

# **Simulationsgestützte Auslegung von Lineardirektantrieben mit MAXWELL, SIMPLORER und ANSYS**

Dipl.-Ing. Matthias Ulmer, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Universität Stuttgart,  
Institut für Konstruktion und Fertigung in der  
Feinwerktechnik,  
Stuttgart, Germany

# Dipl.-Ing. Matthias Ulmer

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik  
Universität Stuttgart

## Arbeitsgebiete:

- Grundlegende Untersuchungen zur Dimensionierung von Lineardirektantrieben
- Betrachtung des thermischen Verhaltens von Antrieben
- FEM-Simulation mit MAXWELL und ANSYS
- Schaltungssimulation mit Matlab/Simulink

# Gliederung

1. Motivation und Zielsetzung
2. Elektrodynamische Lineardirektantriebe
3. Grobdimensionierung von Antrieben
4. Feindimensionierung mit Hilfe der FEM
5. Zusammenfassung und Ausblick

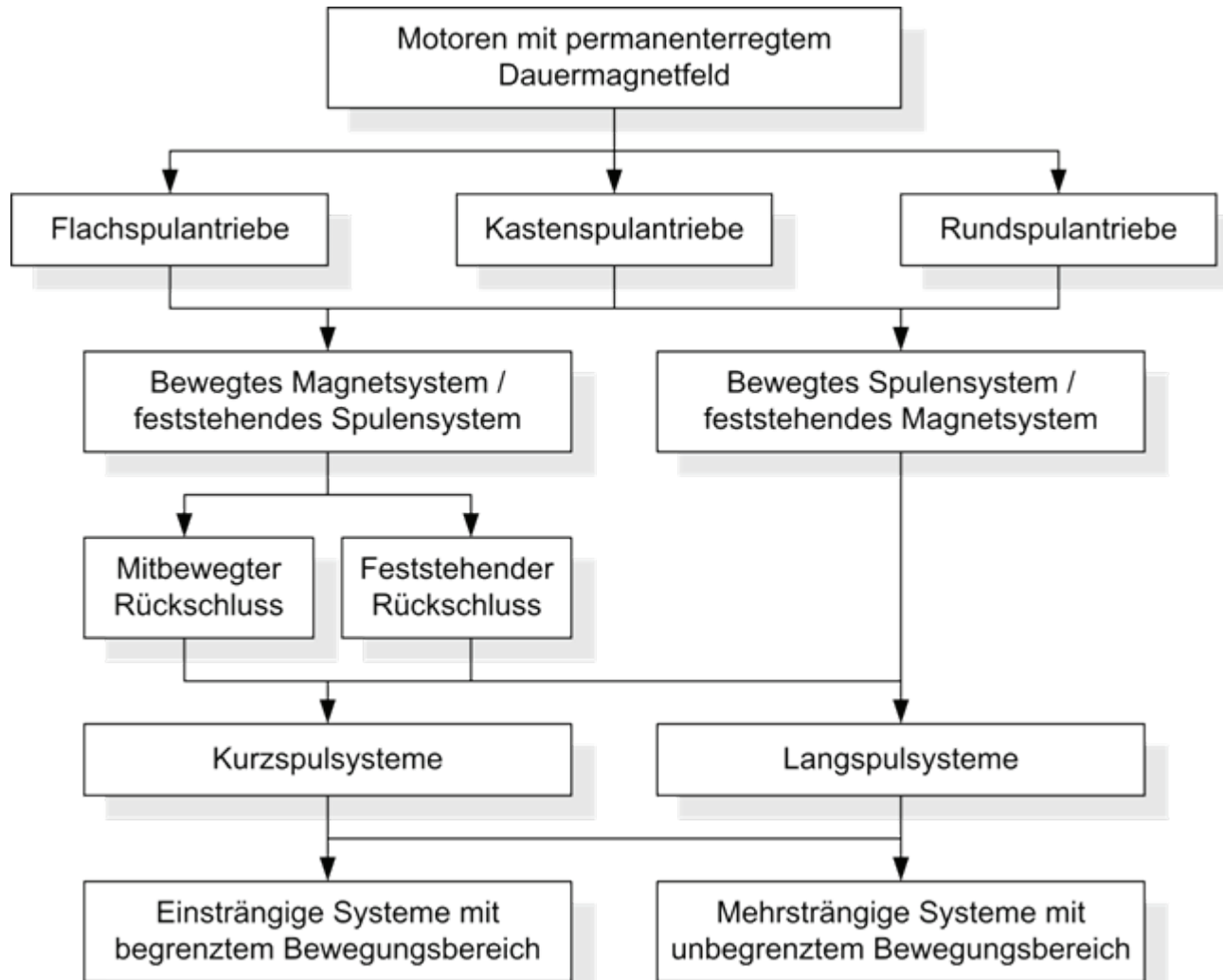
# Motivation

- Stärkere Verbreitung des Einsatzes von Lineardirektantrieben
- Große Variantenvielfalt möglich
- Keine Anpassung durch Getriebe wie bei rotatorischen Motoren mit rotations-translations-Umformern möglich
- Antriebe müssen auf die jeweiligen Anforderungen kostengünstig ausgelegt und dimensioniert werden
- Kürzere Entwicklungszeiten und Optimierungen über Erfahrungswerte hinaus notwendig
- Dies ist nur durch simulative Untersuchungen im Vorfeld möglich

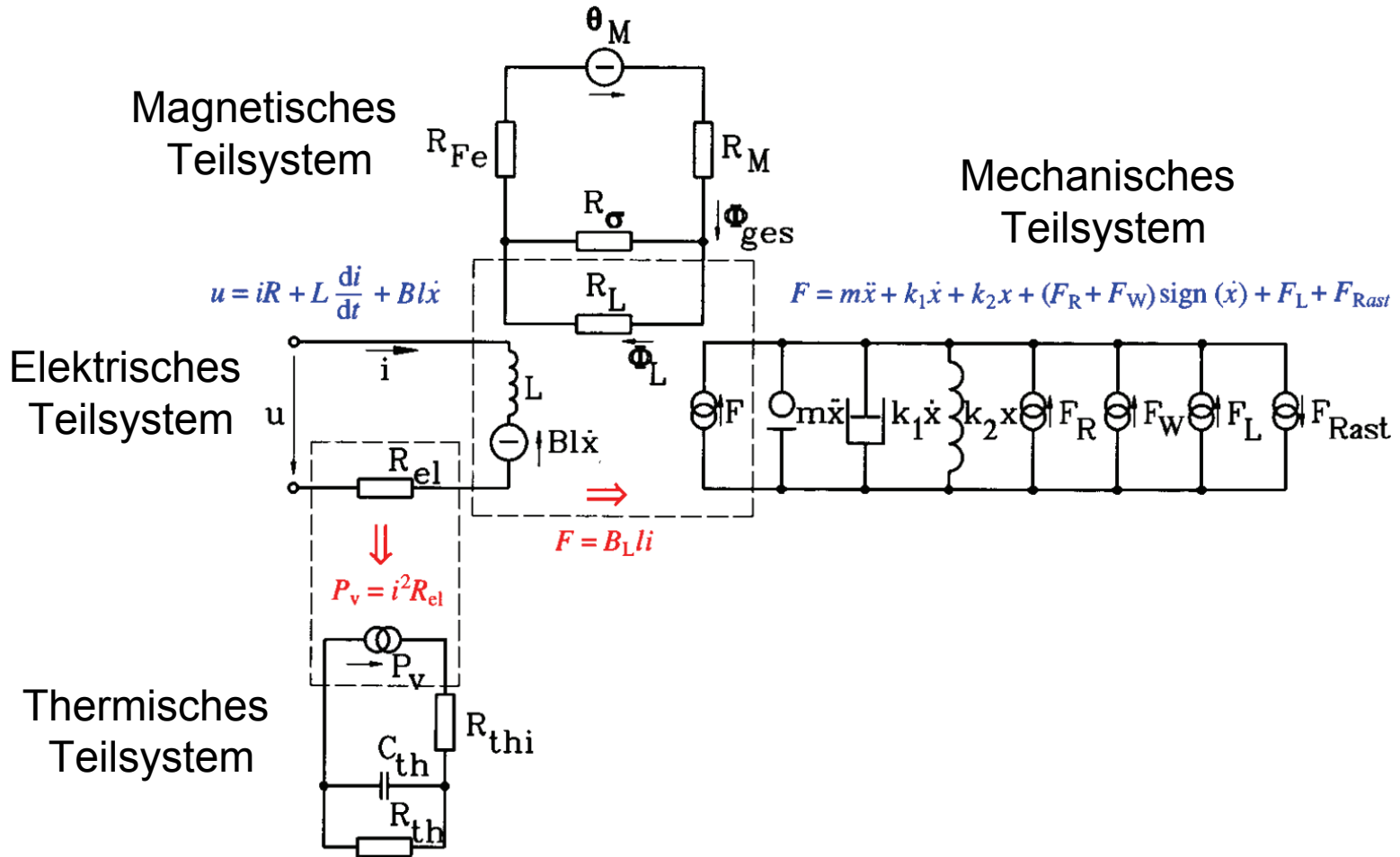
# Zielsetzung

- Systematischer Ansatz zur Auslegung und Dimensionierung feinwerktechnischer Lineardirektantriebe
- Ableitung analytischer Kenngrößen zur Vorabschätzung und Grobdimensionierung
- Entwicklung simulativer Ansätze zur Beschreibung von interdisziplinären physikalischen Zusammenhängen

# Übersicht Lineardirektantriebe



# Teilsysteme eines Linearantriebs



Grundstruktur eines elektrodynamischen Antriebs

[Schinköthe, W.: Aktorik in der Feinwerktechnik, Skript zur Vorlesung]

# Ablauf einer Motordimensionierung

Anforderung  
Lastenheft  
Spezifikationen

- Definition der Bewegung
- Auswahl der Bauform, Struktursynthese
- Festlegung der Einsatzumgebung

Grobdimensionierung  
Analytische  
Vorabschätzung

- Skalierung der Motorbauform
- Werkstoffauswahl
- Überschlägige Berechnung der Motorkennwerte

Feindimensionierung  
Optimierungsrechnung

- Motorkonstruktion
- Numerische Feldberechnung relevanter Größen
- Optimierung auf geforderte Kennwerte

Fertigung  
Inbetriebnahme

- Fertigung und Aufbau des Prototypen
- Endstufe und Ansteuerung
- Überprüfung der Anforderungen

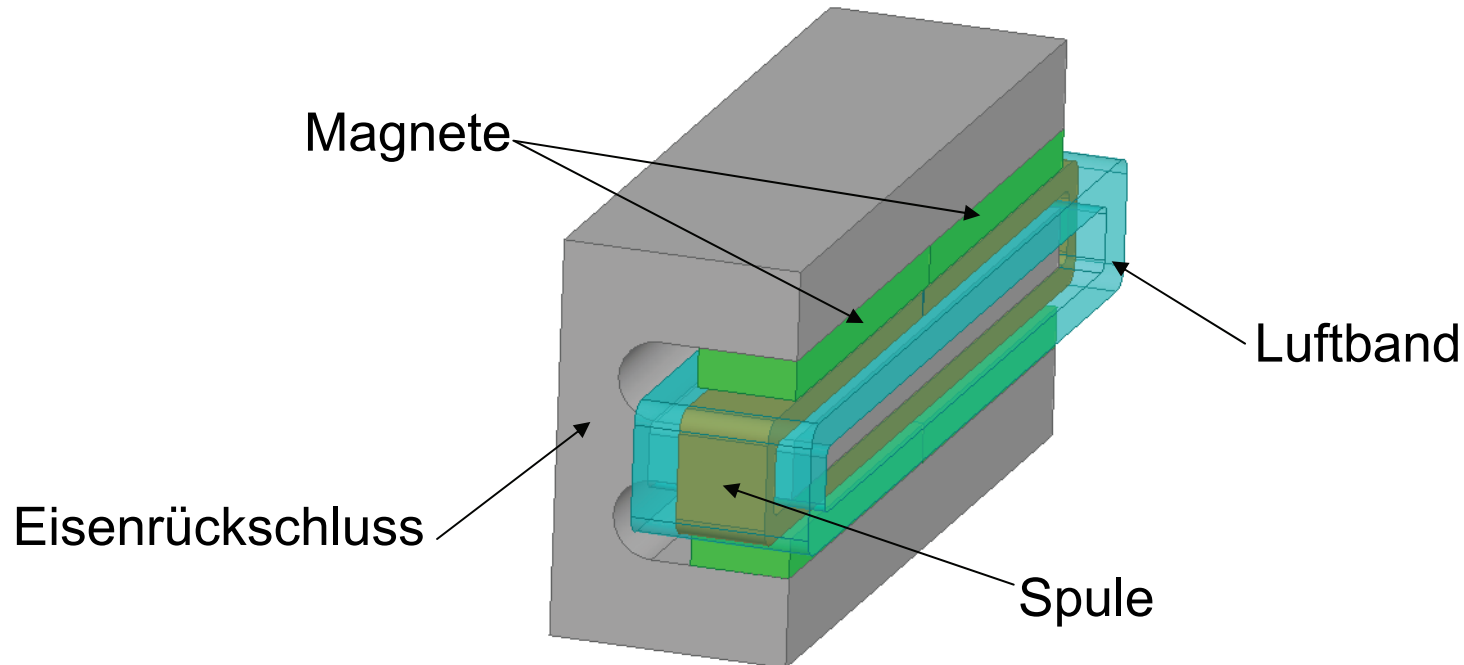


# Anforderungen und Bauformauswahl

- Bauform und Bauraum
- Fahrweglänge
- Maximale Geschwindigkeit, Dauergeschwindigkeit
- Beschleunigung
- Kraftkonstanz,
- Maximalkraft, Dauerkraft
- Positioniergenauigkeit
- Störanfälligkeit gegen äußere Lastangriffe
- Vom Motor ausgehende Störfelder
- Einschätzung des Belastungskollektivs nach DIN-EN 60034-1  
S1 Dauerbetrieb, S2 Kurzzeitbetrieb,... bis S10

# Homopolarer Lineardirektantrieb

- Motormodell mit Rückschluss, Magneten, Spule und Luftband.
- Dieses Modell ist geometrisch nicht sehr komplex aufgebaut. Daher wäre eine Simulation des gesamten Motors hier möglich.
- Bei größeren und geometrisch detaillierteren Antrieben ist dies nur mit großem Rechen- und Zeitaufwand lösbar.



# Analytische Grobdimensionierung

- Festlegung der Werkstoffauswahl
- Prüfung des verfügbaren Bauraums
- Bestimmung der benötigten Kraft
- Definition des Wickelfensters und der Spulengeometrie auf Basis der benötigten Kraft
- Dimensionierung und Auswahl der Magnete
- Überschlägige Bestimmung der Rückschlussgeometrie

**Ergebnis:** Erstes Geometriemodell mit Werkstoffkenndaten und überschlägigen Berechnungen der Kraft-Weg-Kennlinie und der Verlustleistung.

# Feindimensionierung mit Hilfe der FEM

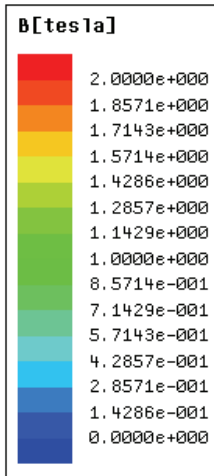
**Ziel:** Optimierung des Geometriemodells hinsichtlich magnetischen, elektrischen, mechanischen und thermischen Parametern.  
Berücksichtigung der dabei auftretenden physikalischen Zusammenhänge der unterschiedlichen Domänen.

Möglichkeiten zur simulativen Betrachtung:

- Magnetisch-statische Auslegung
- Magnetisch und elektrisch transiente Betrachtung
- Kopplung mit dem thermischen Teilsystem
- Systembetrachtung im Simplorer, Einbeziehung des mechanischen und des elektrischen Teilsystems

# Magnetisch-statische Auslegung

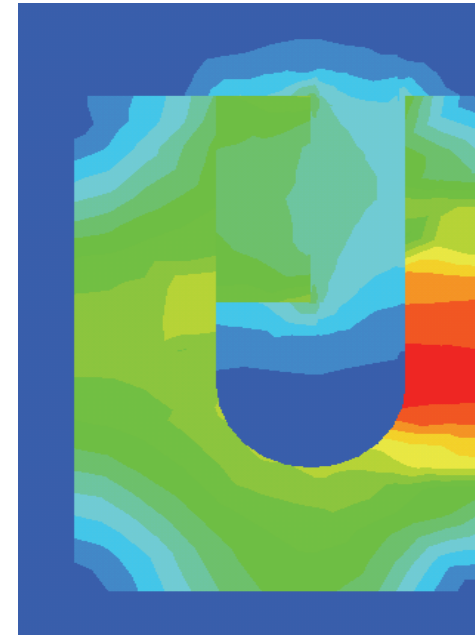
- Definition der Spulengeometrie
- Dimensionierung und Auswahl der Magnete
- Konstruktive Festlegung der Rückschlussgeometrie
- Bestimmung der Luftspaltinduktion
- Bestimmung der Flussdichte im Rückschluss



Heraus

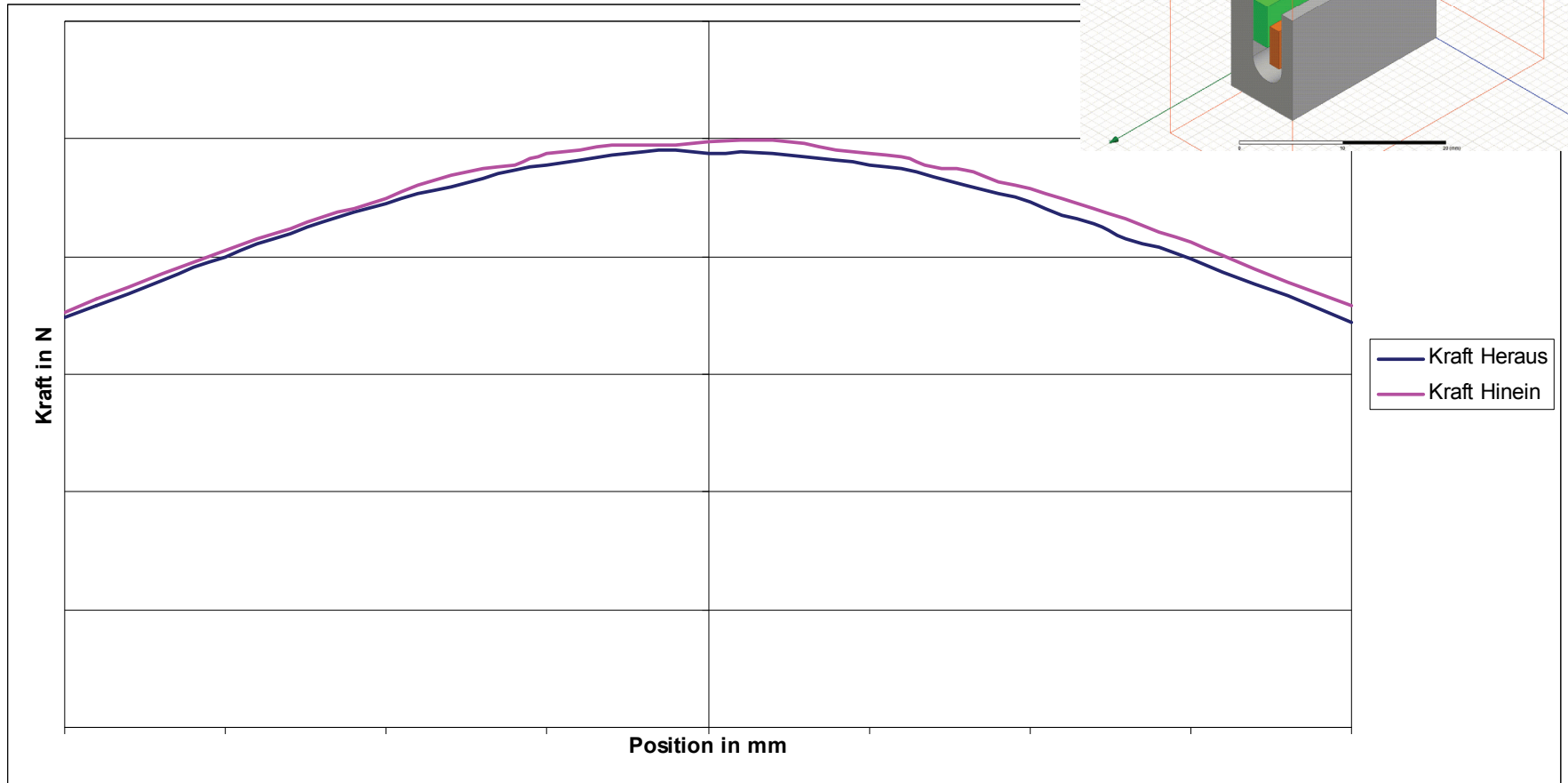
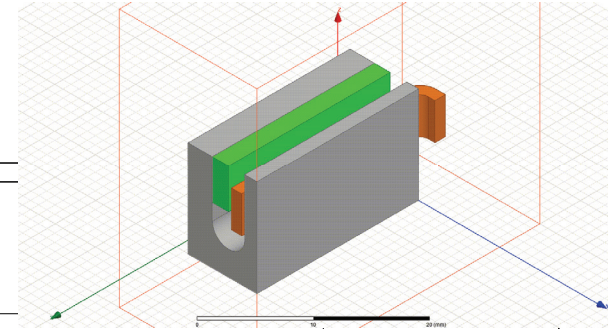


Hinein



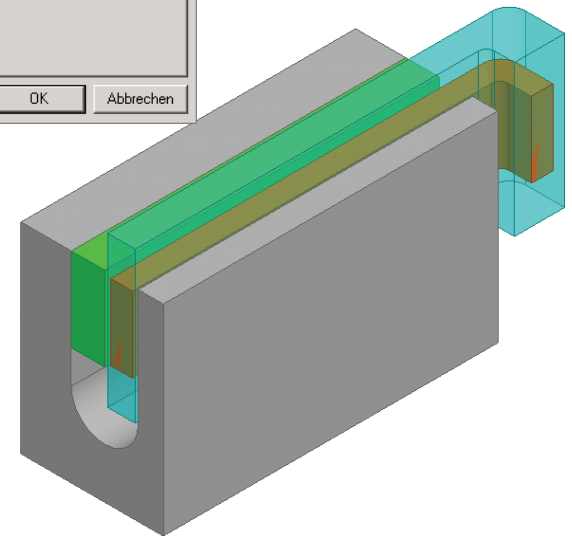
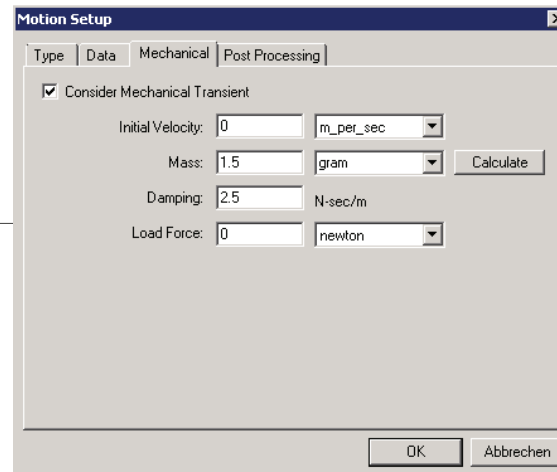
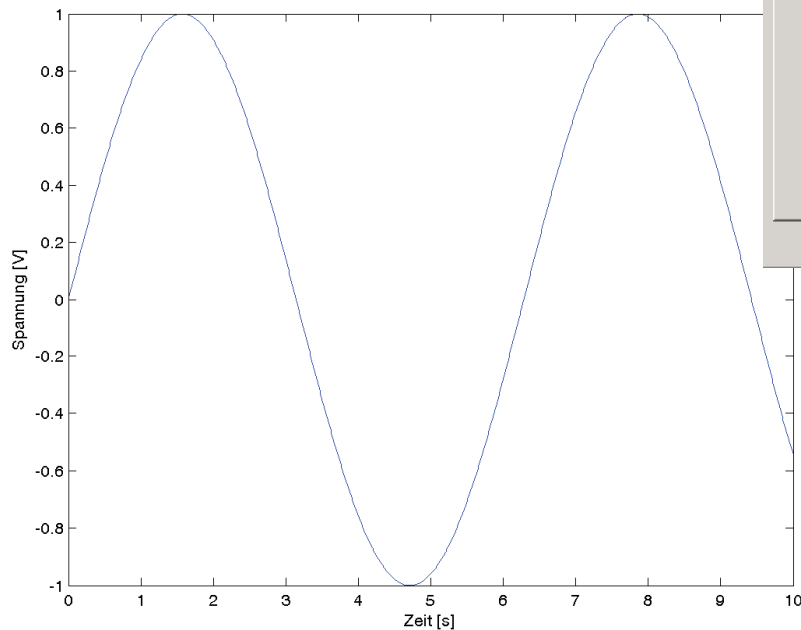
# Magnetisch-statische Auslegung

Ermittlung des Kraft-Weg-Verlaufs:

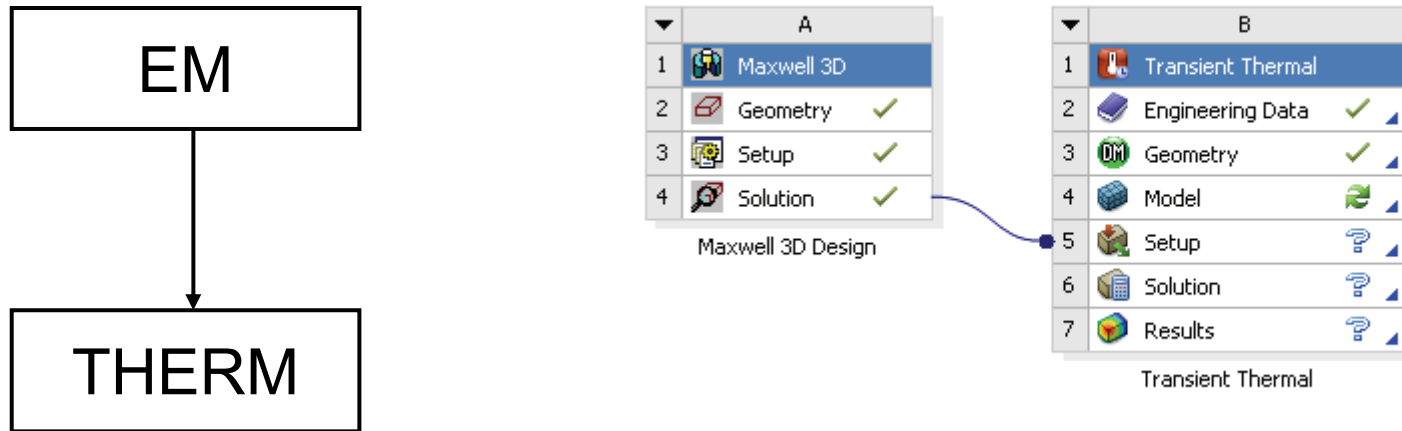


# Magnetisch und elektrisch transiente Betrachtung

- Motion-Band in Maxwell zur Realisierung der Bewegung
- Abbildung des dynamischen Verhaltens für unterschiedliche Ansteuerfrequenzen



# Thermisch-transiente Betrachtung -unidirektional-



- Export der Berechneten Verlustleistungen aus Maxwell
- Direkte unidirektionale Kopplung mit Ansys möglich
- Aufbringung der Wärmegenerationsrate durch Meshmapping, dadurch unterschiedliche Vernetzungen möglich



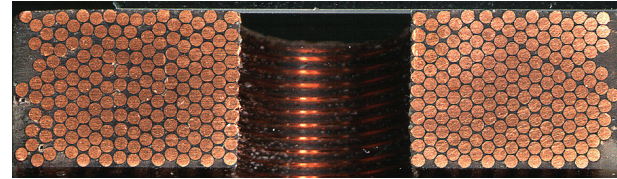
# Berechnung der Verlustleistung

Die ohmsche Verlustleistung wird nach folgendem Prinzip in Maxwell berechnet:

$$P = \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = \int_V \frac{\vec{J}}{\sigma} \cdot \vec{J} dV$$

Dabei wird allerdings der Füllfaktor der Spule nicht berücksichtigt.

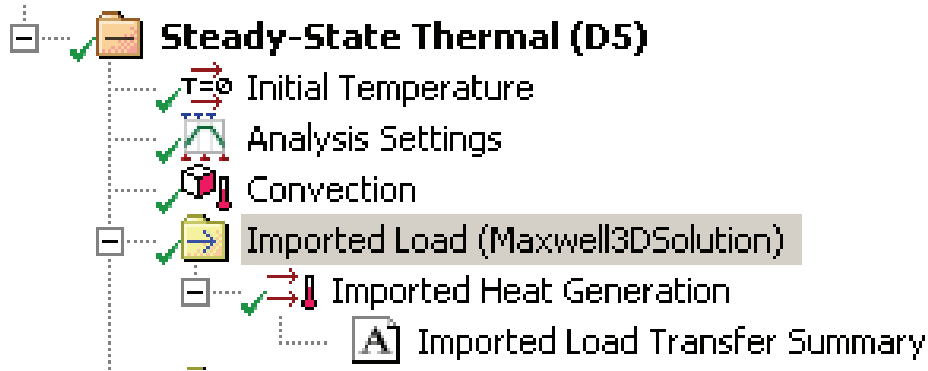
$$f = \frac{A_{Cu}}{A_{Spule}}$$



Die reale ohmsche Verlustleistung berechnet sich unter Berücksichtigung des Füllfaktors wie folgt:

$$P_{Real} = \frac{J_{Cu}}{\sigma} \cdot J_{Cu} \cdot V_{Cu} = \frac{J_{Sim}}{f} \cdot \frac{J_{Sim}}{f} \cdot (V_{Sim} \cdot f) = \frac{J_{Sim}^2}{f \cdot \sigma} \cdot V_{Sim} = \frac{P_{Sim}}{f}$$

# Thermisch-transiente Betrachtung



Details of "Imported Load (Maxwell3DSolution)"

Definition	
Type	Imported Data
Interpolation Type	Ansoft Results Interpolator
Suppressed	No
Export Definition	
Setup	Setup1
Export After Solve	Yes
Time	End Time
Settings	
Mapping Control	Program Controlled
Mapping	Profile Preserving

**Solve Setup**

General | Convergence | Expression Cache | Solver | Defaults

Nonlinear Residual: 0.001

Enable Iterative Solve

Relative Residual: 1e-006

Advanced Material Option

Permeability Option

Nonlinear B-H curve

From Link  Including magnets

Demagnetization Option

Nonlinear B-H curve

From Link

Import mesh

Enable Thermal Feedback from ANSYS Mechanical

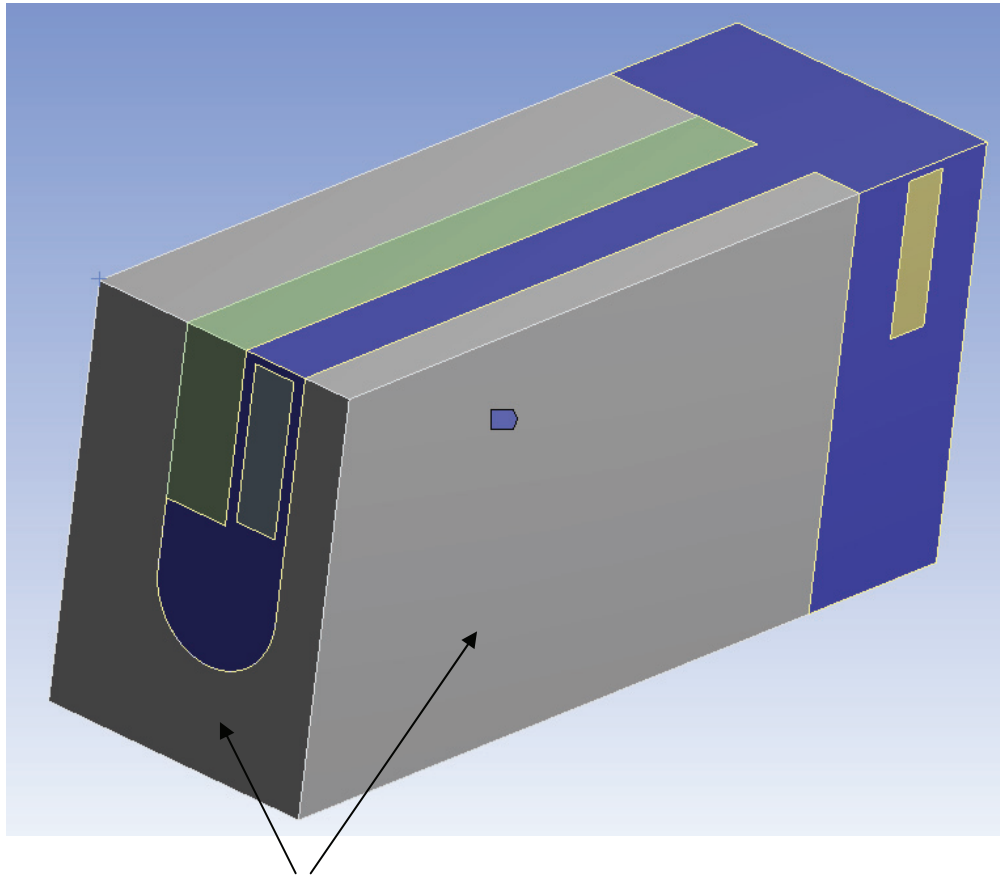
Compute Data For Link

Demagnetized operating points

Use Defaults

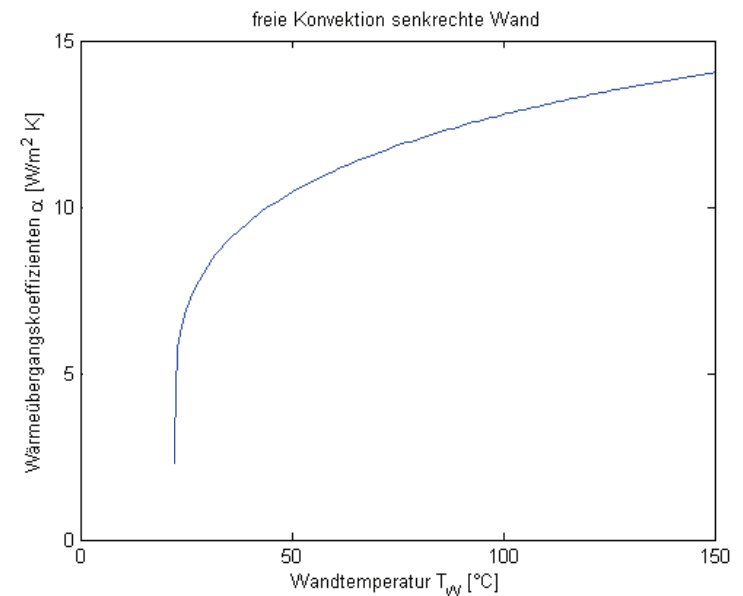
OK Abbrechen

# Definition der thermischen Randbedingungen



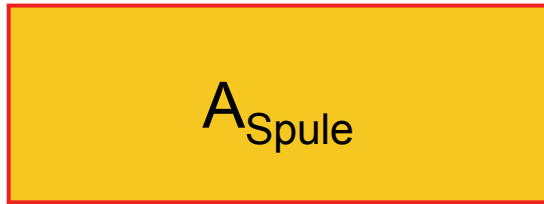
Symmetrieflächen

Vorgabe der Konvektion in  
Abhängigkeit der Temperatur:

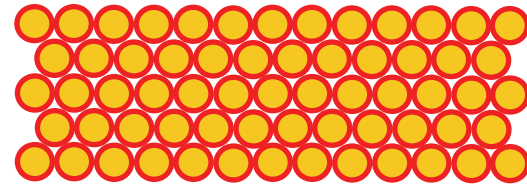


# Vorgabe der thermischen Randbedingungen

Simulationsmodell



Realität, ideal gewickelt



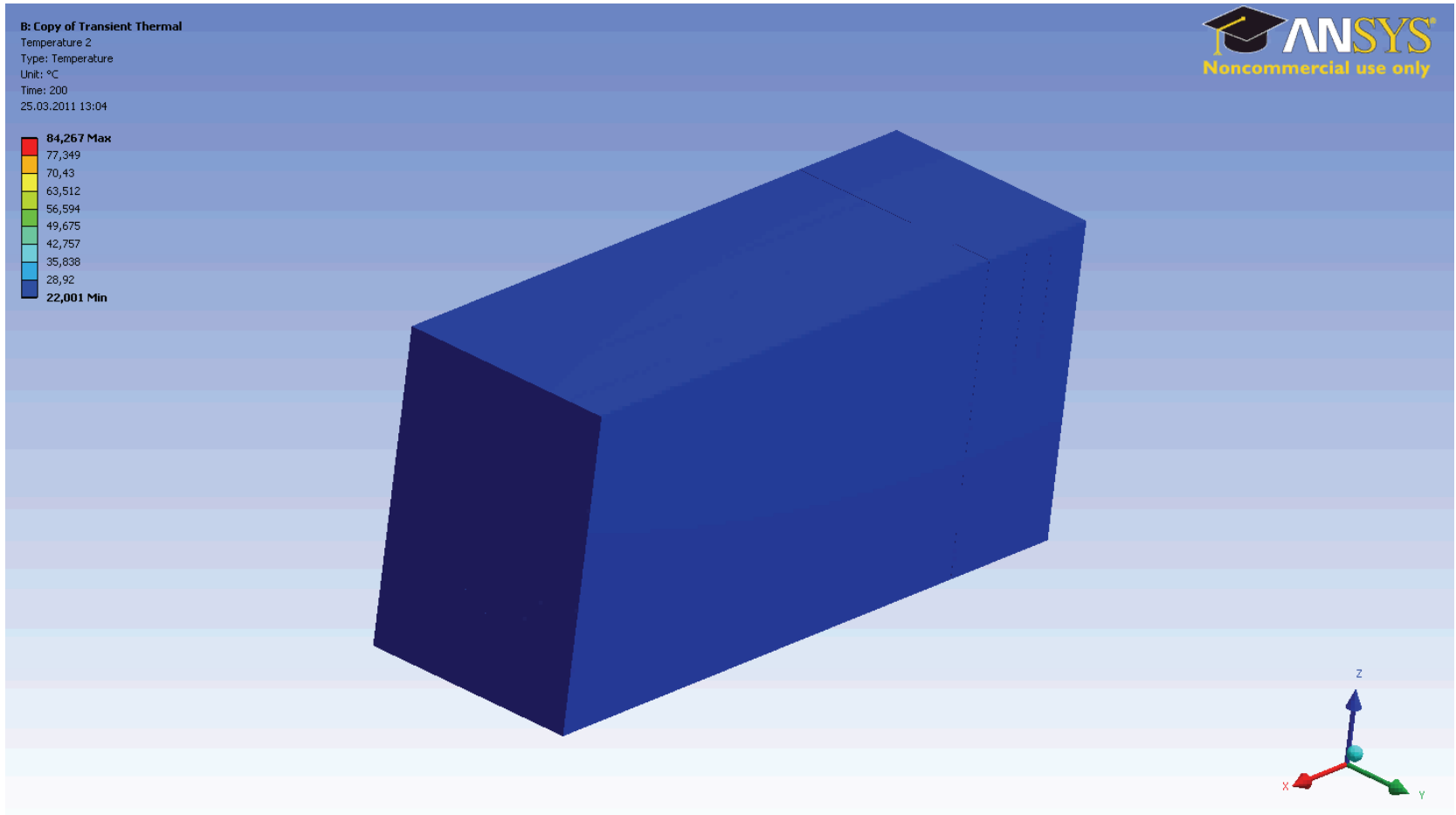
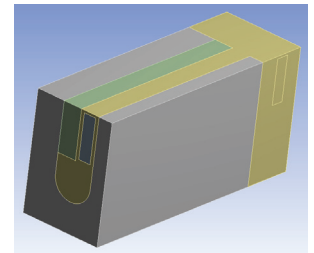
$$\Rightarrow A_{Spule} = A_{Kupfer} + A_{Luft} + A_{Lack}$$

Berücksichtigung der Spule im Modell als Vollmaterial mit fiktiven Materialeigenschaften entsprechend dem verwendeten Kupferdraht.

Anteilige Berechnung der Materialeigenschaften:

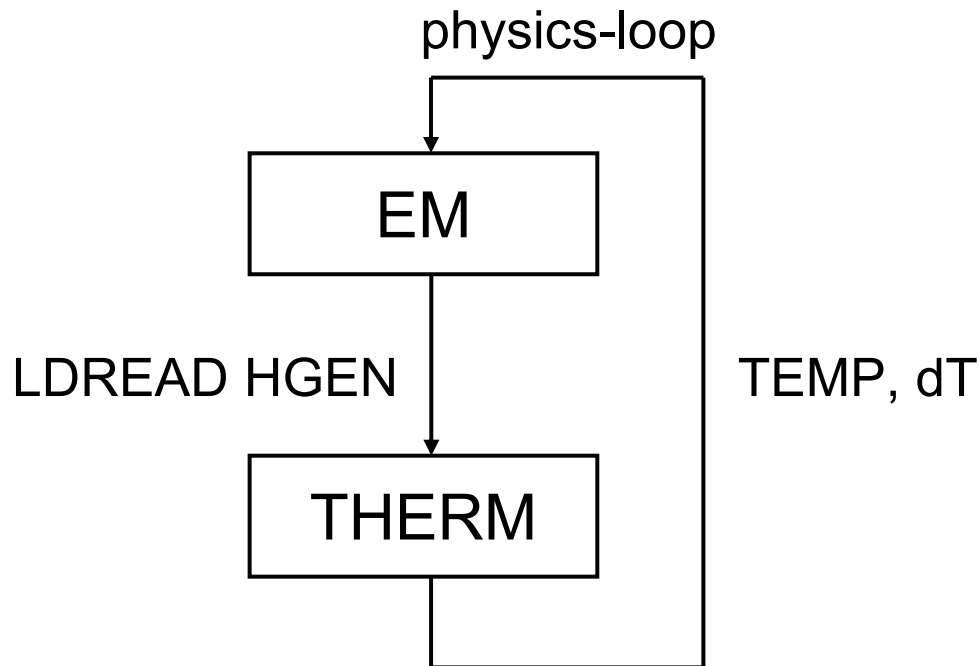
- Dichte  $\rho$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- Isobare Wärmekapazität  $c_p$

# Ergebnis der thermisch-transienten Betrachtung



# Thermisch-transiente Betrachtung -bidirektional-

- Unidirektionale Kopplung oft nicht ausreichend
- Bisher noch nicht als Maxwell-Mechanical-Kopplung möglich
- Dazu EMAG-Mechanical-Kopplung notwendig
- Bewegte lineare Modelle in Ansys nur sehr schwer umsetzbar

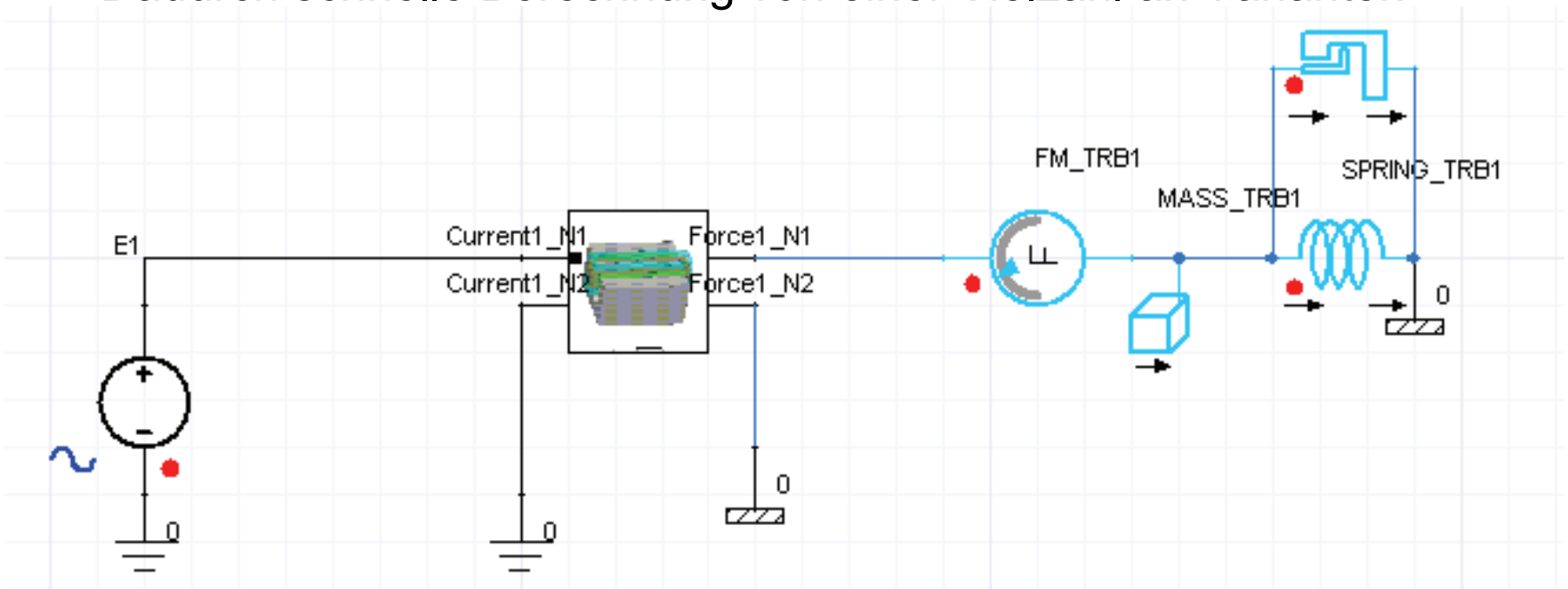


Änderung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit der Temperatur:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{CU} \cdot \Delta v)$$

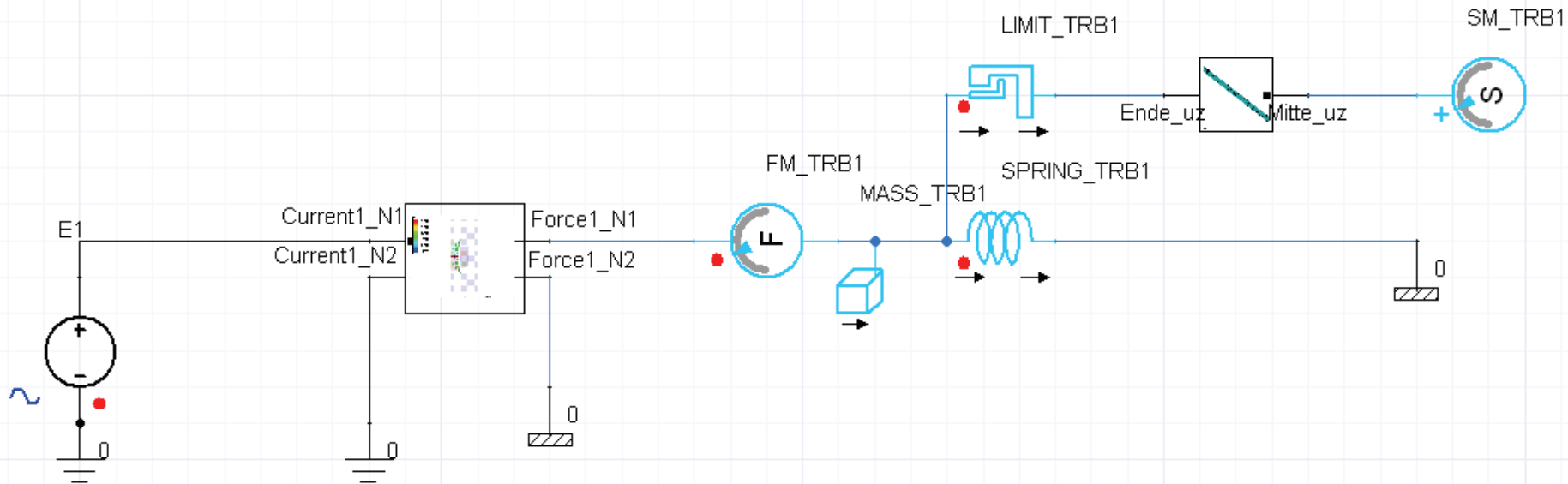
# Systemmodellierung im Simplorer

- Einbindung eines ordnungsreduzierten Modells
- Erweiterte Möglichkeiten zur Realisierung der elektrischen Ansteuerung gegenüber dem Circuit-Editor in Maxwell
- Anbindung der mechanischen Lasten und Randbedingungen
- Sehr schnelle Simulationszeit von wenigen Sekunden
- Dadurch schnelle Berechnung von einer Vielzahl an Varianten



# Systemmodellierung im Simplorer

- Zusätzliche Berücksichtigung eines elastischen Anschlags
- Implementierung der Ergebnisse aus einer Modalanalyse in Ansys
- Möglichkeit zur transient-transient Kopplung mit Maxwell
- Bei 3D aber wieder erhöhte Rechenzeit notwendig





# Zusammenfassung

- Durchgängige Simulation und Optimierung von Lineardirektantrieben mit Maxwell, Ansys und Simplorer möglich.
- Physikalische Zusammenhänge zwischen magnetischem, elektrischem, thermischen und mechanischem Teilsystem können abgebildet werden.
- Durch gekoppelte Simulationen können die physikalisch zusammenhängende Effekte unterschiedlicher Teilsysteme visualisiert werden.
- Die Entwicklungszeit kann dadurch massiv verkürzt werden. Der erste Prototyp ist bereits meist sehr nah am fertigen Produkt

Vielen Dank  
für  
Ihre Aufmerksamkeit!

Herzliche Einladung zum Arbeitskreis Elektromechanik!

16.00 – 17.30 Uhr