

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

 Springer Vieweg

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-Lenkssysteme) 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 Lenkssystemen 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
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und seine Grenzen	3
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
3 Anforderungen an eine fehlertolerante EPS	13
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
4 Konzeption des fehlertoleranten E- Antriebs	29
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
5	Validierung einer neuen EPS- Antriebsarchitektur.....	45
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
6	Komfortoptimierter Betrieb nach Fehler.....	61
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 Kurzschluss in einem Teilantrieb	70
6.2.2	„3 & 2“- Phasennotbetrieb nach Kurzschluss	80
6.3	Inverse Kompensation	81
6.4	Maßnahmen nach Zwischenkreiskurzschluss	83
7	Schlussfolgerung und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	91

Abbildungsverzeichnis

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

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

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