

Control of renewable energy systems

Christoph Hackl

Technische Universität München (TUM)
Munich School of Engineering (MSE)
Research group “Control of Renewable Energy Systems (CRES)”

www.cres.mse.tum.de

07.12.2015

EAL Projektbesprechung

TU München, München

Gliederung

- 1 Wer sind wir?
- 2 Was machen wir?
- 3 Was haben wir bisher erreicht?
- 4 Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Gliederung

- 1** Wer sind wir?
 - Team
 - Forschungskonzept
 - Interdisziplinärer Ansatz

Gliederung

- 1 Wer sind wir?
 - Team
 - Forschungskonzept
 - Interdisziplinärer Ansatz

Wer sind wir?

Team "Control of renewable energy systems"



H. Eldeeb, M.Sc.
(CRES/EAL,09/2015)



C. Dirscherl, M.Sc.
(CRES,01/2014)



C. Hackl, Dr.-Ing.
(CRES,01/2014)



J. Kullick, M.Sc.
(CRES,10/2015)



K. Schechner, M.Sc.
(CRES,01/2014)



Z. Zhang, M.Sc.
(CRES/EAL,07/2015))

... darüberhinaus Leitung der Forschergruppe "Renewable energy systems" am EAL (Prof. Kennel)



F. Bauer, M.Sc.
(EAL)



M. Abdelrahem,
M.Sc. (EAL)

... und fünf weitere Doktoranden
(mit anderen Forschungsschwerpunkten)

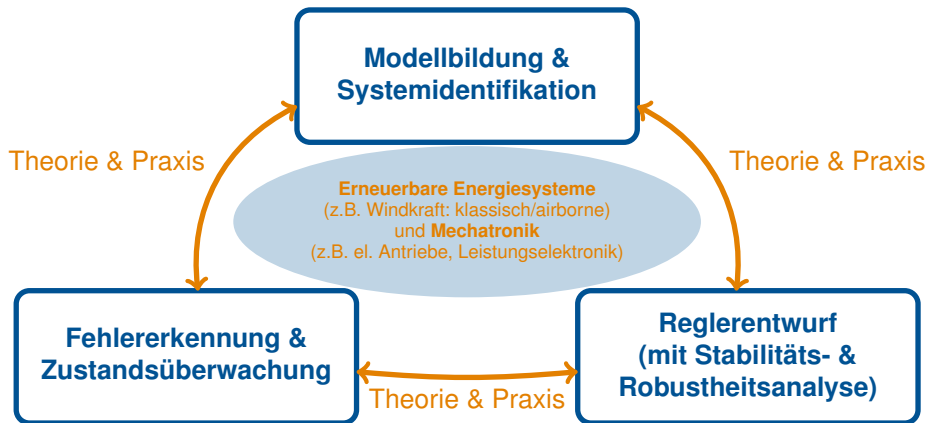
Gliederung

1 Wer sind wir?

- Team
- **Forschungskonzept**
- Interdisziplinärer Ansatz

Wer sind wir?

Forschungskonzept

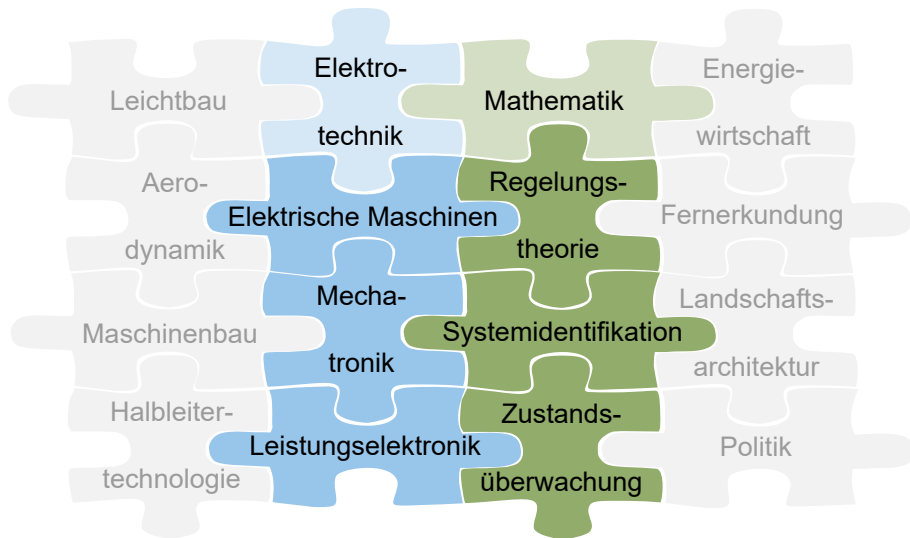


Gliederung

- 1** Wer sind wir?
 - Team
 - Forschungskonzept
 - Interdisziplinärer Ansatz

Wer sind wir?

Interdisziplinärer Ansatz



Gliederung

2 Was machen wir?

- Forschung
 - Forschungsschwerpunkt
 - Forschungsblickwinkel
 - Motivation
- Lehre

Gliederung

2 Was machen wir?

■ Forschung

- Forschungsschwerpunkt
- Forschungsblickwinkel
- Motivation

■ Lehre

Gliederung

2 Was machen wir?

- Forschung
 - Forschungsschwerpunkt
 - Forschungsblickwinkel
 - Motivation
- Lehre

Was machen wir?

Forschungsschwerpunkt: Modellierung und Regelung von **Windkraftanlagen (WKA)**

Klassische Windkraftanlagen



⇒ Ziel: Erhöhen der Zuverlässigkeit

Flugwindkraftanlagen



⇒ Ziel: Fehlertolerante Regelung

Kleinwindkraftanlagen (≤ 50 kW)



⇒ Ziel: Einsatz von Reluktanz-Synchrongeneratoren

Gliederung

2 Was machen wir?

■ Forschung

- Forschungsschwerpunkt

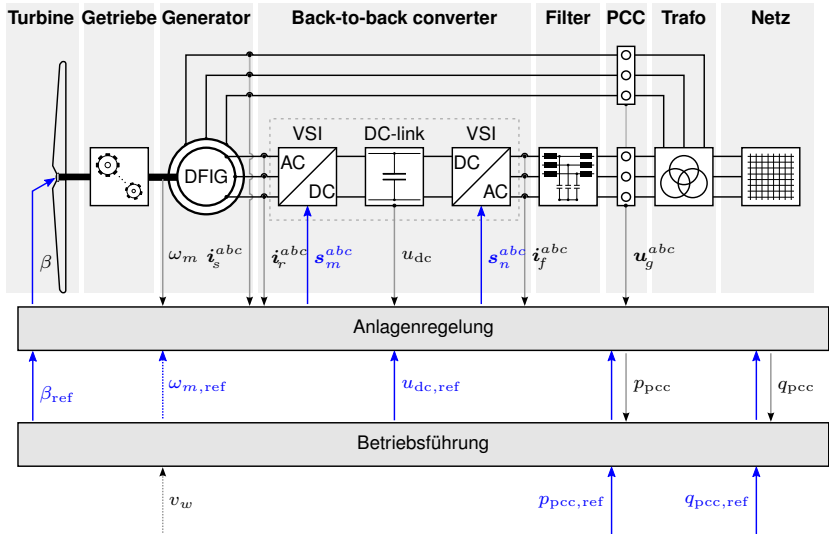
- Forschungsblickwinkel

- Motivation

- Lehre

Wer sind wir?

Forschungsblickwinkel: **Elektrische** Komponenten von Windkraftanlagen



Gliederung

2 Was machen wir?

■ Forschung

- Forschungsschwerpunkt

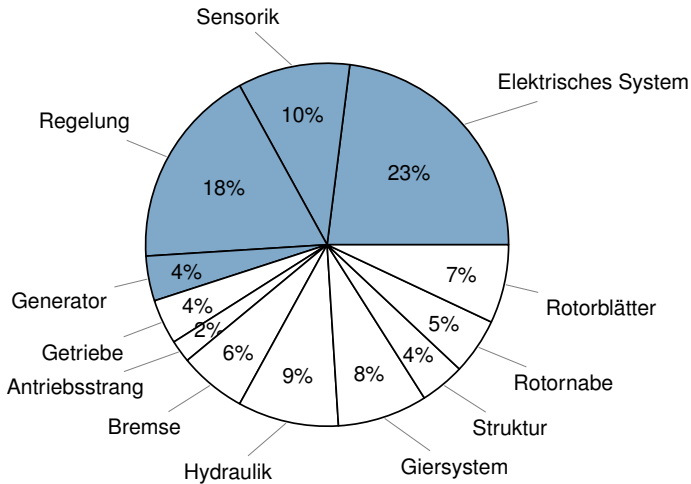
- Forschungsblickwinkel

- Motivation

- Lehre

Was machen wir?

Motivation: WKA-Ausfälle aufgrund von Teilsystemfehlern



(basiert auf Abb. 2 in [1])

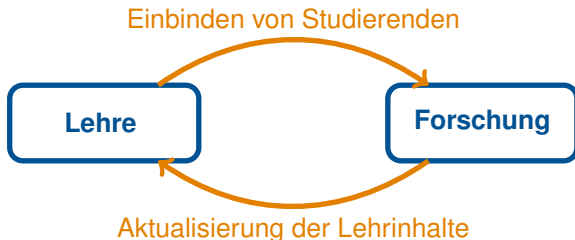
Gliederung

2 Was machen wir?

- Forschung
 - Forschungsschwerpunkt
 - Forschungsblickwinkel
 - Motivation
- Lehre

Was machen wir?

Lehre



- Lehrveranstaltungen
 - Regelung von regenerativen Energiesystemen (WS, 3SWS)
 - Non-identifier based adaptive control in mechatronics (SS, 4SWS)
- Betreuung von studentischen Arbeiten (auch internationale Studenten)
 - Hauptseminare (HS)
 - Projektpraktika (PP), Ingenieurspraxis (IP) und Forschungspraxis (FP)
 - Bachelorarbeiten (BA)
 - Masterarbeiten (MA)

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

■ Unterrichtete und betreute Studierende

- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

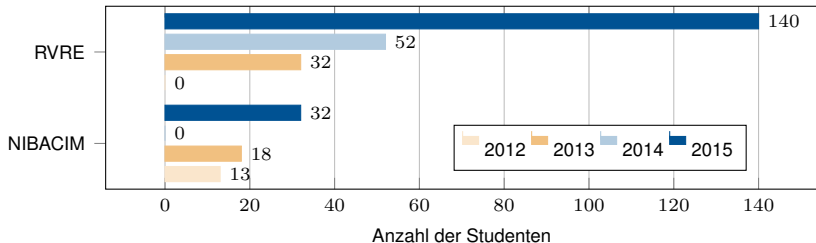
- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Lehre (01.01.2014-20.10.2015): Unterrichtete und betreute Studierende



■ Vorlesungen/Übungen

- “**R**egelung von regenerativen **E**nergiesystemen” (WS, 3SWS)
- “**N**on-identifier **b**ased **a**ddaptive **c**ontrol in **m**echatronics” (SS, 4SWS)

■ “Projektstudium Antriebstechnik (EOF Lehrpreis 2013, WS1415): **13**

■ Betreute studentische Arbeiten: **36**

(3(+5) MA, 1 BA, 7 HS, 5(+2) FP, 13 PP)

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

MSE Winter School “Holistic Modelling and Control of Energy Systems” (02.-06.02.2015)



- *Future of the power system: how can we keep it simple?* (T. Hamacher, TUM)
- *Renewable Energy Systems* (C. Hackl, TUM)
- *Dynamics & Operation of Smart Grids* (F. Dörfler, ETH Zürich)
- *Market-based Power Regulation* (A. Jokić, University of Zagreb)

⇒ 45 internationale Teilnehmer (Doktoranden, Post-Docs und Juniorprofessoren)

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Laufende Drittmittelprojekte (01.01.2014-20.10.2015)

Computationally-efficient
direct MPC for WTS
(172.000 EUR)



Robust and fault-tolerant low-level
control of the electrical drive system
(250.000 EUR)



Klein-Windkraftanlagen mit
Reluktanz-Synchrongenerator
(20.000 EUR)



Bund der Freunde der
Technischen Universität München e.V.

- DFG-Projekt (PI mit Prof. Kennel)
“Computationally-efficient direct MPC of 3L-NPC back-to-back converters for WTS with PMSGs”
- EU H2020 ITN-Projekt (PI mit Prof. Kennel)
“Airborne Wind Energy System Modelling, Control and Optimisation (AWESCO)”
- Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
“Klein-Windkraftanlagen mit effizienter und kostengünstiger Generatortopologie für Micro-Grids – Eine Voruntersuchung”

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- **Laboraufbau**
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Laboraufbau (aktueller Stand)

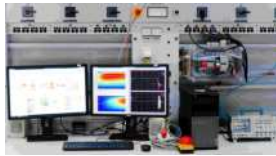
Reluktanz- und Permanentmagnet-Synchronmaschine



Realzeitsystem und Umrichter



Host PC und Sicherheitsbox



Doppelt-gepeiste ASM



Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau

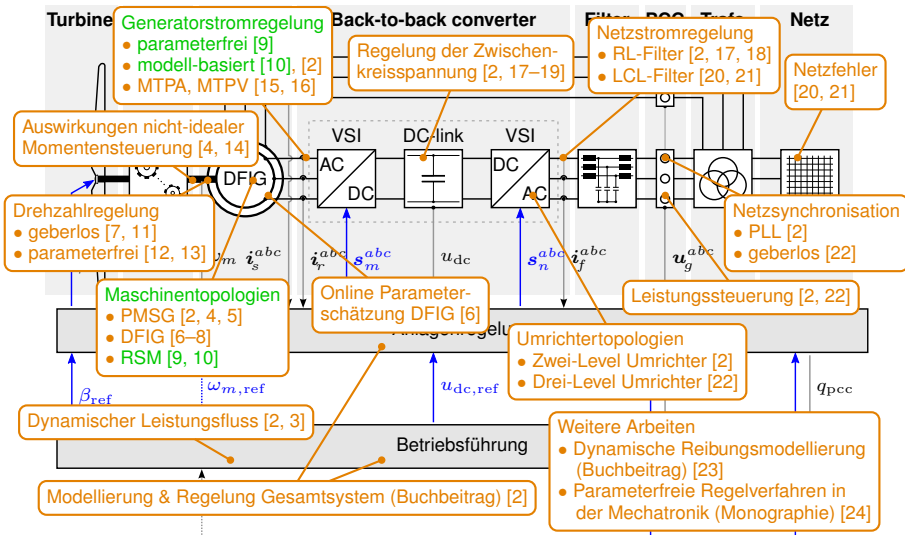
■ Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Was haben wir bisher erreicht?

Forschung (01.01.2014-20.10.2015): Publikationen



Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

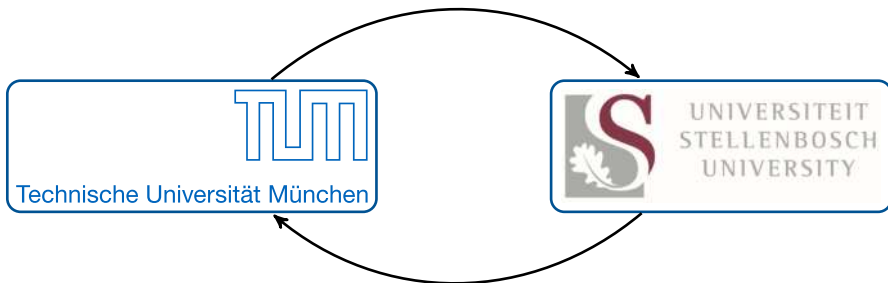
Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

Internationale Kooperation mit der University of Stellenbosch, Südafrika



Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

Projektpartner



CRES (Dr.-Ing. C. Hackl)

- Dynamische Modellierung
- Regelung
- Experimentelle Validierung (Laboraufbau)

EMLab (Prof. M. Kamper)

- Modellierung (FEM)
- Maschinendesign
- Maschinenfertigung

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

■ Lehre

- Unterrichtete und betreute Studierende
- 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”

■ Forschung

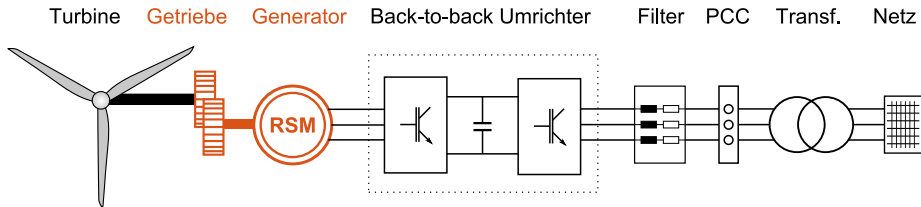
- Laufende Drittmittelprojekte
- Laboraufbau
- Publikationen

■ Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

- Vorarbeiten
- Reluktanz-Synchronmaschine
- Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
- Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
- Gesamtsimulation
- Projektfortschritt

Vorarbeiten

Modellierung, Regelung und Simulation von Klein-Windkraftanlagen mit RSM [15]



- Stromregelung (generatorseitig)
- Maximum Torque per Ampere (MTPA)
- Geschwindigkeitsregelung (Maximum Power Point Tracking (MPPT))
- Stromregelung (netzseitig)
- Spannungszwischenkreis-Regelung
- Blindleistungssteuerung

Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Reluktanz-Synchronmaschine

Ein Blick in die Maschine

http://www.youtube.com/watch?v=69mtuom774E&index=4&list=PLg4s1do3XuVlwclLnpyZgvfjd_o4wtA_D (cut version/duration: 0:26 min)

Reluktanz-Synchronmaschine

Eine brauchbare Alternative?



Traditional IE2 induction motor



IE4 SynRM motor



<http://www.abb.com>

Vorteile [25–27]:

- (sehr) günstig
- hohe Effizienz möglich (IE4)
- hohe Leistungsdichte und hohes Verhältnis Moment-zu-Volumen
- Geberlose Regelung möglich

Nachteile:

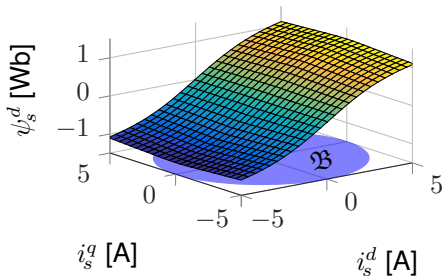
- niedriger Leistungsfaktor
- hochgradig nichtlinear
- Umrichter nötig
- (komplexe/nichtlineare Regelverfahren nötig)

Reluktanz-Synchronmaschine

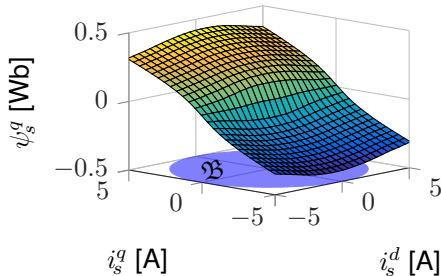
Modell mit nichtlinearer Flussverkettung (ohne Eisenverluste)

$$\mathbf{u}_s^k(t) = R_s \mathbf{i}_s^k(t) + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)) + \underbrace{\omega_k(t) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{=: \mathbf{J}} \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t)),$$

$$m_m(t) = \frac{3}{2} p \boldsymbol{\psi}_s^k(\mathbf{i}_s^k(t))^\top \mathbf{J} \mathbf{i}_s^k(t)$$



(a) d-flux linkage

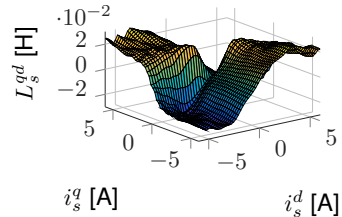
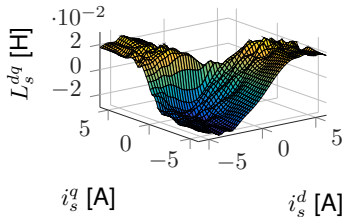
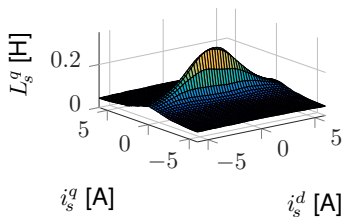
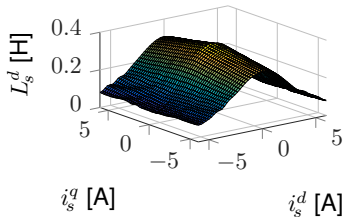


(b) q-flux linkage

⇒ **Nichtlineares dynamisches System!**

Reluktanz-Synchronmaschine

Nichtlineare Induktivitäten $L_s^d := \frac{\partial \psi_s^d}{\partial i_s^d}$, $L_s^q := \frac{\partial \psi_s^q}{\partial i_s^q}$, $L_s^{dq} := \frac{\partial \psi_s^d}{\partial i_s^q} = \frac{\partial \psi_s^q}{\partial i_s^d} =: L_s^{qd}$



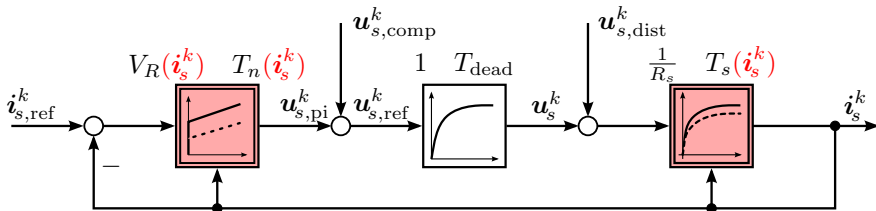
Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - **Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM**
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM

Regelkreis (mit Umrichterapproximation) und PI-Reglerentwurf



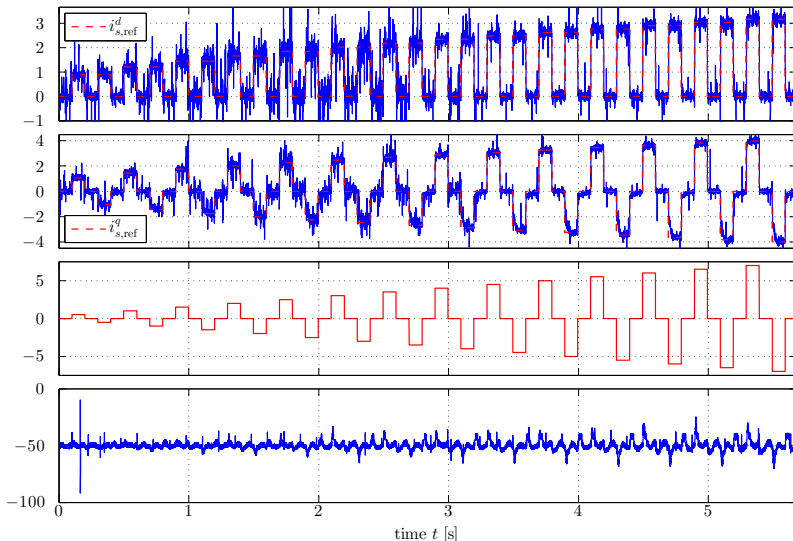
... bei **nichtlinearem** Verhalten [10, 15]

- $T_s = T_s(L_s^{dd}(i_s^k), L_s^{dq}(i_s^k), L_s^{qd}(i_s^k), L_s^{qq}(i_s^k))$
- $T_{\text{dead}} \propto f_{\text{pwm}}$
- $u_{s,\text{comp}}^k = u_{s,\text{dist}}^k$ (ideale Entkopplung)
- Reglerentwurf nach **Betragsoptimum** [28]:

$$\text{Verstärkung: } V_R(i_s^k) = \frac{T_s(i_s^k) R_s}{2T_{\text{dead}}} \quad [\Omega] \quad \wedge \quad \text{Zeitkonstante: } T_n(i_s^k) = T_s(i_s^k) \quad [\text{s}]$$

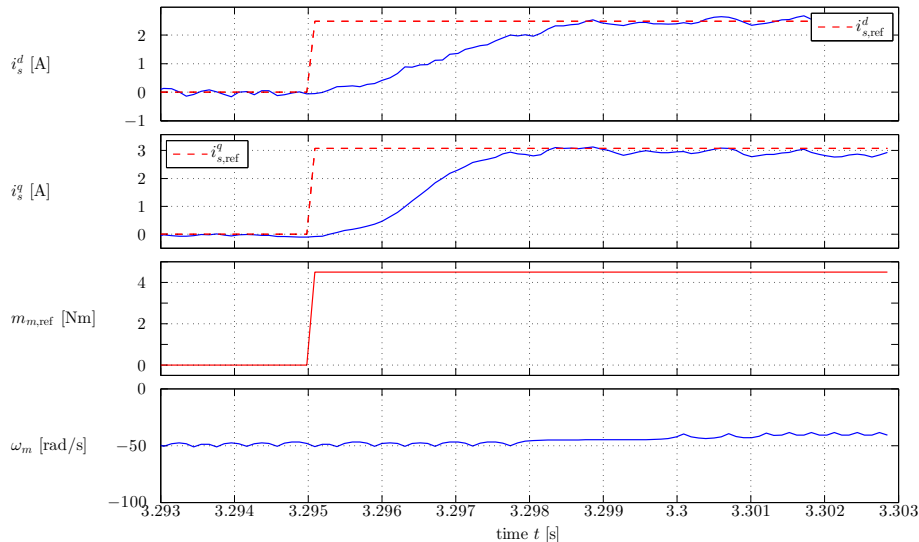
Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM

Messergebnisse für 1,1 kW RSM



Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM

Messergebnisse für 1,1 kW RSM (Zoom)



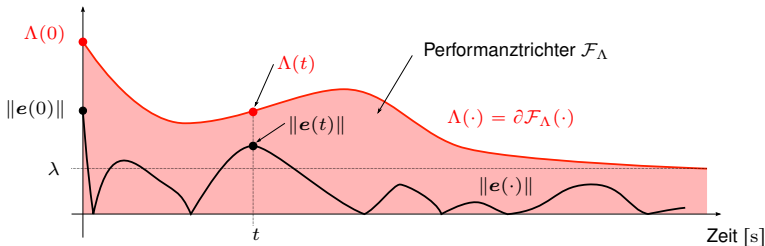
Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]

Funnel Control (dt. "Trichter-Regelung")



Regelgesetz:

$$u_{\text{fc}}(t) = k(t)e(t)$$

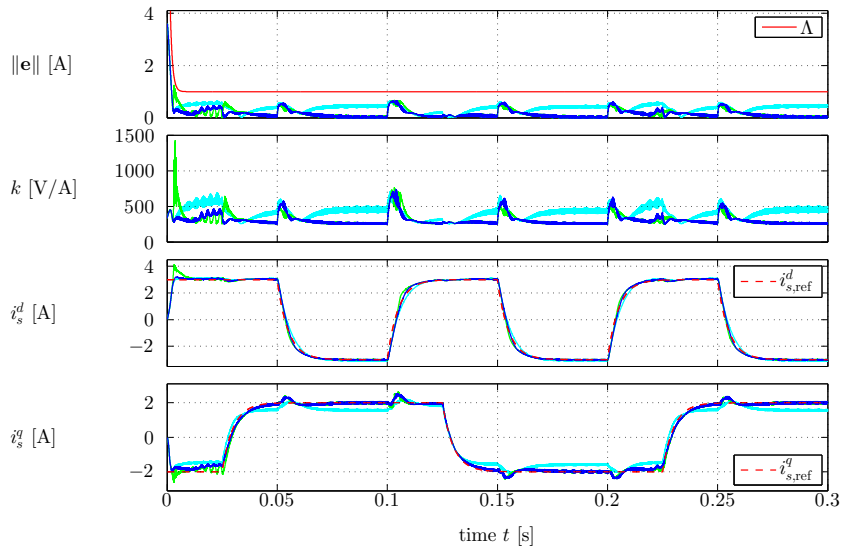
(FC_{*i*_s^{*k*})}

wobei

- $e(t) = (e_s^d(t), e_s^q(t))^T = i_{s,\text{ref}}^k(t) - i_s^k(t)$
- $k(t) = \frac{1}{\Lambda(t) - \|e(t)\|} \geq \frac{1}{\Lambda(t)}$ mit $\|e(t)\| = \sqrt{e_s^d(t)^2 + e_s^q(t)^2}$

Modell-freie PI-Stromregelung von RSM

Simulationsergebnisse (1.1 kW RSM): — FC, — FC+PI and — FC+PI^{aw}



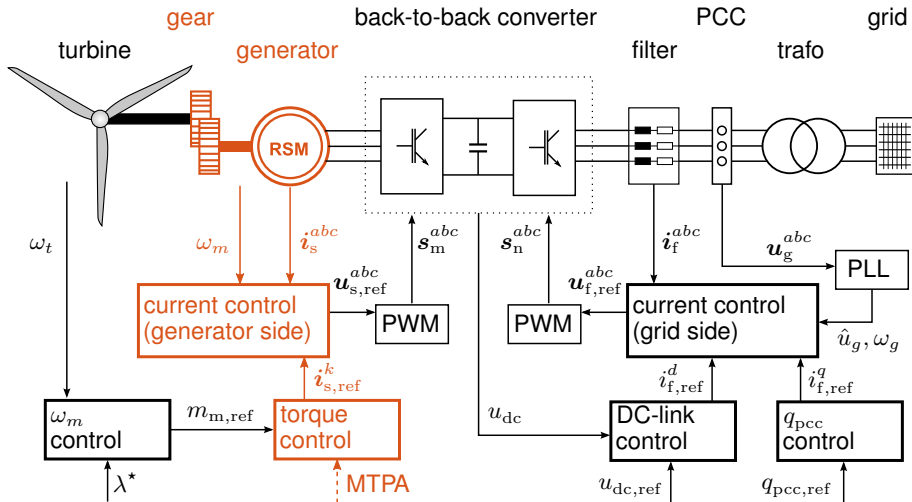
Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

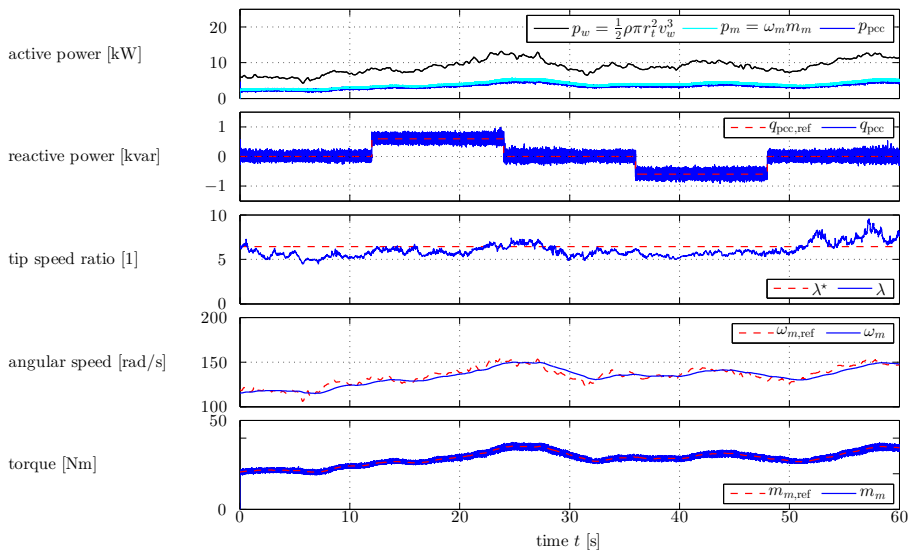
Gesamtsimulation

Klein-Windkraftanlagen mit Reluktanz-Synchronmaschine (Betriebsbereich II)



Gesamtsimulation

Klein-Windkraftanlagen mit Reluktanz-Synchronmaschine (Betriebsbereich II)



Gliederung

3 Was haben wir bisher erreicht?

- Lehre
 - Unterrichtete und betreute Studierende
 - 1. MSE Winter School on “Holistic Modelling and Control of Energy Systems”
- Forschung
 - Laufende Drittmittelprojekte
 - Laboraufbau
 - Publikationen
- Beispiel: Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt
 - Vorarbeiten
 - Reluktanz-Synchronmaschine
 - Modell-basierte PI-Stromregelung von RSM
 - Modell-freie PI-Stromregelung von RSM [9]
 - Gesamtsimulation
 - Projektfortschritt

Bund der Freunde der TUM e.V. Projekt

Projektfortschritt



- Modellierung [2, 15] ✓
- Austausch ✓
CRES → EMLab
- Regelung [9, 10, 15] ✓
- Simulation [2, 15] ✓
- Laboraufbau
 - Spezifikation ✓
 - Aufbau (✓)
 - Messungen [10] (✓)
 - Validierung (✓)
(Regelung, Effizienz, Optimierung)
- Maschinen-Redesign (FEM)
- Austausch
EMLab → CRES (✓)
- Iteration(en)
 - Modellierung
 - Regelung
 - Simulation
 - Validierung
- Forschungsantrag (✓)
- Prototype
- Langzeit-Test
(Stellenbosch / CleanTechCampus)

Gliederung

4 Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Zukünftige Herausforderungen für regenerative Energiesysteme (siehe auch [29])

- Erhöhen der Zuverlässigkeit / Effizienz
(v.a. Regelung und Leistungselektronik fehleranfällig)
 - Robustheit & Systemanalyse ^{CRES}
 - Zustandsüberwachung / Fehlererkennung ^{CRES}
- Robustifizierung/Flexibilisierung der Netzanbindung
 - Anlagenschutz (z.B. bei asymmetrischen Netzen) ^(CRES)
 - Netzanschlussbedingungen (z.B. LVRT) ^{CRES}
 - Dezentrale Einspeisung (z.B. Micro-Grids ohne Trägheit) ^(CRES)
 - Netzanbindung von Windkraftwerken / Windparks ^(CRES)
- Einbinden neuer Technologien
 - Neue Generatortopologien ^{CRES}
 - Neue Umrichtertopologien (Mehrlevel) ^{CRES}
 - Konfigurationen ohne/kleinere Transformatoren ^(CRES)

Was wollen wir in Zukunft erreichen?

Zukünftige Schritte bzw. geplante Projekte/Kooperationen

- Fertigstellung und Erweiterung des Laboraufbaus
- Einwerben weiterer Drittmittel
 - CleanTechCampus-Teilprojekt “Stromnetz”: *ca. 175.000 EUR*
(eingereichter Antrag, Koordination: Dr. Vandersickel)
 - Geothermie-Allianz-Bayern-Teilprojekt “Tauchkreislumpumpe”: *192.000 EUR*
(eingereichter Antrag, Koordination: Hr. Wieland)
 - WindForS Graduiertenkolleg-Teilprojekt “Effects of and compensation for non-ideal electro-mechanical interactions in modern wind turbine systems”: *2 Doktorandenstellen geplant* (eingereichte Projektskizze mit Prof. Bottasso)
 - DFG-Projekt “Reluktanz-Synchronmaschinen für Windkraftanlagen: Modellierung, Regelung und Effizienzanalyse”: *ca. 160.000 EUR*
(in Vorbereitung)
- Ausbau internationaler Kooperationen
- Anstreben von Industriekooperationen



(www.spiegel.de; bearbeitet)

Es gibt noch viel zu tun ... und wir haben große Lust darauf!

Weitere Informationen online unter:

www.cres.mse.tum.de

Literaturliste I

- [1] B. Hahn, M. Durstewitz, and K. Rohrig, "Reliability of wind turbines, experiences of 15 years with 1500 WT's," in *Wind Energy* (J. Peinke, P. Schaumann, and S. Barth, eds.), Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 329–332, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [2] C. M. Hackl, "Current PI-funnel control with anti-windup for synchronous machines," in *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control*, p. (to be published), 2015.
- [3] C. Dirscherl, C. Hackl, and K. Schechner, "Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung (*available at the authors upon request*)," in *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen* (D. Schröder, ed.), ch. 24, pp. 1540–1614, Springer-Verlag, 2015.
- [4] C. Dirscherl and C. M. Hackl, "Dynamic power flow in wind turbine systems with doubly-fed induction generator," *IEEE Transactions on energy conversion (in preparation)*, 2015.
- [5] C. M. Hackl and K. Schechner, "Non-ideal torque control of wind turbine systems: Impacts on annual energy production," in *Proceedings of the IEEE International Energy Conference (submitted)*, 2016.
- [6] Z. Zhang, C. Hackl, T. Sun, and R. Kennel, "Computationally efficient DMPC for three-level NPC back-to-back converters in wind turbine systems with PMSG," *submitted to IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015.
- [7] M. Abdelrahem, C. M. Hackl, and R. Kennel, "Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems," in *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 236–243, 2015.
- [8] M. Abdelrahem, C. M. Hackl, and R. Kennel, "Sensorless control of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems," in *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 423–430, 2015.

Literaturliste II

- [9] C. Dirscherl and C. M. Hackl, "Dynamic power flow in wind turbine systems with doubly-fed induction generator," in *submitted to 2016 IEEE International Energy Conference*, 2016.
- [10] C. M. Hackl, M. J. Kamper, J. Kullick, and J. Mitchell, "Nonlinear PI current control of reluctance synchronous machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics (submitted)*, 2015.
- [11] Z. Zhang, C. Hackl, F. Wang, Z. Chen, and R. Kennel, "Encoderless model predictive control of back-to-back converter direct-drive permanent-magnet synchronous generator wind turbine systems," in *Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1–10, 2013.
- [12] C. M. Hackl, "Funnel control for wind turbine systems," in *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 1377–1382, 2014.
- [13] C. M. Hackl, "Speed funnel control with disturbance observer for wind turbine systems with elastic shaft," in *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control*, p. (to be published), 2015.
- [14] C. M. Hackl and K. Schechner, "Non-ideal torque control in wind turbine systems: Causes and impacts," in *Proceedings of the 5th MSE-Kolloquium on "Innovations for Energy Systems, Mobility, Buildings and Materials"*, 2015.
- [15] J. Kullick, "Simulation and control of a small-scale wind turbine system with reluctance synchronous generator," Master's thesis, Technische Universität München, MSE Research Group "Control of renewable energy systems", 2015.
- [16] L. Horlbeck, M. Lienkamp, and C. Hackl, "Analytical solution for the MTPV hyperbola including the stator resistance," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (submitted)*, 2016.

Literaturliste III

- [17] C. Dirscherl, C. Hackl, and K. Schechner, "Explicit model predictive control with disturbance observer for grid-connected voltage source power converters," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 999–1006, 2015.
- [18] C. Dirscherl, C. M. Hackl, and K. Schechner, "Pole-placement based nonlinear state-feedback control of the DC-link voltage in grid-connected voltage source power converters: A preliminary study," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications*, p. (to be published), 2015.
- [19] F. Bauer, C. M. Hackl, and K. Schechner, "DC-link control for airborne wind energy systems during pumping mode," in *Proceedings of the Airborne Wind Energy Conference 2015*, 2015.
- [20] C. M. Hackl, "MPC with analytical solution and integral error feedback for LTI MIMO systems and its application to current control of grid-connected power converters with LCL-filter," in *Proceedings of the 3rd Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE 2015)*, p. (to be published), 2015.
- [21] C. Dirscherl, J. Fessler, C. M. Hackl, and H. Ipach, "State-feedback controller and observer design for grid-connected voltage source power converters with LCL-filter," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Control Applications*, p. (to be published), 2015.
- [22] Z. Zhang, H. Xu, M. Xue, Z. Chen, T. Sun, R. Kennel, and C. Hackl, "Predictive control with novel virtual flux estimation for back-to-back power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 2823–2834, 2015.
- [23] C. M. Hackl, "Dynamische Reibungsmodellierung: Das Lund-Grenoble (LuGre) Reibmodell (*available at the authors upon request*)," in *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen* (D. Schröder, ed.), ch. 25, pp. 1615–1657, Springer-Verlag, 2015.

Literaturliste IV

- [24] C. M. Hackl, *Non-identifier based adaptive control in mechatronics: Theory and Application*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, Berlin: Springer-Verlag, 2015 (accepted; final version in preparation).
- [25] M. J. Kamper, F. van der Merwe, and S. Williamson, "Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine," *IEEE Transactions on Power Conversion*, vol. 11, no. 3, pp. 547–555, 1996.
- [26] T. A. Lipo, "Synchronous reluctance machines – A viable alternative for AC drives?," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 659–671, 1991.
- [27] A. Vagati, "The synchronous reluctance solution: A new alternative in AC drives," in *Proceedings of the 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp. 1–13, 1994.
- [28] D. Schröder, *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen (3., bearb. Auflage)*. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [29] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, 2013.