Zuständen (mit Oberwellen) evaluiert werden, in denen sie nicht gemessen wurden
- Hierfür wird ein **physikalisches parametrierbares Modell benötigt**
 - **Physikalisch**: Bedingung um sinnvolle Ergebnisse außerhalb des Messbereiches zu erhalten
 - **Parametrierbar**: um die Kenntnisse aus den Messungen im Modell berücksichtigen zu können



- Ein physikalisches Modell für die Berechnung der Eisenverluste in Elektroblech soll enthalten:
 - Ein **Hysteresemodell**
 - Ein dynamisches Modell für Wirbelströme **innerhalb** des Blechs
- Unerreichbar in 2D oder 3D
 - Das individuelle Vernetzen jedes Bleches ist zu vermeiden
 - Hysteresemodelle sind rechenaufwendig
- Dies lässt sich aber in **1D** ausführen
- Genügt um alle Effekte in einem Epstein Rahmen **fast exakt** zu simulieren



Thermodynamische Bedingung:

h_i = irreversibles Feld

M = Magnetisierung

$$Q = h_i \cdot \dot{M} \geq 0$$

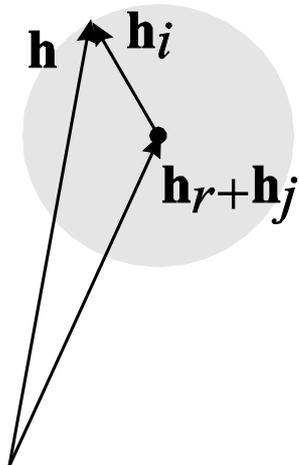
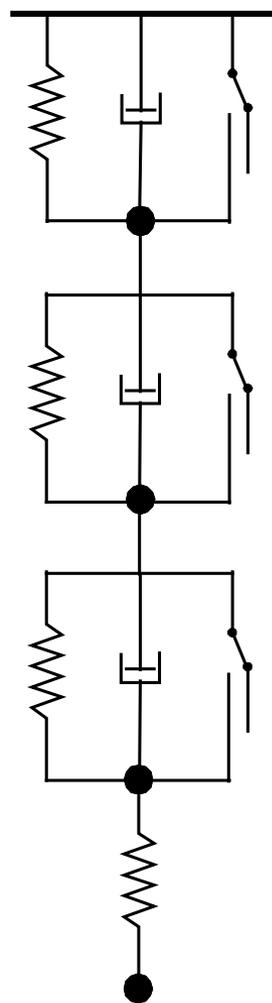
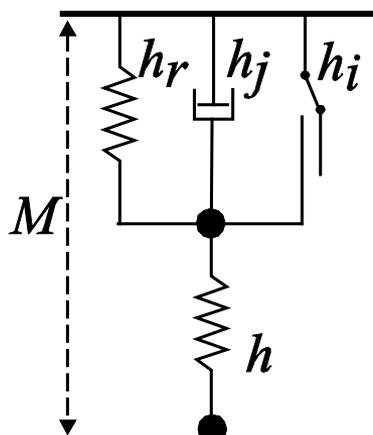
$$Q = \kappa |\dot{M}| \Rightarrow h_i = \text{sign}(\dot{M})$$

$$Q = \lambda |\dot{M}|^2 \Rightarrow h_i = \lambda \dot{M}$$

**quasistatisch (Hyst.)
dry friction**

**dynamisch (Wirbelstr.)
viscous friction**

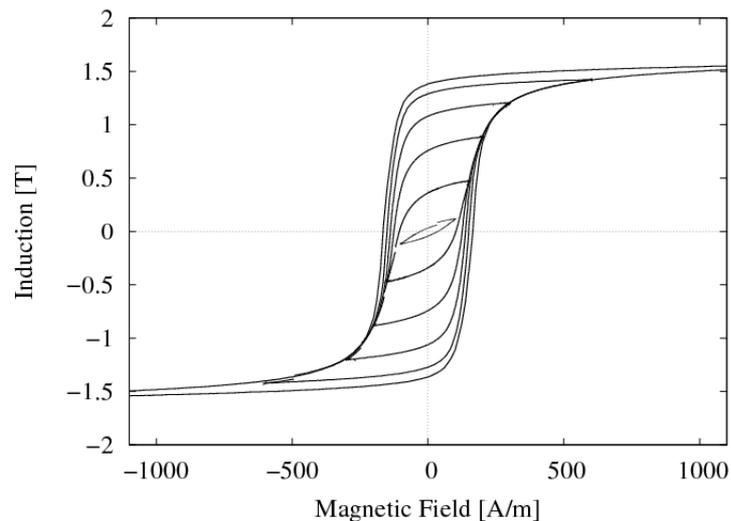
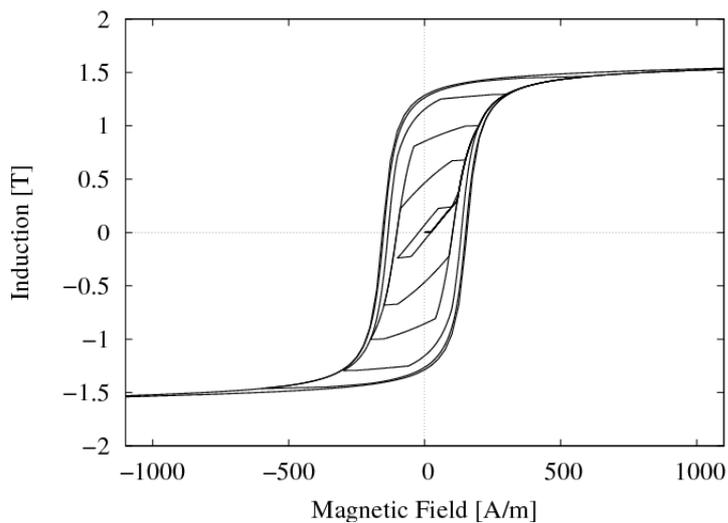
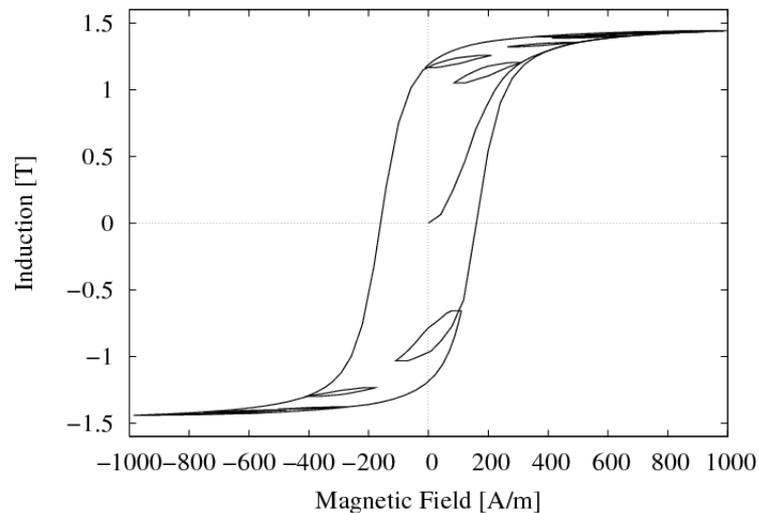
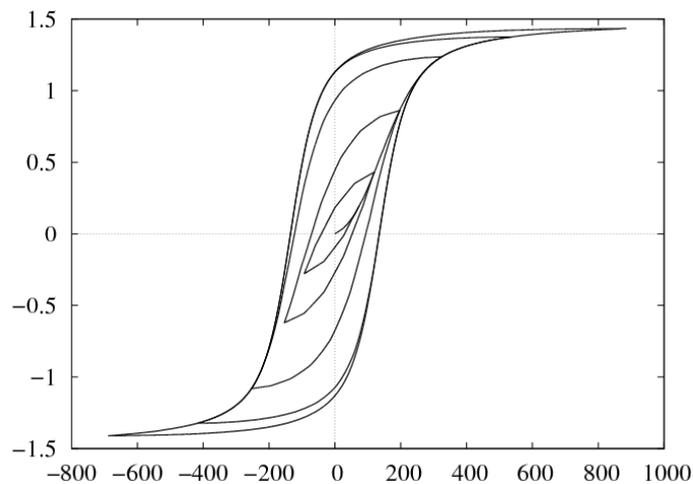
- Nach dem „Loss separation“ Prinzip
- Höhere Ordnungen sind nicht notwendig
- Hysterese und Wirbelströme werden berücksichtigt



- **Feder + Reibungsbaulement + Dämpfungsbaulement**
- **Die entsprechenden 3 „Kräfte“ summieren sich zum eingprägten magnetischen Feld h**
- **Der Memory-Effekt ergibt sich aus den Reibungsbaulementen**
- **Die Genauigkeit wird durch die Reihenschaltung mehrerer Zellen erhöht**
- **Deutliche Trennung zwischen gespeicherter magnetischer Energie und verlorener (dissipated) Energie**



Hysteresemodell





- Hinsichtlich der Berechnung der Eisenverluste in geblechten magnetischen Kernen, muss ein **Kompromiss** zwischen empirischen und physikalischen Ansätzen gemacht werden, also ein **semi-empirischer Ansatz**
- Vollgekoppeltes Modell ist in 2D/3D heutzutage unerreichbar, lässt sich aber in **1D** ausführen
- Beide Modelle sind vorhanden
- Nun muss die Kopplung der beiden Modelle realisiert werden