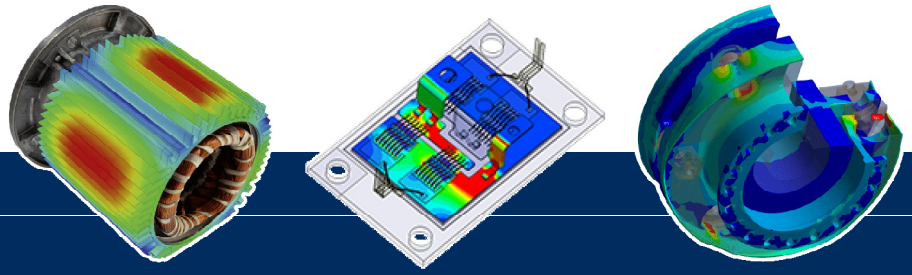
CADFEM®

Simulation ist mehr als Software®



Induktives Laden in der Elektromobilität

Rene Fuger CADFEM (Austria) GmbH

Motivation

Ref.: www.philips.com

Warum berührungslos elektrische Energie übertragen?

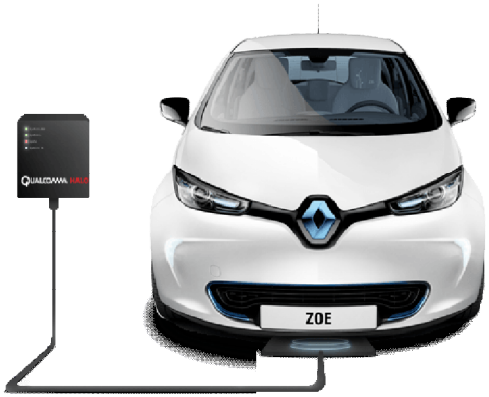
- Es ist keine mechanische Verbindung notwendig
- Steigerung des Bedienungskomforts
- Wartungsarm, weniger reparaturanfällig und dadurch geringere Erhaltungskosten
- Automatisierung des Ladevorgang
- Geringe Infrastrukturkosten und einfachere Kompatibilität

Ref.: www.bosch.com

Ref.: www.wirelesspowerconsortium.com

Ref.: www.samsung.com

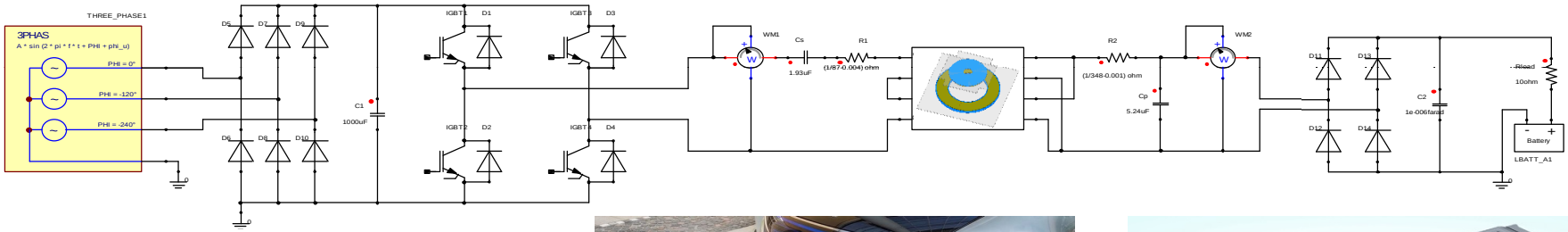
Ref.: www.lg.com

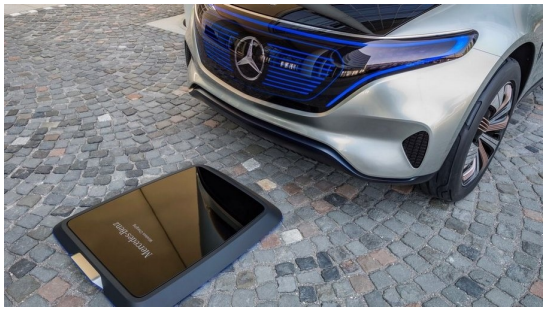


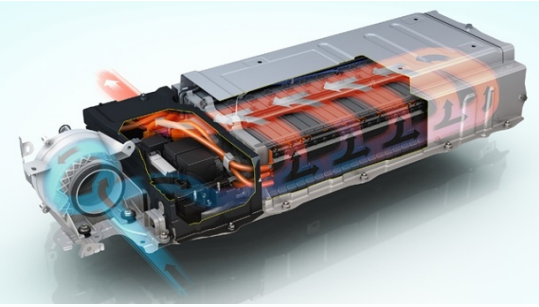
Ref.: www.qualcomm.com

Agenda

- Vorstellung eines Workflow zur Simulation von Induktiven Ladesystemen
  - Elektromagnetische Feld Simulation …anhand von Elektromobilität
  - Schaltungssimulation
  - Systemsimulation







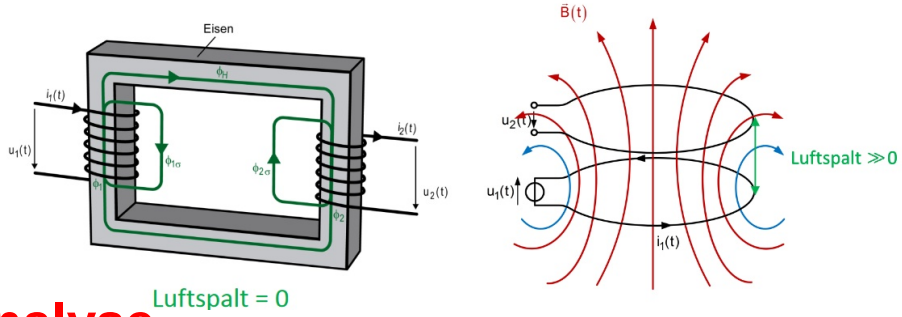
http://www.ti.com/diagrams/tidm-psfb-dcdc_board-tidm-psfb.jpg https://www.automobilwoche.de/article/20170511 http://www.t-online.de/auto/elektromobilitaet/

Grundlagen

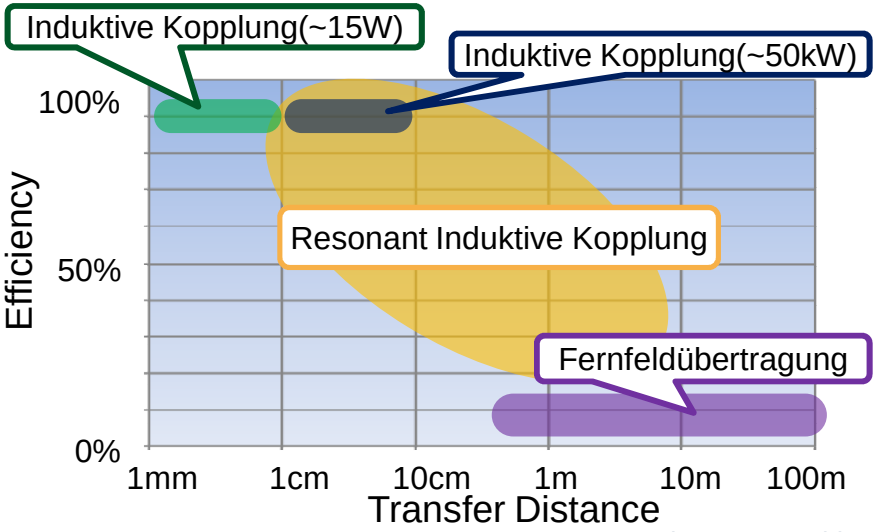
Transformatorprinzip

- *Mit geschlossenen magnetischen Kreis:*
  - Magnetischer Kreis bündelt Fluss und führt zu einem geringeren Streufluss
  - Analytische Berechnung möglich
- *Luftspulen*
  - Analytisch schwierig zu berechnen

FEM - Analyse



Ref.: Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour, „Induktives Laden – ein Themenschwerpunkt der Elektromobilität“



Induktive Kopplung **MAXWELL**

- Basierend auf dem magnetischen Fluss
- Wellenphänomene spielen keine Rolle
- Reichweite einige Millimeter bis wenige Meter
- Die resonante induktive Kopplung ist eine Erweiterung

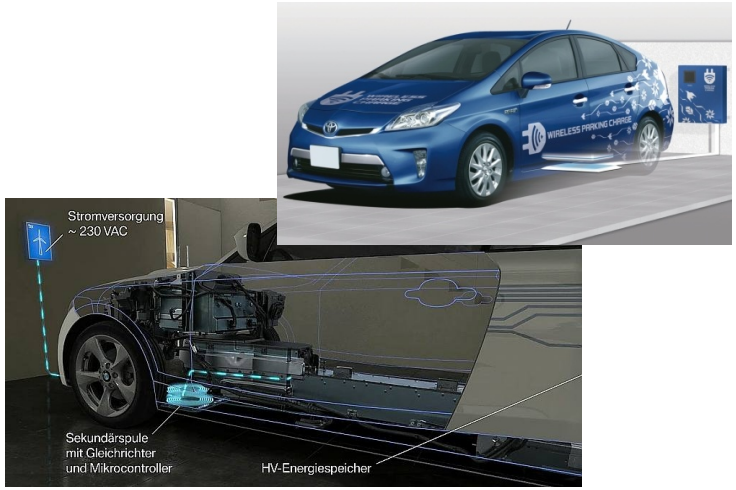
Fernfeldübertragung **HFSS**

- Basierend auf elektromagnetischen Wellen
- Hauptanwendung im Bereich Signalübertragung

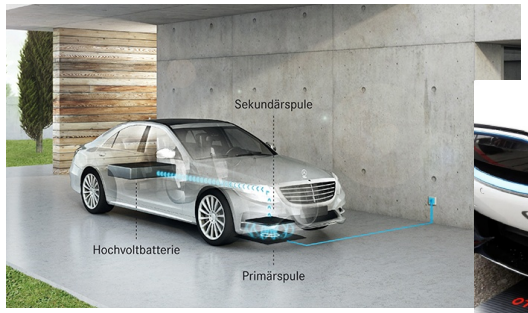
Induktives Laden in der Elektromobilität

Warum?

- Kein hantieren mit Kabel
- Schutz vor Vandalismus im öffentlichen Bereich
- Mehrere kürzere Ladezyklen durch automatisierte Systeme führen zu längeren Akku Lebenszeiten
- Schnelle Energieübertragung mit hohem Wirkungsgrad
- Laden während der Fahrt ist theoretisch möglich



Ref.: www.toyota-global.com



Ref.: www.mercedes-benz.de

Ref.: www.qualcomm.com

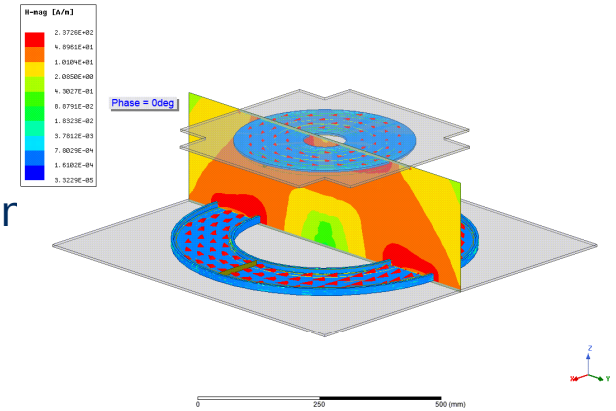
Herausforderungen

- Positionierung des Fahrzeuges
- Streufelder und EMV
- Anpassnetzwerke und Parasitäre Effekte
- Übertragungs- und Systemeffizienz
- Detektieren von Fremdkörper
- Standards und Kompatibilität

Analyseplan

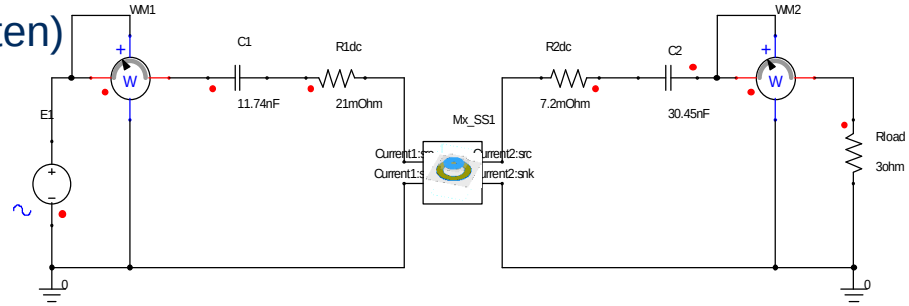
Elektromagnetische Feldanalyse

- Identifizierung von gesättigten Bereiche
- Bestimmung der Selbstinduktivitäten, Gegeninduktivitäten, komplexen Wiederstandsmatrix und Kopplungskoeffizienter und deren Optimierung
- Positionsabhängige Sensitivitätsanalyse
- Bestimmung der Streufelder und Verluste



Elektrische Schaltungssimulation

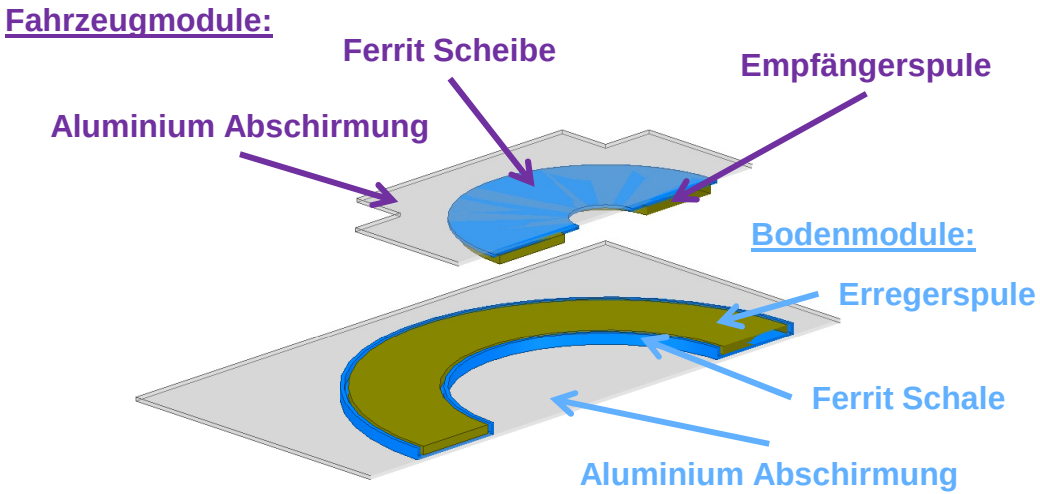
- Schaltungsoptimierung (Resonanzkapazitäten)
- Berechnung der Systemeffizienz



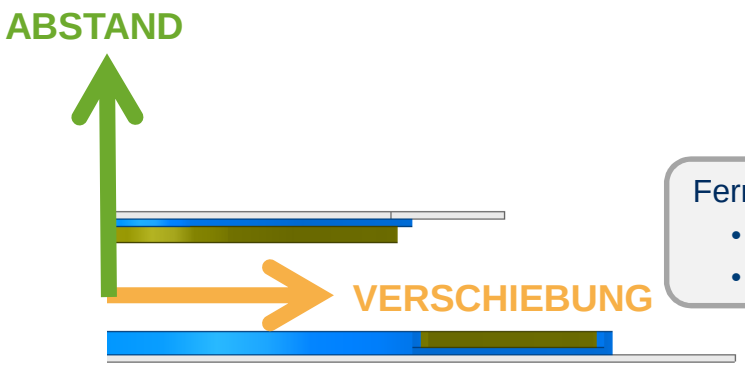
Demonstrator Modell

Komponenten

- Zwei flache zylindrische Spulen
- Ferrit Schale (Bodenmodule)
- Ferrit Scheibe (Fahrzeugmodule)
- Aluminium Abschirmplatten



Position



Ferrit:
- Relative Permeability: $\mu_i = 2400$
- Relative Loss Factor: $1x10^{-9}$

Spulen Spezifikationen:
- Litzendraht: Æ0.25mm x 384 strands
- Kupfer: $5.8x10^{7}$ [S/m]
- Anzahl Wicklungen: 10

Speisung:
- Spannung: 200 V / 10 kW
- Design Resonanz Frequenz: 150 kHz

Modellsimulation mit ANSYS

Voruntersuchung:

Magnetostatische Analyse
(Maxwell – Magnetostatic Solver)

- Maximalen B-Felder

Feldsimulation:

Wechselstrom Analyse
(Maxwell -Eddy Current Solver)

- Wirbelströme
- Hysteresis Verluste
- Induktivitätsmatrix

Schaltungssimulation:

Schaltungssimulation
(Simplorer)

- Resonanzfrequenz
- Effizienz

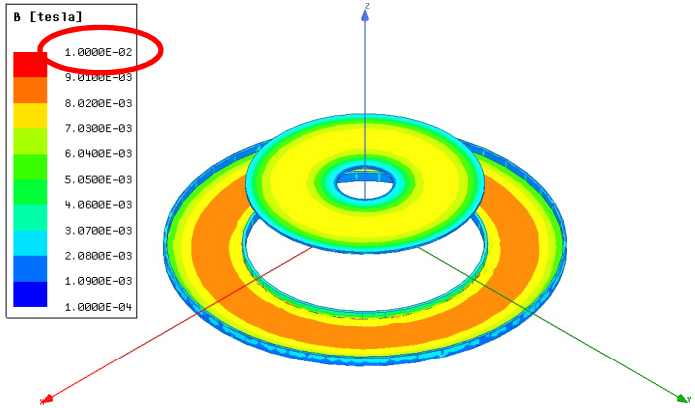
Weiterführende Untersuchungen

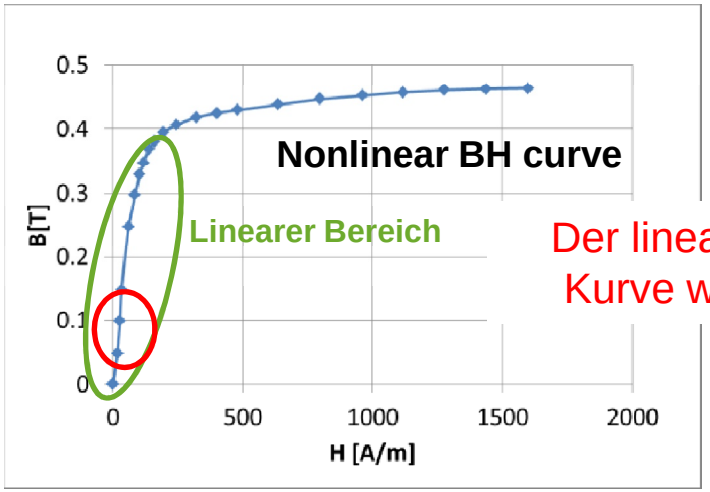
Temperatur, mechanische Beanspruchung, elektromagnetische Abstrahlung

Magnetostatische Analyse

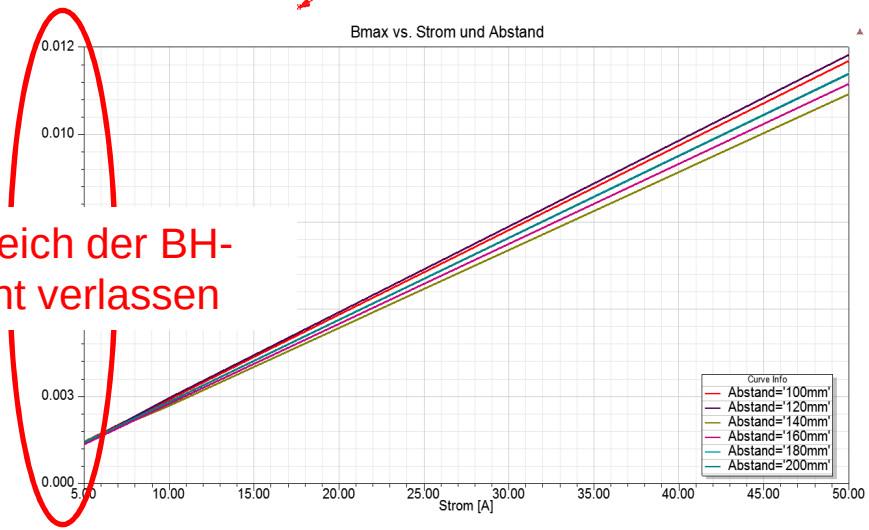
Bestimmung der gesättigten Bereiche in den Ferriten

- BH-Kurve -> linearer Bereich bis ca. 0.35 Tesla
- Grafische Darstellung der B-Felder -> Identifizierung von „Problemstellen“
- Maximal auftretenden Felder für unterschiedliche Positionen und Ströme



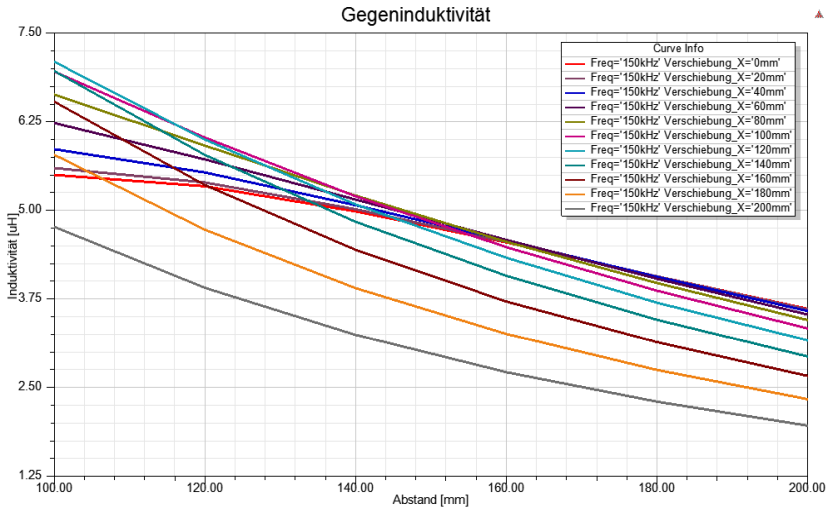


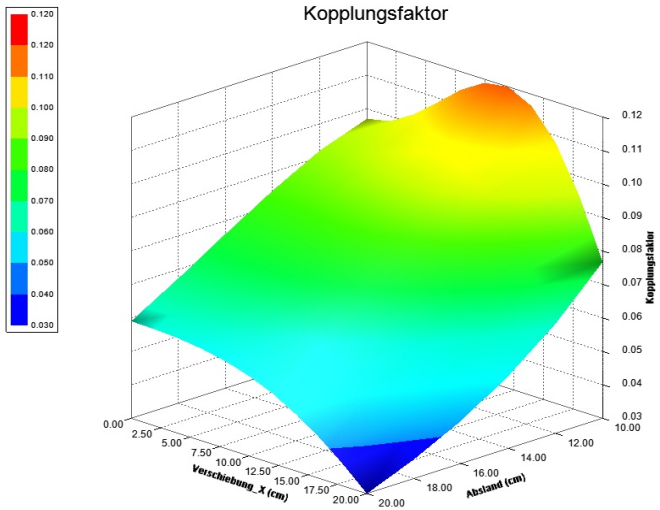
Der lineare Bereich der BH-Kurve wird nicht verlassen

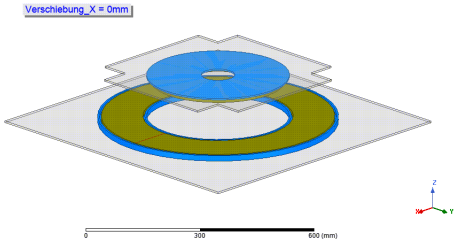


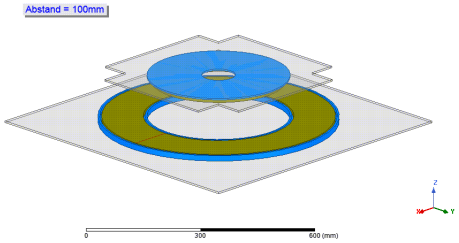
Wechselstrom Analyse – Induktivitätsmatrix

- Die Selbst- und Gegeninduktivitäten sind Positionsabhängig
- Mittels Parameterstudie wird ein Kennfeld für die unterschiedlichen Matrixgrößen berechnet







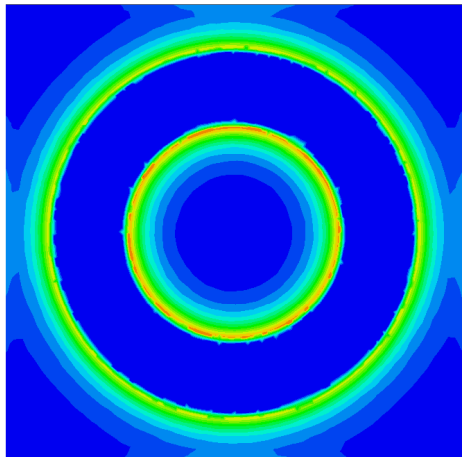


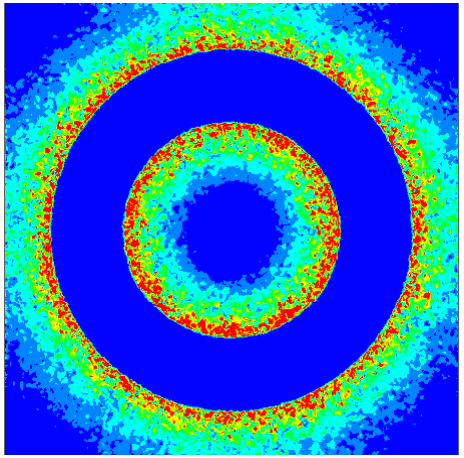
Wechselstrom Analyse – Wirbelstromberechnung

Impedance Randbedingung

- Leiter ist mehrere Größenordnungen dicker als die Endringtiefe
- Abstand zwischen Quelle und leitenden Oberfläche größer als die Eindringtiefe

Aufsicht Bodenplatte





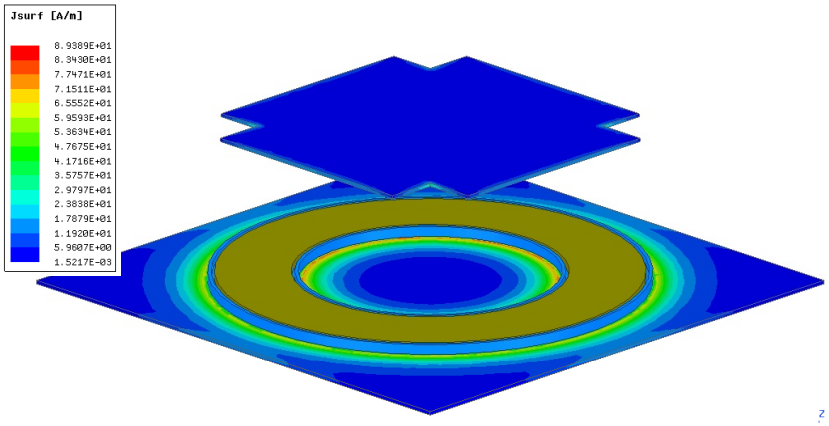
$$d = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}} \approx 0.21\,mm$$

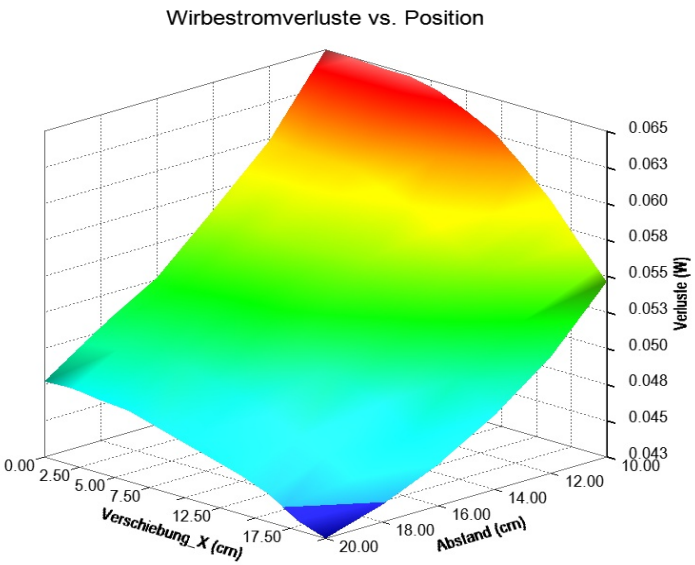
f : Frequenz
μ_r : magnetische Permeabilität
μ_0 : magnetische Feldkonstante
σ : Leitfähigkeit

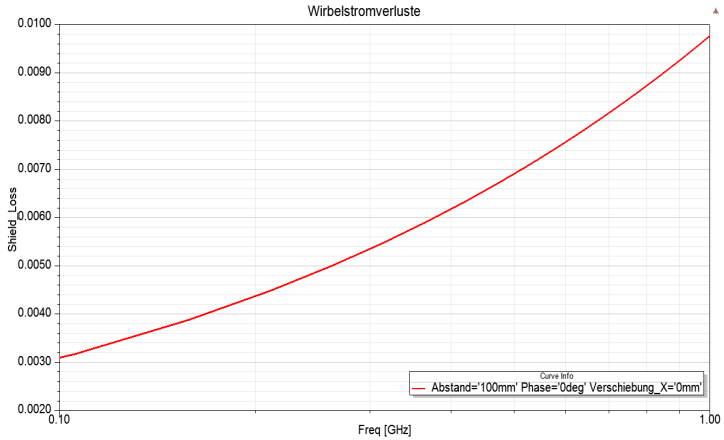
	Impedance Randbedingung		Skin Depth Mesh
Rechenzeit	10 Minuten		~1.5 Stunden
Elemente	89 500		955 000
Strom	2.4 A (100 %)		1.9 A (80 %)
Wirbelstrom-verluste	26.1 mW		21.6 mW

Wechselstrom Analyse – Wirbelstromverluste

- Frequenzabhängigkeit
  - Steigen mit höheren Frequenzen
- Positionsabhängigkeit
  - Sinkt mit größeren Abständen
  - Sinkt mit größerer Verschiebung



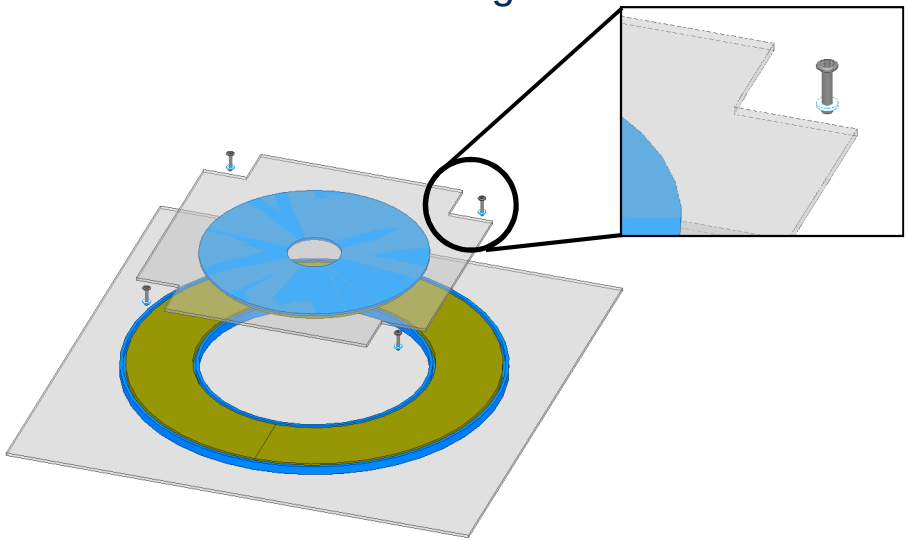


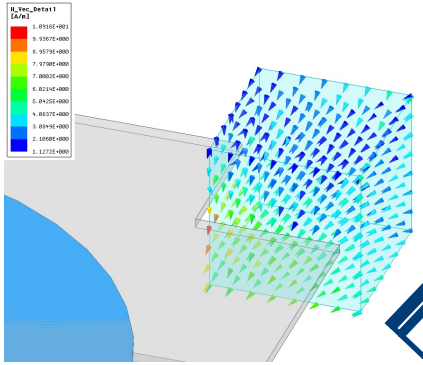


Detailanalysen (Submodell)

Abschätzung von zusätzlichen Verlusten

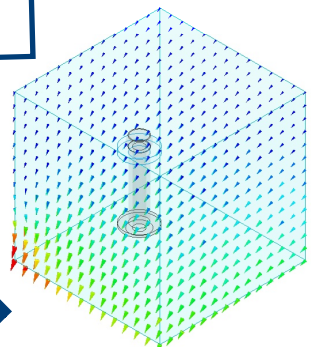
- Leitende Teile führen zu Wirbelstromverluste
- Berücksichtigung von vielen kleinen Teilen im Gesamtmodell erhöht Rechenaufwand
- Eine Abschätzung der Verluste kann durch ein Ersatzmodell erfolgen

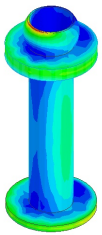




Berechnung der Felder ohne Montageniete im großem Modell

Aufbringen eines ähnlichen H-Feldes im Submodell über Feldrandbedingungen

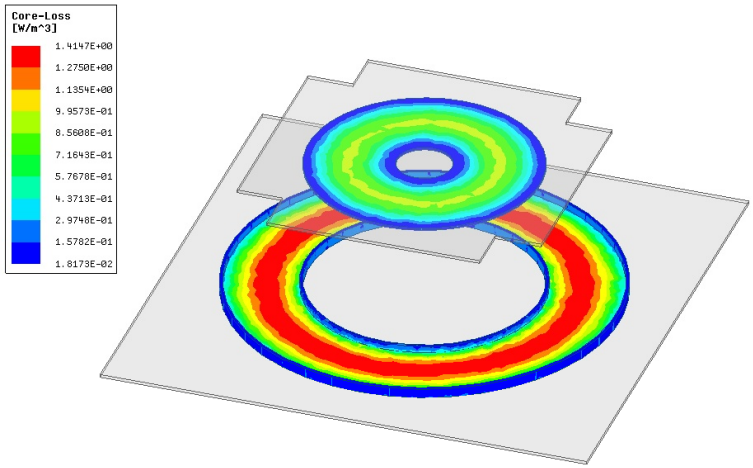




Abschätzung der Wirbelstromverluste in der Montageniete.

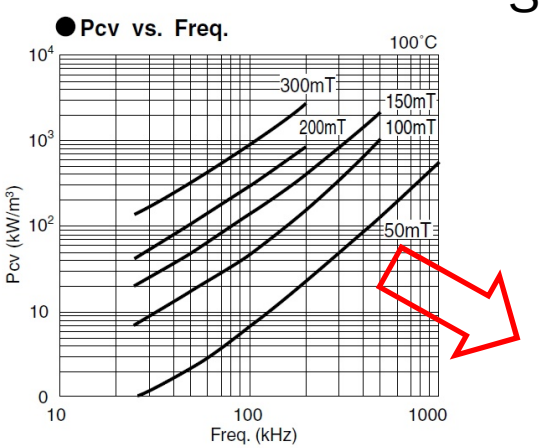
Wechselstrom Analyse – Core Losses

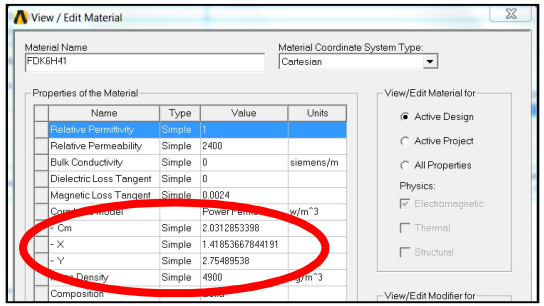
- Der Core Losses kombiniert Wirbelstrom-verluste und Hystereseverluste in Blechen und Ferriten
- Die Core Losses sind kleiner als die Wirbelstromverluste
- Die Core Losses sind nur sehr gering von der Position abhängig

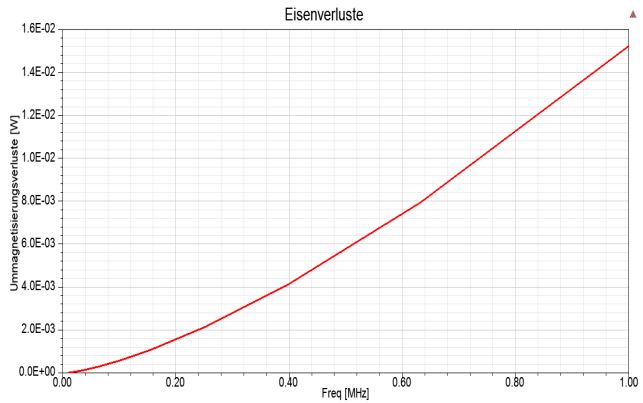


Steinmetzformel:

$$P_v = C_m f^x B_{\max}^y$$

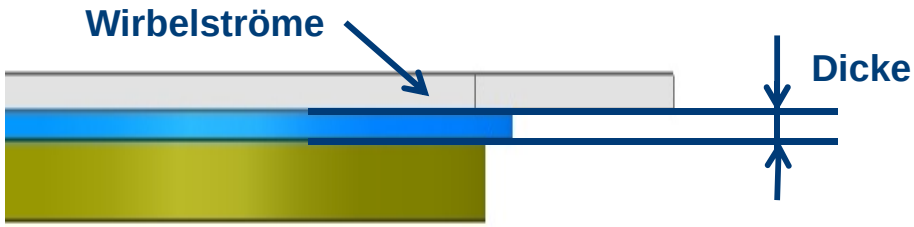


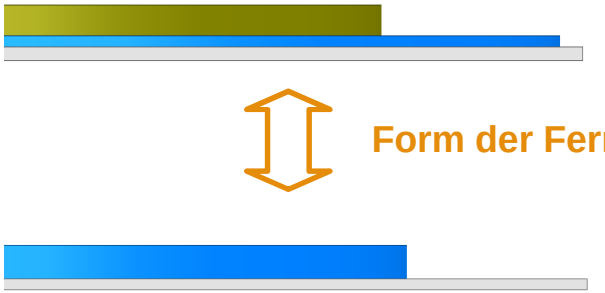


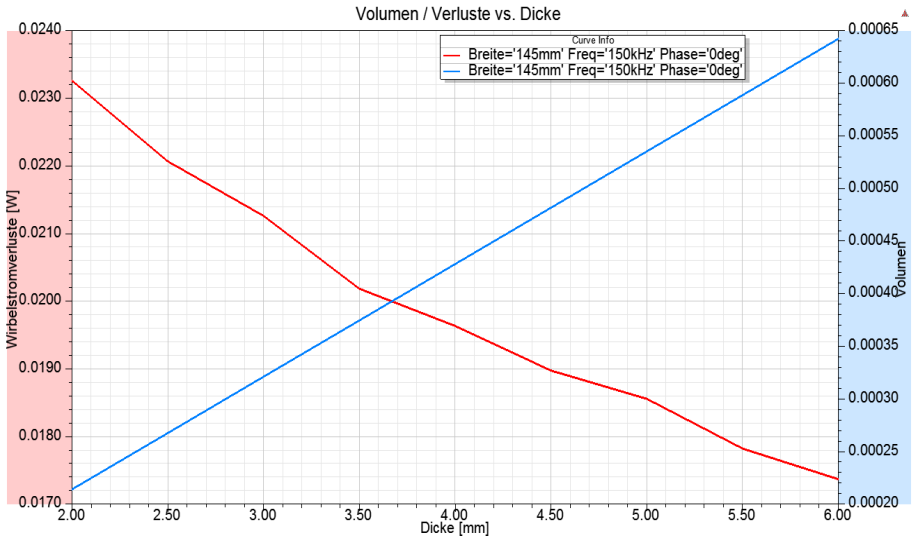


Geometrie Optimierung

- Änderungen an der Geometrie führen zu einem optimalen Einsatz der Ressourcen
- Unterschiedliche Effekte und Kosten können zu unterschiedlichen optimalen Ergebnisse führen
- Varianten Berechnungen erlauben es das optimale Design für meine Anwendung zu bestimmen



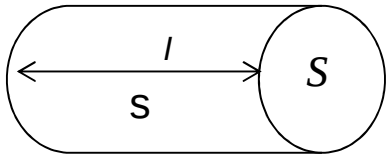




Schaltungssimulation - Ersatzschaltung

- Die Resonanz wird durch eine externe Beschaltung erreicht
- Zusätzliche Verluste können durch Widerstände berücksichtigt werden

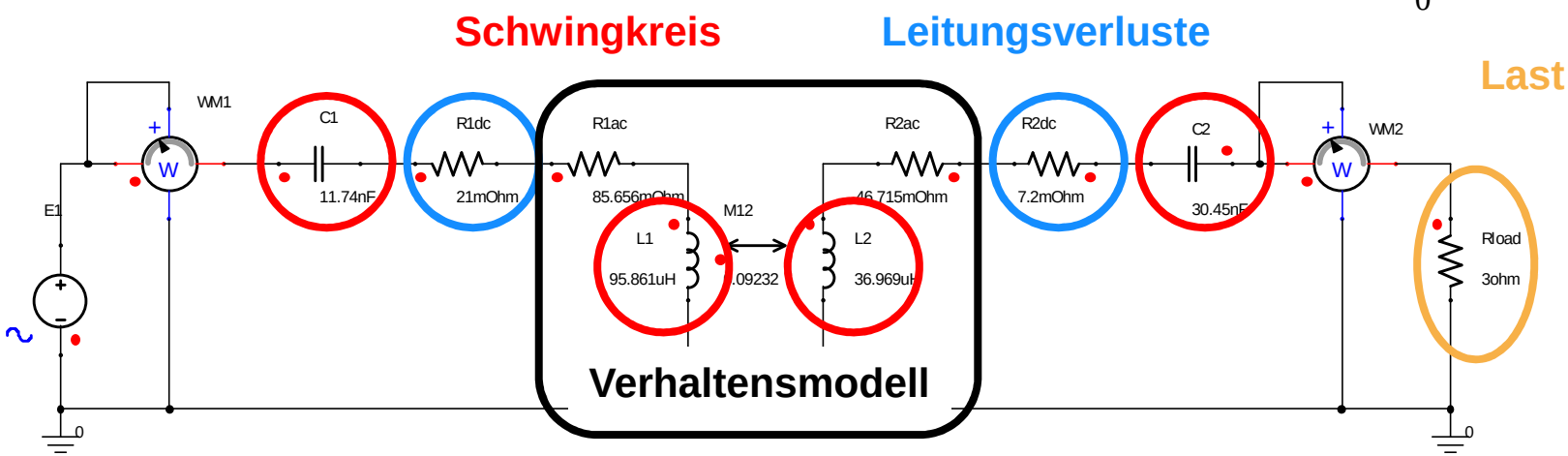
Gleichstromwiderstand:



$$R = \frac{l}{sS}$$

Resonanzkapazität:

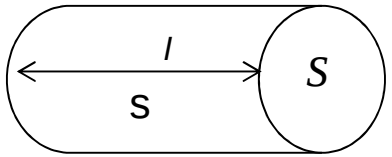
$$C = \frac{1}{w_0^2 L}$$



Schaltungssimulation - Verhaltensmodell

- Die Resonanz wird durch eine externe Beschaltung erreicht.
- Zusätzliche Verluste können durch Widerstände berücksichtigt werden
- Ersetzen der konzentrierten Größen durch ein Verhaltensmodell oder SPICE Modell

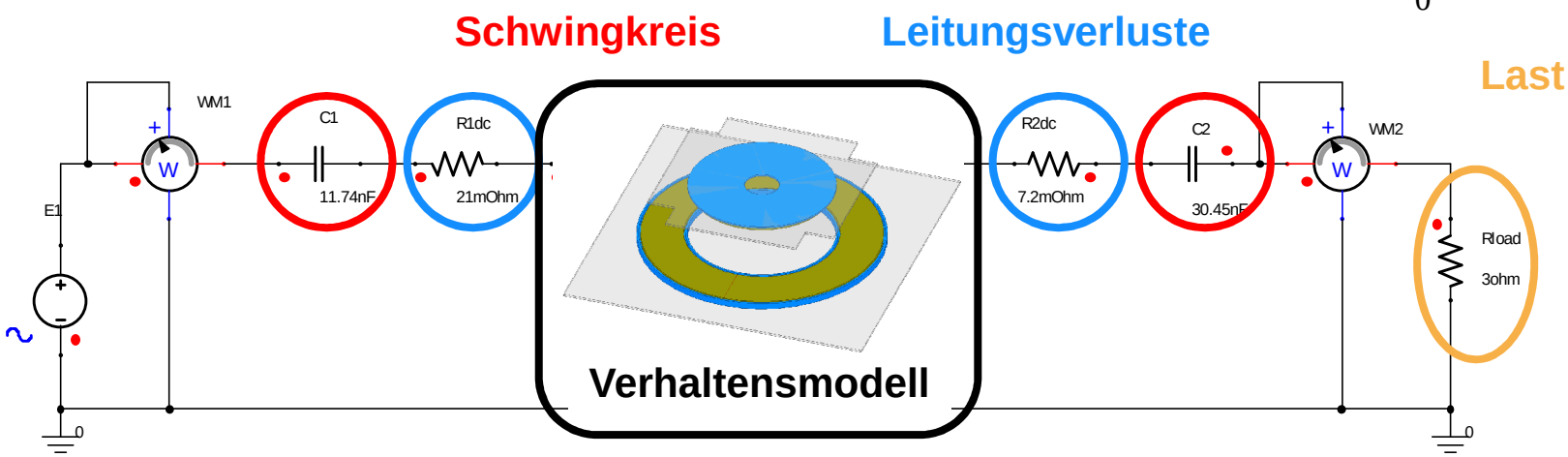
Gleichstromwiderstand:



$$R = \frac{l}{sS}$$

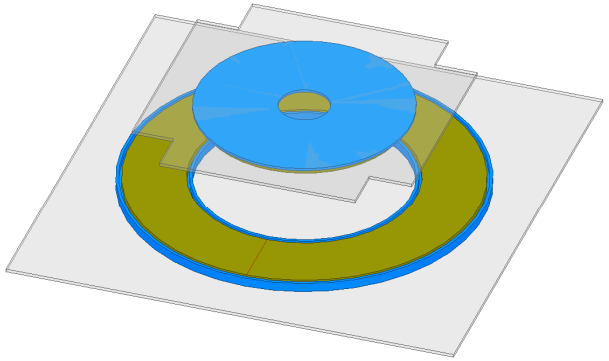
Resonanzkapazität:

$$C = \frac{1}{w_0^2 L}$$

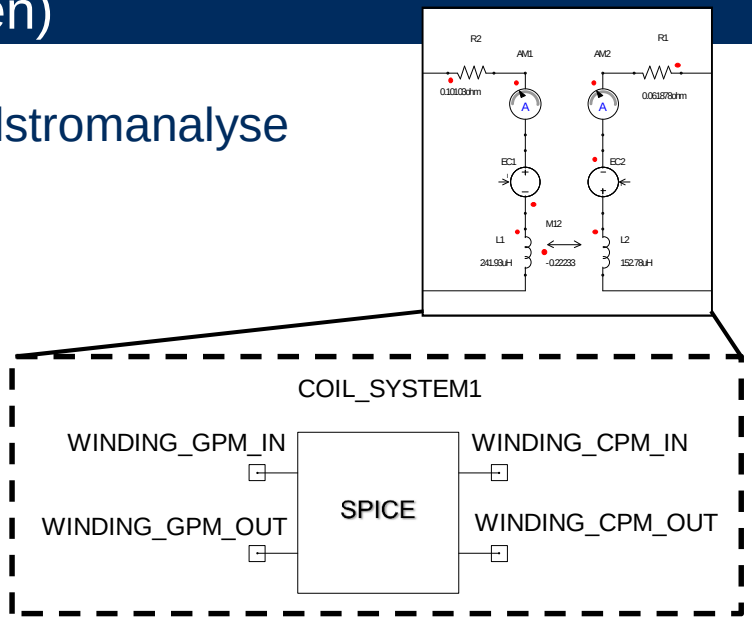


Modellerstellung - Kompaktmodell (Vierpolen)

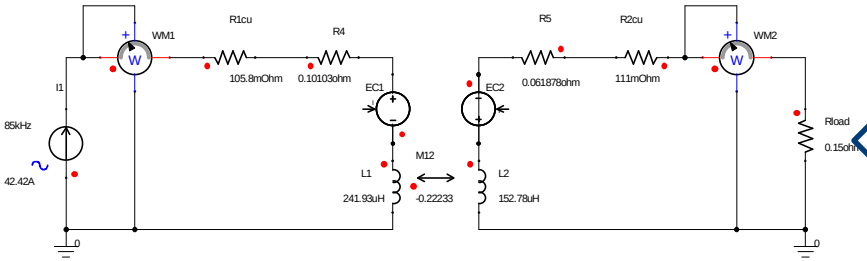
- Generieren eines SPICE Modells aus Wechselstromanalyse

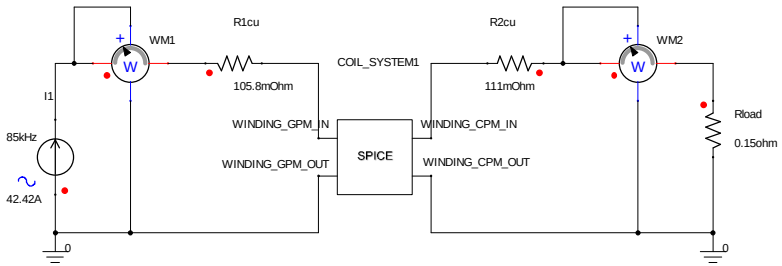


Python Script in Maxwell



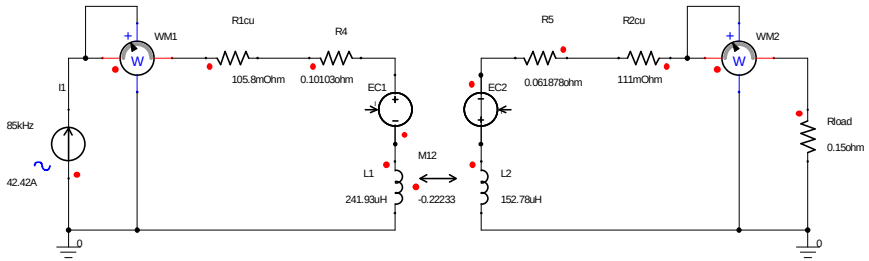
Tests

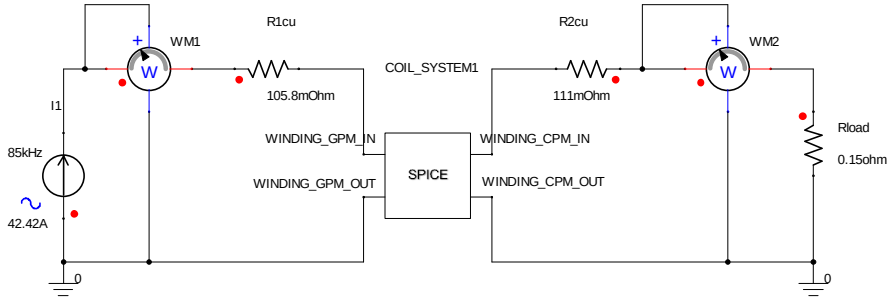


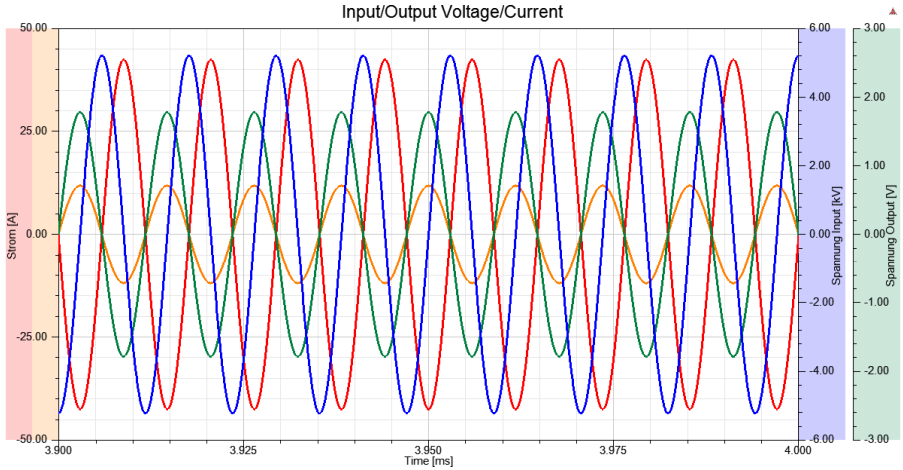


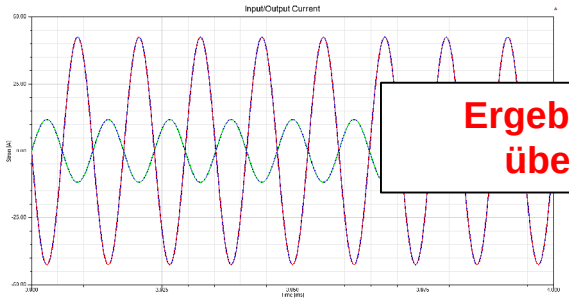
Modellerstellung - Kompaktmodell (Vierpolen)

- Generieren eines SPICE Modells aus Wechselstromanalyse



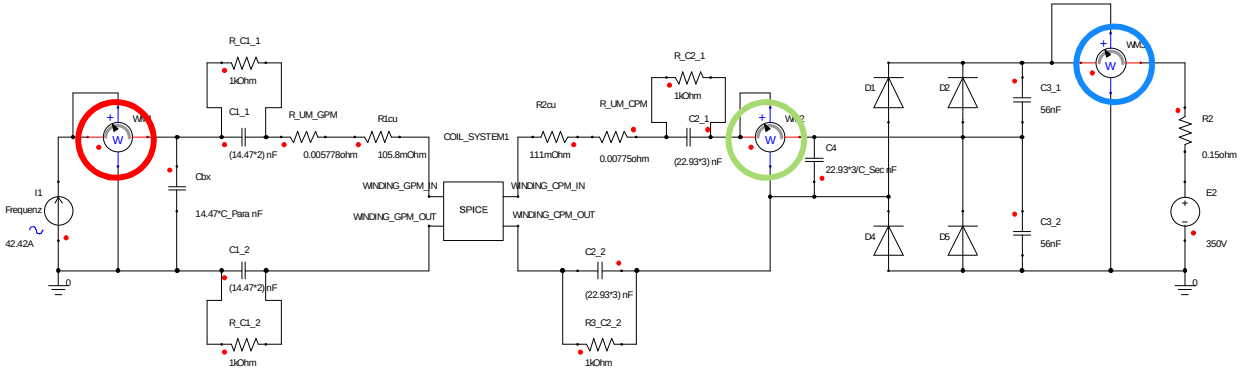




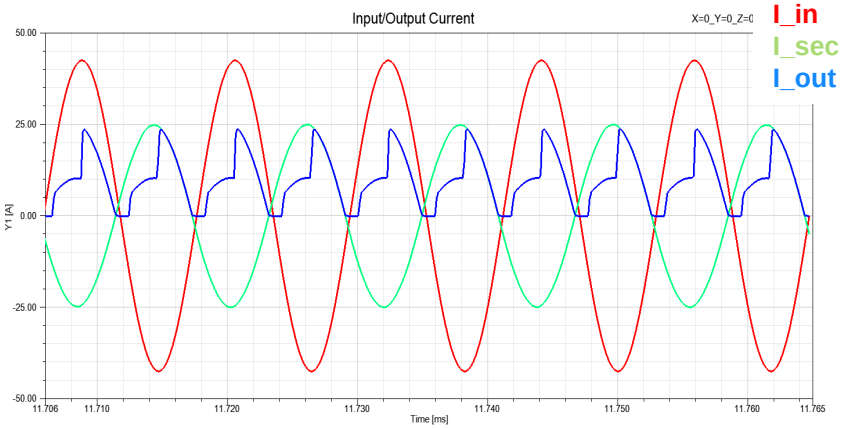


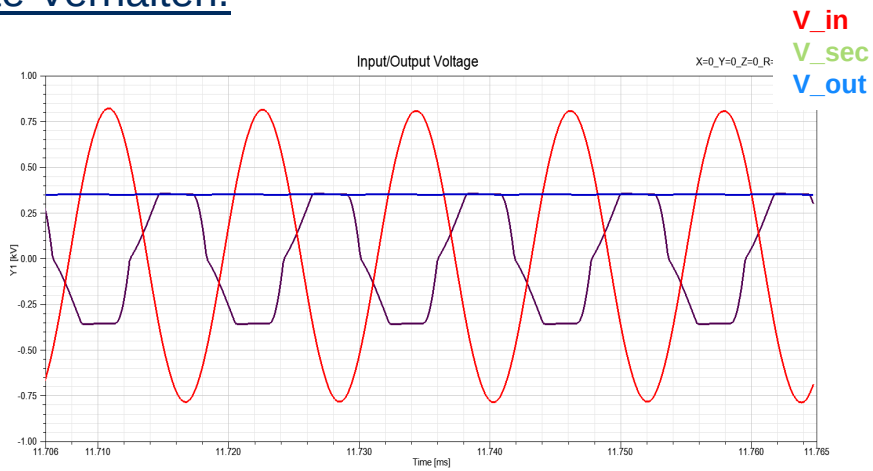
Ergebnisse liegen übereinander

Erweiterte Schaltungssimulation



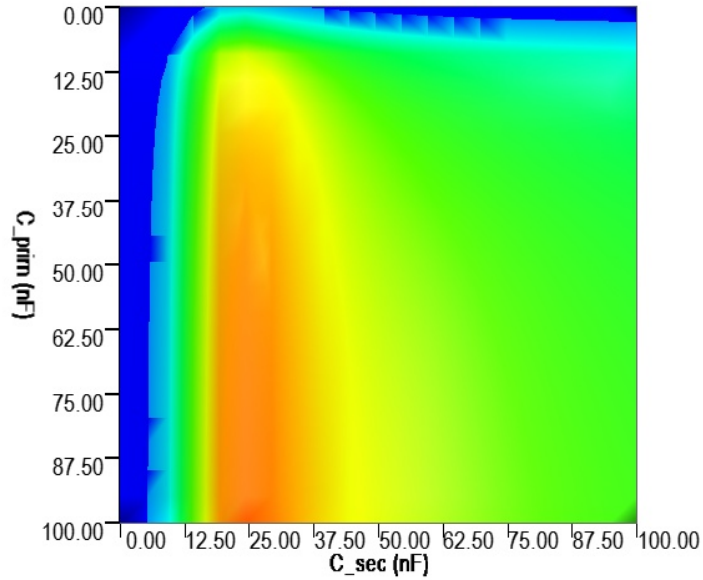
Die Schaltung mit Gleichrichter zeigt das erwartete Verhalten.



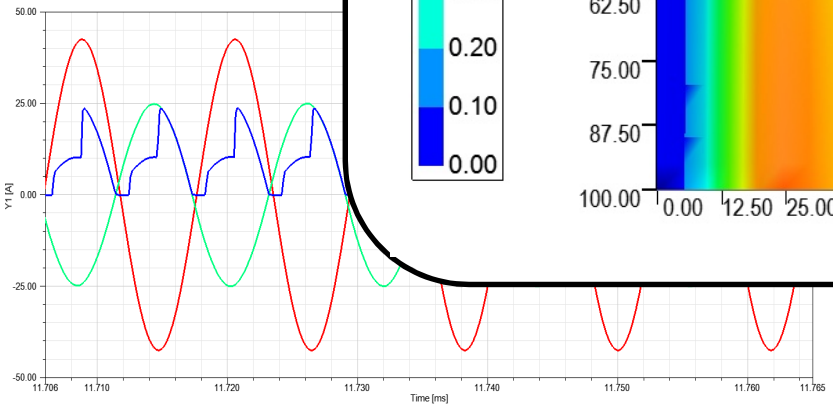


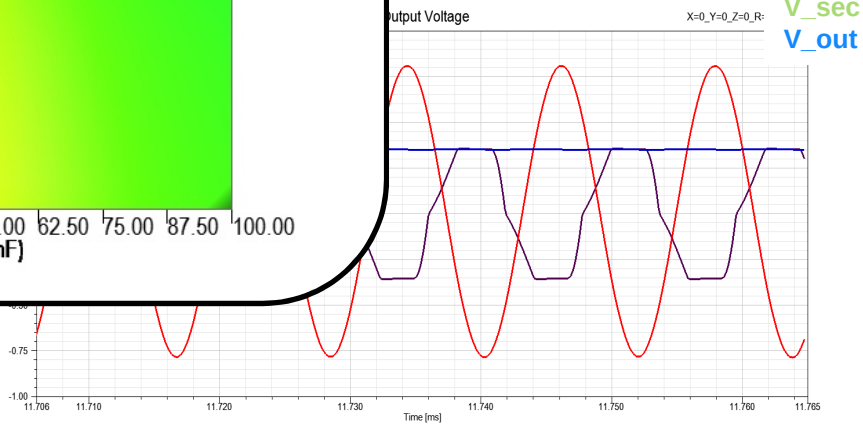
Erweiterte Schaltungssimulation – Parameter Studie

Wirkungsgrad



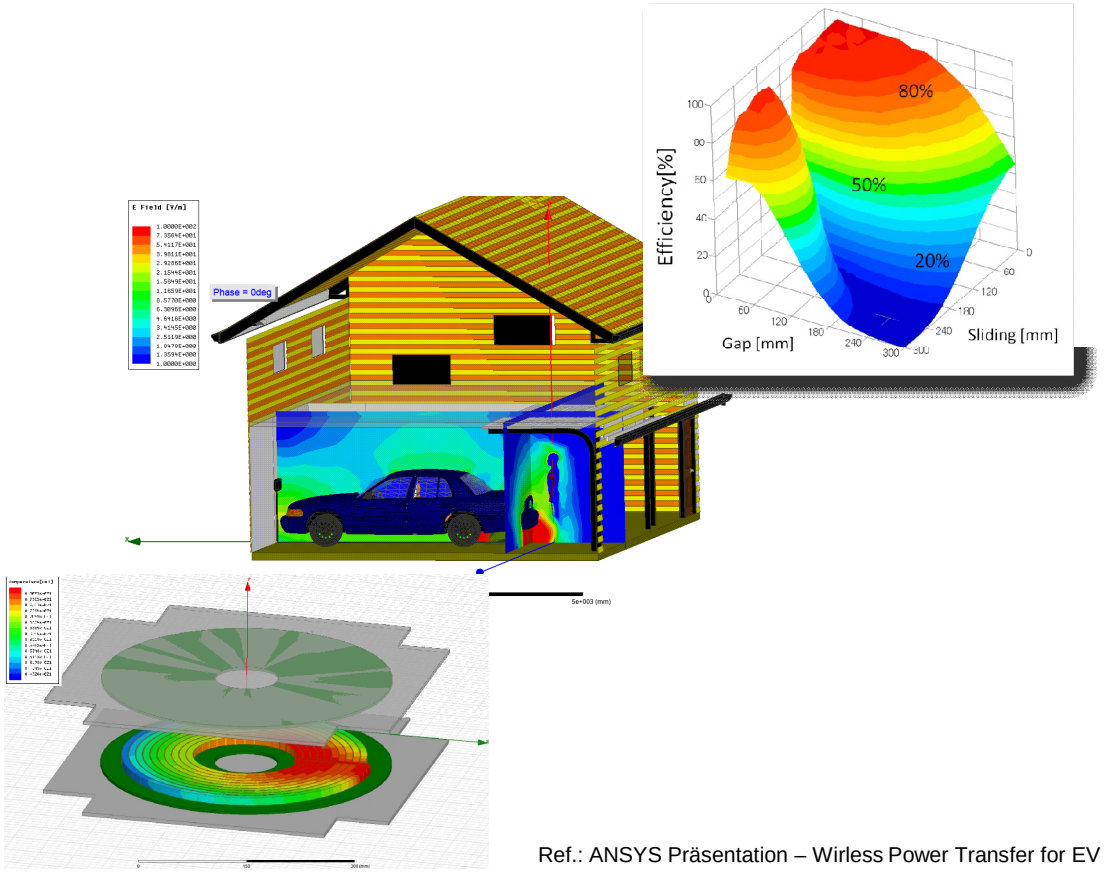
Die Schaltung mit





Ausblick

- System Effizienz
- Sicherheit
- Einfluß von Temperatur



Ref.: ANSYS Präsentation – Wirless Power Transfer for EV

CADFEM®

Simulation ist mehr als Software®

Simulation macht vieles möglich

Gemeinsam holen wir das Beste heraus