



Martin Stemmer

Energetische und funktionale Vernetzung von aktiven Lenksystemen



Audi-Dissertationsreihe, Band 77





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Energetische und funktionale Vernetzung von aktiven Lenksystemen

Martin Georg Stemmer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines

Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. K. Stahl

Prüfer der Dissertation: 1. Univ. Prof. Dr.-Ing. B. Heißing (i.R.)
2. Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lohmann

Die Dissertation wurde am 03.07.2012 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
18.02.2013 angenommen.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2013

Zugl.: (TU) München, Univ., Diss., 2013

978-3-95404-423-8

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2013

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2013

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-423-8



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik ftm der Technischen Universität München. Im Rahmen der Kooperation INI.TUM (Ingolstadt Institute der TU München) war die Untersuchung eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl und der Abteilung Entwicklung Fahrwerkregelsysteme der AUDI AG.

Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die das Projekt ermöglicht haben, mich unterstützt und auf dem Weg begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ. Prof. Dr.-Ing. B. Heißing für das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiräume bei meiner Tätigkeit. Die fachlichen Diskussionen und wertvollen Anregungen stärkten die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Aufgabe. Ich danke Univ. Prof. Dr.-Ing. K. Stahl für den Prüfungsvorsitz und Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lohmann für die Übernahme des Koreferats.

Vielen Dank allen Kollegen der AUDI AG, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere danke ich Dr.-Ing. Stefan Ullmann für die fachliche Betreuung und Dr.-Ing. Ralf Schwarz für die Ermöglichung der Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen. Die Zusammenarbeit und die fachlichen Diskussionen mit Mirko Reuter, Sebastian Stark und Dr.-Ing. Bodo Kleickmann haben das Projekt bereichert.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinen Kollegen und allen Mitarbeitern des Lehrstuhls und von INI.TUM für die fachliche Hilfe und das angenehme Arbeitsklima. Mit Anregungen zur Ausfertigung der Arbeit haben mich Dr.-Ing. Josef Fink, Dr.-Ing. Tilo Koch, Dr.-Ing. Anton Obermüller und Dr.-Ing. Andreas Unger unterstützt. Für die Mithilfe bei gezielten Untersuchungen gilt der Dank auch den beteiligten Studenten.

Nicht zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner Familie für die jahrelange Unterstützung. Meine Freundin Martina stand mir in den Hoch- und Tiefphasen der Arbeit stets zur Seite - danke für alles.



Kurzfassung

Die Anzahl an Fahrerassistenzfunktionen im Fahrzeug steigt stetig. Vermehrt wird auf aktive Lenksysteme als Stellelemente zur Winkel- und Momentenüberlagerung zugegriffen.

Zur Beherrschung der Komplexität ist in dieser Arbeit das Konzept eines Lenkstrangkoordinators dargestellt. In der Betrachtung werden zwei Schwerpunkte gesetzt. Neben der Erarbeitung einer energetischen Vernetzung zur Sicherstellung der Bordnetzstabilität und Vermeidung des Lenkungsüberholens, wird die referenzmodellbasierte Störgrößenaufschaltung als Ansteuerkonzept eingeführt. Lenkeingriffe sind ohne störende Rückwirkung auf den Fahrer möglich.

Die Funktionsmodule des Koordinators und drei Assistenzfunktionen werden theoretisch erarbeitet und die Wirksamkeit auf Basis einer prototypischen Umsetzung nachgewiesen. Die Arbeit zeigt ein ganzheitliches Konzept von den funktionalen Anforderungen, über die zentralisierte Umsetzung und die Systemreaktion im Fahrzeug.



Abstract

Driver assistance functions are growing in number and complexity. In many cases active steering systems are used as actuator for angle and torque superposition.

To cope with the demands in this work the concept of a steering coordinator is presented. In the analysis two focuses are set. An energetic integration is introduced to guarantee the stability of the power supply system and to prevent catch up of the steering system. The reference model based disturbance feedforward control is presented as a new control approach. The steering systems can be actuated for driver assistance functions without disturbance to the driver.

The function modules of the coordinator and three assistance functions are developed theoretically and the effectiveness is proved based on a prototypical implementation. This work shows a holistic concept of the functional requests, through to the centralized calculation and the system reactions in the car.





Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	iii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Lenkverhalten und Lenkgefühl im Fahrbetrieb	5
2.2 Bauarten von aktiven Lenksystemen im Pkw	7
2.2.1 Lenkkraftunterstützung	10
2.2.2 Lenkwinkelüberlagerung	11
2.3 Energieversorgung von elektrischen Lenksystemen	14
2.3.1 Energiebordnetz im Pkw	14
2.3.2 Maßnahmen zur Stabilisierung des Bordnetzes.	17
2.3.3 Maßnahmen bei Lenksystemen zur Verringerung der Bordnetzbelastung	19
2.4 Kundenwerte Nutzfunktionen aktiver Lenksysteme	20
2.4.1 Agilitätsfunktionen.	22
2.4.2 Komfortfunktionen.	24
2.4.3 Stabilitätsfunktionen	26
2.4.4 Funktionale Vernetzung von aktiven Lenksystemen	30
2.5 Vernetzung von aktiven Fahrwerkssystemen.	34
2.6 Formulierung der Zielsetzungen der Arbeit	35
3 Architektur des Lenkstrangkoordinators	39
3.1 Konzept für einen Lenkstrangkoordinator	39
3.2 Darstellung der integrierten Funktionalitäten	42
3.2.1 Kommunikationsstruktur und Schnittstellendefinition	43
3.2.2 Priorisierung und Freigabe der Stelleingriffe	45
3.2.3 Systemübergreifende Beeinflussung des Energiebedarfs	45
3.2.4 Referenzmodellbasierte Störgrößenaufschaltung zur Kompensations- berechnung	47
3.2.5 Degradierungskonzept.	49
3.2.6 Einbindung des Lenkstrangkoordinators in die Fahrzeugarchitektur . . .	52
4 Referenz- und Prädiktionsmodell zur Lenkmomentenkompensation	55
4.1 Parametrisches Modell des Lenkstrangs	55
4.1.1 Modellierung der Lenkungsmechanik	56
4.1.2 Modellierung der Winkelüberlagerung	60
4.1.3 Modellierung der Lenkkraftunterstützung	62
4.1.4 Modellierung der Achskinematik und der Fahrdynamik	63
4.1.5 Modellierung des Reifenverhaltens und der Rückstellkraft	68
4.1.6 Integration der Teilmodelle zur Lenkmomentenberechnung	70



4.2	Online-Adaption zur Erhöhung der Robustheit	71
5	Energetische Untersuchungen an elektrischen Lenksystemen	77
5.1	Sicherstellung der dynamischen Bordnetzstabilität	77
5.2	Untersuchung des Lenkleistungsbedarfs bei stehendem Fahrzeug	82
5.2.1	Darstellung der Referenz ohne koordinierende Maßnahmen	82
5.2.2	Modellbasierter Ansatz zur Lenkleistungsbegrenzung	83
5.2.3	Wirksamkeitsnachweis des modellbasierten Ansatzes im Fahrzeug	87
6	Lenkfunktionen mit integrierter Ansteuerung von Winkel- und Momentenüberlagerung	93
6.1	Agilitätsfunktion - Beeinflussung des Eigenlenkverhaltens.	93
6.1.1	Theoretische Herleitung der Anpassung des Eigenlenkverhaltens	94
6.1.2	Umsetzung im Fahrzeug und Einsatz der vernetzten Ansteuerung	97
6.2	Stabilitätsfunktion - Lenkstabilisierung bei Traktionssteigerung.	101
6.2.1	Traktionssteigerung durch Antriebsmomentenverteilung.	101
6.2.2	Theoretische Herleitung der Lenkstabilisierung	104
6.2.3	Umsetzung im Fahrzeug und Einsatz der vernetzten Ansteuerung	107
6.3	Komfortfunktion - Lenkwinkelüberlagerung zur Spurführung	110
6.3.1	Existierende Spurführungen mit Lenkmomentenempfehlung	111
6.3.2	Theoretische Herleitung der winkelbasierten Spurführung	112
6.3.3	Umsetzung im Fahrzeug und Einsatz der vernetzten Ansteuerung	114
6.4	Bewertung der vernetzten Ansteuerung und der Lenkfunktionen	119
7	Anwendung der Ergebnisse	123
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
A	Anhang	129
A.1	Ergänzende Messungen zur Bordnetzstabilität.	129
A.2	Ergänzende Messungen zur Modellvalidierung	131
	Literaturverzeichnis	135



Formelzeichen und Abkürzungen

Indizes und Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$(\dots)_l$		Index für die linke Fahrzeugseite
$(\dots)_r$		Index für die rechte Fahrzeugseite
$(\dots)_v$		Index für die Vorderachse des Fahrzeugs
$(\dots)_h$		Index für die Hinterachse des Fahrzeugs
$(\dots)_x$		Index für die Fahrzeuglängsachse
$(\dots)_y$		Index für die Fahrzeugquerachse
$(\dots)_z$		Index für die Fahrzeughochachse
$(\dots)_{ist}$		Index für einen vorliegenden Wert
$(\dots)_{soll}$		Index für einen Sollwert
a	$[m/s^2]$	Beschleunigung des Fahrzeugs
b	$[m]$	Spurweite des Fahrzeugs
c	$[N/rad]$	Schräglaufsteifigkeit der Fahrzeugachse
c_{DS}	$[Nm/rad]$	Verdrehsteifigkeit des Drehstabs
d_{DS}	$[Nm \cdot s/rad]$	Dämpfung des Drehstabs
d_R	$[m]$	Teilkreisdurchmesser des Lenkritzels
DR	$[rad/s]$	Drehzahlreserve zur Lenkunterstützung
e_{Trak}	$[m/s]$	Regelabweichung des Traktionsreglers
e_{Stab}	$[rad/s]$	Regelabweichung des Stabilisierungsreglers
e_y	$[m]$	Regelabweichung der Querablage
e_ψ	$[rad]$	Regelabweichung der Spurabweichung
E	$[-]$	Effizienzwert zur Bewertung der Modellgüte
f_{ELV_1}	$[-]$	Anpassungsfaktor zum Eigenlenkverhalten 1
f_{ELV_2}	$[-]$	Anpassungsfaktor zum Eigenlenkverhalten 2
$f_{Stab,kin}$	$[-]$	Kinematikfaktor Vorsteuerung Stabilisierung
$f_{Stab,Steuer}$	$[-]$	Verstärkungsfaktor Vorsteuerung Stabilisierung
F	$[N]$	Kraft (allg.)
F_{EPS}	$[N]$	Kraft der EPS an der Zahnstange
F_{y0}	$[N]$	Seitenkraft des Reifens im MF-Tyre Modell
F_{ZS}	$[N]$	Kraft an der Zahnstange aus dem Rückstellmoment
$F_{ZS,mess_virt}$	$[N]$	virtueller Messwert der Zahnstangenkraft
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
h_{KGT}	$[m]$	Gewindesteigung des Kugelgewindetriebs
h_{SP}	$[m]$	Höhe des Fahrzeugschwerpunkts
i_0	$[-]$	Standübersetzung des Wellgetriebes

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
i_{KGT}	[m]	Übersetzung des Kugelgewindetriebs
i_M	[-]	Übersetzung Motorwinkel ÜL - Ritzelwinkel
i_R	[m/rad]	Übersetzung Ritzelwinkel - Zahnstangenweg
i_S	[-]	Übersetzung Lenkradwinkel - Ritzelwinkel
I_1	[A]	Statorstrom des Elektromotors
I_{Bat}	[A]	Batteriestrom
I_d	[A]	d-Komponente des Statorstrom I_1
I_{EPS}	[A]	Laststrom der Lenkunterstützung
I_{ESP}	[A]	Laststrom des ESP-Hydroaggregat
I_{Gen}	[A]	Generatorstrom
I_{Hsv}	[A]	Laststrom der Hochstromverbraucher
I_{Last}	[A]	Lastrom der Grundverbraucher
I_q	[A]	q-Komponente des Statorstrom I_1
I_{Start}	[A]	Laststrom zum Starten des Verbrennungsmotors
I_{Sum}	[A]	Summenlaststrom der gemessenen Verbraucher
I_{RGS}	[A]	Laststrom der reversiblen Gurtstraffer
$I_{ÜL}$	[A]	Laststrom der Winkelüberlagerung
j	[-]	Laufindex
J_o	[kg · m ²]	Trägheitsmoment des oberen Teils des Zweimassenschwingers
J_u	[kg · m ²]	Trägheitsmoment des unteren Teils des Zweimassenschwingers
J_z	[kg · m ²]	(Gier-) Trägheitsmoment des Fahrzeugs um die Hochachse
k_{adapt}	[-]	Proportionalitätsfaktor für die Änderungsrate der Modelladaption
K	[-]	Verstärkungsfaktor der Regelabweichung des jeweiligen Regleranteils
$K_{Vorhalt}$	[-]	Proportionalitätsfaktor der Vorhaltelenkung
l	[m]	Radstand des Fahrzeugs
l_h	[m]	Abstand Hinterachse - Schwerpunkt
l_v	[m]	Abstand Vorderachse - Schwerpunkt
$l_{y,Fahrzeug}$	[m]	Querabstand des Fahrzeugs zur Referenz
$l_{y,Trajektorie}$	[m]	Querabstand der Solltrajektorie zur Referenz
L_1	[Ωs]	Eigeninduktivität der Statorwicklung
m	[kg]	Masse des Fahrzeugs
M_D	[Nm]	geschwindigkeitsabhängiges Moment am Reibelement
M_{EPS}	[Nm]	Gesamtmoment der EPS
M_{fg}	[Nm]	Moment am Flexible Gear des Wellgetriebes
$M_{KG,1}$	[Nm]	Moment am Eingang des Kreuzgelenkes
$M_{KG,2}$	[Nm]	Moment am Ausgang des Kreuzgelenkes
M_M	[Nm]	Motormoment
M_o	[Nm]	äußeres Moment am oberen Teil des Zweimassenschwingers

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
M_R	$[Nm]$	wegabhängiges Moment am Reibelement
$M_{Rück}$	$[Nm]$	Rückstellmoment der Räder an der Vorderachse
M_S	$[Nm]$	Lenkmoment des Fahrers am Lenkrad
$M_{S,eff}$	$[Nm]$	Effektivwert des Lenkmoments
$M_{S,mess}$	$[Nm]$	Messwert des Lenkmoments zur Adaption
$M_{S,sim}$	$[Nm]$	Simulationswert des Lenkmoments zur Adaption
M_{sensor}	$[Nm]$	gemessenes Moment am Drehstab des Lenkstrangs
M_{Servo}	$[Nm]$	Moment der EPS zur Lenkunterstützung
M_{sg}	$[Nm]$	Moment am Static Gear des Wellgetriebes
M_u	$[Nm]$	äußeres Moment am unteren Teil des Zweimassenschwingers
M_{z0}	$[Nm]$	Rückstellmoment des Reifens im MF-Tyre Modell
M_{zr}	$[Nm]$	Rückstellmoment aus Sturzeinfluss im MF-Tyre Modell
$M_{z,Lenk}$	$[Nm]$	Giermoment aus Lenkeingriff
$M_{z,TV}$	$[Nm]$	Giermoment aus Antriebskraftverlagerung
n_K	$[m]$	konstruktive Nachlaufstrecke
n_p	$[m]$	Reifennachlauf im MF-Tyre Modell
N	$[-]$	Stichprobe / Anzahl der Messpunkte
P_{adapt}	$[-]$	Adaptionsfaktor des Lenkstrangmodells
$P_{Verl,EDS}$	$[W]$	Verlustleistung der EDS
Q_{Mess}	$[-]$	Messwert der Referenzgröße bei der Modelleffizienz
$\bar{Q}_{Mess}$	$[-]$	Mittelwert der Messreihe bei der Modelleffizienz
Q_{Sim}	$[-]$	Simulierter Wert zur Bewertung der Modelleffizienz
r	$[m]$	Kurvenradius des Fahrzeugs
r_{dyn}	$[m]$	dynamischer Radradius
R_0	$[m]$	Lenkrollradius
R_1	$[\Omega]$	ohmscher Statorwiderstand
R_i	$[\Omega]$	Innenwiderstand der Batterie
R_S	$[m]$	Störkrafthebelarm
R_{SH}	$[m]$	Spurhebelarm
T	$[s]$	Messzeit
U_1	$[V]$	Statorspannung des Elektromotors
U_{Bat}	$[V]$	Spannung an den Polen der Batterie
U_d	$[V]$	d-Komponente der Statorspannung U_1
U_{EPS}	$[V]$	Spannung am Systemeingang der Lenkunterstützung
U_{ESP}	$[V]$	Spannung am Systemeingang des ESP
U_{Gen}	$[V]$	Spannung am Ausgang des Generators
U_q	$[V]$	q-Komponente der Statorspannung U_1
v	$[m/s]$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs
x_{ZS}	$[m]$	Zahnstangenverschiebeweg
z_{fg}	$[-]$	Zähnezah Flexible Gear des Wellgetriebes
z_{sg}	$[-]$	Zähnezah Static Gear des Wellgetriebes
Z_P	$[-]$	Polpaarzahl des Elektromotors
α	$[rad]$	Schräglaufwinkel der Fahrzeugachse

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
β	[rad]	Schwimmwinkel des Fahrzeugs
γ	[rad]	Sturzwinkel
δ_{Ack}	[rad]	Ackermannlenkwinkel
δ_{ELV_1}	[rad]	Lenkwinkel zur Beeinflussung des ELV 1
δ_{ELV_2}	[rad]	Lenkwinkel zur Beeinflussung des ELV 2
δ_{fg}	[rad]	Winkel des Flexible Gear des Wellgetriebes
δ_G	[rad]	Ritzelwinkel am Lenkgetriebeeingang
$\delta_{KG,1}$	[rad]	Winkel am Eingang des Kreuzgelenks
$\delta_{KG,2}$	[rad]	Winkel am Ausgang des Kreuzgelenks
δ_M	[rad]	Motorwinkel des Überlagerungslenksystems
$\delta_{M,DR}$	[rad]	Teilwinkel der ÜL zur Lenkleistungsbeeinflussung
$\delta_{M,Vari}$	[rad]	Teilwinkel der ÜL zur variablen Lenkübersetzung
$\delta_{M,Vorhalt}$	[rad]	Teilwinkel der ÜL zur Vorhaltelenkung
δ_o	[rad]	Winkel des oberen Teils des Zweimassenschwingers
δ_{sg}	[rad]	Winkel des Static Gear des Wellgetriebes
δ_S	[rad]	Lenkradwinkel
$\delta_{S,eff}$	[rad]	Effektivwert des Lenkradwinkels
δ_{SF}	[rad]	Lenkwinkel zur Spurführung
$\delta_{Stab,Reg}$	[rad]	Lenkwinkel des Gierstabilisierungsreglers
$\delta_{Stab,Steuer}$	[rad]	Lenkwinkel zur Stabilisierungsvorsteuerung
δ_u	[rad]	Winkel des unteren Teils des Zweimassenschwingers
δ_V	[rad]	(mittlerer) Radwinkel der Vorderachse
$\delta_{V,Fahrer}$	[rad]	Fahreranteil des Radwinkels
$\delta_{V,Zusatz}$	[rad]	funktionaler Überlagerungswinkel auf Radebene
δ_{wg}	[rad]	Winkel des Wave Generators des Wellgetriebes
$\Delta F_{th,TV}$	[N]	Differenz-Antriebskraft durch TV der Hinterachse
$\Delta F_{xv,EDS}$	[N]	Differenz-Antriebskraft der EDS der Vorderachse
$\Delta M_{S,eff}$	[Nm]	Differenz des Effektivwerts des Lenkmoments zur Referenz
ΔM_{TV}	[Nm]	Verlagertes Antriebsmoment durch TV
Δv_{Ack}	[m/s]	Drehzahldifferenz aus Ackermann-Modell
$\Delta V_A - Last$	[kg]	Zusätzliche Vorderachslast
$\Delta \delta_{DS}$	[rad]	Verdrehwinkel des Drehstabs
$\Delta \delta_{S,eff}$	[rad]	Differenz des Effektivwerts des Lenkradwinkels zur Referenz
θ	[rad]	Beugewinkel des Kreuzgelenks
ψ	[rad]	Gierwinkel
$\psi_{Fahrzeug}$	[rad]	Gierwinkel des Fahrzeugs bei der Spurführung
$\psi_{Trajektorie}$	[rad]	Gierwinkel der Solltrajektorie bei der Spurführung
Ψ_{PM}	[-]	Hauptfluss der Permanentmagneten
Ψ_d	[-]	d-Komponente des Statorflusses
Ψ_q	[-]	q-Komponente des Statorflusses
$\omega_{M,grenz}$	[rad/s]	Grenzdrehzahl des EPS-Motors
$\omega_{M,ist}$	[rad/s]	aktuelle Drehzahl des EPS-Motors