

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

## Untersuchungen zum Lenkgefühl von Steer-by-Wire Lenksystemen

Tilo Koch

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. Bernd-Robert Höhn  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing  
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb, i.R.

Die Dissertation wurde am 11.05.2010 bei der Technischen Universität  
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am  
02.08.2010 angenommen.



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Kooperation INI.TUM (Ingolstadt Institute der TU München) am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung Vorentwicklung und Innovationen im Fahrwerk der AUDI AG.

Besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Professor B. Heißing für sein Vertrauen und die wohl dosierten Anregungen zur richtigen Zeit. Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Professor H. Bubb, für den Prüfungsvorsitz bei Professor B.-R. Höhn.

Vielen Dank allen Kollegen der AUDI AG, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere danke ich Peter Kunsch und Achim Glas für ihre großartige Unterstützung. Ebenso danke ich Werner Sutor sowie allen Kollegen aus den Abteilungen Lenkungsentwicklung, Fahrwerkabstimmung und Reifenentwicklung, die wertvolle Beiträge erbracht haben.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben zudem besonders Andreas Kempf und Fabrizio Re im Rahmen ihrer Studienarbeiten beigetragen.

Herzlichen Dank allen Kollegen vom Lehrstuhl und von INI.TUM für die Hilfe und die wunderbare Zeit, die ich mit Ihnen verbringen durfte. Besonders Dr.-Ing. Markus Brändle möchte ich für seinen wertvollen Rat zu Beginn der Arbeit danken, zudem Dr.-Ing. Michael Botsch, Martin Stemmer und Anton Obermüller für Anregungen und Unterstützung.

Außerdem gilt mein ganz besonderer Dank meiner Mutter und meiner Frau für die jahrelange Unterstützung in allen Hoch- und Tiefphasen der Arbeit.



# Kurzfassung

Durch die mechanische Entkopplung von Lenkrad und Rädern eines Kraftfahrzeugs fällt bei Steer-by-Wire Lenksystemen (SbW) zunächst das Lenkmoment und das damit einhergehende Lenkgefühl weg. Da das Lenkgefühl einen großen Einfluss auf Fahrsicherheit und Fahrspaß hat, sollte es bei SbW künstlich erzeugt werden. Um eine Rückmeldung des tatsächlich vorherrschenden Reifen-Fahrbahn-Kontakts zu geben, müssen im Wesentlichen die Rückstellkräfte der gelenkten Räder bestimmt werden. Dazu werden zwei Ansätze umgesetzt: zum einen die direkte Messung mittels zusätzlicher Sensoren, zum anderen die modellbasierte Schätzung auf Basis bereits vorhandener Sensoren. Darüber hinaus werden verschiedene Funktionen zur Verbesserung des Lenkgefühls entwickelt. Zur belastbaren Bewertung aller entwickelten Ansätze wird ein Versuchsfahrzeug realisiert und für Subjektivbewertungen mit Hilfe von Experten verwendet.

Es wird nachgewiesen, dass eine Steer-by-Wire-Lenkung ein besseres Lenkgefühl aufweisen kann, als eine herkömmliche Servolenkung, sofern die Reifenrückstellkräfte gemessen werden. Die Schätzung dieser Kräfte auf Basis von fahrdynamischen Größen bietet das Potential, auf zusätzliche Sensoren im Fahrzeug zu verzichten. Sie zeigt jedoch einige prinzipbedingte Nachteile, beispielsweise das Zeitverhalten der Kräfte, die Lenkungsrückmeldung oder den Gültigkeitsbereich (Mittellage, Stillstand, Reibwert) betreffend. Einige dieser Nachteile werden durch zusätzliche Teilmodelle behoben.

Mit mehreren Beispielen wird gezeigt, dass SbW Möglichkeiten bietet, das Lenkgefühl gegenüber herkömmlichen Lenksystemen weiter zu verbessern. Die einfachere Abstimmung von Komponenten des Lenkgefühls in einer größeren Bandbreite als bislang wird am Beispiel der Reibung und Fahrbahnrückmeldung gezeigt. Neue Funktionen, wie die selektive Veränderung der Rückmeldung (Stößigkeitsreduktion), sind in diesem Maße nur mit der mechanischen Entkopplung durch SbW möglich.



# Abstract

The mechanical decoupling of steering wheel and road wheels in a car with a steer-by-wire system leads to a loss of steering wheel torque and thus steering feel. Steering feel needs to be generated artificially because of its importance regarding driving safety and pleasure. Determining the tire aligning forces is a key factor in restoring the feed back of the actual tire-road-contact. Therefore, two approaches are developed. First, the forces are measured using additional sensors. Secondly, a model based estimator is used, relying only on sensor data already available in the vehicle. Furthermore, several functions are developed to improve steering feel. All these approaches are implemented in an experimental vehicle and assessed by a group of experts.

The experimental results show that steer-by-wire can provide a better steering feel than a conventional power steering, provided that the tire aligning forces are measured. The estimation of these forces based on driving dynamics data offers the possibility to do without additional sensors. Estimation however, has some limitations, e.g. concerning time lag of the estimated forces, road feedback and the area of validity (on-center, vehicle standstill, friction coefficient). Some of these disadvantages are eliminated with additional model parts.

Several examples show the potential of steer-by-wire to further improve steering feel compared to conventional steering systems. Easier tuning of some aspects of steering feel is demonstrated using the examples of road feedback and friction. Additional functions as the selective manipulation of the feedback (kickback reduction), are only feasible with a mechanically decoupled steer-by-wire system.



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Formelzeichen und Indizes	vii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	3
1.2.1 Das Lenkgefühl und seine Bedeutung	3
1.2.1.1 Qualitative Beschreibung des Lenkgeföhls	4
1.2.1.2 Quantitative Beschreibung des Lenkgeföhls.	6
1.2.1.3 Optimierung des Lenkgeföhls mit aktiven Lenksystemen.	10
1.2.2 Lenkmomentsimulation mit Steer-by-Wire Lenksystemen	16
1.2.2.1 Aktorik zur Darstellung künstlicher Lenkmomente	17
1.2.2.2 Messung der Reifenrückstellkräfte.	18
1.2.2.3 Schätzung der Reifenrückstellkräfte	18
1.3 Schlussfolgerungen und Zielsetzung	20
<b>2 Bestimmung des Lenkmoments</b>	<b>23</b>
2.1 Messung der Zahnstangenkraft	23
2.2 Modellbildung des Zahnstangenkraftschätzers.	24
2.2.1 Kalman-Filter zur Seitenkraftschätzung.	25
2.2.2 Berechnung des Schräglaufwinkels	27
2.2.3 Quasistatische Radlastverteilung	28
2.2.4 Ergänzende Teilmodelle.	30
2.3 Modellvalidierung und Analyse des Zahnstangenkraftschätzers.	32
2.3.1 Validierung der Teilmodelle.	32
2.3.2 Validierung des Gesamtmodells	35
2.3.3 Zeitverhalten	35
2.3.4 Zusammenfassung	40
2.4 Modellbildung und -validierung der Lenkung	41
<b>3 Optimierung des Lenkgeföhls</b>	<b>43</b>
3.1 Lenkgeföhloptimierung bei geschätzter Zahnstangenkraft.	43
3.1.1 Verbesserung des Zeitverhaltens	43
3.1.2 Verstärkung der Fahrbahnrückmeldung	45
3.1.3 Verstärkung von Reifennachlaufänderungen	46

---

3.2	Lenkgefühloptimierung bei gemessener Zahnstangenkraft . . . . .	47
3.2.1	Einstellung der Fahrbahnrückmeldung . . . . .	47
3.2.2	Reduktion der Lenkungsstößigkeit . . . . .	48
3.3	Übergreifende Maßnahmen zur Optimierung des Lenkgeföhls . . . . .	49
3.3.1	Systemimmanente Vorteile für die Berechnung und Abstimmung des Lenkmoments . . . . .	50
3.3.2	Verstärkung der Lenkmomentdegression beim Untersteuern. . . . .	50
<b>4</b>	<b>Bewertung der entwickelten Modelle</b>	<b>53</b>
4.1	Gegenstand der Untersuchungen. . . . .	53
4.2	Methodik . . . . .	54
4.2.1	Aufbau des Versuchsfahrzeugs . . . . .	54
4.2.2	Bewertungsverfahren . . . . .	57
4.2.3	Versuchsdurchführung . . . . .	61
4.3	Ergebnisse . . . . .	61
4.3.1	Lenkmomentverlauf . . . . .	62
4.3.2	Präzision von Lenkeingaben . . . . .	66
4.3.3	Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften . . . . .	66
4.4	Ergebniszusammenfassung. . . . .	70
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>77</b>
A.1	Ergänzende Bilder zur Modellvalidierung . . . . .	77
A.2	Einzelnoten der Probandenversuche . . . . .	81
A.3	Fragebogen . . . . .	86
A.4	Signifikanztests. . . . .	87
A.4.1	Signifikanztests der Notenbewertung. . . . .	88
A.4.2	Signifikanztests der Meinungsbewertung. . . . .	92
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiel für eine Joystick-Bedienung [89] . . . . .	2
1.2	Schematische Unterscheidung der Begriffe Lenkverhalten und Lenkgefühl . .	4
1.3	Ermittlung der Lenkungsreibung und -hysterese mittels Weave Test nach ISO 13674-1 [1] . . . . .	7
1.4	Ermittlung des Lenkmomentgradienten um die Mitte durch den Transition Test nach ISO 13674-2 [2] . . . . .	7
1.5	Bevorzugtes Lenkmomentniveau über der Fahrgeschwindigkeit nach Bertol- lini et al. [16] . . . . .	9
1.6	Versuchsaufbau zur Darstellung künstlicher Lenkmomente durch Moment- überlagerung nach Barthenheier [13] . . . . .	11
1.7	Gezielte Veränderung des Lenkmoments bei einem Ausweichmanöver [59] .	12
1.8	Reduktion von Lenkraddrehschwingungen mit einer aktiven Momenten- überlagerung [38] . . . . .	13
1.9	Einfluss einer Vorhaltlenkung auf die Gierrate bei Einbringung von Störun- gen [35]. . . . .	15
1.10	SbW-Lenkung als Master-Slave-System . . . . .	17
1.11	Klassifizierung des Stands der Forschung zur SbW-Lenkgefühlzeugung nach Bestimmung der Kraft und Betrachtung des nichtlinearen Fahrbereichs .	20
2.1	Konfiguration der Spurstangenkraftmessung . . . . .	23
2.2	Prinzip der Zahnstangenkraftschätzung . . . . .	24
2.3	Einspurmodell der Fahrdynamik. . . . .	25
2.4	Seitenkraft über Schräglaufwinkel bei verschiedenen Reifenmodellen. . . . .	28
2.5	Gewichtsverlagerung durch Querbeschleunigung . . . . .	29
2.6	Normalkräfte der rechten Räder durch Erd-, Quer- und Längsbeschleunigung	29
2.7	Beispielhafter Verlauf des künstlichen Lenkmoments zur Verbesserung des Mittengefühls . . . . .	31
2.8	Kreisfahrt: Seitenkraft an der Vorderachse . . . . .	32
2.9	Kreisfahrt: Normalkraft am rechten Vorderrad. . . . .	33
2.10	Kreisfahrt: Seitenkraft am rechten Vorderrad . . . . .	34
2.11	Durchlenken im Stand: Wirksamkeit des Bohrmomentmodells . . . . .	34
2.12	Kreisfahrt: Zahnstangenkraft. . . . .	35
2.13	Kurvenfahrt Grenzbereich: Zahnstangenkraft . . . . .	36
2.14	Zeitverzug der geschätzten Zahnstangenkraft gegenüber der Messung . . . .	36
2.15	Lenkradwinkelverlauf nach loslassen des Lenkrads bei 80 km/h und $a_y =$ $3 \text{ m/s}^2$ . . . . .	37

---

2.16	Zeitverläufe von Lenkradwinkel, Zahnstangenkraft und Querschleunigung im Fahrzeug . . . . .	38
2.17	Zeitverläufe von Lenkradwinkel, Zahnstangenkraft und Querschleunigung in der Mehrkörpersimulation . . . . .	38
2.18	Übertragungsverhalten von Lenkradwinkel auf Querschleunigung an verschiedenen Messorten . . . . .	39
2.19	Momentane Drehachse bei plötzlicher Lenkbewegung nach [66] . . . . .	40
2.20	Schematische Abbildung des Lenkungsmodells . . . . .	41
2.21	Schematische Abbildung des Lenkwinkelgeschwindigkeitsreglers . . . . .	42
2.22	Kurvenfahrt im Grenzbereich: Validierung des Lenkungsmodells mit gemessener Zahnstangenkraft . . . . .	42
3.1	Querschleunigung im Schwerpunkt, Transformation auf die Vorderachse und Prädiktion mittels Einspurmodell im Vergleich . . . . .	44
3.2	Zahnstangenkraftmessung im Vergleich zu Schätzungen mittels unterschiedlicher Querschleunigungssignale. . . . .	45
3.3	Verstärkung der Rückmeldung mit geschätzten Zahnstangenkräften . . . . .	46
3.4	Verstärkung der Rückmeldung durch das Gierratensignal . . . . .	46
3.5	Prinzip der virtuellen Skalierung des Reifennachlaufs zur besseren Spürbarkeit der Lenkmomentdegression . . . . .	47
3.6	Validierung der virtuellen Skalierung des Reifennachlaufs . . . . .	48
3.7	Einfluss der Tiefpass-Eckfrequenz auf Stößigkeit und Rückmeldung . . . . .	49
3.8	Reduktion der Stößigkeit unter Beibehaltung der Rückmeldung des Fahrbahnkontakts. . . . .	49
3.9	Prinzip der Verstärkung der Lenkmomentdegression im Grenzbereich . . . . .	51
3.10	Lenkmomentverlauf bei beschleunigter Kreisfahrt bis in den Grenzbereich, regulär und mit Verstärkung der Lenkmomentdegression . . . . .	51
4.1	Schematischer Aufbau des Versuchsfahrzeugs . . . . .	55
4.2	Innenraum des Versuchsfahrzeugs . . . . .	57
4.3	Beispiel eines Boxplots . . . . .	62
4.4	Subjektivbewertung: Lenkmomentverlauf Teil 1. . . . .	63
4.5	Subjektivbewertung: Lenkmomentverlauf Teil 2. . . . .	65
4.6	Subjektivbewertung: Lenkpräzision . . . . .	67
4.7	Subjektivbewertung: Reibung / Klebrigkeit . . . . .	68
4.8	Subjektivbewertung: Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften. . . . .	69
4.9	Subjektivbewertung: Gesamteindruck . . . . .	70
A.1	Ableitung der Längsbeschleunigung aus der Geschwindigkeit im Vergleich zur Messung mittels Inertialmesssystem . . . . .	77
A.2	Kreisfahrt: Längs- und Querschleunigung. . . . .	78
A.3	Kreisfahrt: Normalkraft am linken Vorderrad . . . . .	79
A.4	Kreisfahrt: Seitenkraft am linken Vorderrad . . . . .	79
A.5	Kurvenfahrt Grenzbereich: Längs- und Querschleunigung . . . . .	80

---

A.6	Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Gesamteindruck. . . . .	81
A.7	Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Reibung / Klebrigkeit . . . . .	81
A.8	Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Lenkmomentverlauf Teil 1 . . . . .	82
A.9	Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Lenkmomentverlauf Teil 2 . . . . .	83
A.10	Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Lenkpräzision . . . . .	84
A.11	Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Rückmeldung von Fahrbahneigen- schaften. . . . .	85



# Formelzeichen und Indizes

$\alpha$	Reifenschräglaufwinkel
$\delta$	Radlenkwinkel
$\delta_l$	Lenkradwinkel
$\dot{\psi}$	Giergeschwindigkeit
$\theta$	Verdrehung der Reifenmitte gegenüber der Aufstandsfläche im Stillstand
$b$	Spurweite
$c_\alpha$	Schräglaufsteifigkeit
$g$	Erdbeschleunigung
$h$	Höhe des Fahrzeugschwerpunkts über Grund
$i_l$	Übersetzung des Lenkgetriebes
$i_s$	Idealisierte konstante Lenkübersetzung
$l_v, l_h$	Abstand des Schwerpunkts von der Vorder- bzw. Hinterachse in x-Richtung
$m$	Fahrzeugmasse
$n_k, n_p$	konstruktiver Nachlauf bzw. Reifennachlauf
$r_{sp}$	Spurhebelradius
$v, a$	Geschwindigkeit, Beschleunigung
$v_{ch}$	Charakteristische Geschwindigkeit eines untersteuernden Fahrzeugs
$x_k$	Zustandsvektor zum Zeitschritt $k$
$z_k$	Messgrößenvektor zum Zeitschritt $k$
$A$	Systemmatrix
$H$	Messmatrix
$P$	Schätzfehlerkovarianzmatrix
$Q$	Prozessfehlerkovarianzmatrix
$R$	Messfehlerkovarianzmatrix
$K_{np}$	Skalierungsfaktor Reifennachlauf
$K_n$	Offset Gesamtnachlauf
$F, M$	Kräfte, Momente
$M_b, M_{b,max}$	Aktuelles bzw. maximales Bohrmoment
$M_h$	Lenkmoment am Lenkrad
$M_r$	Reifenrückstellmoment
$M_{rs}$	Sollmoment des Lenkgeschwindigkeitsreglers
$M_{se}$	Unterstützungsmoment des E-Motors der Servolenkung
$F_{zs}$	Kraft, die von außen in y-Richtung auf die Zahnstange wirkt

---

$J_z$	Trägheitsmoment des Fahrzeugs um die z-Achse
$R, D$	Reibungs- bzw. Dämpfungskoeffizienten
$(\dots)_{v,h,l,r,zs,sp}$	Indizes für Ortsangaben (vorne, hinten, links, rechts, Zahnstange, Schwerpunkt)
$(\dots)_{s,l,n}$	Indizes für Seiten-, Längs- und Normalkräfte im radfesten Koordinatensystem
$(\dots)_{x,y,z}$	Indizes für Achsen im fahrzeugfesten Koordinatensystem

# 1 Einleitung

Im Folgenden wird zunächst die Motivation für die Durchführung der vorliegenden Arbeit dargelegt. Der Stand der Technik und Forschung wird vorgestellt und ausgewertet, um daraus die Zielsetzung abzuleiten.

## 1.1 Motivation

Bei Lenksystemen im PKW ist seit mehreren Jahren ein starker Trend hin zu mechatronischen Systemen zu beobachten. Die hydraulische Lenkhilfe wird durch elektromechanische Systeme (EPS) ersetzt, um Energie einzusparen und zusätzliche Funktionen zu realisieren. Solche EPS-Lenkungen ermöglichen prinzipiell die freie Gestaltung des Lenkradmoments in Abhängigkeit beliebiger Parameter. Überlagerungslenkungen ermöglichen die freie Veränderung der Lenkübersetzung, z. B. abhängig vom Lenkwinkel oder der Fahrgeschwindigkeit. Auch die Kombination beider Systeme ist bereits in einem Serienfahrzeug verfügbar, womit sich die Größen Lenkradwinkel und -moment von Winkel und Rückstellmoment an den Rädern funktional entkoppeln lassen. Die nächste denkbare Entwicklungsstufe ist die voll elektrische Lenkung ohne mechanische Verbindung zwischen Bedienelement (z. B. Lenkrad) und Rädern, bei der diese Größen auch physikalisch entkoppelt sind. Solche Lenksysteme sind unter dem Begriff *Steer-by-Wire* (SbW) bekannt.

Vorteile der SbW-Technologie gegenüber der Kombination von EPS und Überlagerungslenkung sind z. B. nach [34] und [80] optimiertes Package, verbesserte Innenraumergonomie, Variantenreduktion sowie erhöhte passive und aktive Sicherheit auf funktionaler Ebene.

Eine direkte Folge der mechanischen Entkopplung ist jedoch der Wegfall der Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts in Form des heute systemimmanenten Lenkmoments. Die im Lenkmoment enthaltenen Informationen über „den Fahrzustand, den Straßenzustand, externe Störungen und die Stellgröße“ [22] sind ein wichtiger Teil des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises [20] und für eine sichere Fahrzeugführung von großer Bedeutung. Beispielsweise sind eine glatte Fahrbahn oder das Erreichen des fahrdynamischen Grenzbereichs durch Änderungen im Lenkmoment spürbar. Die Bedeutung der Rückmeldeinformation spiegelt sich z. B. in [43] wieder; drei der zehn genannten Anforderungen an das gesamte Fahrverhalten eines Fahrzeugs beziehen sich dort auf die Rückmeldung:

- „gute Rückmeldung über Fahrzeugreaktion und Fahrbahnbeschaffenheit
- Rückmeldung über die Annäherung an den physikalischen Grenzbereich
- präzises, intuitives Lenkverhalten, das ... ein Gefühl für die Straße vermittelt“



Bild 1.1: Beispiel für eine Joystick-Bedienung [89]

Auch bei Steer-by-Wire Lenksystemen sollten dem Fahrer folglich relevante Informationen über den fahrdynamischen Zustand des Fahrzeugs übermittelt werden.

Bei der herkömmlichen Lenkung dient das Bedienelement Lenkrad als Schnittstelle zur Informationsübertragung. Der Mensch nutzt den haptischen Sinneskanal zur Aufnahme dieser Information. Die Wahrnehmung über den haptischen Sinneskanal erfolgt schneller als beispielsweise die Wahrnehmung visueller Reize (vgl. [22, 39]). Das Bedienelement ist somit als haptische Schnittstelle zur Übermittlung zeitkritischer Informationen wie etwa dem Erreichen des Grenzbereichs gut geeignet.

Als Bedienelement muss bei SbW nicht zwingend ein Lenkrad verwendet werden. Die mechanische Entkopplung ermöglicht große Freiheiten bei der Gestaltung des Bedienelements. In mehreren Arbeiten wurden andere Bedienelemente als Alternativen zu Lenkrad und Pedalen untersucht. Eine umfangreiche Übersicht alternativer Bedienelemente für die Längs- und Querdynamik bieten Winner und Heuss in [89]. Am häufigsten sind Joysticks bzw. Sidesticks anzutreffen [17, 26, 47, 52, 58].

Obgleich diese in manchen Disziplinen vorteilhaft sind, beispielsweise in der Längsdynamikregelung, zeigen vergleichende Untersuchungen im Fahr Simulator keine greifbaren Vorteile hinsichtlich der Querdynamik [4, 31]. Die Kopplung von Längs- und Querdynamik in einem Bedienelement ist ebenfalls kritisch zu sehen, sie kann beispielsweise zu ungewollten *schwänzeln*den Fahrzeugbewegungen führen [52]. Für die Regelung der Querdynamik

scheint das herkömmliche Lenkrad sogar eher vorteilhaft, da „sich das Lenkrad durch eine feinere Dosierbarkeit auszeichnet“ [34]. In den genannten Untersuchungen wurden zudem vorwiegend alltägliche Fahrsituationen betrachtet. Zusätzlich „muß sowohl einer gewachsenen Gewöhnung an das Lenkgefühl hydraulischer Servolenkungen Rechnung getragen als auch die schwierige Aufgabe der Rückmeldung von Straßenzustand, Umweltsituation und Fahrzustand bis hin zu Warnhinweisen auf Grenzfahrbereiche gemeistert werden“ [33]. Insbesondere für geübte Fahrer, bei denen hohe Anforderungen an die Rückmeldung des Fahrzustands und genaue innere Modelle der Fahrdynamik (vgl. dazu [79]) aufeinander treffen, ist die Eignung von Joysticks fraglich. Wahrscheinlich werden auch Fahrzeuge mit SbW-Lenkung, zumindest im ersten Schritt, mit einem herkömmlichen Lenkrad ausgestattet.

„Entwicklungsbedarf im Bereich der authentischen Lenkgefühlgenerierung verhindert hier den kurzfristigen Serieneinsatz (von SbW, d. Verf.)“ [48] – diese Einschätzung von Holle wird von der Auswertung zum Stand der Forschung in Kapitel 1.2 bestätigt. Sie bildet zugleich den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit.

Die künstliche Nachbildung des Lenkgefühls wird dabei nicht nur als Notwendigkeit begriffen, sondern gleichzeitig als Möglichkeit, mit den zusätzlichen Freiheitsgraden das Lenkgefühl gegenüber heutigen Lenkungen zu verbessern.

## 1.2 Stand der Technik

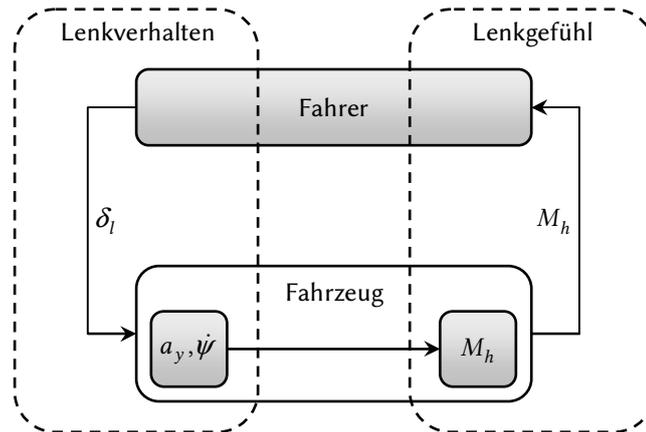
Im Folgenden wird der Begriff *Lenkgefühl* eingegrenzt und seine Bedeutung für das Fahrverhalten dargelegt. Dadurch wird u. a. deutlich, warum es sinnvoll ist, viele der Eigenschaften einer herkömmlichen Lenkung auf Steer-by-Wire zu übertragen. Des Weiteren werden Arbeiten zur Optimierung des Lenkgefühls mit aktiven Lenksystemen vorgestellt (Kapitel 1.2.1). Anschließend werden frühere Forschungsarbeiten zur Simulation des Lenkgefühls bei SbW beschrieben (Kapitel 1.2.2).

### 1.2.1 Das Lenkgefühl und seine Bedeutung

Das *Lenkgefühl* ist eine entscheidende Eigenschaft des Fahrverhaltens von PKW. So „bestimmt das Lenkgefühl ganz wesentlich, ob man ein großes Fahrzeug als handlich, oder einen Kleinwagen als eher schweres Fahrzeug empfindet; das Lenkgefühl ist damit eine ganz wesentliche Komponente des sog. Fahrspaßes“ [18].

Das am Lenkrad spürbare Moment erfüllt mehrere Aufgaben: „Wird ein Steuerungssystem mit elektrischen oder hydraulischen Kraftverstärkern ausgerüstet, sind dennoch Betätigungswiderstände vorzusehen, um die Wegrückmeldung durch eine zusätzliche Kraftrückmeldung zu ergänzen und um unbeabsichtigte Handbewegungen, Körperschwankungen und Handtremor zu dämpfen“ [72]. So zeigen zum Beispiel Untersuchungen von Buschardt [22] und Toffin et al. [83] die schlechte Regelgüte des Fahrers bei einer kraftfreien Lenkung.

Zudem dient das Lenkgefühl als Informationsquelle über den Fahrzustand und den Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Es ist vorteilhaft, dass diese Informationen über den haptischen Sinneskanal aufgenommen werden, da sie der Mensch dadurch schneller aufnehmen und verarbeiten kann, als beispielsweise visuelle Reize. Harnett und Buschardt bieten zu diesem Thema Übersichten und weiterführende Quellen (vgl. [22, 39]).



**Bild 1.2:** Schematische Unterscheidung der Begriffe Lenkverhalten und Lenkgefühl

Bisherige Arbeiten zum Thema Lenkgefühl werden in den folgenden Kapiteln im Überblick dargestellt. Zunächst ist zu definieren, was genau unter dem Begriff Lenkgefühl zu verstehen ist und welche qualitativen Anforderungen an ein *gutes* Lenkgefühl gestellt werden, vgl. Kapitel 1.2.1.1. Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit der Quantifizierung des Lenkgefühls. Hierbei geht es im Wesentlichen darum, das Lenkgefühl zahlenmäßig zu beschreiben und eine Verknüpfung zwischen messbaren Größen und subjektiven Urteilen herzustellen. Kapitel 1.2.1.2 führt in diesen Themenkomplex ein.

Anschließend wird in Kapitel 1.2.1.3 ein Überblick gegeben über Untersuchungen zur Optimierung des Lenkgefühls mit aktiven Lenksystemen. *Aktiv* bedeutet in diesem Fall die Möglichkeit zur weitgehend freien Gestaltung des Lenkmoments, wie sie z. B. elektromechanische Lenkungen oder Steer-by-Wire bieten.

### 1.2.1.1 Qualitative Beschreibung des Lenkgefühls

Das Lenkgefühl ist ein relativ komplexes und vor allem schwierig abzugrenzendes Themengebiet. Im weitesten Sinne fallen unter den Begriff Lenkgefühl sowohl die Reaktion des Fahrzeugs auf Lenkbewegungen, als auch die Rückmeldung fahrdynamischer Zustände in Form des Lenkmoments. Zusammengenommen ergibt sich daraus eine Vielzahl von Aspekten des Lenkgefühls, die von verschiedensten Fahrzeugeigenschaften beeinflusst werden - vom Trägheitsmoment des Fahrzeugaufbaus über Reifen, Achskinematik und Lenkunterstützung bis hin zur Trägheit und Oberflächenbeschaffenheit des Lenkrads. Wolf unterscheidet zwischen Lenkgefühl im *engeren Sinne* (Lenkwinkleingaben und Lenkmoment) und im *erweiterten Sinne* (Reaktion des Fahrzeugs auf Lenkeingaben) (vgl. [90]). Zur weiteren Präzisierung wird im Folgenden der Begriff Lenkgefühl nur im engeren Sinne verwendet. Das Lenkgefühl im erweiterten Sinne wird als *Lenkverhalten* bezeichnet (siehe Bild 1.2).

Trotz dieser enger gefassten Definition kommt dem Lenkgefühl eine Doppelaufgabe zu. Das Lenkrad hat als bidirektionale Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug zwei primäre Aufgaben:

- Übermittlung des Fahrerwunschs an das Fahrzeug

- Übermittlung von Fahrdynamik-Zuständen an den Fahrer

Bei beiden ist das Lenkgefühl von Bedeutung. Im ersten Fall möchte der Fahrer einen Wunsch-Lenkradwinkel einstellen. Im Gegensatz zum oben definierten Lenkverhalten geht es hierbei nicht darum, wie der Lenkradwinkel in eine Fahrzeugbewegung umgesetzt wird, sondern wie gut der Fahrer einen Wunschwinkel einstellen oder halten kann. Dafür sollen die „Betätigungswiderstände hinsichtlich optimaler propriozeptiver Bewegungskontrolle“ [72] gestaltet werden, d. h. es soll einen eindeutigen und einfachen Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Lenkmoment geben, um den Fahrer über den haptischen Sinneskanal bei der Lenkwinkel-Einstellung zu unterstützen. Weil das Lenkmoment sehr indirekt aus den Seitenkräften an den Vorderrädern entsteht, müssen zahlreiche Fahrwerkskomponenten aufeinander abgestimmt werden, um dieses Ziel zu erreichen. Servolenkungen, insbesondere aktive, z. B. elektrische, Systeme, erleichtern dies durch gezielte Gestaltung des Lenkmoments mit Hilfe der Servounterstützung. Theoretisch günstig ist ein hoher Gradient des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel, da kleine Winkeländerungen im Vergleich große Lenkmomentänderungen hervorrufen, welche leichter zu detektieren sind (vgl. [22]). Aus den Messwerten in [83] lässt sich ablesen, dass beim Vergleich zweier Lenkungskennlinien ein steilerer Anstieg des Lenkmoments über dem Lenkwinkel zu kleineren Kursabweichungen führt. Alleine aus Komfortgründen ist der Gradient jedoch bereits begrenzt.

Im zweiten Fall ist es wichtig, dem Fahrer nützliche Informationen zu vermitteln, ohne Störungen zu übertragen. Nützlich sind im Wesentlichen Rückmeldungen über den Fahrzustand:

- kontinuierlicher Anstieg des Lenkmoments über der Querbeschleunigung
- Änderung des Lenkmoments in Relation zum Reibwert
- Verminderung des Lenkmomentanstiegs im fahrdynamischen Grenzbereich
- Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften

Bereits der erste Punkt verdeutlicht, dass das Lenkgefühl auch in seiner enger gefassten Definition nicht vollkommen isoliert vom restlichen Fahrzeug und der Fahrdynamik betrachtet werden kann. Die obige Definition wird zur Präzisierung des Begriffs trotzdem als sinnvoll erachtet.

Als Störungen sind v. a. Stöße und Schwingungen zu sehen, verursacht etwa durch Fahrbahnschäden oder Radunwucht. Untersuchungen von Harrer und Brunn legen nahe, dass sich Störungen und Nutzinformatoren an Hand ihrer Frequenz teilweise voneinander trennen lassen. Nutzinformatoren werden vorrangig niedrigeren Frequenzen zugeordnet, bis ca. 15 Hz (vgl. [19]). Frequenzen darüber sind demnach eher störend, ohne klaren Nutzwert. Jedoch gibt es einen Übergangsbereich, so dass keine exakte Trennung von Nutz- und Störinformatoren möglich ist (vgl. auch Bild 3.7).

Zusammengefasst bietet ein *gutes* Lenkgefühl also viel Rückmeldung ohne Störungen und gute Unterstützung der Propriozeption bei geringem Diskomfort.

Die beschriebenen Anforderungen lassen sich noch deutlich feiner untergliedern, was beispielsweise zur detaillierten Bewertung eines Lenksystems im Entwicklungsprozess sinnvoll

ist. Kriterien, die die einzelnen Aspekte des Lenkgefühls beschreiben, finden sich z. B. in [18, 36, 41, 44]. In Kapitel 4.2.2 wird ebenfalls ein Katalog solcher Anforderungen entwickelt, um darauf aufbauend Probandenversuche durchzuführen.

### 1.2.1.2 Quantitative Beschreibung des Lenkgefühls

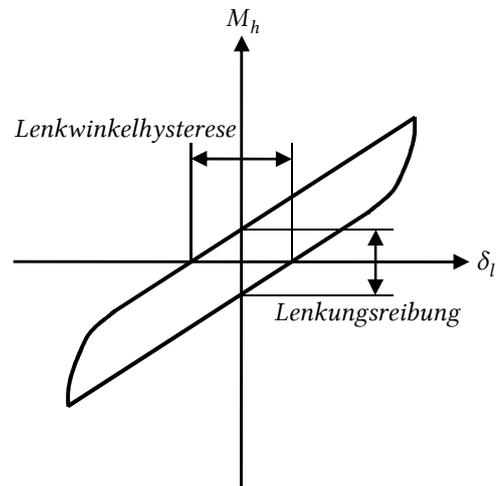
Die einfachste Form der quantitativen Beschreibung des Lenkgefühls ist die subjektive Bewertung in Form einer Note. Dies setzt eine Bewertungsskala voraus, die qualitativen Bewertungen eine Zahl zuordnet. Es existieren zahlreiche Arten von Bewertungsskalen, wobei die sog. *10er-Skala* in der Automobilindustrie weite Verbreitung gefunden hat. In Kapitel 4 wird dieses Thema nochmals aufgegriffen.

### Klassische Objektivierung

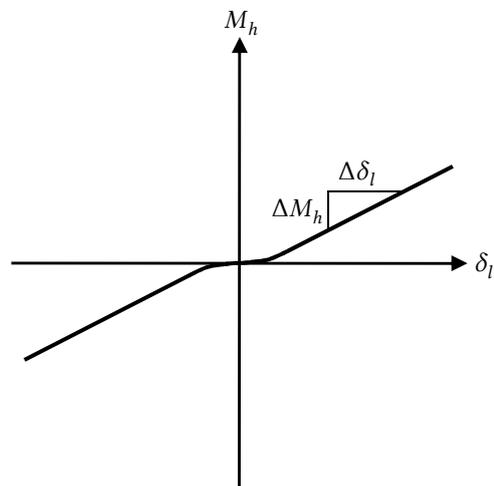
Interessanter ist jedoch eine Quantifizierungsmöglichkeit, die eine Bewertung des Lenkgefühls ohne Probanden ermöglicht. Die subjektive Bewertung des Lenkgefühls durch Probanden unterliegt zwei wesentlichen Einschränkungen. Zum einen ist die Reproduzierbarkeit der Bewertung begrenzt und zum anderen ist eine Subjektivbewertung erst in einem späten Stadium der Produktentwicklung möglich, wenn bereits reale Fahrzeuge verfügbar sind. Die Reproduzierbarkeit lässt sich zwar durch Schulung und Erfahrung steigern, was jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Aufwand bedeutet. Deswegen wird vielfach nach einer objektiven Bewertung gestrebt, die reproduzierbar numerische Kennwerte generiert, aus denen sich wiederum rechnerisch Subjektivurteile ableiten lassen. Untersuchungen zu diesem Thema sind unter dem Stichwort *Objektivierung* bekannt.

Zomotor, Braess und Rönitz geben in [93–96] einen generellen Überblick über objektive „Verfahren zur Bewertung des Fahrverhaltens“, ebenso Rompe und Heißing in [70]. Die Objektivierung von Handlingeigenschaften ist ein sehr weites Feld, das hier nicht vollständig dargestellt werden soll. Im Folgenden wird ein Überblick über Untersuchungen gegeben, die sich zumindest teilweise mit dem Lenkgefühl befassen. Zur Vertiefung der Thematik sei im Hinblick auf die Objektivierung des Lenkverhaltens beispielsweise auf Harrer verwiesen (vgl. [41]).

Ein intensiv bearbeitetes Forschungsfeld stellt das *On-Center-Handling* dar. Nach Farrer ist dieses durch das Zusammenspiel von Lenkaktivität, Lenkgefühl und Fahrzeugreaktion bei kleinen Lenkbewegungen um die Mittellage charakterisiert (vgl. [32]). Nach den internationalen Normen ISO 13674-1 und -2 können im sog. *Weave Test* und *Transition Test* Kennwerte zur Beschreibung des On-Center-Handling erzeugt werden [1, 2]. Beim Weave Test handelt es sich um sinusförmige Lenkbewegungen bei konstanter Fahrgeschwindigkeit, Frequenz und Amplitude. Beim Transition Test wird bei konstanter Fahrgeschwindigkeit langsam aus der Mittellage herausgelenkt. Aus den gemessenen fahrdynamischen Größen beider Manöver werden zahlreiche Kennwerte ermittelt, die beispielsweise das Zusammenspiel von Lenkmoment und Lenkwinkel, Gierrate und Lenkwinkel oder Lenkmoment und Querschleunigung kennzeichnen (Beispiele siehe Bilder 1.3 und 1.4). Diese Normen gehen unter anderem auf die Arbeiten von Norman [62] und Farrer [32] zurück. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wurden z. B. von Deppermann [28], Dettki [29], Salaani et al. [73] und Sato et al. [75] durchgeführt.



**Bild 1.3:** Ermittlung der Lenkungsreibung und -hysterese mittels Weave Test nach ISO 13674-1 [1]



**Bild 1.4:** Ermittlung des Lenkmomentgradienten um die Mitte durch den Transition Test nach ISO 13674-2 [2]

Peppler et al. und Farrer führen auch den nächsten Schritt der „klassischen“ Objektivierung durch, eine Subjektiv-Objektiv-Korrelation (vgl. [32, 67]). Beide konzentrieren sich auf das On-Center-Handling.

Brunn und Harrer zeigen in [19] Untersuchungen zur Objektivierung der Lenkungsrückmeldung durch Analyse des Lenkmoments im Frequenzbereich.

Harrer stellt in [40] Korrelationsanalysen mit einer großen Anzahl an bewerteten Fahrzeugen vor. Die Untersuchung geht zudem deutlich über das reine On-Center-Handling hinaus. Eine ähnlich große Zahl von Fahrzeugen und Bewertungskriterien ist bei Koide und Kawakami zu finden. Auch dort wird versucht, Subjektivurteile durch statistische Werkzeuge mit Messdaten zu verknüpfen [54]. Gies und Marusic beschreiben eine Methode, die nicht nur Expertenurteile und Messwerte verknüpft, sondern eine bessere Korrelation von Kundenurteilen und Messwerten erlauben soll [36].

### **Alternative Methoden zur Objektivierung**

Ein etwas anderer Ansatz als die klassische Verknüpfung von Messwerten mit Subjektivurteilen ist die Nutzung mathematischer Fahrermodelle zur Objektivierung. Ein realer Fahrer vollzieht im Simulator oder Realfahrzeug eine Bewertungsfahrt. Der dabei entstehende Lenkradwinkelverlauf wird von einem Fahrermodell nachgebildet, z. B. auf Basis einer Vorausschau-Krümmung und der Abweichung vom Soll-Kurs. Die Grundidee ist, dass sich ein menschlicher Fahrer an das Fahrzeugverhalten und die Fahrsituation adaptiert, um unabhängig vom Fahrzeug ein möglichst konstantes Fahrer-Fahrzeug-Verhalten einzustellen. Die Parameter des Fahrermodells sollen ein Maß für diese Adaption darstellen (vgl. [45]). Diese Adaption in Form der Fahrermodell-Parameter kann dann wiederum mit Subjektivurteilen verknüpft werden. Die grundsätzliche Methode ähnelt also der klassischen Objektivierung, jedoch werden die objektiven Kennwerte auf andere Art gewonnen. Decker reißt die Objektivierung mit Fahrermodellen an [27], Henze [45] wendet diese Methode im Fahrsimulator an. Schimmel et al. erweitern sie auf die Anwendung im Fahrversuch, wodurch reale Fahrphysik und reales Fahrverhalten sichergestellt sind [68, 76].

Eine weitere Methode zur Gewinnung objektiver Kennwerte ist der Fahrversuch im Simulator. Bei den zuvor beschriebenen Methoden werden viele unterschiedliche Fahrzeuge vermessen und bewertet, um eine Funktion zu finden, die Messwerte Subjektivurteilen zuordnet. Teilweise wird dabei auch versucht, optimale Ausprägungen zu finden, d. h. Wertebereiche, die gute Subjektivurteile versprechen. Im Fahrsimulator kann diese Suche nach Optimalwerten gegenüber dem Realversuch verfeinert werden. Bertollini et al. [16] sowie Zong et al. [97] haben Probanden die Möglichkeit gegeben, das Lenkmomentniveau so lange einzustellen, bis es ihnen am besten gefallen hat. Dies wurde bei Bertollini et al. bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt und bei Zong et al. zusätzlich bei verschiedenen Querbeschleunigungswerten. Ergebnis sind Kennlinien mit optimalem Verlauf des Lenkmomentniveaus über Geschwindigkeit bzw. Querbeschleunigung wie z. B. in Bild 1.5 dargestellt.

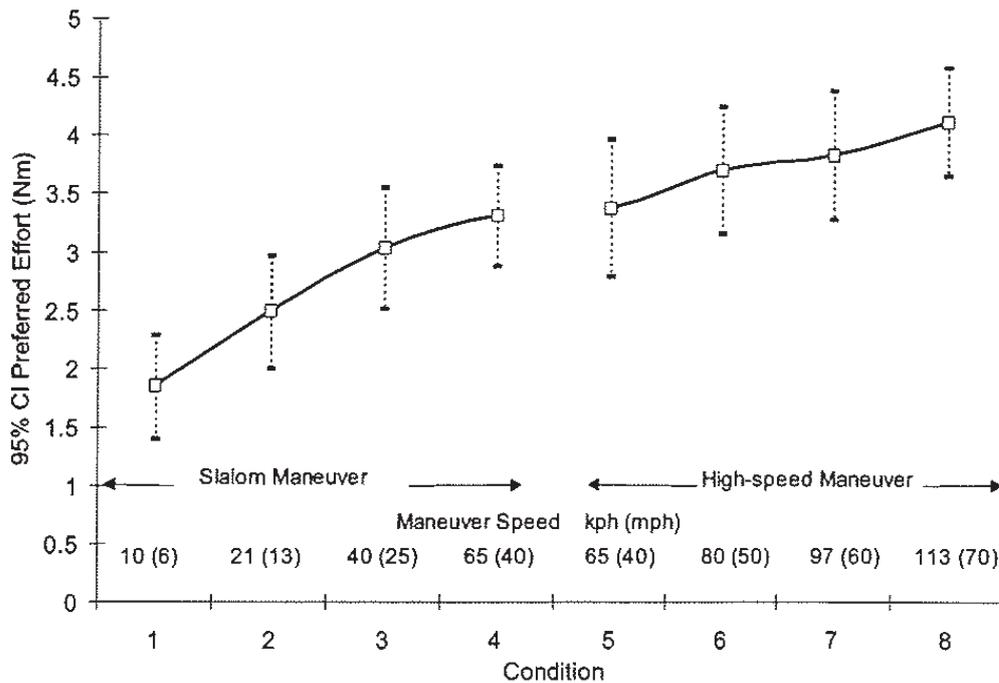


Bild 1.5: Bevorzugtes Lenkmomentniveau über der Fahrgeschwindigkeit nach Bertollini et al. [16]

## Anwendung

Ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung objektiver Beurteilungskriterien ist in [23] zu finden. Camuffo et al. optimieren das Unterstützungsmoment und die Dämpfung einer elektromechanischen Servolenkung in der Simulation. Objektive Beurteilungskriterien dienen zur numerischen Bewertung der Optimierungsmaßnahmen. Durch die vorgeschlagene Vorgehensweise wird die anschließende Abstimmung im Realfahrzeug verkürzt.

Der Stand der Technik hinsichtlich der objektiven Bewertung des Lenkgefühls lässt jedoch noch einige Fragen offen. Beispielsweise fehlen Methoden zur abschließenden Beurteilung der Fahrbahnrückmeldung oder der Degression im Grenzbereich.

Zomotor et al. haben im Jahr 1977 festgestellt, dass die „Prüfung des Fahrverhaltens durch Spezialisten im Fahrbetrieb ... die heute noch immer wirksamste Methode“ sei [95]. Und auch 2008 bestätigt Harrer dies zum größten Teil: es „... wurde gezeigt, dass eine Verknüpfung der subjektiven Bewertungen der Lenkeigenschaften mit objektiven Parametern für den On-Centre Bereich der Fahrdynamik möglich ist und die gewonnenen Erkenntnisse den Fahrwerksentwicklungsprozess durch eine entsprechende Zielbereichsdefinition unterstützen können. Dennoch kann das ... Fahrerlebnis nicht zur Gänze objektiviert bzw. in Zahlen gefasst werden. In der Gesamtheit kann es heute und in absehbarer Zukunft nur mit Hilfe aller Sinne erfahren und genossen werden“ [41].

### 1.2.1.3 Optimierung des Lenkgefühls mit aktiven Lenksystemen

Aktive Lenksysteme erlauben durch freie Gestaltung des Lenkmoments oder Addition beliebiger Momente die Umsetzung verschiedener Funktionen zur Optimierung des Lenkgefühls. Dazu durchgeführte Arbeiten werden im Folgenden vorgestellt, gegliedert nach dem verwendeten Lenksystem. Ein zusätzlicher Elektromotor ermöglicht bei einer hydraulischen Servolenkung die Lenkmomentüberlagerung, bis hin zur nahezu vollständigen Kompensation der realen Rückstellkräfte. Elektromechanische Lenksysteme und Steer-by-Wire erlauben von Haus aus die aktive Veränderung, bzw. Gestaltung, des Lenkmoments.

#### Lenkmomentüberlagerung

Buschardt hat verschiedene Versuche durchgeführt, bei denen dem Lenkmoment einer hydraulischen Servolenkung ein zusätzliches Lenkmoment durch einen Elektromotor in der Lenksäule überlagert wird [22]. Durch den Überlagerungsantrieb kann das Lenkmoment der Servolenkung komplett aufgehoben und zusätzlich ein synthetisches Moment überlagert werden. Es werden verschiedene Lenkmomentfunktionen umgesetzt und in einer Versuchsreihe subjektiv bewertet. Eine momentenfreie Lenkung ohne jegliche Krafrückwirkung weist demnach ein deutlich schlechteres Lenkgefühl auf, als eine herkömmliche Servolenkung. Ein rein lenkwinkelproportionales Lenkmoment mit simulierter Reibung wird ähnlich beurteilt, wie eine herkömmliche Lenkung, jedoch mit deutlichen Abstrichen hinsichtlich Fahr- und Straßenzustand. Um Reibwertänderungen zwischen Reifen und Fahrbahn deutlicher spürbar zu machen, wird eine Variante realisiert, bei der dem Lenkmoment der Servolenkung eine simulierte Reibung überlagert wird. Der Betrag der Reibung wird bei Verringerung des Fahrbahnreibwerts ebenfalls reduziert. Die Probanden bewerteten diese Variante besser, als die herkömmliche Lenkung. Zwei weitere Varianten dienen der Untersuchung von querbeschleunigungs- bzw. gierratenproportionalen Lenkmomenten. Beide werden tendenziell besser bewertet, als die Servolenkung, nachteilig sind jedoch ein schlechtes Mittengefühl und ein instabiles Rückstellverhalten bei höheren Geschwindigkeiten. Zur Verbesserung der Mittellage wird ein lenkwinkelabhängiges Moment um die Mitte eingeführt. Die Rückstellung wird mit Dämpfungsanteilen stabilisiert, zum einen abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, zum anderen abhängig vom Quadrat der Lenkwinkelgeschwindigkeit.

Barthenheier et al. verwenden einen ähnlichen Versuchsaufbau wie Buschardt mit der Möglichkeit, einer hydraulischen Servolenkung zusätzliche Momente elektromotorisch zu überlagern (Vgl. Bild 1.6) [12, 13, 88]. Es wird darauf hingewiesen, dass nicht alle Anteile des Handmoments der Servolenkung ausgeblendet werden können, bedingt durch die Dynamik des elektrischen Antriebs und seiner Regelung. Dies trifft beim verwendeten System vor allem auf Vibrationen zu, die sich oberhalb der Regelkreiseckfrequenz von ca. 20 Hz befinden.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen sind grundlegende Erkenntnisse, ob je nach Streckenart, Geschlecht, Alter oder Fahrstil des Fahrers verschiedene Lenkmomentcharakteristiken bevorzugt werden. Dazu werden bei Fahrten in der Stadt, auf einer Landstraße und einer Autobahn Lenkmomentfunktionen mit Variation von Rückstellmoment, Reibung und Dämpfung untersucht. Insgesamt 180 Probanden wurden nach der Fahrt befragt zu Ihrem Empfinden von Komfort, Sportlichkeit/Fahrspaß und Sicherheit sowie einer allgemeinen Bevorzugung der jeweiligen Variante. Bei der Auswertung werden tatsächlich unterschiedliche



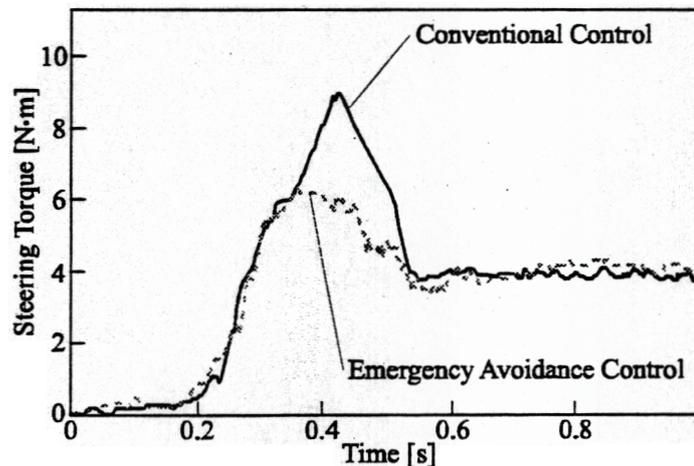


Bild 1.7: Gezielte Veränderung des Lenkmoments bei einem Ausweichmanöver [59]

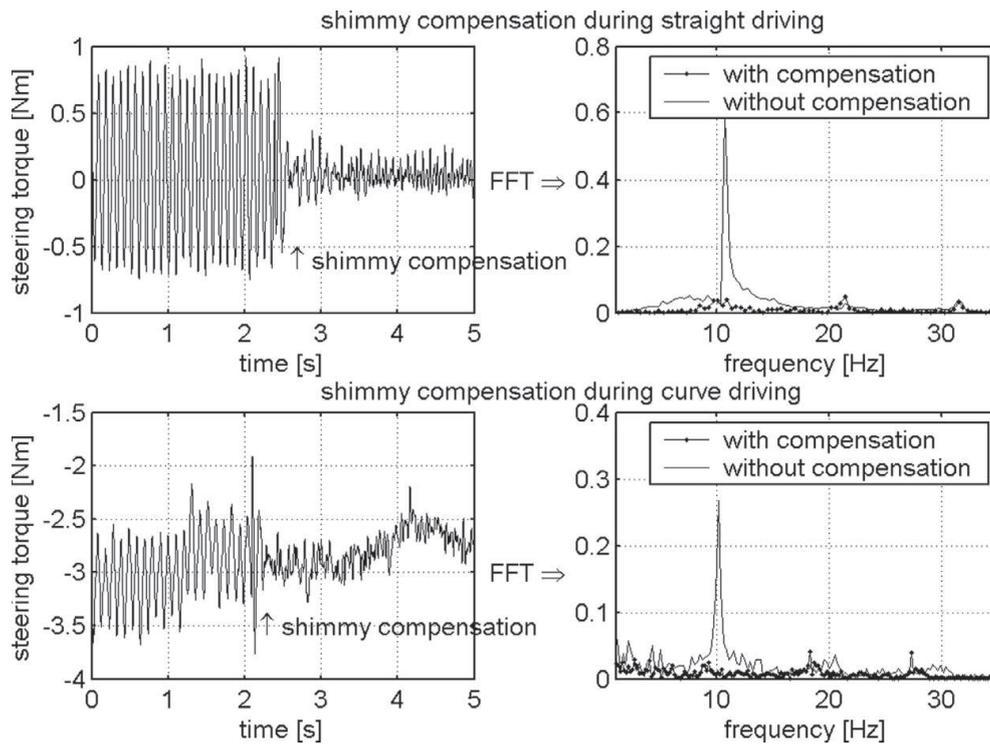
### Elektromechanische Lenksysteme

Okamoto et al. verwenden in [64] die Änderungsgeschwindigkeit des Lenkmoments ( $\dot{M}_h$ ) zur Verbesserung des Lenkgefühls bei verschiedenen EPS-Lenkungen.  $\dot{M}_h$  wird skaliert zum Unterstützungsmoment addiert, wodurch sich die gefühlte Trägheit des EPS-Motors sowie selbsterregte Schwingungen im Stillstand reduzieren lassen. Eine zu große Skalierung führt jedoch zu einem schlechten Rückstellverhalten bei losgelassener Lenkung. Die Rückstellgeschwindigkeit steigt durch den Ableitungsterm an, wodurch es zum Überschwingen über die Mittellage kommen kann.

Nakano et al. zeigen in [59] eine situationsabhängige Veränderung der Unterstützungskraft einer EPS-Lenkung. Die Situationen *stationäre Kreisfahrt*, *Slalom*, *Ausweichen im Notfall* und *Wendemanöver* werden durch Analyse von Lenkmanöver- und Fahrdynamikdaten erkannt.

Zum normalen Unterstützungsmoment wird ein Anteil addiert, der von der Änderungsgeschwindigkeit des Lenkmoments,  $\dot{M}_h$ , abhängt und je nach Situation anders ausgeprägt ist. Mit einem Elektromyogramm zur Intensitätsmessung der Muskelaktivität wurde in Fahrversuchen die Belastung der Fahrer untersucht. Die situationsabhängige Unterstützung weist dabei Vorteile gegenüber der normalen Servounterstützung auf und gegenüber einer Variante mit erhöhter Unterstützung, also verringertem Lenkmoment. Zur Bewertung des Lenkgefühls werden Verfahren nach Sato ([74]) angewandt, die allerdings nur für die Mittellage relevant sind. Die Ergebnisse zeigen eine Verringerung der Fahrerbelastung ohne Beeinträchtigung des Lenkgefühls.

McCann untersucht simulativ den Einfluss eines giergeschwindigkeitsabhängigen Lenkmomentanteils auf die Stabilität des Fahrer-Fahrzeug-Systems (vgl. [56]). Dazu wird ein



**Bild 1.8:** Reduktion von Lenkraddrehschwingungen mit einer aktiven Momentenüberlagerung [38]

Fahrzeugmodell mit EPS-Lenkung mit einem Fahrermodell gekoppelt. Wird dem Unterstützungsmoment der EPS ein zusätzlicher Anteil proportional zur Gierrate aufgeschaltet, zeigen sich Verbesserungen der Gesamtsystemstabilität.

Von Groll et al. zeigen in [38] die Reduktion von Lenkraddrehschwingungen mit einem Elektromotor, der in die Lenksäule einer hydraulischen Servolenkung integriert ist. Periodische Lenkraddrehschwingungen, beispielsweise verursacht durch eine Radunwucht, werden durch ihr periodisches Auftreten erkannt. Mit einem elektrischen Aktor in der Lenksäule wird ein entgegengerichtetes Moment mit passendem Betrag und Phasenverhalten erzeugt, um die anregenden Momente zu kompensieren und so Lenkraddrehschwingungen zu vermeiden.

Den gleichen Ansatz realisiert von Groll in [37] unter Verwendung einer elektrischen Servolenkung. Um die tendenziell schlechtere Rückmeldung einer EPS-Lenkung zu verbessern, wird dort eine weitere Funktion vorgestellt. Zur Verstärkung der Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts wird mit Hilfe eines vereinfachten Einspurmodells aus Gierrate und Querbewegung eine Ersatzseitenkraft an der Vorderachse berechnet. Diese wird verstärkt und hochpassgefiltert durch den Elektromotor der EPS dem Lenkmoment aufgeschaltet.

Die grundsätzliche Wirksamkeit beider Ansätze wird im Realfahrzeug mit Messungen belegt. Die Rückmeldeverstärkung wird mit einer  $K_H$ -Wert-Beurteilung nach VDI-Richtlinie 2057 bewertet. Eine Subjektive Bewertung des empfundenen Fahrbahnkontakts erfolgt nicht.

Ein ähnliche Zielrichtung wird in [81] verfolgt. Unter der Annahme, dass nützliche Infor-

mationen im Lenkmoment in Frequenzen kleiner 5 Hz zu finden sind, Störungen hingegen bei mehr als 13 Hz, werden höhere Frequenzen mit einer EPS gedämpft. Dazu wird das gemessene Lenkmoment phasenkorrigiert und hochpassgefiltert, anschließend gedämpft und über den EPS-Motor negativ aufgeschaltet zur Reduktion der höherfrequenten Lenkmomentanteile. Simulation und Fahrversuch weisen die Wirksamkeit bei Frequenzen ab 20 Hz nach.

### Steer-by-Wire

Niemann et al. untersuchen mit einem SbW-Fahrzeug künstliche Lenkmomente auf Basis der Quer- und der Gierbeschleunigung (vgl. [60]). Ein zusätzlicher Anteil des Lenkmoments wird aus Lenkwinkel und Fahrgeschwindigkeit berechnet. Probandenversuche zeigen, dass das Fahrer-Fahrzeug-Regelverhalten bei der Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage verbessert werden kann. Bei Aufschaltung eines querbeschleunigungsabhängigen Moments ergeben sich kürzere Reaktionszeiten (Zeitverzug bis zum Beginn der Lenkreaktion). Gierbeschleunigungsabhängige Momente zeigen keinen positiven Einfluss.

Chai et al. haben in einem Steer-by-Wire-Fahrzeug drei Varianten zur Berechnung des Lenkmoments umgesetzt [25]:

$$\begin{aligned}M_h &= K_1 \cdot \delta_l \\M_h &= K_2 \cdot \dot{\psi} \\M_h &= K_3 \cdot a_y\end{aligned}$$

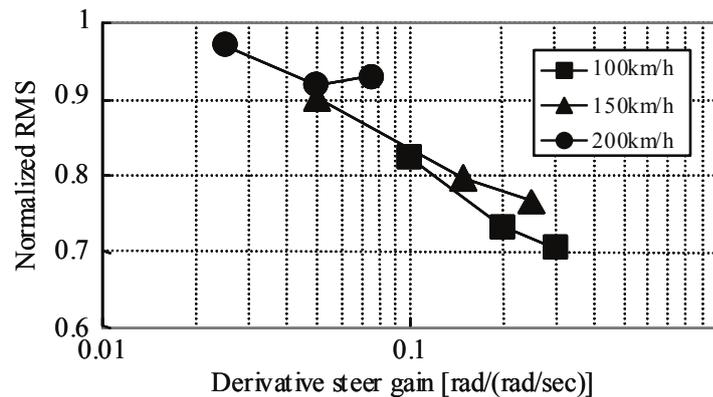
$K_1$  bis  $K_3$  sind dabei konstante Faktoren. In einer Subjektivbewertung bei einem Spurwechsel bei 60 km/h wurden diese Varianten bewertet. Das querbeschleunigungs- bzw. gieratenproportionale Moment wird schlecht bewertet, weil beide Messgrößen einen deutlichen Zeitverzug aufweisen, womit das Lenkmoment dem Lenkwinkel um bis zu ca. 0,4 s nacheilt. Bis zu 0,2 s Zeitverzug werden akzeptabel bewertet. Die Untersuchung wurde jedoch lediglich mit zwei Probanden bei einem Fahrmanöver durchgeführt.

Bei Steer-by-Wire-Fahrzeugen können sowohl die Lenkübersetzung, als auch das Lenkmoment frei gestaltet werden. Auch die gezielte Beeinflussung von Übersetzung *und* Moment zur Verbesserung von Lenkgefühl und Lenkverhalten wurde bereits untersucht, wie die folgenden Arbeiten zeigen.

In einer weiteren Untersuchung fügen Chai et al. dem Radwinkel  $\delta$  und dem Lenkmoment  $M_h$  Anteile hinzu, die von der Lenkgeschwindigkeit abhängig sind [24]. Die Berechnung dieser Größen verläuft nach folgendem Muster im Frequenzbereich:

$$\begin{aligned}M_h &= K1 \cdot (1 + \tau_T s) \cdot \delta_h \\ \delta &= G1 \cdot (1 + \tau_D s) \cdot \delta_h\end{aligned}$$

Folglich werden eine *Vorhaltelenkung* mit der Zeitkonstanten  $\tau_D$  und ein Dämpfungsanteil im Lenkmoment mit  $\tau_T$  dargestellt. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Vorhaltelenkung die Agilität erhöht und die Belastung des Fahrers verringert. Die Probanden haben bei verschiedenen Kombinationen stets ein Verhältnis von  $\tau_T = \frac{1}{2}\tau_D$  am besten bewertet, unabhängig vom Absolutbetrag von  $\tau_D$ . Auch diese Versuche wurden mit nur zwei Probanden bei einem einfachen Spurwechsel durchgeführt.



**Bild 1.9:** Einfluss einer Vorhaltlenkung auf die Gierrate bei Einbringung von Störungen [35]

Onoda et al. zeigen eine SbW-Lenkung, die kein Umgreifen erfordert, jedoch ein harmonischeres Lenkverhalten erzeugt, als eine sehr direkte lineare Übersetzung [65]. Dazu wurden Versuchsfahrten mit direkter linearer Übersetzung durchgeführt und der Lenkwinkelverlauf analysiert. Zur Analyse wird auf eine Modellvorstellung zurückgegriffen, die das menschliche Lenkverhalten als Kombination aus Vorsteuerung und Kompensationsregelung beschreibt. Davon ausgehend werden die zahlreichen Lenkkorrekturen darauf zurückgeführt, dass die Vorsteuerung von der bisherigen Erfahrung mit weniger direkten Lenkübersetzungen geprägt ist; zunächst wird zu viel gelenkt, anschließend muss korrigiert werden, um dem Wunschkurs zu folgen. Neben dynamischen Veränderungen an der Lenkübersetzung wird zur Verringerung des Korrekturaufwands auch das Lenkmoment gezielt verändert. Die simulierte Reibung steigt mit der Gierrate des Fahrzeugs, die Dämpfung steigt mit der Lenkwinkelgeschwindigkeit. Ungewollt schnelle Lenkbewegungen werden dadurch gedämpft. In Fahrversuchen wird nachgewiesen, dass mit der Summe der Maßnahmen weniger Lenkkorrekturen nötig sind, als bei einer linearen direkten Lenkübersetzung.

Fukui et al. untersuchen im Fahrsimulator den Einfluss von Lenkübersetzung und Lenkmoment auf die Fahrstabilität (vgl. [35]). Die entwickelten Lenkfunktionen würden im Realfahrzeug Steer-by-Wire voraussetzen, oder eine Kombination aus Winkelüberlagerungslenkung und elektromechanischer Lenkhilfe. Bei Geradeausfahrt wird eine Störung (Seitenkraft oder Giermoment) eingebracht und der Einfluss der Lenkübersetzung und einer Vorhaltlenkung untersucht. Kleine (direkte) Lenkübersetzungen führen zu einer höheren Schleuderschwärze. Bei der Vorhaltlenkung wird dem Radwinkel ein Anteil abhängig von der Lenkwinkelgeschwindigkeit aufgeschaltet. Je höher dieser Anteil ausfällt, desto geringer sind die RMS-Werte (Root Mean Square) der Gierrate (bezogen auf die Fahrt ohne Vorhaltlenkung) direkt nach Einbringung der Störung (vgl. Bild 1.9). Nach der ersten Ausregelung der Störung ist das Bild jedoch uneinheitlich - die RMS-Werte nehmen mit zunehmendem Anteil der Lenkwinkelgeschwindigkeit zunächst ab, steigen jedoch bei größeren Anteilen

wieder an.

Für den Fall *Untersteuern* werden zwei Varianten mit dem unveränderten Fahrzeug verglichen. Bei einer Variante wird während des Untersteuerns die Lenkübersetzung weniger direkt, in der zweiten Variante wird zusätzlich das rückstellende Lenkmoment erhöht. Das Untersteuern wird durch die Abweichung der gemessenen Gierrate von einer mittels Einspurmodell berechneten Gierrate detektiert. 41 % der Probanden gelangen beim kombinierten Eingriff die geringsten Kursabweichungen, 31 % bei der weniger direkten Übersetzung. Die restlichen Probanden waren nach Fukui et al. erfahrener und empfanden die Eingriffe in Lenkmoment und -übersetzung störend. Ihnen gelangen mit dem Standardfahrzeug die geringsten Kursabweichungen. Beim Übersteuern wird ein Zusatzlenkwinkel in Abhängigkeit der zuvor beschriebenen Gierratendifferenz gestellt. Alternativ wird das Lenkmoment abhängig von der Bremsdruckdifferenz zwischen linkem und rechtem Vorderrad erhöht, die durch eine Stabilitätsregelung verursacht wird. Beide Ansätze führen jeweils zu geringeren Schwimmwinkeln im Vergleich zum Standardfahrzeug. Bei einer  $\mu$ -split-Bremsung werden ein Zusatzwinkel oder ein Zusatzlenkmoment gestellt, abhängig von der Bremsdruckdifferenz, die eine ABS-Regelung hervorruft. Beide Maßnahmen zeigen Wirkung, die Lenkmomentänderung jedoch nicht bei allen Fahrern. Über alle Versuche hinweg wird festgestellt, dass Änderungen des Lenkwinkels bzw. der Lenkübersetzung die Fahrstabilität stärker beeinflussen können, als veränderte Lenkmomente, zumindest bei Normalfahrern.

### 1.2.2 Lenkmomentsimulation mit Steer-by-Wire Lenksystemen

Eine Steer-by-Wire-Lenkung lässt sich als Master-Slave-System auffassen, beispielhaft in Bild 1.10 dargestellt.

In der Ergonomie sind nach [71] bei solchen „rückwirkungsfreien Servosystemen“ drei Arten bekannt, ein „Steuergefühl“ zu erzeugen:

1. „durch die computergestützte Generierung eines synthetischen Steuerdruckes aus meßbaren Systemdaten beliebiger Herkunft
2. durch Restaurierung eines synthetischen Steuergefühls auf der Grundlage analoger Modellierung der beschreibenden Differentialgleichung der Maschine oder
3. durch die Vermittlung positions- und bewegungsproportionaler Rückstellkräfte infolge der mechanischen Eigenschaften der Armatur selbst, wobei jedoch die propriozeptive Rückmeldung keine Information über die Zustandsgrößen der Maschine liefert.“

Ein passives, beispielsweise durch eine Drehfeder zentriertes, Lenkrad entsprechend Punkt drei kann keinerlei Informationen über den Fahrzustand liefern und damit die zahlreichen Anforderungen an ein *gutes* Lenkgefühl nach Kapitel 1.2.1 nicht erfüllen.

Folglich bleiben zwei Möglichkeiten zur Bestimmung des Lenkmoments. Die zu Grunde liegenden Kräfte können zum einen gemessen werden, entweder *direkt*, z. B. durch Kraftmessdosen oder Dehnungsmessstreifen (DMS), oder auch *indirekt*, beispielsweise über die Leistungsaufnahme der Radaktorik. Alternativ kann ein modellbasierter Ansatz verfolgt

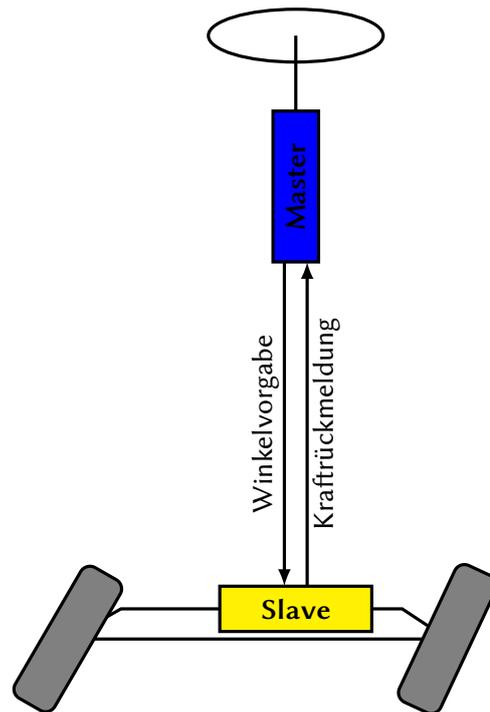


Bild 1.10: SbW-Lenkung als Master-Slave-System

werden, indem beispielsweise die Eigenschaften des Fahrzeugs und des Reifen-Fahrbahn-Kontakts mathematisch modelliert werden. Auch dazu sind Messsignale als Modelleingänge erforderlich, allerdings kann dabei auf Sensoren zurückgegriffen werden, die in modernen Fahrzeugen ohnehin vorhanden sind, wie etwa Fahrgeschwindigkeit, Giergeschwindigkeit oder Querbeschleunigung.

Zur Darstellung eines künstlichen Lenkgefühls ist zunächst ein Lenkmomentaktor nötig. Kapitel 1.2.2.1 verweist auf einige Arbeiten, die sich damit befassen haben. In den nachfolgenden Kapiteln wird speziell auf frühere Arbeiten eingegangen, die sich mit der Erzeugung des Lenkgefühls mit realistischer Nachbildung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts befassen, um daraus weiteren Forschungsbedarf abzuleiten. Die dort beschriebenen Untersuchungen verfolgen die Zielsetzung, mit SbW das Zusammenspiel von Reifen und Fahrbahn abzubilden. Dadurch unterscheiden sie sich von jenen in Kapitel 1.2.1.3, die versuchen, das Zusammenwirken von Fahrer und Fahrzeug zu verbessern.

#### 1.2.2.1 Aktorik zur Darstellung künstlicher Lenkmomente

Bajcinca beschreibt in [7, 9–11] u. a. einen Lenkmomentaktor mit Getriebestufe zur Steigerung der Leistungsdichte. Störende Einflüsse von Motor und Getriebe auf das spürbare Lenkmoment werden über einen Regler kompensiert. Da das vom Fahrer aufgebrachte Moment diese Regelung stört, wird ein Drehmomentsensor verwendet, um die Fahrereinflüsse auf die Regelung zu eliminieren. Die Bestimmung der Sollgröße für den Lenkmomentaktor im Realfahrzeug wird nicht betrachtet.

In [14] und [15] wird ebenfalls ein Lenkmomentaktor für Steer-by-Wire beschrieben, wobei vor allem die Stromregelung des bürstenlosen Gleichstrommotors dargestellt wird.

Morgando und Velardocchia beschreiben in [57] einen SbW-Prüfstands Aufbau der Lenkmomentaktorik, bestehend aus einem bürstenlosen Gleichstrommotor und einem Planetengetriebe. Zusätzlich wird ein detailliertes mathematisches Modell der Radaufhängung und des Lenksystems dargestellt, das zur Berechnung des Lenkmoments verwendet wird.

Yu et al. zeigen in [92] einen Hardware-in-the-loop-Prüfstand (HIL), in dem ebenfalls ein Gleichstrommotor mit Getriebestufe verwendet wird.

### 1.2.2.2 Messung der Reifenrückstellkräfte

Niemann et al. haben für Grundlagenuntersuchungen ein Steer-by-Wire-Fahrzeug realisiert (vgl. [60]). Bei einem herkömmlichen Fahrzeug mit hydraulischer Lenkung wird eine Trennkupplung in die Lenksäule eingebracht. Ein Stellmotor wird zur Bewegung der Räder eingesetzt, gesteuert von einem Analogrechner. Ein permanenterregter Gleichstrommotor dient zur Lenkmomentsimulation, ebenfalls durch einen Analogrechner angesteuert. Neben den in Kapitel 1.2.1.3 beschriebenen Ansätzen zur Verbesserung des Seitenwindverhaltens werden auch andere Formen der Lenkmomentberechnung beschrieben. Eine davon basiert auf dem am Arbeitszylinder der Servolenkung gemessenen Druck, sie wird jedoch nicht näher beschrieben.

Eine weiteres SbW-System mit Messung der Radrückstellkräfte beschreiben Amberkar et al. (vgl. [3]). Das Lenkgefühl wird hierbei über die Übertragungsfunktion von Lenkradwinkel zu Lenkradmoment bewertet, die sog. *input impedance*. Es wird gezeigt, dass sich bedingt durch die Bandbreite der Lenkmoment- und Radaktoren ein störender Phasenverzug zwischen Lenkwinkel und Lenkmoment einstellt. Dieser wird kompensiert, indem ein künstliches, vom Lenkradwinkel direkt abhängiges Lenkmoment addiert wird. Es ergeben sich neben einer günstigeren Übertragungsfunktion auch ein besseres Rückstellverhalten beim Anreißen oder Loslassen des Lenkrads (*Free Control*) sowie eine Reduktion der Störungen aus Radkräften und der Lenkradaktorik. Das so erzeugte Lenkgefühl wird nicht ausführlich bewertet. Eine Verbesserung des Übertragungsverhaltens lässt sich laut Amberkar jedoch auch durch Erhöhung der Aktorbandbreite erzielen.

### 1.2.2.3 Schätzung der Reifenrückstellkräfte

Bachmann analysiert in [6] die Eignung eines Reifenmodells nach Rill für die Berechnung des Radrückstellmoments in einem Steer-by-Wire-Fahrzeug und diskutiert die Möglichkeit, ein solches Modell im Fahrzeug nur mit den dort vorhandenen Sensoren einzusetzen. Als größtes Problem wird die Bestimmung des Reibwerts vermutet.

Hiraoka et al. zeigen eine vergleichsweise einfache Berechnung des Lenkmoments aus fahrdynamischen Messgrößen (vgl. [46]). Die Seitenkraft an der Vorderachse wird als  $F_{sv} = m_{VA} \cdot a_{y,VA}$  berechnet. Die Masse an der Vorderachse ( $m_{VA}$ ) wird aus Fahrzeugmasse und Schwerpunktlage ermittelt, die Querschleunigung im Schwerpunkt wird zur Vorderachse transformiert:  $a_{y,VA} = a_y + l_v \cdot \ddot{\psi}$ . Das Lenkmoment ergibt sich aus dieser Seitenkraft und einer konstanten Nachlaufstrecke. Simulationen zeigen, dass sich das solchermaßen berechnete Lenkmoment mit dem Reifen-Fahrbahn-Reibwert ändert und auch im fahrdynamischen

Grenzbereich eine degressive Charakteristik aufweist. Untersuchungen im Fahr Simulator zeigen, dass dieses Lenkmoment besser bewertet wird, als ein rein lenkwinkelproportionales.

In [49] und [50] wird ein Störgrößenbeobachter beschrieben, mit dem das Rückstellmoment der Räder geschätzt wird, basierend auf Soll- und Istposition der Radaktorik. Das Soll-Lenkmoment wird durch Multiplikation des geschätzten Rückstellmoments mit einem konstanten Faktor berechnet. Das dynamische Verhalten des Lenkmomentaktors wird über einen Regler kompensiert, so dass möglichst exakt das berechnete Lenkmoment gestellt wird. Eine Validierung des Ansatzes erfolgt im einsitzigen Elektrofahrzeug *Toyota COMS* über einen Vergleich von gemessenem und geschätztem Lenkmoment.

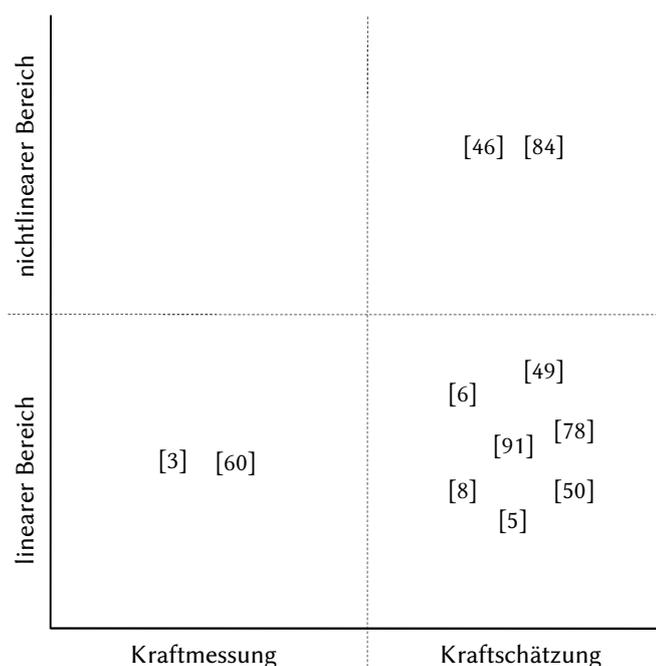
Yao verwendet ebenfalls die Regelabweichung der Radaktorik als Eingang für einen nicht näher beschriebenen Zustandsschätzer (vgl. [91]). Als Vorteil wird genannt, dass das geschätzte Rückstellmoment schneller sei, als eine Messung der Spurstangenkräfte mit Dehnmessstreifen. Ein Vergleich des geschätzten Rückstellmoments bei stehendem Fahrzeug und angehobenem Fahrzeug, ohne Bodenkontakt, zeigt deutliche Unterschiede. Daraus wird geschlossen, dass unterschiedliche Reifen-Fahrbahn-Reibwerte spürbar sein müssten.

Shengbing et al. bestimmen die Zahnstangenkraft aus der Stromaufnahme der Radaktorik (vgl. [78]). Das Lenkmoment ist grundsätzlich proportional zum Motorstrom des Radaktors, wird jedoch skaliert, abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Zusätzlich wird ein Moment addiert, das zur Querbeschleunigung proportional ist. Die Untersuchungen erfolgen an einem HIL-Prüfstand, bei niedrigen Geschwindigkeiten und Querbeschleunigungen. Eine Beurteilung des Lenkgefühls bleibt aus.

Bajcinca et al. beschreiben in [8] ein *Extended Kalman Filter* für die Schätzung der Reifenkräfte in seitlicher und Längsrichtung. Die „Reibungskräfte“ werden dabei als stochastischer *Gauss-Markov-Prozess* modelliert. Die Validierungsschriebe zeigen in einer Fahrdynamiksimulation eine sehr gute Übereinstimmung mit gemessenen Kräften.

In [84] wird für die Lenkmomentsimulation in einem SbW-Fahrzeug ein Schätzer für fahrdynamische Zustände aus [98] verwendet. Auf Basis eines Zweispurmodells und eines *Extended Kalman Filters* werden damit u. a. Seitenkräfte, Schräglaufwinkel und der Reibbeiwert bestimmt. Mit einem *Brush Model* als Reifenmodell wird aus Schräglaufwinkel, Reibwert und Normalkraft das Reifenrückstellmoment an den Vorderrädern berechnet. Zusammen mit dem Rückstellmoment aus Seitenkraft und konstruktivem Nachlauf wird somit das gesamte Rückstellmoment an den Vorderrädern bestimmt. Da das *Brush Model* bei kleinen Geschwindigkeiten nicht der Realität entspricht, wird ein zusätzliches Modell für das Rückstellmoment nach [51] verwendet. Die Umrechnung der Zahnstangenkräfte in ein Lenkmoment erfolgt über ein einfaches Lenkungsmodell mit hydraulischer Lenkunterstützung. Validierungsmessungen im Realfahrzeug zeigen eine gute Übereinstimmung von geschätzten und gemessenen Zahnstangenkräften und Lenkmoment.

Asai et al. verwenden den Motorstrom der Radaktorik und die Zahnstangenbeschleunigung als Eingangsgrößen eines Störgrößenbeobachters zur Schätzung der Zahnstangenkraft [5]. In Prüfstandsversuchen beim Lenken gegen eine Feder werden die Federkräfte gut geschätzt. Zusätzlich werden jedoch auch die Reibung und der *Motorripple* der Radaktorik als *innere Störgröße* mit geschätzt. Beides wird mit der Regelung der Lenkmomentaktorik kompensiert. Dieser Ansatz setzt eine Strommessung sowohl in der Radaktorik, als auch in der Lenkmomentaktorik voraus.



**Bild 1.11:** Klassifizierung des Stands der Forschung zur SbW-Lenkgeföhlerzeugung nach Bestimmung der Kraft und Betrachtung des nichtlinearen Fahrbereichs

### 1.3 Schlussfolgerungen und Zielsetzung

Kapitel 1.2.1 hat gezeigt, dass das Lenkgeföhls eine essentielle Informationsquelle für den Fahrer darstellt. Aspekte wie die Erkennung der Annäherung an den Grenzbereich oder die Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts sind für die Fahrsicherheit und den Fahrspaß von Bedeutung und sollten deshalb auch bei SbW-Systemen abgebildet werden. Dazu sind zwei grundlegende Ansätze denkbar: Verwendung zusätzlicher Sensoren zur Messung der relevanten Kräfte oder modellbasierte Schätzung dieser Kräfte auf Basis im Fahrzeug vorhandener Sensoren.

Das Minimalziel muss bei SbW die Darstellung eines Lenkgeföhls sein, das heutigen Lenk-systemen entspricht. Es ist nicht zu erwarten, dass eine neue Technik Akzeptanz findet, die in ihren direkt erlebbaren Eigenschaften bisherigen Systemen unterlegen ist. SbW bietet darüber hinaus nahezu beliebige Freiheitsgrade, das Lenkmoment zu manipulieren und verspricht damit Möglichkeiten, das Lenkgeföhls gegenüber klassischen Lenk-systemen sogar noch zu verbessern.

Der Stand der Forschung zeigt, dass relativ wenige Untersuchungen existieren, die sich eingehend mit der Lenkmomentsimulation mit Kraftmessung auseinandersetzen (vgl. Bild 1.11). Ein Nachteil dieses Ansatzes sind prinzipiell erhöhte Kosten durch zusätzliche Sensorik sowie Sicherheitsbedenken beim Ausfall der Sensoren. Dies sollte jedoch kein Grund sein, ein solches System von vornherein von grundlegenden Untersuchungen auszuschließen.

Mit der steigenden Verfügbarkeit von Rechenleistung und Sensoren im Fahrzeug sind in jüngerer Vergangenheit zahlreiche modellbasierte Zustandsschätzer in den Mittelpunkt des

Interesses gerückt, die ohne Kraftmessung auskommen und trotzdem ein gutes Lenkgefühl vermitteln sollen. I. d. R. werden hier jedoch Fahrmanöver im nichtlinearen Fahrbereich nicht betrachtet. So werden häufig die Seitenkräfte geschätzt, jedoch wird meist die Veränderung des Reifennachlaufs im Grenzbereich nicht abgebildet. Die Validierung erfolgt meist nur in der Simulation, auf dem Prüfstand oder im niederdynamischen Bereich, sofern ein reales Fahrzeug verwendet wird. Einzig Verhoeff et al. führen Realversuche bis in den fahrdynamischen Grenzbereich durch und bilden dabei das nichtlineare Reifenverhalten ab (vgl. [84]). Dort fehlt jedoch, wie in den anderen gezeigten Untersuchungen auch, eine qualifizierte Bewertung des dargestellten Lenkgefühls. Kapitel 1.2.1.2 hat gezeigt, dass die rein objektive Bewertung des Lenkgefühls an Hand von Messgrößen auch nach jahrzehntelanger Forschung noch nicht umfassend möglich ist. Die subjektive Beurteilung im Fahrversuch stellt nach dem derzeitigen Stand der Technik die beste Möglichkeit einer aussagekräftigen Bewertung dar. Da Fahr simulatoren die Fahrphysik und Umwelteinflüsse nur begrenzt abbilden, sollten derartige Fahrversuche zudem im Realfahrzeug erfolgen.

Zur Optimierung des Lenkgefühls mit aktiven Lenksystemen wurden zahlreiche Maßnahmen untersucht, die das Zusammenspiel von Fahrer und Fahrzeug sowie Lenkübersetzung und Lenkmoment verbessern sollen. Beispielsweise wird das Lenkmoment synthetisch aus Gierrate, Querb beschleunigung oder anderen Messgrößen errechnet, oftmals angepasst an verschiedene Fahrsituationen. Die Möglichkeit dazu bietet grundsätzlich bereits eine elektromechanische Servolenkung. Die Übertragung der Reifenrückstellkräfte zum Fahrer wird kaum thematisiert, lediglich bei von Groll und Sugiyama wird das Übertragungsverhalten von Nutzinformationen und Störungen gezielt beeinflusst (vgl. [37, 38, 81]). Gerade die Informationen über den Reifen-Fahrbahn-Kontakt sind mit SbW vermutlich schwierig darzustellen, da sie in derzeitigen Fahrzeugen nicht direkt messbar sind. Gleichzeitig stellen sie, wie eingangs erwähnt, einen essentiellen Teil des Lenkgefühls dar.

Als Ziel der vorliegenden Arbeit wird folglich definiert, unter Verwendung einer SbW-Lenkung ein möglichst gutes Lenkgefühl darzustellen und dies durch Probandenversuche zu evaluieren. Dabei sollen die beiden oben dargestellten grundlegenden Varianten exemplarisch realisiert und verglichen werden. Aufbauend auf diesen Varianten werden Möglichkeiten untersucht, wie sich die Freiheitsgrade der SbW-Lenkmomentsimulation nutzen lassen, um das Lenkgefühl weiter zu verbessern. Schwerpunkte dieser Arbeit sind dabei die Übermittlung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts und die Berücksichtigung des fahrdynamischen Grenzbereichs.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

Kapitel 2 beschreibt die verschiedenen Ansätze zur Berechnung des Lenkmoments mit und ohne Messung der Reifenrückstellkräfte.

Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 verschiedene Funktionen entwickelt, die das Lenkgefühl verbessern sollen.

Um eine möglichst objektive Validierung und Bewertung der Ansätze zur Lenkmomentberechnung und Lenkgefühloptimierung zu ermöglichen, werden Probandenversuche im Realfahrzeug durchgeführt (Kapitel 4).

## 2 Bestimmung des Lenkmoments

In diesem Kapitel werden zwei Ansätze entwickelt, um bei SbW das Soll-Lenkmoment zu berechnen. In Kapitel 2.1 wird beschrieben, wie bei den durchgeführten Versuchen die Zahnstangenkraft bestimmt wird. Kapitel 2.2 geht anschließend auf die modellbasierte Zustandschätzung der Zahnstangenkraft ein. Um beide Ansätze unter identischen Bedingungen vergleichen zu können, wird jeweils dasselbe Lenkungsmodell zur Berechnung des Lenkmoments aus der Zahnstangenkraft verwendet (siehe Kapitel 2.4). Die Zahnstangenkraft wird als gemeinsame Schnittstelle der verschiedenen Modelle verwendet, weil sie sich relativ gut messtechnisch erfassen lässt.

Für die Herleitung der verwendeten Modelle wird grundsätzlich ein fahrzeugfestes Koordinatensystem nach DIN 70000 mit Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt verwendet.

### 2.1 Messung der Zahnstangenkraft

Die Messung der Zahnstangenkraft erfolgt über Dehnungsmessstreifen (DMS), die auf die Spurstangen appliziert werden. Es wird jeweils eine Vollbrücke verwendet, die vom DMS-Verstärker gespeist und gemessen wird. Die Versorgungsspannung wird über Sechisleitertechnik an den DMS auf den Sollwert geregelt. Der Verstärker gibt die Messwerte auf einen CAN-Bus aus, von dem sie ein angeschlossener Echtzeitrechner einliest (Bild 2.1). Die Summe der Spurstangenkräfte entspricht nicht exakt der Zahnstangenkraft, da je nach Lenkwinkel und Einfederzustand ein Pfeilungswinkel zwischen Spurstangen und Zahnstange vorliegt. Dieser ist jedoch in der Regel sehr klein und wird daher vernachlässigt.



Bild 2.1: Konfiguration der Spurstangenkraftmessung (Bildquellen [30, 82])

## 2.2 Modellbildung des Zahnstangenkraftschätzers

Zur Schätzung der Zahnstangenkraft wird ein Ansatz gemäß Bild 2.2 verfolgt. Die Darstellung ist für eine bessere Übersichtlichkeit gegenüber dem realen Modell vereinfacht. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Teilmodelle detailliert beschrieben.

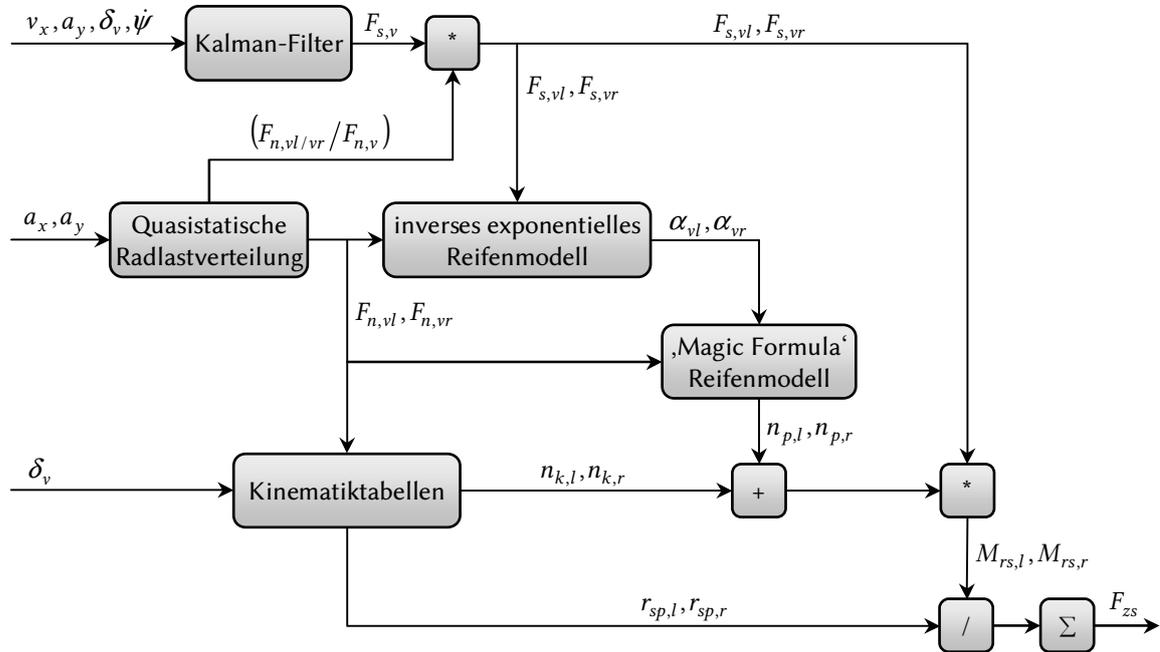


Bild 2.2: Prinzip der Zahnstangenkraftschätzung

Kernstück des Schätzers ist ein Kalman-Filter, das über virtuelle Inversion eines Einspurmodells die Seitenkräfte an Vorder- und Hinterachse schätzt. Dieser Ansatz ist als *Inverse Kalman Filtering* bekannt und wird in ähnlicher Form u. a. in [8] verwendet, wo simulativ sehr gute Ergebnisse erzielt wurden. Die Herleitung erfolgt in Kapitel 2.2.1.

Der weitere Aufbau bildet das Reifenverhalten und die Achskinematik des Fahrzeugs ab. Das Reifenrückstellmoment  $M_r$  setzt sich somit zusammen aus der Seitenkraft  $F_s$  und der Summe aus konstruktivem Nachlauf  $n_k$  und Reifennachlauf  $n_p$ :

$$M_r = F_s \cdot (n_k + n_p). \quad (2.1)$$

Aus dem Reifenrückstellmoment bestimmt sich die Spurstangenkraft über den effektiven Spurfkrafthebelarm  $r_{sp}$ :

$$F_{sps} = \frac{M_r}{r_{sp}}. \quad (2.2)$$

Die Summe beider Spurstangenkräfte wird der Zahnstangenkraft gleichgesetzt, analog zur Messung im vorigen Kapitel. Die kinematischen Größen konstruktiver Nachlauf und Spurfkrafthebelarm ändern sich bei großen Lenkwinkeln und Federwegen teilweise erheblich. Deswegen werden sie über Kinematiktabelle abgebildet, die in einer Mehrkörpersimula-



sie z. B. in [86] beschrieben werden. Ein System sei mit dem Zustandsvektor  $x$  und der Systemmatrix  $A$  durch folgende Differenzengleichung gegeben:

$$x_k = Ax_{k-1} + w_{k-1}. \quad (2.5)$$

Zusätzlich existiert mit der Messmatrix  $H$  folgender mathematischer Zusammenhang zwischen dem Vektor der messbaren Größen ( $z$ ) und dem Zustandsvektor:

$$z_k = Hx_k + v_k. \quad (2.6)$$

$v_k$  und  $w_k$  stellen das Mess- bzw. Prozessrauschen dar und werden als normalverteilt und weiß angenommen. Da das Kalman-Filter nicht den realen Systemzustand berechnet, sondern stets eine Schätzung, wird zur Unterscheidung die Schätzung mit einem Dach gekennzeichnet ( $\hat{x}$ ).

Der eigentliche Filteralgorithmus ist unterteilt in einen Prädiktionsschritt und einen Korrekturschritt. Im Prädiktionsschritt wird zunächst der aktuelle Zustand  $\hat{x}_k^-$  mit Hilfe der Modellgleichungen und dem Zustand zum letzten Zeitschritt  $\hat{x}_{k-1}$  geschätzt:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}. \quad (2.7)$$

Zudem wird die *a priori* Schätzfehlerkovarianz  $P_k^-$  berechnet:

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q. \quad (2.8)$$

$Q$  stellt die Prozessfehlerkovarianzmatrix dar. Im Korrekturschritt wird die Schätzung mit Hilfe der Kalman-Matrix  $K$  und der aktuellen Messwerte  $z_k$  *korrigiert*:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (2.9)$$

$$P_k = (I - K_kH)P_k^-. \quad (2.10)$$

Die Kalman-Matrix ist gegeben durch:

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}. \quad (2.11)$$

$R$  ist die Messfehlerkovarianzmatrix.

Im vorliegenden Fall der Seitenkraftschätzung auf Basis des nichtlinearen Einspurmodells wird folgender Zustandsvektor gewählt:

$$x = [v_y \quad \dot{\psi} \quad F_{s,v} \quad F_{s,h}]^T. \quad (2.12)$$

Mit den Gleichungen 2.3 und 2.4 ergibt sich somit für das kontinuierliche System die Systemmatrix:

$$A_{kont.} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\cos \delta_v}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & 0 & \frac{l_v \cos \delta_v}{J_z} & -\frac{l_h}{J_z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Zur Verwendung der Systemmatrix des kontinuierlichen Systems im diskreten Kalman-Filter wird eine Diskretisierung nach Euler durchgeführt:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + A_{kont.} \hat{x}_{k-1} \Delta_t. \quad (2.14)$$

$\Delta_t$  entspricht der Simulationsschrittweite. Als Messgrößen stehen  $a_y$  und  $\dot{\psi}$  zur Verfügung:

$$z = [ a_y \quad \dot{\psi} ]^T. \quad (2.15)$$

Damit ist die Messmatrix H folgendermaßen definiert:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\cos \delta_v}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & 0 & \frac{l_v \cos \delta_v}{J_z} & -\frac{l_h}{J_z} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

### 2.2.2 Berechnung des Schräglaufwinkels

Als Eingang in das *Magic Formula* Reifenmodell (vgl. [61]) zur Berechnung des Reifennachlaufs ist neben anderen Größen der Schräglaufwinkel erforderlich. Dieser kann bei bekannten Seitenkräften aus der Schräglaufsteifigkeit berechnet werden:

$$\alpha_v = \frac{C_{\alpha v}}{F_{sv}} \quad (2.17)$$

Eine bessere Schätzung bei hohen Querbeschleunigungen kann mit Hilfe des exponentiellen Reifenmodells aus [98] erreicht werden, das ohne Berücksichtigung des Reibwerts durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$F_{sv} = F_n \cdot (1 - e^{-K \cdot |\alpha_v|}) \cdot \text{sign}(\alpha_v) \quad (2.18)$$

Bild 2.4 zeigt den Seitenkraftverlauf über dem Schräglaufwinkel im Vergleich der *Magic Formula*, dem obigen exponentiellen Ansatz und einer linearen Schräglaufsteifigkeit.

Der Parameter  $K$  ist ein Maß für die Schräglaufsteifigkeit. Im Gegensatz zur *Magic Formula* lässt sich Gleichung 2.18 analytisch nach  $\alpha_v$  auflösen, womit sich für den Schräglaufwinkel folgender Zusammenhang ergibt:

$$\alpha_v = -\frac{1}{K} \cdot \ln \left( 1 - \frac{F_{sv}}{F_n} \right) \cdot \text{sign}(F_{sv}). \quad (2.19)$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Vorzeichen von Schräglaufwinkel und Seitenkraft stets gleich sind:

$$\text{sign}(\alpha_v) = \text{sign}(F_{sv}). \quad (2.20)$$

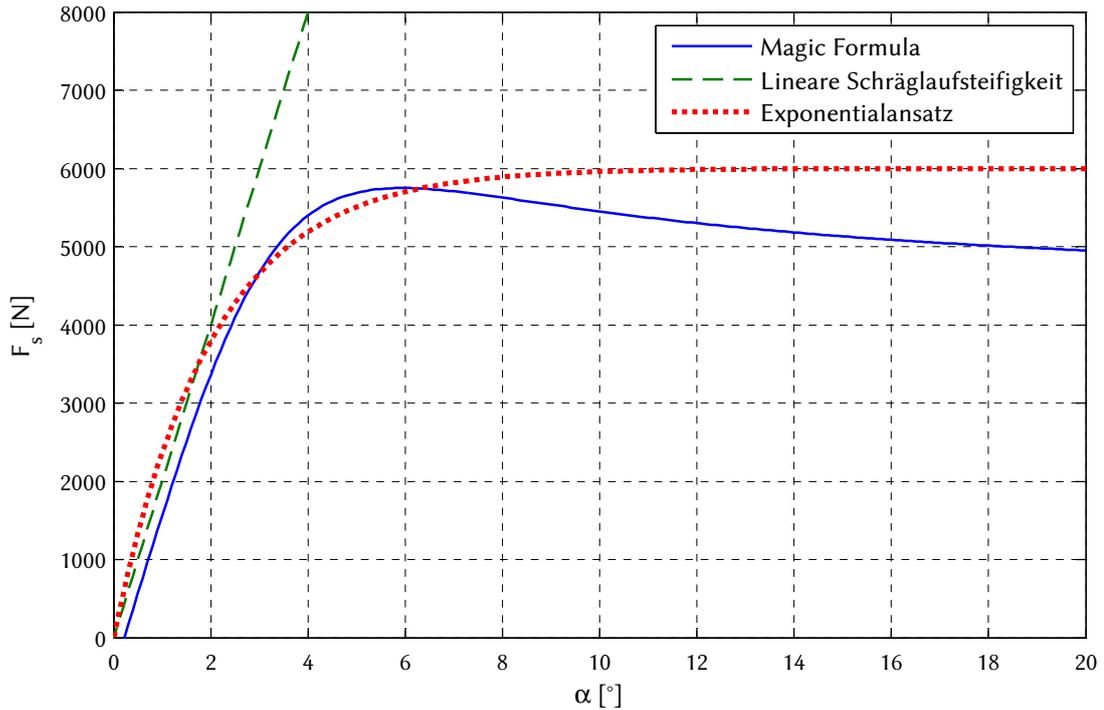


Bild 2.4: Seitenkraft über Schräglaufwinkel bei verschiedenen Reifenmodellen

### 2.2.3 Quasistatische Radlastverteilung

Bild 2.2 zeigt, dass an mehreren Stellen im Modell die Normalkräfte benötigt werden. Diese werden aus Längs- und Querbeschleunigung berechnet. Notwendige Parameter sind dabei die Fahrzeugmasse sowie die Schwerpunktlage. Die Berechnung erfolgt quasistatisch, d. h. ohne Berücksichtigung von Dämpfern und Trägheitsmomenten. Die Wirkung der Stabilisatoren wird ebenfalls vernachlässigt.

Im ersten Schritt wird die Radlastverteilung in Folge der Querbeschleunigung berechnet. Entsprechend Bild 2.5 wird davon ausgegangen, dass das Wankmoment um den Punkt P durch eine Erhöhung der Radlast an der kurvenäußeren Seite und eine betragsmäßig identische Verringerung der Radlast an der kurveninneren Seite abgestützt wird.

Folglich ergibt die Summe der Momente um P den Betrag der abstützenden Kräfte:

$$\Delta F_{n,y} = \frac{m \cdot a_y \cdot h}{b} \quad (2.21)$$

Wird von einer symmetrischen Gewichtsverteilung um die Fahrzeuglängsmittlebene sowie näherungsweise gleicher Spurweite an Vorder- und Hinterachse ausgegangen, so kann eine Fahrzeughälfte als *vertikales Einspurmodell* aufgefasst werden, auf dem die halbe Fahrzeugmasse lastet (siehe Bild 2.6). Zusätzlich wird dieses Halbfahrzeug von der Gewichtsverlagerung durch Querbeschleunigung gemäß Gleichung 2.21 beaufschlagt, wirksam in der  $x$ - und  $z$ -Koordinate des Fahrzeugschwerpunkts  $S$ . Die Erdbeschleunigung  $g$  hat im verwendeten Koordinatensystem ein negatives Vorzeichen, die resultierende Trägheitskraft würde somit im Bild nach oben zeigen. Zur intuitiveren Darstellung wird  $|g|$  verwendet, womit die

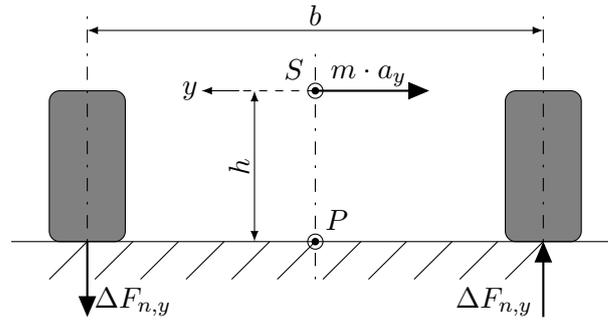


Bild 2.5: Gewichtsverlagerung durch Querbeschleunigung

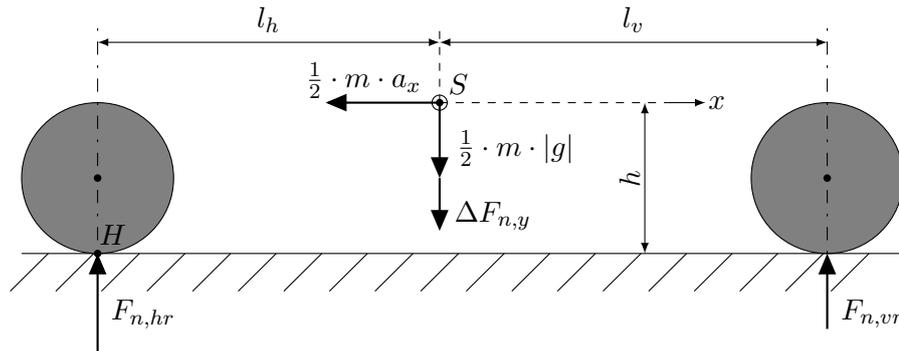


Bild 2.6: Normalkräfte der rechten Räder durch Erd-, Quer- und Längsbeschleunigung

wirksame Kraft auf den Fahrzeugaufbau in negative  $z$ -Richtung weist.

Mit dieser Ersatzvorstellung kann die Normalkraft am rechten Vorderrad durch eine Momentenbilanz um den Punkt  $H$  folgendermaßen berechnet werden:

$$F_{n,vr} = \frac{m}{2l} \cdot \left[ -a_x \cdot h + \left( g + 2 \cdot a_y \cdot \frac{h}{b} \right) \cdot l_h \right] \quad (2.22)$$

Analog dazu gilt für die Normalkraft am vorderen linken Rad:

$$F_{n,vl} = \frac{m}{2l} \cdot \left[ -a_x \cdot h + \left( g - 2 \cdot a_y \cdot \frac{h}{b} \right) \cdot l_h \right] \quad (2.23)$$

Die im Kalman-Filter geschätzte vordere Achsseitenkraft  $F_{s,v}$  wird an Hand der relativen Normalkräfte auf die einzelnen Seitenkräfte  $F_{s,vl}$  und  $F_{s,vr}$  aufgeteilt. Beispielhaft bedeutet dies für das linke Rad:

$$F_{s,vl} = F_{s,v} \cdot \frac{F_{n,vl}}{F_{n,vl} + F_{n,vr}} \quad (2.24)$$

Die Längsbeschleunigung wird aus der gemessenen Längsgeschwindigkeit abgeleitet. Um ein relativ glattes Signal zu erhalten, wird ein weiteres Kalman-Filter zur Ableitung verwendet.

Mit dem Zustandsvektor

$$x = [v_x \ a_x]^T \quad (2.25)$$

lauten die Systemmatrix

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

und die Messmatrix

$$H = [1 \ 0]. \quad (2.27)$$

Der Messvektor ist

$$z = [v_x]. \quad (2.28)$$

## 2.2.4 Ergänzende Teilmodelle

Die zuvor beschriebenen Modelle zur Berechnung des Lenkmoments setzen fahrdynamische Messgrößen voraus, v. a. Querbewegung und Gierrate. In zwei Sonderfällen funktionieren diese Modelle nicht oder nur unzureichend. Im Stillstand kann das Kalman-Filter keine Seitenkräfte schätzen, da keine Fahrzeugbewegung stattfindet. In diesem Fall hat zudem das Bohrmoment, d. h. das Widerstandsmoment des Reifens beim Drehen um seine Hochachse, den größten Einfluss auf das Lenkmoment. Die Modellvorstellung entsprechend Gleichung 2.1 ist somit ungültig.

Während der Fahrt sind dagegen sehr kleine Lenkbewegungen kritisch, aus denen nur sehr kleine Gier- und Querbewegungen entstehen. Die Seitenkraftschätzung des Kalman-Filters ist auch hier relativ ungenau, woraus ein mangelhaftes Mittengefühl resultiert.

Im Folgenden werden zwei Teilmodelle beschrieben, die das Lenkgefühl in beiden Fällen verbessern. Zur Simulation eines realistischen Lenkgefühls im Stillstand und bei niedrigen Geschwindigkeiten wird für das Bohrmoment ein separates Modell nach [51] verwendet.

Das Rückstellmoment eines Reifens wird analog zu einer Drehstabfeder berechnet aus dem Verdrehwinkel  $\theta$  und der Torsionssteifigkeit  $c_\theta$ :

$$M_b = c_\theta \cdot \theta. \quad (2.29)$$

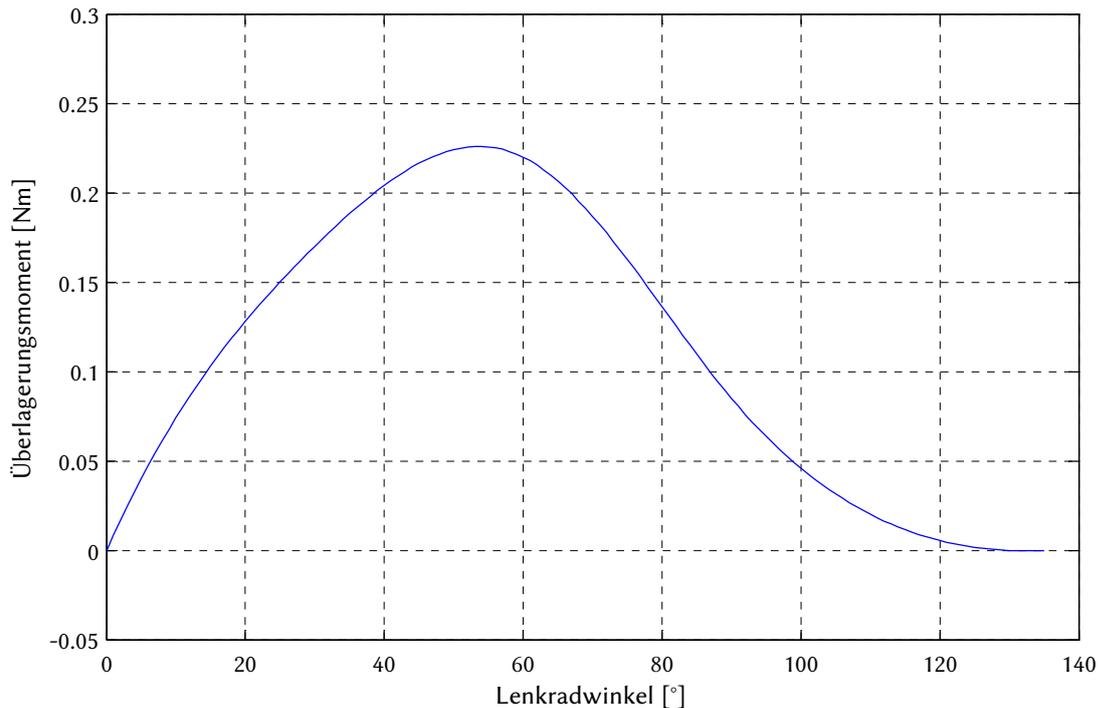
Die Änderung des Verdrehwinkels wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\dot{\theta} = - \left( 1 - p \cdot \left| \frac{M_b}{M_{b,max}} \right|^{c_0} \right) \cdot \dot{\delta}_v. \quad (2.30)$$

$p$  ist definiert durch Gleichung 2.31.

$$p = \begin{cases} 0, & \text{sign}(\dot{\theta}) \neq -\text{sign}(\dot{\delta}_v) \\ 1, & \text{sign}(\dot{\theta}) = -\text{sign}(\dot{\delta}_v) \end{cases}. \quad (2.31)$$

Wird das Rad aus dem Stand gedreht, steigt das Bohrmoment dadurch bis zum Maximalmoment  $M_{b,max}$  an, entsprechend einer elastischen Verdrehung des Reifens bei haftender



**Bild 2.7:** Beispielhafter Verlauf des künstlichen Lenkmoments zur Verbesserung des Mittengefühls

Aufstandsfläche. Wird dem Rad währenddessen plötzlich keine Verdrehung mehr aufgezwungen, wird die vom realen Reifen bekannte Rückfederung simuliert. Wird das Rad nach Erreichen des Maximalmoments weiter verdreht, gerät das Rad ins Gleiten. Das dabei wirk-same Rückstellmoment entspricht dem Maximalmoment bei Haftung. Die Änderung des Verdrehwinkels nach Gleichung 2.30 ist während des Gleitens gleich Null, weil  $M_b = M_{b,max}$  und  $p = 1$ . Der Verdrehwinkel bleibt also erhalten. Wird dem Rad nach einer solchen gleitenden Bewegung keine Bewegung mehr aufgezwungen, wird dadurch auch in diesem Fall die Rückfederung korrekt simuliert.

Der Radwinkel wird mit Hilfe von Kinematiktabelle aus dem Lenkradwinkel berechnet. Der Betrag des Bohrmoments wird mit steigender Fahrgeschwindigkeit linear reduziert. Das mit den beschriebenen Gleichungen berechnete Bohrmoment wird zum dynamischen Rückstellmoment aus Seitenkraft und Gesamtnachlauf addiert. Eine Translation des Rades, die z. B. bei Mehrlenkerachsen mit virtueller Lenkungs-drehachse auftreten kann, wird bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

Der Lenkmomentanstieg aus der Mittellage wird, wie zuvor beschrieben, bei kleinen Lenkwinkeln schlecht geschätzt. Deshalb wird der Schätzung ein künstliches Rückstellmoment an Hand einer Kennlinie überlagert. Bild 2.7 zeigt einen empirisch im Fahrversuch ermittelten Verlauf dieser Kennlinie, die zusätzlich abhängig von der Fahrgeschwindigkeit verändert wird.

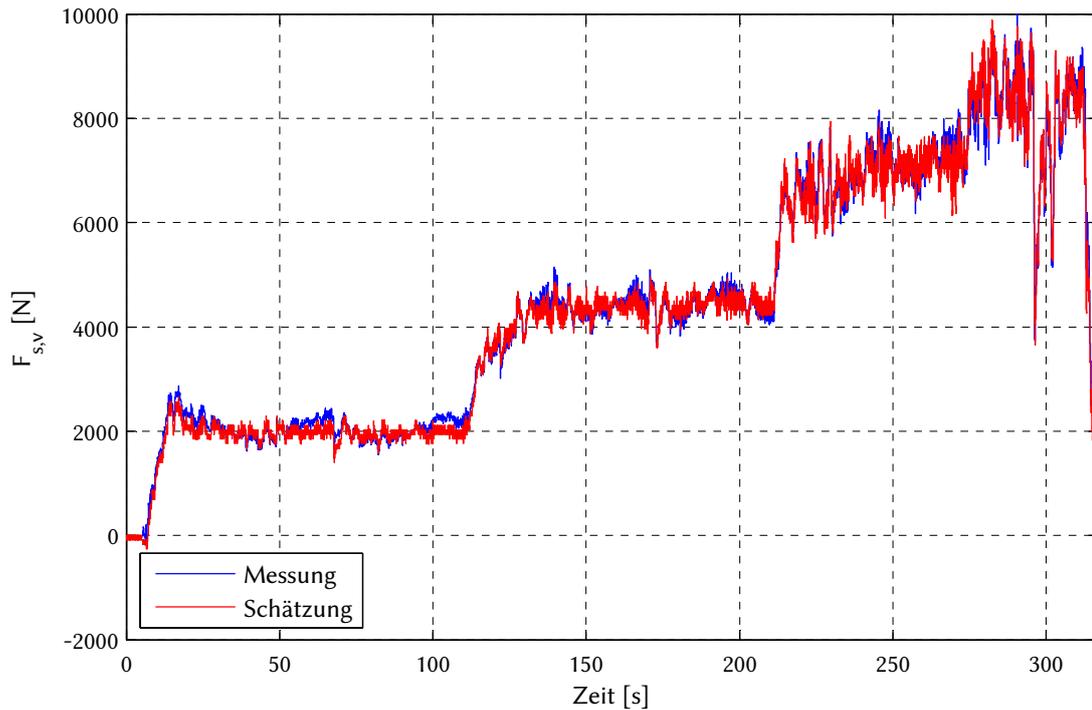


Bild 2.8: Kreisfahrt: Seitenkraft an der Vorderachse

## 2.3 Modellvalidierung und Analyse des Zahnstangenkraftschätzers

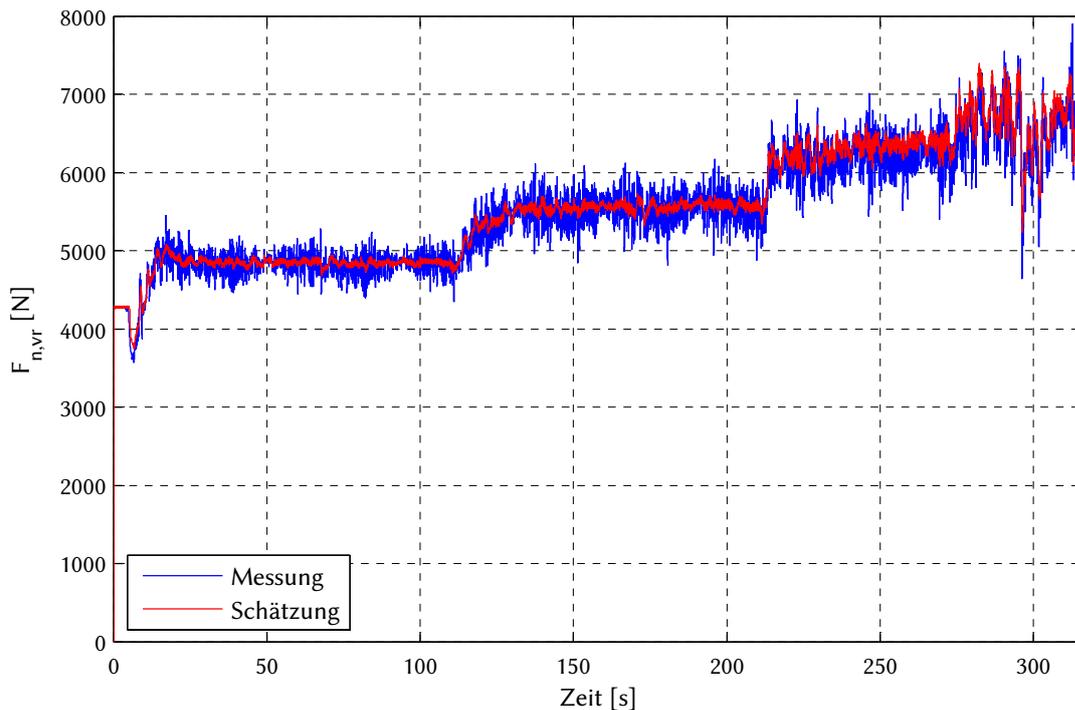
Zur Validierung des Kalman-Filters wurde ein Fahrzeug mit Kraftmessfelgen der Firma Additec ausgerüstet, um Seiten- und Normalkräfte messen zu können. Die in den folgenden Bildern gezeigten Messungen wurden nach der Messung offline phasenfrei tiefpassgefiltert, um das Messrauschen zu reduzieren. Zusätzlich wurden die Spurstangen mit Dehnmessstreifen versehen, um die Zahnstangenkraft zu messen (vgl. Kapitel 2.1). Die Messfahrten wurden auf dem Prüfgelände der Firma Audi durchgeführt, bei trockener Fahrbahn und Temperaturen um 15°C.

### 2.3.1 Validierung der Teilmodelle

An Hand von Messungen sollen die wesentlichen Teilmodelle des Zahnstangenkraftschätzers validiert werden – das Kalman-Filter zur Schätzung der Achsseitenkraft, die quasistatische Normalkraftberechnung und relative Radlastverteilung sowie die darauf basierenden Seitenkräfte der einzelnen Vorderräder.

Zunächst wurde auf einer ebenen Fläche eine stationäre Kreisfahrt auf konstantem Radius von 100 m durchgeführt. Die Geschwindigkeit wurde stufenweise erhöht, bis die Reifen die Haftgrenze erreichten. Bild A.2 in Anhang A.1 zeigt die entstandenen Verläufe der Längs- und Querbeschleunigung, die das Fahrmanöver charakterisieren.

Die in Bild 2.8 dargestellten Seitenkräfte zeigen qualitativ eine sehr gute Übereinstimmung



**Bild 2.9:** Kreisfahrt: Normalkraft am rechten Vorderrad

von Messung und Schätzung. Das in Kapitel 2.2.1 entwickelte Kalman-Filter funktioniert in allen Querbeschleunigungsbereichen ausreichend gut.

Die Berechnung der Normalkräfte aus Längs- und Querbeschleunigung liefert trotz der getroffenen Vereinfachungen gute Ergebnisse. Bild 2.9 zeigt beispielhaft das rechte Vorderrad, die Ergebnisse des linken Vorderrads sind im Anhang in Bild A.3 zu finden. Erst bei sehr hoher Querbeschleunigung, ab ca.  $8 \frac{m}{s^2}$ , treten etwas deutlichere Abweichungen gegenüber der Messung auf. Ursache ist vermutlich die Vernachlässigung der Wankstabilisatoren im Schätzermodell. Diese Abweichungen spiegeln sich auch in den Einzelseitenkräften wieder (vgl. Bild 2.10 für das rechte Vorderrad und Bild A.4 für das linke). Abgesehen von der akzeptablen Abweichung ist die Berechnung der Seitenkraft proportional zur Normalkraft offensichtlich ausreichend genau.

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass die Amplitude höherer Frequenzen in der Schätzung deutlich geringer ausfällt, als in der Messung – trotz Tiefpassfilterung der Messung.

Bild 2.11 zeigt die Schätzung der Zahnstangenkraft mit und ohne Bohrmomentmodell im Vergleich zur Messung. Dazu wurde im Stand mehrmals von Anschlag zu Anschlag gelenkt. Die Schätzung des Kalman-Filters fällt in diesem Fall viel zu gering aus, trotz 100-facher Skalierung in dieser Darstellung. Das Modell des Bohrmoments kommt dem realen Reifenverhalten recht nahe und hat sich in Vorversuchen mit einem Lenkmomentsimulator im HIL-Betrieb auch subjektiv bewährt. Effekte wie z. B. das Rückfedern des Reifens werden sehr natürlich nachgebildet.

In Bild A.1 in Anhang A.1 ist die Ableitung der Längsbeschleunigung aus der im Fahrzeug gemessenen Geschwindigkeit dargestellt. Zur Validierung wurde die Längsbeschleunigung

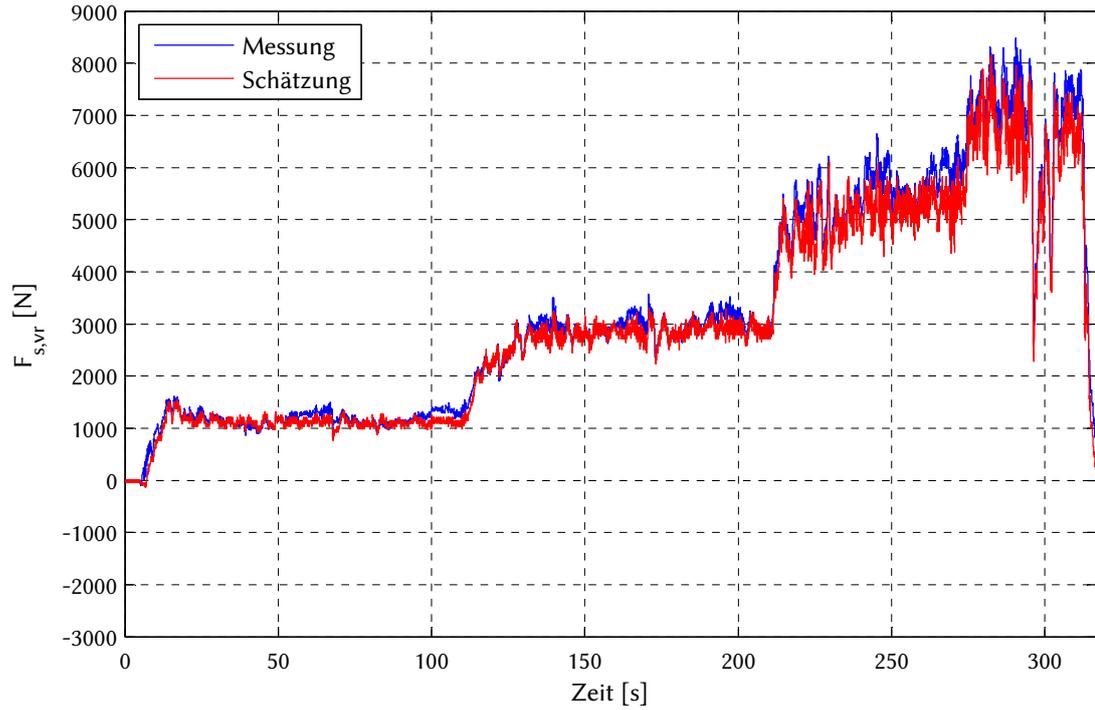


Bild 2.10: Kreisfahrt: Seitenkraft am rechten Vorderrad

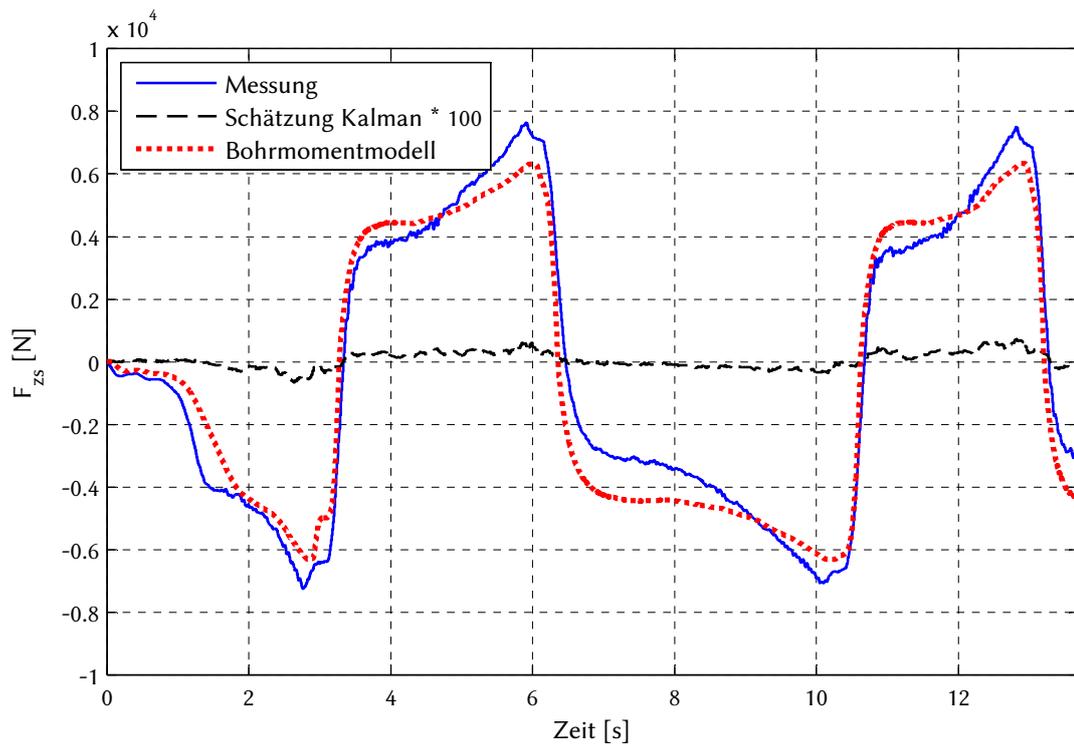


Bild 2.11: Durchlenken im Stand: Wirksamkeit des Bohrmomentmodells

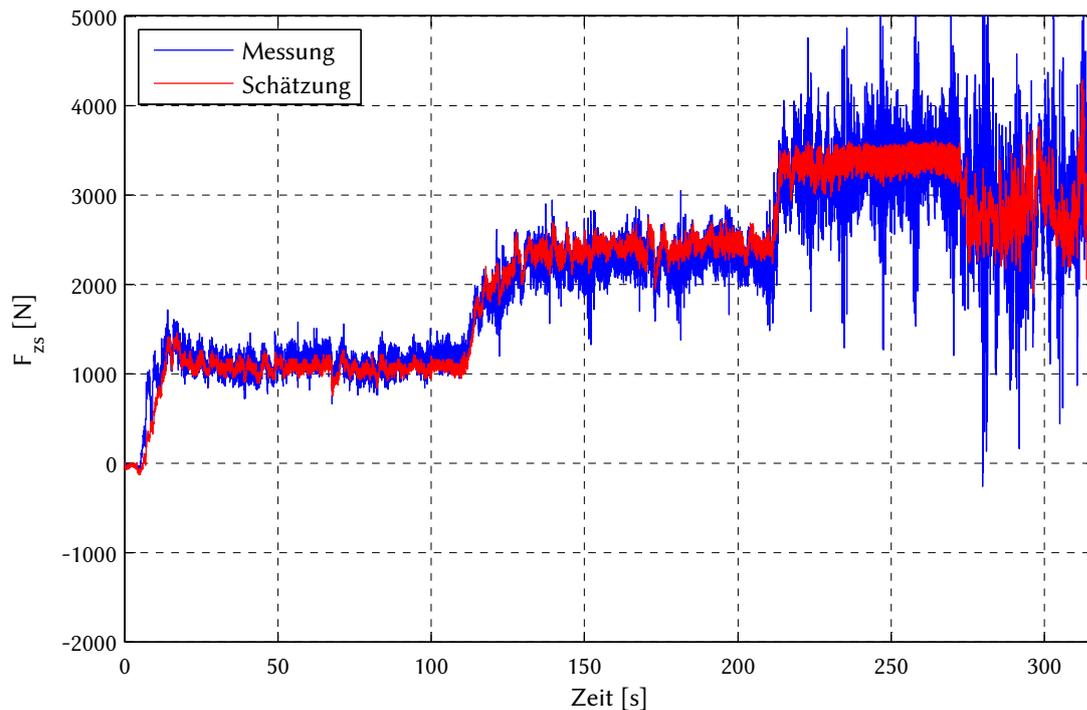


Bild 2.12: Kreisfahrt: Zahnstangenkraft

mit einer Inertialplattform gemessen.

### 2.3.2 Validierung des Gesamtmodells

Bei der zuvor beschriebenen Kreisfahrt ergeben sich mit dem Gesamtmodell des Schätzers die in Bild 2.12 dargestellten Zahnstangenkräfte.

Um ein Fahrmanöver abzubilden, das weniger synthetisch ist, als die Kreisfahrt, wurde eine Messfahrt auf einem landstraßenähnlichen Kurs durchgeführt. Dabei traten unterschiedliche Kurvenradien und Geschwindigkeiten auf, sowie ausgeprägtere Kombinationen von Längs- und Querb beschleunigung (siehe Bild A.5 in Anhang A.1). In Bild 2.13 ist zu sehen, dass auch hier die geschätzte Zahnstangenkraft gut mit der Messung übereinstimmt, selbst bei sehr hoher Querb beschleunigung, deutlich im nichtlinearen Bereich der Fahrdynamik.

### 2.3.3 Zeitverhalten

Bei genauerer Betrachtung der gemessenen und geschätzten Zahnstangenkraft fällt auf, dass die Schätzung einen Phasenverzug aufweist. Bild 2.14 zeigt diesen Effekt beispielhaft bei einem Manöver mit sinusförmiger Lenkbewegung. Der dort sichtbare Zeitverzug beträgt etwa 130 ms und wirkt sich spürbar auf das Zusammenspiel von Lenkradwinkel und Lenkmoment aus. Kritisch ist vor allem ein instabiles Rückstellverhalten der Lenkung, das sich ergibt, wenn die geschätzte Zahnstangenkraft im SbW-Versuchsfahrzeug für die Lenkmomentsimulation verwendet wird.

Bild 2.15 zeigt den Lenkradwinkelverlauf, nachdem das Lenkrad bei 80 km/h und einer

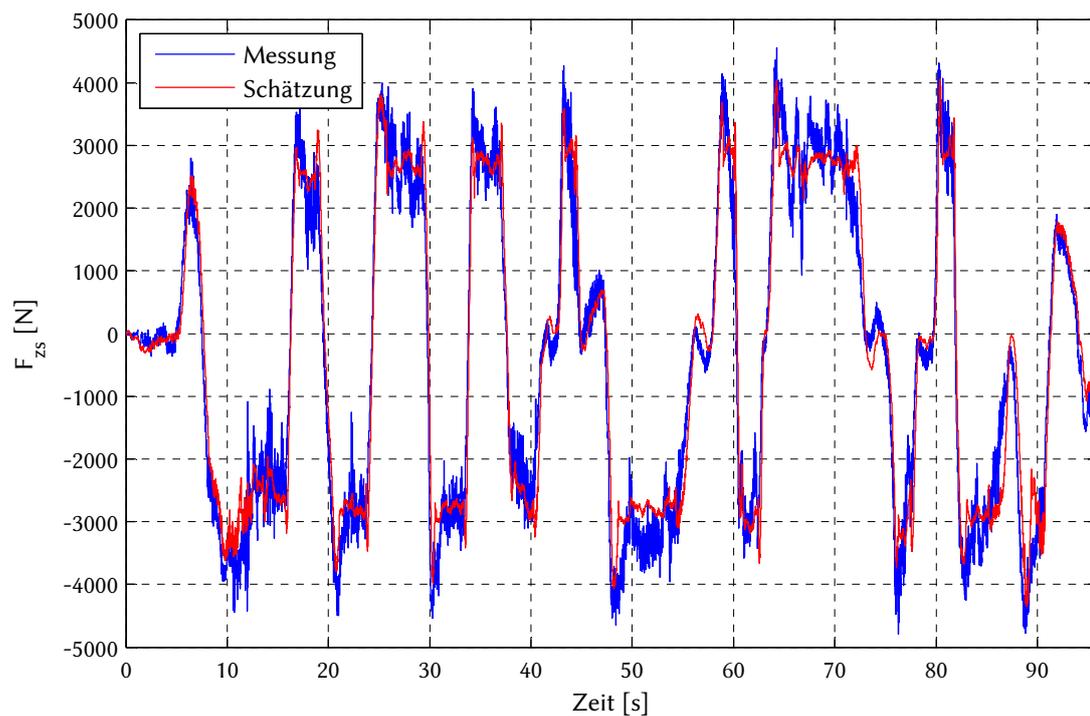


Bild 2.13: Kurvenfahrt Grenzbereich: Zahnstangenkraft

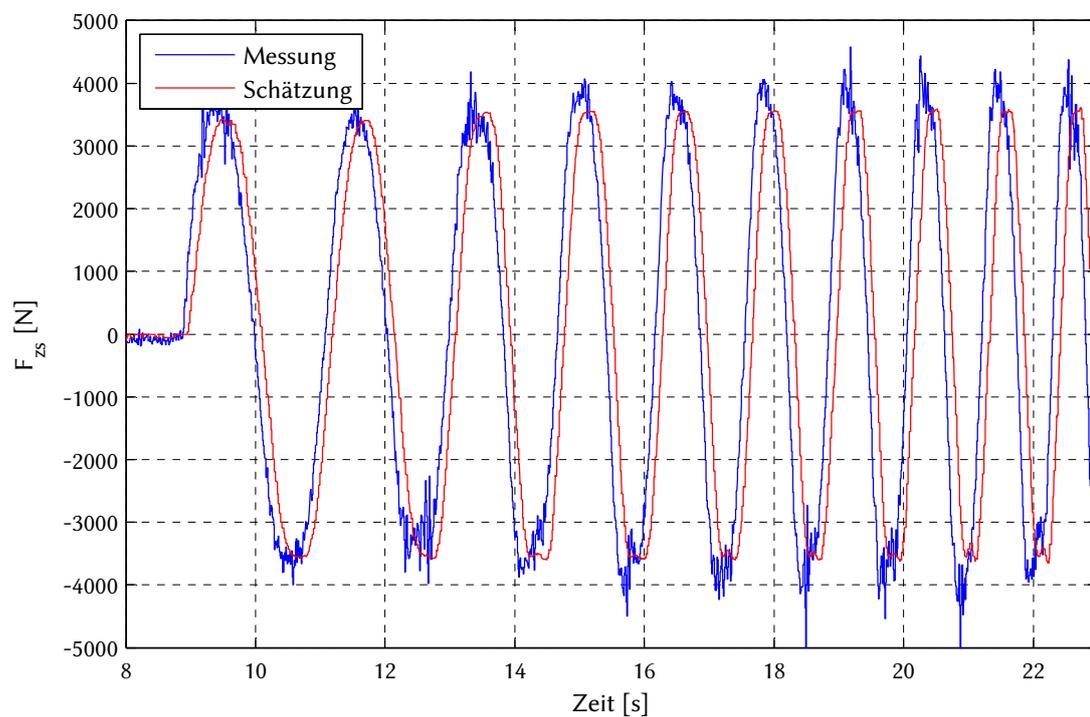
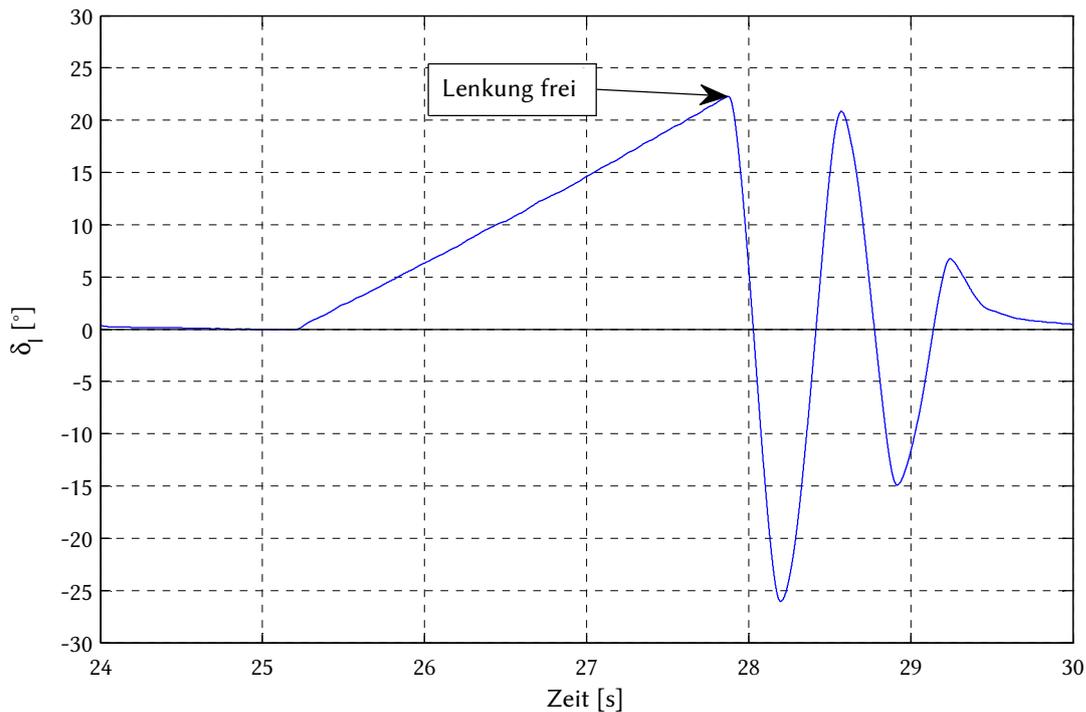


Bild 2.14: Zeitverzug der geschätzten Zahnstangenkraft gegenüber der Messung



**Bild 2.15:** Lenkradwinkelverlauf nach loslassen des Lenkrads bei 80 km/h und  $a_y = 3 \text{ m/s}^2$

Querbeschleunigung von  $3 \text{ m/s}^2$  losgelassen wird. Bedingt durch den Zeitverzug schwingt das Lenkrad sehr deutlich über. Auf Grund räumlicher Begrenzungen musste das Lenkrad vom Fahrer wieder stabilisiert werden, um weiteres Aufschwingen zu vermeiden. Dieser Effekt tritt weder beim Basisfahrzeug mit geschlossener Kupplung, noch bei Steer-by-Wire unter Verwendung der Kraftmessung mittels DMS auf. Beide stellen selbst bei deutlich höherer Querbeschleunigung stabil in die Mitte zurück, ohne überzuschwingen.

Zur Analyse des Zeitverzugs wurden in der Simulation bei den Messgrößen jeweils künstliche Verzögerungsglieder eingefügt. Es hat sich gezeigt, dass die Querbeschleunigung den größten Einfluss auf die Schätzung der Zahnstangenkraft und deren Zeitverzug hat. Bild 2.16 zeigt die im Realfahrzeug gemessenen Größen Lenkradwinkel, Zahnstangenkraft und Querbeschleunigung. Es ist ersichtlich, dass die Querbeschleunigung, karosseriefest in Nähe des Fahrzeugschwerpunkts gemessen, den anderen Größen deutlich nacheilt.

Um auszuschließen, dass dieser Effekt durch die verwendete Sensorik und Signalverarbeitung hervorgerufen wird, wurde eine Reihe von Untersuchungen mit der Mehrkörpersimulationssoftware *Adams/Car* durchgeführt. Dazu wurde das Simulationsmodell entsprechend dem im Realversuch verwendeten Fahrzeug parametrisiert und validiert.

Bild 2.17 zeigt, dass auch hier die Querbeschleunigung im Schwerpunkt verzögert auftritt. Parametervariationen des Messorts, der Fahrzeugbeladung und verschiedener Fahrwerksparameter haben gezeigt, dass v. a. der Messort den Zeitverzug der Querbeschleunigung beeinflusst. In Bild 2.18 ist der Effekt der  $x$ -Koordinate des Messorts im Frequenzbereich dargestellt.

Dieses Verhalten lässt sich letztlich zurückführen auf das dynamische Verhalten des Fahr-

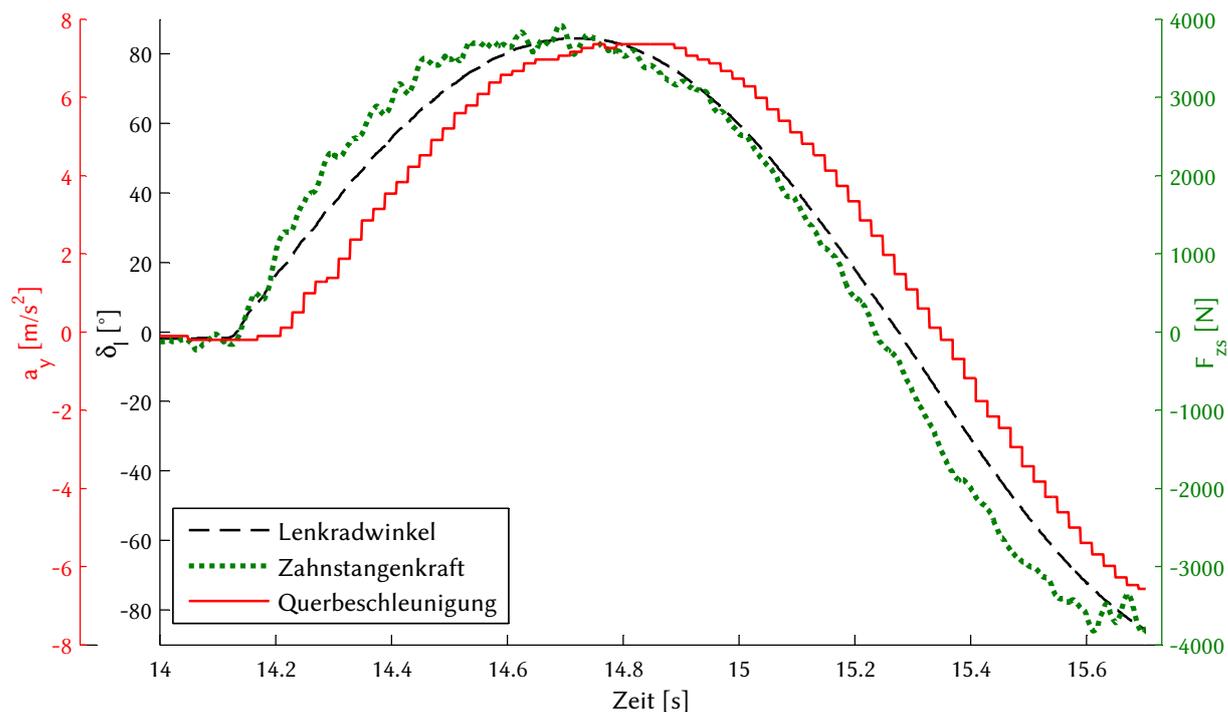


Bild 2.16: Zeitverläufe von Lenkradwinkel, Zahnstangenkraft und Querbeschleunigung im Fahrzeug

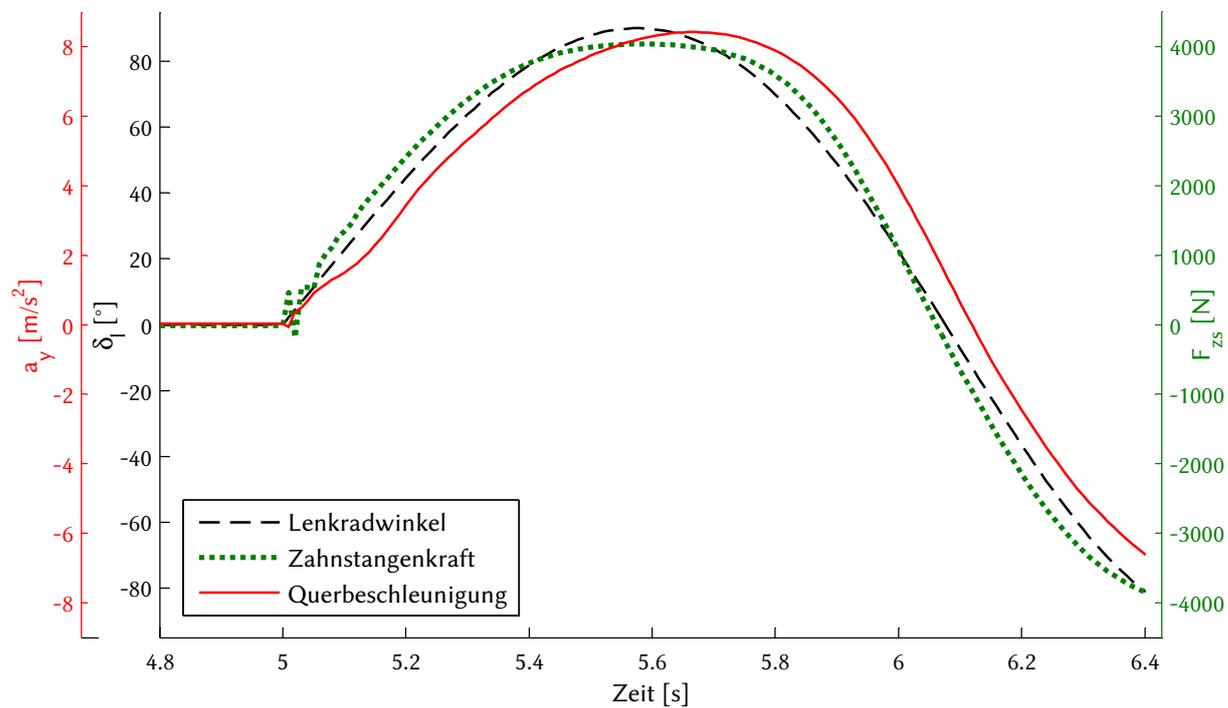
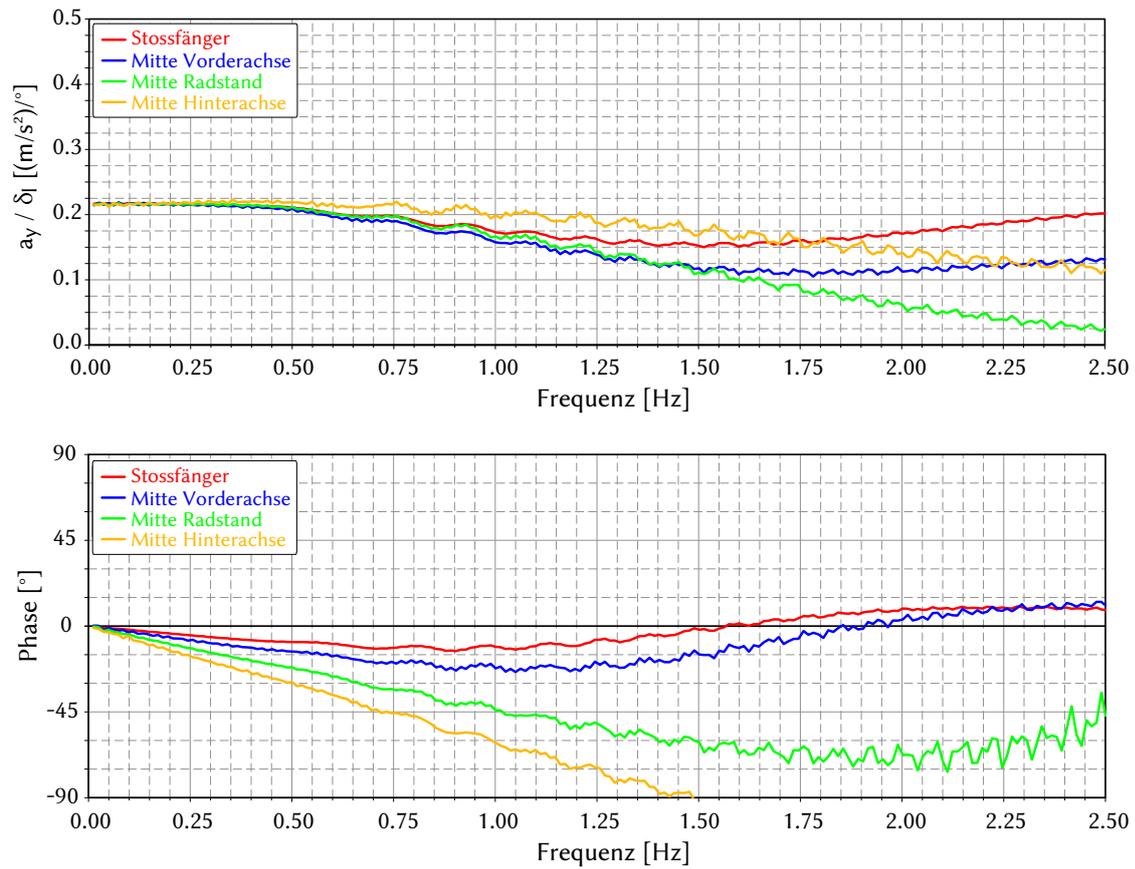


Bild 2.17: Zeitverläufe von Lenkradwinkel, Zahnstangenkraft und Querbeschleunigung in der Mehrkörpersimulation



**Bild 2.18:** Übertragungsverhalten von Lenkradwinkel auf Quereschleunigung an verschiedenen Messorten

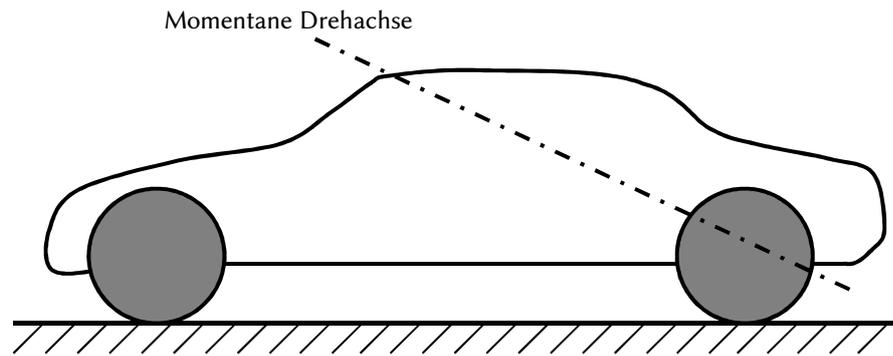


Bild 2.19: Momentane Drehachse bei plötzlicher Lenkbewegung nach [66]

zeugs beim Einlenken. Nach Untersuchungen von Pauly [66] verhält sich das Fahrzeug bei schnell auftretenden Seitenkräften an der Vorderachse (z. B. verursacht durch Lenkbewegungen) wie bei einem exzentrischen Stoß. Das Fahrzeug dreht sich zunächst um eine Momentanachse wie in Bild 2.19 dargestellt. Die Querschleunigung baut sich folglich vorne im Fahrzeug schneller auf als weiter hinten. Beim Übergang hin zur stationären Kreisfahrt richtet sich diese Achse auf und wandert nach vorne, bis sie schließlich einige Meter vor dem Fahrzeugschwerpunkt steht.

Mit weiteren Simulationen wurde die Auswirkung des Zeitverzugs auf die Stabilität der Rückstellung untersucht. Dazu wurde der SbW-Aufbau im Modell abgebildet, wobei das Lenkmoment aus den Zahnstangenkräften des Fahrzeugmodells bestimmt wurde, ergänzt durch ein einstellbares Totzeitglied. Der negative Einfluss des Zeitverzugs auf die Rückstellung konnte damit reproduziert werden.

### 2.3.4 Zusammenfassung

Die Validierung zeigt, dass der entwickelte Zahnstangenkraftschätzer bis in den fahrdynamischen Grenzbereich gute Ergebnisse liefert. Das Kalman-Filter zur Berechnung der Seitenkraft liefert unabhängig vom Reifenverhalten eine sehr exakte Schätzung der Achsseitenkraft. Die Berechnung der Normalkräfte aus Längs- und Querschleunigung liefert trotz relativ starker Vereinfachungen hinreichend genaue Ergebnisse. Gleiches gilt für die Verteilung der Achsseitenkraft auf die Einzelräder an Hand der relativen Normalkräfte.

Das Verfahren zur Bestimmung der Schräglaufwinkel wurde nicht separat validiert. Die Validierung des Gesamtmodells legt jedoch nahe, dass auch dieses Modell funktioniert.

Ein großer Vorteil der inversen Seitenkraftberechnung und der daraus bestimmten Schräglaufwinkel ist die Robustheit bei Verwendung realer Messgrößen. Selbst bei der mehr als fünf Minuten dauernden Kreisfahrt, die in Kapitel 2.3.2 gezeigt wurde, bleiben die Schätzungen stabil. Sensor-Offsets oder Messrauschen verursachen allenfalls minimale Verschiebungen der Schätzung. Da kein integratives Verhalten vorliegt, kommt es jedoch nicht zum *Drift* der Schätzgrößen.

Ein Zeitverzug der Schätzung gegenüber der Messung wird durch den verzögerten Aufbau der Querschleunigung in der Fahrzeugkarosserie verursacht. Dies kann u. a. zu einem instabilen Rückstellverhalten bei losgelassenem Lenkrad führen. In Kapitel 3 werden zwei

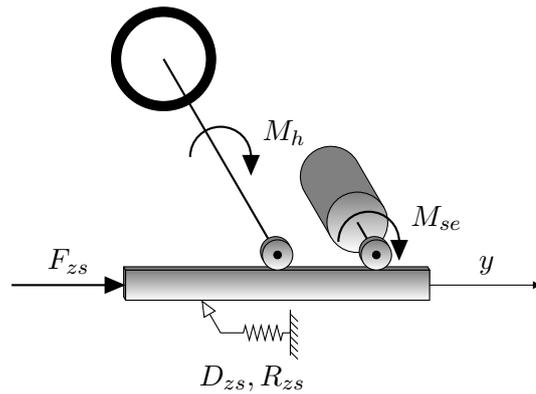


Bild 2.20: Schematische Abbildung des Lenkungsmodells

mögliche Lösungsansätze für dieses Problem vorgestellt.

## 2.4 Modellbildung und -validierung der Lenkung

Um die in den Kapiteln 2.1 und 2.2 bestimmten Zahnstangenkräfte in ein Lenkmoment umzurechnen, wird im folgenden ein mathematisches Modell der Lenkung entwickelt.

Grundlage ist eine physikalische Modellbildung auf Basis des in Bild 2.20 dargestellten Schemas. Die Mechanik umfasst eine einteilige, starre Lenksäule. Eventuell vorhandene Ungleichförmigkeiten aus den Kreuzgelenken der Lenksäule werden somit nicht modelliert, da sie generell unerwünscht sind. Ihr Trägheitsmoment, sowie Reibung und Dämpfung werden über die Lenkritzelübersetzung  $i_l$  in der Zahnstange zusammengefasst. Die Trägheit des Lenkrads wird bewusst nicht modelliert, da sie im Steer-by-Wire Aufbau real vorhanden ist und somit nicht simuliert werden muss.

Das Modell verfügt über eine elektrische Lenkhilfe, die über die Übersetzung  $i_{se}$  auf die Zahnstange wirkt. Trägheit, Reibung und Dämpfung der Lenkhilfe werden ebenfalls der Zahnstange zugeschlagen. Die Lenkhilfe selbst wird durch ein geschwindigkeitsabhängiges Unterstützungskennfeld abgebildet. Das dynamische Übertragungsverhalten des elektrischen Antriebs und seiner Leistungselektronik wird vernachlässigt.

Angelehnt an EPS-Lenkungen in Serienfahrzeugen wird eine Regelung der Lenkwinkelgeschwindigkeit zur Unterstützung der Lenkungsrückstellung verwendet, deren Aufbau Bild 2.21 zeigt (vgl. z. B. [55]).

Aus dem Kräftegleichgewicht an der Zahnstange ergibt sich das Fahrerhandmoment grundsätzlich zu

$$M_h = (F_{zs} - m \cdot \ddot{y}_{zs} - D_{zs} \cdot \dot{y}_{zs} - R_{zs} \cdot \text{sign}(\dot{y}_{zs}) - M_{se} \cdot i_{se} + M_{rs} \cdot i_{se}) \cdot i_l \quad (2.32)$$

Die Signumfunktion zur Berechnung der Reibung wird durch eine Funktion angenähert, die aus dem Nullpunkt eine endliche Steigung aufweist (vgl. [22]). Dadurch lassen sich Schwingungen um die Ruhelage verhindern.

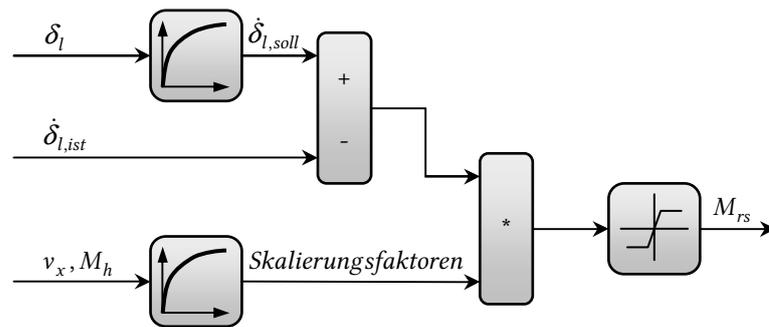


Bild 2.21: Schematische Abbildung des Lenkwinkelgeschwindigkeitsreglers

Die Zahnstangenposition  $y_{zs}$  wird aus Lenkradwinkel und Lenkritzelnübersetzung berechnet. Die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Zahnstange werden aus dem Lenkradwinkel abgeleitet. Um auch mit realen Messsignalen stabile Ableitungen zu erzielen, wird die Kalman-Filter-Ableitung angewendet, die bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert wurde.

Die Parametrierung des Gesamtmodells orientiert sich an einem Serienfahrzeug vom Typ *Audi TT*. Bild 2.22 zeigt einen Vergleich von gemessenem und simuliertem Lenkmoment auf dem in Kapitel 2.3.2 erwähnten landstraßenähnlichen Kurs. Die relativ einfache Modellstruktur führt zu Abweichungen der Simulation gegenüber der Messung. In Vorversuchen im SbW-Versuchsfahrzeug hat sich diese Form des Lenkungsmodells jedoch als ausreichend herausgestellt, um ein realistisches Lenkgefühl darzustellen.

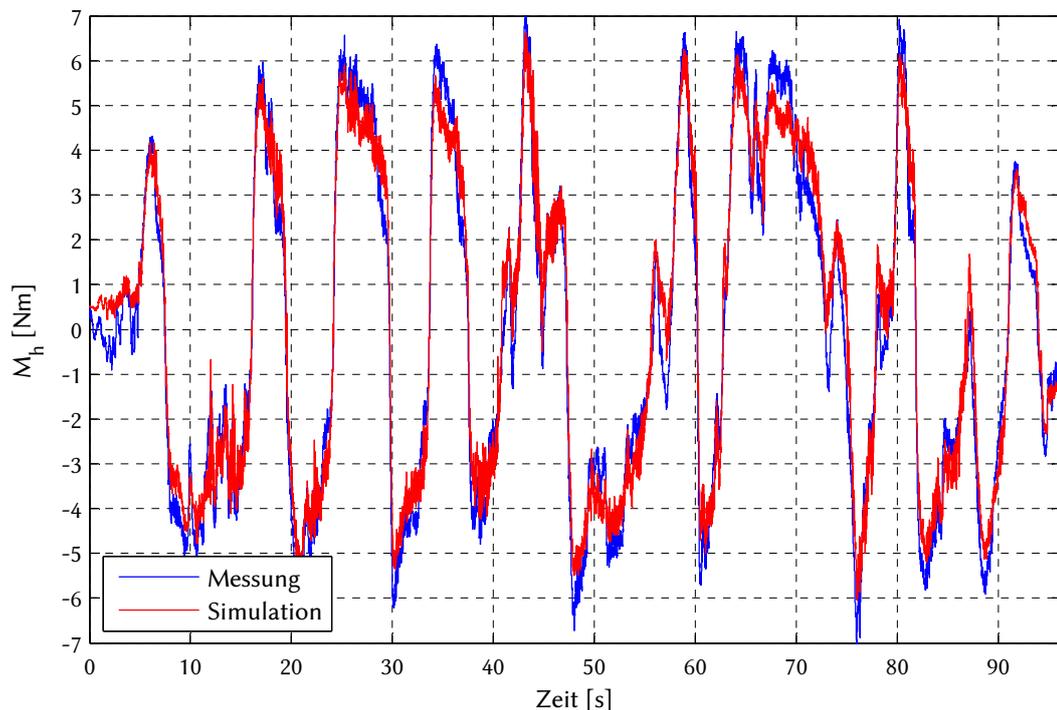


Bild 2.22: Kurvenfahrt im Grenzbereich: Validierung des Lenkungsmodells mit gemessener Zahnstangenkraft

# 3 Optimierung des Lenkgefühls

Ein Steer-by-Wire Lenksystem bietet nahezu beliebige Freiheiten zur Gestaltung des Lenkmoments, die zur Verbesserung des Lenkgefühls genutzt werden können. In diesem Kapitel werden verschiedene Ansätze aufgezeigt, die dieses Ziel verfolgen. Der Schwerpunkt wird auf die Optimierung der Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts gelegt, d. h. die verbesserte Übertragung von Nutzinformation, Verringerung von Störungen sowie die Annäherung an den Grenzbereich.

Kapitel 3.1 beschreibt Maßnahmen zur Verbesserung des Zahnstangenkraftschätzers. Kapitel 3.2 zeigt Optimierungsmaßnahmen im Fall gemessener Zahnstangenkräfte und Kapitel 3.3 beschreibt Ansätze, die auf beide Varianten anwendbar sind.

## 3.1 Lenkgeföhloptimierung bei geschätzter Zahnstangenkraft

### 3.1.1 Verbesserung des Zeitverhaltens

Kapitel 2.3.3 hat gezeigt, dass der Zeitverzug der gemessenen Aufbau-Querbeschleunigung zu einem instabilen Rückstellverhalten der Lenkung führen kann. Des Weiteren wirkt sich ein hoher Zeitverzug zwischen Lenkwinkel und Lenkmoment negativ auf die subjektive Bewertung des Lenkgefühls aus (Vgl. [19, 25]).

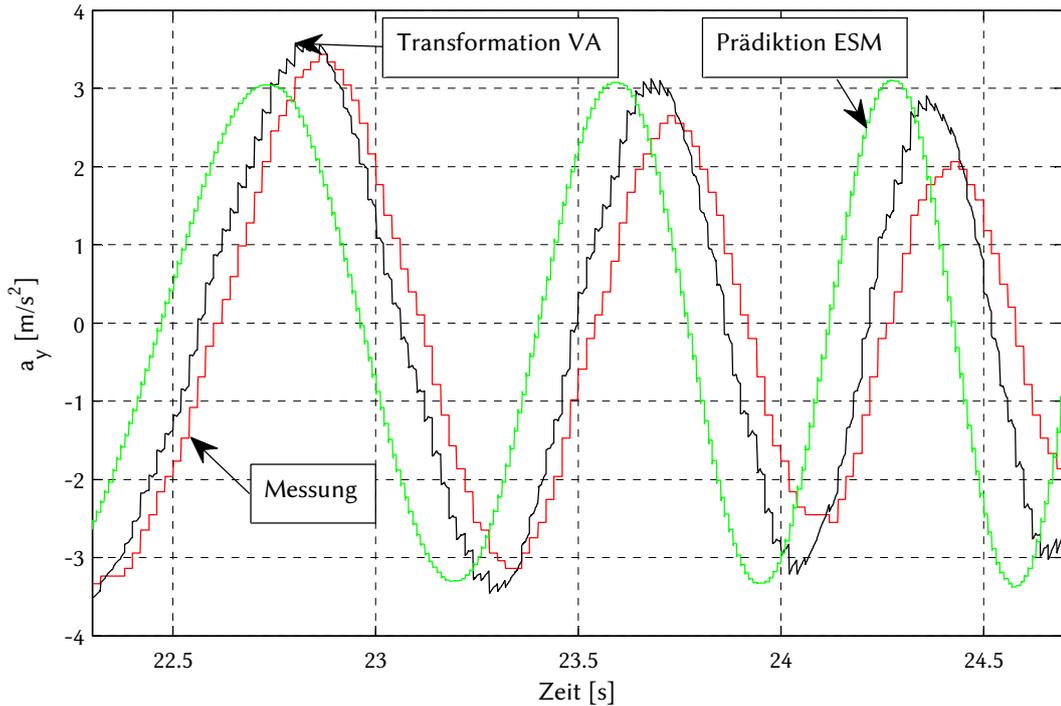
Im Folgenden werden zwei Methoden vorgestellt, die den Zeitverzug der geschätzten Zahnstangenkraft verringern.

Durch Mehrkörpersimulationen konnte gezeigt werden, dass der Zeitverzug umso geringer wird, je weiter vorne im Fahrzeug die Querbeschleunigung gemessen wird. Mit den Methoden der Starrkörperkinematik kann die Querbeschleunigung vom Schwerpunkt über die Gierbeschleunigung um eine beliebige Länge  $\Delta x$  nach vorne transformiert werden:

$$a_{y,t} = a_{y,sp} + \Delta x \cdot \ddot{\psi} \quad (3.1)$$

Damit ist zwar streng genommen das in Kapitel 2.2 beschriebene Modell mit  $a_y$  im Schwerpunkt nicht mehr gültig, jedoch wirkt sich dies nicht negativ auf die Zahnstangenkraftschätzung aus.

Um den Zeitverzug der Querbeschleunigung im Schwerpunkt zu reduzieren, ist es alternativ möglich, diese mit den Gleichungen eines Einspurmodells aus dem Lenkradwinkel und der Fahrgeschwindigkeit zu präzisieren. Somit gilt für die Querbeschleunigung nach [77] für ein untersteuerndes Fahrzeug mit der charakteristischen Geschwindigkeit  $v_{ch}$  die Gleichung 3.2.

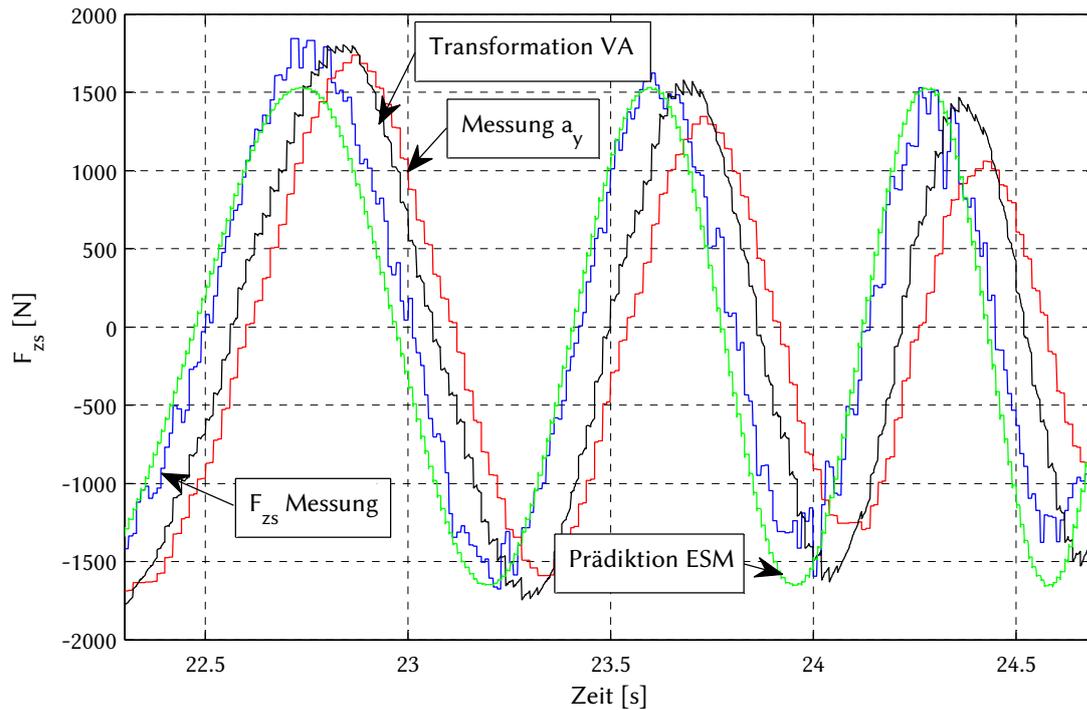


**Bild 3.1:** Gemessene Querbeschleunigung im Vergleich zur Transformation auf die Vorderachse und der Prädiktion mittels Einspurmodell (ESM)

$$a_y = \frac{\delta_l \cdot v^2}{i_s \cdot l \cdot \left(1 + \left(\frac{v}{v_{ch}}\right)^2\right)} \quad (3.2)$$

Bild 3.1 zeigt die im Schwerpunkt gemessene Querbeschleunigung im Vergleich zur transformierten und zur prädizierten Querbeschleunigung bei einem Ausschnitt eines Sinuslenkmanövers mit steigender Frequenz. Die Gierbeschleunigung wurde dazu mittels Kalman-Filter-Ableitung (vgl. Kapitel 2.2.3) aus der gemessenen Gierrate abgeleitet. Bei hohen Lenkfrequenzen um 2 Hz fällt die Amplitude der gemessenen Querbeschleunigung bei gleichem Lenkwinkel bereits deutlich ab. Dieser Effekt tritt in den beiden anderen Querbeschleunigungssignalen nicht auf.

In Bild 3.2 ist die unveränderte Zahnstangenkraftschätzung im Vergleich zu den beiden optimierten Varianten und der gemessenen Zahnstangenkraft dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die veränderten Amplituden der prädizierten und transformierten Querbeschleunigung eher positiv auf die Zahnstangenkraftschätzung auswirken. Bei niedrigeren Frequenzen ist die Prädiktion mittels Einspurmodell vom Betrag etwas zu gering. Jedoch ist der Zeitverzug gegenüber der auf Vorderachshöhe transformierten Querbeschleunigung nochmals niedriger. Letztere kann theoretisch beliebig weit nach vorne transformiert werden. Auf Grund der erforderlichen Filterung und Ableitung der Gierrate sind dem jedoch in der Praxis Grenzen gesetzt. Mit einer anderen Sensorik und / oder Filterung ist es prinzipiell denkbar, die Transformation der Querbeschleunigung weiter zu verbessern. Da sich der Zeitverzug u. a.



**Bild 3.2:** Messung der Zahnstangenkraft im Vergleich zur Schätzung mit den unterschiedlichen Querbeschleunigungssignalen

spürbar auf die Stabilität der Lenkungsrückstellung auswirkt, wird die prädizierte Querbeschleunigung für die Probandenversuche in Kapitel 4 verwendet. Nachteilig ist bei dieser Variante, dass sie ohne weitere Maßnahmen nur in einem engen Bereich von Reifen-Fahrbahn-Reibwerten gültig ist.

### 3.1.2 Verstärkung der Fahrbahnrückmeldung

Die Schätzung der Zahnstangenkraft erfolgt, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, auf Basis der im Fahrzeugaufbau gemessenen Querbeschleunigung und Gierrate. Die im Einspurmodell getroffene Annahme, dass sich die Achsseitenkräfte exakt in diesen beiden Messgrößen widerspiegeln, trifft im deutlich komplexeren Realfahrzeug nicht zu. Insbesondere das Übertragungsverhalten im Frequenzbereich wird durch die Radaufhängung und verschiedene elastische Lager gezielt beeinflusst, weil z. B. aus Komfortgründen Schwingungen und Stöße im Fahrzeugaufbau nicht oder nur gering spürbar sein sollen. Solche höherfrequenten Anteile finden sich folglich auch nur gedämpft in den Messgrößen  $a_y$  und  $\dot{\psi}$  wieder. Gleiches gilt somit für die geschätzte Zahnstangenkraft. Die Rückmeldung des Fahrbahnkontakts leidet dadurch, was sich in Vorversuchen bestätigt hat.

Um die Rückmeldung höherer Frequenzen zu verstärken, sind verschiedene Ansätze denkbar. Grundsätzlich ist es möglich, das Übertragungsverhalten von Zahnstangenkräften zum geschätzten Lenkmoment zu bestimmen und durch eine angepasste Übertragungsfunktion zu kompensieren. Vereinfacht kann man höhere Frequenzen über ein Hochpassfilter herausgreifen und verstärken, wie in Bild 3.3 dargestellt.

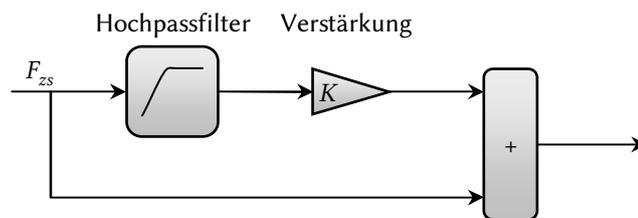


Bild 3.3: Verstärkung der Rückmeldung mit geschätzten Zahnstangenkräften

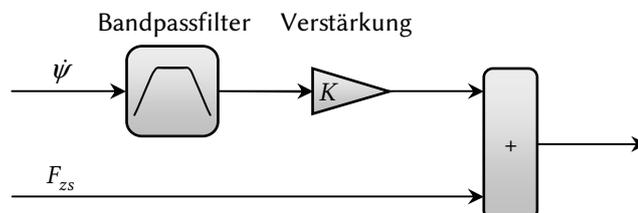


Bild 3.4: Verstärkung der Rückmeldung durch das Gierratensignal

Um die Filterwirkung des Kalman-Filters zu umgehen, ist es auch möglich, die Vorderachsenkraft aus einem einfachen Einspurmodell direkt zu berechnen und hochpassgefiltert zur geschätzten Seitenkraft zu addieren. Ein vergleichbarer Ansatz wurde in [37] mit einer elektromechanischen Servolenkung untersucht.

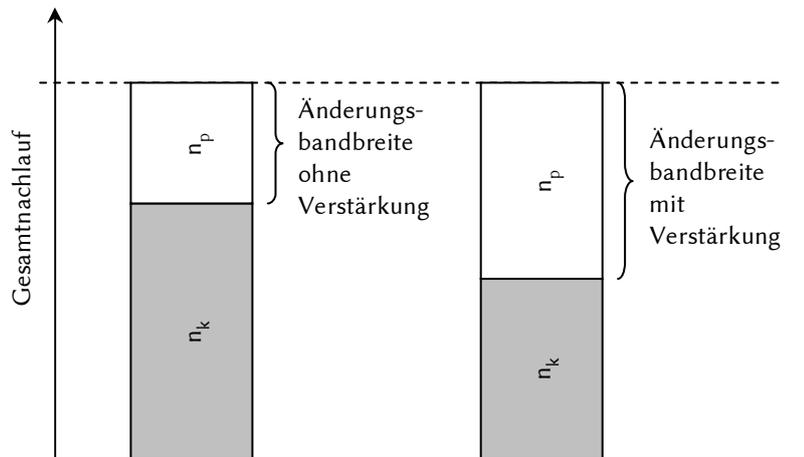
Eine demgegenüber weiter vereinfachte Variante hat sich im Versuchsfahrzeug als vielversprechend herausgestellt. Dabei wird eine der beiden Messgrößen, in diesem Fall die Gierrate, ohne weitere Umrechnung gefiltert und geeignet skaliert der Zahnstangenkraft oder dem Lenkmoment überlagert, siehe Bild 3.4. Tiefe Frequenzen der Gierrate werden durch Lenkbewegungen verursacht und müssen deshalb ausgeschlossen werden. Relativ hohe Frequenzen enthalten keine nützlichen Informationen, sondern entsprechen z. B. Messrauschen. Aus diesen Gründen wird ein Bandpassfilter verwendet.

### 3.1.3 Verstärkung von Reifennachlaufänderungen

Bei der Annäherung an die Haftgrenze der Vorderräder in Kurvenfahrt verringert sich der Reifennachlauf und somit i. d. R. auch das Lenkmoment. Diese Änderung im Lenkmoment kann einem geübten Fahrer als Warnung vor dem Grenzbereich dienen. Je größer diese Änderung bei gleichem Ausgangsmoment ausfällt, desto leichter ist sie tendenziell spürbar und desto zuverlässiger ist die Warnung.

Bei einem konventionellen Lenksystem ist die relative Änderung des Lenkmoments vor allem durch das Verhältnis von Reifennachlauf und konstruktivem Nachlauf festgelegt. Änderungen dieser Größen sind nur bedingt möglich und wirken sich in zahlreichen anderen Bereichen aus, beispielsweise in der benötigten Unterstützungskraft der Lenkhilfe oder im Rückstellverhalten. Bei der Schätzung der Zahnstangenkraft in einem SbW-Fahrzeug können jedoch beide Größen im Simulationsmodell variiert werden, ohne das reale Fahrwerk zu verändern.

Um die Annäherung an den Grenzbereich stärker spürbar zu machen, wird der Reifen-



**Bild 3.5:** Virtuelle Skalierung des Reifennachlaufs zur besseren Spürbarkeit der Lenkmomentdegression (vereinfachte Darstellung)

nachlauf um einen konstanten Faktor größer eins skaliert. Damit insgesamt kein erhöhtes Rückstellmoment entsteht, wird vom Gesamtnachlauf wiederum ein konstanter Wert abgezogen:

$$n = (n_k + n_p \cdot K_{np}) - K_n \quad (3.3)$$

Bild 3.5 zeigt die Auswirkung dieser Maßnahme schematisch gegenüber dem Normalfahrzeug. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass der Minimalbetrag des Reifennachlaufs bei Null liegt. Es ist ersichtlich, dass das Rückstellmoment, das proportional zum Gesamtnachlauf ist, im Grenzbereich stärker abfallen kann, als beim Normalfahrzeug.

In Bild 3.6 ist die Wirksamkeit der Funktion bei einer beschleunigten Kreisfahrt dargestellt.

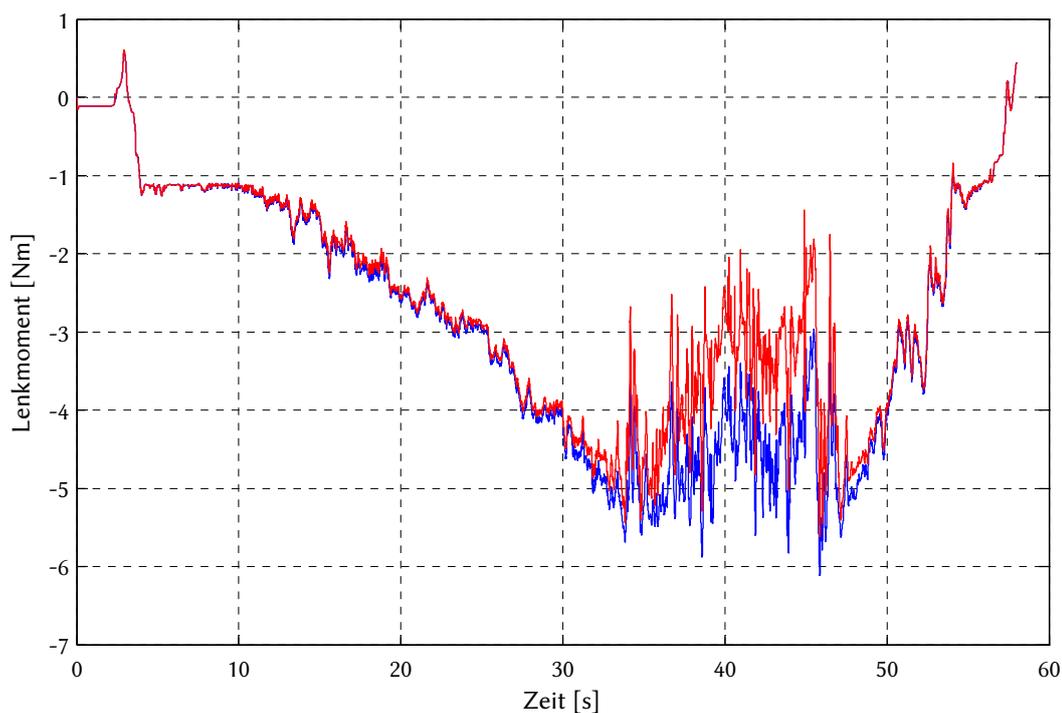
## 3.2 Lenkgefühloptimierung bei gemessener Zahnstangenkraft

In diesem Kapitel werden Maßnahmen entwickelt, die v. a. zur Verbesserung des Lenkgefühls bei SbW mit gemessener Zahnstangenkraft dienen. Hierbei werden die gemessenen Kräfte derart verarbeitet, dass eine möglichst gute Übermittlung der Nutzinformationen bei starker Unterdrückung von Störungen gewährleistet wird.

Die Anwendung dieser Maßnahmen ist prinzipiell auch auf geschätzte Zahnstangenkräfte möglich. Jedoch sind diese Informationen in der Schätzung der Zahnstangenkraft nach derzeitiger Erkenntnis so schwach ausgeprägt, dass dies nicht sinnvoll erscheint.

### 3.2.1 Einstellung der Fahrbahnrückmeldung

Für die Rückmeldung des Fahrbahnkontakts sind vorwiegend höhere Frequenzen relevant, nach [42] bis etwa 15 Hz. Bei einer herkömmlichen Lenkung bestimmen ihre mechanischen



**Bild 3.6:** Lenkmomentverlauf bei beschleunigter Kreisfahrt bis in den Grenzbereich, regulär (blau) und mit Verstärkung der Reifennachlaufänderung (rot)

Eigenschaften, d. h. Trägheit, Dämpfung und Reibung, die Übertragung von Spurstangenkräften auf das Lenkmoment. Je höher der Durchlassbereich dieser Übertragungsfunktion im Frequenzbereich endet, desto *rückmeldefreudiger* wird eine Lenkung typischerweise beurteilt. Allerdings werden auch vermehrt Störungen über das Lenkrad an den Fahrer übertragen, beispielsweise Stöße durch Fahrbahnebenheiten.

Ein SbW-System bietet hier die Möglichkeit, die gemessenen Spurstangenkräfte beliebig zu filtern und somit das Übertragungsverhalten gezielt einzustellen. Somit lässt sich, je nach Fahrzeug und Abstimmungsziel, mit wenig Aufwand ein lokales Optimum für den Zielkonflikt zwischen guter Rückmeldung der Nutzinformation und Unterdrückung der Störungen realisieren.

Für die Versuche in Kapitel 4 werden zwei Filtervarianten mit einer Grenzfrequenz von 15 bzw. 35 Hz realisiert. Dabei haben sich Butterworth-Filter niedriger Ordnung bewährt, da sie den Durchlassbereich wenig verfälschen und das Phasenverhalten nicht spürbar beeinträchtigen.

### 3.2.2 Reduktion der Lenkungsstößigkeit

Die im vorigen Kapitel beschriebene Filterung der Zahnstangenkraft erlaubt lediglich einen Kompromiss zwischen guter Rückmeldung und geringer Stößigkeit. Während sich Stöße durch eine große Amplitude auszeichnen, wird im Folgenden angenommen, dass Nutzinformationen (z. B. die Rückmeldung der Fahrbahnbeschaffenheit) deutlich kleinere Amplituden aufweisen. Ein analoges Filter, das Stöße ausreichend unterdrückt, dämpft bei gleicher Fre-

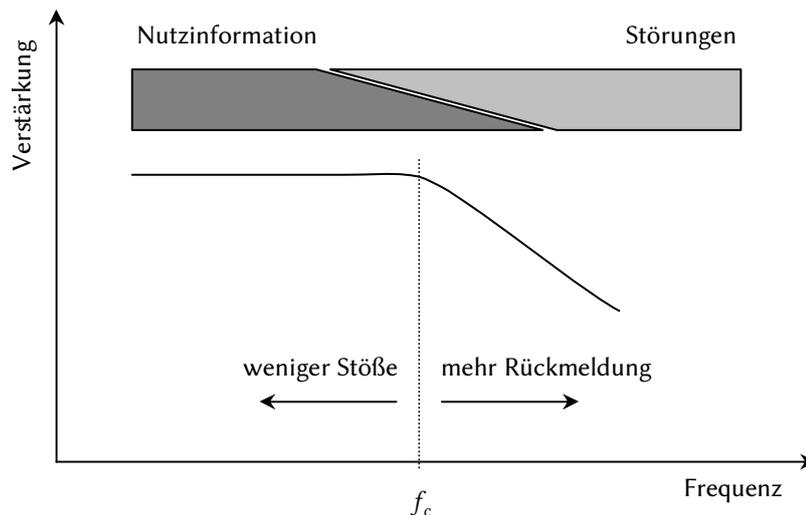


Bild 3.7: Einfluss der Tiefpass-Eckfrequenz auf Stößigkeit und Rückmeldung (angelehnt an [42])

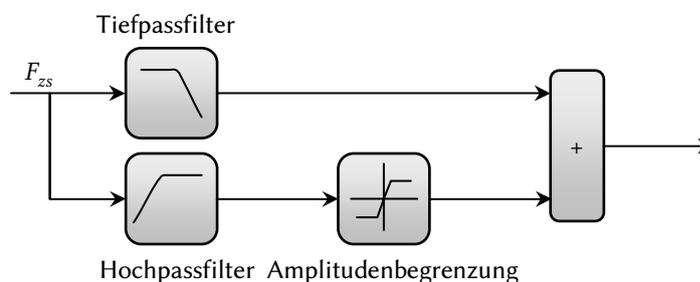


Bild 3.8: Reduktion der Stößigkeit unter Beibehaltung der Rückmeldung des Fahrbahnkontakts

quenz auch Schwingungen kleiner Amplitude. Über die Frequenz ist somit keine exakte Trennung von Nutzinformation und Störungen möglich, wie z. B. auch der Überlappungsbereich in Bild 3.7 zeigt. Günstig wäre eine geringe Dämpfung von Anregungen kleiner Amplitude und eine hohe Dämpfung hoher Amplituden. Um diese Annahme zu überprüfen, wird eine frequenzabhängige Amplitudenbegrenzung eingeführt, wie in Bild 3.8 dargestellt.

### 3.3 Übergreifende Maßnahmen zur Optimierung des Lenkgefühls

Gegenüber einer elektromechanischen oder hydraulischen Servolenkung bietet SbW einige systemimmanente Vorteile, die das Lenkgefühl verbessern, oder dessen Abstimmung vereinfachen. Diese Vorteile sind von der Bestimmung des Lenkmoments unabhängig und werden in Kapitel 3.3.1 geschildert. Kapitel 3.3.2 beschreibt eine Methode zur Verstärkung der Lenkmomentdegression beim Untersteuern, die den Fahrer vor dem Grenzbereich deutlicher warnen soll. Auch diese kann auf beliebige Formen der Lenkmomentsimulation angewendet werden.

### 3.3.1 Systemimmanente Vorteile für die Berechnung und Abstimmung des Lenkmoments

In manchen Fahrzeugen ist es schwierig, eine Lenksäule mit idealer W- oder Z-Anordnung der Kreuzgelenke zu realisieren. Bei Abweichung von diesen Anordnungsformen entsteht eine ungleichförmige Übersetzung zwischen Lenkrad und Lenkgetriebeeingang, die u. a. zu spürbaren Lenkmomentschwankungen führen kann. Diese Problematik entfällt bei SbW mangels Lenksäule komplett.

Durch den Wegfall der mechanischen Verbindung zum Lenkgetriebe sind bei SbW zudem die Einflüsse von Reibung, Dämpfung und Trägheit des Lenkgetriebes nicht spürbar. Nach [72] sind Reibung und Dämpfung mitunter vorteilhaft, um die Regelgüte unter Einfluss von Schwingungen zu erhöhen, deshalb sollten sie künstlich nachgebildet werden. Ein Lenkungsmodell wie in Kapitel 2.4 ist dafür geeignet. Mit einem solchen Modell können die Parameter für Reibung und Dämpfung sehr einfach und in weiten Grenzen verändert werden. Zu hohe Werte für Reibung und Dämpfung beeinträchtigen jedoch das Lenkgefühl durch die sogenannte *Klebrigkeit*. Diese zu reduzieren, ist meist nur durch konstruktive Maßnahmen möglich und in einem begrenzten Umfang. Mit SbW lassen sich dagegen die spürbare Reibung und Dämpfung mit wenig Aufwand einstellen, unabhängig von den tatsächlich im Lenkgetriebe vorhandenen Verhältnissen. Des Weiteren sind komplexere Modelle denkbar, etwa geschwindigkeitsabhängige Dämpfungsbeiwerte, die beispielsweise der Optimierung der Lenkungsrückstellung dienen, oder die Fahrstabilität bei hohen Geschwindigkeiten verbessern.

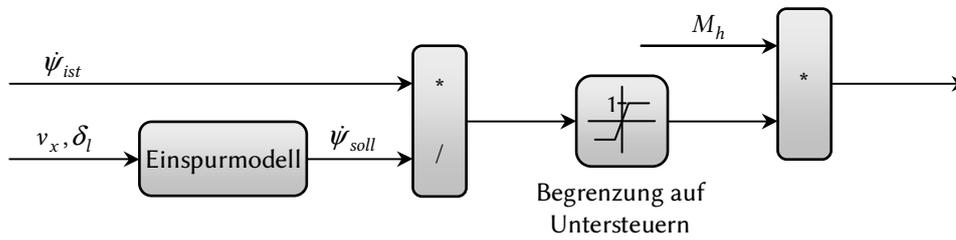
### 3.3.2 Verstärkung der Lenkmomentdegression beim Untersteuern

In Kapitel 3.1.3 wurde geschildert, dass es vorteilhaft ist, das Erreichen des Grenzbereichs beim Untersteuern deutlich spürbar zu machen. Die dort beschriebene Verstärkung von Reifennachlaufänderungen ist bei gemessenen Zahnstangenkräften oder bei einfachen lenkwinkelproportionalen Lenkmomenten nicht anwendbar. Für solche Fälle ist es möglich, den Grenzbereich zu erkennen und das Lenkmoment gezielt zu verringern.

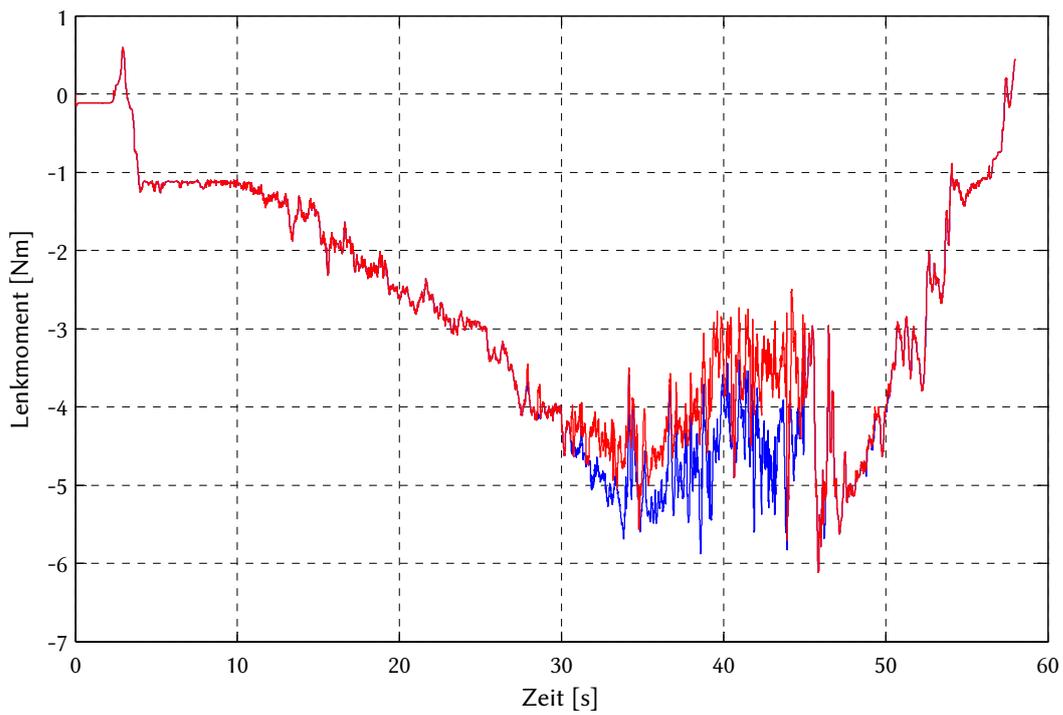
Die Erkennung des Grenzbereichs ist auf verschiedene Arten möglich. Von Vietinghoff beschreibt in [85] mehrere „Erkennungsmethoden auf Basis des linearen Einspurmodells“. Im Folgenden wird der Zustand *Untersteuern* detektiert, wenn die im Fahrzeug gemessene Ist-Gierate kleiner ist, als die mit einem Einspurmodell berechnete Soll-Gierate. Eine ähnliche Herangehensweise findet sich etwa in Stabilitätsregelsystemen. An Stelle eines Regeleingriffs wird in diesem Fall das Lenkmoment skaliert, proportional zum Verhältnis von Soll- und Ist-Gierate. Die prinzipielle Funktionsweise verdeutlicht Bild 3.9.

Zur Vermeidung numerischer Instabilitäten bei der Geradeausfahrt wird die Funktion erst bei Überschreitung einer Mindestgierate aktiviert. Um ein zu frühes Eingreifen der Funktion zu verhindern, ist zudem eine Mindestabweichung zwischen Soll- und Ist-Gierate definiert, die für die Aktivierung erreicht werden muss.

Bild 3.10 zeigt die Wirkung der Funktion.



**Bild 3.9:** Prinzip der Verstärkung der Lenkmomentdegression im Grenzbereich



**Bild 3.10:** Lenkmomentverlauf bei beschleunigter Kreisfahrt bis in den Grenzbereich, regulär (blau) und mit Verstärkung der Lenkmomentdegression (rot)



# 4 Bewertung der entwickelten Modelle

Im Folgenden werden die durchgeführten Probandenversuche beschrieben, die zur Bewertung der zuvor dargestellten Lenkmomentfunktionen durchgeführt wurden. In Kapitel 4.1 werden die verschiedenen Varianten aufgeführt, die bewertet wurden. Kapitel 4.2 beschreibt die Methodik, die den Versuchen zu Grunde lag. In Kapitel 4.3 werden schließlich die Ergebnisse aufgezeigt und interpretiert.

## 4.1 Gegenstand der Untersuchungen

Die durchgeführten Versuche hatten zwei Zielsetzungen. Zum einen sollte untersucht werden, ob es möglich ist, mit einer mechanisch entkoppelten SbW-Lenkung ein ähnlich gutes Lenkgefühl zu erzeugen, wie mit einer herkömmlichen Servolenkung. Dabei wurden zwei Ansätze zur Berechnung des Lenkmoments untersucht. Wie in Kapitel 2 beschrieben, handelt es sich dabei um die Berechnung des Lenkmoments aus gemessenen sowie aus modellbasiert geschätzten Zahnstangenkräften.

Zum anderen sollte die Wirksamkeit der in Kapitel 3 dargestellten Optimierungsmaßnahmen untersucht werden. Dazu wurden folgende Varianten in Verbindung mit der Zahnstangenkraftschätzung umgesetzt:

- Prädiktion der Querschleunigung auf Basis eines Einspurmodells
- Aufschaltung höherfrequenter Gierratenanteile zur Verstärkung der Fahrbahnrückmeldung
- Verstärkung von Reifennachlaufänderungen.

Zur Bewertung wurden diese Maßnahmen gebündelt in einem zweiten, *optimierten* Schätzer realisiert. Dabei wurden nur die genannten Funktionen hinzugefügt, der Aufbau und die Parametrierung des restlichen Modells ist mit der Basisvariante des Schätzers identisch.

Die Lenkgefühlssimulation mit gemessener Zahnstangenkräften wurde um folgende Funktionen erweitert:

- Einstellung der Rückmeldung durch zwei Tiefpassfilter unterschiedlicher Eckfrequenz
- Reduktion der Stößigkeit durch Amplitudenbegrenzung höherer Frequenzen
- Verstärkung der Lenkmomentdegression beim Untersteuern.

Zusätzlich wurden im Vorfeld die simulierte Reibung und Dämpfung des Lenkungsmodells abgestimmt. Die so gewonnenen Werte wurden bei allen SbW-Varianten verwendet.

Insgesamt wurden somit sieben Varianten bewertet: die EPS, zwei Schätzer und vier Varianten mit gemessener Zahnstangenkraft (vgl. Tabelle 4.1).

Variante	Beschreibung
EPS	Basis-EPS
DMS35	SbW mit DMS-Messung, 35 Hz TP
StRed	SbW mit DMS-Messung, 40 Hz TP, Stößigkeitsreduktion
DMS15	SbW mit DMS-Messung, 15 Hz TP
DMSDeg	wie DMS35, zusätzlich Verstärkung Lenkmomentdegression
Est	SbW mit Schätzer (Estimator)
EstOpt	SbW mit optimiertem Schätzer

Tabelle 4.1: Zuordnung der bewerteten Varianten

## 4.2 Methodik

„Die Subjektivbeurteilung ist seit Jahrzehnten in der Automobilindustrie etabliert und bis heute eines der wichtigsten Instrumentarien zur Bewertung und Abstimmung des Fahr- und Lenkverhaltens von Personenkraftwagen“ [41]. Da die Subjektivbeurteilung nach wie vor das zuverlässigste Mittel zur Beurteilung des Lenkgefühls darstellt (vgl. auch Kapitel 1.2.1.2), wird sie in dieser Arbeit verwendet, um die entwickelten Modelle und Funktionen zu bewerten.

Zur Durchführung ist zunächst ein Versuchsfahrzeug erforderlich, das in Kapitel 4.2.1 vorgestellt wird. In den nachfolgenden Kapiteln werden das Versuchsverfahren (Kapitel 4.2.2) und die konkrete Durchführung (Kapitel 4.2.3) beschrieben.

### 4.2.1 Aufbau des Versuchsfahrzeugs

Für den Aufbau des Versuchsfahrzeugs wurde ein Sportfahrzeug vom Typ *Audi TT* mit Allradantrieb gewählt, das bereits über eine elektromechanische Servolenkung verfügt. Die Serienlenkung wurde durch eine ähnliche EPS mit angepasster, integrierter Lageregelung ersetzt. Die Darstellung des Lenkmoments erfolgt ebenfalls elektrisch, über einen konstruktiv angepassten, bürstenlosen Gleichstrommotor (BLDC), wie er z. B. für Fahrsimulatoren eingesetzt wird. Der schematische Aufbau des Fahrzeugs ist in Bild 4.1 dargestellt. Der verwendete Antrieb zeichnet sich durch eine vergleichsweise kompakte Bauart aus und weist auch bei kleinen Lenkgeschwindigkeiten ein sehr gleichförmiges Drehmoment auf. Sowohl in der Simulation (vgl. [63]), als auch im Fahrversuch (vgl. [3]) wurde bereits nachgewiesen, dass sich eine mangelnde Bandbreite der verwendeten Aktorik und Sensorik negativ auf Fahr- und Lenkgefühl von Steer-by-Wire-Fahrzeugen auswirken. Aus diesem Grund wurde ein Fahrzeug mit relativ geringer Vorderachslast gewählt, so dass die verwendete seriennahe EPS-Lenkung ausreichend Leistungsreserven bietet. Des Weiteren ist der Lenkmomentsteller bezüglich Nenn- und Überlastmoment größer dimensioniert, als für den normalen Fahrbetrieb erforderlich. Dadurch lassen sich zudem beispielsweise Lenkungsendschläge realistisch simulieren.

Beide Aktoren werden durch einen Echtzeitrechner (Rapid Prototyping Einheit) angesteuert.

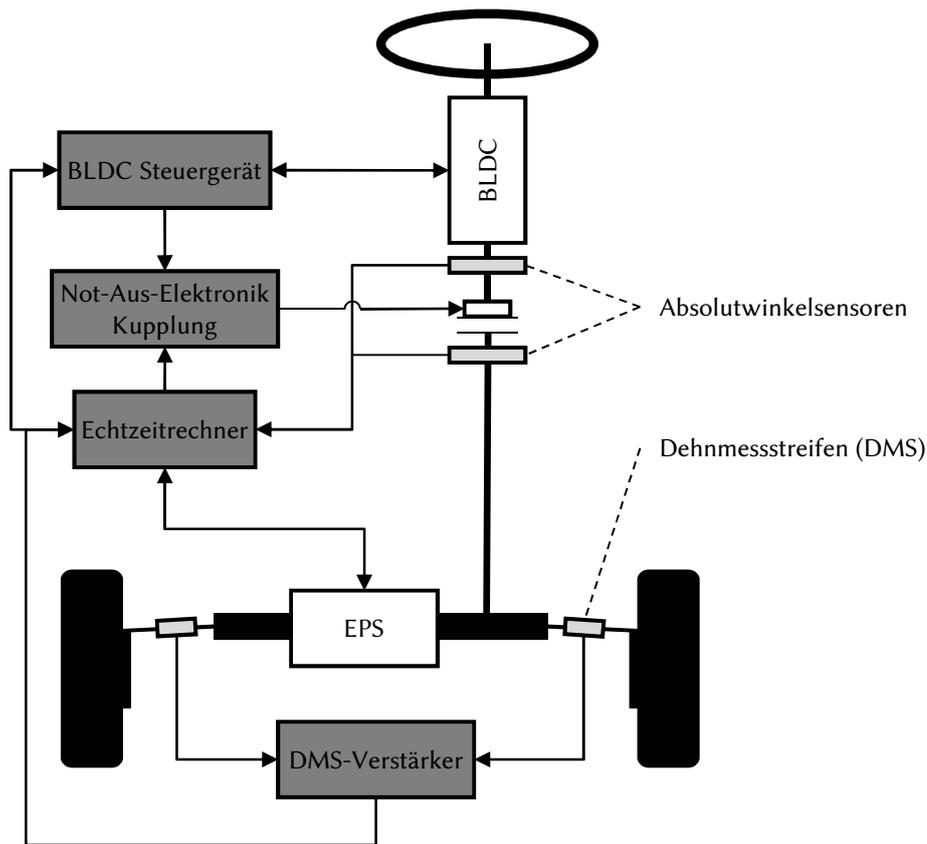


Bild 4.1: Schematischer Aufbau des Versuchsfahrzeugs

ert, in dem auch sämtliche verwendeten Sensoren eingelesen werden.

### Sicherheitskonzept

Als Rückfallebene ist weiterhin eine mechanische Lenksäule vorhanden, die im Normalfall durch eine Zahnkupplung aufgetrennt ist. Die Kupplung schließt federdruckbetätigt und wird elektromagnetisch geöffnet. Bei Wegfall der Versorgungsspannung schließt die Kupplung folglich selbsttätig. Ein aktives Schließen in anderen Fehlerfällen ist ebenfalls möglich - dabei wird das elektromagnetische Feld umgekehrt, wodurch sich die Schließzeit verringert.

Bei geschlossener Kupplung wird der Lenkmomentaktor deaktiviert und die EPS übernimmt den Lenkhilfebetrieb. Die Beugewinkel der Lenksäulengelenkwelle entsprechen dem Serienfahrzeug, ebenso die Übersetzung von Lenkradwinkel zu Zahnstangenhub der EPS. Zudem ist die Abstimmung des Unterstützungskennfelds der Lenkhilfe weitgehend an das Serienfahrzeug angepasst. Bei geschlossener Kupplung wird somit ein sehr ähnliches Lenkgefühl wie im Serienfahrzeug dargestellt. Da die Simulationsmodelle im SbW-Betrieb ein Servolenkungsmodell mit nahezu dem gleichen Unterstützungskennfeld verwenden, sind somit in einem Fahrzeug die SbW-Varianten und die EPS bei geschlossener Kupplung gut vergleichbar.

Im Hinblick auf die Sicherheit stellt eine SbW-Lenkung selbst für Versuchszwecke hohe

Anforderungen. Ein Ausfall der Lenkung kann äußerst zeitkritisch sein, die menschlichen Reaktionszeiten sind meist viel zu lang. Ein manueller Not-Aus-Schalter zur Betätigung der Zahnkupplung ist zwar vorhanden, reicht jedoch bei weitem nicht aus.

Das gesamte Sicherheitskonzept umfasst folgende wesentliche Punkte, die nachfolgend beschrieben werden:

- Redundante bzw. überwachte Sensorik
- Eigendiagnose der Aktoren
- Überwachung der Kommunikation
- Funktionale Überwachung der Aktoren
- Überwachung des Echtzeitrechners

Die EPS und der Lenkmomentaktor verfügen jeweils über einen integrierten Lenkwinkelsensor, zusätzlich ist jeweils ein Absolutwinkelsensor verbaut, um Ausfälle der Winkelsensoren erkennen zu können. Die zur Messung der Spurstangenkräfte verwendeten Dehnmessstreifen werden im DMS-Verstärker auf Sensorbruch überwacht. Der DMS-Verstärker ist per CAN-Bus mit dem Echtzeitrechner verbunden.

Sowohl die EPS, als auch der Lenkmomentaktor verfügen über Eigendiagnosefunktionen, deren Status im Echtzeitrechner ausgewertet werden. Die Datenübertragung dieser Systeme, des DMS-Verstärkers und der fahrzeuginternen Sensoren wird über *Watchdogs* überwacht. Der *Watchdog* überprüft jeweils, ob die per CAN-Bus übertragenen Botschaften in definierten zeitlichen Grenzen eintreffen (*Timeout*) und ob eine Botschaft tatsächlich von neuem Inhalt ist (*Alive-Counter*, d. h. Botschaftszähler). Zur Kommunikationsüberwachung zählt im weitesten Sinne auch die Ansteuerung der Not-Aus-Elektronik. Sie erfolgt im Normalfall mit Spannungen größer Null, ein Kabelbruch oder ähnliche Fehler in der Signalübertragung führen somit ebenfalls zur Abschaltung des SbW-Systems und dem Schließen der Kupplung.

Des Weiteren erfolgt eine Überwachung der EPS und des Lenkmomentaktors auf funktionaler Ebene. Ein einfacher Drehmomentsensor dient zum Vergleich des kommandierten Lenkmoments mit dem tatsächlich gestellten. Zur Regelung wird dieser Sensor nicht eingesetzt. Die von der EPS gestellte Ist-Position wird auf einen gedachten Lenkradwinkel umgerechnet und mit dem am Lenkrad gemessenen Sollwinkel verglichen. Dieser Vergleich gestaltet sich relativ aufwändig, um bei geringer Zahl von Fehlauflösungen trotzdem eine schnelle Auslösung im Fehlerfall zu gewährleisten: bei normalen Lenkbewegungen beträgt die Soll-Ist-Abweichung i. d. R. weniger als 5°, beim sehr schnellen Anreißen sind dagegen Abweichungen bis etwa 20° möglich. Um bei normalen Fahrmanövern keine übermäßig großen Abweichungen zuzulassen, wurde eine dynamisch angepasste Schwelle zulässiger Soll-Ist-Abweichungen entwickelt, die v. a. von der Lenkwinkelgeschwindigkeit und -beschleunigung abhängig ist.

Der Echtzeitrechner, auf dem sämtliche Überwachungsfunktionen ausgeführt werden, wird selbst vom Steuergerät des Lenkmomentaktors überwacht. Eine Kontrollbotschaft mit Botschaftszähler wird vom Echtzeitrechner verschickt. Auf dem Steuergerät ist ein weiterer



**Bild 4.2:** Innenraum des Versuchsfahrzeugs

*Watchdog* implementiert, der den Timeout und den Botschaftszähler der Kontrollbotschaft überprüft. Im Fehlerfall aktiviert das Steuergerät die Not-Aus-Elektronik.

Um den subjektiven Eindruck im Versuch möglichst wenig zu beeinflussen, wurde der SbW-Aufbau unauffällig im Innenraum integriert. Der Lenkmomentaktor wird von der Lenksäulenverkleidung des Standardfahrzeugs verdeckt. Das Lenkrad entstammt dem Serienfahrzeug und auch die Lenkstockhebel sind vorhanden und funktionsfähig. Bild 4.2 zeigt den geringfügig veränderten Innenraum.

#### 4.2.2 Bewertungsverfahren

Bei den durchgeführten Probandenversuchen sollte das Lenkgefühl möglichst umfassend beurteilt werden. Die Rückmeldung des Fahrbahnkontakts sollte dabei ebenso Gegenstand der Bewertung sein, wie beispielsweise das Erreichen des Grenzbereichs. Für die Versuchsplanung müssen Probanden ausgewählt, Bewertungskriterien definiert und ein Bewertungsmaßstab festgelegt werden.

Bei der Auswahl von Probanden stellt sich die Frage nach der Qualifikation und der Anzahl der Versuchsfahrer. Hinsichtlich Qualifikation wird typischerweise unterschieden zwischen *Normalfahrern* und *Experten*, wobei hier unter Experten professionelle Testfahrer zu verste-

hen sind, die über Erfahrung in der Beurteilung von Lenksystemen verfügen. Je nach Untersuchungsgegenstand haben beide Probandengruppen ihre Vor- und Nachteile. Wie Buschardt hervorhebt, können Experten auch im fahrdynamischen Grenzbereich sicher fahren und gleichzeitig das Fahrzeug bewerten [22]. Ihr Urteil ist in der Regel durch höhere Wiederholbarkeit und geringere Streuung gekennzeichnet, als das von Normalfahrern. Da sich Experten oftmals schneller an verschiedene Varianten adaptieren können, ist es mitunter schwieriger, aus dem Fahrverhalten objektive Kriterien abzuleiten. Soll beispielsweise aus der Abweichung zwischen Soll- und Istkurs auf die Qualität des Lenkverhaltens geschlossen werden, besteht die Gefahr, dass Experten durch die schnelle Adaption an verschiedene Varianten ähnlich kleine Abweichungen erzielen. Ein weiterer Nachteil einer Expertenbewertung ist, dass die Erkenntnisse daraus nicht zwingend auf Normalfahrer übertragbar sind.

Die Frage nach der Anzahl der Probanden lässt sich nicht pauschal beantworten, sie unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren. „Um zu genauen Ergebnissen ... zu kommen sind im Allgemeinen Versuchspersonenzahlen deutlich > 1000 notwendig. [...] Geht es nur darum, den Trend von Einflüssen im Rahmen einer Zusammenhangshypothese zu untersuchen, kommt man ... mit weit geringeren Versuchspersonenzahlen aus (Größenordnung 10).“ [21]. Durch die genannte erhöhte Beurteilungsqualität können bei Expertenbewertungen oftmals weniger Probanden herangezogen werden, als dies bei Normalfahrern erforderlich wäre.

In Kapitel 1.2.1.1 wurden bereits einige Anforderungen an das Lenkgefühl dargestellt. Wesentlich sind die Rückmeldung des Fahrzustands ohne Übermittlung von Störeinflüssen, geringer Diskomfort und die Unterstützung der Propriozeption. Diese Punkte lassen sich noch deutlich feiner untergliedern und ergänzen. Ausgehend von [18], [40] und [44] wurden die Bewertungskriterien in Tabelle 4.2 erarbeitet.

Diese recht feine Untergliederung der Bewertungskriterien setzt eine ausführliche Einweisung voraus, oder Probanden, die bereits über Erfahrung mit vielen oder allen Kriterien verfügen. Einige der Kriterien setzen explizit voraus, dass der Proband das Fahrzeug im Grenzbereich beherrschen und gleichzeitig beurteilen kann. Zudem sollte die Bewertung bewusst auch bei hochdynamischen Fahrmanövern durchgeführt werden. Dadurch bieten sich für die Probandenversuche in erster Linie Experten an. Vorteilhaft ist zudem die geringe zu erwartende Streuung der Subjektivurteile von erfahrenen Beurteilern.

Neun männliche Probanden mit Erfahrung in der Beurteilung von Lenksystemen haben sich zu den Versuchen bereit erklärt. Es handelte sich um Versuchs- und Abstimmingenieure der Audi AG aus den Tätigkeitsbereichen Lenkungsentwicklung, Fahrwerk- sowie Reifenabstimmung und Fahrwerkvorentwicklung.

Als Bewertungsmaßstab wurde die in der Automobilentwicklung gebräuchliche 10er-Skala gewählt (vgl. Tabelle 4.3). Die Skala wurde ergänzt um eine qualitative Beurteilung, angelehnt an Harrer (vgl. Tabelle 4.4), wodurch eine *Begründung* der Note möglich wird. Die Zahlenstufen von -3 bis 3 wurden für die Versuche mit Worten beschrieben, für das Kriterium *Lenkmomentniveau* beispielsweise mit *'viel zu niedrig'*, *'deutlich niedrig'*, *'etwas zu niedrig'*, *'optimal'*, usw. Zur numerischen Auswertung sind jedoch Zahlenwerte erforderlich. Bei manchen Kriterien ist die Skala auf die Stufen -3 bis 0 begrenzt. Das Lenkmoment beispielsweise kann zu ungleichförmig sein, jedoch nicht zu gleichförmig. Die Diagramme weisen für eine einheitliche Skalierung trotzdem Werte von -3 bis 3 auf, die Beschreibung heißt in diesem Fall jedoch *ungleichförmig – optimal*.

Zusätzlich zu diesen beiden Skalenbewertungen wurden relevante Kommentare der Probanden für die weitere Auswertung notiert.

Kriterium	Beschreibung
Lenkmomentniveau beim Parkieren / Rangieren	Betrag des Lenkmoments bei Stillstand und niedrigen Geschwindigkeiten
Lenkmomentniveau bei Kurvenfahrt	Betrag des Lenkmoments bei verschiedenen Kurvenradien und Geschwindigkeiten, z. B. Landstraße
Lenkmomentgleichförmigkeit	Verlauf des Lenkmoments beim Lenken von Anschlag zu Anschlag im Stand; sollte keine Schwankungen aufweisen
Lenkmomentanstieg über $a_y$	Harmonischer Anstieg des Lenkmoments über der Querschleunigung erwünscht
Lenkmomentanstieg über $v_x$	Harmonischer Anstieg des Lenkmoments mit der Fahrgeschwindigkeit erwünscht (geschwindigkeitsabhängige Lenkunterstützung)
Lenkmomentdegression im Grenzbereich	Rückgang oder Umkehrung des Lenkmomentgradienten soll Haftgrenze der Reifen spürbar machen
Mittengefühl	v. a. Lenkmomentniveau und -anstieg aus der Mitte bei kleinen Lenkwinkeln
Reibung	Lenkmoment, das der Lenkbewegung entgegengerichtet ist, Betrag idealisiert konstant; zu wenig Reibung beeinträchtigt die Lenkpräzision und verursacht nervöses Verhalten, zu viel Reibung beeinträchtigt ebenfalls die Lenkpräzision
Rückmeldung, Nutzinformation	Spürbarkeit des Reifen-Fahrbahn-Kontakts, z. B. Fahrbahnbeschaffenheit, Reibwert
Rückmeldung, Störungen	V. a. Stöße aus Fahrbahnunebenheiten sollen weitgehend vermieden werden
Rückstellung	Selbständiger Rücklauf des Lenkrads in die Mitte durch das Lenkmoment; Überschwinger ist dabei zu vermeiden
Lenkpräzision bei Kurvenfahrt	Unterstützung präziser Lenkeingaben durch geeigneten Lenkmomentanstieg über Lenkwinkel
Lenkpräzision bei Geradeausfahrt	Unterstützung präziser Lenkeingaben durch geeigneten Lenkmomentanstieg über Lenkwinkel; geringer Korrekturaufwand bei Spurhaltung erwünscht
Gesamteindruck	Zusammenspiel von Lenkmoment, Rückmeldung und Fahrzeugreaktion auf Lenkeingaben

Tabelle 4.2: Kriterien zur subjektiven Bewertung des Lenkgefühls

Definition	Mängel	wahrnehmbar durch	Note
derzeit optimal	nicht wahrnehmbar	ausgebildete Beobachter	10
sehr gut	kaum wahrnehmbar	ausgebildete Beobachter	9
gut	äußerst gering	ausgebildete Beobachter, kritische Kunden	8
noch gut	sehr gering	kritische Kunden	7
befriedigend	gering	kritische Kunden	6
genügend	gut wahrnehmbar	kritische Kunden, Normal- kunden	5
mangelhaft	unangenehm (Reklamation)	Normalkunden	4
schlecht	nicht akzeptabel, Bauteil feh- lerhaft	alle Kunden	3
sehr schlecht	nicht akzeptabel, Bauteil be- dingt funktionsfähig	alle Kunden	2
völlig ungenügend	nicht akzeptabel, Bauteil ohne Funktion	alle Kunden	1

Tabelle 4.3: 10er-Notenskala zur Subjektivbewertung nach [44]

Kriterium	Note	-3	-2	-1	0	1	2	3
Lenkmomentniveau	7			x				

Tabelle 4.4: Erweiterung der 10er-Notenskala zur Subjektivbewertung durch qualitative Bewertungen

Block	Strecke	Kriterien	Varianten
1	Dynamikfläche	Lenkmomentniveau Parkieren / Rangieren, Lenkmomentgleichförmigkeit, Rückstellung, Reibung, Lenkmomentanstieg über $v_x$	EPS, DMS35, Est, EstOpt
2	„kurvige Landstraße“	Lenkmomentanstieg über $a_y$ , Lenkmomentdegression Grenzbereich, Lenkmomentniveau Kurvenfahrt, Lenkpräzision, Gesamteindruck	EPS, DMS35, DMSDeg, Est, EstOpt
3	lange Gerade	Lenkpräzision Geradeausfahrt, Mittengefühl	EPS, DMS35, Est, EstOpt
4	„schlechte Landstraße“	Rückmeldung Nutzinformation, Störungen	EPS, DMS35, StRed, DMS15, Est, EstOpt

Tabelle 4.5: Bündelung der Bewertungskriterien und befahrene Strecken

### 4.2.3 Versuchsdurchführung

Für die Probandenversuche wurden die Bewertungskriterien zu sinnvollen Blöcken gebündelt. Jeder Block wurde auf einer geeigneten Strecke auf dem Prüfgelände der *Audi AG* bewertet. Je nach Kriterium wurden ggf. Geschwindigkeiten und / oder Manöver vorgegeben.

Innerhalb eines Bewertungsblocks wurden alle Kriterien mit einer Variante beurteilt, anschließend wurde die nächste Variante gefahren. Bei Bedarf konnten die Probanden Varianten mehrmals fahren und direkt vergleichen.

Einige Funktionen zur Optimierung des Lenkgefühls können zur SbW-Variante mit gemessener Zahnstangenkraft hinzugeschaltet werden. Da diese Funktionen meist nur Teilbereiche des Lenkgefühls beeinflussen, ist es nicht sinnvoll, alle Bewertungskriterien darauf anzuwenden. Beispielsweise haben verschiedene Tiefpassfilter (vgl. Kapitel 3.2.1) keinen Einfluss auf den Anstieg des Lenkmoments über Fahrgeschwindigkeit oder Lenkwinkel. Folglich wurden auf den jeweiligen Strecken nur die dort relevanten Varianten bewertet, um den Aufwand für die Probanden zu reduzieren.

Die Versuche wurden *blind* durchgeführt, d. h. den Probanden war vorab nicht bekannt, welche Varianten sie bewerteten und worin sich die Varianten unterschieden. Um Reihenfolgeeffekte auszuschließen, wurde der Ablauf von Block zu Block zufällig verändert. Für jeden Probanden wurden die Reihenfolgen der Varianten in den Blöcken vorab zufällig permutiert.

Um ein einheitliches Verständnis der Kriterien sicherzustellen, wurden diese vor Beginn der Versuche mit jedem Probanden besprochen.

Die Randbedingungen wurden bei allen Versuchen soweit möglich konstant gehalten. Vor Versuchsbeginn wurden Reifenprofil und -luftdruck überprüft. Bei nicht mehr ausreichendem Profil wurden die Reifen gewechselt, wobei stets der gleiche Reifentyp verwendet wurde. Nach einem Wechsel wurden die Reifen zunächst eingefahren. Die Versuche wurden im Juli 2009 durchgeführt. Trotz wechselhaften Wetters war die Fahrbahn bei allen Versuchen trocken, die Lufttemperatur lag zwischen 15 und 25 °C.

Aus Sicherheitsgründen wurde die Geschwindigkeit bei allen Versuchen auf ca. 130 km/h begrenzt.

## 4.3 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der durchgeführten Probandenversuche vorgestellt und interpretiert. Die Bilder zeigen jeweils in der linken Spalte die Noten auf der 10er-Skala und in der rechten Spalte die qualitative Bewertung. Die Einzeldiagramme sind sog. *Boxplots*, Bild 4.3 zeigt ein Beispiel. Die waagerechten roten Linien stellen den Median der Bewertungen aller Probanden dar. Die blauen Rechtecke zeigen das obere und untere Quartil der Verteilung an und die Querbalken Minimal- und Maximalwerte. Weicht ein Minimal- oder Maximalwert sehr stark von den übrigen Werten ab (mehr als der 1,5-fache Interquartilabstand vom Median), so wird er als Ausreißer betrachtet und gesondert gekennzeichnet. Als Ergänzung zu herkömmlichen *Boxplots* werden die Medianwerte zusätzlich durch eine rot gestrichelte Linie verbunden, um einen schnelleren Vergleich der verschiedenen Varianten zu ermöglichen.

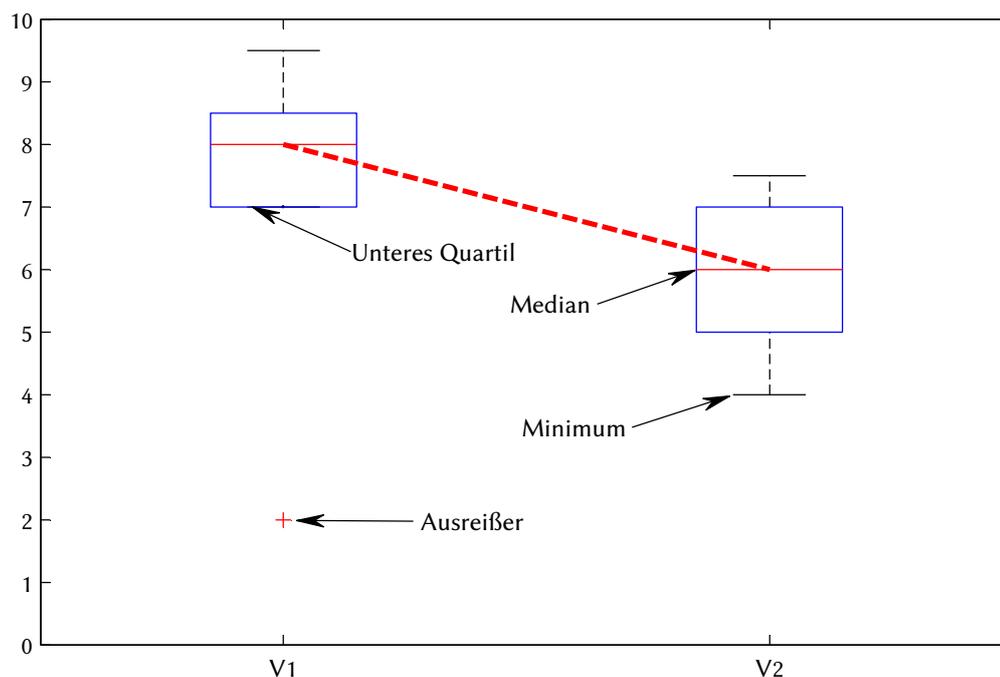


Bild 4.3: Beispiel eines Boxplots

Die bewerteten Varianten werden in den Bildern aus Gründen der Übersichtlichkeit mit Abkürzungen bezeichnet, wie bereits in Tabelle 4.1 aufgeführt. Zur Auswertung wurden die Bewertungskriterien in drei Themengebiete gegliedert. Kapitel 4.3.1 beschreibt Aspekte des Lenkmomentverlaufs, Kapitel 4.3.2 widmet sich der Präzision von Lenkeingaben und in Kapitel 4.3.3 werden alle Kriterien zusammengefasst, bei denen die Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts eine entscheidende Rolle spielt. Kapitel 4.4 fasst die Ergebnisse zusammen.

Um insbesondere knappe Bewertungsunterschiede auf Signifikanz zu prüfen, erfolgt eine Prüfung mittels t-Test für gepaarte Stichproben. Die Vorgehensweise und detaillierte Ergebnisse werden im Anhang in Kapitel A.4 beschrieben.

### 4.3.1 Lenkmomentverlauf

Zum *Lenkmomentverlauf* wurden mehrere Kriterien zusammengefasst, die den Betrag oder den Verlauf des Lenkmoments über verschiedenen Parametern beschreiben. Von den SbW-Varianten mit DMS-Messung wurde exemplarisch DMS35 zur Bewertung ausgewählt. DMS15, DMSDeg und StRed unterscheiden sich davon nur hinsichtlich der Rückmeldung oder der Annäherung an den Grenzbereich. Sie haben auf den Lenkmomentverlauf keinen Einfluss.

Bild 4.4 zeigt die Ergebnisse der Probandenversuche hinsichtlich Lenkmomentniveau im Stillstand und bei Kurvenfahrt, sowie Lenkmomentgleichförmigkeit im Stand und den Anstieg über der Querbeschleunigung.

Die Bewertung des Lenkmomentniveaus ist sowohl vom Fahrzeugtyp, als auch von persönlichen Vorlieben abhängig. Es wurde im Stand bei allen Varianten nahezu identisch be-

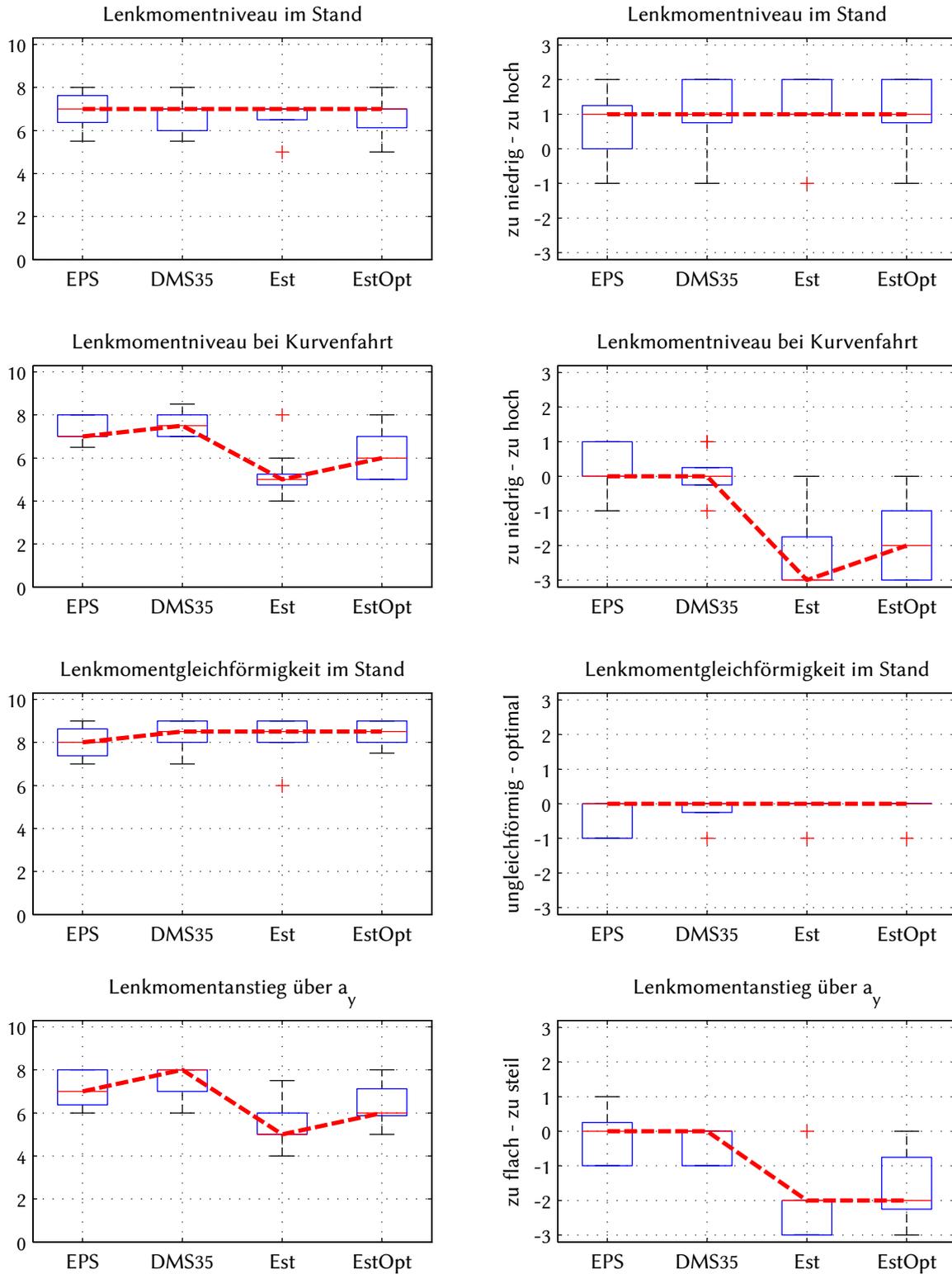


Bild 4.4: Subjektivbewertung: Lenkmomentverlauf Teil 1

wertet. Streuungen ergaben sich vor allem durch unterschiedliche Erwartungshaltungen, d. h. bei den einzelnen Probanden wurden tendenziell alle Varianten als zu leichtgängig oder zu schwergängig eingestuft. Bei Kurvenfahrt wurden die EPS und SbW mit DMS-Messung (DMS35) ähnlich gut bewertet. SbW mit Zahnstangenkraftschätzer (Est) wurde deutlich schlechter beurteilt, weil diese Variante als zu leichtgängig empfunden wurde. Der optimierte Schätzer mit prädizierter Querb beschleunigung (EstOpt) wurde etwas besser bewertet.

Die Gleichförmigkeit des Lenkmoments beim Durchlenken im Stand ist im verwendeten Fahrzeug bereits bei der herkömmlichen EPS auf einem hohen Niveau. Alle SbW-Varianten werden minimal besser beurteilt. Bei SbW mit Messung steigt das Moment zum Endanschlag hin leicht an, was von manchen Probanden als Ungleichförmigkeit bewertet wurde. Das komplett synthetisch berechnete Lenkmoment der beiden Schätzer weist diesen Anstieg nicht auf und wurde dementsprechend sehr gut bewertet. Lediglich leichte Änderungen im Momentniveau bei Lenkrichtungswechseln wurden bemängelt. Ein unangenehm *synthetisches* Lenkgefühl des simulierten Bohrmoments lässt sich aus den Bewertungen und Kommentaren nicht ableiten, das Bohrmomentmodell ist also für eine realistische Nachbildung des Reifenverhaltens gut geeignet.

Die scheinbar vorhandenen Unterschiede in der Bewertung der SbW-Variante DMS35 im Vergleich zur EPS beim Lenkmomentanstieg über der Querb beschleunigung ist nicht signifikant. Beide wurden sehr gut bewertet. Beide Schätzer wurden schlechter bewertet. Dies liegt offenbar am Zeitverzug des Lenkmoments, da der optimierte Schätzer besser bewertet wurde, als die Variante Est. Trotzdem wurde EstOpt etwas schlechter bewertet, als die EPS oder SbW mit DMS-Messung. Wahrscheinliche Ursache ist das Zusammenspiel der künstlichen Mittellage und der Zahnstangenkraftschätzung, das noch harmonischer aufeinander abgestimmt werden sollte.

Bild 4.5 zeigt die Ergebnisse für den Lenkmomentanstieg über der Längsgeschwindigkeit sowie die Rückstellung bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

Der Lenkmomentanstieg über  $v_x$  wurde bei DMS35 etwas niedriger bewertet als die EPS. Beide Schätzer enthalten neben der Servounterstützung zwei weitere Teilmodelle, die von der Fahrgeschwindigkeit abhängig sind – die künstliche Mittellage und das Bohrmoment, welches mit steigender Geschwindigkeit zurückgenommen wird. Diese Teilmodelle sind bei beiden Schätzern vom Modellaufbau und der Parametrierung her identisch. Trotzdem wird Est etwas schlechter bewertet als EstOpt, was darauf schließen lässt, dass sich der Zeitverzug der Seitenkraftschätzung von Est negativ auf das subjektive Empfinden auswirkt. EstOpt wird etwas besser bewertet, allerdings ebenfalls etwas schlechter als die EPS und DMS35. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass die verschiedenen geschwindigkeitsabhängigen Teilmodelle zusammenwirken und in Summe nicht ganz so harmonisch arbeiten, wie die einfacher abstimmbaren Varianten EPS und DMS35.

Die Rückstellung der Lenkung beim Loslassen des Lenkrads in Kurvenfahrt wurde bei allen Varianten bei niedrigen bis mittleren Geschwindigkeiten gut bis sehr gut bewertet. Streuungen ergaben sich teilweise dadurch, dass einige Probanden die aktive Rückstellung von EPS-Lenkungen gewohnt waren, andere hingegen die relativ schlechte Rückstellung hydraulischer Lenkungen als Basis ihrer Urteile verwendet haben. Die niedrigere Bewertung der EPS bei 10 km/h liegt an der prototypischen Lenkung, Serienfahrzeuge mit EPS weisen

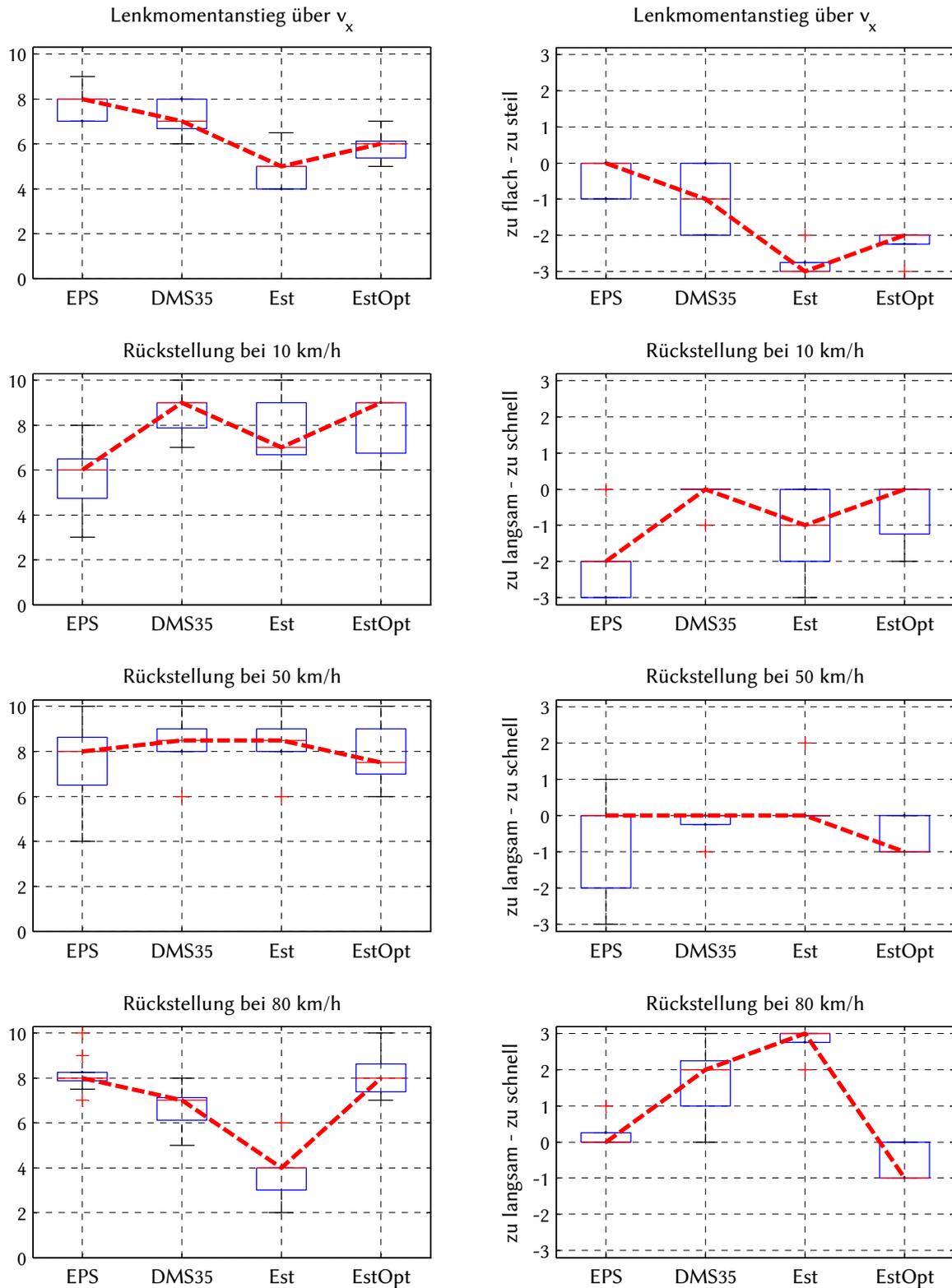


Bild 4.5: Subjektivbewertung: Lenkmomentverlauf Teil 2

typischerweise in diesem Geschwindigkeitsbereich eine bessere Rückstellung auf. Die aktive Rückstellung wurde bei der verwendeten Lenkung nicht optimal abgestimmt, die Bewertung der Rückstellung bei 10 km/h ist deshalb nur eingeschränkt gültig.

Bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h zeigen alle Varianten gute Ergebnisse. Bei 80 km/h weisen EPS und SbW mit DMS-Messung nach wie vor gute Bewertungen auf. SbW mit DMS-Messung hat hier beim Zurückstellen leichte Überschwinger gezeigt. Dies wird vermutlich hervorgerufen durch einen minimalen Zeitverzug in der Signalverarbeitung und -übertragung der Messung in Verbindung mit der geringeren Reibung und Dämpfung im Vergleich zur EPS. Nachträgliche Versuche mit einer geschwindigkeitsabhängigen Dämpfung und einer angepassten aktiven Rückstellung haben jedoch gezeigt, dass sich dieses Problem leicht lösen lässt. Der Zeitverzug des konventionellen Schätzers Est führt bei dieser Geschwindigkeit zu instabilen Schwingungen. Folglich bewerteten die Probanden dieses Kriterium als inakzeptabel. Dämpfungswerte, die dieses Verhalten ausreichend reduzieren, beeinträchtigen das Lenkgefühl zu sehr in Richtung *teigig* bzw. *klebrig*. Die Prädiktion der Querbeschleunigung mit einem Einspurmodell eliminiert hingegen dieses Phänomen und führt zu einer Rückstellung, die durchweg sehr positiv bewertet wurde.

### 4.3.2 Präzision von Lenkeingaben

Das Mittengefühl wurde bei SbW mit DMS-Messung und EPS nahezu identisch bewertet. Die qualitativen Bewertungen der rechten Spalte in Bild 4.6 beziehen sich auf den Lenkmomentanstieg aus der Mitte. Beide Schätzer fallen dagegen etwas ab. Eine andere Abstimmung der künstlichen Mittellage könnte hier Verbesserung bringen. Jedoch zeigt die bessere Bewertung von EstOpt bei 100 km/h, dass sich auch bei kleinen Lenkbewegungen der Zeitverzug von Est negativ bemerkbar macht.

Die Auswirkung des Zeitverzugs schlägt sich auch in der Lenkpräzision bei Kurvenfahrt und Geradeausfahrt nieder. Auch hier bewirkt das verbesserte Zeitverhalten von EstOpt eine höhere Bewertung. Die EPS und SbW mit DMS-Messung wurden beide sehr gut bewertet. Bei Geradeausfahrt ist DMS35 signifikant besser, vermutlich durch die geringere Reibung und Dämpfung, bei Kurvenfahrt ist statistisch keine Verbesserung von DMS35 zur EPS nachweisbar.

Die Reibung, welche die Präzision von Lenkeingaben beeinflusst, wurde im Lenkungsmodell niedriger parametrisiert als bei der EPS-Lenkung vorhanden. Bild 4.7 zeigt die daraus resultierende bessere Bewertungen aller SbW-Varianten. Est wurde signifikant schlechter beurteilt, als DMS35 und EstOpt, obwohl in allen drei Fällen exakt das gleiche Reibmoment simuliert wurde.

### 4.3.3 Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften

Bei der Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften zeigen sich auf der 10er-Skala relativ geringe Unterschiede, die oftmals rechnerisch nicht signifikant sind. Mit Hilfe der Meinungsbewertung lassen sich jedoch in einigen Punkten dennoch signifikante Verbesserungen nachweisen. Hier zeigt sich offenbar ein Nachteil der 10er-Skala, die oftmals nicht in vollem Umfang ausgeschöpft wird.

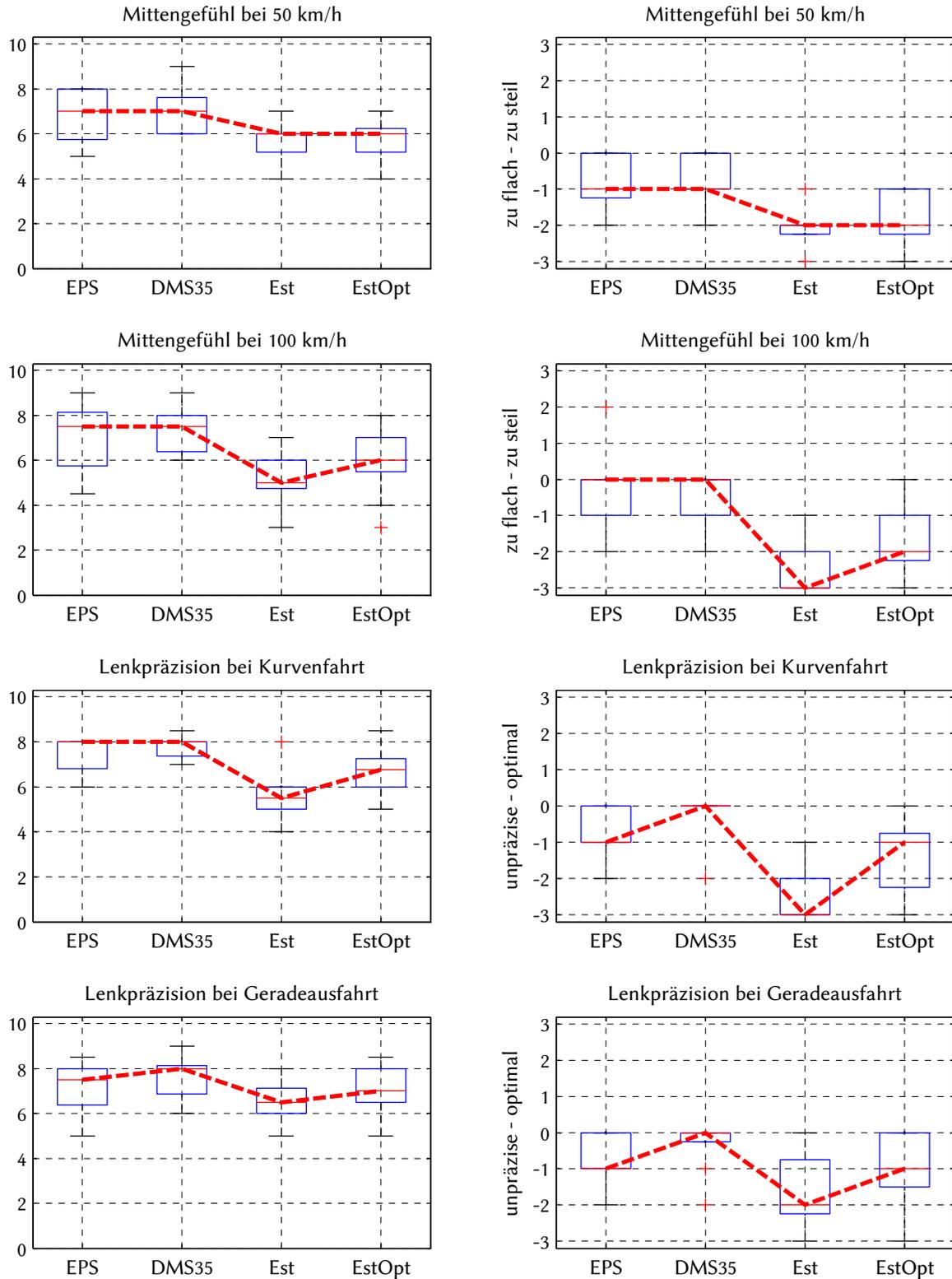


Bild 4.6: Subjektivbewertung: Lenkpräzision

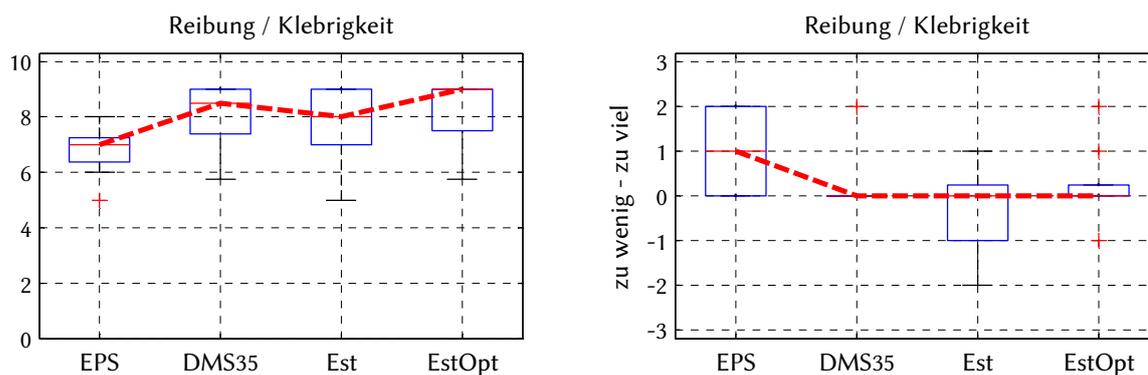
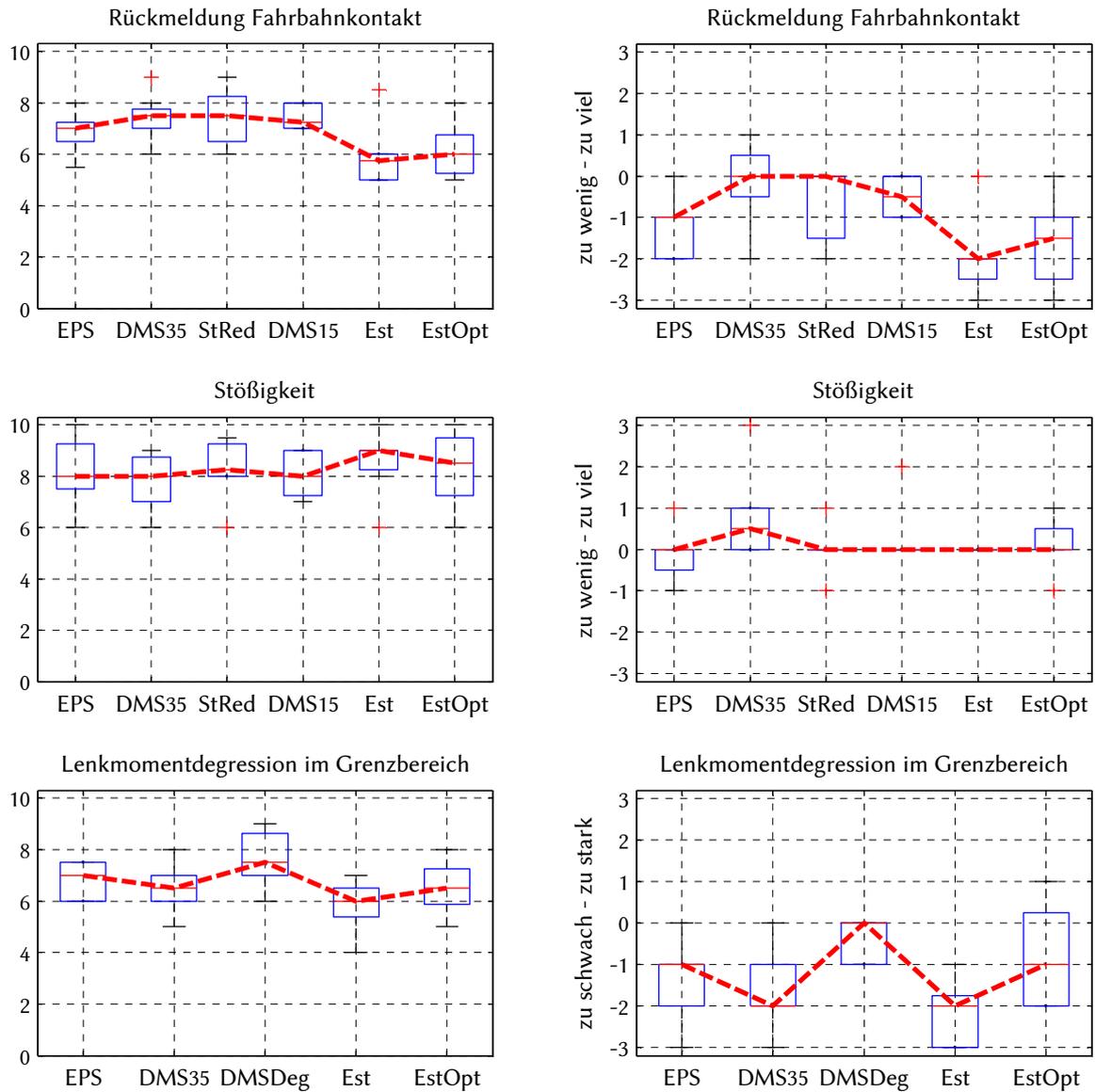


Bild 4.7: Subjektivbewertung: Reibung / Klebrigkeit

Die Rückmeldung des Fahrbahnkontakts wurde bei den SbW-Varianten DMS35, StRed und DMS15 mit gemessenen Zahnstangenkräften durchweg am besten bewertet, wobei die Stößigkeit mindestens ebenso gut bewertet wurde, wie bei der EPS (vgl. Bild 4.8). Die Schätzer Est und EstOpt weisen eine geringere Rückmeldung auf, wurden dafür jedoch hinsichtlich Stößigkeit am besten bewertet. Die Gierratenaufschaltung von EstOpt führt zu einer besseren Bewertung der Rückmeldung bei nicht signifikant verschlechterter Stößigkeit.

Die drei Varianten mit gemessenen Zahnstangenkräften unterscheiden sich in den Noten relativ wenig. StRed mit der Stößigkeitsreduktion gemäß Kapitel 3.2.2 weist im Median der Noten die geringste Stößigkeit auf, bei gleichzeitig guter Rückmeldung. DMS35 mit 35 Hz-Tiefpassfilterung weist eine gute Rückmeldung auf, wurde jedoch schon als etwas zu stößig beurteilt. DMS15 mit 15 Hz-Filter wurde hinsichtlich Stößigkeit tendenziell besser bewertet als DMS35, verliert jedoch etwas an Rückmeldung. StRed scheint diesen Zielkonflikt aufzulösen und wurde in beiden Disziplinen am besten bewertet. Das relativ hohe Quartilsrechteck von StRed zeigt jedoch, dass die Meinungen der Probanden bei dieser Variante stärker auseinander lagen. Bisherige Erfahrungen prägen vermutlich die Bewertung: bei herkömmlichen Lenkungen geht eine bessere Rückmeldung mit einer höheren Stößigkeit einher. Drei Probanden empfanden beispielsweise die leichte Stößigkeit der Variante DMS35 deshalb persönlich als positiv. Drei weitere Probanden befanden die Variante StRed als beste der sechs bewerteten hinsichtlich Rückmeldung und Stößigkeit. Diese unterschiedlichen Präferenzen sowie insgesamt geringe Unterschiede in der Spürbarkeit führen letztlich dazu, dass die im Median scheinbar sichtbaren Unterschiede nicht durchgehend statistisch nachweisbar sind. Die obigen Interpretationen sind folglich nur qualitativ zu werten und sollten durch weitere Versuche mit höherer Probandenanzahl untermauert werden.

Die Lenkmomentdegression beim Erreichen des Grenzbereichs ist bei allen Varianten spürbar. Die Verstärkung der Degression bei DMSDeg zeigt sehr deutlich Wirkung und wurde positiv bewertet. Die Verstärkung von Nachlaufänderungen bei EstOpt (vgl. Kapitel 3.1.3) ist ebenfalls wirksam, wie die signifikant bessere Bewertung gegenüber Est zeigt.



**Bild 4.8:** Subjektivbewertung: Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften

## 4.4 Ergebniszusammenfassung

Für die Lenkgefühlssimulation in einem Steer-by-Wire Fahrzeug wurden verschiedene Varianten umgesetzt. Als Beispiel einer Variante mit Messung der Reifenrückstellkräfte wurden die Zahnstangenkräfte mit Dehnmessstreifen auf den Spurstangen gemessen und mit einem Lenkungsmodell in ein Lenkmoment umgerechnet. Um zu untersuchen, ob auch ohne Messung der Kräfte ein gutes Lenkgefühl erzeugt werden kann, wurde ein Zustandsschätzer auf Basis vorhandener fahrdynamischer Messgrößen entwickelt. Maßgebliche Eingangsgrößen sind Lenkwinkel, Fahrgeschwindigkeit sowie Gierrate und Querbesehleunigung. Ein weiterer, optimierter Schätzer, verwendet an Stelle der in Schwerpunktnähe gemessenen Querbesehleunigung eine Prädiktion mittels Einspurmodell und integriert weitere Zusatzfunktionen, die weiter unten beschrieben werden. Diese drei Grundvarianten zur Erzeugung eines möglichst natürlichen Lenkgefühls sowie eine herkömmliche elektromechanische Servolenkung wurden im Realversuch von Experten bewertet. Zusätzliche Funktionen zur Optimierung des Lenkgefühls führen zu insgesamt sieben bewerteten Varianten (s. u.).

### Vergleich einer herkömmlichen Servolenkung mit Steer-by-Wire

Für eine subjektive Gesamtnote mit eigener Gewichtung der Einzelkriterien sollten die Probanden bei einer separaten Fahrt das Zusammenspiel von Lenkmoment, Rückmeldung und Fahrzeugreaktion auf Lenkeingaben bewerten.

Bild 4.9 zeigt, dass das mit gemessener Zahnstangenkraft simulierte Lenkmoment im SbW-Betrieb am besten bewertet wird. Die konventionelle elektromechanische Servolenkung wird dagegen etwas niedriger, aber immer noch sehr gut bewertet. Die einfachere Schätzung der Zahnstangenkraft führt in der Summe zu einer *unverkäuflichen* Lenkung. Mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Optimierungsmaßnahmen kann das Lenkgefühl des Schätzers deutlich verbessert werden, insbesondere das sicherheitskritische Verhalten der Lenkungsrückstellung.

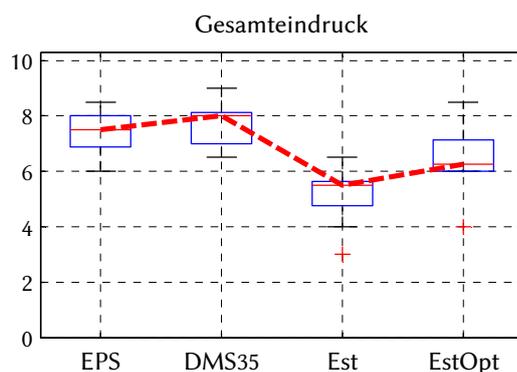


Bild 4.9: Subjektivbewertung: Gesamteindruck

Diese Rangfolge findet sich auch in den meisten Einzelbewertungen wieder. SbW mit gemessener Zahnstangenkraft ist der EPS in sehr vielen Kriterien gleichwertig oder überlegen. Leichte Abstriche sind lediglich beim Lenkmomentanstieg über der Fahrgeschwindigkeit,

der Rückstellung bei hohen Geschwindigkeiten und der Lenkmomentdegression im Grenzbereich zu verzeichnen. Die beiden erstgenannten Punkte sind weitgehend eine Frage der Abstimmung und können ohne Änderungen am Aufbau des Lenksystems oder der verwendeten Modelle weiter verbessert werden. Die Lenkmomentdegression ist auch mit SbW spürbar, jedoch etwas schwächer, als bei der EPS-Lenkung. Mit der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Zusatzfunktion lässt sich auch diese Eigenschaft bei Bedarf verbessern. Somit lässt sich mit SbW in alle Punkten ein besseres Lenkgefühl erzeugen, als mit einer normalen Servolenkung.

Beide Schätzer zeichnen sich durch die besten Bewertungen bei der Lenkmomentgleichförmigkeit im Stand sowie der Stößigkeit aus. Die Schätzung auf Basis der Querschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt leidet vor allem unter deren Zeitverzug. Die Lenkungsrückstellung wird dadurch deutlich verschlechtert, aber auch die Präzision von Lenkeingaben und der Lenkmomentanstieg über Fahrgeschwindigkeit und Querschleunigung werden subjektiv etwas beeinträchtigt. Wird statt dessen die Querschleunigung mittels Einspurmodell aus der Geschwindigkeit und dem Lenkradwinkel berechnet, werden diese Nachteile weitgehend kompensiert. Zusätzliche Optimierungsmaßnahmen tragen dazu bei, auch ohne Kraftmessung ein in vielen Aspekten gutes Lenkgefühl zu erzeugen.

### **Wirksamkeit der Funktionen zur Optimierung des Lenkgefühls**

Zusätzlich zu den drei SbW-Grundvarianten wurden verschiedene Funktionen zur Optimierung des Lenkgefühls entwickelt.

Die Erzeugung des Lenkgefühls mit SbW bietet einige systemimmanente Vorteile. Durch den Wegfall einer Lenksäule mit Kreuzgelenken kann mit SbW ohne besondere Maßnahmen ein sehr gleichförmiger Lenkmomentverlauf über dem Lenkwinkel erzeugt werden. Des Weiteren müssen bei SbW Reibung, Dämpfung und Trägheit explizit modelliert werden. Dies ermöglicht eine einfache Abstimmung dieser Werte durch Veränderung einzelner Parameter. So wurde bei den SbW-Varianten eine geringere Reibung appliziert und die Trägheit vollständig eliminiert. Die positive Wirkung dieser Eigenschaften bzw. Maßnahmen lässt sich aus den Einzelbewertungen ablesen. Sowohl Gleichförmigkeit, als auch Klebrigkeit werden besser bewertet, als beim herkömmlichen Lenksystem.

In Kapitel 3.3.2 wurde eine Funktion beschrieben, die das Lenkmoment verringert, in Abhängigkeit vom Verhältnis der gemessenen Gierrate zur mittels Einspurmodell berechneten Gierrate. Dadurch wird die Lenkmomentdegression im Grenzbereich beim Untersteuern spürbar verbessert, wie die Bewertungen deutlich zeigen. Eine solche Funktion ist prinzipiell auf beliebige Formen der Lenkmomentberechnung anwendbar.

Bei der modellbasierten Schätzung der Zahnstangenkraft lässt sich der gleiche Effekt erreichen, in dem der Reifennachlauf im Schätzermodell virtuell skaliert wird (vgl. Kapitel 3.1.3). Zur Verbesserung der Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts wird die gemessene Gierrate bandpassgefiltert, verstärkt und zum Lenkmoment des Schätzers addiert. Die Bewertung der Rückmeldung verbessert sich dadurch, erreicht jedoch nicht ganz das Niveau der EPS oder der SbW-Variante mit gemessenen Zahnstangenkräften.

Insgesamt lässt sich mit Messung der Kräfte eine bessere Rückmeldung erzielen. Im Gegensatz zur Schätzung ist keine Verstärkung erforderlich, statt dessen bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, die Übertragung von Nutzinformationen und Störungen gezielt zu

verändern. Durch Tiefpassfilterung der Kraftmessung lässt sich die Stößigkeit der Lenkung reduzieren. Je nach Wahl der Eckfrequenz lässt sich je nach Fahrzeug und Abstimmungsziel relativ einfach ein Kompromiss aus Rückmeldung und Stößigkeit erzielen. Zwei deutlich unterschiedliche Eckfrequenzen haben bei der Subjektivbewertung diese Abstimmungsmöglichkeiten hinsichtlich der Rückmeldung unter Beweis gestellt. Bei herkömmlichen Lenksystemen ist diese Veränderung des Übertragungsverhaltens nur sehr eingeschränkt und zumeist nur durch konstruktive Maßnahmen möglich. Es wurde eine weitere Funktion entwickelt, mit dem Ziel, eine gute Rückmeldung mit geringer Stößigkeit zu verbinden. Unter der Annahme, dass sich Fahrbahninformationen und Stöße im Frequenzbereich überlappen, jedoch in der Amplitude unterscheiden, wurde die Amplitude höherer Frequenzen der Zahnstangenkraft begrenzt. In der Subjektivbeurteilung zeigt sich die Wirksamkeit dieser Maßnahme prinzipiell, wobei zusätzliche Versuche mit höherer Probandenzahl sinnvoll wären.

### **Fazit**

Es wurde nachgewiesen, dass eine Steer-by-Wire-Lenkung ein besseres Lenkgefühl aufweisen kann als eine herkömmliche Servolenkung, sofern die Zahnstangenkraft bzw. Spurstangenkräfte gemessen werden. Die Schätzung dieser Kräfte auf Basis von fahrdynamischen Größen bietet das Potential, auf zusätzliche Sensoren im Fahrzeug zu verzichten. Sie ist jedoch im realen Fahrzeug nicht so einfach umzusetzen, wie in der Simulation. Die eingeschränkte Gültigkeit des Grundmodells zur Seitenkraftschätzung um die Mittellage und im Stillstand erfordern zusätzliche Teilmodelle, die harmonisch zusammenwirken müssen. Der Abstimm Aufwand steigt dadurch.

Mit einigen weiteren Funktionen konnte gezeigt werden, dass sich mit SbW Möglichkeiten bieten, das Lenkgefühl gegenüber herkömmlichen Lenksystemen weiter zu verbessern. Die einfachere Abstimmung von Komponenten des Lenkgefühls in einer größeren Bandbreite als bislang wurde am Beispiel der Reibung und Fahrbahnrückmeldung gezeigt. Neue Funktionen, wie die gezielte Veränderung der Rückmeldung in Form der Stößigkeitsreduktion, sind nur mit der mechanischen Entkopplung durch SbW möglich.

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei Steer-by-Wire Lenksystemen entfällt durch die mechanische Entkopplung von Lenkrad und Rädern zunächst das Lenkradmoment. Um dem Fahrer eine Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts zu geben, ist es erforderlich, das Lenkmoment künstlich nachzubilden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Ansätze untersucht, wie dies erreicht werden kann. Als Ziel wurde gesetzt, die hohen Ansprüche geübter Fahrer an ein sportliches Fahrzeug zu erfüllen. Der fahrdynamische Grenzbereich wurde bewusst nicht ausgeblendet, die Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts wurde als Schwerpunkt gewählt.

Dazu wurde ein Versuchsfahrzeug mit SbW-Lenkung entwickelt, in dem sich verschiedene Arten der Lenkmomentsimulation darstellen lassen. Mit Hilfe einer in die Lenksäule integrierten Kupplung kann die Radaktorik zusätzlich als mechanische Lenkung mit elektrischer Lenkhilfe betrieben werden. Somit konnten die verschiedenen Lenkmomentfunktionen bei Verwendung von SbW untereinander und mit einer herkömmlichen Servolenkung verglichen werden.

Mit Dehnmessstreifen an den Spurstangen werden die Rückstellkräfte der Räder gemessen. Es wurde ein Simulationsmodell einer Lenkung mit Servounterstützung entwickelt, mit dem aus den gemessenen Kräften das Lenkmoment berechnet wird. Dasselbe Lenkungsmodell kann mit modellbasiert geschätzten Zahnstangenkräften gespeist werden, so dass beide Ansätze unter identischen Bedingungen vergleichbar sind. Zur Schätzung der Kräfte wurde ein Modell entwickelt, das bis in fahrdynamischen Grenzbereich gute Ergebnisse liefert. Wird die im Fahrzeug gemessene Querschleunigung zur Schätzung der Rückstellkräfte verwendet, weist das Lenkmoment einen deutlichen Zeitverzug gegenüber dem Lenkwinkel auf. Ursache ist der verzögerte Aufbau der Querschleunigung der Karosserie gegenüber den Reifenseitenkräften. Da dieser Zeitverzug das Lenkgefühl und das Rückstellverhalten der Lenkung in vielen Punkten beeinträchtigt, wurde ein zweiter Schätzer mit Prädiktion der Querschleunigung durch ein Einspurmodell umgesetzt.

Es wurden Probandenversuche mit Experten durchgeführt, um die drei Ansätze miteinander und mit der elektromechanischen Servolenkung zu vergleichen.

Unter Verwendung gemessener Zahnstangenkräfte konnte das Lenkgefühl gegenüber der herkömmlichen Servolenkung in einigen Punkten bereits ohne besondere Maßnahmen verbessert werden. Dazu haben u. a. systemimmanente Vorteile geführt, wie z. B. eine optimale Gleichförmigkeit mangels Lenksäule mit Kreuzgelenken oder der freien Parametrierbarkeit der spürbaren Reibung, Dämpfung und Trägheit. Geringere Reibung und Dämpfung wirken sich z. B. positiv auf die Präzision von Lenkwinkleingaben aus.

Eine Zahnstangenkraftschätzung ist vorteilhaft, weil keine zusätzlichen Sensoren benötigt werden, die zusätzliche Kosten verursachen und zudem ausfallen können. Wird dazu die im Aufbau gemessene Querschleunigung genutzt, ergeben sich zahlreiche Nachteile

hinsichtlich Lenkpräzision und Stabilität der Lenkungsrückstellung. Die Rückmeldung des Fahrbahnkontakts ist ebenfalls mäßig, da die hierfür relevanten Frequenzen im Fahrzeugaufbau nur gedämpft gemessen werden. Mit einigen Zusatzmodellen kann das Lenkgefühl auf Basis eines modellbasierten Schätzers jedoch ebenfalls ein zufriedenstellendes Niveau erreichen, wenn auch nicht ganz so gut, wie mit gemessenen Kräften. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand zu sehen, der sich durch die Abstimmung der verschiedenen Teilmodelle aufeinander ergibt.

Des Weiteren wurden Möglichkeiten untersucht, das Lenkgefühl mit SbW aktiv zu verbessern. Dazu wurden mehrere Modelle entwickelt, wobei der Schwerpunkt auf die Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts gelegt wurde. Auch diese Funktionen wurden in Probandenversuchen auf ihre Wirksamkeit hin geprüft.

Im Falle der Zahnstangenkraftschätzung kann eine Verbesserung der Rückmeldung durch Addition der hochpassgefilterten und verstärkten Gierrate erreicht werden. Durch Skalierung des berechneten Reifennachlaufs wird die Annäherung an den Grenzbereich deutlicher spürbar gemacht, was einen Gewinn an aktiver Sicherheit verspricht. Das gleiche Ergebnis lässt sich durch ein weiteres Modell erreichen. Dabei wird die Abweichung der im Fahrzeug gemessenen Gierrate von der durch ein Einspurmodell berechneten Gierrate genutzt, um im Grenzbereich das Lenkmoment gezielt zu reduzieren. Dieses Modell lässt sich in Verbindung mit gemessenen und geschätzten Zahnstangenkräften gleichermaßen einsetzen oder mit beliebigen anderen Methoden der Lenkmomentberechnung.

Im Falle gemessener Zahnstangenkräfte ist es möglich, die Rückmeldung gezielt zu verändern. Der Einsatz verschiedener Tiefpassfilter mit unterschiedlicher Eckfrequenz hat gezeigt, dass sich damit im Zielkonflikt zwischen Rückmeldefreudigkeit und Stößigkeit verschiedene Abstimmungen realisieren lassen, ohne Änderungen an Fahrwerk oder Lenkung vorzunehmen. Durch Begrenzung der Amplitude höherfrequenter Anteile der Kräfte lässt sich dieser Zielkonflikt weitgehend auflösen - unverfälschte Rückmeldung und geringe Stößigkeit können dadurch in Einklang gebracht werden.

Mit der vorliegenden Arbeit wurde der experimentelle Nachweis erbracht, dass das Lenkgefühl einer herkömmlichen Lenkung mit SbW darstellbar ist. Darüber hinaus wurden verschiedene Modelle zur Optimierung des Lenkgefühls entwickelt und validiert, die zum Teil auch auf elektromechanische Lenksysteme übertragbar sind. Damit wurde exemplarisch gezeigt, dass SbW das Potential bietet, das Lenkgefühl gegenüber heutigen Lenksystemen in vielen Punkten weiter zu verbessern.

Im Zusammenhang der Zahnstangenkraftschätzung wäre es in Zukunft interessant, den Einfluss der verwendeten Sensorik auf die Rückmeldung zu untersuchen. Bislang kam die im Fahrzeug standardmäßig verbaute Sensorik zum Einsatz. Die Messung der Querbeschleunigung und Gierrate mit höherer Auflösung oder schnellerer Abtastung könnte zu weiteren Verbesserungen des Lenkgefühls führen. Erste Versuche mit einer Inertialplattform haben keine nennenswerte Auswirkung gezeigt, dies sollte jedoch zukünftig ausführlich untersucht werden. Zudem sollte der Einfluss des Messorts auf den Zeitverzug der Schätzung im Realfahrzeug nachvollzogen werden, in dieser Arbeit erfolgte die Untersuchung rein simulativ.

Der entwickelte Zahnstangenkraftschätzer berücksichtigt bislang den Reifen-Fahrbahn-Reibwert bei Berechnung des Reifennachlaufs und des Bohrmoments nicht. Für den Ein-

satz unter allen Bedingungen müsste der Reibwert bekannt sein, z. B. durch Verwendung eines Reibwertschätzers. Die wirksamen Seitenkräfte sind davon nicht betroffen, sie werden prinzipiell unabhängig vom Reibwert aus der real resultierenden Querschleunigung und Gierrate von dem verwendeten Kalman-Filter geschätzt.

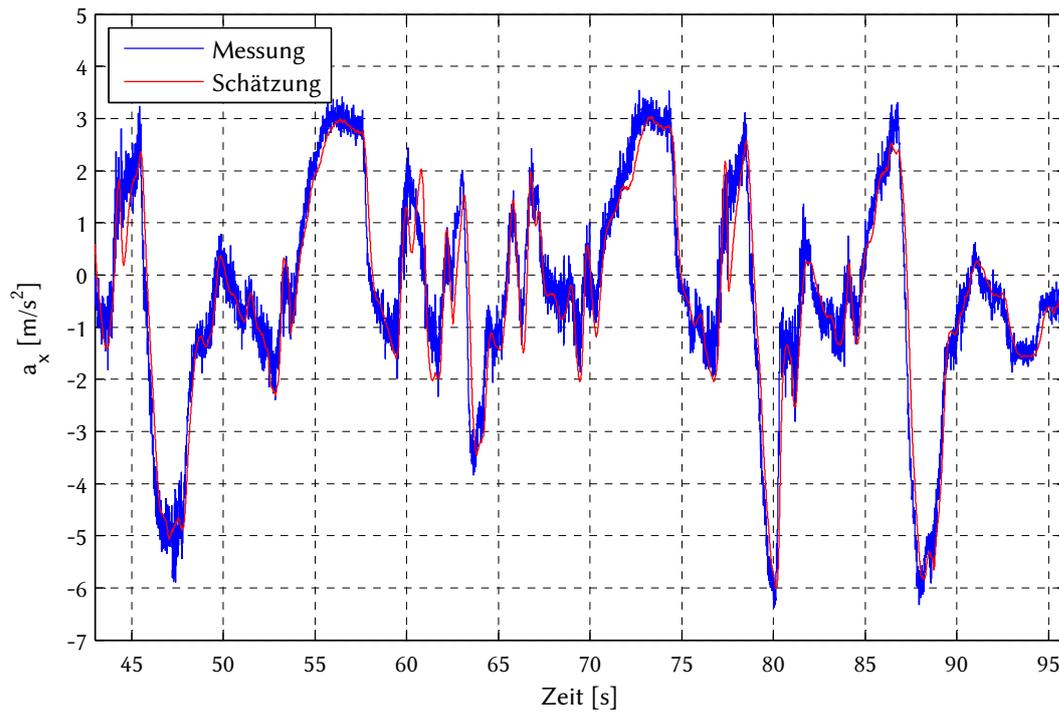
Die verwendeten Eckfrequenzen der Tiefpassfilterung der Zahnstangenkräfte legen nahe, dass entgegen [42] auch Frequenzen über 15 Hz für die Rückmeldung relevant sind. Weitere Untersuchungen dieser Thematik wären von großem Interesse. SbW ist dafür als vielversprechendes Werkzeug zu sehen, mit dem sich viele verschiedene Varianten allein durch Softwareänderungen in einem Fahrzeug darstellen lassen. Auch Untersuchungen im Sinne der Objektivierung des Lenkgefühls sind damit denkbar.

Ein weiteres interessantes Betätigungsfeld stellt das Zusammenspiel Fahrer-Lenkrad-Fahrzeug dar. Beispielsweise ist ein eindeutiger und einfacher Zusammenhang zwischen Lenkwinkel und Lenkmoment wünschenswert, um den Fahrer bei der Einstellung eines Lenkwinkels durch die Krafrückmeldung zu unterstützen. Das Lenkmoment ist jedoch bei den hier untersuchten Ansätzen von einer Vielzahl von Parametern abhängig, beispielsweise vom Reifenverhalten und der Achskinematik. Die Optimierung des Gesamtzusammenspiels ist wünschenswert, um die Propriozeption optimal zu unterstützen, gleichzeitig jedoch den Reifen-Fahrbahn-Kontakt realistisch zurückzumelden.

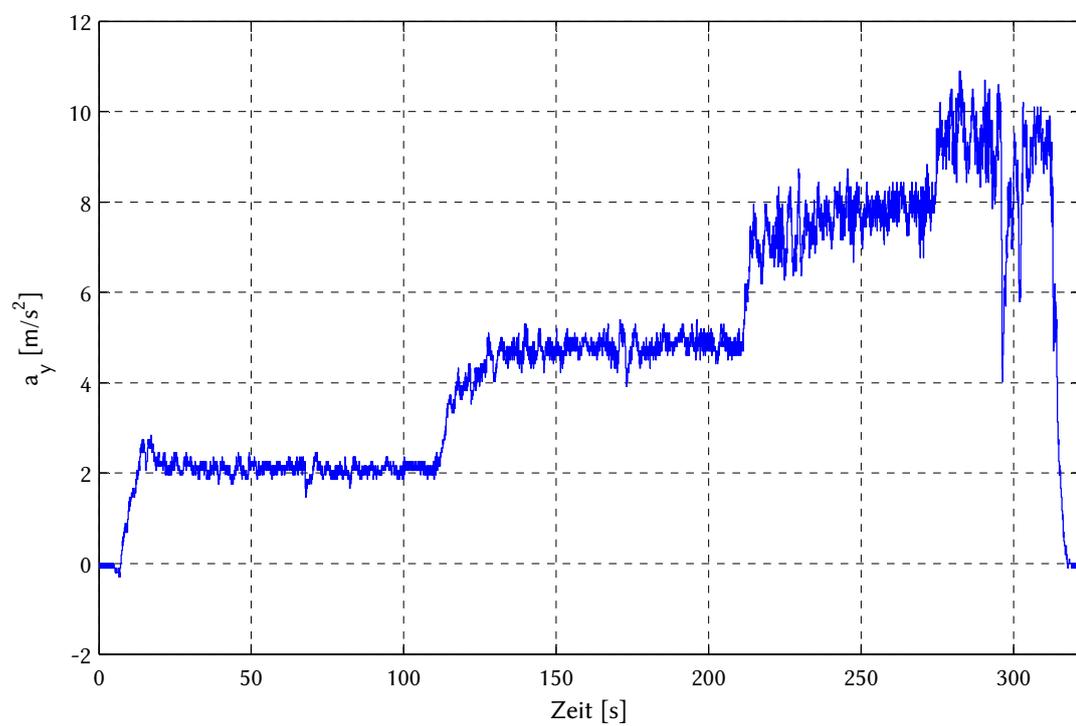
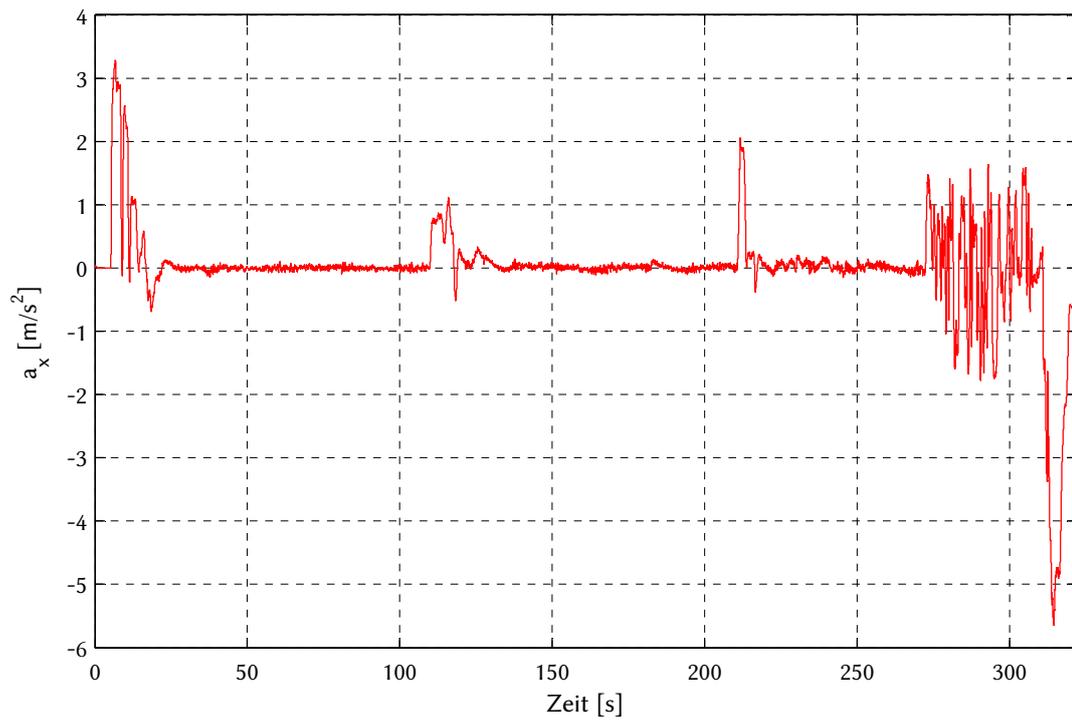


# A Anhang

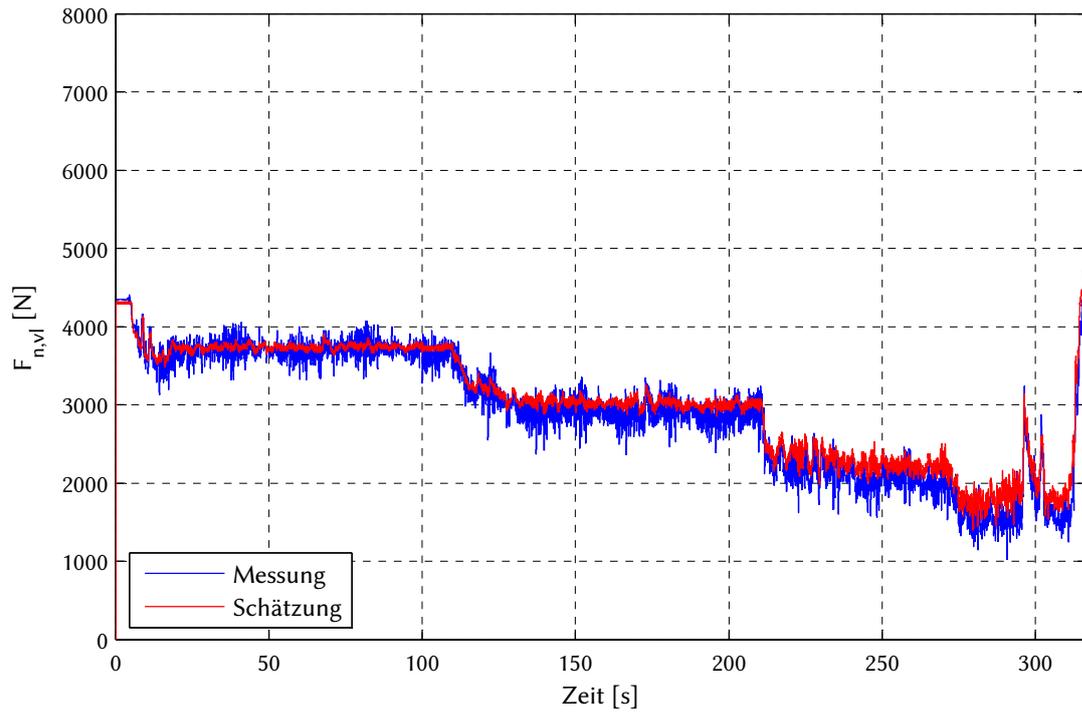
## A.1 Ergänzende Bilder zur Modellvalidierung



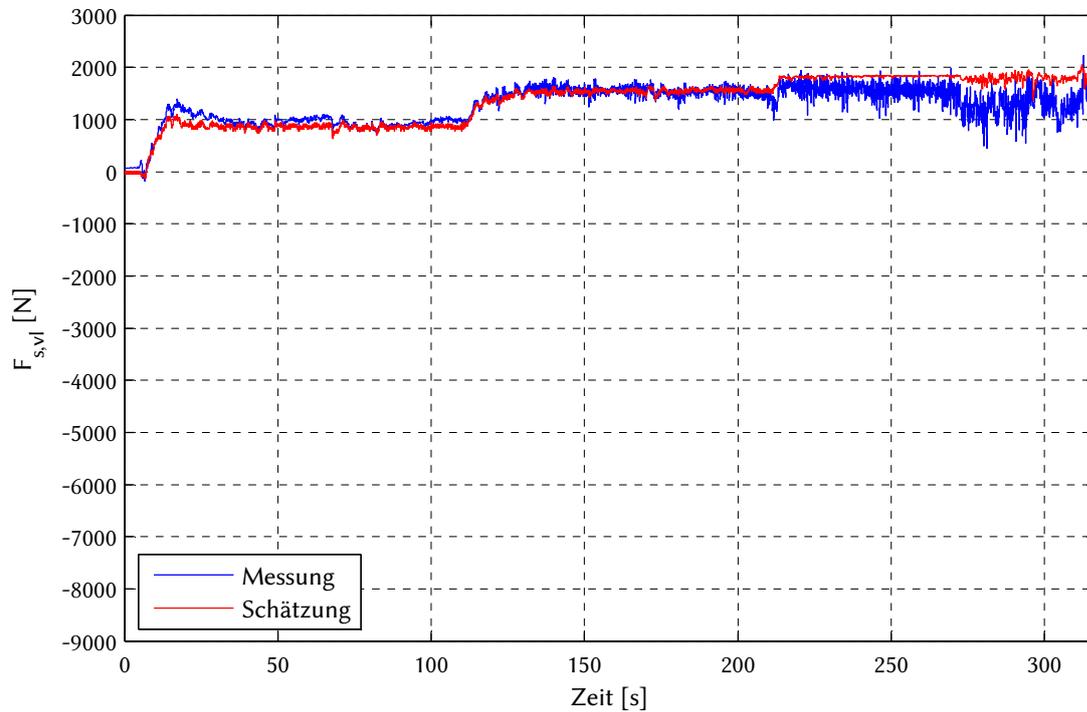
**Bild A.1:** Ableitung der Längsbeschleunigung aus der Geschwindigkeit im Vergleich zur Messung mittels Inertialmesssystem



**Bild A.2:** Kreisfahrt: Längs- und Querbeschleunigung



**Bild A.3:** Kreisfahrt: Normalkraft am linken Vorderrad



**Bild A.4:** Kreisfahrt: Seitenkraft am linken Vorderrad

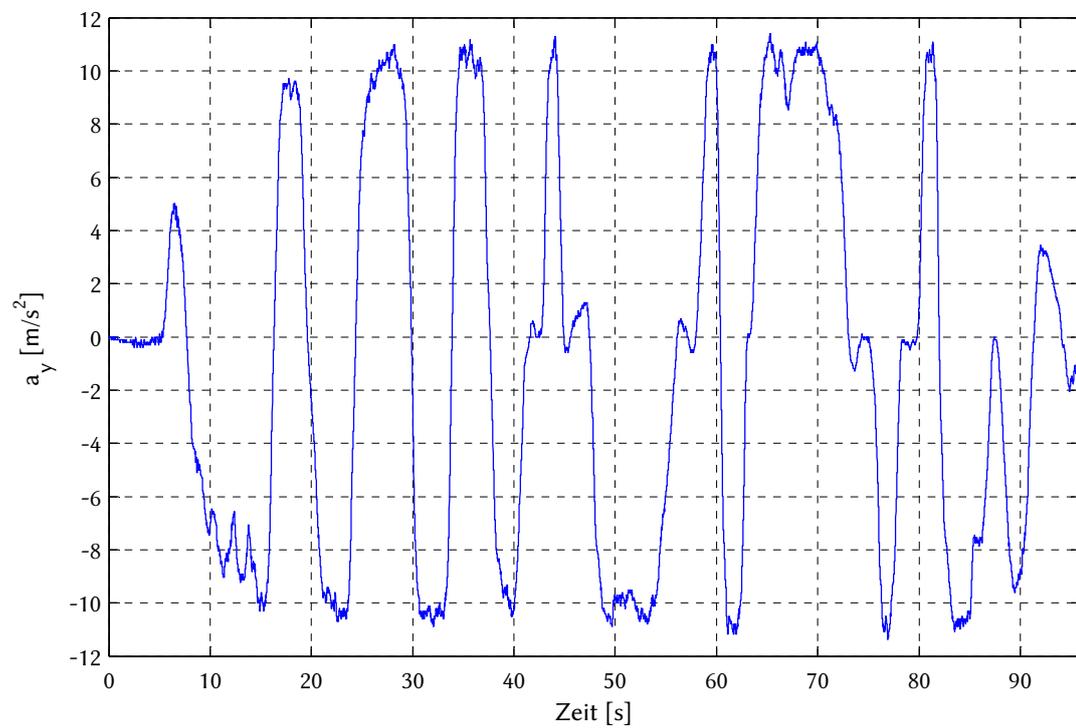
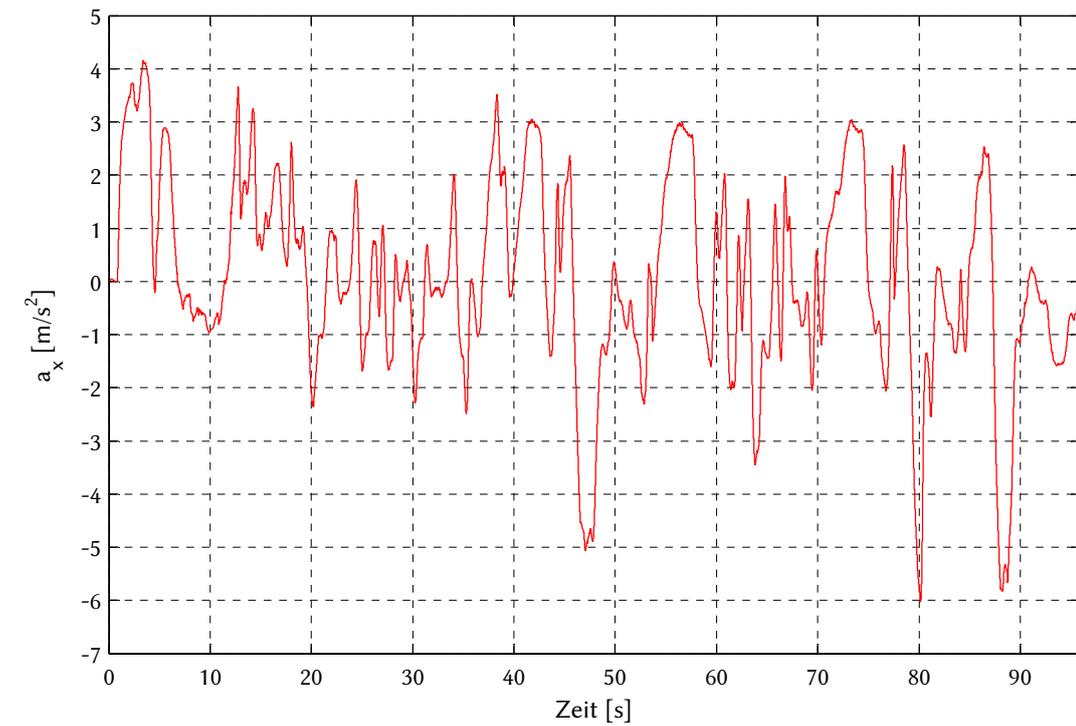


Bild A.5: Kurvenfahrt Grenzbereich: Längs- und Querbeschleunigung

## A.2 Einzelnoten der Probandenversuche

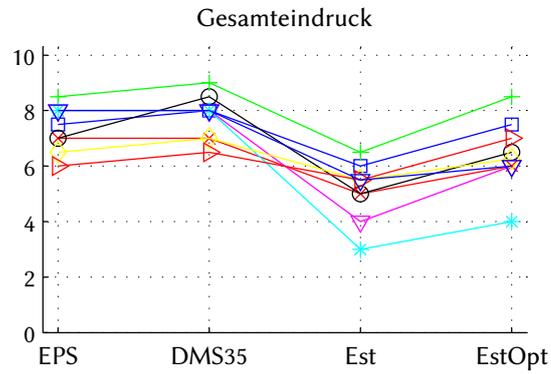


Bild A.6: Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Gesamteindruck

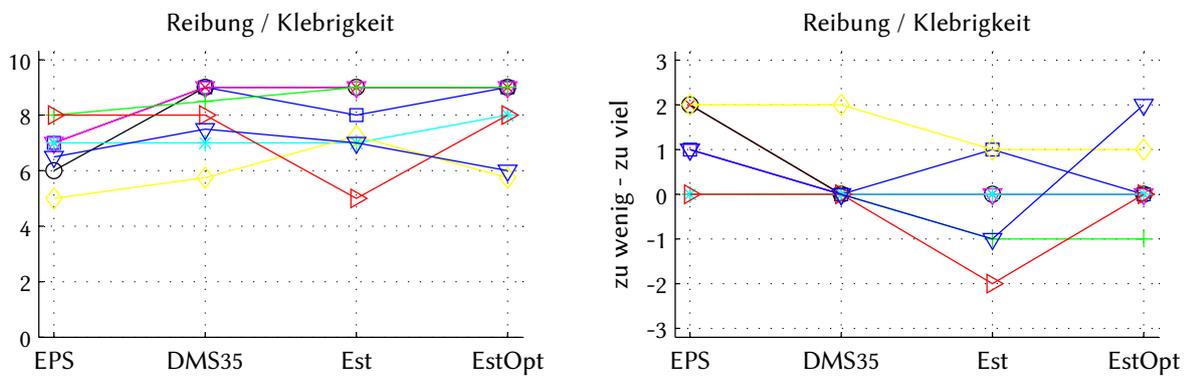


Bild A.7: Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Reibung / Klebrigkeit

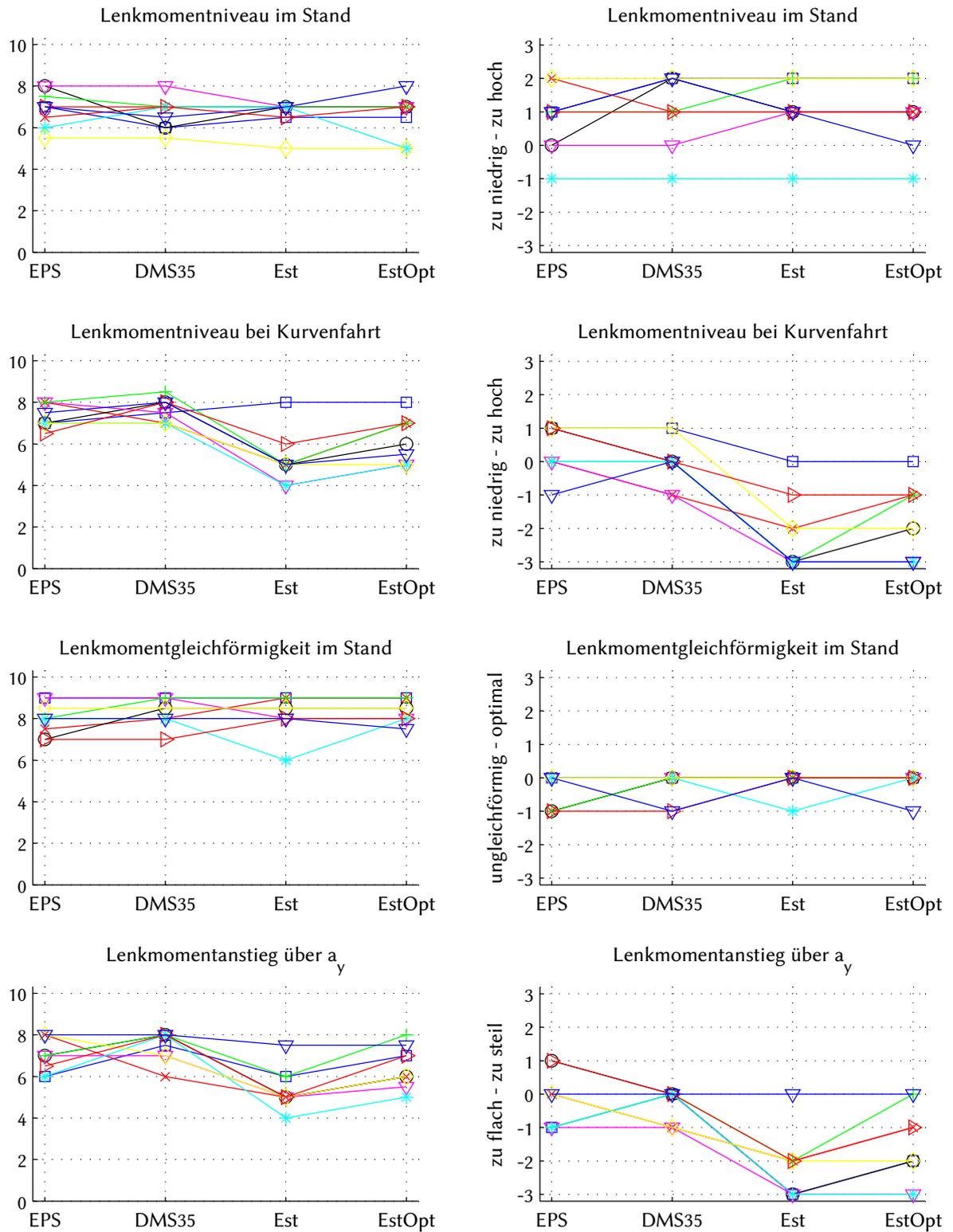


Bild A.8: Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Lenkmomentverlauf Teil 1

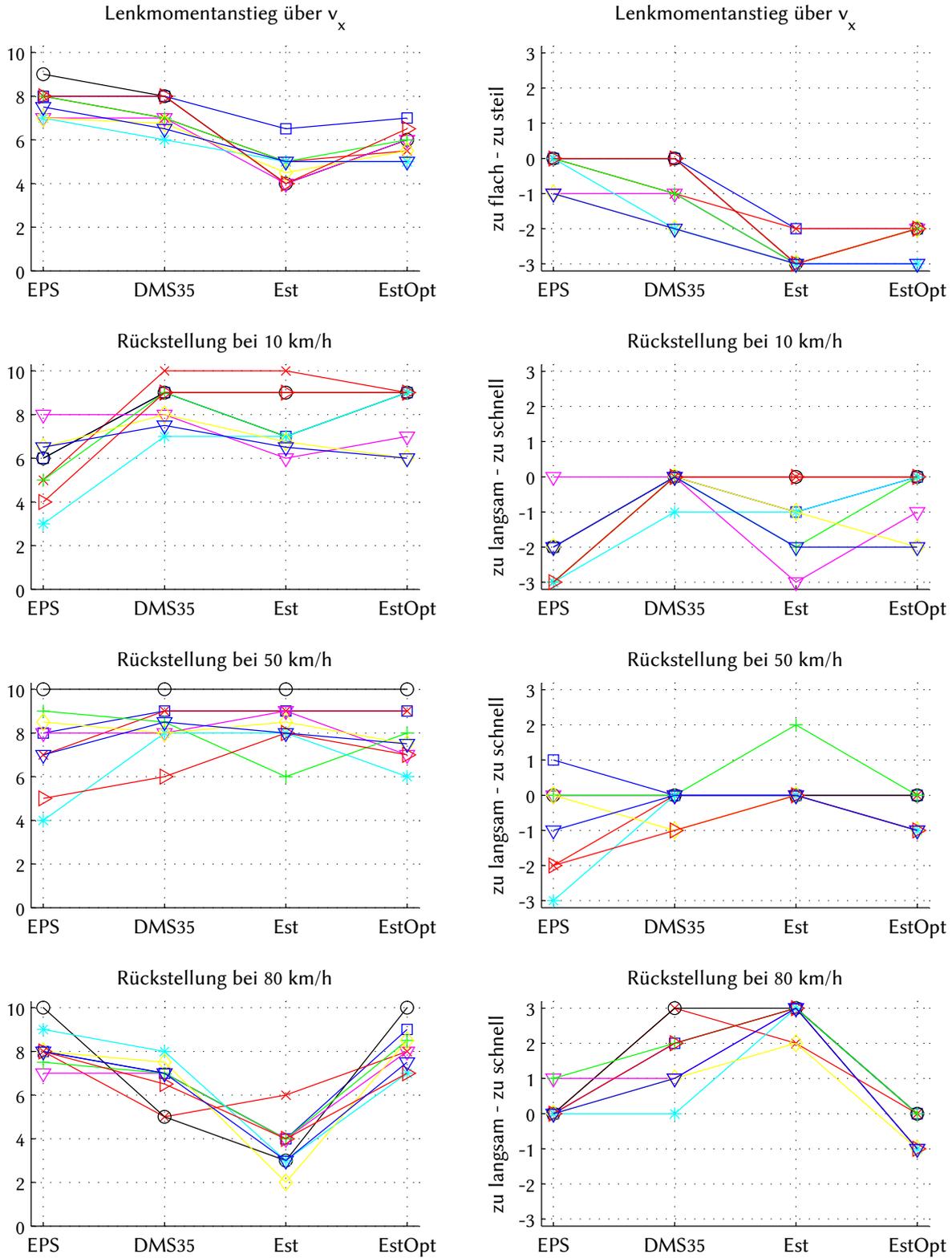


Bild A.9: Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Lenkmomentverlauf Teil 2

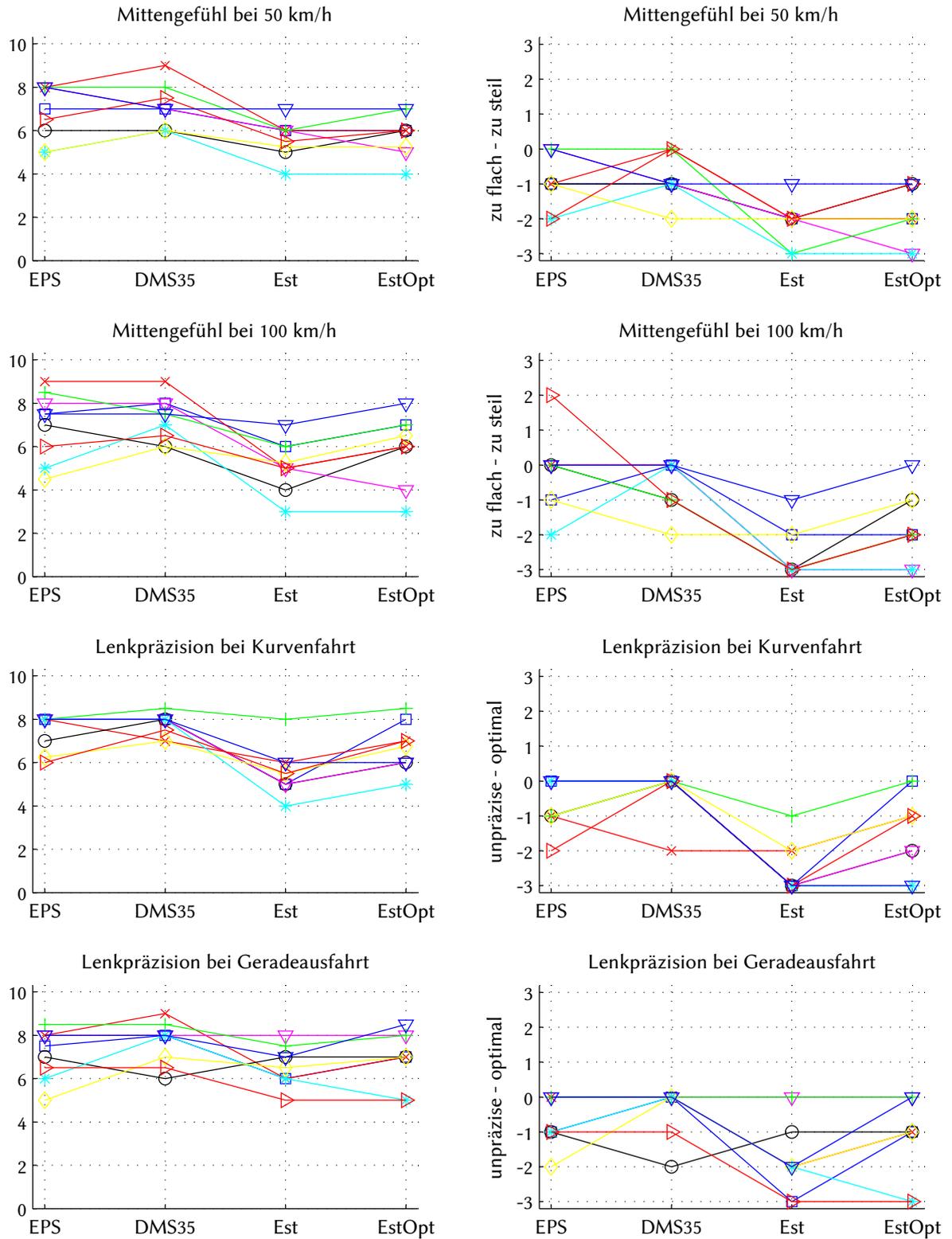


Bild A.10: Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Lenkpräzision

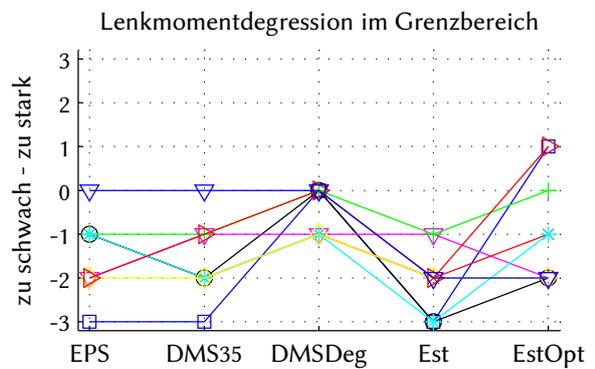
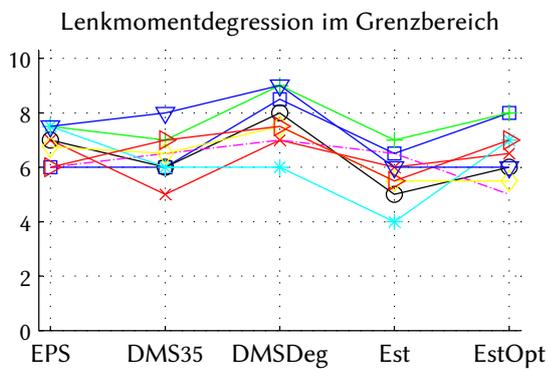
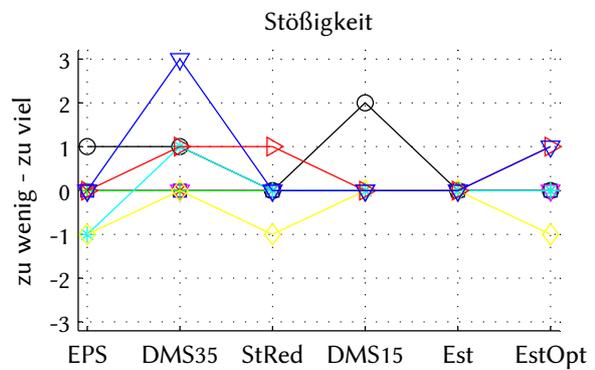
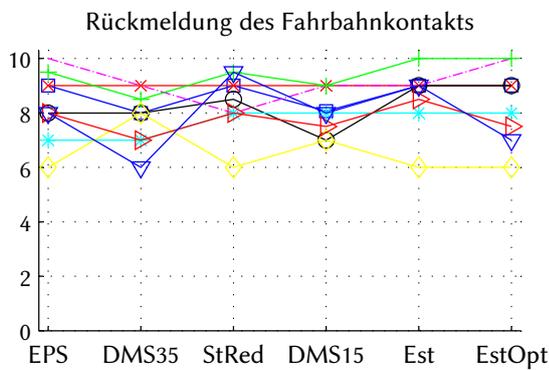
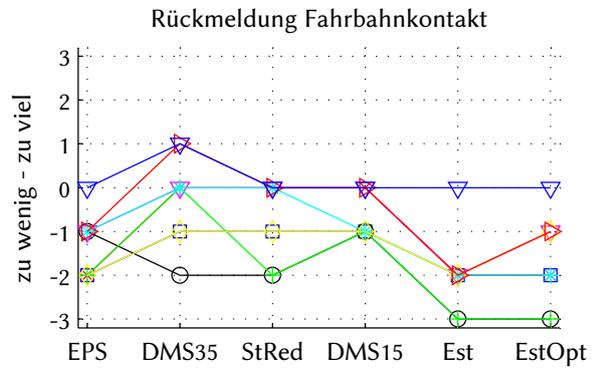
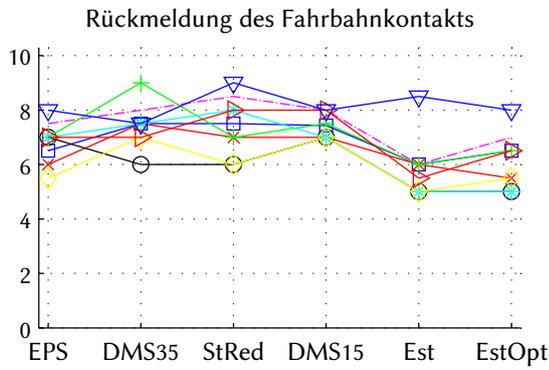


Bild A.11: Subjektivbewertung: Einzelbewertungen Rückmeldung von Fahrbahneigenschaften

### A.3 Fragebogen

Grundsätzlicher Aufbau des Fragebogens zur Subjektivbewertung des Lenkgefühls. Beispielhaft wird ein Bewertungskriterium dargestellt, bei anderen Kriterien werden zum Teil mehr als vier Varianten bewertet.

<b>Proband</b>	Vorname Name
<b>Reifen</b>	Modell, Dimension, Solldruck v/h
<b>Profil und Luftdruck geprüft</b>	✓
<b>DMS kalibriert</b>	✓
<b>Datum / Uhrzeit</b>	
<b>Witterung</b>	

Tabelle A.1: Checkliste für Probandenversuche

Lenkmomentniveau Parkieren / Rangieren				
Block: 1, Strecke: Dynamikfläche				
Nr.	Var.	Note	Meinung	Kommentar
4	V1		optimal zu wenig  zu viel	
2	V2		optimal zu wenig  zu viel	
3	V6		optimal zu wenig  zu viel	
1	V7		optimal zu wenig  zu viel	

Tabelle A.2: Beispielblatt des Fragebogens mit zufällig permutierter Reihenfolge

## A.4 Signifikanztests

Für den Vergleich der Bewertung zweier Varianten wird ein einseitiger t-Test für gepaarte Stichproben verwendet. Auf Grund der relativ geringen Zahl von Probanden und der geringen Kritikalität des Untersuchungsgegenstands wird ein Signifikanzniveau von 10% gewählt.

Die Prüfgröße  $t$  berechnet sich somit zu:

$$t = \sqrt{n} \cdot \frac{\bar{d}}{s_d} \quad (\text{A.1})$$

Der Mittelwert der Bewertungsdifferenzen  $\bar{d}$  ist gegeben durch:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad (\text{A.2})$$

wobei  $d_i$  die Differenz zweier Varianten in der Bewertung durch einen Probanden  $P_i$  ist. Die Standardabweichung der Differenzen  $d_i$  wird mit  $s_d$  bezeichnet.

Das Quantil der T-Verteilung bei Freiheitsgrad  $f = 8$  und Wahrscheinlichkeit  $p = 0,9$  beträgt 1,397.

Folgende Hypothesen wurden gewählt:

Nullhypothese  $H_0$ : Variante A = Variante B

Alternativhypothese  $H_1$ : Variante A besser bzw. schlechter als Variante B

In den nachfolgenden Tabellen werden die Bewertungskriterien aus Platzgründen durch Zahlen ersetzt, entsprechend Tabelle A.3.

Kriterium	Beschreibung
1	Lenkmomentniveau beim Parkieren / Rangieren
2	Lenkmomentniveau bei Kurvenfahrt
3	Lenkmomentgleichförmigkeit
4	Lenkmomentanstieg über $a_y$
5	Lenkmomentanstieg über $v_x$
6	Lenkmomentdegression im Grenzbereich
7	Mittengefühl 50 km/h
8	Mittengefühl 100 km/h
9	Reibung
10	Rückmeldung, Nutzinformation
11	Rückmeldung, Störungen
12	Rückstellung 10 km/h
13	Rückstellung 50 km/h
14	Rückstellung 80 km/h
15	Lenkpräzision bei Kurvenfahrt
16	Lenkpräzision bei Geradeausfahrt
17	Gesamteindruck

Tabelle A.3: Nummerierung der Bewertungskriterien

## A.4.1 Signifikanztests der Notenbewertung

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	-1,0	0,5	-2,0	0,0	-0,5	1,0	0,0	0,0	-0,5	-0,278	0,870	-0,958
2	0,5	-1,0	1,0	-0,5	0,5	0,0	0,0	1,5	0,5	0,278	0,755	1,104
3	0,0	0,5	1,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,333	0,559	1,789
4	1,5	-2,0	1,0	0,0	1,0	2,0	-1,0	1,5	0,0	0,444	1,310	1,018
5	0,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,0	-1,0	-0,3	0,0	-1,0	-0,583	0,500	-3,500
6	0,0	-2,0	-1,0	0,5	-0,5	-1,5	-0,3	1,0	0,5	-0,361	0,993	-1,091
7	0,0	1,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	0,222	0,833	0,800
8	0,5	0,0	-1,0	0,0	-1,0	2,0	1,5	0,5	0,0	0,278	1,003	0,830
9	2,0	2,0	3,0	2,0	0,5	0,0	0,8	0,0	1,0	1,250	1,046	3,586
10	1,0	1,5	-1,0	0,5	2,0	0,5	1,5	0,0	-0,5	0,611	0,993	1,846
11	-1,0	0,0	0,0	-1,0	-1,0	0,0	2,0	-1,0	-2,0	-0,444	1,130	-1,180
12	3,0	5,0	3,0	0,0	4,0	4,0	1,5	5,0	1,0	2,944	1,776	4,975
13	1,0	2,0	0,0	0,0	-0,5	4,0	-0,5	1,0	1,5	0,944	1,446	1,960
14	-1,0	-3,0	-5,0	0,0	-0,5	-1,0	-0,5	-1,5	-1,0	-1,500	1,561	-2,882
15	0,0	-1,0	1,0	0,0	0,5	0,0	0,8	1,5	0,0	0,306	0,726	1,262
16	0,5	1,0	-1,0	0,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,500	1,000	1,500
17	0,5	0,0	1,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,0	0,389	0,486	2,401

Tabelle A.4: Signifikanztest EPS vs. DMS35

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	-0,5	0,5	-1,0	-1,0	-0,5	1,0	-0,5	-0,5	0,0	-0,278	0,667	-1,250
2	1,0	-3,0	-2,0	-4,0	-3,0	-3,0	-2,0	-0,5	-2,5	-2,111	1,516	-4,177
3	0,0	1,5	1,5	-1,0	1,0	-2,0	0,0	1,0	0,0	0,222	1,176	0,567
4	0,0	-3,0	-2,0	-2,0	-1,0	-2,0	-3,0	-1,5	-0,5	-1,667	1,031	-4,851
5	-1,5	-3,0	-5,0	-3,0	-3,0	-2,0	-2,5	-4,0	-2,5	-2,944	1,044	-8,460
6	0,5	-1,0	-2,0	0,5	-0,5	-3,5	-1,3	-0,5	-1,5	-1,028	1,253	-2,461
7	-1,0	-2,0	-1,0	-2,0	-2,0	-1,0	0,3	-1,0	-1,0	-1,194	0,726	-4,932
8	-1,5	-4,0	-3,0	-3,0	-2,5	-2,0	0,8	-1,0	-0,5	-1,861	1,464	-3,815
9	1,0	2,0	3,0	2,0	1,0	0,0	2,3	-3,0	0,5	0,972	1,761	1,656
10	-0,5	0,0	-2,0	-1,5	-1,0	-2,0	-0,5	-1,5	0,5	-0,944	0,882	-3,213
11	0,0	0,0	1,0	-1,0	0,5	1,0	0,0	0,5	1,0	0,333	0,661	1,512
12	1,0	5,0	3,0	-2,0	2,0	4,0	0,3	5,0	0,0	2,028	2,425	2,508
13	1,0	2,0	0,0	1,0	-3,0	4,0	0,0	3,0	1,0	1,000	2,000	1,500
14	-4,0	-2,0	-7,0	-3,0	-3,5	-6,0	-6,0	-4,0	-5,0	-4,500	1,620	-8,332
15	-3,0	-2,0	-2,0	-3,0	0,0	-4,0	-0,8	-0,5	-2,0	-1,917	1,311	-4,386
16	-1,5	-2,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	1,5	-1,5	-1,0	-0,611	1,083	-1,692
17	-1,5	-2,0	-2,0	-4,0	-2,0	-5,0	-1,0	-0,5	-2,5	-2,278	1,417	-4,824

Tabelle A.5: Signifikanztest EPS vs. Est

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	-0,5	0,5	-1,0	-1,0	-0,5	-1,0	-0,5	0,0	1,0	-0,333	0,707	-1,414
2	1,0	-1,0	-1,0	-3,0	-1,0	-2,0	-2,0	0,5	-2,0	-1,167	1,275	-2,746
3	0,0	1,5	1,5	-1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	-0,5	0,389	0,894	1,306
4	1,0	-2,0	-1,0	-1,5	1,0	-1,0	-2,0	0,5	-0,5	-0,611	1,193	-1,537
5	-1,0	-2,5	-3,0	-1,0	-2,0	-2,0	-1,5	-1,5	-2,5	-1,889	0,697	-8,128
6	2,0	-0,5	-1,0	-1,0	0,5	-0,5	-1,3	1,0	-1,5	-0,250	1,173	-0,640
7	-1,0	-2,0	0,0	-3,0	-1,0	-1,0	0,3	-0,5	-1,0	-1,028	0,988	-3,122
8	-0,5	-3,0	-1,0	-4,0	-1,5	-2,0	2,0	0,0	0,5	-1,056	1,828	-1,733
9	2,0	2,0	3,0	2,0	1,0	1,0	0,8	0,0	-0,5	1,250	1,104	3,397
10	0,0	-0,5	-2,0	-0,5	-0,5	-2,0	0,0	-0,5	0,0	-0,667	0,791	-2,530
11	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,0	-0,5	-1,0	0,111	0,651	0,512
12	3,0	4,0	3,0	-1,0	4,0	6,0	-0,5	5,0	-0,5	2,556	2,591	2,959
13	1,0	2,0	0,0	-1,0	-1,0	2,0	-1,0	2,0	0,5	0,500	1,323	1,134
14	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	-2,0	0,5	-1,0	-0,5	0,000	1,031	0,000
15	0,0	-1,0	-1,0	-2,0	0,5	-3,0	0,5	1,0	-2,0	-0,778	1,372	-1,701
16	-0,5	-1,0	0,0	0,0	-0,5	-1,0	2,0	-1,5	0,5	-0,222	1,034	-0,645
17	0,0	-1,0	-0,5	-2,0	0,0	-4,0	-0,3	1,0	-2,0	-0,972	1,492	-1,955

Tabelle A.6: Signifikanztest EPS vs. EstOpt

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	0,5	0,0	1,0	-1,0	0,0	0,0	-0,5	-0,5	0,5	0,000	0,612	0,000
2	0,5	-2,0	-3,0	-3,5	-3,5	-3,0	-2,0	-2,0	-3,0	-2,389	1,244	-5,759
3	0,0	1,0	0,0	-1,0	0,0	-2,0	0,0	1,0	0,0	-0,111	0,928	-0,359
4	-1,5	-1,0	-3,0	-2,0	-2,0	-4,0	-2,0	-3,0	-0,5	-2,111	1,083	-5,846
5	-1,5	-2,0	-4,0	-3,0	-2,0	-1,0	-2,3	-4,0	-1,5	-2,361	1,083	-6,538
6	0,5	1,0	-1,0	0,0	0,0	-2,0	-1,0	-1,5	-2,0	-0,667	1,090	-1,835
7	-1,0	-3,0	-1,0	-1,0	-2,0	-2,0	-0,8	-2,0	0,0	-1,417	0,901	-4,715
8	-2,0	-4,0	-2,0	-3,0	-1,5	-4,0	-0,8	-1,5	-0,5	-2,139	1,282	-5,007
9	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	1,5	-3,0	-0,5	-0,278	1,228	-0,679
10	-1,5	-1,5	-1,0	-2,0	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	1,0	-1,556	1,130	-4,128
11	1,0	0,0	1,0	0,0	1,5	1,0	-2,0	1,5	3,0	0,778	1,372	1,701
12	-2,0	0,0	0,0	-2,0	-2,0	0,0	-1,3	0,0	-1,0	-0,917	0,935	-2,940
13	0,0	0,0	0,0	1,0	-2,5	0,0	0,5	2,0	-0,5	0,056	1,210	0,138
14	-3,0	1,0	-2,0	-3,0	-3,0	-5,0	-5,5	-2,5	-4,0	-3,000	1,887	-4,768
15	-3,0	-1,0	-3,0	-3,0	-0,5	-4,0	-1,5	-2,0	-2,0	-2,222	1,121	-5,946
16	-2,0	-3,0	1,0	0,0	-1,0	-2,0	-0,5	-1,5	-1,0	-1,111	1,193	-2,794
17	-2,0	-2,0	-3,5	-4,0	-2,5	-5,0	-1,5	-1,0	-2,5	-2,667	1,275	-6,276

Tabelle A.7: Signifikanztest DMS35 vs. Est

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	0,5	0,0	1,0	-1,0	0,0	-2,0	-0,5	0,0	1,5	-0,056	1,044	-0,160
2	0,5	0,0	-2,0	-2,5	-1,5	-2,0	-2,0	-1,0	-2,5	-1,444	1,074	-4,036
3	0,0	1,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-0,5	0,056	0,635	0,263
4	-0,5	0,0	-2,0	-1,5	0,0	-3,0	-1,0	-1,0	-0,5	-1,056	0,982	-3,223
5	-1,0	-1,5	-2,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,3	-1,5	-1,5	-1,306	0,349	-11,235
6	2,0	1,5	0,0	-1,5	1,0	1,0	-1,0	0,0	-2,0	0,111	1,387	0,240
7	-1,0	-3,0	0,0	-2,0	-1,0	-2,0	-0,8	-1,5	0,0	-1,250	0,984	-3,810
8	-1,0	-3,0	0,0	-4,0	-0,5	-4,0	0,5	-0,5	0,5	-1,333	1,837	-2,177
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,0	0,0	-1,5	0,000	0,661	0,000
10	-1,0	-2,0	-1,0	-1,0	-2,5	-2,5	-1,5	-0,5	0,5	-1,278	0,972	-3,944
11	1,0	0,0	1,0	1,0	1,5	1,0	-2,0	0,5	1,0	0,556	1,044	1,596
12	0,0	-1,0	0,0	-1,0	0,0	2,0	-2,0	0,0	-1,5	-0,389	1,167	-1,000
13	0,0	0,0	0,0	-1,0	-0,5	-2,0	-0,5	1,0	-1,0	-0,444	0,846	-1,577
14	2,0	3,0	5,0	1,0	1,5	-1,0	1,0	0,5	0,5	1,500	1,714	2,626
15	0,0	0,0	-2,0	-2,0	0,0	-3,0	-0,3	-0,5	-2,0	-1,083	1,159	-2,804
16	-1,0	-2,0	1,0	0,0	-0,5	-3,0	0,0	-1,5	0,5	-0,722	1,277	-1,696
17	-0,5	-1,0	-2,0	-2,0	-0,5	-4,0	-0,8	0,5	-2,0	-1,361	1,306	-3,127

Tabelle A.8: Signifikanztest DMS35 vs. EstOpt

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-2,0	0,0	0,5	1,0	-0,056	0,808	-0,206
2	0,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	0,0	1,0	0,5	0,944	0,726	3,900
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	-0,5	0,167	0,707	0,707
4	1,0	1,0	1,0	0,5	2,0	1,0	1,0	2,0	0,0	1,056	0,635	4,990
5	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0	0,0	1,0	2,5	0,0	1,056	0,917	3,455
6	1,5	0,5	1,0	-1,5	1,0	3,0	0,0	1,5	0,0	0,778	1,253	1,863
7	0,0	0,0	1,0	-1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,167	0,612	0,816
8	1,0	1,0	2,0	-1,0	1,0	0,0	1,3	1,0	1,0	0,806	0,846	2,857
9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-1,5	3,0	-1,0	0,278	1,302	0,640
10	0,5	-0,5	0,0	1,0	0,5	0,0	0,5	1,0	-0,5	0,278	0,565	1,474
11	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	-2,0	-0,222	0,833	-0,800
12	2,0	-1,0	0,0	1,0	2,0	2,0	-0,8	0,0	-0,5	0,528	1,240	1,277
13	0,0	0,0	0,0	-2,0	2,0	-2,0	-1,0	-1,0	-0,5	-0,500	1,225	-1,225
14	5,0	2,0	7,0	4,0	4,5	4,0	6,5	3,0	4,5	4,500	1,561	8,647
15	3,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,3	1,5	0,0	1,139	0,821	4,163
16	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	-1,0	0,5	0,0	1,5	0,389	0,741	1,575
17	1,5	1,0	1,5	2,0	2,0	1,0	0,8	1,5	0,5	1,306	0,527	7,431

Tabelle A.9: Signifikanztest Est vs. EstOpt

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
6	2,5	2,0	2,0	0,5	2,0	0,0	1,0	0,5	1,0	1,278	0,870	4,406

Tabelle A.10: Signifikanztest DMS35 vs. DMSDeg

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
10	0,0	-0,5	1,0	0,0	-1,5	-0,5	0,0	1,0	0,5	0,000	0,791	0,000
11	0,0	0,0	-1,0	0,0	0,5	1,0	-1,0	0,5	2,0	0,222	0,939	0,710

Tabelle A.11: Signifikanztest DMS35 vs. DMS15

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
10	0,0	-0,5	0,0	0,5	-2,0	0,5	-1,0	1,0	1,5	0,000	1,061	0,000
11	1,0	0,0	0,5	-1,0	1,0	1,0	-2,0	1,0	3,5	0,556	1,530	1,089

Tabelle A.12: Signifikanztest DMS35 vs. StRed

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
10	0,0	0,0	-1,0	0,5	-0,5	1,0	-1,0	0,0	1,0	0,000	0,750	0,000
11	1,0	0,0	1,5	-1,0	0,5	0,0	-1,0	0,5	1,5	0,333	0,935	1,069

Tabelle A.13: Signifikanztest DMS15 vs. StRed

## A.4.2 Signifikanztests der Meinungsbewertung

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	1,0	-1,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,333	0,866	1,155
2	0,0	-1,0	-1,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	1,0	-0,333	0,707	-1,414
3	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,222	0,667	1,000
4	1,0	-1,0	-1,0	0,0	1,0	1,0	-1,0	-1,0	0,0	-0,111	0,928	-0,359
5	0,0	-1,0	0,0	0,0	-1,0	-2,0	-1,0	0,0	-1,0	-0,667	0,707	-2,828
6	0,0	-1,0	-1,0	1,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	0,0	-0,111	0,782	-0,426
7	0,0	1,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	-1,0	2,0	-1,0	0,111	1,054	0,316
8	1,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	2,0	-1,0	-3,0	0,0	-0,333	1,414	-0,707
9	-1,0	-2,0	-2,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	-0,778	0,833	-2,800
10	1,0	2,0	-1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,111	0,928	3,592
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	1,0	3,0	0,778	1,093	2,135
12	2,0	3,0	2,0	0,0	3,0	2,0	2,0	3,0	2,0	2,111	0,928	6,825
13	-1,0	2,0	0,0	0,0	0,0	3,0	-1,0	1,0	1,0	0,556	1,333	1,250
14	2,0	3,0	3,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,444	1,130	3,833
15	0,0	-1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	0,0	0,444	0,882	1,512
16	1,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	1,0	2,0	0,0	0,0	0,333	0,866	1,155
17	0,0	-2,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,866	0,000

Tabelle A.14: Signifikanztest EPS vs. DMS35

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	1,0	-1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,333	0,707	1,414
2	-1,0	-2,0	-4,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-2,0	-2,0	-2,556	0,882	-8,693
3	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	-1,0	0,0	1,0	0,0	0,333	0,707	1,414
4	-2,0	-2,0	-4,0	-2,0	-1,0	-2,0	-2,0	-3,0	0,0	-2,000	1,118	-5,367
5	-2,0	-2,0	-3,0	-2,0	-3,0	-3,0	-2,0	-3,0	-2,0	-2,444	0,527	-13,914
6	0,0	-1,0	-2,0	1,0	0,0	-2,0	0,0	0,0	-2,0	-0,667	1,118	-1,789
7	-1,0	-1,0	-1,0	-2,0	-3,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,0	-1,222	0,833	-4,400
8	-1,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-1,0	-1,0	-5,0	-1,0	-2,333	1,414	-4,950
9	0,0	-2,0	-2,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,0	-2,0	-2,0	-1,222	0,833	-4,400
10	0,0	0,0	-2,0	-1,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,0	0,0	-0,667	0,707	-2,828
11	0,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,111	0,601	0,555
12	1,0	3,0	2,0	-3,0	1,0	2,0	1,0	3,0	0,0	1,111	1,833	1,818
13	-1,0	2,0	0,0	0,0	2,0	3,0	0,0	2,0	1,0	1,000	1,323	2,268
14	3,0	2,0	3,0	2,0	2,0	3,0	2,0	3,0	3,0	2,556	0,527	14,546
15	-3,0	-1,0	-2,0	-3,0	0,0	-3,0	-1,0	-1,0	-3,0	-1,889	1,167	-4,857
16	-2,0	-2,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	-2,0	-2,0	-1,000	1,000	-3,000
17	0,0	0,0	1,0	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,000	1,323	2,268

Tabelle A.15: Signifikanztest EPS vs. Est

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	1,0	-1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,222	0,833	0,800
2	-1,0	-1,0	-3,0	-3,0	-1,0	-3,0	-3,0	-2,0	-2,0	-2,111	0,928	-6,825
3	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	-1,0	0,333	0,707	1,414
4	-1,0	-1,0	-3,0	-2,0	1,0	-2,0	-2,0	-2,0	0,0	-1,333	1,225	-3,266
5	-2,0	-2,0	-2,0	-1,0	-2,0	-3,0	-1,0	-2,0	-2,0	-1,889	0,601	-9,430
6	4,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	3,0	-2,0	0,556	1,878	0,887
7	-1,0	-1,0	0,0	-3,0	-2,0	-1,0	-1,0	1,0	-1,0	-1,000	1,118	-2,683
8	-1,0	-2,0	-1,0	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	-4,0	0,0	-1,556	1,333	-3,500
9	-1,0	-2,0	-2,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	-0,778	0,972	-2,401
10	0,0	0,0	-2,0	0,0	-1,0	-1,0	1,0	0,0	0,0	-0,333	0,866	-1,155
11	0,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,222	0,667	1,000
12	2,0	3,0	2,0	-1,0	3,0	3,0	0,0	3,0	0,0	1,667	1,581	3,162
13	-1,0	2,0	0,0	-1,0	0,0	2,0	-1,0	1,0	0,0	0,222	1,202	0,555
14	0,0	0,0	0,0	-2,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,778	0,667	-3,500
15	0,0	0,0	-1,0	-2,0	1,0	-3,0	0,0	1,0	-3,0	-0,778	1,563	-1,492
16	0,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	-2,0	1,0	-2,0	0,0	-0,444	1,014	-1,315
17	0,0	0,0	1,0	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,667	0,866	2,309

Tabelle A.16: Signifikanztest EPS vs. EstOpt

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	0,0	0,0	-1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,000	0,707	0,000
2	-1,0	-1,0	-3,0	-2,0	-3,0	-3,0	-3,0	-1,0	-3,0	-2,222	0,972	-6,860
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	1,0	0,111	0,601	0,555
4	-3,0	-1,0	-3,0	-2,0	-2,0	-3,0	-1,0	-2,0	0,0	-1,889	1,054	-5,376
5	-2,0	-1,0	-3,0	-2,0	-2,0	-1,0	-1,0	-3,0	-1,0	-1,778	0,833	-6,400
6	0,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	-2,0	-0,556	0,726	-2,294
7	-1,0	-2,0	-1,0	-1,0	-3,0	-2,0	0,0	-2,0	0,0	-1,333	1,000	-4,000
8	-2,0	-3,0	-2,0	-3,0	-2,0	-3,0	0,0	-2,0	-1,0	-2,000	1,000	-6,000
9	1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	-2,0	-1,0	-0,444	0,882	-1,512
10	-1,0	-2,0	-1,0	-2,0	-3,0	-2,0	-1,0	-3,0	-1,0	-1,778	0,833	-6,400
11	0,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	-3,0	-0,667	1,000	-2,000
12	-1,0	0,0	0,0	-3,0	-2,0	0,0	-1,0	0,0	-2,0	-1,000	1,118	-2,683
13	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,444	0,726	1,835
14	1,0	-1,0	0,0	2,0	1,0	3,0	1,0	1,0	2,0	1,111	1,167	2,857
15	-3,0	0,0	-3,0	-3,0	-1,0	-3,0	-2,0	-3,0	-3,0	-2,333	1,118	-6,261
16	-3,0	-2,0	1,0	0,0	0,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-1,333	1,323	-3,024
17	0,0	2,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,000	1,225	2,449

Tabelle A.17: Signifikanztest DMS35 vs. Est

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	0,0	0,0	-1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-2,0	-0,111	0,928	-0,359
2	-1,0	0,0	-2,0	-2,0	-1,0	-3,0	-3,0	-1,0	-3,0	-1,778	1,093	-4,880
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,111	0,333	1,000
4	-2,0	0,0	-2,0	-2,0	0,0	-3,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,222	1,093	-3,355
5	-2,0	-1,0	-2,0	-1,0	-1,0	-1,0	0,0	-2,0	-1,0	-1,222	0,667	-5,500
6	4,0	1,0	0,0	-1,0	1,0	1,0	0,0	2,0	-2,0	0,667	1,732	1,155
7	-1,0	-2,0	0,0	-2,0	-2,0	-2,0	0,0	-1,0	0,0	-1,111	0,928	-3,592
8	-2,0	-2,0	0,0	-3,0	-1,0	-3,0	1,0	-1,0	0,0	-1,222	1,394	-2,630
9	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	0,0	2,0	0,000	0,866	0,000
10	-1,0	-2,0	-1,0	-1,0	-3,0	-2,0	0,0	-2,0	-1,0	-1,444	0,882	-4,914
11	0,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	-1,0	-1,0	0,0	-2,0	-0,556	0,726	-2,294
12	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	-2,0	0,0	-2,0	-0,444	1,014	-1,315
13	0,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	-1,0	-0,333	0,500	-2,000
14	-2,0	-3,0	-3,0	-2,0	-2,0	-1,0	-2,0	-3,0	-2,0	-2,222	0,667	-10,000
15	0,0	1,0	-2,0	-2,0	0,0	-3,0	-1,0	-1,0	-3,0	-1,222	1,394	-2,630
16	-1,0	-1,0	1,0	0,0	0,0	-3,0	-1,0	-2,0	0,0	-0,778	1,202	-1,941
17	0,0	2,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,667	0,866	2,309

Tabelle A.18: Signifikanztest DMS35 vs. EstOpt

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	-0,111	0,333	-1,000
2	0,0	1,0	1,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,444	0,726	1,835
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	-1,0	0,000	0,500	0,000
4	1,0	1,0	1,0	0,0	2,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,667	0,707	2,828
5	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,556	0,527	3,162
6	4,0	1,0	1,0	-1,0	1,0	2,0	0,0	3,0	0,0	1,222	1,563	2,345
7	0,0	0,0	1,0	-1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,222	0,667	1,000
8	0,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,778	0,667	3,500
9	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,0	0,444	1,236	1,079
10	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,333	0,500	2,000
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	1,0	1,0	0,111	0,601	0,555
12	1,0	0,0	0,0	2,0	2,0	1,0	-1,0	0,0	0,0	0,556	1,014	1,644
13	0,0	0,0	0,0	-1,0	-2,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,778	0,667	-3,500
14	-3,0	-2,0	-3,0	-4,0	-3,0	-4,0	-3,0	-4,0	-4,0	-3,333	0,707	-14,142
15	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	2,0	0,0	1,111	0,928	3,592
16	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	1,0	0,0	2,0	0,556	1,014	1,644
17	0,0	0,0	0,0	-1,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	-0,333	0,500	-2,000

Tabelle A.19: Signifikanztest Est vs. EstOpt

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
6	3,0	1,0	2,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,111	0,928	3,592

Tabelle A.20: Signifikanztest DMS35 vs. DMSDeg

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
10	0,0	0,0	1,0	0,0	-1,0	-1,0	0,0	-1,0	-1,0	-0,333	0,707	-1,414
11	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	-3,0	-0,444	1,130	-1,180

Tabelle A.21: Signifikanztest DMS35 vs. DMS15

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
10	0,0	0,0	0,0	0,0	-2,0	0,0	0,0	-1,0	-1,0	-0,444	0,726	-1,835
11	0,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	-1,0	-1,0	0,0	-3,0	-0,667	1,000	-2,000

Tabelle A.22: Signifikanztest DMS35 vs. StRed

Krit.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	$\bar{d}$	$s_d$	$t$
10	0,0	0,0	-1,0	0,0	-1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-0,111	0,601	-0,555
11	0,0	0,0	-2,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	1,0	0,0	-0,222	0,833	-0,800

Tabelle A.23: Signifikanztest DMS15 vs. StRed



# Literaturverzeichnis

- [1] ISO13674-1 ; *Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 1: Weave test.* März 2001
- [2] ISO13674-2 ; *Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 2: Transition test.* Dezember 2006
- [3] AMBERKAR, Sanket ; BOLOURCHI, Farhad ; DEMERLY, Jon ; MILLSAP, Scott: A Control System Methodology for Steer by Wire Systems. In: *SAE World Congress, Steering and Suspension Technology Symposium*, 2004
- [4] ANDONIAN, Brian ; RAUCH, William D. ; BHISE, Vivek D.: Driver Steering Performance Using Joystick Versus Steering Wheel Controls. In: *SAE World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA*, 2003
- [5] ASAI, Shoji ; KUROYANAGI, Hiroshi ; TAKEUCHI, Shinji ; TAKAHASHI, Toshihiro ; OGAWA, Shoji: Development of a Steer-by-Wire System with Force Feedback using a Disturbance Observer. In: *SAE World Congress and Exhibition, Detroit, USA*, 2004
- [6] BACHMANN, Volker: Berechnung des Radrückstellmoments zur Erzeugung des Lenkgefühls bei einem Steer-by-Wire Fahrzeug. In: *3. Darmstädter Reifenkolloquium*, VDI Verlag, Düsseldorf, Oktober 2000
- [7] BAJCINCA, N. ; CORTESAO, R. ; HAUSCHILD, M. ; BALS, J. ; HIRZINGER, G.: Haptic control for steer-by-wire systems. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003
- [8] BAJCINCA, N. ; NUTHONG, C. ; SVARICEK, F.: Road Feedback Estimation for Steer-by-Wire Control. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, 2006
- [9] BAJCINCA, Naim: *Robust Control Methods with Applications to Steer-by-Wire Systems*, Technische Universität Berlin, Diss., 2006. <http://elib.dlr.de/44060>
- [10] BAJCINCA, Naim ; CORTESAO, Rui ; HAUSCHILD, Markus: Robust Control for Steer-by-Wire Vehicles. In: *Autonomous Robots* 19 (2005), 193 - 214. <http://elib.dlr.de/19971>
- [11] BAJCINCA, Naim ; HAUSCHILD, Markus ; BOSE, Lutz: Steer-by-wire Lenkung: Algorithmen, Aktuatorik und Rapid-Control-Prototyping. In: *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2004

- [12] BARTHENHEIER, T. ; WINNER, H.: Das persönliche Lenkgefühl. In: *fahrwerk.tech, Fachtagung des TÜV-Süddeutschland, München, 2003*
- [13] BARTHENHEIER, Thomas: *Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentgestaltung*, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, TU Darmstadt, Diss., 2004
- [14] BERTACCHINI, A. ; TAMAGNINI, L. ; PAVAN, P.: Force Feedback in Steer-by-Wire Systems: Architecture and Experimental Results. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2006*
- [15] BERTACCHINI, Alessandro ; PAVAN, Paolo ; TAMAGNINI, Luca ; FERGNANI, Lorenzo: Control of brushless motor with hybrid redundancy for force feedback in steer-by-wire applications. In: *Industrial Electronics Society, IECON 2005, 32nd Annual Conference of IEEE, 2005*
- [16] BERTOLLINI, Gary P. ; HOGAN, Robert M.: Applying Driving Simulation to Quantify Steering Effort Preference as a Function of Vehicle Speed. In: *SAE Steering and Suspension Technology Symposium, 1999*
- [17] BOLTE, Uwe: *Das Aktive Stellteil - ein ergonomisches Bedienkonzept*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1991
- [18] BRAESS, H.-H.: Lenkung und Lenkverhalten von Personenkraftwagen. Was haben die letzten 50 Jahre gebracht, was kann und muss noch getan werden? In: *VDI Berichte Nr. 1632*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2001
- [19] BRUNN, Philipp ; HARRER, Manfred: Objektivierung der Lenkungsrückmeldung. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 580*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004, S. 67–79
- [20] BUBB, Heiner: Haptik im Kraftfahrzeug. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001, S. 164–174
- [21] BUBB, Heiner: Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In: *VDI Fortschrittberichte Nr. 557: Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [22] BUSCHARDT, Boris: *Synthetische Lenkmomente*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [23] CAMUFFO, Isabella ; CAVIASSO, Guglielmo ; PASCALI, Leonardo ; PESCE, Marco: Simulation Tools and Evaluation Criteria for Steering Wheel Feel Improvement of An Electric Power Steering System. In: *SAE Automotive Dynamics & Stability Conference and Exhibition, Detroit, USA, 2002*
- [24] CHAI, Yu W. ; SAITOU, Youhei ; KANO, Yoshio ; ABE, Masato: A Study on Effects of Derivative Parameters in a SBW System for Active Interface Vehicle on Driver-Vehicle System Performance. In: *Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC '04, Arnhem, Niederlande, 2004*

- 
- [25] CHAI, Yu W. ; SAITOU, Youhei ; SAKAKIBARA, Yusuke ; KANO, Yoshio ; ABE, Masato: A study of effect of steering gain and steering torque on driver's feeling for SbW Vehicle. In: *FISITA World Automotive Congress, Barcelona, Spanien, 2004*
- [26] CHAKIROV, R. ; SCHÖNER, H.P.: Aktiver Sidestick für Steer-By-Wire Systeme. In: *Steuerung und Regelung von Kraftfahrzeugen und Verbrennungsmotoren - AUTOREG, 2004*
- [27] DECKER, Medon: *Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen*, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München, Diss., 2009
- [28] DEPPERMAN, Karl-Heinz: Fahrversuche und Berechnungen zum Geradeauslauf von Personenwagen. In: *VDI Fortschrittberichte Nr. 133*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1989
- [29] DETTKI, Frank: *Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen*, Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [30] dSPACE GMBH, Paderborn: *Bildnachweis*. 2009
- [31] ECKSTEIN, Lutz: Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks. In: *VDI Fortschrittberichte: Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik*, 2001
- [32] FARRER, David: An Objective Measurement Technique for the Quantification of On-Center Handling Quality. In: *SAE International Congress and Exhibition, Vehicle Dynamics and Simulation, Detroit, Michigan, 1993*
- [33] FOTH, J. ; GAZYAKAN, Ü. ; DOMINKE, P. ; RUCK, G.: Moderne Lenksysteme für zukünftige Anforderungen. In: *VDI Fortschrittberichte Nr. 1533*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [34] FRIEDRICH, H. ; HOFFMANN, J. ; KREFT, J. ; SEMMLER, C. ; WITTE, B.: Auf dem Weg zum intelligenten Auto - Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen. In: *VDI-Berichte Bd. 1613*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2001
- [35] FUKUI, Katsuhiko ; TAKAHASHI, Toshimichi ; AMANO, Yasushi ; SUGAWARA, Tomoko ; TSUCHIYA, Yoshiaki ; KOIBUCHI, Ken: Experimental Study on the Performance of Driver-Vehicle System for the Change of Steering Characteristics. In: *Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC '04, Arnhem, Niederlande, 2004*
- [36] GIES, S. ; MARUSIC, Z.: Das Lenkgefühl - Merkmale der subjektiven und objektiven Beschreibung. In: *HDT-Tagung - Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen*, 1998
- [37] GROLL, Max von: Modifizierung von Nutz- und Störinformationen am Lenkrad durch elektromechanische Lenksysteme. In: *VDI Fortschrittberichte Nr. 630*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2006
- [38] GROLL, Max von ; MÜLLER, Steffen ; MEISTER, Tilo ; TRACHT, Rudolf: Disturbance compensation with a torque controllable steering system. In: *Vehicle System Dynamics* 44, No. 4 (2006), S. 327 – 338

- [39] HARNETT, Philip: *Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2002
- [40] HARRER, Manfred: *Characterisation of Steering Feel*, University of Bath, Diss., 2007
- [41] HARRER, Manfred: Objektivierung des Lenkverhaltens. In: *17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2008
- [42] HARRER, Manfred ; SCHMITT, Thomas ; FLECK, Reidar: Elektromechanische Lenksysteme - Herausforderungen und Entwicklungstrends. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2006
- [43] HEISSING, Bernd: Fahrverhalten. In: HEISSING, Bernd (Hrsg.) ; ERSOY, Metin (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007, S. 122–123
- [44] HEISSING, Bernd ; BRANDL, Hans J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Vogel Verlag, Würzburg, 2002
- [45] HENZE, Roman: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Diss., 2004
- [46] HIRAOKA, Toshihiro ; NISHIHARA, Osamu ; KUMAMOTO, Hiromitsu: Steering Reactive Torque Presentation Method for a Steer-By-Wire Vehicle. In: *Review of Automotive Engineering JSAE 29 No.2, April (2008)*, S. 287–294
- [47] HOFFMANN, Jürgen ; KREFT, Jörg ; SEMMLER, Carsten: "Drive by wire" - Potenziale aus heutiger Sicht. In: *GfA-Herbstkonferenz an der TU München*, 2000
- [48] HOLLE, Michael: Aktivlenkung - Untersuchungen zum Lenkgefühl. In: *13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2004
- [49] IM, Jae-Sung ; OZAKI, Fuminori ; MATSUSHITA, Takayasu ; MATSUNAGA, Nobutomo ; KAWAJI, Shigeyasu: Experimental study on SbW system with bilateral control. In: *Proceedings of IEEE international conference on mechatronics, Kumamoto, Japan, 2007*
- [50] IM, J.S. ; OZAKI, F. ; MATSUNAGA, M. ; KAWAJI, S.: Design of steer-by-wire system with bilateral control method using disturbance observer. In: *Advanced intelligent mechatronics, IEEE / ASME international conference, 2007*
- [51] JAGT, Pim van d.: *The road to virtual vehicle prototyping; new CAE-models for accelerated vehicle dynamics development*, TU Eindhoven, Diss., 2000
- [52] KELBER, Christian R. ; WEBBER, Daniel ; GOMES, Guilherme K. ; LOHMANN, Mauricio A. ; RODRIGUES, Marcelo S. ; LEDUR, Danton: Active Steering Unit with integrated ACC for X-by-Wire vehicles using a Joystick as HMI. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma, Italien, 2004*
- [53] KOCH, Tilo: Bewertung des Lenkgefühls in einem Sportfahrzeug mit Steer-by-Wire Lenksystem. In: *18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2009

- 
- [54] KOIDE, Masaru ; KAWAKAMI, Shingo: Analysis of 'Steering Feel' - Evaluation in Vehicles with Power Steering. In: *JSAE Review* 9 (1988), S. 36–42
- [55] KWASNY, Olaf ; MANZ, Holger: Die elektromechanische Lenkung des VW Touran. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 5 (2003), S. 464–470
- [56] McCANN, Roy: Variable Effort Steering for Vehicle Stability Enhancement Using an Electric Power Steering System. In: *Steering and Suspension Technology Symposium*, 2000
- [57] MORGANDO, Andrea ; VELARDOCCHIA, Mauro: Steering Feedback Torque Definition and Generation in a Steer by Wire System. In: *SAE World Congress, Detroit, USA*, 2008
- [58] MÜCKE, Stephan: Driving with sidesticks - a new vehicle concept based on drive by wire technology / DaimlerChrysler AG. 2000. – Forschungsbericht
- [59] NAKANO, Shiro ; KADA, Tomoyasu ; NISHIHARA, Osamu ; KUMAMOTO, Hiromitsu: A Study of Assist Control in Electric Power Steering Driving Pattern Rule-Based Control. In: *FISITA World Automotive Congress*, 2000
- [60] NIEMANN, Klaus ; WEIGER, Karl-Heinz R. ; WULF, Helmut: Entwicklungsmöglichkeiten an Lenksystemen für Kraftfahrzeuge und ihr Einfluss auf die Kurshaltung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 82 (1980), S. 525–532
- [61] N.N.: *Tyre models users manual*. TNO Automotive, Mai 2002
- [62] NORMAN, Kenneth D.: Objective Evaluation of On-Center Handling Performance. In: *SAE International Congress and Exhibition, Detroit, USA*, 1984
- [63] ODENTHAL, Dirk ; BÜNTE, Tilman ; HEITZER, Heinz-Dieter ; EICKER, Christoph: Übertragung des Lenkgefühls einer Servo-Lenkung auf Steer-by-Wire. In: *at - Automatisierungstechnik* 7 (2003), S. 329–337
- [64] OKAMOTO, K. ; CHIKUMA, I. ; SAITO, N. ; MIYAZAKI, H.: Improvement of drivers feel for electric power steering. In: *SAE Autotechnologies*, 1989
- [65] ONODA, Yuichi ; ONUMA, Yutaka ; GOTO, Takeshi ; SUGITANI, Tatsuo: Design Concept and Advantages of Steer-by-Wire System. In: *SAE World Congress, Detroit, USA*, 2008
- [66] PAULY, Axel: *Experimenteller und theoretischer Beitrag zu Fragen des instationären Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen*, TU München, Diss., 1977
- [67] PEPPLER, Steven A. ; JOHNSON, James R. ; WILLIAMS, Daniel E.: Steering System Effects on On-Center Handling and Performance. In: *International Truck & Bus Meeting & Exposition, Detroit*, 1999
- [68] PIETSCH, Robert ; SCHIMMEL, Christian ; HEISSING, Bernd: Objective Assessment of Handling Performance. In: *chassis.tech, International Congress with Concurrent Technology Exhibition, München*, 2009

- [69] RE, Fabrizio ; BRAGHIN, Francesco ; KOCH, Tilo: Estimation Of The Self-Sligning Torque For Steer-by-Wire Systems Using Inverse Kalman Filtering. In: *21st International Symposium On Dynamics Of Vehicles On Roads And Tracks, Stockholm, Schweden, 2009*
- [70] ROMPE, Klaus ; HEISSING, Bernd: *Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen: Quer- und Längsdynamik*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1984
- [71] RÜHMANN, Heinzpeter: Schnittstellen in MMS. In: SCHMIDTKE, Heinz (Hrsg.): *Ergonomie*. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1993
- [72] RÜHMANN, Heinzpeter: Stellteilgestaltung. In: SCHMIDTKE, Heinz (Hrsg.): *Ergonomie*. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1993
- [73] SALAANI, Kamel M. ; HEYDINGER, Gary J. ; GRYGIER, Paul A.: Experimental Steering Feel Performance Issues. In: *SAE World Congress, Detroit, Michigan, SAE International, Warrendale, 2004*
- [74] SATO, Hirofumi ; HARAGUCHI, Tetsunori ; OSAWA, Hiroshi: Experimental Analysis of Steering Response Characteristics and Steering Feeling. In: *Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan* 44, No.3 (1990), S. 52 – 58
- [75] SATO, Hirofumi ; OSAWA, Hiroshi ; HARAGUCHI, Tetsunori: The quantitative analysis of steering feel. In: *JSAE Review* 12 (1991), S. 85–87
- [76] SCHIMMEL, C. ; HEISSING, B.: Fahrerbasierte Objektivierung subjektiver Fahreindrücke. In: *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen, Haus der Technik, Essen, 2009*
- [77] SCHINDLER, Erich ; BAUM, Birgit (Hrsg.) ; BARTZ, Wilfried J. (Hrsg.) ; WIPPLER, Elmar (Hrsg.): *Fahrdynamik. Grundlagen des Lenkverhaltens und ihre Anwendung für Fahrwerkregelsysteme*. expert Verlag, Renningen, 2007
- [78] SHENGBING, Yang ; CHUNAN, Den ; XUEWU, Ji ; KUIYUAN, Chen: Research on Road Feeling Control Strategy of Steer-by-Wire. In: *Asia Pacific Automotive Engineering Conference, Hollywood, USA, SAE International, Warrendale, 2007*
- [79] SPIEGEL, Bernt: *Die obere Hälfte des Motorrads. Über die Einheit von Fahrer und Maschine*. 3. Auflage. Motorbuch Verlag, 2006
- [80] SPIEGELBERG, Gernot: Migration via drive-by-wire to autonomous driving - realization with integration and data flow? In: *8th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, 2008*
- [81] SUGIYAMA, Akinobu ; KURISHIGE, Masahiko ; HAMADA, Hanako ; KIFUKU, Takayuki: An EPS Control Strategy to Reduce Steering Vibration Associated with Disturbance from Road Wheels. In: *SAE World Congress & Exhibition, SAE International, Warrendale, 2006*
- [82] TBJ DYNAMISCHE MESSTECHNIK, Wolfratshausen: *Bildnachweis*. 2009

- [83] TOFFIN, D. ; REYMOND, G. ; KEMENY, A. ; DROULEZ, J.: Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis. In: *Vehicle System Dynamics* 45 (2007), Nr. 4, S. 375–388
- [84] VERHOEFF, Lennard ; VERSCHUREN, Robert ; ZUURBIER, Joost: Tyre force estimation for improved steering feel in EPAS and Steer-by-Wire. In: *FISITA World Automotive Congress, Barcelona, Spanien, 2004*
- [85] VIETINGHOFF, Anne von: *Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen*, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2008
- [86] WELCH, Greg ; BISHOP, Gary: An Introduction to the Kalman Filter. In: *Siggraph, Los Angeles, Vereinigte Staaten, 2001*
- [87] WILLIAMS, Daniel ; SHERWIN, Kenneth: Artificial Steering Feel. In: *SAE World Congress & Exhibition, Detroit, USA, 2009*
- [88] WINNER, H. ; BARTHENHEIER, T. ; FECHNER, N. ; LUH, S.: Fahrversuche mit Probanden zur Funktionsbewertung von aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In: *VDI Fortschrittberichte Nr. 557: Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2003 (557)
- [89] WINNER, H. ; HEUSS, O.: X-by-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick. In: *Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Darmstadt, 08.+09. März, 2005*
- [90] WOLF, Hagen: *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*, TU München, Diss., 2009
- [91] YAO, Yixin: Vehicle Steer-by-Wire System Control. In: *SAE World Congress, Detroit, Michigan*, SAE International, 2006
- [92] YU, Lei-yan ; QI, Yao-guang ; LIU, Feng: Research on Control Strategy and Bench Test of Automobile Steer-by-Wire System. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 2008*
- [93] ZOMOTOR, Adam ; BRAESS, Hans-Hermann ; RÖNITZ, Rolf: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre, Teil 1. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 12 (1997), S. 780–786
- [94] ZOMOTOR, Adam ; BRAESS, Hans-Hermann ; RÖNITZ, Rolf: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre, Teil 2. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 3 (1998), S. 236–243
- [95] ZOMOTOR, Adam ; BRAESS, Hans-Herrmann ; RÖNITZ, Rolf: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen. Stand und Problematik - Teil 1. In: *Automobil-Industrie* 1 (1977), S. 29–39

- [96] ZOMOTOR, Adam ; BRAESS, Hans-Herrmann ; RÖNITZ, Rolf: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen. Stand und Problematik - Teil 2. In: *Automobil-Industrie* 3 (1977), S. 39–48
- [97] ZONG, Changfu ; NA, HsiaoHisang ; HU, Dan ; WANG, Deping ; YUE, Botao: Study on Steering Effort Preference of Drivers Based on Driving Simulator. In: *SAE Asia Pacific Automotive Engineering Conference, Hollywood, USA, 2007*
- [98] ZUURBIER, J. ; BREMMER, P.: State estimation for integrated vehicle dynamics control. In: *Proceedings of AVEC'02, 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2002*