

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. 809

M.Sc. Jakob Philipp Bechtloff,  
Ludwigsburg

## Schätzung des Schwimmwinkels und fahrdynamischer Parameter zur Verbesserung modellbasierter Fahrdynamikregelungen

Berichte aus dem

Institut für  
Automatisierungstechnik  
und Mechatronik  
der TU Darmstadt





# Schätzung des Schwimmwinkels und fahrdynamischer Parameter zur Verbesserung modellbasierter Fahrdynamikregelungen

Dem Fachbereich  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
vorgelegte Dissertation

von

**Jakob Philipp Bechtloff, M.Sc.**

geboren am 12. März 1988 in Peine

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Rolf Isermann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy

Tag der Einreichung: 19. September 2017



D 17 · Darmstadt



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

M.Sc. Jakob Philipp Bechtloff,  
Ludwigsburg

Nr. 809

Schätzung des  
Schwimmwinkels und  
fahrdynamischer  
Parameter zur  
Verbesserung  
modellbasierter  
Fahrdynamikregelungen

Berichte aus dem

Institut für  
Automatisierungstechnik  
und Mechatronik  
der TU Darmstadt



Bechtloff, Jakob Philipp

## **Schätzung des Schwimmwinkels und fahrdynamischer Parameter zur Verbesserung modellbasierter Fahrdynamikregelungen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 809. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

176 Seiten, 93 Bilder, 1 Tabelle.

ISBN 978-3-18-380912-7, ISSN 0178-9449,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

**Für die Dokumentation:** Nichtlineare Zustandsschätzung – Fahrzustandsschätzung – Fahrdynamikbeobachter – Unscented Kalman-Filter – Fahrdynamikmodelle – Sensorfusion – Schwimmwinkelschätzung – Reibwertschätzung – Schräglautstiefigkeiten – Fahrdynamikregelsysteme

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Fahrdynamikregelungen. Sie befasst sich mit der Entwicklung einer Methode zur Schätzung der nicht-messbaren Bewegungsgrößen Schwerpunktgeschwindigkeit und Schwimmwinkel. Dafür wird lediglich die Sensorik der Electronic Stability Control genutzt. Damit eine modellbasierte Steuerung oder ein Führungsmodell auf Veränderung des querdynamischen Fahrverhaltens reagieren kann, werden zusätzlich die fahrdynamisch wichtigsten Parameter, wie die Schräglautstiefigkeiten und der maximale Reibwert während des Fahrbetriebs geschätzt. Hierzu werden Fahrdynamikmodelle entwickelt, die alle erforderlichen Situationen, wie die Fahrt in der Steilkurve, Fahrten im physikalischen Grenzbereich auf Hoch- und Niedrigreibwert genau genug modellieren. Es wird gezeigt, warum ein Unscented Kalman-Filter im fahrdynamischen Grenzbereich durch die Berücksichtigung der Nichtlinearität der Achsquerkraftkennlinien den Schwimmwinkel robuster als der erweiterte Kalman-Filter schätzt.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

D 17

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9449

ISBN 978-3-18-380912-7

---

# Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Isermann am Institut für Regelungstechnik und Mechatronik der TU Darmstadt im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit der Bosch Engineering GmbH.

Mein Dank gilt zuallererst Herrn Prof. Isermann für die wissenschaftliche Betreuung sowie den Freiraum, den er mir bei der Bearbeitung dieser Aufgabe ließ. Durch seine angenehme und gelassene Art ist er für mich auch menschlich ein Vorbild geworden.

Ich danke Herrn Prof. Adamy für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit.

Danken möchte ich auch den Mitarbeitern der Bosch Engineering GmbH, die in vielen Gesprächen und Diskussionen anregende Impulse gaben und so wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Vor allem möchte ich mich bei Dr. König bedanken. Er war der Initiator für die Forschungs Kooperation und konnte mich immer wieder motivieren und mit seinem fahrdynamischen Wissen unterstützen.

Ich möchte mich auch bei all meinen Kollegen am Institut für Automatisierungstechnik für das familiäre Arbeitsklima bedanken. Mit den Jahren sind echte Freundschaften entstanden. Für ihre Arbeit im Rahmen von Seminar- und Abschlussarbeiten möchte ich mich bei meinen ehemaligen Studenten bedanken. Herausheben möchte ich hier Sven Pospischil, dessen Arbeit ein Teil meiner Dissertation wurde. Ebenfalls möchte ich mich beim Team vom Sekretariat Ilse Brauer, Corinna Fischer und ganz besonders bei Brigitte Hoppe bedanken, die die Arbeit Korrektur gelesen hat.

Ein riesiger Dank gilt meinen Eltern, die es mir ermöglichten Maschinenbau und Mechatronik zu studieren. Allerdings schufen sie schon viel früher die Basis für diese Arbeit, indem sie mir große Freiräume ließen, meine Leidenschaft für die Geschwindigkeit und das Gefühl für den fahrdynamischen Grenzbereich von Kind an auszuleben. Mein Vater ließ sich im Laufe der Promotion auch von den Kalman-Filtern begeistern, sodass wir immer wieder anregende fachliche Diskussionen führen konnten. Meine Mutter gab mir den nötigen Halt und ermutigte mich, wenn meine Motivation auch mal nachließ.

Ludwigsburg, Januar 2018

*Jakob Bechtloff*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>VIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	2
1.2 Zielsetzung und Stand der Technik . . . . .	2
1.2.1 Übergrundgeschwindigkeit . . . . .	2
1.2.2 Schwimmwinkel . . . . .	4
1.2.3 Maximaler Reibwert . . . . .	11
1.2.4 Schräglaufsteifigkeiten . . . . .	14
1.2.5 Achsindividuelle maximale Reibwerte in Querrichtung . . . . .	17
1.3 Konzeptbeschreibung und Gliederung der Arbeit . . . . .	18
<b>2 Modellbildung</b>	<b>21</b>
2.1 Koordinatensysteme . . . . .	21
2.2 Lagedarstellung . . . . .	22
2.3 Reifen- und Achskraftmodelle . . . . .	23
2.3.1 Reifenverhalten . . . . .	24
2.3.2 Effektives Achsquerkraftmodell . . . . .	25
2.3.3 Transientes Querkraftverhalten . . . . .	29
2.3.4 Reifenlängskraftmodell . . . . .	30
2.4 Starrkörperbewegung . . . . .	31
2.4.1 Beispiel: Steilkurve . . . . .	33
2.5 Zweispurmodell . . . . .	34
2.6 Erweitertes Einspurmodell . . . . .	40
2.7 Lineares Einspurmodell . . . . .	41
2.8 Wankmodell . . . . .	44
2.9 Zusammenfassung . . . . .	45
<b>3 Grundlagen der Zustandsschätzung</b>	<b>46</b>
3.1 Erweitertes Kalman-Filter . . . . .	47
3.2 Unscented Kalman-Filter . . . . .	48
3.3 Vergleich des EKF mit dem UKF . . . . .	50
<b>4 Identifikation</b>	<b>53</b>
4.1 Grundparameter . . . . .	53
4.2 Referenzmesssystem . . . . .	54

4.2.1	Aufbau . . . . .	55
4.2.2	Ergebnisse . . . . .	57
4.3	Wankmodell . . . . .	58
4.4	Achsquerkraftmodelle . . . . .	59
4.4.1	Vorgehen . . . . .	59
4.4.2	Identifikation ohne Einfluss von Längsschlupf . . . . .	63
4.4.3	Identifikation bei kombiniertem Schlupf . . . . .	68
4.5	Achslängskraftmodelle . . . . .	71
4.6	Validierung und Vergleich der Einspurfahrdynamikmodelle . . . . .	72
4.6.1	Stationäres Verhalten . . . . .	73
4.6.2	Bremsen in der Kurve . . . . .	74
4.6.3	Dynamisches Verhalten . . . . .	75
4.7	Zusammenfassung . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Schätzung fahrdynamischer Zustände und Parameter</b>	<b>77</b>
5.1	Aufbau der Kalman-Filter . . . . .	77
5.2	Prädiktion . . . . .	79
5.3	Korrektur . . . . .	82
5.3.1	Einspurmodellvorderradgeschwindigkeit . . . . .	83
5.3.2	Achslängskräfte . . . . .	84
5.3.3	Achsquerkräfte . . . . .	86
5.3.4	Schwimmwinkel für niedrige Geschwindigkeiten . . . . .	88
5.4	Güte der Schätzung der Geschwindigkeit und der Fahrbahnsteigung . . . . .	91
5.5	Güte der Schätzung des Schwimmwinkels und des Fahrbahnwankwinkels . . . . .	95
5.6	Vergleich der Schwimmwinkelschätzung mit EKF und UKF . . . . .	97
5.7	Zusammenfassung . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Validierungsergebnisse für verschiedene Fahrmanöver</b>	<b>102</b>
6.1	Geschwindigkeitsschätzung . . . . .	102
6.2	Schwimmwinkel- und Reibwerterschätzung . . . . .	103
6.2.1	Stationäre Kreisfahrt . . . . .	105
6.2.2	Doppelspurwechsel . . . . .	105
6.2.3	Steilkurve . . . . .	106
6.2.4	Handlingkurs . . . . .	110
6.2.5	Driften . . . . .	110
6.2.6	Niedrigreibwert . . . . .	111
6.2.7	Zusammenfassung . . . . .	115
6.3	Schätzung der Schräglaufsteifigkeiten . . . . .	120
6.3.1	Adaption von zufälligen Startwerten auf Winterbereifung . . . . .	120
6.3.2	Adaption von Winter- auf Sommerbereifung . . . . .	122
6.3.3	Vergleich mit dem EKF und modularer Parameterschätzung . . . . .	123
6.4	Zusammenfassung . . . . .	125

<b>7</b>	<b>Adaptive modellbasierten Fahrdynamikregelung auf Basis der geschätzten Größen</b>	<b>127</b>
7.1	Adaptive flachheitsbasierte Modellfolgesteuerung . . . . .	127
7.1.1	Entwurf einer Steuerung für flache Systeme . . . . .	128
7.1.2	Aufbau . . . . .	129
7.1.3	Simulationsergebnisse . . . . .	131
7.2	Schwimmwinkel- und Gierratenregelung durch Bremsingriffe . . . . .	134
7.2.1	Aufbau der Gierraten- und Schwimmwinkelregelung . . . . .	135
7.2.2	Simulationsergebnisse . . . . .	138
7.3	Kombinierte Schwimmwinkel und Gierraten-Steuerung und Regelung . . . . .	139
7.3.1	Performancesteigerung durch kombinierte Lenk- und Bremsingriffe . . . . .	140
7.3.2	Virtueller Fahrversuch . . . . .	141
7.4	Zusammenfassung . . . . .	142
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>146</b>
9.1	Definition der Flachheit . . . . .	146
9.2	Übergang zur Geschwindigkeits-/ Schwimmwinkel-Darstellung des Zweispurmodells . . . . .	146
9.3	Verwendete Zusatzsensoren . . . . .	148
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>159</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>160</b>

# Symbole und Abkürzungen

## Lateinische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\mathbf{A}$	Systemmatrix	
$A_X$	Fahrzeugstirnfläche	
$a$	Beschleunigung	$\text{m/s}^2$
$a_c$	Zentripetalbeschleunigung	$\text{m/s}^2$
$\mathbf{B}$	Eingangsmatrix	
$B$	Pacejka-Reifenmodell-Parameter für die Steigung	
$b$	mittlere Spurweite	$\text{m}$
$b_f$	Spurweite vorne	$\text{m}$
$b_r$	Spurweite hinten	$\text{m}$
$b_S$	Abstand Sensor - Schwerpunkt in Y-Richtung	$\text{m}$
$C$	Pacejka-Reifenmodell-Formparameter	
$C_{\text{Roll}}$	Parameter für die Wankmomentverteilung	
$c_W$	Luftwiderstandsbeiwert	
$c_{s_x}$	Schlupfsteifigkeit	$\text{N}$
$c_{s_x}^*$	auf die Radlast bezogene Schlupfsteifigkeit	
$c_\alpha$	Schräglaufsteifigkeit	$\text{N/rad}$
$D$	Pacejka-Reifenmodell-Parameter für das Kraftmaximum	
$D_{\text{Roll}}$	Dämpfung des Wankmodells	$\text{rad}/(\text{m/s})$
$E$	Pacejka-Reifenmodell-Formparameter	
$F$	Kraft	$\text{N}$
$F_T$	Reifenkraft	$\text{N}$
$F_R$	Rollwiderstandskraft	$\text{N}$
$g$	Gravitationskonstante	$\text{m/s}^2$
$\mathbf{H}$	Ausgangsmatrix	
$\mathbf{h}$	Ausgangsfunktionsvektor	
$h$	Schwerpunkthöhe des Fahrzeugs	$\text{m}$
$h_S$	Höhe des Sensors	$\text{m}$
$i_S$	Lenkübersetzung	
$J$	Trägheitsmoment	$\text{kgm}^2/\text{rad}$
$\mathbf{K}$	Kalman-Verstärkung	
$K_{\text{Roll}}$	Verstärkung des Wankmodells	$\text{rad}/(\text{m/s}^2)$
$k_\alpha$	Quotient aus Querkraft und Schräglaufsteifigkeit	
$l$	Radstand	$\text{m}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$l_r$	Abstand Hinterachse - Fahrzeugschwerpunkt	m
$l_f$	Abstand Vorderachse - Fahrzeugschwerpunkt	m
$l_s$	Abstand Sensor - Schwerpunkt in X-Richtung	m
$l_T$	Einlauflänge	m
$M$	Drehmoment	Nm
$M_D$	Antriebsmoment	Nm
$M_B$	Bremsmoment	Nm
$m$	Gesamtfahrzeugmasse	kg
$\mathbf{P}$	Kovarianzmatrix des Schätzfehlers	
$\mathbf{P}_{xy}$	Kreuzkovarianzmatrix zwischen Schätzfehler und Ausgang	
$\mathbf{P}_{zz}$	Kovarianzmatrix der Messung	
$\mathbf{p}$	Parametervektor	
$\mathbf{Q}$	Kovarianzmatrix des Prozessrausches	
$\mathbf{R}$	Kovarianzmatrix des Messrausches	
$R$	Kurvenradius	m
$r_{\text{dyn}}$	dynamischer Reifenhalbmesser	m
$s_Y$	Querschlupf	
$s_X$	Längsschlupf	
$s$	resultierender Schlupf	
$s_{X,\text{crit}}$	kritischer Schlupf	
$\mathbf{T}$	Transformationsmatrix	
$T_0$	Abtastzeit	s
$T_{\text{Roll}}$	Zeitkonstante des Wankmodells	s
$t$	Zeit	s
$\mathbf{u}$	Eingangsvektor	
$\mathbf{v}$	Messrauschvektor	
$v$	Schwerpunktgeschwindigkeit	m/s
$\mathbf{W}$	Jacobimatrix des Prozessrauschens	
$\mathbf{w}$	Prozessrauschvektor	
$\mathbf{X}$	Sigma-Partikel	
$\mathbf{x}$	Zustandsvektor	
$\hat{\mathbf{x}}$	geschätzter Zustandsvektor	
$x_E$	laterale Position	m
$\mathbf{Y}$	Sigma-Partikel durch die Ausgangsfunktion transformiert	
$\mathbf{y}$	Systemausgang	
$y_E$	longitudinale Position	m
$\mathbf{z}$	Messvektor	

## Griechische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\alpha$	Schräglaufwinkel	rad
$\alpha_{\text{crit}}$	Schräglaufwinkel bei dem die maximale Querkraft entsteht	rad
$\alpha_f$	Schräglaufwinkel an der Vorderachse	rad
$\alpha_{ij}$	Schräglaufwinkel	rad
$\alpha_r$	Schräglaufwinkel an der Hinterachse	rad
$\beta$	Schwimmwinkel in Aufbau-Koordinaten (DIN-ISO-8855:2013-11 (2013) bezieht sich auf die Ebene)	rad
$\dot{\beta}$	Schwimmwinkelgeschwindigkeit in Aufbau-Koordinaten (DIN-ISO-8855:2013-11 (2013) bezieht sich auf die Ebene)	rad/s
$\delta_f$	mittlerer Lenkwinkel an der Vorderachse	rad
$\delta_H$	Lenkradwinkel	rad
$\delta_r$	mittlerer Lenkwinkel an der Hinterachse	rad
$\theta$	Parametervektor	
$\theta$	Nickwinkel des Aufbaus relativ zur horizontalen Ebene	rad
$\theta_K$	Nickwinkel des Aufbaus relativ zur Fahrbahnebene	rad
$\theta_T$	Nickwinkel der Fahrbahnebene relativ zur horizontalen Ebene	rad
$\kappa$	Parameter des Achsquerkraftmodells zur Parametrierung des Längsschlupfeinflusses	
$\mu_{ij}$	resultierender Kraftschlussbeiwert am Rad ij, $ij \in \{fl, fr, rl, rr\}$	
$\mu_{\text{max},i}$	maximaler Kraftschlussbeiwert an Achse i, $i \in \{f, r\}$	
$\xi$	Regressionsvektor	
$\rho$	Luftdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Standartabweichung	
$\varphi$	Wankwinkel des Aufbaus relativ zur horizontalen Ebene	rad
$\varphi_K$	Wankwinkel des Aufbaus relativ zur Fahrbahnebene	rad
$\varphi_T$	Wankwinkel der Fahrbahnebene relativ zur horizontalen Ebene	rad
$\Psi$	Vektor der Eulerwinkel	rad
$\psi$	Gierwinkel zum erdfesten Koordinatensystem	rad
$\dot{\psi}$	Gierrate in der Ebene	rad/s
$\ddot{\psi}$	Gierbeschleunigung in der Ebene	rad/s <sup>2</sup>
$\omega_{ij}$	Raddrehgeschwindigkeit	rad/s
$\omega_X$	gemessene Winkelgeschwindigkeit um die Fahrzeuglängsachse (Wankrate)	rad/s
$\omega_Z$	gemessene Winkelgeschwindigkeit um die Fahrzeughochachse (Gierrate)	rad/s
$\dot{\omega}_X$	gemessene Wankwinkelbeschleunigung	rad/s <sup>2</sup>
$\dot{\omega}_Z$	Gierbeschleunigung um die Fahrzeughochachse	rad/s <sup>2</sup>

---

**Indizes**

Indize	Beschreibung
Corr	Correxit
E	im erdfesten Koordinatensystem
f	an der Vorderachse
fl	Vorderachse links
fr	Vorderachse rechts
r	an der Hinterachse
rl	Hinterachse links
rr	Hinterachse rechts
S	im Sensorkoordinatensystem
V	im Fahrzeugkoordinatensystem
X	in X-Richtung im jeweiligen Koordinatensystem
Y	in Y-Richtung im jeweiligen Koordinatensystem
Z	in Z-Richtung im jeweiligen Koordinatensystem

**Abkürzungen**

Kürzel	vollständige Bezeichnung
ABS	Antiblockiersystem
ATP	Automotiv Testcenter Papenburg
CG	Center of Gravity (Schwerpunkt)
EG	Eigenlenkgradient
EKF	erweitertes Kalman-Filter
ESC	Electronic Stability Control
ESM	Einspurmodell
ESP	elektronisches Stabilisierungsprogramm
FDM	Fahrdynamikmodell
GPS	Global-Positioning-System
HA	Hinterachse
HK	Handlingkurs
IMU	Inertial-Measurement-Unit
KIN	kinematisches Modell
KF	Kalman-Filter
LS	Least-Square
max	maximal
min	minimal
NLB	nichtlinearer Beobachter
PT1	Verzögerungsglied 1. Ordnung
PT2	Verzögerungsglied zweiter Ordnung
PZB	Prüfzentrum Boxberg
RC	Rollcenter (Wankpol)
RLS	Recursive-Least-Square
STM	Single Track Model
rms	root mean square
SG	Schwimmwinkelgradient
SR	Sommerreifen
UKF	Unscented Kalman-Filter
WG	Wankwinkelgradient
WI	Wankindex
WR	Winterreifen
VA	Vorderachse
ZVF	Zustandsvariablenfilter
ZSM	Zweispurmodell

# Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Methode zur Schätzung der wichtigsten Bewegungsgrößen Schwerpunktgeschwindigkeit und Schwimmwinkel, um diese einer Fahrdynamikregelung zur Verfügung zu stellen. Dazu sollte lediglich die Sensorik der Electronic Stability Control (ESC) genutzt werden. Damit eine modellbasierte Steuerung oder ein Führungsmodell auf Veränderung des querdynamischen Fahrverhaltens reagieren kann, sollten zusätzlich die fahrdynamisch wichtigsten Parameter, wie die Schräglaufsteifigkeiten und der maximale Reibwert während des Fahrbetriebs geschätzt werden.

Fahrdynamische Modelle wurden auf Basis der Starrkörperbewegung im Raum entwickelt, die alle erforderlichen Situationen, wie die Fahrt in der Steilkurve, Fahrten im physikalischen Grenzbereich auf Hoch- und Niedrigreißwert genau genug modellieren. Dabei wurde ein optimaler Kompromiss aus Komplexität und Genauigkeit gefunden.

Die fahrzeug- und reifenabhängigen Parameter dieser nichtlinearen Schlupf-Kraftmodelle wurden durch Fahrversuche und einer neu entwickelten Referenzsensorik-Konfiguration bestehend aus 6D-IMU, GPS und *Correxit*-Sensor identifiziert. Dabei wurden erstmals auch Manöver mit gleichzeitigem Längs- und Querschlupf (Kurvenbremsungen) verwendet, um die Querkraftabschwächung in Abhängigkeit des Längsschlupfes zu parametrieren. Die Validierung mit einer Kurvenbremsung bei maximaler Querbeschleunigung zeigt die Leistungsfähigkeit des resultierenden Fahrdynamikmodells auf.

Die Schätzung der fahrdynamischen Zustände und Parameter mit ESC-Sensorik wurde auf Basis von erweiterten und Unscented Kalman-Filtern entwickelt. Die Prädiktion der Zustände erfolgte wie in der Luft- und Raumfahrt üblich mit einem kinematischen Modell, d.h. durch Integration der Längs- und Querbeschleunigungssensorsignale, sowie der Gierrate. Die Korrektur dieser instabilen Integration erfolgte durch die Geschwindigkeiten der Vorderräder und mit den (aus Sensorgrößen geschätzten) Längs- und Querkraften der Vorder- und Hinterachse. Durch Berücksichtigung des maximalen Reibwerts in den Achslängs- und Querkraftmodellen wird dieser bei genügend Schlupf beobachtbar.

Es konnte gezeigt und erstmals begründet werden, warum der hier zur Zustandsschätzung eingesetzte Unscented Kalman-Filter im fahrdynamischen Grenzbereich durch die Berücksichtigung der Nichtlinearität den Schwimmwinkel robuster als der erweiterte Kalman-Filter schätzt.

Die Schwimmwinkelschätzung wurde mittels 355 unterschiedlicher, vom Autor selbst durchgeführter Testfahrten auf Fahrdynamikflächen, Steilkurven, Handlingkursen und auf Schnee validiert. Der Algorithmus lieferte auf ca. 1000 Testfahrt-Kilometern in allen erdenklichen fahrdynamisch relevanten Situationen robuste Ergebnisse. Im Mittel betrug der maximale Schwimmwinkelfehler während einer Testfahrt  $2,7^\circ$ . Der entwickelte Schwimmwinkelschätzer kann daher einen entscheidenden Beitrag bei der Weiterentwicklung des ESC leisten, indem insbesondere

kritische Situationen frühzeitig erkannt werden. Die Reibwertschätzung reagierte sehr schnell, sodass bereits bei ca. 80-85% der maximalen Querschleunigung der maximale Reibwert richtig eingeschätzt wurde. Die Schräglaufsteifigkeiten konnten während einer Landstraßenfahrt mit mittleren Querschleunigungen robust geschätzt werden. Der Unterschied zwischen einer Winter- und Sommerbereifung wurde deutlich.

Um das Zusammenspiel des entwickelten Schätzalgorithmus mit einer Fahrdynamikregelung zu demonstrieren, wurde eine Modellfolgesteuerung einer aktiven Vorder- und Hinterachslenkung zur Verbesserung der Gierdynamik in einer *IPG-Carmaker*-Simulation implementiert. Durch die Rückführung des geschätzten Schwimmwinkels und einem einfachen P-Regler konnte das Fahrzeug durch Bremsengriffe auch bei einem langsam anwachsenden Schwimmwinkel frühzeitig stabilisiert werden, was durch eine Gierratenrückführung nicht möglich war.