Fraunhofer
IISB

CADFEM TECHNOLOGIETAGE 2021

MODELLIERUNG VON LITZEN- UND KERNVERLUSTEN

DR. ANDREAS ROSSKOPF, STEFAN EHRLICH

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR INTEGRIERTE SYSTEME UND BAUELEMENTETECHNOLOGIE (IISB)

© Fraunhofer IISB

Agenda

- Induktive Systeme:
  - Aufbau und Verlustmechanismen
  - Hochfrequenzlitzen
- Verfahren zur Verlustbestimmung bei HF-Litzen
- ACT für Litzenverluste
- Verfahren zur Verlustbestimmung bei Magnetischen Materialien
- Verifikation mit Messungen
- Zusammenfassung

© Fraunhofer IISB

Herausforderungen in der Leistungselektronik

Fraunhofer IISB

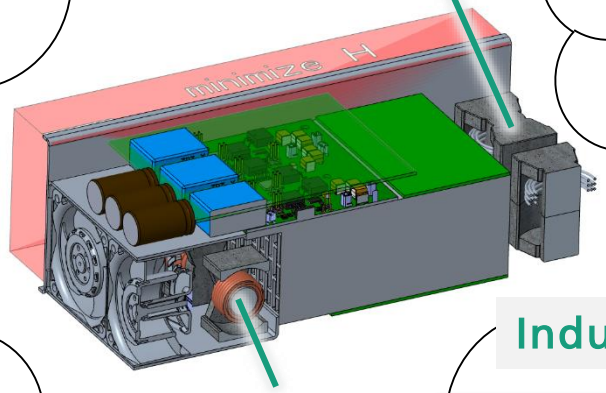
Multikriterielle Optimierung

≤ x Liter

≤ y K

≤ z kg

Transformator



Drossel

Möglichkeiten

- Anstieg der Schaltfrequenz
- Kleine Energiespeicher
- Effiziente Materialien
- Passende Topologien

Herausforderungen

- Kühlkonzepte [16] Menrath
- EMV
- Wide Bandgap [13] Endruschat [14] Gerstner

Induktive Komponenten

- Wicklungsverluste [15] Roßkopf
- Kernverluste [12] Stolzke
- Verlustcharakterisierung [11] Ehrlich

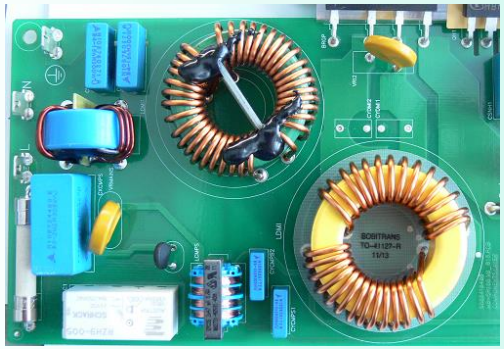
© Fraunhofer IISB

Induktive Systeme: State-of-the-art

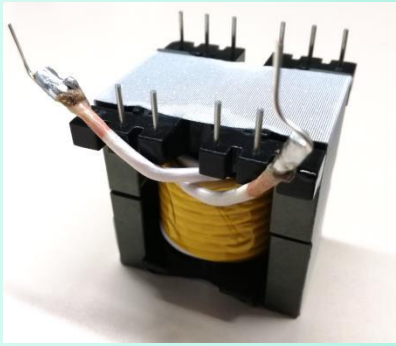
Fraunhofer IISB

Induktive Komponenten

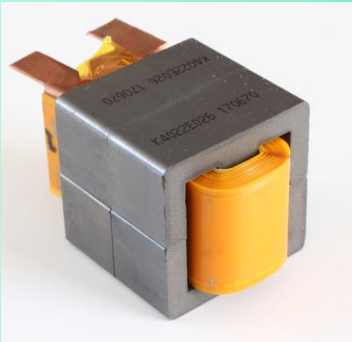
[3]



Filterspulen



PFC-Drossel
mit Luftspalt



Leistungsdrossel
(DC-DC-Wandler)

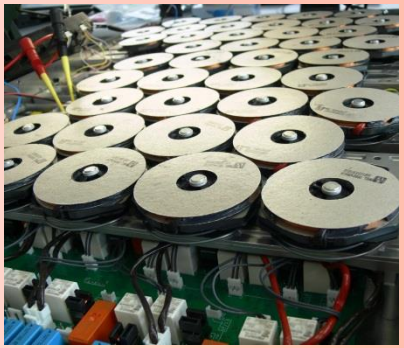
Bahntransformator
(luftgekühlt)

Systeme

[1]

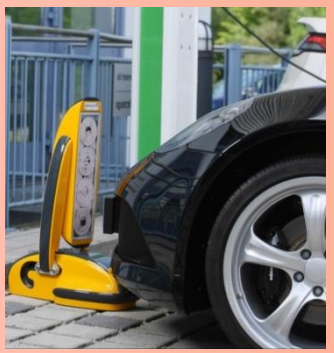
[2]

Induktive Ladesysteme für
Haushaltsanwendungen



Induktionsherd

[4]



Induktive Ladesysteme

© Fraunhofer IISB

[1] https://www.physikalische-schulexperimente.de/p/images/c/c6/Zahnbürste.png
[2] https://www.bosch-professional.com/static/specials/wireless-charging/gb/en
[3] http://www.sangl.de/produkte/autotransformatoren-atisoliertransformatoren-it/
[4] http://www.conductix.de/de/produkte/inductive-power-transfer-iptr

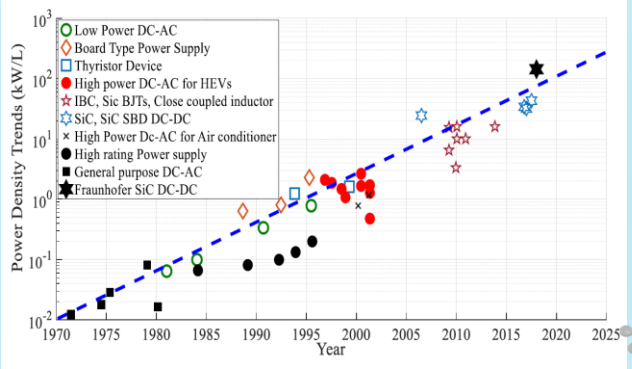
Induktive Systeme: State-of-the-art

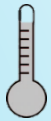
Fraunhofer IISB

Induktive Komponenten

[3]

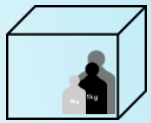
Leistung
Arbeitspunkte

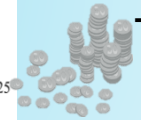




Abwärme
Temperatur

Bauraum
Gewicht





Time to market
Kosten

Zunahme der Leistungsdichte in Leistungselektronik Komponenten [5]

Systeme

[4]

Induktive Ladesysteme für Haushaltsanwendungen

Induktionsherd

Induktive Ladesysteme

[1] https://www.physikalische-schulexperimente.de/p/images/c/c6/Zahnbürste.png
[2] https://www.bosch-professional.com/static/specials/wireless-charging/gb/en
[3] http://www.sangl.de/produkte/autotransformatoren-atisoliertransformatoren-it/
[4] http://www.conductix.de/de/produkte/inductive-power-transfer-ipt/
[5] Chakraborty, S., DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends.

© Fraunhofer IISB

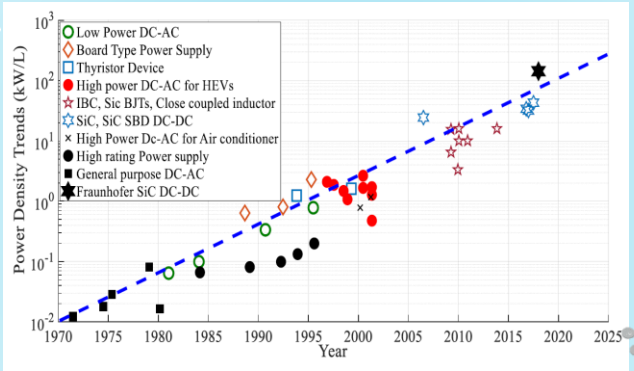
Induktive Systeme: State-of-the-art

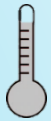
Fraunhofer IISB

Induktive Komponenten

[3]

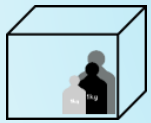
Leistung
Arbeitspunkte

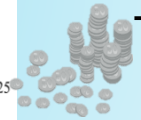




Abwärme
Temperatur

Bauraum
Gewicht





Time to market
Kosten

Zunahme der Leistungsdichte in Leistungselektronik Komponenten [5]

Systeme

[4]

Zunehmende Herausforderungen im Designprozess

Computergestützte Auslegung

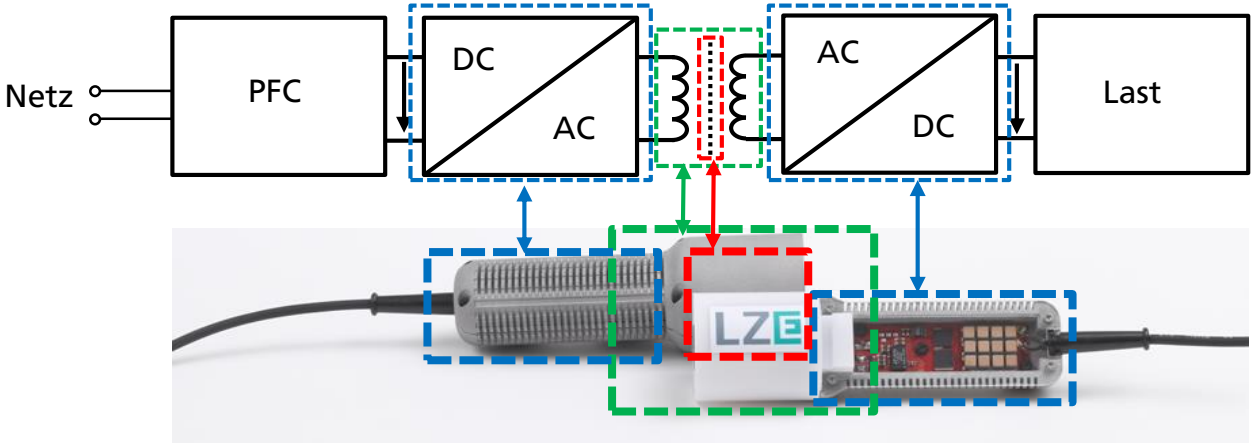
[1] https://www.physikalische-schulexperimente.de/p/images/c/c6/Zahnbürste.png
[2] https://www.bosch-professional.com/static/specials/wireless-charging/gb/en
[3] http://www.sangl.de/produkte/autotransformatoren-atisoliertransformatoren-it/
[4] http://www.conductix.de/de/produkte/inductive-power-transfer.jsp
[5] Chakraborty, S., DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends.

© Fraunhofer IISB

Induktive Systeme: Aufbau und Verluste

Fraunhofer IISB

➢ Prinzipschaltbild und Beispielanwendung:



➢ Dominierende Verlusteffekte:

Kern-verluste	Schaltungs-verluste	Wicklungs-verluste
Hysterese Wirbelstomverluste	Halbleiter (z.B. Diode, Schalter)	Proximityeffekt Skineffekt

© Fraunhofer IISB

Induktive Systeme: Verlustberechnung

Fraunhofer IISB

Dominierende Verlusteffekte:

Kern-verluste	Schaltungs-verluste	Wicklungs-verluste
Hysterese Wirbelstomverluste	Halbleiter (z.B. Diode, Schalter)	Proximityeffekt Skineffekt

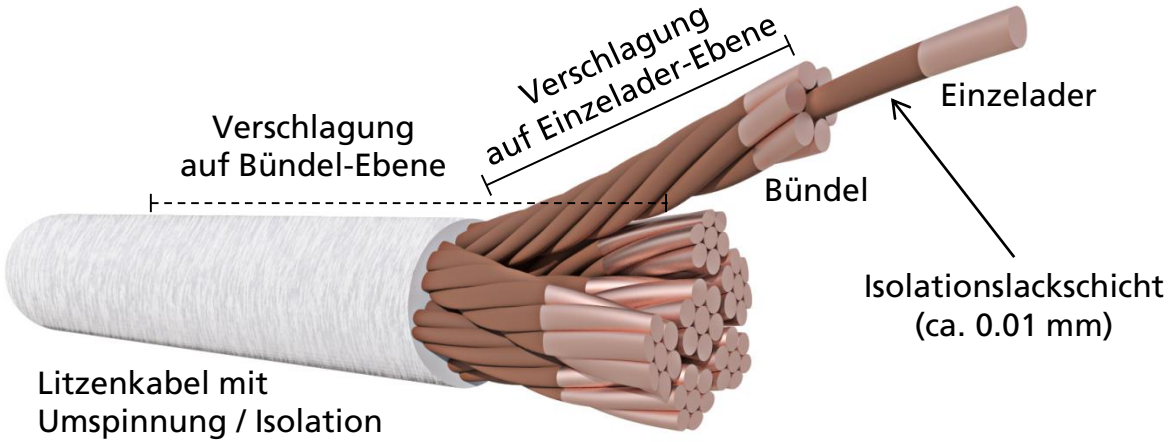
Charakteri-sierung	• Messungen an Probekörpern • Extraktion von Kennwerten	• Messungen der Bauelemente • Halbleiter-bauelemente-simulation	**Massivleiter**	**Litzenkabel** • Messungen der Litzenkabel • Extraktion von Kennwerten
Methodik & Simulation	• Steinmetzformel • Numerische Verfahren (z.B. FEM)	• Schaltungs-simulation (z.B. Spice, Simplorer)	• Numerische Verfahren (z.B. FEM)	• FEM + PEEC/SEEC/o.ä.

© Fraunhofer IISB

Litzenkabel – Aufbau

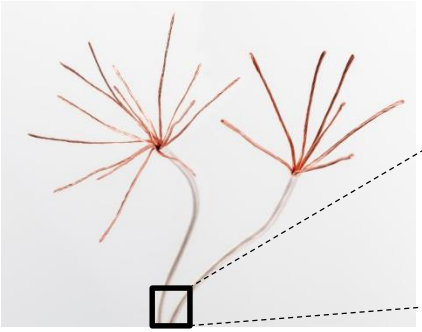
Fraunhofer IISB

➢ Hochfrequenzlitze – Schematischer Aufbau und Bezeichnung

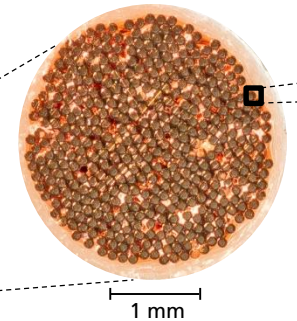


➢ Beispiel HF-Litze: 420 x 0.1mm

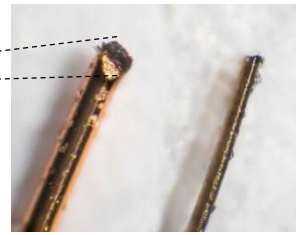
Bündelstruktur 14 x 30 und 7 x 60



Querschnitt



Größenvergleich Einzelader / Haar



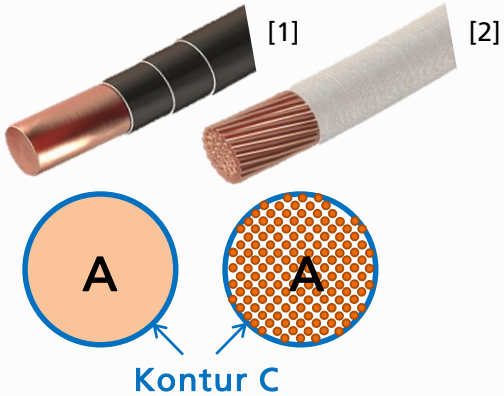
Portfolio gängiger HF-Litzen-Hersteller

© Rudolf Pack GmbH & Co. KG

SlicerPro – Grundlegende Idee

Fraunhofer IISB

Modellbildung:

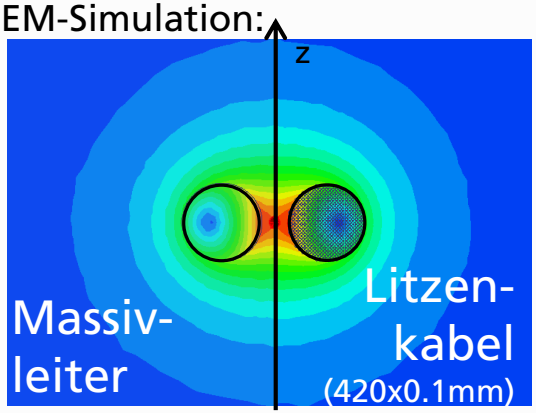


Mathematik:

$$\oint_C \vec{H}\, dc = \iint_A \vec{J}\, dA$$

(unter Vernachlässigung des Verschiebungsstroms)

FEM-Simulation:

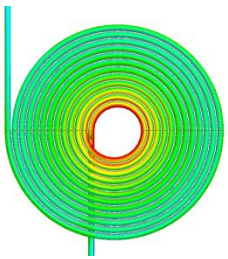


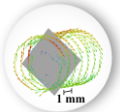
2.5D-Simulation von |H|

Gleiche Feldverteilung bei Massiv- und Litzenleiter

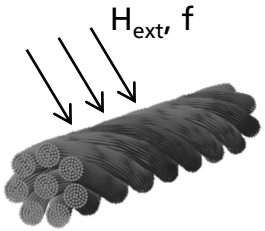
Aufspaltung des Multiskalen-Problems mit SlicerPro-Ansatz

Externe Effekte
(Feldverteilung)
via vereinfachte
Leitergeometrie





+



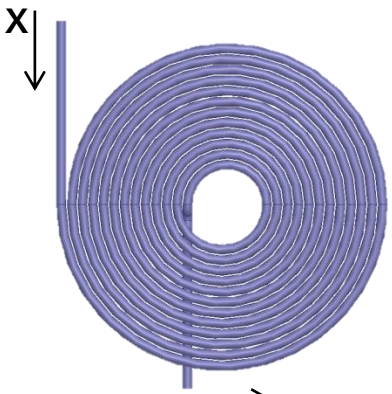
Interne Effekte
(Wicklungsverluste)
via Randbedingungen
auf Litzenteilstücken

© Fraunhofer IISB
[1]-[2] © Rudolf Pack GmbH & Co. KG

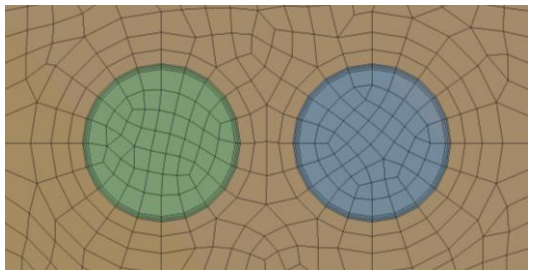
SlicerPro – Übersicht Systemebene

Fraunhofer IISB

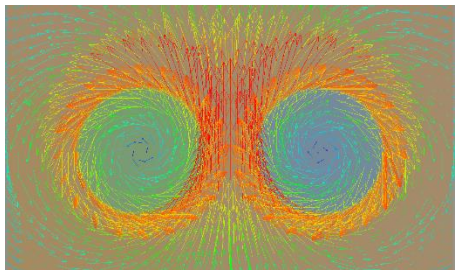
Import der CAD-Daten
mit Massivleiter



Vernetzung
'Inflation layers' und 'swept mesh' für eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse

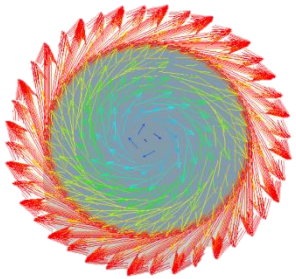


FEM-Lösung
Berechnung der magnetischen Feldverteilung basierend auf einem Massivleiter mit homogener Stromdichteverteilung

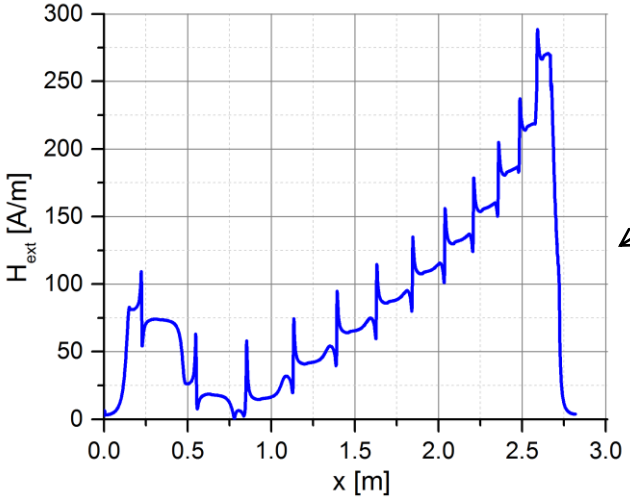


H_{ext} -Daten
Export der externen magnetischen Feldstärke für Schnitte entlang des Leiters

(APDL / Field Calculator)



Geometrie-information

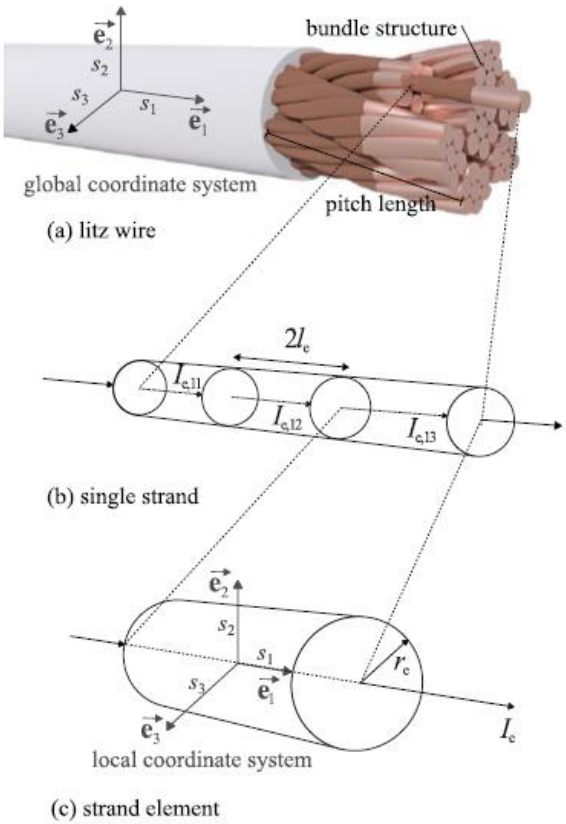


Extraktion des externen mag. Felds

Verteilung der externen magnetischen Feldstärke entlang des Leiters
=> Berechnung der Verluste

© Fraunhofer IISB

Methodische Entwicklung



Berechnung der charakteristischen Litzenverluste bestehend aus

- Geometrie: Impedanz
- H_ext: Leistungsverluste

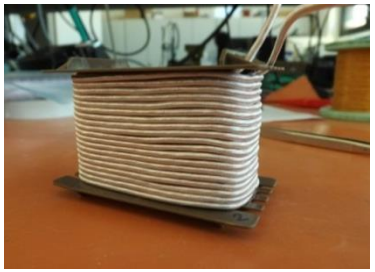
Jahr	Methode	# Strands	CPU-Time
2016	FEM	19	~ 5000 sek
2018	PEEC	420	~ 6000 sek
2020	SEEC	1000	48 sek
2021	Sparse SEEC	> 1000	< 15 sek

© Fraunhofer IISB

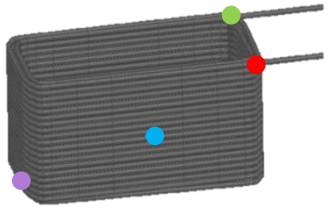
Experimentelle Verifikation – Drossel

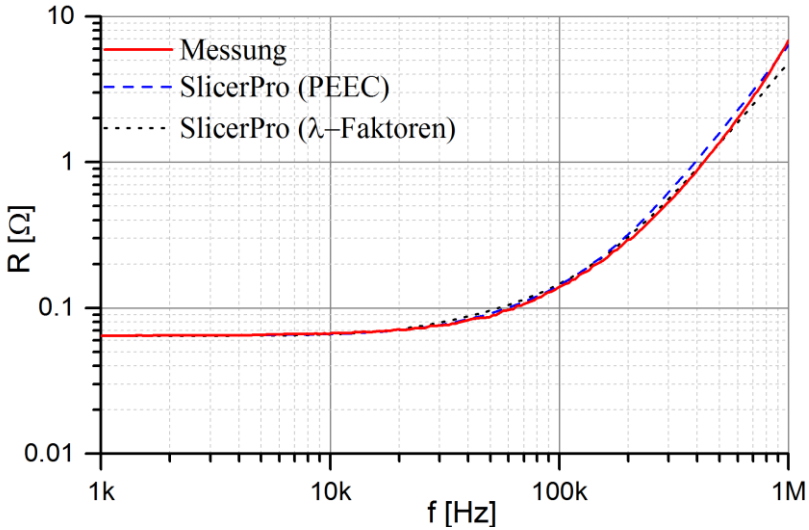
Fraunhofer IISB

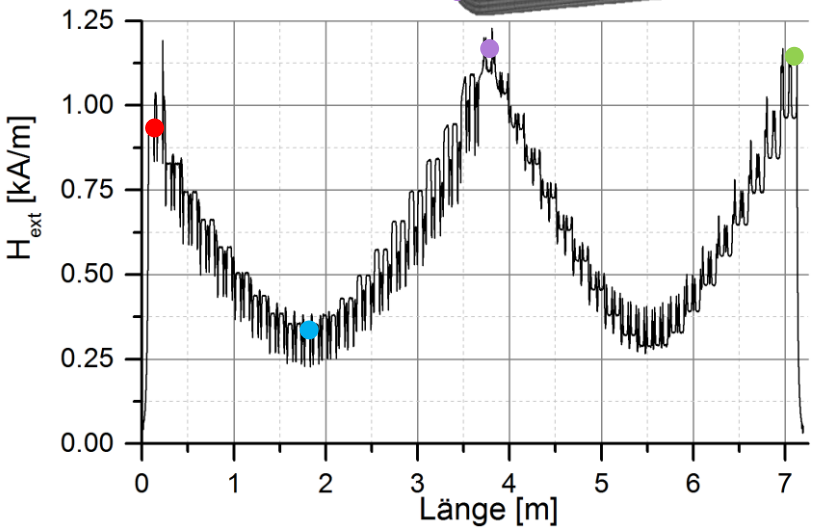
- Aufbau:
  - 2-lagig gewickelte Drossel mit 39 Wicklungen
  - 245 x 0.1mm-Litzenkabel
- Ergebnisse:
  - Sehr gute Übereinstimmung der Widerstände beider SlicerPro-Varianten (PEEC, λ-Faktoren) bis 1MHz
  - Simulationszeit ca. 1h



Experiment & Simulationsmodell





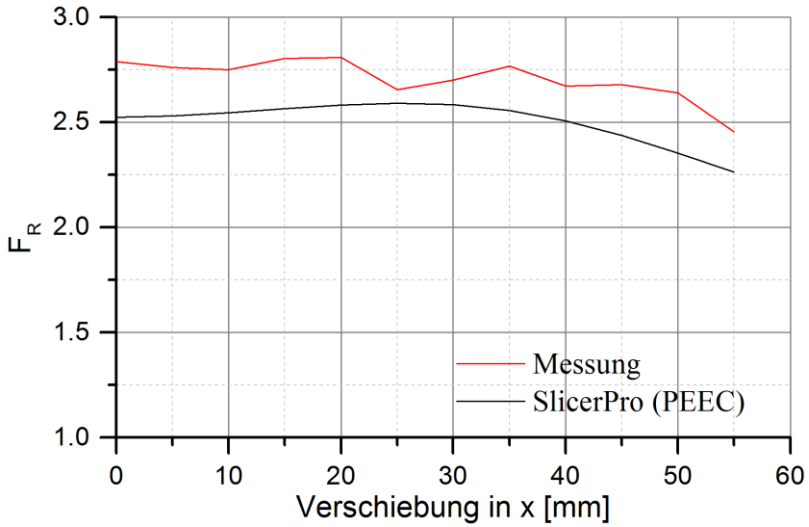


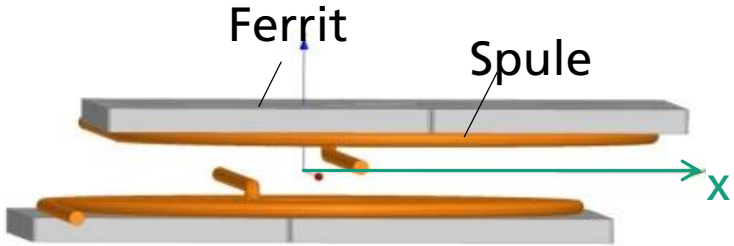
© Fraunhofer IISB

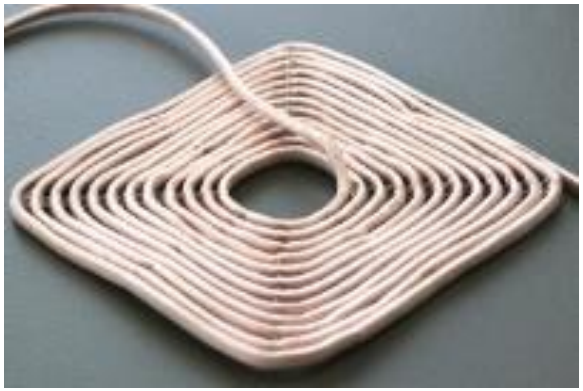
Experimentelle Verifikation – Spulensystem

Fraunhofer IISB

- Aufbau:
  - Spulensystem mit je einer quadratischen Spule (12 Windungen, 800 x 0.071mm-Litzenkabel) und Ferritplatten zur Feldführung
  - Vergleich von $F_R=R_{AC}/R_{DC}$ bei Verschiebung der Spulen zueinander
- Ergebnisse:
  - Gute Übereinstimmung bei Arbeitsfrequenz 140kHz
  - Simulationszeit ca. 6h

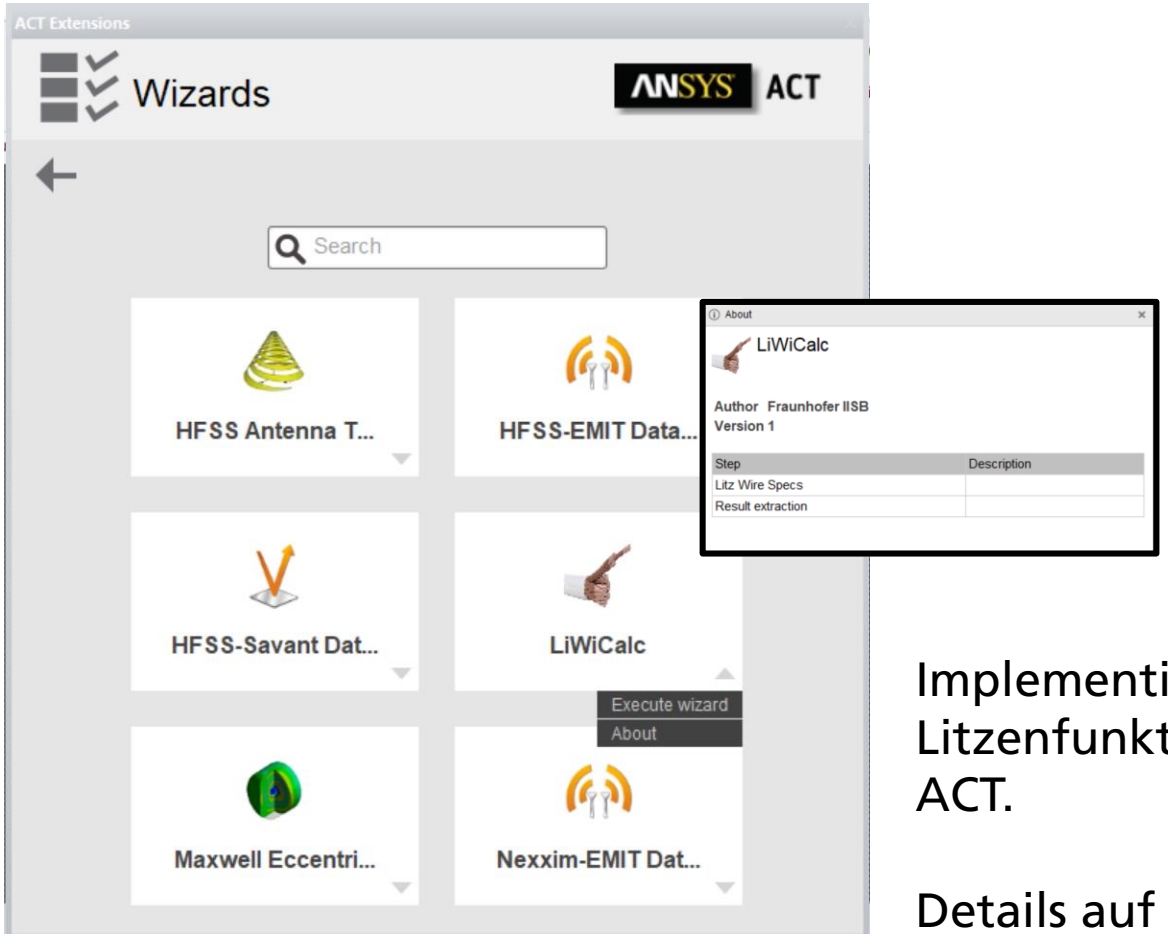


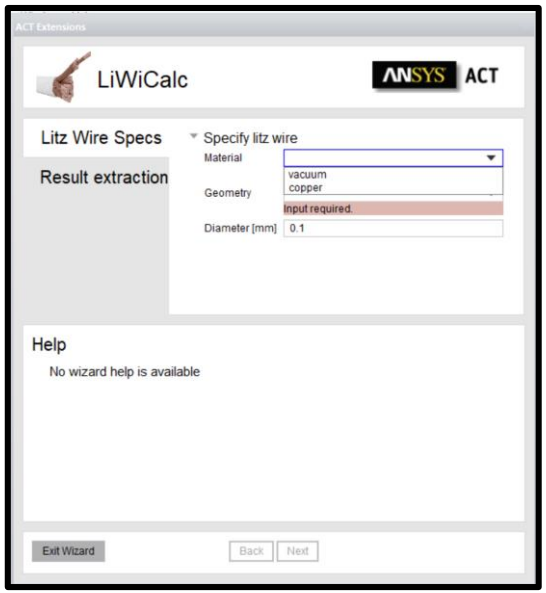




© Fraunhofer IISB

Implementierung in ACT





Implementierung der Litzenfunktionalität in einer Ansys ACT.

Details auf Anfrage.

© Fraunhofer IISB

Fraunhofer IISB

Berechnung der Kernverluste im Kern: Ansatz

Materialparameter:

Permeabilität:

$\mu(f,T,\underline{\hat{B}}) = \mu' - j\mu''$

Permittivität:

$\varepsilon(f,T) = \varepsilon' - j\varepsilon''$

Leitfähigkeit:

$\sigma(f,T)$

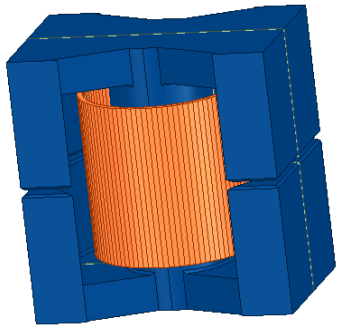
Materialgleichungen:

$$\underline{\hat{D}} = \varepsilon\,\underline{\hat{E}},$$

$$\underline{\hat{B}} = \mu\,\underline{\hat{H}},$$

$$\underline{\hat{J}} = \kappa\,\underline{\hat{E}}$$

FEM (ANSYS)



Lösung

Maxwell Gleichungen:

$$\nabla\times\underline{\hat{H}}=\underline{\hat{J}}+j\omega\underline{\hat{D}}$$

$$\nabla\times\underline{\hat{E}}=-j\omega\underline{\hat{B}}$$

- Materialparameter für Ferrite sind in Datenblättern nicht angegeben

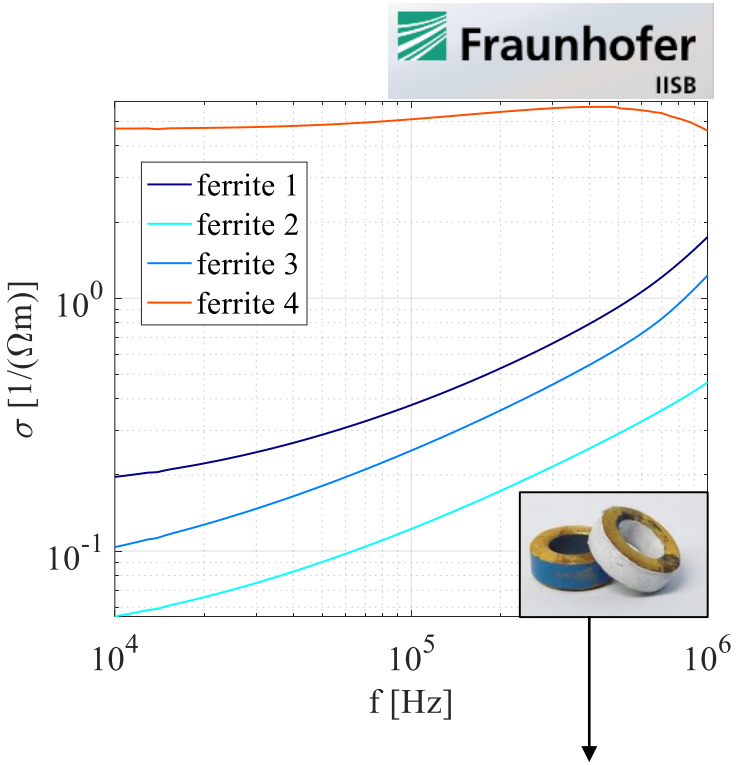
Materialparameter

- Charakterisierung mit Kleinsignal
- Notwendig für eine Lösung der Maxwell Gleichungen

© Fraunhofer IISB

Leitfähigkeit bei Ferriten

- Ferrit 1 – 3 → Leistung
- Ferrit 4 → EMV - Filter
- Messung der Leitfähigkeit erfordert
  - Kleinsignalmessung
  - Parameter Fitting [17] Stadler
- Leitfähigkeit
  - Nur für DC angegeben
  - Steigt mit der Frequenz
  - Verursacht Wirbelströme im Magnetkern



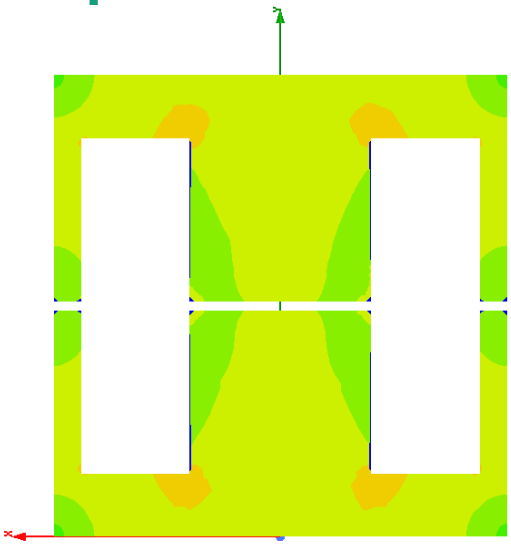
Galvanisierte Samples zur Messung der Leitfähigkeit

© Fraunhofer IISB

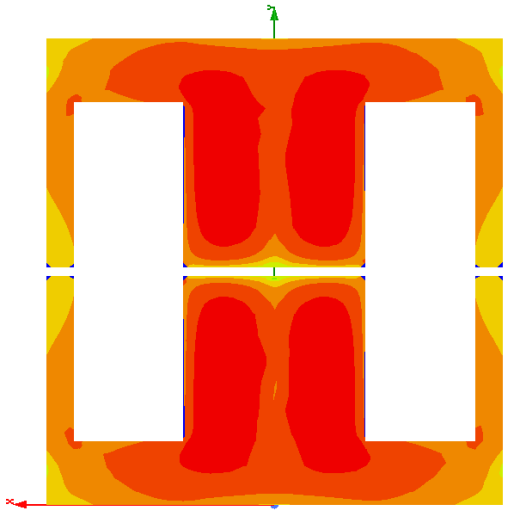
Fraunhofer IISB

Beispiel: Wirbelströme in Ferriten

Simulation mit HFSS Ansys



Querschnitt
eines PQ Kerns
@ 100 kHz
@ 1 MHz



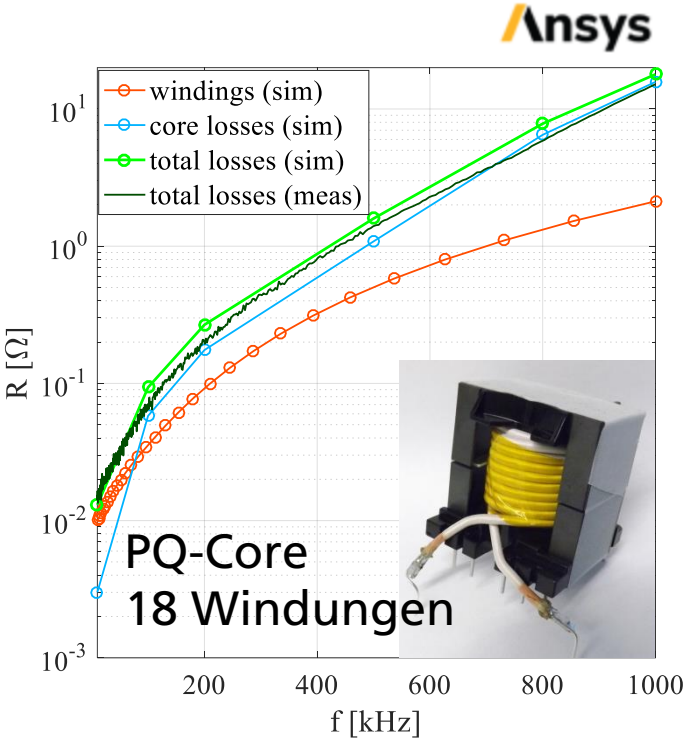
- Wirbelströme an den Arbeitspunkten 100 kHz and 1 MHz unterscheiden sich um 2 Größenordnungen
- Die Position der Maxima der Stromdichte verändern sich mit der Frequenz

© Fraunhofer IISB

Fraunhofer IISB

Vergleich von Messung und Simulation: PQ - Kern

- Kleinsignalmessung der Gesamtverluste
- Simulation
  - Berechnung der Wicklungsverluste mit der SEEC - Methode
  - Berechnung der Kernverluste mit Hilfe der Materialparameter und der FEM-Methode
- Die Gesamtverluste in der Simulation und der Messung zeigen gleiche Tendenzen und passen gut zusammen

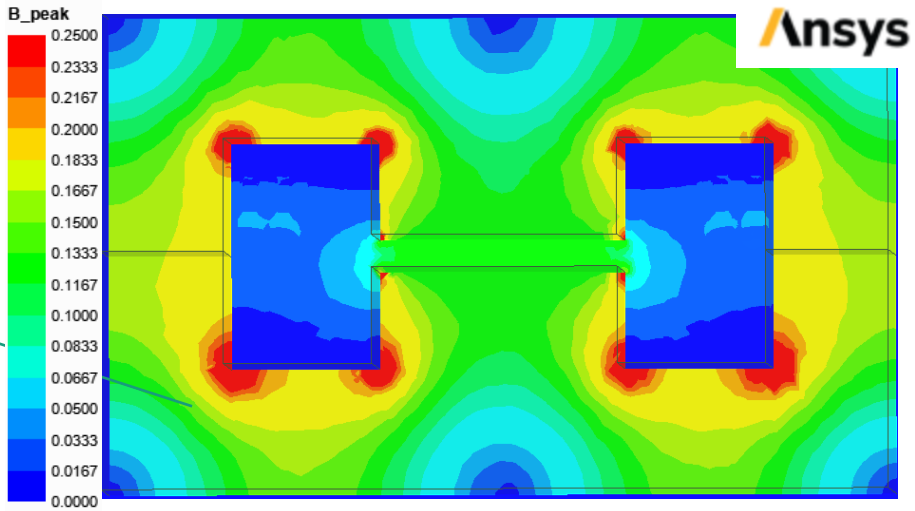


© Fraunhofer IISB

Kernverluste: Steinmetz Parameter

Steinmetz Parameter:

$$P_V = C_m \cdot \boxed{\hat{B}_{ac}^{y}} \cdot f^{x}$$



→ Berechnung der magnetischen Flussdichte

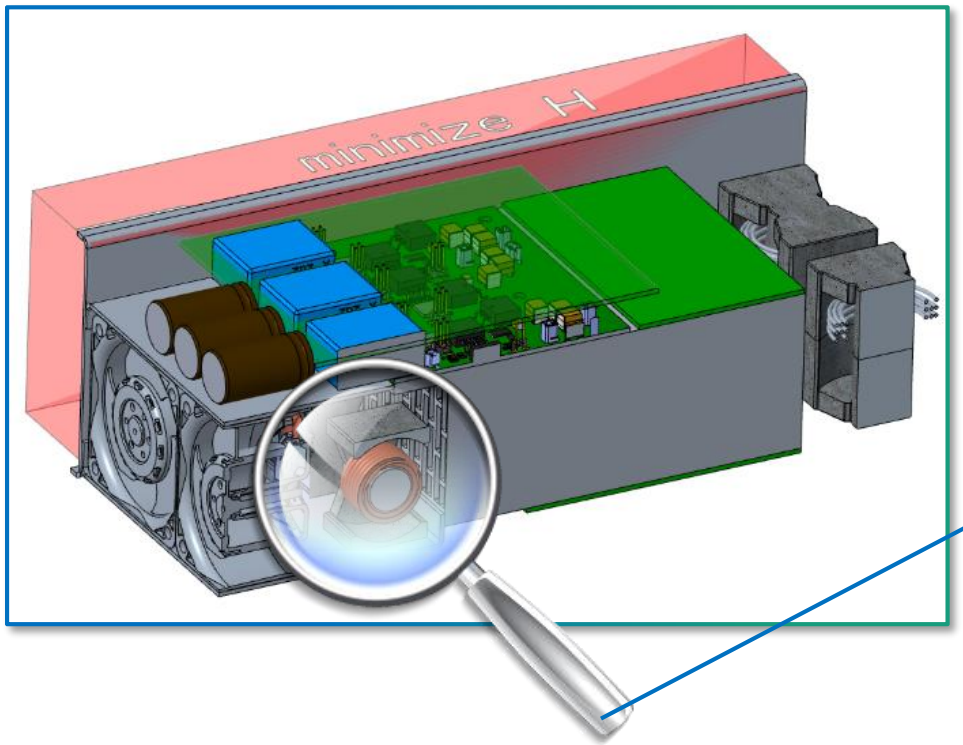
- Berechnung der magnetischen Flussdichte mit FEM
- Anwendung der Steinmetzparameter
- Gute Simulationsergebnisse erfordern eine hinreichende Charakterisierung der Kernverluste an Ringkernproben
- Voraussetzung: spezifische Kernverluste sind dominant, Wirbelströme (makroskopisch) und Volumeneffekte vernachlässigbar

© Fraunhofer IISB

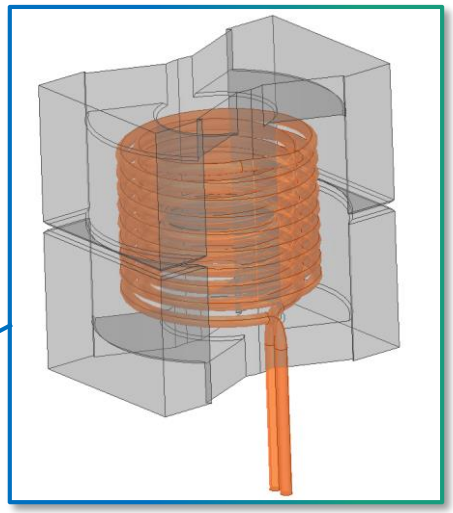
Fraunhofer IISB

Optimierung auf Basis eines virtuellen Prototypen

Virtual Prototype
System Level



Virtual Prototype
Component Level



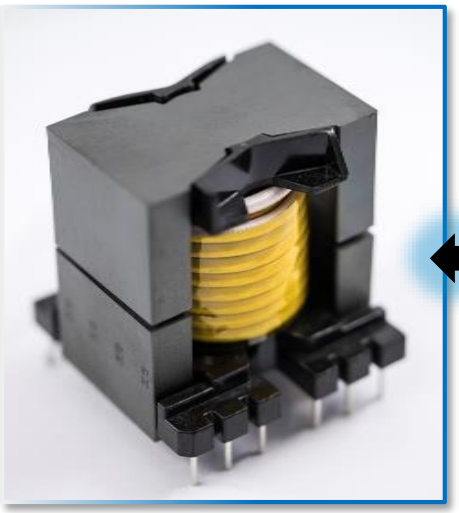
© Fraunhofer IISB

Fraunhofer IISB

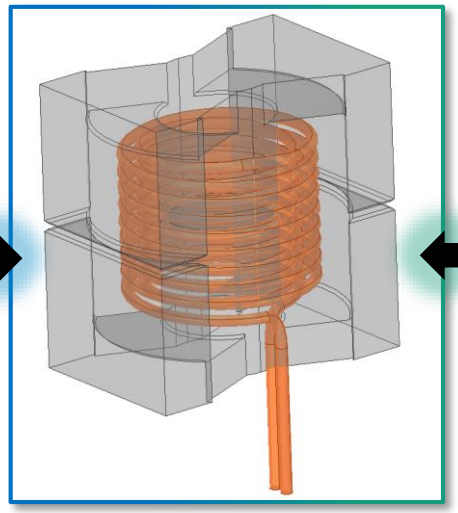
Optimierung auf Basis eines virtuellen Prototypen

Fraunhofer IISB

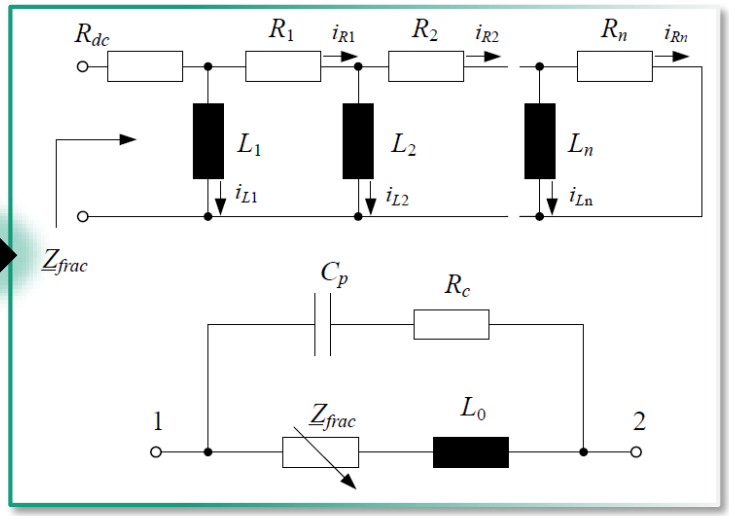
Prototyp einer Drossel



CAD/FEM Modellierung



Netzwerksimulation

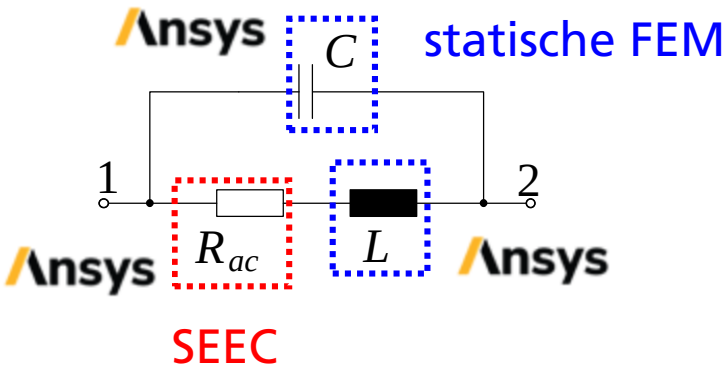


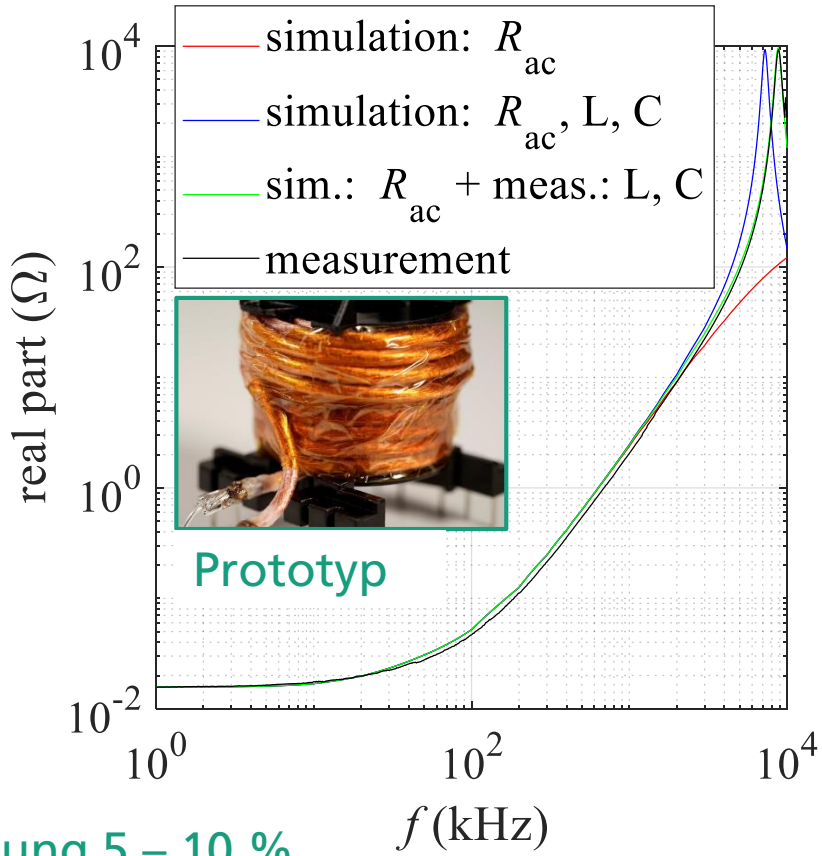
© Fraunhofer IISB

Fraunhofer IISB

Simulation: Realteil der Impedanz einer Luftspule

- Kapazitive Effekte werden bei der SEEC nicht berücksichtigt.
- Simulierter Realteil der Impedanz einer Luftspule:





→ Simulation L: Abweichung zur Messung 5 – 10 %

→ Simulation C: Abweichung zur Messung > 10 %

© Fraunhofer IISB

Zusammenfassung

Fraunhofer IISB

- Aktuelle Methoden (PEEC, SEEC) zur simulativen Charakterisierung von HF-Litzen sind schnell, effizient und hochgenau
- Komplexe Leiterstrukturen bei HF-Litzen werden berücksichtigt
- Erweiterte Materialdaten der Kernmaterialien ermöglichen präzise Vorhersage der dominierenden spezifischen Kernverluste in der FEM-Simulation
- Simulative Ermittlung dominierender Verlustmechanismen bei induktiven Komponenten durch Anwendung verschiedener Solver (Maxwell, HFSS, PEEC / SEEC)
- Effiziente Optimierung durch Kombination der Modelle mit der Netzwerksimulation

© Fraunhofer IISB

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Kontakte:

Dr. Andreas Roßkopf (Gruppenleiter)
Gruppe: KI-unterstützte Simulation
E-Mail: andreas.rosskopf@iisb.fraunhofer.de
Tel.: +49 9131 761-153

Stefan Ehrlich
Gruppe: RF-Leistungselektronik und EMV
E-Mail: stefan.ehrlich@iisb.fraunhofer.de
Tel.: +49 9131 761-556

© Fraunhofer IISB

Referenzen

[11] Ehrlich, S., Joffe, C., Thielke, H., Leinfelder, M., & März, M. (2019, March). Comprehensive SPICE Model for Power Inductor Losses. In *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1237-1244). IEEE.

[12] Stolzke, T., Ehrlich, S., Joffe, C., & März, M. (2020). Comprehensive accuracy examination of electrical power loss measurements of inductive components for frequencies up to 1 MHz. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *497*, 166022.

[13] Endruschat, A., Novak, C., Gerstner, H., Heckel, T., Joffe, C., & März, M. (2018). A Universal SPICE Field-Effect Transistor Model Applied on SiC and GaN Transistors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *34*(9), 9131-9145.

[14] Gerstner, H., Endruschat, A., Heckel, T., Joffe, C., Eckardt, B., & März, M. (2018). Non-Linear input capacitance determination of WBG power FETs using gate charge measurements. In *2018 IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)* (pp. 247-253). IEEE.

[15] Roßkopf, A., Bär, E., Joffe, C., & Bonse, C. (2015). Calculation of power losses in litz wire systems by coupling FEM and PEEC method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *31*(9), 6442-6449.

[16] Menrath, T., Endres, S., Zeltner, S., Matlok, S., & Eckardt, B. (2017, May). Mechatronic Design of 2 kW SiC DC/AC Converter with 200 W/inch. In *PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (pp. 1-6). VDE.

[17] A. Stadler, M. Albach, and A. Lindner, “A Practical Method to Measure Electrical AC Conductivity of MnZn Ferrites Using Conventional Toroids,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 2, pp. 678–681, 2010

© Fraunhofer IISB