TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Entwurf elektrischer Maschinen mit numerischer Feldberechnung

Erich Schmidt

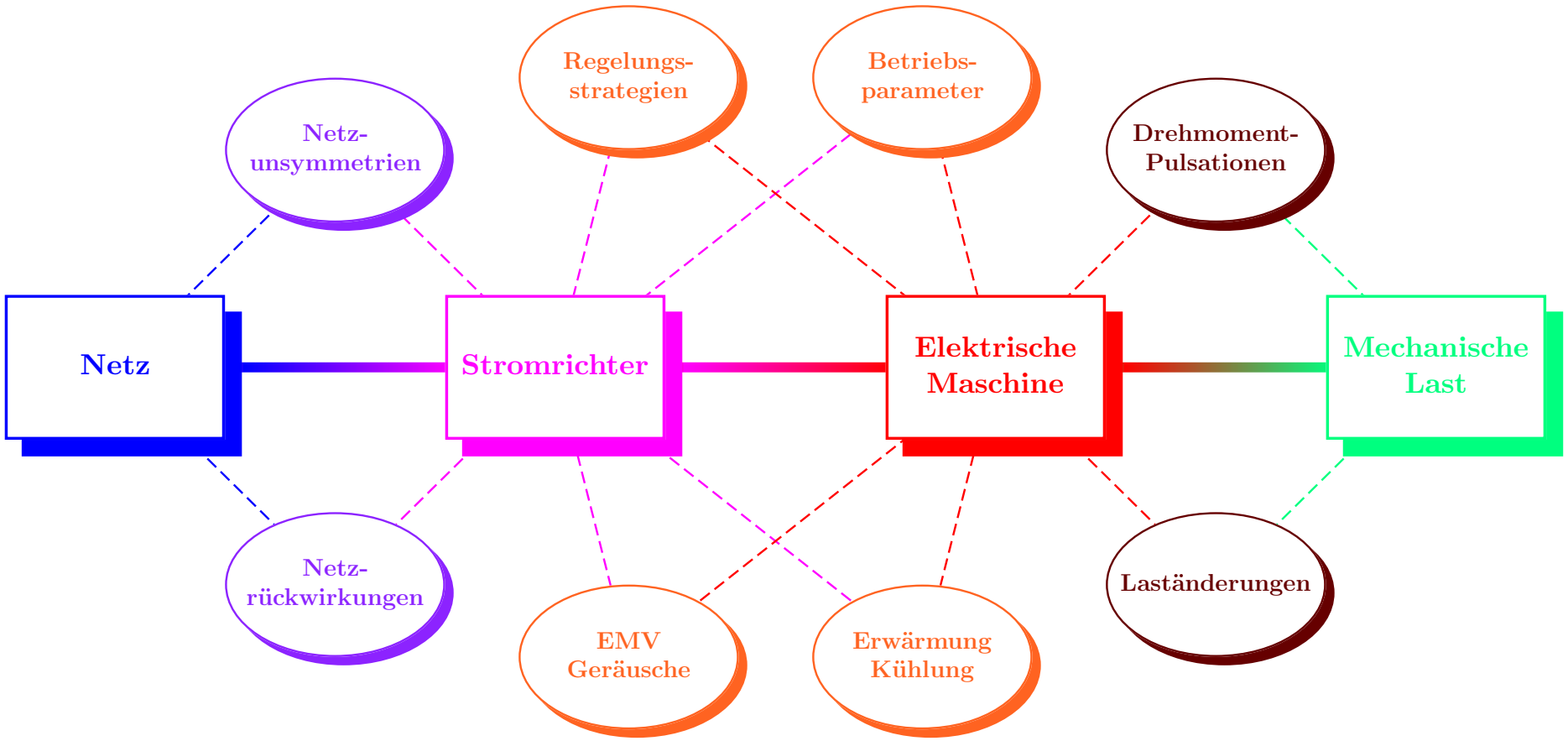
Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen
Technische Universität Wien
Wien, Österreich

Inhalt

- **Einleitung**
- **Finite Elemente Analyse elektrischer Maschinen**
- **Modellierung von Stator-Rotor-Positionen**
- **Anwendungsbeispiele**
  - **Reluktanz-Synchronmaschine**
  - **Transversalflussmaschine**
- **Zusammenfassung**

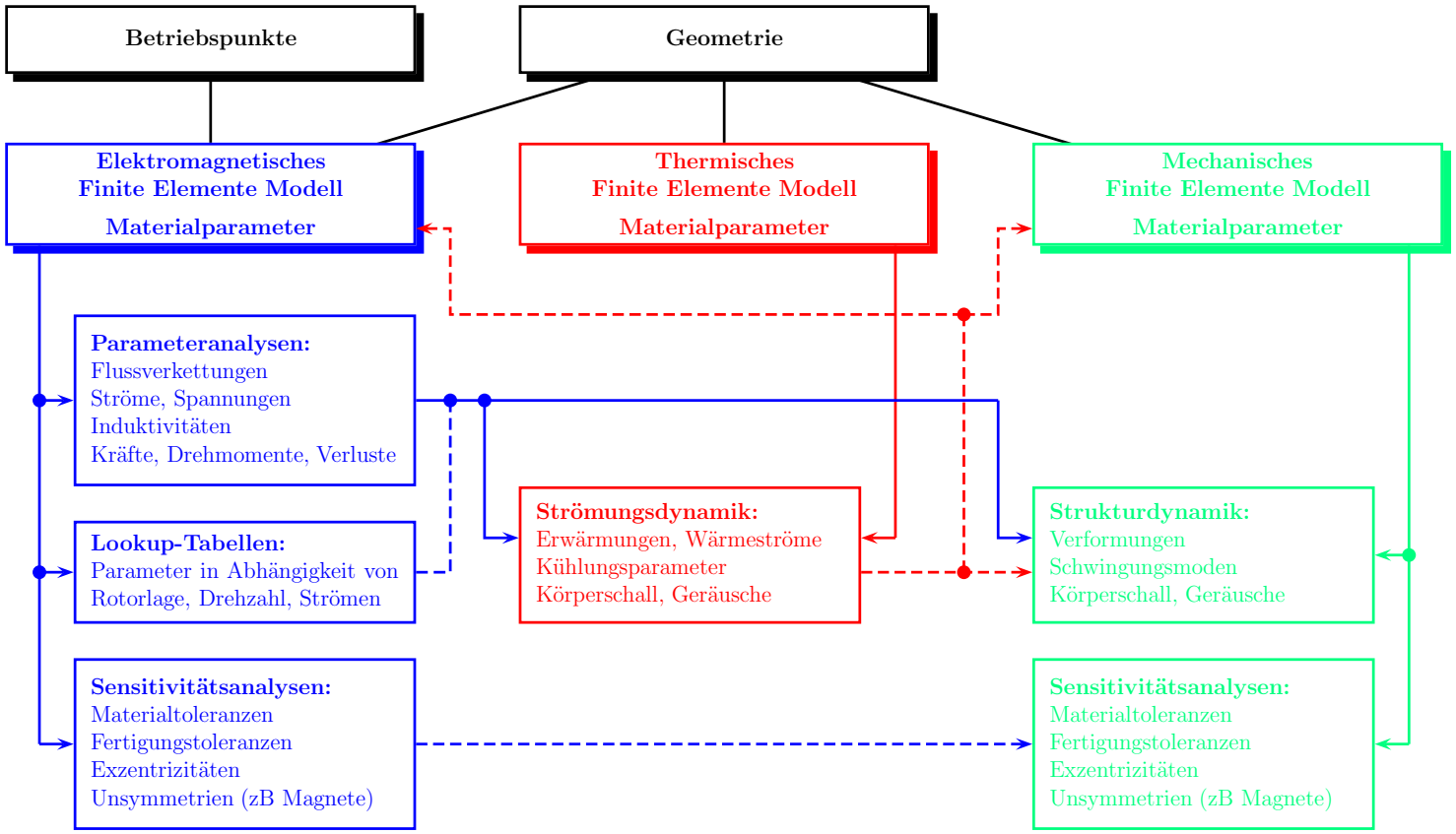
Einleitung

- **Im Bereich der elektrischen Maschinen sind Finite Elemente Analysen im normalen Entwurfsverfahren und insbesonders für Design-Review und Design-Optimierung immer mehr etabliert.**
- **Im Hinblick auf Modellerstellung und Reduzierung des Rechenaufwandes sind dabei spezielle Methoden zur Modellierung der verschiedenen Stator-Rotor-Positionen unverzichtbar.**
- **Dies ist insbesondere für die Simulation elektrischer Antriebe wichtig, wo die Abhängigkeiten aller Parameter von der Rotorwinkellage von grossem Interesse sind.**
- **Design-Varianten bezüglich Geometrie und Materialeinsatz ermöglichen Entwurf und Optimierung der elektrische Maschinen unter Berücksichtigung der vorkommenden Betriebszustände.**



Makrostrukturelle Komponenten eines elektrischen Antriebs
mit exemplarischen Aufgaben für die Systemsimulation

Finite Elemente Analyse elektrischer Maschinen



Übersicht und Kopplungen von Finite Elemente Analysen

Modellierung von Stator-Rotor-Positionen

- **Elektrische Maschinen haben in vielen Fällen eine höhere Polpaarzahl, sodass entsprechend den Wicklungsausführungen in Umfangsrichtung nur ein Teil der Maschine modelliert wird, meist sind das zwei Polteilungen oder gar nur eine Polteilung.**
- **Elektrische Maschinen haben in den elektromagnetischen Analysen betreffend die verschiedenen Stator-Rotor-Positionen invariante Geometrien von Stator und Rotor.**
- **Reduktion des Rechenaufwandes für die Gleichungslösung durch eine Partitionierung des Modells in getrennte Stator- und Rotor-Teilmodelle**

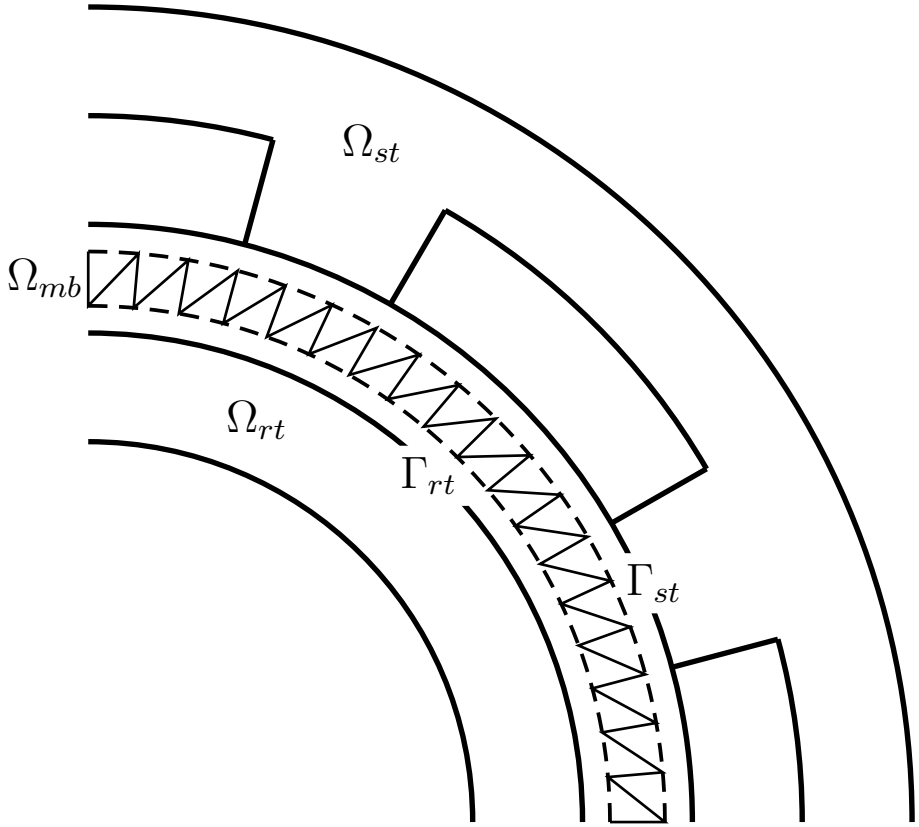
Rechenaufwand zur Lösung von Gleichungssystemen

Matrix-Inversion	$\sim N^3$
Dreieckszerlegung	$\sim N^2$
Sparse-Solver	$\sim N^{1.5}$
Multigridsolver	$\sim N$

$$\left(N_{st}+N_{rt}\right)^k > N_{st}^k + N_{rt}^k \quad , \quad k>1$$

Stator-Rotor-Positionen – Moving Band Modellierung

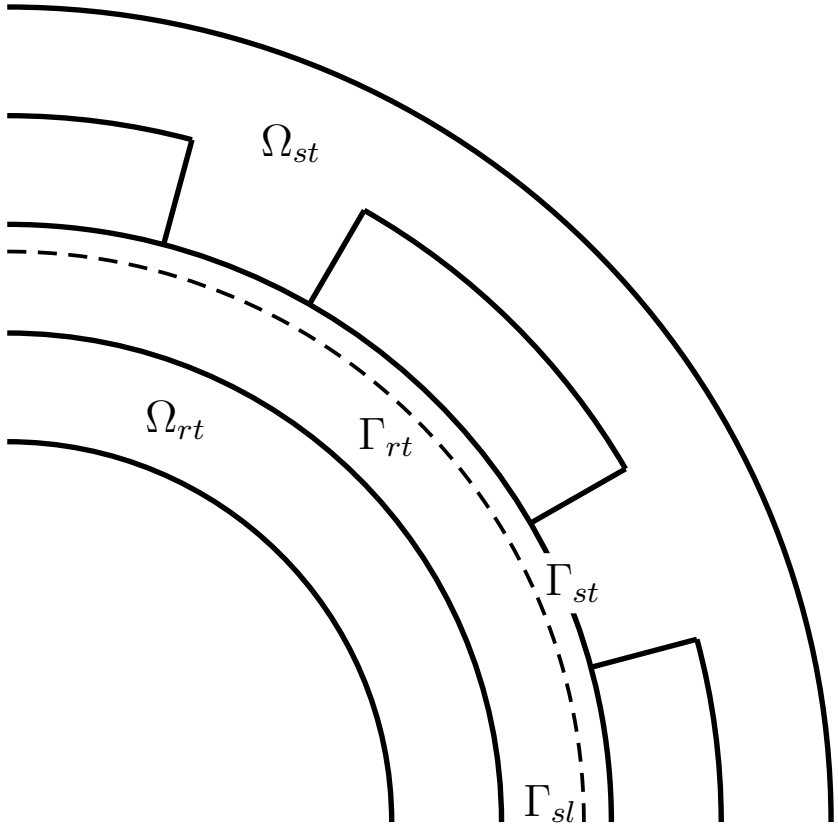
- **Getrennte Modelle für Stator und Rotor mit einer meist äquidistanten Diskretisierung in Umfangsrichtung**
- **Kopplung der Stator- und Rotor-Teilmodelle über eine Elementlage im Luftspalt**
- **Simultane Anwendung periodischer Randbedingungen schwierig**
- **Neuvernetzung der Elementlage im Luftspalt in Abhängigkeit von der aktuellen Rotorposition**
- **Ungleiche Qualität der numerischen Ergebnisse für verschiedene Rotorpositionen**



Bereiche bei der Moving Band Modellierung

Stator-Rotor-Positionen – Sliding Surface Modellierung

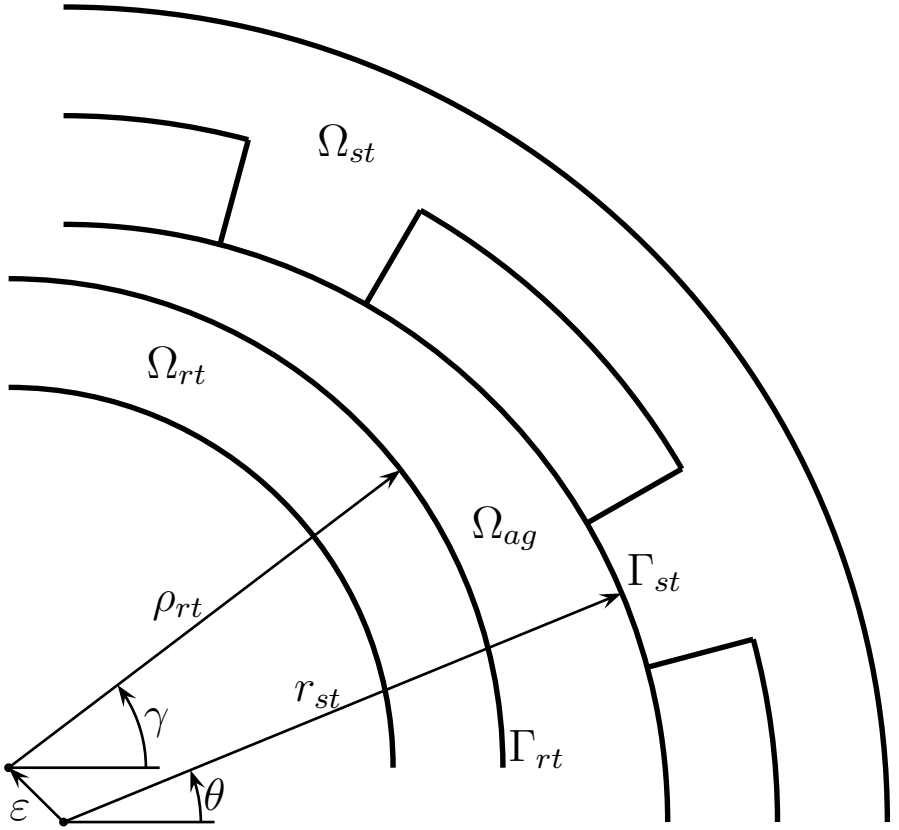
- **Getrennte Modelle für Stator und Rotor mit einer meist äquidistanten Diskretisierung in Umfangsrichtung**
- **Kopplung der Stator- und Rotor-Teilmodelle über Randbedingungen in Abhängigkeit der Rotorposition**
- **Simultane Anwendung periodischer Randbedingungen möglich**
- **Invariante Diskretisierung der Teilmodelle ohne einer Neuvernetzung für verschiedene Rotorpositionen**
- **Identische Qualität der numerischen Ergebnisse für verschiedene Rotorpositionen**



Bereiche bei der Sliding Surface Modellierung

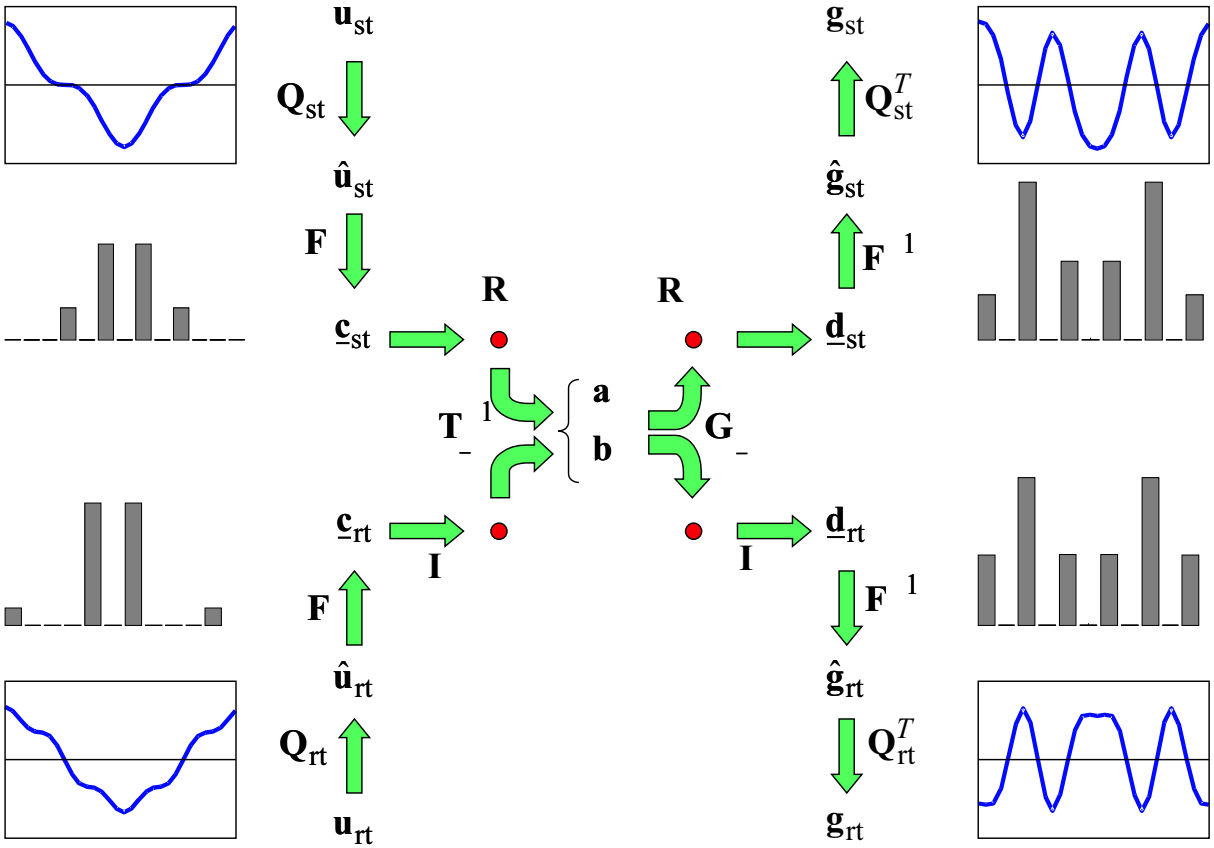
Stator-Rotor-Positionen – Airgap Macro Modellierung

- **Getrennte Modelle für Stator und Rotor mit einer meist äquidistanten Diskretisierung in Umfangsrichtung**
- **Kopplung der Stator- und Rotor-Teilmodelle über analytische Lösung in Abhängigkeit der Rotorposition**
- **Simultane Anwendung periodischer Randbedingungen möglich**
- **Invariante Diskretisierung der Teilmodelle ohne einer Neuvernetzung für verschiedene Rotorpositionen**
- **Identische Qualität der numerischen Ergebnisse für verschiedene Rotorpositionen**



Bereiche bei der Airgap Macro Modellierung

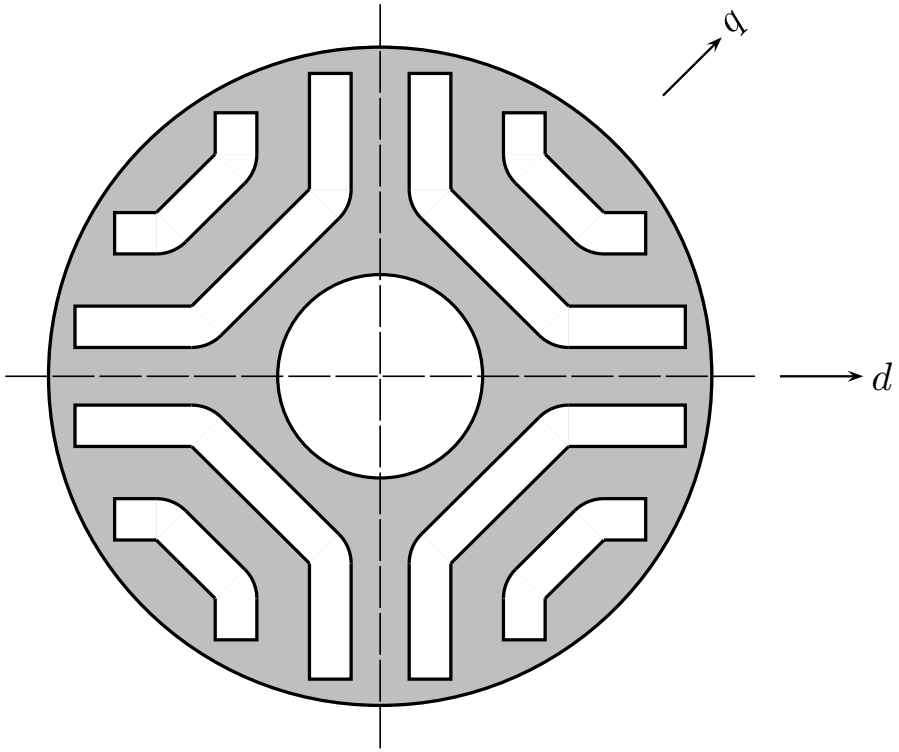
Kopplung der Stator- und Rotor-Teilmodelle



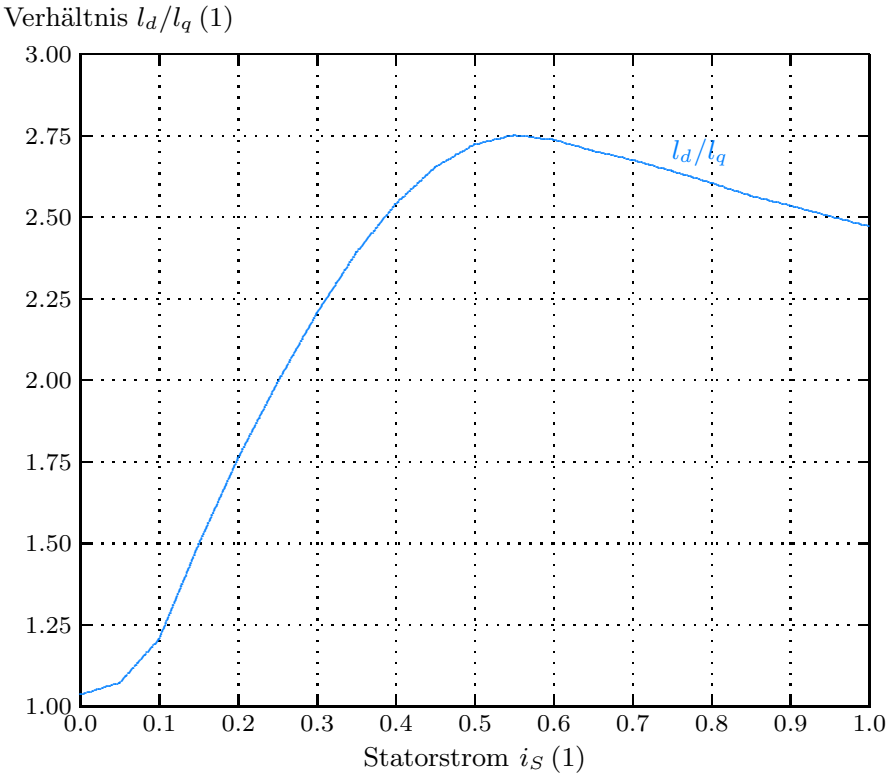
Kopplung der Stator- und Rotor-Teilmodelle mit harmonischen Gewichtsfunktionen im Luftspalt

Anwendungsbeispiele

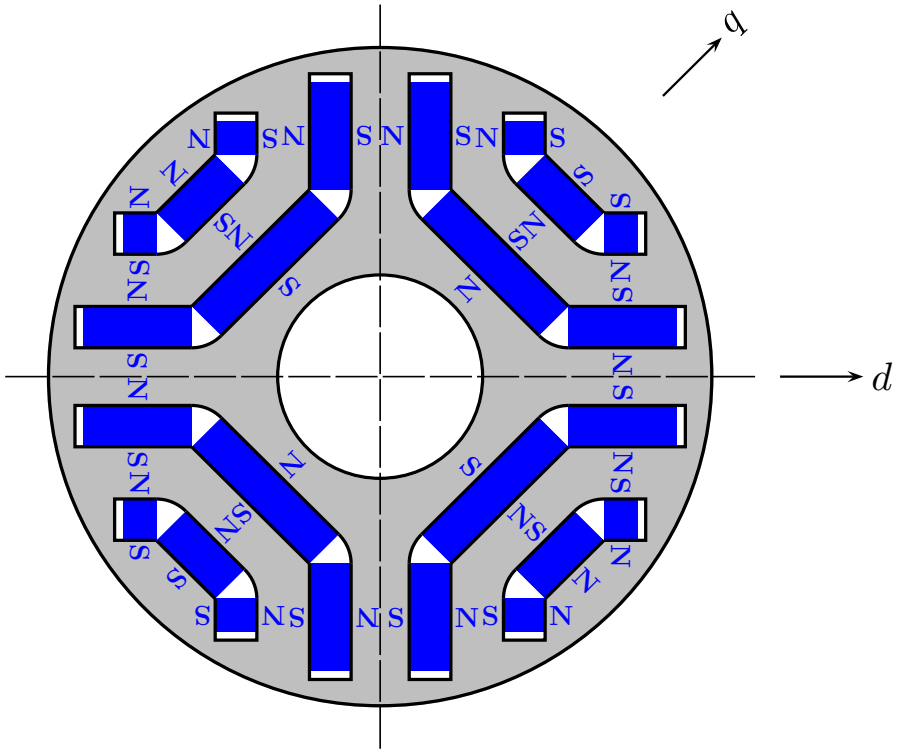
- **Reluktanz-Synchronmaschine**
  - **Hohe magnetische Achsigkeit durch Rotorkonstruktionen mit internen Flussbarrieren**
  - **Realisierung mehrerer Maschinenkonzepte durch Permanentmagnete in den Flussbarrieren bei identischer Geometrie**
- **Transversalflussmaschine**
  - **Optimierung des Reluktanzmoments unter Verwendung von Pulvermagnet-Materialien**
  - **Elektromagnetische Scherspannungen zur mechanischen Auslegung der Rotorträgerteile zwischen den Strängen**



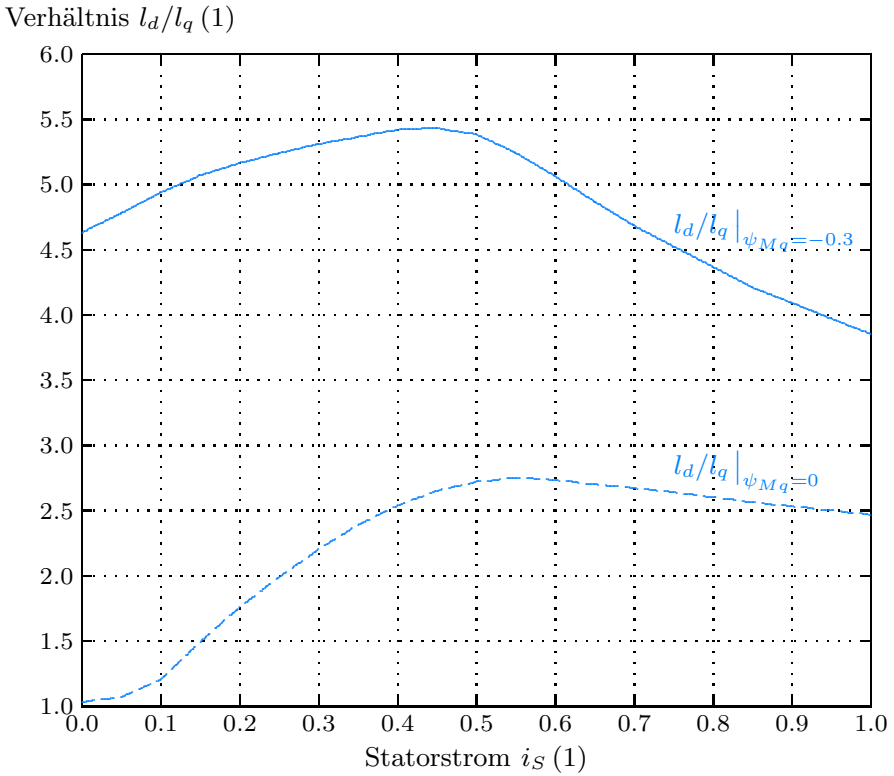
Reluktanzrotor mit Flussbarrieren zur Erhöhung der magnetischen Achsigkeit



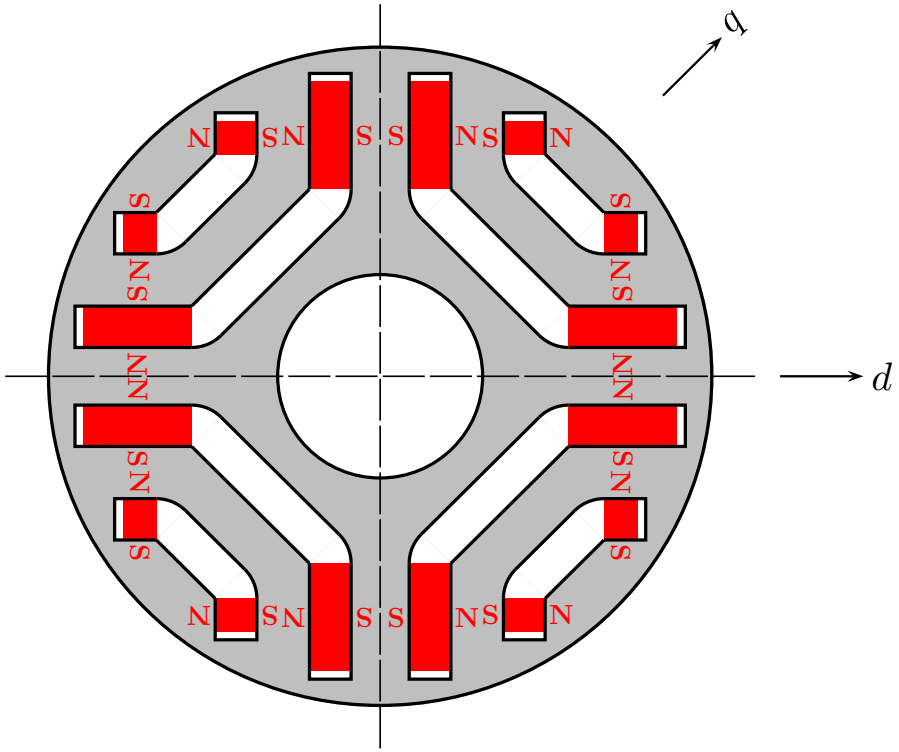
Induktivitätsverhältnis l_d/l_q in Abhängigkeit der Amplitude des Statorstromraumzeigers i_S, Statorstromwinkel $\beta = \pi/4$



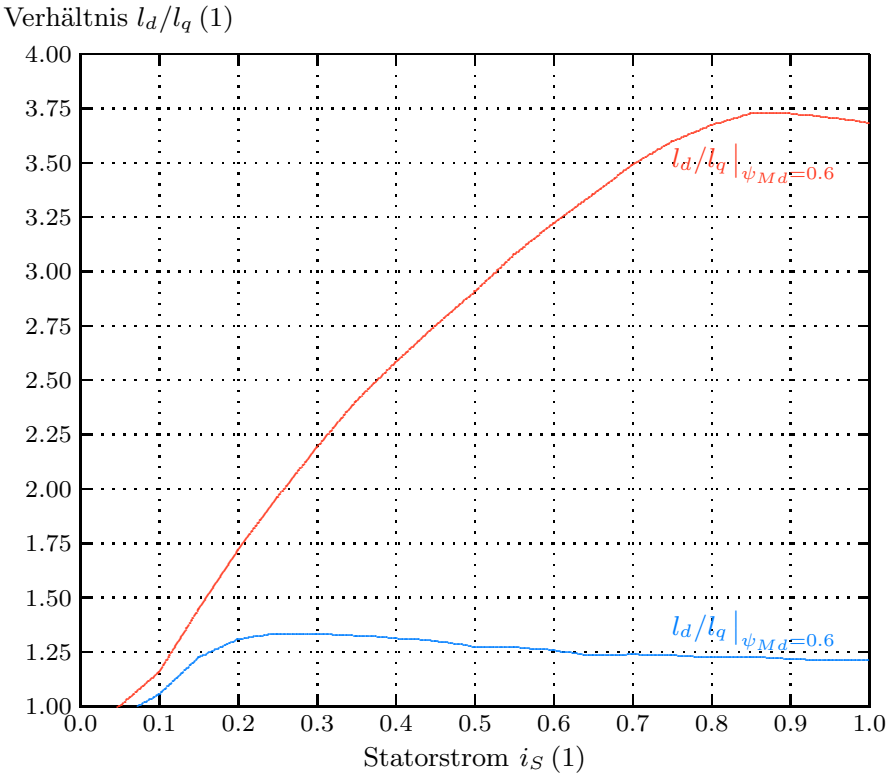
Reluktanzrotor mit Flussbarrieren und Permanentmagnet–Erregung $\psi_{Mq} < 0$



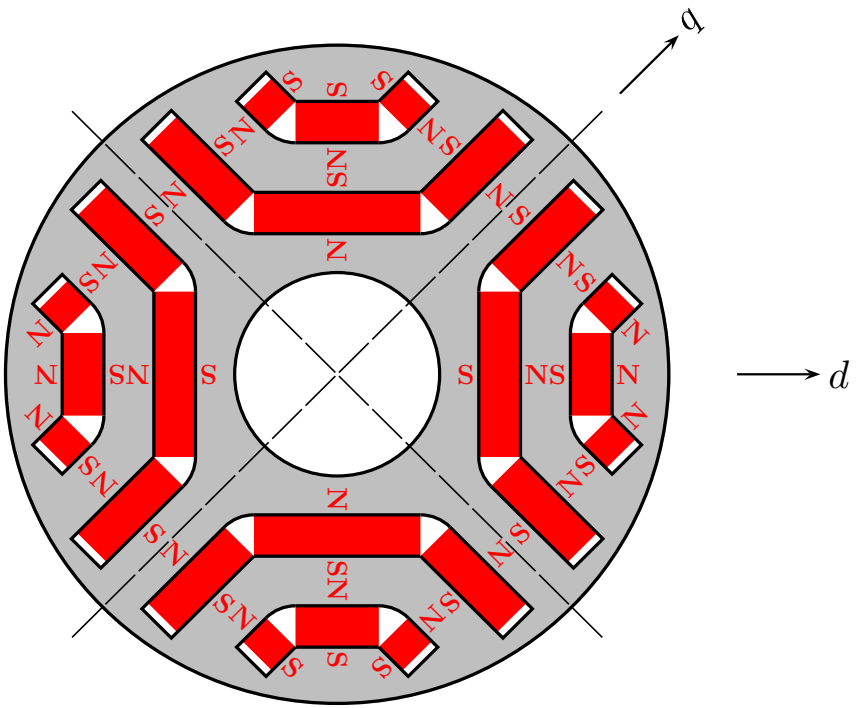
Induktivitätsverhältnis l_d/l_q in Abhängigkeit der Amplitude des Statorstromraumzeigers i_S, Statorstromwinkel $\beta = \pi/4$



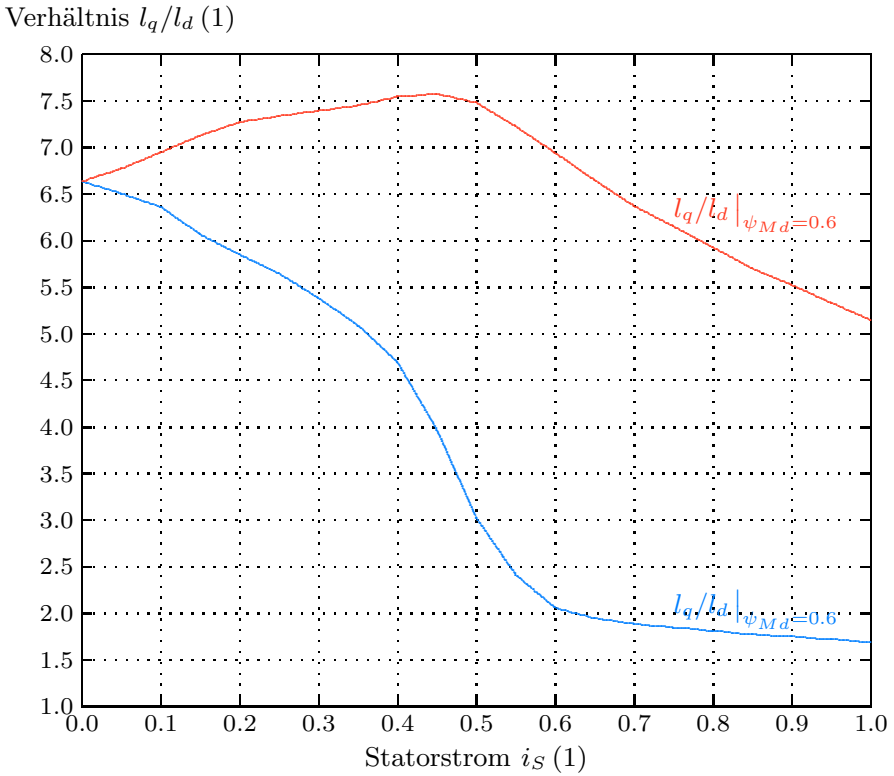
Reluktanzrotor mit Flussbarrieren und Permanentmagnet–Erregung $\psi_{Md} > 0$



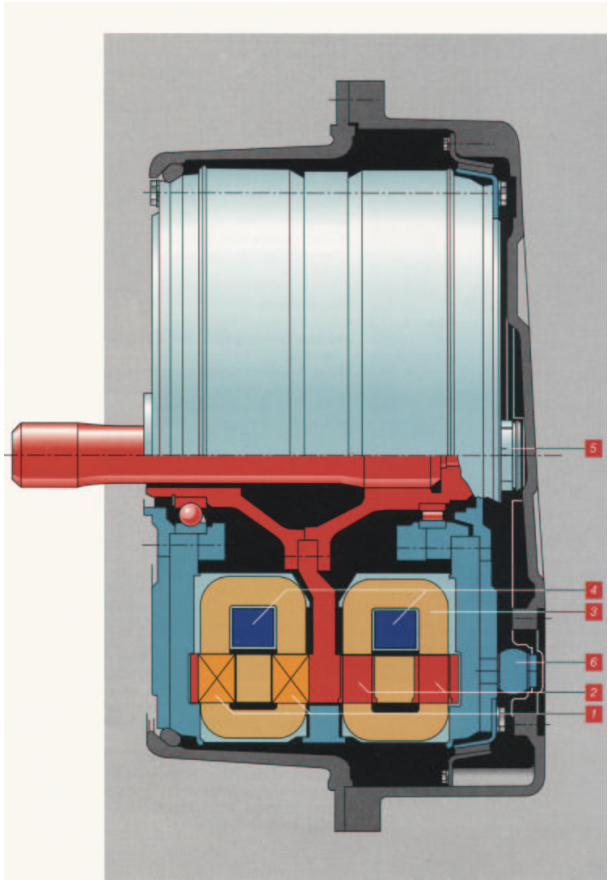
Induktivitätsverhältnis l_d/l_q in Abhängigkeit der Amplitude des Statorstromraumzeigers i_S, Statorstromwinkel $\beta = \pi/4$, $\beta = 3\pi/4$



Reluktanzrotor mit Flussbarrieren und Permanentmagnet–Erregung $\psi_{Md} > 0$



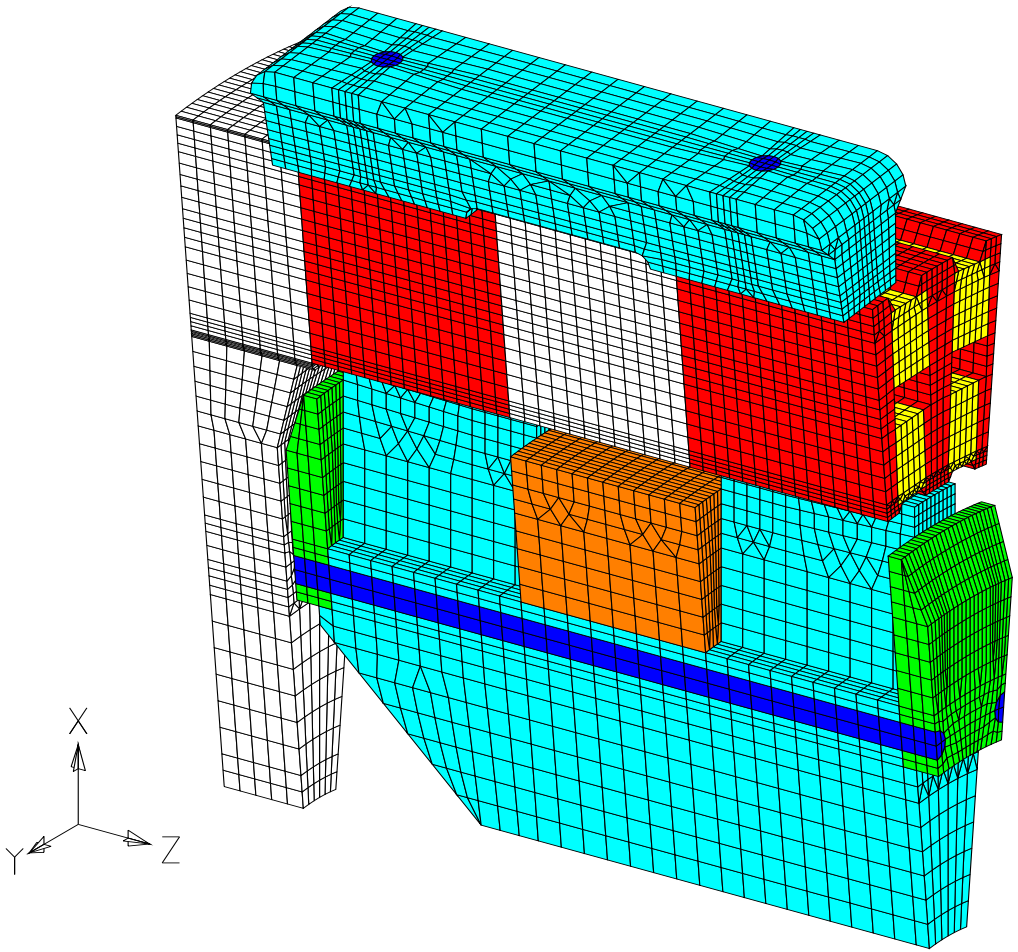
Induktivitätsverhältnis l_q/l_d in Abhängigkeit der Amplitude des Statorstromraumzeigers i_S, Statorstromwinkel $\beta = \pi/4$, $\beta = 3\pi/4$



Zweisträngige Transversalflussmaschine
in vereinfachter Darstellung (VOITH)

Hauptdaten der Transversalflussmaschine (VOITH)

Nennleistung	150	kW
Nenndrehmoment	1800	Nm
Nenndrehzahl	800	1/min
Maximaldrehzahl	2400	1/min
Anzahl der Pole	56	
Rotordurchmesser aussen	380	mm
Rotordurchmesser innen	290	mm
Rotorpaketlänge	315	mm

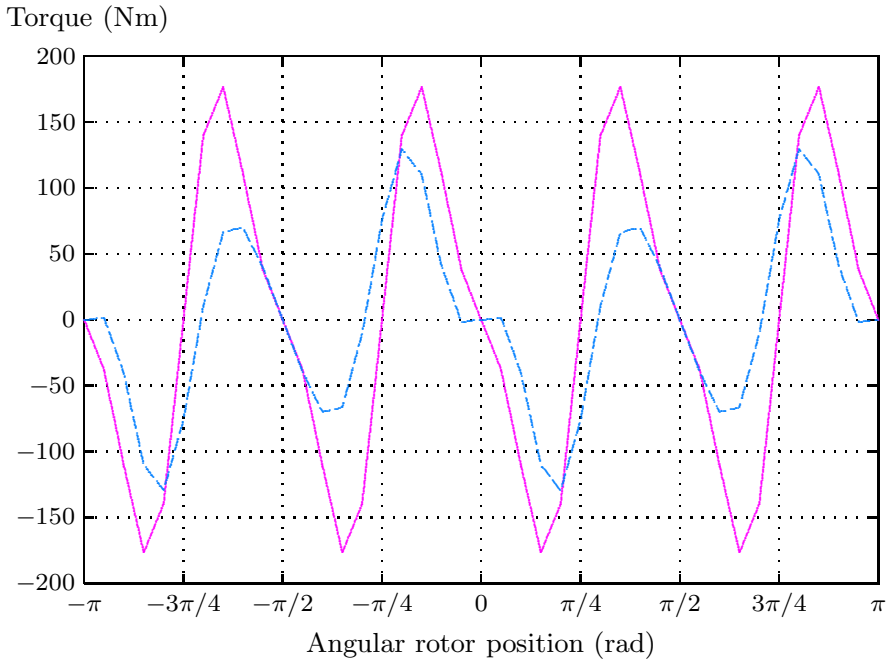


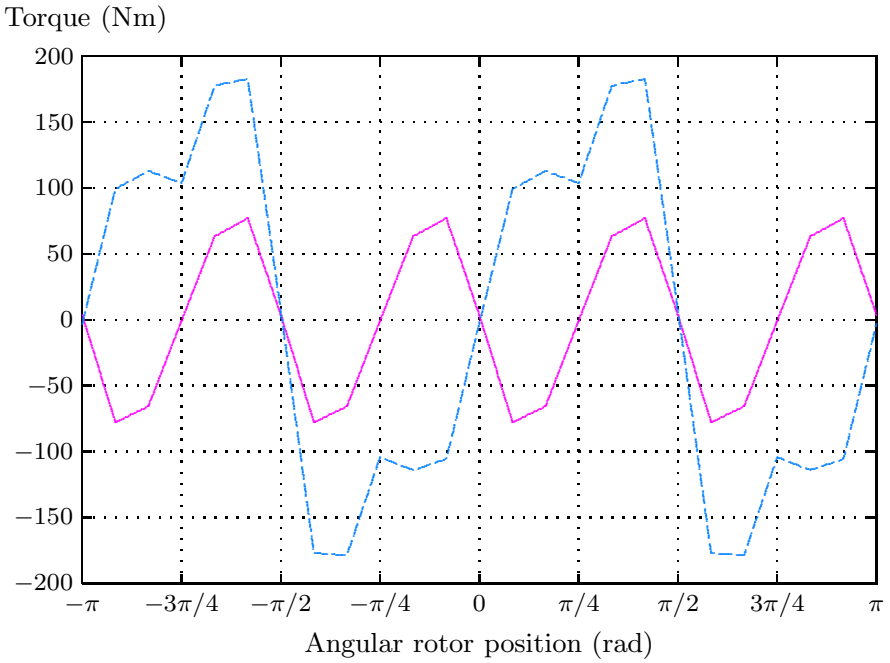
Finite Elemente Modell von zwei Polteilungen eines Stranges der zweisträngigen Transversalfluss-maschine

- Rotor-Permanentmagnete
- Rotor-Blechpakete
- Stator-Pulvermagnetjoche
- Stator-Ringwicklung
- Statorpressteile
- Rotorträgerteile

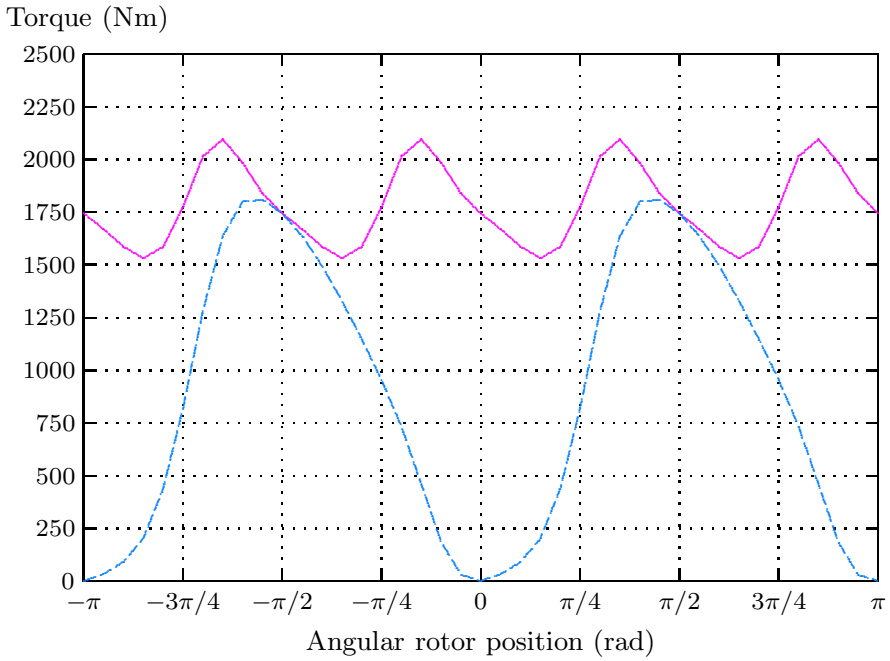
MODELLDATEN

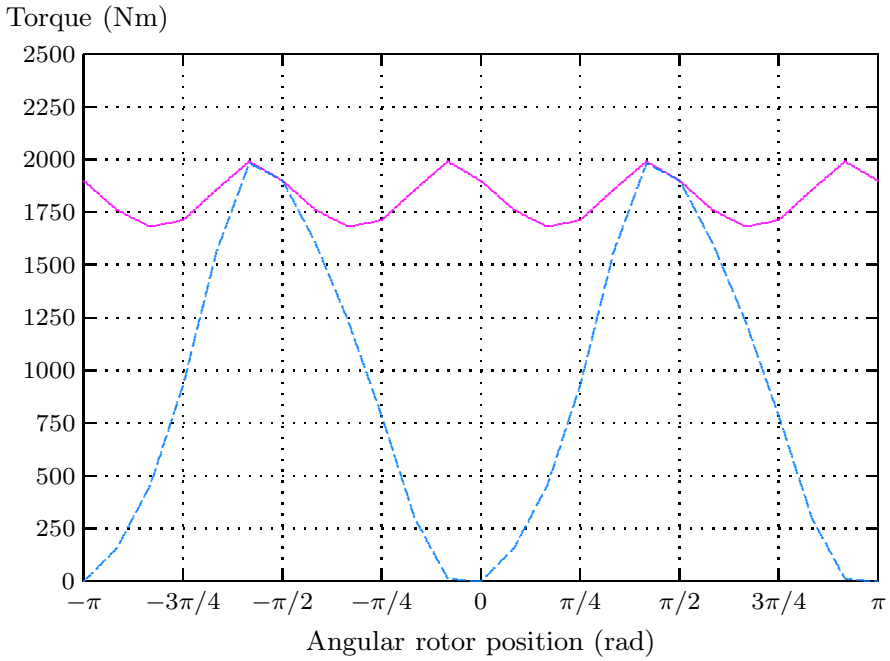
Anzahl Elemente	78566
Anzahl Knoten	79506
Anzahl Gleichungen	211334
Residuum-Potentiale	15456



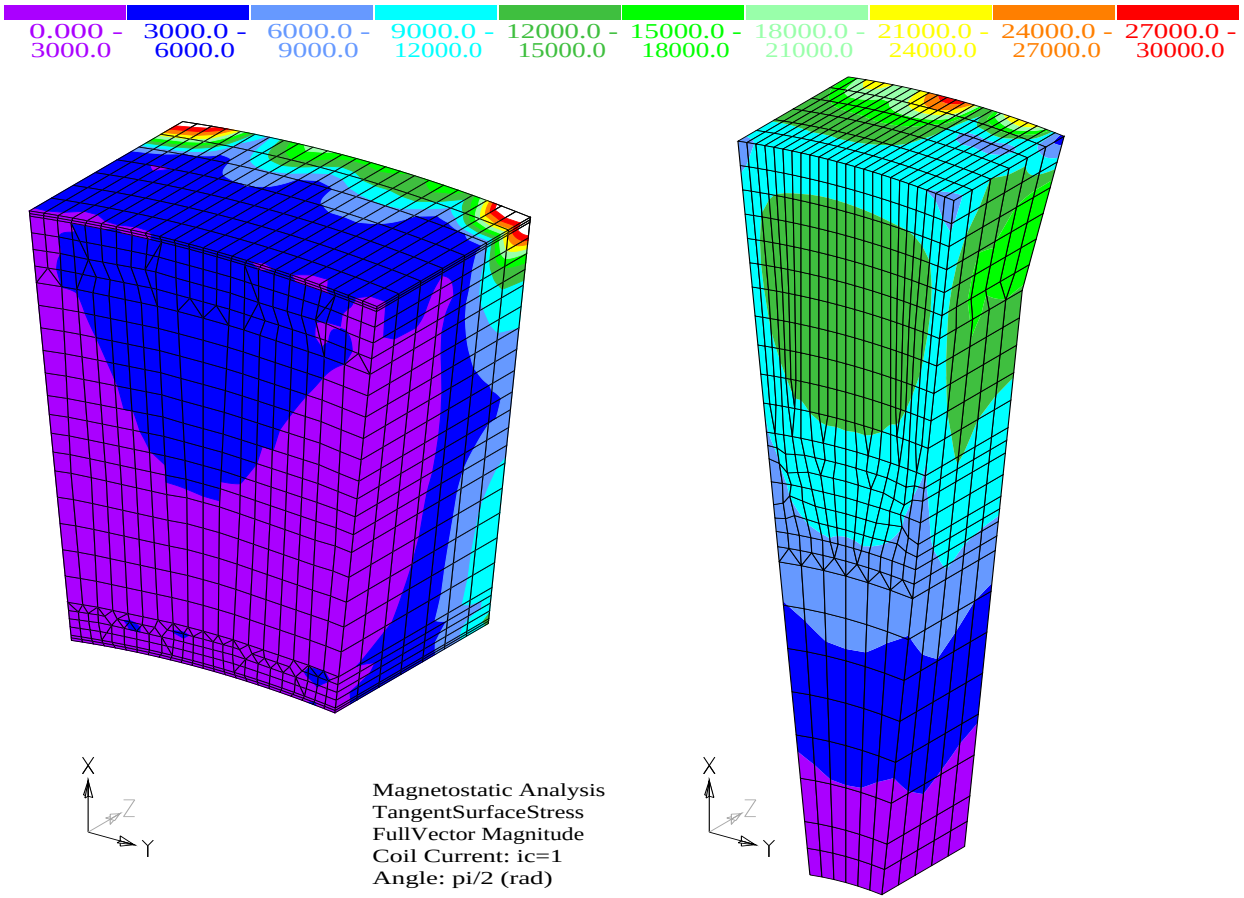


Reluktanzmoment $T_z(\varphi)$ eines Stranges und beider Stränge,
symmetrische Rotornuten und geblechte Joche (links),
asymmetrische Rotornuten und Pulvermagnetjoche (rechts)





Lastdrehmoment $T_z(\varphi)$ eines Stranges und beider Stränge,
Erregung mit $\hat{\Theta}_C = 7.2\,\mathrm{kA}$, $\gamma_i = -\pi/2$,
symmetrische Rotornuten und geblechte Joche (links),
asymmetrische Rotornuten und Pulvermagnetjoche (rechts)



Elektromagnetische Scherspannungen [N/m^2] in den Rotorträgerteilen,
Erregung mit $\hat{\Theta}_C = 7.2\,\mathrm{kA}$, $\gamma_i = -\pi/2$, Rotorwinkellage $\varphi = \pi/2$

Zusammenfassung

- **Für den routinemäßigen Einsatz der Finite Elemente Methode bei Entwurf und Optimierung von elektrischen Maschinen sind effiziente Methoden für Modellierung und Analyse notwendig.**
- **In diesem Zusammenhang sind die wichtigsten Methoden der Modellierung von Stator-Rotor-Positionen samt deren Vor- und Nachteilen vorgestellt worden.**
- **Die ausgewählten Beispiele zeigen exemplarisch den Einsatz von elektromagnetischen Finite Elemente Analysen für Entwurf, Optimierung und Weiterentwicklung der elektrischen Maschinen.**
- **Besonders eine Anwendung gekoppelter numerischer Analysen eröffnet neue Möglichkeiten, innovative elektrische Antriebe und deren Komponenten dimensionieren und optimieren zu können.**