

Wissenschaftliche Reihe  
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Nick Trümmel

# Verlässlichkeits- steigerung elektrischer Antriebe am Beispiel der elektromechani- schen Servolenkung



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo, featuring a stylized chess knight icon to the left of the text 'Springer Vieweg'.

---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **Reihe herausgegeben von**

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

**Reihe herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann  
Lehrstuhl Kraftfahrwesen  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss  
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

---

Nick Trümmel

# Verlässlichkeits- steigerung elektrischer Antriebe am Beispiel der elektromechani- schen Servolenkung

Nick Trümmel  
IVK, Fakultät 7, Lehrstuhl für  
Kraftfahrzeugmechatronik  
Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2018

D93

ISSN 2567-0042                      ISSN 2567-0352 (electronic)  
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-27805-2              ISBN 978-3-658-27806-9 (eBook)  
<http://doi.org/10.1007/978-3-658-27806-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist geprägt von einer systematischen Herangehensweise und bezieht eine Vielzahl interdisziplinärer Aspekte aus der Systemauslegung, der Mechanik, der Elektrik und Elektronik sowie der Sicherheit und Erprobung ein. Diese Vielseitigkeit in den bearbeiteten Themenfeldern ist maßgeblich durch die Tätigkeit und breite Unterstützung vieler Kollegen der Robert Bosch Automotive Steering GmbH (ehemals ZF-Lenksysteme) gefördert und gefordert wurden. Die vergangenen dreieinhalb Jahre wurden damit fachlich und persönlich zu einem der wohl intensivsten und lehrreichsten beruflichen Lebensabschnitte. Hierfür möchte ich allen direkt und indirekt unterstützenden Kollegen auf das herzlichste danken. Besonderer Dank gilt meinen Kollegen im Team der Mechatronikentwicklung sowie dem Motorlabor, die mit ihrer Unterstützung und vielen interessanten Fachgesprächen die Einsicht und das Verständnis für die Komplexitäten von EPS- Antrieben und Lenksystemen bereichert haben. Den Kollegen aus dem Fahrversuch danke ich für die Unterstützung bei den durchgeführten Versuchen und der Probandenstudie. Zu großem Dank für seine umfassende Unterstützung bin ich Thomas Pötzl, ehem. Senior Manager der Entwicklung Elektrik & Elektronik verpflichtet. Ohne sein Zutun hätte es weder die Doktorandenstelle noch die interessanten Hintergründe und Anregungen gegeben. Dafür: Vielen Dank! Ein herzliches Dankeschön auch an Professor Reuss und sein Institut für die Möglichkeit und Unterstützung der Promotion. Was im Beruflichen die Unterstützung durch die Vielzahl engagierter Kollegen war, ist im Privaten der Rückhalt und die Unterstützung meiner geliebten Familie. Ich danke meinen Eltern ganz herzlich, sowohl für ihre offensichtlich gelungene Erziehung, die jederzeit spürbare Unterstützung als auch das immer wieder geäußerte Vertrauen. Und was wäre meine Danksagung ohne ein paar herzliche Worte für meine geliebte Frau: Trang, du als meine „Motivatorin“ und ausgezeichnete (leibliche) Versorgerin hast einen riesigen Anteil am Gelingen dieser Arbeit. Ich danke dir von ganzem Herzen für deine Unterstützung, deine Geduld, deine „Opfer“ und den Rückhalt, den du mir in manch anstrengender Stunde gegeben hast.

Ihnen und Euch ein riesiges DANKESCHÖN!

Nick Trümmel

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Formelzeichen .....	XVII
Zusammenfassung.....	XIX
Abstract .....	XXI
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und seine Grenzen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Allgemeiner Aufbau und Funktion von EPS- Systemen.....	3
2.2 Der elektromechanische Aktuator.....	4
2.3 Neue Herausforderungen und Grenzen des Technikstandes.....	9
<b>3 Anforderungen an eine fehlertolerante EPS .....</b>	<b>13</b>
3.1 Normative Anforderungen .....	13
3.2 Technische Anforderungen.....	15
3.2.1 Unterstützungsgrad (Level of Assist, LeOA).....	17
3.2.2 Qualität der degradierten Unterstützung .....	25
3.2.3 Restbetriebsdauer und Belastungsgrenzen.....	27
<b>4 Konzeption des fehlertoleranten E- Antriebs .....</b>	<b>29</b>
4.1 Grundlagen Fehlertoleranz.....	29
4.2 Allgemeine technische Lösungsansätze.....	30

---

4.3	Lösungsansatz für den elektrischen Antrieb .....	33
4.3.1	Auswahl einer geeigneten Motortopologie .....	33
4.3.2	Bewertung der elektromagnetischen Kopplung .....	37
4.3.3	Festlegen der Antriebsarchitektur .....	41
<b>5</b>	<b>Validierung einer neuen EPS- Antriebsarchitektur.....</b>	<b>45</b>
5.1	Motor- und Systemsimulationen.....	45
5.2	Funktionalität und Performance im Normalbetrieb .....	49
5.3	Analyse von Fehlerbildern und deren Auswirkungen.....	50
5.3.1	Unterbrechungsfehler.....	53
5.3.2	Kurzschlussfehler.....	57
<b>6</b>	<b>Komfortoptimierter Betrieb nach Fehler.....</b>	<b>61</b>
6.1	Strategien nach Unterbrechungsfehler .....	61
6.1.1	Abschaltung der Ansteuerung eines Teilantriebes.....	62
6.1.2	3+2- Phasennotbetrieb.....	63
6.1.3	„3 & 2“- Phasennotbetrieb .....	64
6.1.4	„2 & 2“- Phasennotlauf .....	65
6.2	Strategien nach Kurzschlussfehler .....	69
6.2.1	Aktiver Kurzschlusses in einem Teilantrieb .....	70
6.2.2	„3 & 2“- Phasennotbetrieb nach Kurzschluss .....	80
6.3	Inverse Kompensation .....	81
6.4	Maßnahmen nach Zwischenkreiskurzschluss .....	83
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick .....</b>	<b>87</b>
	Literaturverzeichnis .....	91

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b>	Schematischer Leistungspfad am Bsp. einer EPSapa .....	4
<b>Abbildung 2.2:</b>	Schnittmodell PMSM und konzentrierte Zahnspulen .....	5
<b>Abbildung 2.3:</b>	Lineares Ersatzschaltbild einer 3-phasigen PMSM .....	5
<b>Abbildung 2.4:</b>	Grundcharakteristiken eines geregelten PMSM-Antriebes .....	7
<b>Abbildung 2.5:</b>	Aufbau eines Powerpacks für die Lenkungsanwendung .....	7
<b>Abbildung 2.6:</b>	Feldorientierte Regelung sinuskommutierter Maschinen .....	8
<b>Abbildung 2.7:</b>	Verlässlichkeitsoptimierung und Entwicklungsziele .....	11
<b>Abbildung 3.1:</b>	Strategie und Aspekte eines degradierten Betriebes .....	16
<b>Abbildung 3.2:</b>	Verfügbare und abgerufene Zahnstangenleistung; links: schematisch, rechts: Beispiel für einen Stadtfahrzyklus .....	18
<b>Abbildung 3.3:</b>	Lenkwinkel und Kraft als Funktion der Geschwindigkeit .....	20
<b>Abbildung 3.4:</b>	Manöverübersicht, Messstellen und charakt. Ergebnisse der Studie für eine Konfiguration .....	22
<b>Abbildung 3.5:</b>	Kumulierte Lenkcharakteristiken in Abhängigkeit von Fahrzeug und Unterstützungsgrad („Kreisverkehr“) .....	23
<b>Abbildung 3.6:</b>	Kumulierte Lenkcharakteristiken in Abhängigkeit von Fahrzeug und Unterstützungsgrad (ISO-Spurwechsel) .....	23
<b>Abbildung 3.7:</b>	Umrechnung von Lenk- auf Motormoment .....	26
<b>Abbildung 4.1:</b>	Sechs Stufen der Fehlertoleranz, nach [6] .....	29
<b>Abbildung 4.2:</b>	Verschaltungslayout von 3-/ dual- 3-phasigen Maschinen .....	36
<b>Abbildung 4.3:</b>	Motortopologie mit Einschichtwicklung .....	38

<b>Abbildung 4.4:</b>	Vergleich von $L_{dd}$ und $L_{dq}$ aus Messung und Simulation .....	39
<b>Abbildung 4.5:</b>	Gemessene Phasenströme und G- EMK in den Teilmaschinen vor und nach Unterbrechungsfehler .....	40
<b>Abbildung 4.6:</b>	Vergleich etablierter und der D3P- Antriebsarchitektur mit gesteigerter Verlässlichkeit .....	43
<b>Abbildung 5.1:</b>	Aufbau des reduzierten Ordnungsmodells .....	47
<b>Abbildung 5.2:</b>	Lastabhängigkeit der Induktivitäten $L_d$ , $L_q$ und $L_{dq}$ bzw. $L_{qd}$ .....	47
<b>Abbildung 5.3:</b>	Modell zur Antriebssimulation .....	49
<b>Abbildung 5.4:</b>	Performance des sim. Antriebes im Normalbetrieb .....	50
<b>Abbildung 5.5:</b>	Übersicht möglicher Fehlerbilder im elektrischen Antrieb .....	51
<b>Abbildung 5.6:</b>	Auswirkungen der MOSFET- Unterbrechung auf Drehmoment und Phasenstrom .....	54
<b>Abbildung 5.7:</b>	Messung an D3P- Prototypen mit Phasenunterbrechung .....	55
<b>Abbildung 5.8:</b>	Unterbrechung DBC 1/3 zw. Endstufe und Zwischenkreis .....	56
<b>Abbildung 5.9:</b>	Unterbrechung von Modul 2 (zwischen ZK und Endstufe).....	56
<b>Abbildung 5.10:</b>	Unterbrechung eines Zwischenkreiskondensators .....	57
<b>Abbildung 5.11:</b>	Kurzschluss eines Leistungshalbleiters in der Endstufe .....	59
<b>Abbildung 5.12:</b>	Kurzschluss Kondensator mit anschließender Abschaltung .....	60
<b>Abbildung 6.1:</b>	Betriebsstrategien nach Unterbrechungsfehler .....	62
<b>Abbildung 6.2:</b>	Moment und Phasenstrom bei Abschaltung Teilantrieb .....	62
<b>Abbildung 6.3:</b>	Simuliertes Drehmoment für Boost- (links) oder Fade- out- Betrieb (rechts) .....	63
<b>Abbildung 6.4:</b>	Prinzip und beispielhafte Charakteristik des „2 & 2“ Phasennotbetriebes.....	65

---

<b>Abbildung 6.5:</b>	Prinzipskizze DBC2- Unterbrechung und Adaption der Stromzeiger .....	66
<b>Abbildung 6.6:</b>	Vorgehensmodell zur Ermittlung der optimalen Phasenlage bei „2 & 2“- Phasennotbetrieb .....	67
<b>Abbildung 6.7:</b>	Räumliche Radialkraftverteilung in Abhängigkeit von der Betriebsstrategie.....	68
<b>Abbildung 6.8:</b>	Simulierte Varianten Notbetriebe; V2 mit 25 %-, V3 mit 12,5 %- Leistungsbeitrag der TM1 .....	69
<b>Abbildung 6.9:</b>	Performance nach einem FET- Kurzschluss und Umschaltung auf 3- phasigen Kurzschluss .....	71
<b>Abbildung 6.10:</b>	Gemessene Kurzschlussströme und mittleres Bremsmoment einer Teilmaschine (12/10-V1).....	72
<b>Abbildung 6.11:</b>	Vergleich des Bremsmoments einer Teilmaschine nach 3- Phasenkurzschluss je untersuchter Topologie .....	73
<b>Abbildung 6.12:</b>	Vergleich von Kurzschlussstrom und Bremsmoment aus Analytik, Simulation und Messung .....	74
<b>Abbildung 6.13:</b>	M(n)- Charakteristik des D3P- Motors in 12/10- Topologie mit 3- Phasenkurzschluss in TM 1.....	76
<b>Abbildung 6.14:</b>	Einfluss des Phasenwiderstandes auf das Bremsmoment.....	78
<b>Abbildung 6.15:</b>	Einfluss der d- Induktivität auf das Bremsmoment.....	79
<b>Abbildung 6.16:</b>	Drehmoment und Phasenströme nach Kurzschluss und Adaption beider Regelkreise (ab 35 ms).....	81
<b>Abbildung 6.17:</b>	Drehmoment vor und nach Aufschaltung der inversen Kompensation (ab ca. 120 ms).....	83
<b>Abbildung 6.18:</b>	Erscheinungsbild und Maßnahmen nach Zwischenkreiskurzschluss im Modul 1/ 3 der Endstufe.....	84
<b>Abbildung 6.19:</b>	Erscheinungsbild Maßnahmen nach Zwischenkreiskurzschluss im Modul 2 der Endstufe.....	85