bertrandt

Zukunft der Synchronmaschine

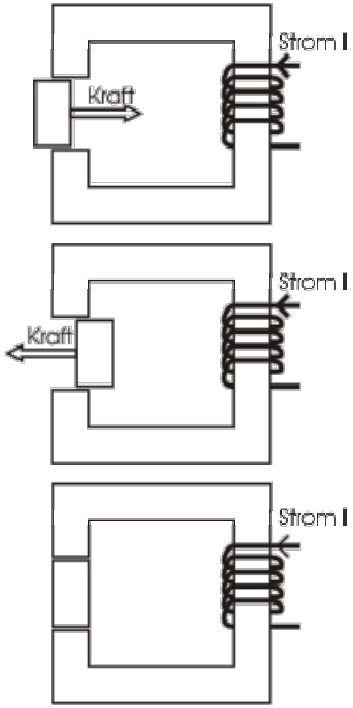
Regensburg, 19.11.2019, Florian Porkert, Tobias Lautenschlager

bertrandt

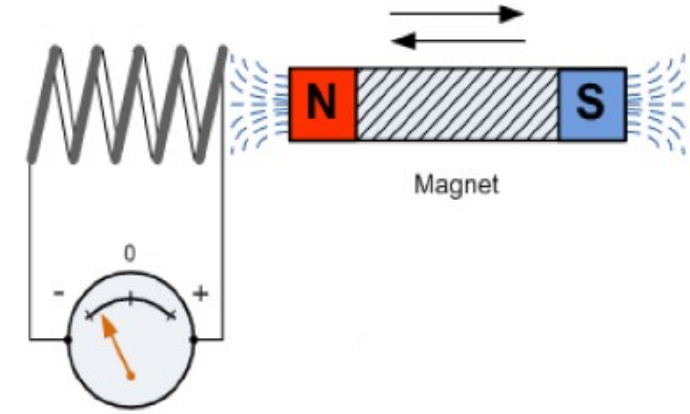
Inhalt

1. Prinzipien
2. Übersicht
3. Seltene Erden
4. Maschinenbau
5. Mehrphasige Antriebe
6. Regelungstechnik
7. Zusammenfassung

Prinzipien der Erregung - Synchronmaschinen



Wikipedia



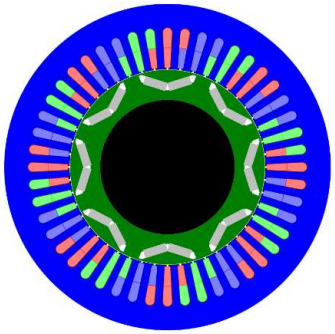
electrical4u.com

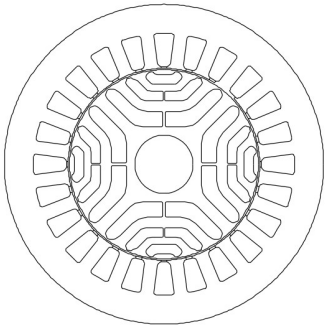
topmotors.ch

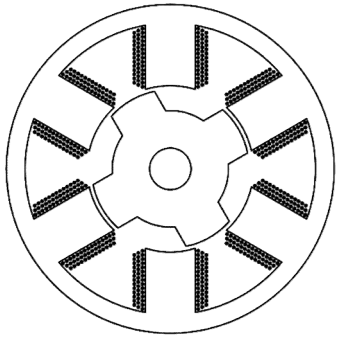
Lorenzkraft

Faradaysches Induktionsgesetz

Übersicht - Synchronmaschinen







Permanentmagneterregte Synchronmaschine

Vorteile:

- **Effizient und kompakt** (hoher Wirkungsgrad)
- **Hoher Leistungsfaktor** (keine Joule-Verlusten im Rotor, kein Erregerfluss der Permanentmagnete)
- **Höhere Effizienz bei niedrigen Drehzahlen**

Nachteile:

- **Investitionskosten** (Permanentmagnete)
- **Benötigt seltene Erden** (Neodym, Dysprosium)
- **Schwierige Montage, Demontage, Wartung**

Reluktanzmaschine

Vorteile:

- **Kostengünstig** (Robustheit, Zuverlässigkeit)
- **breite Drehzahlbereiche und hohe Drehzahlen**
- **Höhere Effizienz bei kleinen Drehzahlen**
- **Keine Magnete** (Effizienz/Leistungsdichte besser als Asynchronmotoren gleicher Leistung)
- **Möglichkeit der Feldschwächung**

Nachteile:

- **Drehmomentwelligkeit / Geräuschentwicklung** (Geometrie der Flusssperren im Rotorblech)
- **Niedrigerer Leistungsfaktor**

Geschaltete Reluktanzmaschine

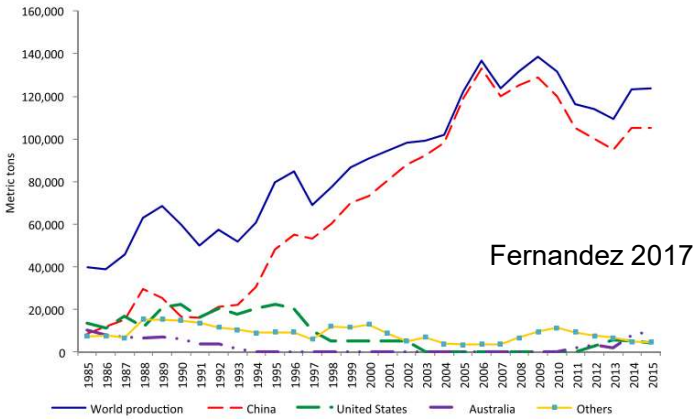
Vorteile:

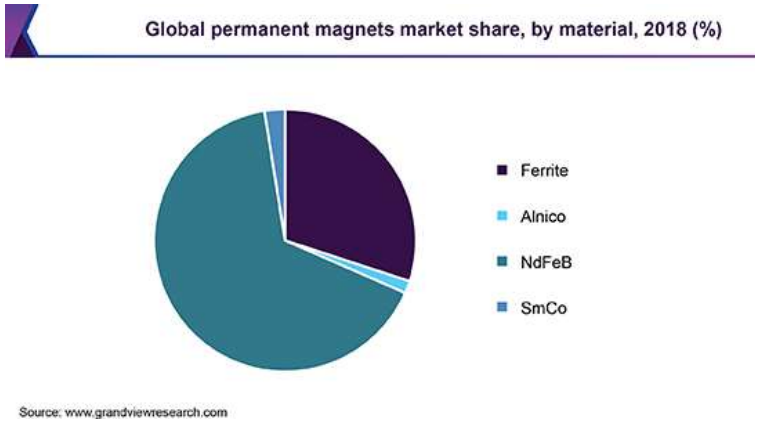
- **Kostengünstig** (einfache Bauweise)
- **Effizienz** (keine Joule-Verluste im Rotor)
- **Hervorragend für Anwendungen mit hohen Drehzahlen** (z.B. Kompressoren, Werkzeugmaschinen)

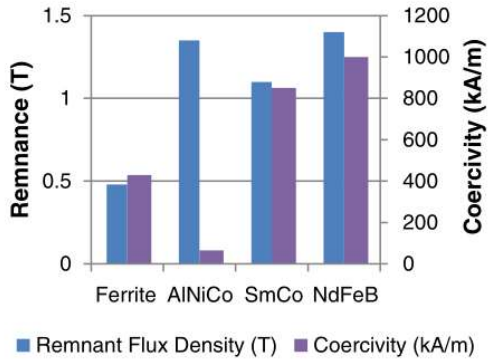
Nachteile:

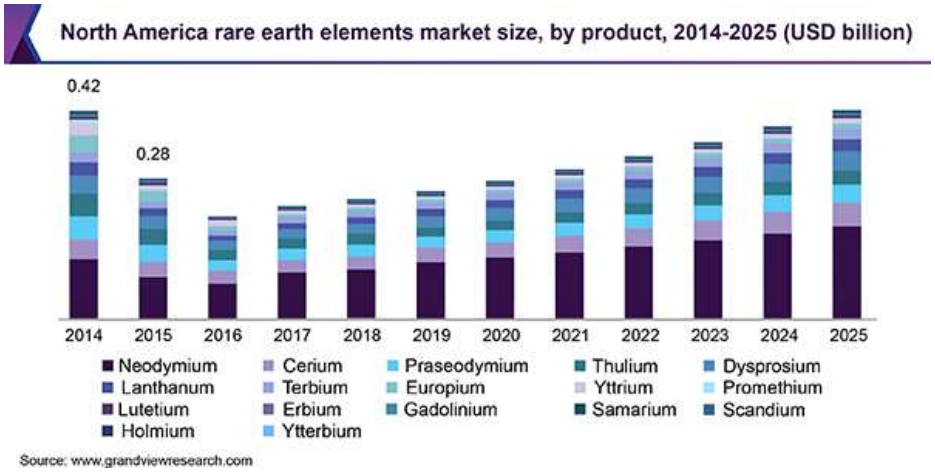
- **Komplexere elektronische Steuerung**
- **Drehmomentwelligkeit / Geräuschpegel**
- **Höhere Ströme / niedriger Leistungsfaktor**

Seltene Erden - Marktübersicht

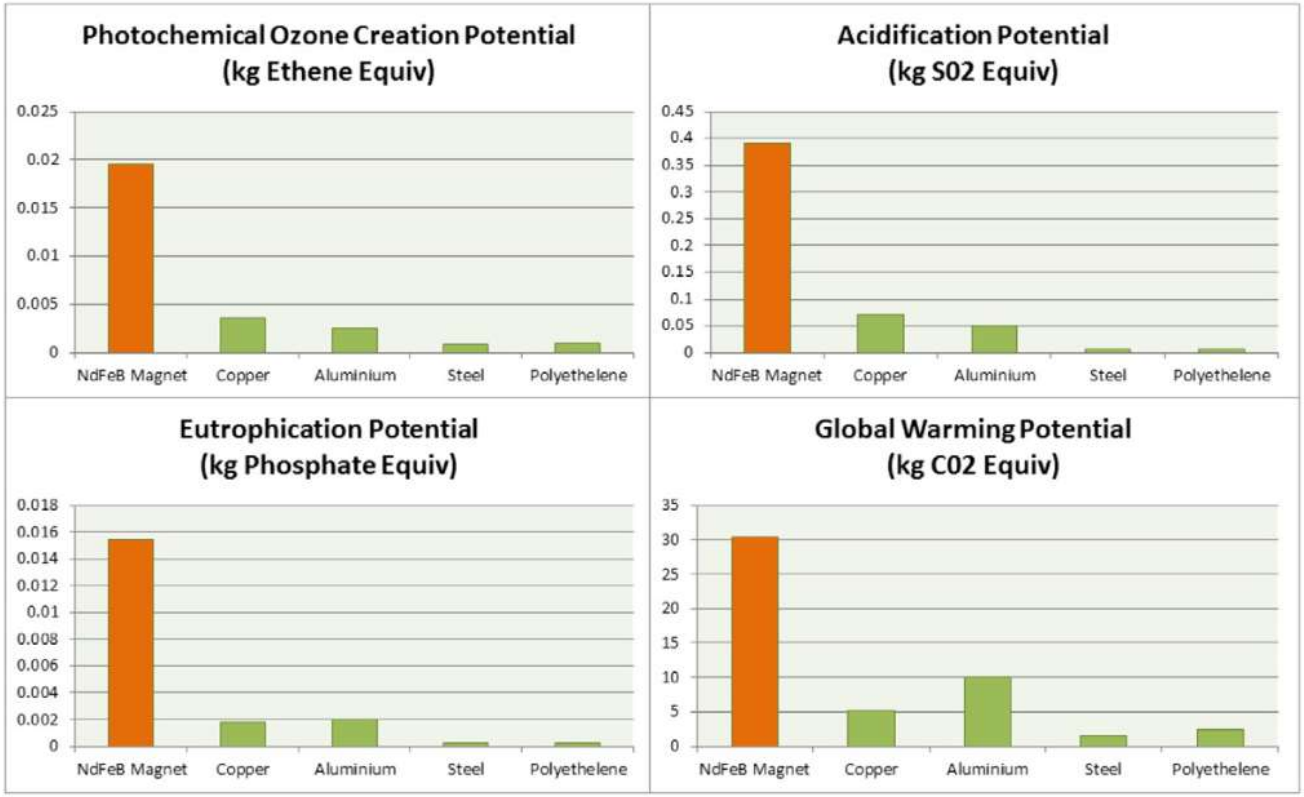








Seltene Erden - Marktübersicht



Widmer, Martin, Kimiabeigi 2015

bertrandt

Maschinenbau

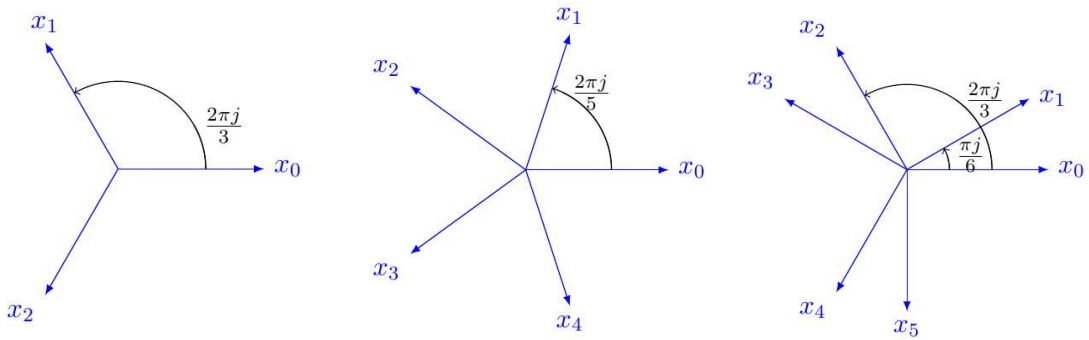
	Reduzierte NdFeB-Magnete	Ferrit Permanentmagnete	Kupfer Rotor, Induktion	Geschaltene Reluktanz
Spitzenleistung [kW]	80	80	50	75
Effizienz [%]	98	96	96	97
Materialkosten [$]	223	154	144	118
Drehmomentdichte [Nm/kg]	15	11	10	15

Kostensenkung und Verzicht auf seltene Erden führt zu Herausforderungen bei

- Leistungsfaktor
- Effizienz
- Drehmomentdichte
- Drehmomentwelligkeit
- Geräuschpegel

Mehrphasige Motoren

- Fehlertoleranz
- Phasenstrom
- Konzentrierte Wicklung
  - Drehmomenterhöhung
- Räumliche Oberwellen
  - Geräusche
  - Effizienz
- Drehmomentwelligkeit
- Kosten



Property	Three-phase machine	Multiphase (n-phase) machine
Torque ripple frequency (f = fundamental frequency)	$6f$	$2nf$ ($> 6f$)
Order of the lowest spatial mmf harmonics (sinusoidal mmf machines)	5 and 7	$2n \pm 1$ ($> 5,7$)
Power/torque per phase (rated power/torque = P/T_e)	$P/3$ ($T_e/3$)	P/n (T_e/n)
Continued operation after an open-phase fault	No[1]	Yes[2]
Torque enhancement by stator current harmonic injection	Not possible	Yes (concentrated winding machines)

Levi 2008

Regelungstechnik – Stand der Technik

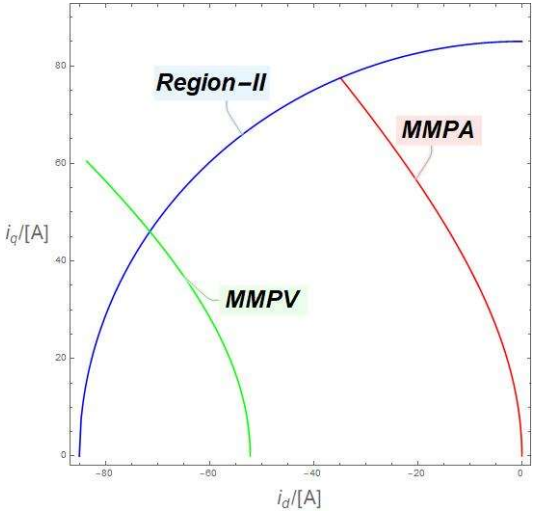
Quasistationäre DGL → Optimierung → Betriebspunkte → Regelung (PI)

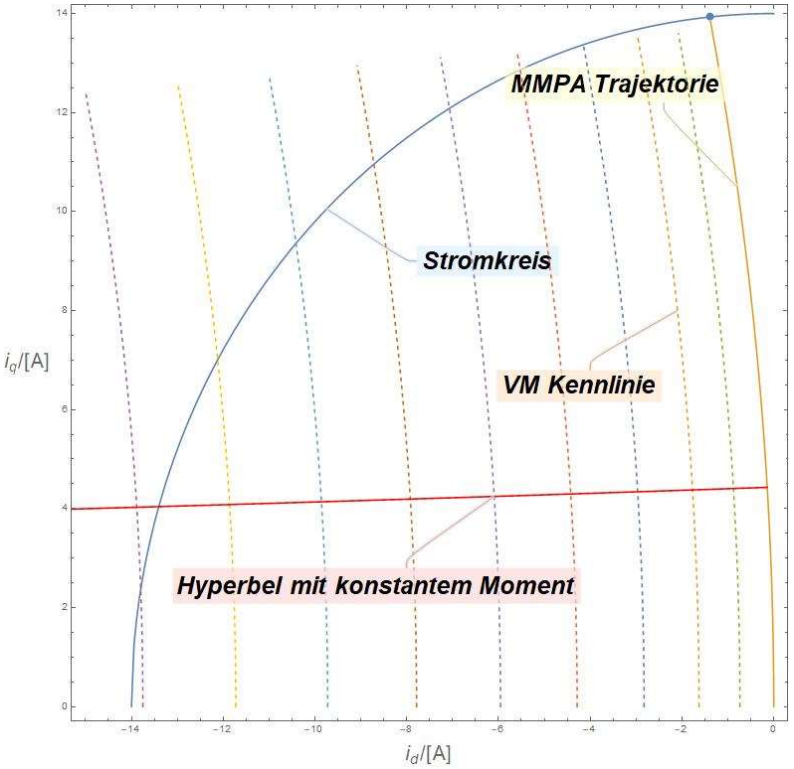
Vorteile:

- Einfach implementierbar
- Lehrbuchwissen
- Geringer numerischer Aufwand
- Bewährt

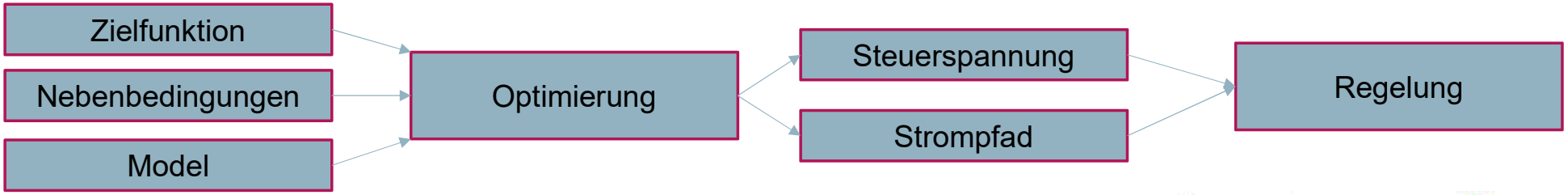
Nachteile:

- Keine Dynamik
- Verlust zu Nebenbedingungen





Regelungstechnik – Model Predictive Control

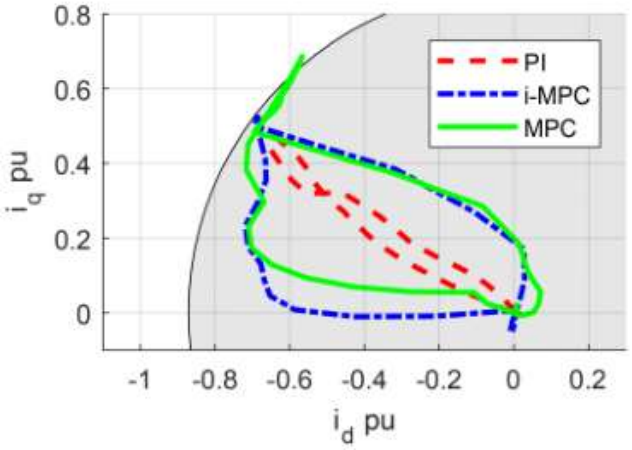


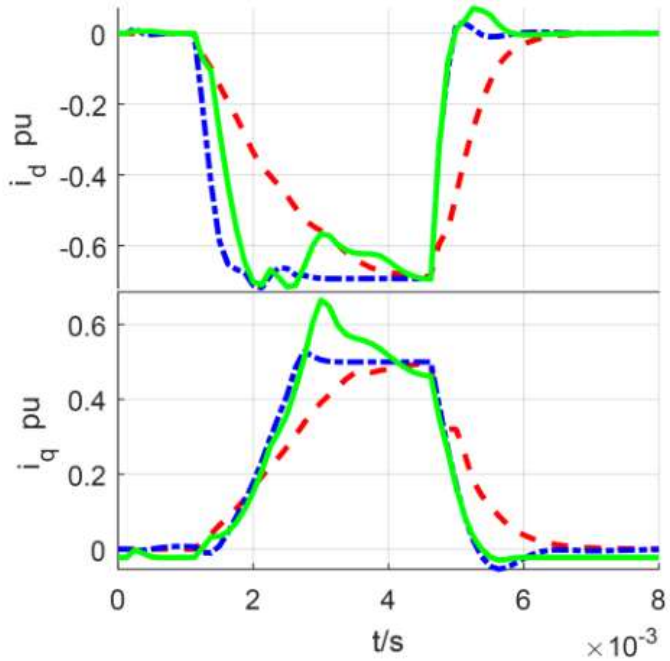
Vorteile:

- Beliebige Zielfunktionen
- Austausch der Nebenbedingungen
- Einhaltung der Nebenbedingungen im Dynamischen Betrieb

Nachteile:

- Rechenintensiv

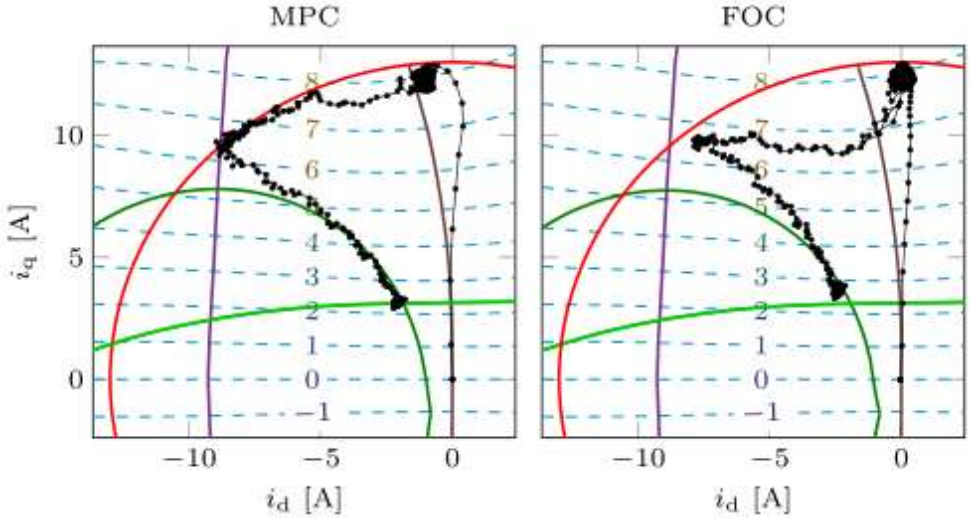


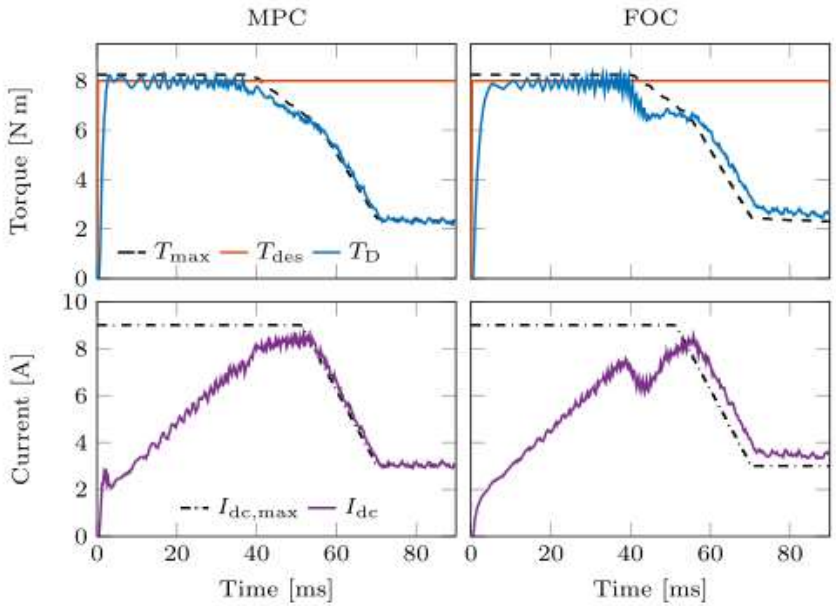


Schnurr, Hohmann, Kolb 2018 (KIT, Schäffler)

Regelungstechnik – Model Predictive Control

Vergleich von Model Predictive Control (MPC) mit feldorientierten Regelung (FOC) an den Grenzen der Nebenbedingungen.





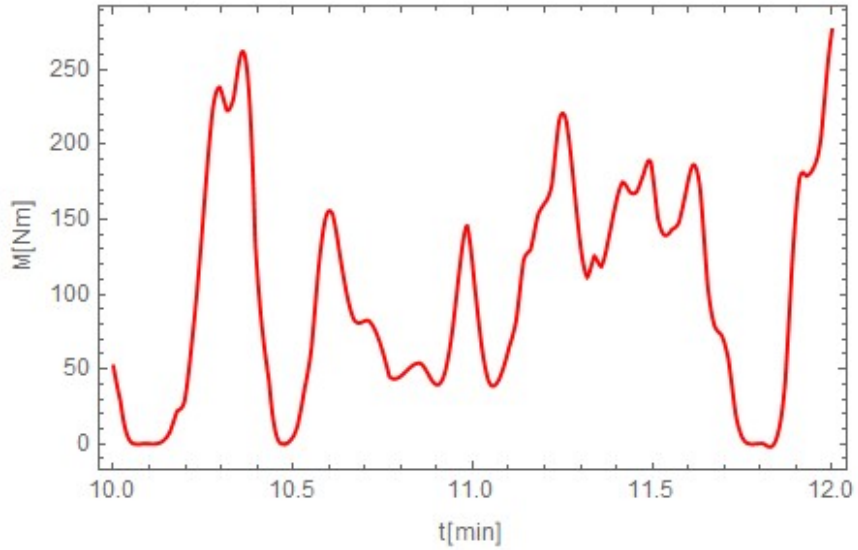
Property	MPC	FOC	MPC (nom.)	FOC (nom.)
Energy loss E_l	1793 J	2025 J	1577 J	1757 J
Mean torque dev. to (49)	0.20 N m	0.31 N m	0.28 N m	0.46 N m
Max. violation of (14)	0.61 A	2.25 A	1.36 A	2.12 A
Max. violation of 16	0.41 A	0.90 A	0.63 A	1.61 A

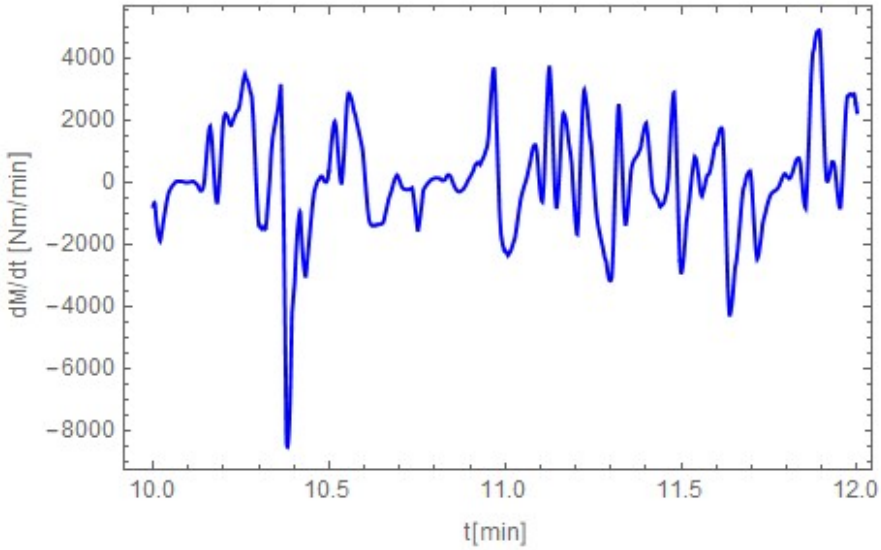
Englert, Graichen, 2018 (Ulm, Bosch)

→ Reduzierung der ohmschen Verluste um 14%

Regelungstechnik

Drehmoment und Drehmomentänderung im Verlauf eines Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure (WLTP) Zyklus





→ Steigerung der Effizienz

→ Senkung der Drehmomentwelligkeit

→ Verbesserung der Geräuschentwicklung

bertrandt

Regelungstechnik – Optimal Control

Vorteile gegenüber Model Predictive Control

- Konsistenter Einbau thermodynamischer Effekte
- Digitaler Zwilling
  - Numerische stabile HiL-Modelle
  - Exzellentes Langzeitverhalten
- Schneller und stabiler als Model Predictive Control

bertrandt

Zusammenfassung

- **Ziele für die Entwicklung elektrischer Maschinen:**
  - Kostensenkung
  - Verzicht auf seltene Erden

- **Herausforderungen dabei sind:**
  - Leistungsfaktor
  - Effizienz
  - Drehmomentdichte
  - Drehmomentwelligkeit
  - Geräuschpegel

- **Mehrphasige Antriebe verbessern:**
  - Leistungsfaktor
  - Drehmomentdichte
  - Effizient unklar
  - Drehmomentwelligkeit
  - Geräuschpegel

- **Regelungstechnik löst:**
  - Effizienz
  - Drehmomentwelligkeit
  - Geräuschpegel

bertrandt

Vielen Dank!

bertrandt

Referenzen

- Electric vehicle traction motors without rare earth magnets
  James D. Widmer, Richard Martin, Mohammed Kimiabeigi

- Nonlinear model predictive torque control of PMSMs for high performance applications
  Tobias Englert, Knut Graichen

- Non-linear MPC for winding loss optimized torque control of anisotropic PMSM
  Christoph Schnurr, Sören Hohmann, Johannes Kolb

- High Performance Electrical Motors for Automotive Applications – Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets
  Marco Villani