

# **Objektive Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der  
Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Daniel Simmermacher**  
aus Lauterbach (Hessen)

|                             |                                    |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Berichterstatter:           | Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner |
| Mitberichterstatter:        | Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein       |
| Tag der Einreichung:        | 30. April 2013                     |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 10. Juli 2013                      |



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Fahrzeugentwicklung der Daimler AG in Sindelfingen und wurde von mir an der Technischen Universität Darmstadt als Dissertation eingereicht.

Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik (FZD) an der TU Darmstadt, für die fachliche und persönliche Betreuung meiner Arbeit als Doktorvater. Den stets treffsicheren methodischen und inhaltlichen Anregungen ist ein großer Anteil am Erfolg meines Promotionsvorhabens beizumessen.

Ebenfalls ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein, Leiter des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) an der RWTH Aachen, für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Während meiner Zeit als Doktorand im Bereich der Aktiven Sicherheit bei Mercedes-Benz konnte ich jederzeit auf die umfangreiche Unterstützung des gemeinsamen Forschungsvorhabens zählen. Mindestens in gleichem Maße bedanke ich mich daher bei meinen Betreuern und Ratgebern, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Marcus Nüssle und Herrn Dr.-Ing. Frank Baumann, sowie meinen ehemaligen Vorgesetzten und Förderern Herrn Uwe Stenzel und Herrn Dr.-Ing. Rüdiger Rutz für Ihre Unterstützung und das entgegen gebrachte Vertrauen in die Ergebnisse meiner Arbeit.

Auch den studentischen Mitarbeitern sei auf diesem Wege für ihre tatkräftige Unterstützung des Forschungsprojekts im Rahmen von Praktika und Abschlussarbeiten mein großer Dank ausgesprochen.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und Freunden, die mich in den letzten Jahren auf verschiedene Weise unterstützt haben und zumeist ein hohes Maß an Verständnis für meine gelegentliche Unpässlichkeit aufbringen konnten.

Daniel Simmermacher

München, Juli 2013

**Für die Fahrsicherheit**

# Inhalt

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>                                | <b>VIII</b> |
| <b>1 Einleitung.....</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Zielsetzung .....   | 3           |
| 1.2 Methodik.....   | 4           |
| <b>2 Stand der Forschung.....</b>   | <b>5</b>    |
| 2.1 Grundlagen der Fahrdynamik.....                                       | 7           |
| 2.1.1 Bewegungsgrößen des Fahrzeugs .....                                 | 7           |
| 2.1.2 Stationäres und dynamisches Lenkverhalten .....                     | 8           |
| 2.1.3 Messtechnik.....  | 17          |
| 2.2 Testverfahren und objektive Kennwerte.....                            | 20          |
| 2.2.1 Closed-Loop-Studien zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen .....       | 23          |
| 2.2.2 Bewegungskennwerte zur Bewertung der Fahrsicherheit.....            | 28          |
| 2.2.3 Bekannte Akzeptanzgrenzen für die Bewegungskennwerte .....          | 31          |
| 2.3 Fahrsicherheit und Fahrzeugführung.....                               | 33          |
| 2.3.1 Aktive Sicherheit.....  | 33          |
| 2.3.2 Unfallursachen .....  | 36          |
| 2.3.3 Regelkreis Mensch-Fahrzeug.....                                     | 44          |
| 2.3.4 Anwendung von Fahrermodellen zur Bewertung der Fahrsicherheit ..... | 49          |
| 2.4 Fazit .....   | 54          |
| <b>3 Versuchskonzept.....</b>   | <b>58</b>   |
| 3.1 Zielsetzung .....   | 58          |
| 3.2 Hypothesen .....  | 58          |
| 3.3 Ableitung der Testmethodik .....                                      | 60          |
| 3.3.1 Testmanöver zur Bewertung von Gierstörungen.....                    | 61          |
| 3.3.2 Testmanöver zur Bewertung von überhöhten Schwimmwinkeln .....       | 68          |
| 3.3.3 Subjektive und objektive Beherrschbarkeit .....                     | 69          |
| 3.4 Variation von Gierstörungen und Schwimmwinkeln mittels HSR.....       | 70          |
| 3.4.1 Wirkprinzip .....   | 71          |
| 3.4.2 Validierung in Vorversuchen .....                                   | 73          |
| 3.5 Variation von Gierstörungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten.....      | 75          |
| 3.5.1 Fahrsimulator der Daimler AG.....                                   | 76          |
| 3.5.2 FADYS Modellvalidierung .....                                       | 78          |
| 3.6 Fazit .....   | 80          |
| <b>4 Durchführung und Methodik der Auswertung.....</b>                    | <b>82</b>   |
| 4.1 Durchführung der Realstudie im kontrollierten Feld .....              | 82          |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.1.1    | Versuchsfahrzeug .....  | 82         |
| 4.1.2    | Probandenkollektiv und Testvarianten .....                            | 83         |
| 4.1.3    | Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80-120 km/h .....                 | 84         |
| 4.1.4    | Ausweichtest .....  | 86         |
| 4.2      | Durchführung der Fahrsimulatorstudie .....                            | 87         |
| 4.2.1    | Probandenkollektiv und Testvarianten .....                            | 87         |
| 4.2.2    | Geradeausbremsungen aus 120-180 km/h .....                            | 88         |
| 4.3      | Verwendete Messtechnik .....  | 89         |
| 4.3.1    | Funktionsweise des verwendeten Differential-GPS-Systems .....         | 91         |
| 4.3.2    | Kursverlaufbestimmung in Geradeausfahrt .....                         | 91         |
| 4.3.3    | Kursverlaufbestimmung in Kurvenfahrt .....                            | 93         |
| 4.3.4    | Fehlerabschätzung der Abstandsbestimmung .....                        | 95         |
| 4.4      | Methodik der Auswertung .....   | 97         |
| 4.4.1    | Kennwerte und Messdatenaufbereitung .....                             | 98         |
| 4.4.2    | Statistische Methoden .....   | 100        |
| 4.4.3    | Prüfung auf Normalverteilung der Beobachtungsgrößen .....             | 103        |
| 4.5      | Fazit .....   | 105        |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse .....</b>   | <b>106</b> |
| 5.1      | Korrelationen der untersuchten Kenngrößen .....                       | 106        |
| 5.1.1    | Bremsmanöver (80-180 km/h) .....                                      | 106        |
| 5.1.2    | Ausweichtest (80 km/h) .....  | 108        |
| 5.2      | Objektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern .....                    | 109        |
| 5.2.1    | Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie) .....      | 110        |
| 5.2.2    | Störaufschaltung ohne gleichzeitige Bremsbetätigung bei 80 km/h ..... | 113        |
| 5.2.3    | Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulator) .....                  | 114        |
| 5.3      | Subjektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern .....                   | 118        |
| 5.3.1    | Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie) .....      | 118        |
| 5.3.2    | Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulator) .....                  | 119        |
| 5.4      | Vergleich von subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit .....       | 120        |
| 5.4.1    | Gegenüberstellung in Geradeausbremsungen aus 80-180 km/h .....        | 121        |
| 5.4.2    | Subjektive Beherrschbarkeit von Fahrstreifenverletzungen .....        | 122        |
| 5.4.3    | Nachweis von Trainingseffekten über der Versuchsdauer .....           | 123        |
| 5.5      | Beherrschbarkeit des Ausweichtests mit 80 km/h .....                  | 125        |
| 5.5.1    | Objektives Kurshaltevermögen bei hohen HA-Schwimmwinkeln .....        | 125        |
| 5.5.2    | Subjektive Beherrschbarkeit von hohen HA-Schwimmwinkeln .....         | 126        |
| 5.6      | Fazit .....   | 127        |
| <b>6</b> | <b>Ermittlung von Akzeptanzgrenzen und Ausblick .....</b>             | <b>130</b> |
| 6.1      | Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen in Bremsmanövern .....             | 130        |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.1.1    | Methodik .....  | 130        |
| 6.1.2    | Ergebnisse .....  | 133        |
| 6.1.3    | Vergleich mit bisherigen Studien .....                          | 136        |
| 6.2      | Akzeptanzgrenzen für Schwimmwinkel im Ausweichtest .....        | 138        |
| 6.3      | Bedeutung der Ergebnisse und Ausblick .....                     | 139        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung.....</b>                                     | <b>141</b> |
| <b>8</b> | <b>Anhang .....</b>   | <b>143</b> |
| 8.1      | Erwartungsbereiche der Begrenzungsabstände .....                | 143        |
| 8.1.1    | Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung .....                 | 143        |
| 8.1.2    | Auftragung über der Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung ... | 144        |
| 8.2      | Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung.....                | 145        |
| 8.2.1    | Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung .....                 | 145        |
| 8.2.2    | Auftragung über der Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung ... | 146        |
| 8.3      | Standardisierte Testverfahren .....                             | 147        |
| 8.3.1    | Geradeausverhalten .....  | 147        |
| 8.3.2    | Kurvenverhalten .....   | 150        |
| 8.3.3    | Übergangsverhalten.....   | 163        |
| 8.3.4    | Wechselkurvenverhalten .....                                    | 171        |
| <b>9</b> | <b>Quellen .....</b>  | <b>183</b> |

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Lateinische Buchstaben

| Zeichen    | Einheit              | Bezeichnung                             |
|------------|----------------------|---|
| $a$        | $\text{m/s}^2$       | Beschleunigung                          |
| $b$        | m                    | Spurbreite                              |
| $b_i$      | m                    | Querabstand                             |
| $B$        | $^\circ, \text{rad}$ | Breitengrad                             |
| $B_s$      | /.                   | Subjektive Beherrschbarkeit             |
| $B0-B2$    | /.                   | Beherrschbarkeitsniveau                 |
| $c_\alpha$ | $\text{N/rad}$       | Schräglaufsteifigkeit                   |
| $d$        | /.                   | Spannweite                              |
| $D$        | /.                   | Dämpfungsmaß                            |
| $F$        | N                    | Kraft                                   |
| $F_{z,w}$  | N                    | Radaufstandskraft                       |
| $f$        | Hz                   | Frequenz                                |
| $H_0$      | /.                   | Ausgangshypothese                       |
| $i_s$      | /.                   | Lenkübersetzung                         |
| $k$        | /.                   | Verstärkungsfaktor                      |
| $K$        | /.                   | Konstante                               |
| $l$        | m                    | Radstand                                |
| $l_v$      | m                    | Abstand Fzg.-Schwerpunkt zu Vorderachse |
| $l_h$      | m                    | Abstand Fzg.-Schwerpunkt zu Hinterachse |
| $l_i$      | m                    | Längsabstand                            |
| $L$        | $^\circ, \text{rad}$ | Längengrad                              |
| $L_p$      | m                    | Vorausschaulänge                        |
| $m_{Fzg}$  | kg                   | Fahrzeugmasse                           |
| $M_H$      | Nm                   | Lenkradmoment                           |
| $M_Z$      | Nm                   | Giermoment                              |
| $n$        | /.                   | Anzahl                                  |
| $p$        | /.                   | Wahrscheinlichkeit                      |
| $R$        | m                    | Kurvenradius                            |
| $R_p$      | /.                   | Korrelationsmaß nach Pearson            |
| $R^2$      | /.                   | Bestimmtheitsmaß                        |
| $v$        | $\text{m/s}$         | Geschwindigkeit                         |
| $s$        | /.                   | Laplace-Operator                        |
| $S$        | %                    | Schlupf                                 |
| $t$        | s                    | Zeitvariable                            |
| $T$        | s                    | Zeitverzug                              |
| $T_p$      | s                    | Vorausschauzeit                         |

|       |     |                     |
|-------|-----|---------------------|
| $T_z$ | ./. | Zählerzeitkonstante |
| $U$   | ./. | Überschwingweite    |

### Griechische Buchstaben

| Zeichen    | Einheit          | Bezeichnung                   |
|------------|------------------|-------------------------------|
| $\alpha$   | °, rad           | Schräglaufwinkel              |
| $\alpha_s$ | ./.              | Signifikanzniveau             |
| $\beta$    | °, rad           | Schwimmwinkel                 |
| $\delta_H$ | °, rad           | Lenkradwinkel                 |
| $\delta_A$ | °, rad           | Ackermannwinkel               |
| $\delta_D$ | °, rad           | Dynamischer Bezugslenkwinkel  |
| $\delta_v$ | °, rad           | Lenkwinkel an der Vorderachse |
| $\delta_h$ | °, rad           | Lenkwinkel an der Hinterachse |
| $\theta$   | kgm <sup>2</sup> | Massenträgheitsmoment         |
| $\kappa$   | 1/m              | Krümmung                      |
| $\mu$      | ./.              | Reibwert                      |
| $\sigma$   | 1/s              | Abklingkonstante              |
| $\varphi$  | °, rad           | Wankwinkel                    |
| $\psi$     | °, rad           | Gierwinkel                    |
| $\omega$   | 1/s              | Kreisfrequenz                 |

### Indizes

| Zeichen | Bezeichnung                 |
|---------|-----------------------------|
| $0$     | Startposition, Nullstellung |
| $1s$    | nach einer Sekunde          |
| $corr$  | Correxit                    |
| $e$     | Endposition, Endzeitpunkt   |
| $Fusi$  | Funktionale Sicherheit      |
| $ges$   | Gesamtwert                  |
| $grenz$ | Grenzwert                   |
| $h$     | hinten                      |
| $HA$    | Hinterachse                 |
| $i$     | Laufzähler                  |
| $ist$   | Istwert                     |
| $Int$   | Interpolation               |
| $krit$  | kritisch                    |
| $LL$    | Leitlinie                   |
| $max$   | Maximalwert                 |
| $min$   | Minimalwert                 |
| $Obj$   | Objektiv                    |

|             |                  |
|-------------|------------------|
| <i>prop</i> | proportional     |
| <i>Pos</i>  | Position         |
| <i>red</i>  | reduziert        |
| <i>ref</i>  | Referenzwert     |
| <i>res</i>  | resultierend     |
| <i>Reg</i>  | Regression       |
| <i>stat</i> | Stationärwert    |
| <i>soll</i> | Sollwert         |
| <i>SP</i>   | Schwerpunkt      |
| <i>Subj</i> | Subjektiv        |
| <i>v</i>    | vorne            |
| <i>VA</i>   | Vorderachse      |
| <i>x</i>    | Längsrichtung    |
| <i>y</i>    | Querrichtung     |
| <i>z</i>    | Vertikalrichtung |

## Abkürzungen

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bezeichnung</b>                      |
|------------------|---|
| <i>ABS</i>       | Anti-Blockier-System                    |
| <i>AFS</i>       | Active Front Steering                   |
| <i>ASIL</i>      | Automotive Safety Integrity Level       |
| <i>ASR</i>       | Antriebsschlupfregelung                 |
| <i>BA</i>        | Begrenzungsabstand                      |
| <i>CI</i>        | Confidence Interval (Vertrauensbereich) |
| <i>DSC</i>       | Dynamic Stability Control               |
| <i>EG</i>        | Eigenlenkgradient                       |
| <i>EPS</i>       | Electric Power Steering                 |
| <i>ESP</i>       | Elektronisches-Stabilitäts-Programm     |
| <i>FLC</i>       | Fuzzy Logic Controller                  |
| <i>Fzg</i>       | Fahrzeug                                |
| <i>GPS</i>       | Global Positioning System               |
| <i>HA</i>        | Hinterachse                             |
| <i>HSR</i>       | Hinterrad-Schräglaufwinkel-Regelung     |
| <i>KS</i>        | Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lilliefors |
| <i>NN</i>        | Neuronales Netz                         |
| <i>SBB</i>       | Spurbreitenbedarf                       |
| <i>SW</i>        | Shapiro-Wilk-Test                       |
| <i>VA</i>        | Vorderachse                             |

# 1 Einleitung

Obwohl eine sichere Kursführung die anerkannt wichtigste Aufgabe des Fahrers ist und auch im Berichtsjahr 2010 immer noch ca. 40 % aller Verkehrsunfälle mit Todesopfern auf den Verlust der Fahrzeugkontrolle zurückzuführen sind<sup>1</sup>, erfolgt nur in Ausnahmefällen, wie z.B. bei Wallentowitz et al.<sup>2</sup> oder Freitag et al.<sup>3</sup>, eine objektive Bewertung des tatsächlichen Kurshaltevermögens von Testpersonen in Abhängigkeit verschiedener Fahrzeugvarianten oder Störeinflüsse. Während die Testverfahren zur Ermittlung von objektiven Fahreigenschaftskennwerten ohne Fahrereinfluss heute überwiegend standardisiert sind<sup>4</sup> und durch die Fahrzeughersteller angewandt werden<sup>5</sup>, ist der Zusammenhang zwischen den bekannten objektiven Bewegungskennwerten und der tatsächlichen Beherrschbarkeit des Fahrverhaltens noch weitestgehend unerforscht. Die Gründe sind zum einen in der Schwierigkeit zu sehen, das objektive Kurshaltevermögen von Testpersonen messtechnisch zu erfassen<sup>6</sup>, aber auch in der gängigen Annahme, ein von Testpersonen subjektiv als „sicher“ beurteiltes Fahrzeugverhalten sei jederzeit auch objektiv sicher zu führen, siehe Neukum et al.<sup>7</sup>.

Dabei ist der Ansatz, den Fahrer und seine Reaktionen in die Betrachtung der Fahr-sicherheit mit einzubeziehen, nicht neu und wurde bereits in den 60er Jahren als notwendig erachtet, siehe z.B. Enke<sup>8</sup>, Fiala<sup>9</sup>, Rashevsky<sup>10</sup> und Wallner<sup>11</sup>. Zur Minimierung von Unfallrisiken muss der Fahrer in Abhängigkeit des Streckenverlaufs und der Fahrsituation objektiv sichere Führungsgrößen wählen<sup>12</sup> und das Fahrzeug in der Folge möglichst exakt auf dem gewählten Sollkurs stabilisieren<sup>13</sup>. Bis heute wird die Fahrzeugführung und Stabilisierung als primäre Aufgabe des Fahrers verstanden<sup>14</sup>. Zur Unterstützung einer sicheren Kurführung sollen die Bewegungen des Fahrzeugs möglichst exakt den

---

<sup>1</sup> Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010, S. 58ff

<sup>2</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>3</sup> Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

<sup>4</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 20

<sup>5</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW, S. 3

<sup>6</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 300

<sup>7</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

<sup>8</sup> Enke (1966): Zusammenwirken von Fahrzeuglenker und Automobil, S.37ff

<sup>9</sup> Fiala, Wallner (1968): Untersuchung des Systems Fahrzeug-Fahrer bei einer Lenkung mit Zeitvorhalt

<sup>10</sup> Rashevsky (1966): Neglected Factors in Highway Safety

<sup>11</sup> Wallner (1967): Zum Verhalten des Fahrzeuglenkers als regelungstechnisches Problem, S. 54ff

<sup>12</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren, S. 5

<sup>13</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 217

<sup>14</sup> Bruder et al. (2007): Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung, S. 79ff

Erwartungen des Fahrers entsprechen<sup>15</sup> und das Fahrzeug allgemein „leicht zu führen“ sein.<sup>16</sup>

Der Stabilität in Brems- und Ausweichmanövern kommt aufgrund der relativen Häufigkeit dieser Fahrmanöver in unfallrelevanten Fahrsituationen eine hohe Bedeutung zu.<sup>17,18</sup> Mit Beginn der 70er-Jahre wurden daher einheitliche Tests zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens und insbesondere der Bremsstabilität gesucht. Das Ziel war es, objektive Bewertungskriterien zu finden.<sup>19</sup> Der Ansatz hierzu ist bis heute die Betrachtung des Zusammenhangs von Subjektivbeurteilungen mit objektiven Fahreigenschaftskennwerten.<sup>20,21,22</sup> Die Bewertung der Brems- und Lastwechselstabilität in Geradeaus- und Kurvenfahrt wurde daher mittlerweile standardisiert und in Normungen überführt.<sup>23,24,25</sup> Die Testmanöver werden überwiegend ohne Berücksichtigung des Fahrereinflusses in Form von sogenannten Open-Loop-Tests mit fixiertem Lenkrad (fixed control) durchgeführt. Als Bewertungsgrößen der Brems- und Lastwechselstabilität aus einem stationären Ausgangszustand heraus haben sich heute vor allem die Abweichung der Giergeschwindigkeit eine Sekunde nach Bremsbeginn bzw. Lastwechselzeitpunkt  $\Delta\dot{\psi}_{1s}$  und die maximale Abweichung der Giergeschwindigkeit  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ , jeweils bezogen auf den stationären Ausgangszustand, durchgesetzt, siehe z.B. Sagan<sup>26</sup>, ISO 14512<sup>27</sup> oder Neukum et al.<sup>28</sup>. Zur Bewertung der Stabilität in Folge querdynamischer Lenkanregungen werden hingegen hauptsächlich die auftretenden Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt ausgewertet, siehe z.B. Fach et al.<sup>29</sup> und von Glasner<sup>30</sup>. Nach Rönitz<sup>31</sup> sind der auftretende Schwimmwinkel und die Gierbewegung des Fahrzeugs in fast allen stationären und instationären Fahrmanövern zur Bewertung der Fahrstabilität geeignet.

Bei konsequenter Anwendung eines rein auf objektiven Bewegungskennwerten beruhenden Bewertungsverfahrens könnte das Fahrverhalten eines Fahrzeugs dann als objektiv fahrsicher eingestuft werden, wenn die betrachteten Bewegungskennwerte inner-

<sup>15</sup> Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

<sup>16</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>17</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 12

<sup>18</sup> Weiß (1988): Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechsellvorgängen

<sup>19</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 13f

<sup>20</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop, S. 1

<sup>21</sup> Riedel, Arbinger (1997): Subjektive und Objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>22</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 24ff

<sup>23</sup> ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

<sup>24</sup> ISO 7975 (1985): Braking in a turn – Open loop test procedure (first edition)

<sup>25</sup> ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method

<sup>26</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 21

<sup>27</sup> ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction, S. 8

<sup>28</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

<sup>29</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme, S. 74

<sup>30</sup> von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

halb definierter Akzeptanzgrenzen liegen. Einheitliche oder gar genormte Akzeptanzgrenzen der Bewegungskenngrößen in Brems- und Ausweichmanövern existieren bisher allerdings nicht. Die subjektive Fahrzeugbewertung erfolgt nach Neukum/Krüger häufig nur in Relation zu einer Standardvariante und ist daher nicht geeignet, absolute Akzeptanzgrenzen abzuleiten.<sup>32</sup> Anhaltspunkte für Akzeptanzgrenzen von Gierstörungen liefern bisher lediglich veröffentlichte Subjektivurteile von Testfahrern aus den 70er- und 80er-Jahren<sup>33,34</sup> sowie aktuelle Untersuchungen zu Störungen durch elektronische Fahrzeugkomponenten, z.B. durch aktive Überlagerungslenkung<sup>35</sup> (Active Front Steering AFS), Vertikaldynamikstörung<sup>36</sup> und Hinterradlenkung<sup>37</sup> (Hinterrad-Schräglaufwinkel-Regelung HSR). Die vorgeschlagenen Akzeptanzgrenzen der Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  weichen jedoch auch bei vergleichbaren Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Störanregung mit empfohlenen Werten zwischen 2,5-12°/s deutlich voneinander ab. Die Werte der maximal tolerierten Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt  $\beta_{SP,\max}$  bei kombinierten Lenk- und Bremsmanövern sind mit Akzeptanzaussagen zwischen 5-20°/s ebenfalls unterschiedlich, siehe Keinert<sup>38</sup> (5°) und Witte<sup>39</sup> (20°).

Das resultierende objektive Kurshaltevermögen wird in diesen Studien nicht betrachtet. Auf Basis der vorhandenen Erkenntnisse kann daher keine objektiv begründete Aussage getroffen werden, bis hin zu welchen Werten der betrachteten Bewegungskenngrößen in Brems- und Ausweichtests Normalfahrer<sup>40</sup> noch in der Lage sind, ein Fahrzeug „sicher“ zu führen.

## 1.1 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll das objektive Kurshaltevermögen eines kundenrepräsentativen Probandenkollektivs in Brems- und Ausweichtests in Abhängigkeit der zur Bewertung von Fahrstabilität bekannten Stabilitäts-Kennwerte ermittelt werden. Auf Basis des ermittelten objektiven Kurshaltevermögens sollen Akzeptanzgrenzen für die betrachteten Stabi-

---

<sup>31</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

<sup>32</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik, S. 301f

<sup>33</sup> Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

<sup>34</sup> Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

<sup>35</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

<sup>36</sup> Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 92

<sup>37</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

<sup>38</sup> Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

<sup>39</sup> Witte (1995): Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen

<sup>40</sup> Unter dem Begriff *Normalfahrer* werden nach Ullmann (2006, Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme) und in dieser Arbeit Fahrer verstanden, „...die nicht über beruflich (Versuchsfahrer) oder privat (Hobbyrennfahrer) begründete besondere Fähigkeiten oder Fertigkeiten bezüglich des Fahrens im querdynamischen Grenzbereich verfügen.“

litäts-Kennwerte abgeleitet werden, innerhalb derer das Fahrzeug in Brems- und Ausweichtests für Normalfahrer nach objektiven Kriterien sicher zu führen ist.

## 1.2 Methodik

Bild 1.1 fasst das Vorgehen in dieser Arbeit zusammen. Als Grundlage der durchgeführten Studie wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der objektiven Bewertung von Fahrsicherheit aufgezeigt. Dieser Stand umfasst zunächst die objektive Beschreibung von Fahrsicherheit in zahlreichen Testmanövern durch objektive Bewegungskenngrößen. Darüber hinaus wird die Bedeutung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug aus Sicht der Aktiven Sicherheit diskutiert und auf veröffentlichte Vorschläge für Akzeptanzgrenzen der objektiven Bewegungskenngrößen des Fahrzeugs eingegangen.

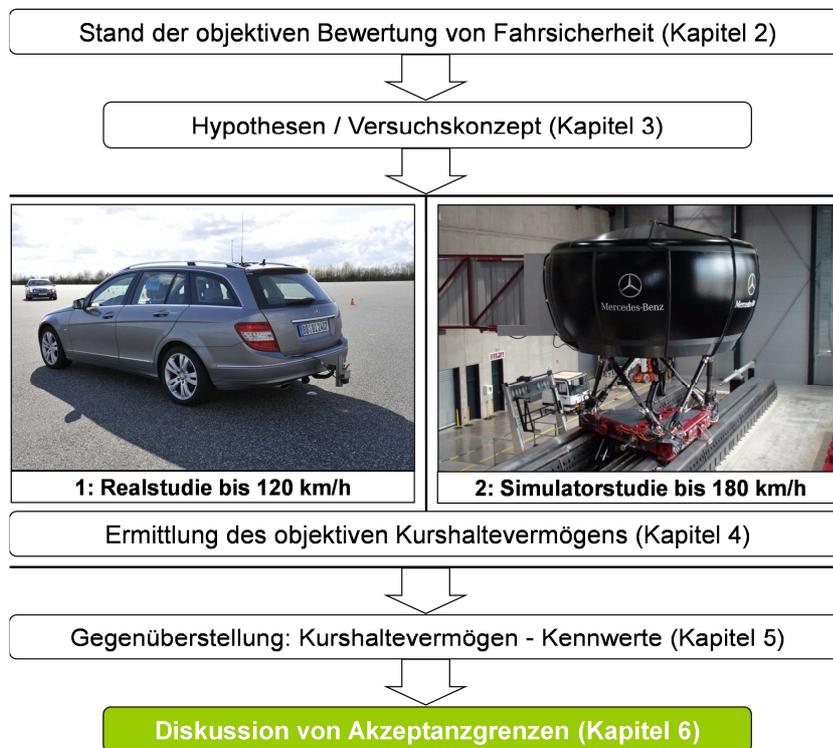


Bild 1.1 Methodik der durchgeführten Untersuchung von objektivem Kurshaltevermögen

Auf Basis der bereits vorhandenen Erkenntnisse aus der Literatur werden in Kapitel 3 Hypothesen zu dem erwarteten Kurshaltevermögen von Normalfahrern aufgestellt und das zur Prüfung dieser Hypothesen benötigte Versuchskonzept abgeleitet.

Die Ermittlung des Kursführungsvermögens in Kapitel 4 erfolgt in zwei umfangreichen Probandenstudien mit jeweils ca. 100 Versuchspersonen auf einem abgesperrten Testgelände und am Fahrsimulator der Daimler AG. Zur Variation der Bewegungskenngrößen in den verschiedenen Testmanövern wird eine aktive Hinterradverstellung verwendet.

Das resultierende Kurshaltevermögen der Normalfahrer innerhalb vorgegebener Fahr-gassen wird durch ein hochpräzises Differential-GPS-System erfasst.

Das ermittelte Kurshaltevermögen der Testpersonen wird in Kapitel 5 den objektiven Bewegungskenngrößen des Fahrzeugs gegenübergestellt. Aus dieser Gegenüberstellung werden in Kapitel 6 mögliche Akzeptanzgrenzen dieser Kennwerte abgeleitet und disku-tiert, die eine sichere Kursführung durch Normalfahrer gewährleisten sollen.

## 2 Stand der Forschung

Im Fokus der anfänglichen Betrachtung von Fahrsicherheit steht nach Zomotor<sup>41</sup> An-fang des 19. Jahrhunderts die Sorge einer unkontrollierten Schleuderbewegung des Fahrzeugs in Folge schneller Lenkbewegungen oder Bremsungen. Hierzu werden erste Slalom-Tests auf eingefetteten Holzbohlen durchgeführt. Eine mathematische Beschrei-bung des Lenkverhaltens von Fahrzeugen in stationären und dynamischen Manövern ist zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht bekannt und folgt erst in den 40er-Jahren<sup>42</sup>, ebenfalls aufgeführt bei Zomotor. Die nächsten wesentlichen Schritte auf dem Weg zur heutigen Bewertungsmethodik sind die Entwicklung portabler Messtechnik in den 60er-Jahren<sup>43</sup> und die schrittweise Vereinheitlichung der Testmanöver und Auswerteverfahren seit den 70er-Jahren, z.B. nach Mitschke et al.<sup>44</sup> und Rompe/Heißing<sup>45</sup>. Das Ziel dieser Bemühungen ist die eingangs erwähnte Beschreibung des Fahrverhaltens in einheitli-chen Prüfverfahren und durch objektive Bewegungskennwerte. Hierdurch soll die Be-wertung der Fahrzeuge vom Urteil einzelner Testfahrer losgelöst werden<sup>46</sup> und ver-schiedene Fahrzeuge untereinander besser verglichen werden können.<sup>47</sup> Heute sind so-wohl die Durchführung und messtechnische Erfassung als auch die Auswertung des Fahrverhaltens in zahlreichen Testmanövern genormt und werden nach Zomotor et al.<sup>48</sup> von allen Fahrzeugherstellern angewandt.

Bild 2.1 zeigt das heutige Vorgehen von Fahrzeugherstellern zur Bewertung und Absi-cherung von Fahrsicherheit, wie es z.B. für das Testmanöver *Sine with dwell* aus dem zulassungsrelevanten Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) No. 126 der Na-tional Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) hervorgeht<sup>49</sup>, Details siehe An-

---

<sup>41</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 12ff

<sup>42</sup> Riekert, Schunck (1940): Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs

<sup>43</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>44</sup> Mitschke et al. (1986): Untersuchung des Fahrverhaltens von PKW bei Kurvenfahrt

<sup>45</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

<sup>46</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 13f

<sup>47</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 11

<sup>48</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW, S. 3

<sup>49</sup> NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-1ff

hang 8.3.4. Die Fahrzeuge werden in einer Vielzahl von Testmanövern geprüft, die als relevant in Bezug auf die spätere Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch den Nutzer beurteilt werden. Zur Bewertung des Fahrverhaltens in diesen Testmanövern werden diejenigen Kennwerte verwendet, die nach bisherigen Forschungen besonders gut mit den Urteilen von Testfahrern korrelieren und somit zur objektiven Beschreibung des Fahrverhaltens geeignet erscheinen, siehe ausführliche Beschreibung der Testverfahren und Kriterien in Anhang 8.3. Das Fahrverhalten wird anschließend mittels portabler Messtechnik in Erprobungsfahrzeugen erfasst und durch die Bewegungskennwerte objektiviert. Eine Alternative zu Testfahrten mit Entwicklungsfahrzeugen sind heute Simulationsverfahren mit virtuellen Fahrzeugmodellen. Durch die sogenannte „virtuelle Erprobung“ kann das Fahrverhalten des späteren Fahrzeugs bereits in den frühen Phasen der Entwicklung abgeschätzt und unter Einbeziehung von Fahrdynamik-Regelsystemen optimiert werden, siehe z.B. Bewersdorff et al.<sup>50</sup> und Dragon<sup>51</sup>.



Bild 2.1 Methodik der Bewertung von Fahrsicherheit durch die Fahrzeughersteller (Schritte 1-3) und nicht standardisierte Absicherung (Schritt 4)

Eine Standardisierung des zur vollständig objektiven Absicherung notwendigen Bewertungsschritts 4 aus Bild 2.1 – der Abgleich mit Akzeptanzgrenzen – ist mit Ausnahme der FMVSS No. 126 bisher jedoch nicht bekannt. Die Kriterien zur Absicherung des Fahrzeugverhaltens in den übrigen Testmanövern sind somit den Fahrzeugherstellern überlassen. Die Festlegung von Akzeptanzgrenzen ist daher nach den bereits geleisteten Bemühungen um eine Vereinheitlichung von Testmanövern und Bewertungskriterien der nächste wesentliche Schritt in Richtung einer standardisierten Absicherung von Fahrsicherheit. Neben den gängigen Prüfverfahren und objektiven Bewegungskenngrößen werden in diesem Kapitel bisherige Vorschläge und Möglichkeiten zur Definition von Akzeptanzgrenzen für die bekannten Bewegungskenngrößen diskutiert.

<sup>50</sup> Bewersdorff et al. (2007): Simulation und Bewertung der Fahrdynamikeigenschaften im Grenzbereich, S. 56ff

<sup>51</sup> Dragon (1996): FADYS Fahrdynamikmodell, S. 117ff

## 2.1 Grundlagen der Fahrdynamik

### 2.1.1 Bewegungsgrößen des Fahrzeugs

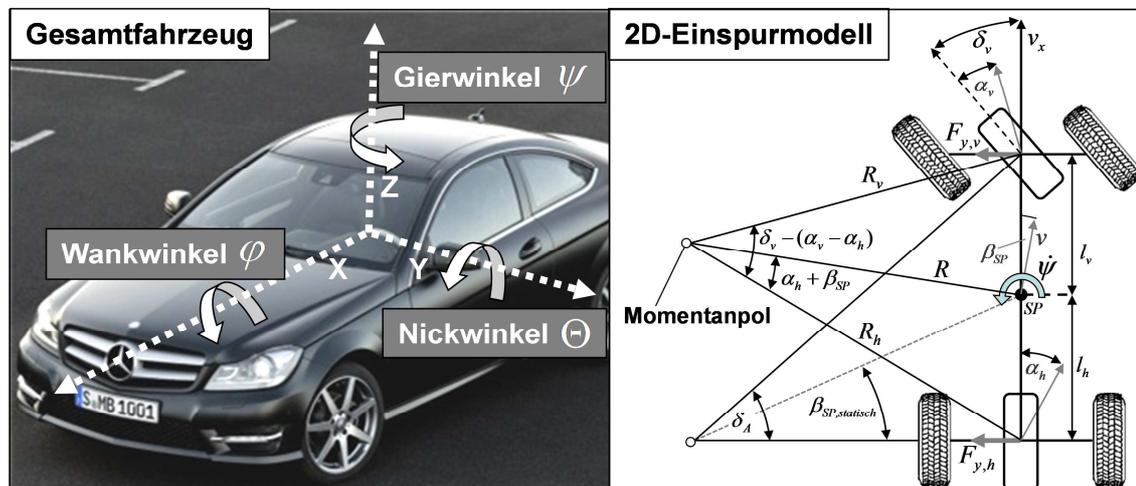


Bild 2.2 Bewegungsgrößen des Fahrzeugs nach DIN 70000 und vereinfachtes Einspurmodell nach Zomotor<sup>52</sup>

Die Möglichkeit zur messtechnischen Erfassung der Bewegungen des Fahrzeugs ist die Basis für eine objektive Bewertung des Fahrzeugverhaltens. Hieraus werden manöverspezifische objektive Bewegungskenngrößen gebildet, die das Fahrzeugverhalten in Form von objektiven Kennwerten charakterisieren. Bild 2.2 zeigt die erstmals 1983 standardisierten Bewegungsgrößen eines Fahrzeugs nach DIN 70000<sup>53</sup> und die reduzierte Darstellung der Fahrzeugbewegungen auf der Fahrbahnebene im sogenannten Einspurmodell nach Zomotor. Die Reduktion der sechs Bewegungsfreiheitsgrade des Gesamtfahrzeugs auf drei Freiheitsgrade – Translation in X- und Y-Richtung sowie die Drehbewegung um die Hochachse – ist eine gebräuchliche Vereinfachung der wesentlichen Bewegungszusammenhänge des Fahrzeugs, da die Beurteilung des Fahrverhaltens hinsichtlich Stabilität und Fahrsicherheit nach Rönitz<sup>54</sup> und Wallentowitz et al.<sup>55</sup> in fast allen stationären und instationären Manövern über den Schwimmwinkel  $\beta_{SP}$  und die Gierrate  $\dot{\psi}$  erfolgen kann. Im Einspurmodell werden beide Räder einer Achse zusätzlich zu einem einzigen Rad pro Achse zusammengefasst, woraus eine vereinfachte Betrachtung der am Fahrzeug angreifenden Reifenkräfte in Folge der Summenschräglaufsteifigkeiten beider Achsen,  $c_{\alpha_v}$  und  $c_{\alpha_h}$ , resultiert.

<sup>52</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 99

<sup>53</sup> DIN 70000 (1991): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, S. 11

<sup>54</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

<sup>55</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

### 2.1.2 Stationäres und dynamisches Lenkverhalten

Die vereinfachte Betrachtung der Bewegungszusammenhänge des Fahrzeugs im Einspurmodell kann nach Zomotor verwendet werden, um das stationäre und dynamische Lenkverhalten des Fahrzeugs mathematisch zu beschreiben.<sup>56</sup> Aus der angenommenen Summen-Schräglaufsteifigkeit der Räder beider Achsen  $c_{\alpha,v}, c_{\alpha,h}$  und der Schräglaufwinkel  $\alpha_v, \alpha_h$  resultieren die Seitenkräfte

$$F_{y,v} = c_{\alpha,v} \cdot \alpha_v \text{ mit } \alpha_v = \delta_v - \beta_{SP} - \frac{\dot{\psi} \cdot l_v}{v} \quad (2.1)$$

und

$$F_{y,h} = c_{\alpha,h} \cdot \alpha_h \text{ mit } \alpha_h = -\beta_{SP} + \frac{\dot{\psi} \cdot l_h}{v}. \quad (2.2)$$

Da in dieser Betrachtung von konstanten Schräglaufsteifigkeiten ausgegangen wird, liegt eine linearisierte Modellbetrachtung des Fahrzeugs vor. Zur weiteren Vereinfachung der Bewegungsgleichungen erfolgt bei Zomotor in den Gleichungen (2.1) und (2.2) eine Annahme kleiner Winkel, so dass gilt:  $\sin(x) = x$ ,  $\tan(x) = x$  und  $\cos(x) = 1$ . Mit der Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$ , der Gierträgheit des Fahrzeugs  $\Theta_Z$  und den Radständen  $l_v, l_h$  ergibt sich das Kräftegleichgewicht in Querrichtung  $Y$  zu

$$m_{Fzg} \cdot (\dot{\psi} + \dot{\beta}) = F_{y,v} + F_{y,h} \quad (2.3)$$

sowie das Momentengleichgewicht um die Hochachse im Schwerpunkt zu

$$\Theta_Z \cdot \ddot{\psi} = F_{y,v} \cdot l_v - F_{y,h} \cdot l_h. \quad (2.4)$$

Zusammengefasst ergeben sich aus (2.1) bis (2.4) die beiden Bewegungsgleichungen des linearen Einspurmodells

$$m_{Fzg} \cdot v \cdot \dot{\beta} + \frac{1}{v} \cdot (m_{Fzg} \cdot v^2 + c_{\alpha,v} \cdot l_v - c_{\alpha,h} \cdot l_h) \cdot \dot{\psi} + (c_{\alpha,v} + c_{\alpha,h}) \cdot \beta - c_{\alpha,v} \cdot \delta_v = 0 \quad (2.5)$$

und

$$\Theta_Z \cdot \ddot{\psi} + \frac{1}{v} \cdot (c_{\alpha,v} \cdot l_v^2 + c_{\alpha,h} \cdot l_h^2) \cdot \dot{\psi} - (c_{\alpha,h} \cdot l_h - c_{\alpha,v} \cdot l_v) \cdot \beta - c_{\alpha,v} \cdot l_v \cdot \delta_v = 0. \quad (2.6)$$

Der Lenkwinkel  $\delta_v$  eines konventionell an der Vorderachse gelenkten Fahrzeugs resultiert aus dem Lenkradwinkel  $\delta_H$  und der effektiven Lenkübersetzung  $i_S$ .

<sup>56</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 102ff

$$\delta_v = \frac{\delta_H}{i_s} \quad (2.7)$$

Das Fahrverhalten auf der Betrachtungsebene des Einspurmodells ist bei den gegebenen Fahrzeugparametern Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$ , Gierträgheit  $\Theta_z$  und Radständen  $l_i$  also lediglich von den Modellparametern der beiden Summen-Schräglaufsteifigkeiten der Achsen  $c_{\alpha,i}$  und der effektiven Lenkübersetzung  $i_s$  abhängig. Alle Fahrzeug- und Umgebungseigenschaften, die das Fahrverhalten des Fahrzeugs in der vollständigen Systembetrachtung bestimmen, z.B. Reifeneigenschaften, Achskinematik, Achssteifigkeiten, Feder- und Dämpfungsraten, Aerodynamik, Lenkungssteifigkeit, Karosseriesteifigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit und weitere Größen, aufgeführt u.a. bei Braess<sup>57</sup>, Mitschke<sup>58</sup> und Zomotor<sup>59</sup>, sind in diesen drei charakteristischen Modellparametern zusammengefasst. Mit der effektiven Lenkübersetzung über dem Lenkradwinkel und der Achs-Schräglaufsteifigkeiten beider Achsen über dem Schräglaufwinkel kann das Fahrverhalten eines Fahrzeugs auch mit einem Einspurmodell bis in den Bereich der Kraftschlussgrenze beschrieben werden, siehe Diebold et al.<sup>60</sup>.

Das Lenkverhalten als wesentlicher Bestandteil des Fahrverhaltens ist durch die Fahrzeugreaktion auf alle Lenkeingaben des Fahrers beschrieben. In Bezug auf das Lenkverhalten werden in DIN 70000<sup>61</sup> die Begriffe des Eigenlenkverhaltens definiert und von Zomotor<sup>62</sup> diskutiert. Das Eigenlenkverhalten umfasst demnach „...die vom Fahrer unabhängigen Lenkeigenschaften des Fahrzeugs.“ Zur Fahrt auf einem definierten Kurvenradius  $R$  wird bei niedriger Querbewegung und somit querschleppfreiem Abrollen der Räder zunächst der Vorderrad-Lenkwinkel

$$\delta_A = \arctan\left(\frac{l}{\sqrt{R^2 - l_h^2}}\right) \approx \frac{l}{R} \quad (2.8)$$

benötigt, auch „Ackermannwinkel“ genannt. Das Verhältnis von Radstand zu Kurvenradius wird in DIN 70000 als „dynamischer Bezugslenkwinkel“

$$\delta_D = \frac{l}{R} \quad (2.9)$$

<sup>57</sup> Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

<sup>58</sup> Mitschke (1990): Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C

<sup>59</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>60</sup> Diebold et al. (2006): Einspurmodell für die Fahrdynamiksimulation und -analyse, S. 962ff

<sup>61</sup> DIN 70000 (1991): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, S. 7

<sup>62</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 105ff

bezeichnet.<sup>63</sup> Auch bei querschlupffreiem Abrollen tritt konstruktionsbedingt nach Bild 2.2 (rechts) ein statischer Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt

$$\beta_{SP,statish} = \arctan \left( \frac{l_h}{\sqrt{R^2 - l_h^2}} \right) \approx \frac{l_h}{R} \quad (2.10)$$

auf. Mit steigender Querbeschleunigung rollen die Räder nicht mehr querschlupffrei ab und das Verhältnis der Achs-Schräglaufsteifigkeiten von Vorder- und Hinterachse bestimmt zusammen mit der Fahrzeuggeometrie die Änderung des benötigten Lenkradwinkels. Nach DIN 70000 wird das Eigenlenkverhalten mathematisch durch den Eigenlenkgradienten  $EG$  als Differenz der auf die Lenkübersetzung  $i_s$  bezogenen Änderung des benötigten Lenkradwinkels  $\delta_H$  über einer Änderung der Querbeschleunigung  $a_y$  und der Änderung des dynamischen Bezugslenkwinkels  $\delta_D \approx \delta_A$  über der Querbeschleunigung beschrieben.

$$EG = \frac{1}{i_s} \cdot \frac{d\delta_H}{da_y} - \frac{d\delta_D}{da_y} \quad (2.11)$$

Im stationären Fahrzustand kann aus (2.11) unter der Annahme eines konstanten Eigenlenkgradienten im linearen Einspurmodell daher der für eine Querbeschleunigung  $a_{y,i,stat}$  benötigte Lenkradwinkel

$$\delta_{H,i,stat} = i_s \cdot (\delta_D + EG \cdot a_{y,i,stat}) \quad (2.12)$$

abgeleitet werden. Über den benötigten Lenkradwinkel  $\delta_H$  bzw. Lenkwinkel  $\delta_v$  in stationärer Kreisfahrt des linearen Einspurmodells aus (2.12) und (2.7) kann der Eigenlenkgradient  $EG$  anhand der Bewegungsgleichungen des Einspurmodells aus (2.5) und (2.6) beispielsweise über die Fahrzeugparameter des Einspurmodells  $m_{Fzg}, l, l_v, l_h, c_{\alpha,v}, c_{\alpha,h}$  oder auch in Abhängigkeit der Schräglaufwinkeldifferenz zwischen Vorder- und Hinterachse ( $\alpha_v - \alpha_h$ ) ausgedrückt werden:<sup>64</sup>

$$EG = \frac{m_{Fzg} \cdot (c_{\alpha,h} \cdot l_h - c_{\alpha,v} \cdot l_v)}{l \cdot c_{\alpha,v} \cdot c_{\alpha,h}} \quad (2.13)$$

$$EG = (\alpha_v - \alpha_h) \cdot \frac{R}{v^2} \quad (2.14)$$

<sup>63</sup> DIN 70000 (1991): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, S. 7

<sup>64</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 105ff

Zur Bestimmung des Eigenlenkgradienten  $EG$  existieren nach Zomotor zwei verschiedene Möglichkeiten der Durchführung:

- Steigerung der Fahrgeschwindigkeit auf einem festen Kurvenradius (Ackermannwinkel konstant)
- Quasistationäres Lenkungsziehen mit konstanter Geschwindigkeit (Ackermannwinkel nicht konstant)

Der Ackermannwinkel  $\delta_A$  bzw. der dynamische Bezugslenkwinkel  $\delta_D$  eines Fahrzeugs sind bei festem Radstand  $l$  nach (2.8) bzw. (2.9) nur vom Kurvenradius  $R$  abhängig und erhöhen sich in stationärer Kreisfahrt ( $R = v^2 / a_{y,stat}$ ) somit bei Variante 2 (konstante Fahrgeschwindigkeit und gesteigerte Querbesehleunigung) linear mit der Querbesehleunigung.<sup>65</sup>

$$\delta_A \approx \delta_D = \frac{l}{v^2} \cdot a_{y,stat} \quad (2.15)$$

Die heute verwendeten Begrifflichkeiten des Eigenlenkverhaltens, *Untersteuern*, *Übersteuern* und *neutrales Verhalten*, gehen nach Zomotor bereits auf die 30er-Jahre zurück und wurden seinerzeit von Olley auf die Differenz der Schräglaufwinkel von Vorder- und Hinterachse ( $\alpha_v - \alpha_h$ ) bezogen. Wie (2.14) zeigt, kann der Eigenlenkzustand unter der Voraussetzung eines linearen Einspurmodells (konstante Schräglaufsteifigkeiten und konstante Lenkübersetzung) im stationären Fahrzustand gleichermaßen über den Eigenlenkgradienten und die resultierende Schräglaufdifferenz klassifiziert werden:

- Untersteuern:  $EG > 0$  bzw.  $\alpha_v - \alpha_h > 0$
- Übersteuern:  $EG < 0$  bzw.  $\alpha_v - \alpha_h < 0$
- neutrales Verhalten:  $EG = 0$  bzw.  $\alpha_v - \alpha_h = 0$

Der Eigenlenkgradient nach DIN 70000 basiert jedoch nach (2.11) auf der Änderung des benötigten und durch den Fahrer spürbaren Lenkradwinkels  $\delta_H$  in Abhängigkeit der Querbesehleunigungsänderung. Die Klassifizierungen des Eigenlenkverhaltens nach Olley und DIN 70000 sind also nur im stationären Fahrzustand und unter der Annahme eines linearen Einspurmodells mit konstanter Lenkübersetzung vergleichbar. Bild 2.3 (links) zeigt die Ermittlung des stationären Eigenlenkgradienten mit konstanter Fahrgeschwindigkeit, d.h. radiusabhängigem Ackermannwinkel, am Beispiel eines nicht linearen Fahrzeugverhaltens mit konstanter Lenkübersetzung  $i_S$ : Während Fahrzeug A bis in

<sup>65</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 107

den hohen Querbeschleunigungsbereich hinein ein zunehmend untersteuerndes Fahrzeugverhalten zeigt ( $EG > 0$ ), verhält sich Fahrzeug B trotz zunächst untersteuerndem Fahrverhalten ab einer bestimmten Querbeschleunigung übersteuernd ( $EG < 0$ ). Von einem übersteuerndem Fahrverhalten wird bei konstanter Lenkübersetzung also auch dann gesprochen, wenn im niedrigen Querbeschleunigungsbereich zwar  $EG > 0$  gilt, der benötigte Lenkwinkel  $\delta_v = \delta_H / i_s$  ab einer gewissen Querbeschleunigung aber weniger stark ansteigt als der zugehörige Ackermannwinkel bzw. Bezugslenkwinkel.

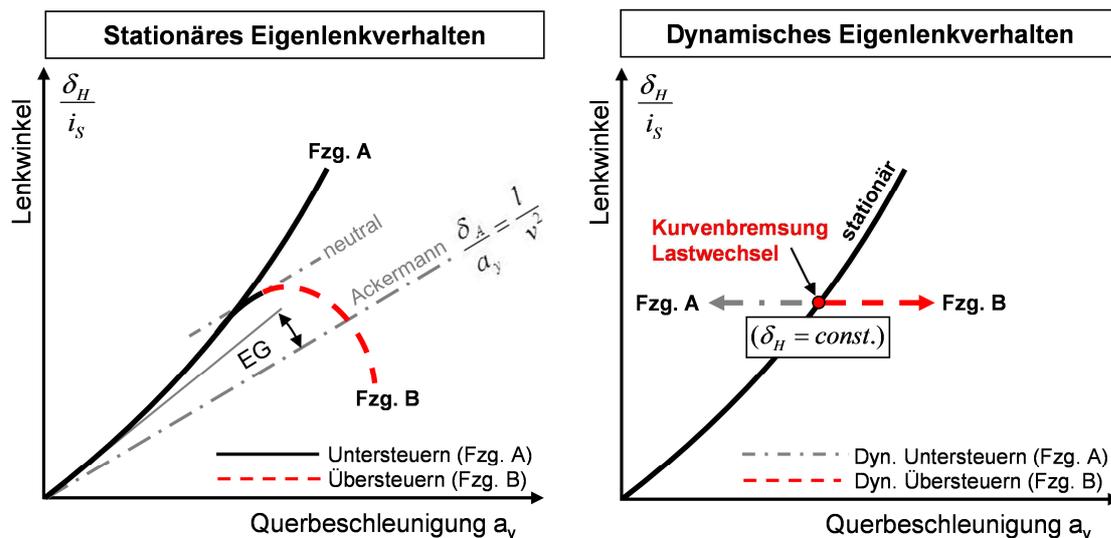


Bild 2.3 Bestimmung des Eigenlenkgradienten mit konstanter Fahrgeschwindigkeit (links) nach Zomotor<sup>66</sup> und Darstellung eines instationären Übersteuerns in Folge Kurvenbremsung (rechts)

Mit einer nicht konstanten Lenkübersetzung  $i_s$  kann ein Fahrzeug nach DIN 70000 auch bei einer im Vergleich zum Anstieg des Ackermannwinkels größeren Zunahme des benötigten Lenkwinkels  $\delta_v$  über der Querbeschleunigung ein übersteuerndes Eigenlenkverhalten aufweisen. Dies ist dann der Fall, wenn sich die Lenkübersetzung  $i_s$  mit steigender Querbeschleunigung gleichzeitig so stark reduziert, dass trotz eines Anstiegs von  $\delta_v$  eine Verminderung des benötigten Lenkradwinkels  $\delta_H$  auftritt. Da Normalfahrer ihre Erfahrungen im linearen Bereich des Fahrverhaltens sammeln und den Annahmen von z.B. McAdam<sup>67</sup> oder Müller-Beßler et al.<sup>68</sup> zufolge in kritischen Fahrsituationen nur ungenügend in der Lage sind, ihre Lenkreaktionen einem veränderten Fahrverhalten anzupassen, werden Fahrzeuge heute über den gesamten Querbeschleunigungsbereich generell stationär untersteuernd ausgelegt. Dies bedeutet, dass der Fahrer für das Erreichen höherer Querbeschleunigungen in jedem Fall stärker Einlenken oder das Fahrzeug Be-

<sup>66</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 108

<sup>67</sup> McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

<sup>68</sup> Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

schleunigen muss. Dennoch können Fahrzeuge in instationären Fahrmanövern, z.B. in Bremsmanövern oder Ausweichtests, dynamisch übersteuernd sein.<sup>69</sup> Dies ist in der eigenen Darstellung aus Bild 2.3 (rechts) am Beispiel eines Lastwechsels bzw. der Bremsung aus einer zunächst stationären Kurvenfahrt ersichtlich: Bei einem Lastwechsel wird die Hinterachse des Fahrzeugs entlastet und die Vorderachse um eine zusätzliche Radaufstandskraft  $\Delta F_{z,w}$  belastet. Unter Annahme von radlastabhängigen Schräglaufsteifigkeiten der Reifen, z.B. nach Heißing/Ersoy<sup>70</sup>, benötigt die Hinterachse in Folge der verminderten Radlast einen höheren Schräglaufwinkel, um die bisherige Seitenkraft abstützen zu können. Gleichzeitig gewinnt die Vorderachse durch die zusätzliche Radlast bei zunächst unverändertem Schräglaufwinkel an Seitenkraft. Bei konstantem Lenkradwinkel resultiert infolge des Lastwechsels also ein Giermoment, welches das Fahrzeug zusätzlich in die Kurve eindreht.

$$\Delta M_{z, \text{Lastwechsel}} = \Delta F_{y,h} \cdot l_h + \Delta F_{y,v} \cdot l_v \quad (2.16)$$

Zusätzlich werden die Aufstandsflächen der Reifen durch die angreifenden Seitenkräfte in Kurvenfahrt nach Kurveninnen verschoben.<sup>71</sup> Eine an beiden Rädern der Antriebsachse identische Antriebskraft wirkt daher in stationärer (angetriebener) Kurvenfahrt zusätzlich stabilisierend. Ein Wegfall der Antriebskräfte bewirkt bei einem Lastwechsel dementsprechend eine weitere destabilisierende Giermomentendifferenz. In der Folge dreht das Fahrzeug bei konstantem Lenkradwinkel in die Kurve ein und erreicht höhere Querschleunigungen. Da der Lenkradwinkel in diesem Testmanöver konstant gehalten wird, entspricht dieses Fahrverhalten nach Bild 2.3 (rechts) einem dynamisch übersteuerndem Fahrverhalten eines stationär untersteuernden Fahrzeugs (Fahrzeug B). Eine zusätzliche Bremsung des Fahrzeugs kann die Fahrzeugreaktion durch eine zusätzliche Radlastdifferenz verstärken, sofern durch radselektive Bremskraftverteilung kein stabilisierendes Giermoment erzeugt wird. Bei starker Bremsung in Kurvenfahrt wird der Reifen zusätzlich durch einen hohen Längsschlupf  $S_x$  beaufschlagt. Hierdurch wird bei konstantem Querschlupf  $S_y$  das Kraftschlusspotential der Reifen in Querrichtung vermindert.<sup>72</sup> Je nachdem, welche Fahrzeugachse stärker abgebremst wird, kommt es bei starker Bremsung zu einer Untersteuer- oder Übersteuerverstärkung. Fahrzeug A in Bild 2.3 (rechts) zeigt ein dynamisch untersteuerndes Eigenlenkverhalten, beispielsweise infolge einer „überbremsten“ Vorderachse.

<sup>69</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 121

<sup>70</sup> Heißing, Ersoy (2008): Fahrwerkhandbuch, 2. Auflage, S. 59ff

<sup>71</sup> Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, S. 208

<sup>72</sup> Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, S. 217ff

Die Betrachtung des dynamischen Eigenlenkverhaltens von Fahrzeugen ist für die Bewertung der Fahrsicherheit in besonderem Maße relevant, da nach Rönitz der Anteil des stationären Kurvenfahrens am gesamten Straßenverkehr nur gering ist.<sup>73</sup> In Bezug auf kritische Fahrsituationen im Straßenverkehr kommt daher dem dynamischen Eigenlenkverhalten in Brems- und Ausweichtests eine hohe Bedeutung zu, siehe z.B. Rompe/Heißing<sup>74</sup> und Weiß<sup>75</sup>. Auch in dynamischen Ausweichmanövern ist nach Zomotor ein Übersteuern möglich und das Fahrzeug kann „phasenweise instabil“ werden oder sogar ins Schleudern geraten.<sup>76</sup> Daher ist für die Betrachtung der Fahrstabilität insbesondere auch das instationäre Lenkverhalten infolge instationärer Lenkanregungen durch den Fahrer zu betrachten.

Die Zusammenhänge des instationären Lenkverhaltens unter Annahme eines linearen Modellverhaltens des Fahrzeugs werden ebenfalls von Zomotor erörtert:<sup>77</sup> Mit der Laplace-Darstellung  $d/dt = s$ , d.h.  $\dot{\psi}(t) = \psi \cdot s$ ;  $\dot{\beta}(t) = \beta \cdot s$  kann aus (2.5) und (2.6) die Übertragungsfunktion der Giergeschwindigkeit für eine Lenkwinkelgabe des Fahrers abgeleitet werden ( $c_{\alpha,i}$  wird mit  $c_i$  abgekürzt).

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v} = \frac{(m_{Fzg} \cdot v \cdot s + c_v + c_h) \cdot c_v \cdot l_v + (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) \cdot c_v}{\frac{1}{v} \cdot (m_{Fzg} \cdot v^2 + c_v \cdot l_v - c_h \cdot l_h) \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) + \left[ \Theta_Z \cdot s + \frac{1}{v} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) \right] \cdot (m_{Fzg} \cdot v \cdot s + c_v + c_h)} \quad (2.17)$$

Dieses System stellt nach Zomotor ein System zweiter Ordnung dar, dessen allgemeine Übertragungsfunktion in der Regelungstechnik

$$F(s) = K \cdot \frac{1 + T_Z \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \sigma \cdot s + \omega_0^2} \quad (2.18)$$

entspricht. Um eine Aussage über die theoretische Stabilität eines Fahrzeugs treffen zu können, erfolgt eine mathematische Betrachtung der Gierübertragungsfunktion bei periodischer Lenkanregung: Zur Bestimmung der charakteristischen Größen des Einspurmodells bei periodischer Lenkanregung – die Abklingkonstante  $\sigma_{\dot{\psi}}$ , die ungedämpfte Eigenfrequenz  $\omega_{\dot{\psi},0}$  und somit das Gierdämpfungsmaß  $D_{\dot{\psi}} = \sigma_{\dot{\psi}} / \omega_{\dot{\psi},0}$  – wird (2.17) entsprechend nach (2.18) umgestellt.

<sup>73</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

<sup>74</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 12

<sup>75</sup> Weiß (1988): Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechselforgängen

<sup>76</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 121

<sup>77</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 117ff

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v} = \frac{\overbrace{c_v \cdot c_h \cdot l}^K}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v} \cdot \frac{1 + \overbrace{\frac{m_{Fzg} \cdot v \cdot l_v}{c_h \cdot l}}^{T_Z} \cdot s}{s^2 + \underbrace{\frac{m_{Fzg} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) + \Theta_Z \cdot (c_v + c_h)}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v}}_{2\sigma_{\dot{\psi}}}} \cdot s + \underbrace{\frac{m_{Fzg} \cdot v^2 \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) + c_v \cdot c_h \cdot l^2}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v^2}}_{\omega_{\dot{\psi},0}^2}} \quad (2.19)$$

Aus dieser Umstellung sind die Zählerzeitkonstante  $T_Z$ , die Abklingkonstante  $\sigma_{\dot{\psi}}$  und die ungedämpfte Giereigenfrequenz  $\omega_{\dot{\psi},0}$  erkennbar

$$T_Z = \frac{m_{Fzg} \cdot v \cdot l_v}{c_h \cdot l} \quad (2.20)$$

$$\sigma_{\dot{\psi}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_{Fzg} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) + \Theta_Z \cdot (c_v + c_h)}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v} \quad (2.21)$$

$$\omega_{\dot{\psi},0}^2 = \frac{m_{Fzg} \cdot v^2 \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) + c_v \cdot c_h \cdot l^2}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v^2} \quad (2.22)$$

und nach Einsetzen des Gierdämpfungsmaßes  $D_{\dot{\psi}}$  in (2.19) ergibt sich die Gierübertragungsfunktion schließlich zu

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v} = \frac{c_v \cdot c_h \cdot l}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v \cdot \omega_{\dot{\psi},0}^2} \cdot \frac{1 + T_Z \cdot s}{1 + \frac{2 \cdot D_{\dot{\psi}}}{\omega_0} \cdot s + \frac{1}{\omega_0^2} \cdot s^2} \quad (2.23)$$

Das Übertragungsverhalten in stationärer Kreisfahrt ist durch den vom Laplace-Operator unabhängigen Term aus (2.23) gegeben:

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_v}\right)_{stat} = \left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_H / i_s}\right)_{stat} = \frac{c_v \cdot c_h \cdot l}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v \cdot \omega_{\dot{\psi},0}^2} \quad (2.24)$$

Bei instationärem Lenkverhalten entscheidet das Vorzeichen des Gierdämpfungsmaßes  $D_{\dot{\psi}}$  über die Stabilität des durch Lenkeingaben angeregten Fahrzeug-Systems.<sup>78</sup> Bei positivem Gierdämpfungsmaß  $D_{\dot{\psi}}$  ist das System stabil, da die Fahrzeugreaktion infolge einer Störung über der Zeit abklingt. Bei negativem Gierdämpfungsmaß ist das Fahrzeug hingegen instabil, da die Eigenbewegungen des Fahrzeugs nach einer Lenkungsanregung zunehmen.

Die ungedämpfte Giereigenfrequenz  $\omega_{\dot{\psi},0}$  und die gedämpfte Giereigenfrequenz

<sup>78</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 118

$$\omega_{\psi} = \omega_{\psi,0} \cdot \sqrt{1 - D_{\psi}^2} \quad (2.25)$$

nähern sich mit steigender Fahrgeschwindigkeit nach Bild 2.4 (links) einander an, während die Gierdämpfung  $D_{\psi}$  eines anhand des linearen Einspurmodells idealisierten Fahrzeugs mit steigender Fahrgeschwindigkeit abnimmt, siehe Bild 2.4 (rechts). Somit nimmt auch die Stabilität der Gierreaktion des Fahrzeugs bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ab.

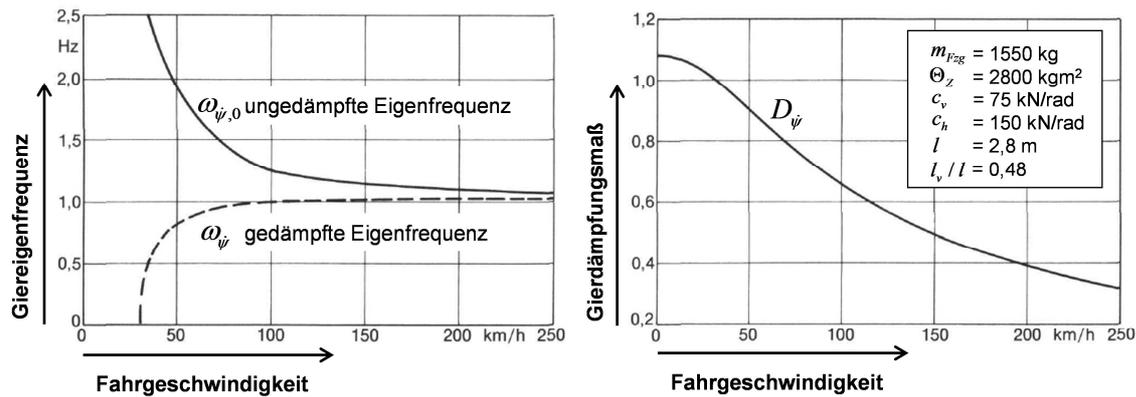


Bild 2.4 Abhängigkeit der Giereigenfrequenzen (links) und des Gierdämpfungsmaßes (rechts) eines linearen Einspurmodells von der Fahrgeschwindigkeit nach Zomotor<sup>79</sup>

Die Gierdämpfung  $D_{\psi}$  nimmt negative Werte an, wenn  $\omega_{\psi,0}^2$  nach (2.22) ein negatives Vorzeichen annimmt. Durch Einsetzen der Bestimmungsgleichung des Eigenlenkgradienten bei konstanter Lenkübersetzung aus (2.13) in (2.22) ist ersichtlich, dass eine positive Gierdämpfung vorliegt, wenn gilt

$$EG \cdot v^2 + l > 0. \quad (2.26)$$

Ein stationär untersteuernd ausgelegtes Fahrzeug verfügt also grundsätzlich über eine positive Gierdämpfung und ist somit nach der Theorie der Regelungstechnik stabil, während ein stationär übersteuerndes Fahrzeug nur bis hin zu einer kritischen Fahrgeschwindigkeit  $v_{krit}$  stabil ist.

$$v_{krit} = \sqrt{-\frac{l}{EG}} \quad (2.27)$$

Ein stationär untersteuernd ausgelegtes Fahrzeug kann, wie bereits erwähnt wurde, jedoch in dynamischen Ausweichtests oder infolge von Lastwechsellvorgängen ein temporär übersteuerndes oder sogar instabiles Fahrverhalten aufweisen. Die Ursache ist in beiden Fällen eine Reduzierung der effektiv wirksamen Schräglaufsteifigkeit an der

<sup>79</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 120

Hinterachse  $c_{\alpha,h,dyn,effektiv}$  und / oder eine gleichzeitige Erhöhung der effektiv wirksamen Schräglaufsteifigkeit an der Vorderachse  $c_{\alpha,v,dyn,effektiv}$ . Dies ist nach Umformung von (2.22) wiederum dann der Fall, wenn die effektiv wirksame Schräglaufsteifigkeit an der Hinterachse  $c_{\alpha,h,dyn,effektiv}$ , beispielsweise aufgrund von Lastwechselreaktion, Antriebs-schlupfüberlagerung, Aerodynamik (Entlastung der Hinterachse), Fahrbahnbeschaffenheit (Glätte), Einlaufverhalten des Reifens (Zeitverzug des Kraftaufbaus) oder Achskinematik, temporär kleiner ist als

$$c_{\alpha,h,dyn,effektiv} < \frac{l_v}{\frac{l_h}{c_{v,dyn,effektiv}} + \frac{l^2}{m_{Fzg} \cdot v^2}}. \quad (2.28)$$

Die idealisierten Betrachtungen des linearen Einspurmodells lassen also keinen direkten Rückschluss auf das Fahrverhalten heutiger Fahrzeuge in allen fahrsicherheitsrelevanten Fahrmanövern zu, sie können jedoch dazu verwendet werden, die auftretenden Effekte, beispielsweise infolge Lastwechsels oder hochdynamischer Lenkeingaben, anhand vereinfachter Modellzusammenhänge nachzuvollziehen bzw. zu veranschaulichen.

### 2.1.3 Messtechnik

Die Möglichkeit zur messtechnischen Erfassung der Bewegungskenngrößen eines Fahrzeugs ist, wie bereits oben diskutiert wurde, die Grundvoraussetzung für eine objektive Betrachtung und Beurteilung des Fahrverhaltens. Nach Zomotor<sup>80</sup> werden die ersten Messungen des Fahrverhaltens im heutigen Sinne Ende der 30er- / Anfang der 40er-Jahre von Stonex<sup>81</sup> durchgeführt. Hierbei wird der benötigte Lenkradwinkel in stationärer Kreisfahrt über der Querbeschleunigung aufgetragen. Bis heute haben sich die eingesetzten Messmittel einerseits in ihrer Messgenauigkeit, insbesondere aber in ihrer Portabilität weiterentwickelt. Zur messtechnischen Erfassung der Bewegungsgrößen und Lenkeingaben des Fahrers werden heute die Standard-Messinstrumente

- GPS-gestützte Kreiselplattform (Bild 2.5, links)
- Optischer Correvit-Leuchtpunktsensor (Bild 2.5, rechts)
- Messlenkrad (Bild 2.6)

verwendet. Portable Messmethoden werden seit den 60er-Jahren eingesetzt<sup>82</sup> und waren bis in die 80er-Jahre noch sehr aufwendig, siehe Rompe/Heißing<sup>83</sup>. Die heutigen, im

<sup>80</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 14

<sup>81</sup> Stonex (1941): Car Control Factors and their Measurement

<sup>82</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>83</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 15ff

Vergleich zu den ersten mobilen Messinstrumenten sehr kompakten und einfach zu handhabenden Komponenten, werden fest im bzw. am Fahrzeug montiert. Ein zentraler Messrechner empfängt und speichert alle Messkanäle zeitsynchron in einer Messdatei ab.

### GPS-gestützte Kreiselplattform:

Die Kreiselplattform nach Bild 2.5 (links) wird nahe des Fahrzeug-Schwerpunkts fest mit dem Fahrzeug verbunden und ist daher auch als „Strap-Down Plattform“ bekannt. Mit der Kreiselplattform können die Drehraten sowie Beschleunigungen des Fahrzeugs über jeweils drei integrierte Beschleunigungssensoren und Faserkreisel erfasst werden. Die Kreiselplattform wird heute zusätzlich durch GPS-Daten gestützt, um den Anteil der Erdrotation zu kompensieren. Die erfassten Beschleunigungssignale werden unter Verwendung der Drehraten und der aufintegrierten Drehwinkel auf die Fahrbahnebene horizontalisiert. Eine detaillierte Funktionsbeschreibung findet sich bei Zomotor<sup>84</sup>. Mit Differential-GPS-Systemen können zusätzlich Positionsgenauigkeiten des Fahrzeugs im Bereich weniger Zentimeter erzielt werden, siehe Kapitel 4.3.



Bild 2.5 GPS-gestützte Kreiselplattform der Firma iMAR (iTraceRT- F200-E, links) und optischer Leuchtpunkt-Sensor von CORRSYS-DATRON (Correvit S350-Aqua, rechts)

### Correvit-Sensor:

Correvit-Sensoren sind optische, berührungslose Leuchtpunktsensoren zur Messung der Fahrgeschwindigkeit in Längsrichtung oder – bei der üblicherweise verwendeten mehrachsigen Ausführung – in Längs- und Querrichtung des Fahrzeugs. Zur Messbarkeit der Geschwindigkeiten muss die Fahrbahnoberfläche über eine ausreichende optische Struktur verfügen, siehe Funktionsbeschreibung optischer Gitter von Haus/Lauinger<sup>85</sup>.

<sup>84</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 237ff

<sup>85</sup> Haus, Lauinger (2007): Optische Gitter: Die Abbildung der Realität, S. 39ff

### Messlenkrad:

Bei Fahrdynamik-Untersuchungen wird nach Armbruster anstelle des Standard-Lenkrads häufig ein „Messlenkrad“ verwendet (Bild 2.6), um eine höhere Auflösung des Lenkradwinkels und des Lenkradmoments im Vergleich zu den fahrzeugeigenen Sensoren zu erzielen.<sup>86</sup> Das Messlenkrad wird über eine zentrale Bohrung an der Lenksäule befestigt und besteht aus einem frei drehbaren Lenkrad (Rotor) und einem festen Statorgehäuse. Der Lenkradwinkel und das Lenkmoment werden über einen berührungslosen optischen Sensor und DMS-Streifen erfasst.



Bild 2.6 Messlenkrad zur Erfassung von Lenkradwinkel und Lenkradmoment, abgebildet bei Armbruster

### Messgenauigkeiten:

Die Messgenauigkeiten der heutigen Messinstrumente zur Erfassung der Bewegungsgrößen von Testfahrzeugen sind nach den jeweiligen Herstellerangaben in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Heutige Messgenauigkeiten der Bewegungsgrößen durch die vorgestellten Messinstrumente

| Bewegungsgröße      | Einheit          | Messtechnik                                    | Messgenauigkeit          |
|---------------------|------------------|--|--------------------------|
| Fahrgeschwindigkeit | km/h             | Optischer Sensor                               | ±0,2 %                   |
| Schwimmwinkel       | Grad (°)         | (z.B. Correvit S350)                           | ±0,2°                    |
| Längsbeschleunigung | m/s <sup>2</sup> | Strap-Down Plattform<br>(z.B. iTraceRT-F200-E) | ±0,0001 m/s <sup>2</sup> |
| Querbearchleunigung |                  |  |                          |
| Gierrate            | %s               |  | ±0,2%h                   |
| Gierwinkel          | Grad (°)         |  | ±0,01°                   |
| Wankwinkel          |                  |  |                          |
| Nickwinkel          |                  |  |                          |
| Lenkradwinkel       | Grad (°)         | Messlenkrad                                    | ±0,1 %                   |
| Lenkmoment          | Nm               | (z.B. von Corrsys Datron)                      | ±0,2 %                   |

<sup>86</sup> Armbruster (2006): Fahrdynamikuntersuchung von Fahrspurwechsel mit Längsverzögerung, S. 31

Die vom Hersteller CORRSYS-DATRON angegebenen Messungenauigkeiten eines aktuellen optischen Correvit-Sensors S350-Aqua (0,2 % Linearitätsfehler bezogen auf die Fahrgeschwindigkeit und 0,2° Messungenauigkeit bezogen auf den Schwimmwinkel) sind im Hinblick auf die Ermittlung von objektiven Bewegungskennwerten für das Fahrverhalten vernachlässigbar gering. Gleiches gilt für die geringen absoluten Abweichungen der ermittelten Bewegungsgrößen durch eine Kreiself Plattform nach Tabelle 2.1 und die prozentual geringen Linearitätsfehler von 0,1 % bzw. 0,2 % der Messung des Lenkradwinkels und des Lenkmoments durch ein heutiges Messlenkrad.

## 2.2 Testverfahren und objektive Kennwerte

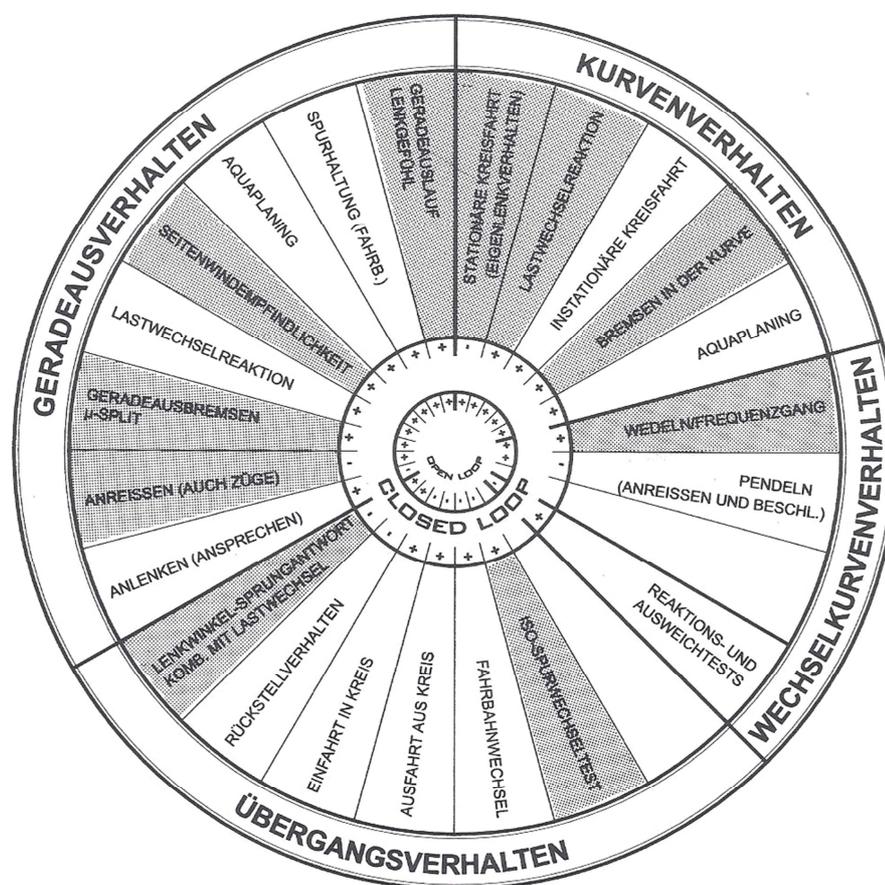


Bild 2.7 Einteilung der wesentlichen Testmanöver im „Fahrer-dynamik-zirkel“ von Zomotor et al.<sup>87</sup>, eingeführt 1978 durch Rönitz<sup>88</sup>

Die zur Beurteilung des Fahrverhaltens im alltäglichen Betrieb von Fahrzeugen relevanten Testverfahren werden in den 70er-Jahren identifiziert und kategorisiert. Bild 2.7 zeigt die Einteilung der relevanten Testverfahren in die Kategorien

<sup>87</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>88</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

- Geradeausverhalten
- Übergangsverhalten
- Wechselkurvenverhalten
- Kurvenverhalten

basierend auf Rönitz. In den darauffolgenden Jahren wird die Durchführung und Auswertung des Großteils dieser Testverfahren vereinheitlicht und schrittweise in internationale Normungen überführt, siehe Tabelle 2.2. Das Fahrverhalten in stationärer Kreisfahrt, bei instationärer Lenkanregung (Lenkwinkelsprung, schneller Fahrbahnwechsel, Frequenzgang) und infolge Kurvenbremsung wird zur Definition von Mindestanforderungen an die Fahrstabilität verwendet.<sup>89</sup> Eine detaillierte Beschreibung der Testverfahren und ihrer objektiven Bewertungskriterien ist in Anhang 8.3 zusammengetragen.

Tabelle 2.2 Aktueller Stand der genormten Testverfahren, in Ergänzung von Sagan<sup>90</sup>

| Kategorie              | Testverfahren            | Norm        | Jahr | Open Loop | Closed Loop |
|------------------------|--------------------------|-------------|------|-----------|-------------|
| Geradeausverhalten     | Bremsen auf $\mu$ -split | ISO 14512   | 1999 | x         | x           |
|                        | Gespannstabilität        | ISO 9815    | 1992 | x         | -           |
|                        | Seitenwind (Gebälse)     | ISO 12021-1 | 1996 | x         | -           |
| Übergangsverhalten     | Dreieckimpuls            | ISO 7401    | 1988 | x         | -           |
|                        | ISO Spurwechsel          | ISO 3888-1  | 1999 | -         | x           |
|                        | Lenkwinkelsprung         | ISO 7401    | 1988 | x         | -           |
| Wechselkurvenverhalten | Frequenzgang             | ISO 7401    | 1988 | x         | -           |
|                        | Lenkungspendeln          | ISO 17288-1 | 2002 | x         | -           |
|                        | VDA Test                 | ISO 3888-2  | 2002 | -         | x           |
|                        | Weavetest                | ISO 13674-1 | 2003 | x         | -           |
|                        | NHTSA Sine with dwell    | FMVSS 126   | 2007 | x         | -           |
| Kurvenverhalten        | Bremsen in der Kurve     | ISO 7975    | 1985 | x         | -           |
|                        | Gaswegnahme in der Kurve | ISO 9816    | 1993 | x         | -           |
|                        | Stationäre Kreisfahrt    | ISO 4138    | 1982 | x         | -           |

Bei der Durchführung der Testverfahren wird in

- *Open-Loop*- und
- und *Closed-Loop*-

Verfahren unterschieden, siehe z.B. Neukum<sup>91</sup>, Plöchl/Edelmann<sup>92</sup> oder Zomotor et al<sup>93</sup>. In sogenannten Closed-Loop-Testverfahren wird der vollständige Regekreis aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt betrachtet. Der Vorteil von Closed-Loop-Verfahren besteht darin, den Fahrer direkt miteinzubeziehen und somit reale Fahrsituationen nachstellen zu kön-

<sup>89</sup> von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 13

<sup>90</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 20

<sup>91</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

<sup>92</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 699ff

<sup>93</sup> Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

nen.<sup>94</sup> Als Nachteil werden nach Neukum die eingeschränkte Reproduzierbarkeit von Closed-Loop-Verfahren und die Abhängigkeit der Testergebnisse von individuellen Fertigkeiten, Fahrstrategien und Subjektivurteilen betrachtet.<sup>95</sup> In Open-Loop-Verfahren wird der Einfluss des Fahrers nicht berücksichtigt, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit bei der messtechnischen Erfassung des Fahrverhaltens zu erzielen. In Abhängigkeit des Testverfahrens wird das Lenkrad entweder fixiert (fixed control), freigelassen (free control) oder ein bestimmter Lenkradwinkelverlauf vorgegeben, wie z.B. in den durch die amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA definierten Testmanövern „Fishhook“ und „Sine with dwell“.<sup>96</sup> Durch die Ausblendung des Fahrereinflusses wird das Fahrverhalten im offenen Regelkreis jedoch auf den Teilaspekt des isolierten Fahrzeugverhaltens reduziert. In diesem Fall müssen also die in dieser Arbeit untersuchten objektiven (messbaren) Beurteilungskriterien für das Fahrzeugverhalten vorliegen.

Das Ziel der Standardisierung von Testverfahren seit den 70er-Jahren ist daher neben der Entwicklung einer einheitlichen Prüfmethodik durch die Fahrzeughersteller auch der Versuch, die Bewertung des Fahrverhaltens von der Subjektivbeurteilung einzelner Testfahrer zu lösen und zu objektivieren, siehe Förster<sup>97</sup> oder Jürgensohn<sup>98</sup>. Der Ansatz hierzu besteht in der bereits genannten Suche nach signifikanten Korrelationen zwischen Subjektivbeurteilungen und objektiven Bewegungskennwerten, siehe auch Neukum<sup>99</sup>, Bruder et al.<sup>100</sup> oder Tuzar<sup>101</sup>. Diese Zielsetzung erklärt, warum der Schwerpunkt der heutigen Prüfverfahren nach Plöchl/Edelmann<sup>102</sup> und Tabelle 2.2 auf Open-Loop-Untersuchungen unter Ausschluss des Fahrereinflusses liegt. Da der Fahrer und seine Handlungen jedoch ein wesentlicher Bestandteil des gesamten Regelkreises sind, fordern heute neben Neukum<sup>103</sup> auch Jürgensohn<sup>104</sup>, Sagan<sup>105</sup> und Zomotor et al.<sup>106</sup> eine verstärkte Betrachtung von Closed-Loop-Verfahren zur Bewertung des Fahrverhaltens. Nach Sagan ist eine umfassende Bewertung des objektiven Fahrverhaltens auf Basis der bestehenden Open-Loop-Verfahren nicht möglich und sollte um Verfahren ergänzt wer-

---

<sup>94</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 220

<sup>95</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop, S. 4

<sup>96</sup> Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

<sup>97</sup> Förster (1987): Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft

<sup>98</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 13

<sup>99</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop, S. 1ff

<sup>100</sup> Bruder et al (2009): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

<sup>101</sup> Tuzar (2007): Einfluss von Fahrversuchen auf das Human-Machine-Interaction-Design in Fahrzeugen

<sup>102</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 699ff

<sup>103</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

<sup>104</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 31f

<sup>105</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 17ff

<sup>106</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

den, die den Fahrer mit einbeziehen.<sup>107</sup> Ebenso umstritten ist die Objektivierung des Fahrverhaltens durch Korrelation mit positiven Subjektivurteilen: Jürgensohn sieht den Ansatz der Korrelationsuntersuchungen in Teilen als gescheitert an, da aus statistischen Betrachtungen keine Kausalität abgeleitet werden könne.<sup>108</sup> Seine Aussage stützt Jürgensohn auf widersprüchliche Ergebnisse von bekannten Korrelationsuntersuchungen zu Ausweichtests. Auch Meyer-Tuve/Heißing zweifeln die Ergebnisse von Korrelationsuntersuchungen mit dem Argument an, die gefundenen Zusammenhänge seien individuell und würden zudem mit der Weiterentwicklung der Fahrzeuge veralten.<sup>109</sup> Andere Autoren betonen hingegen die bisherigen Forschungserfolge: So sieht Sagan viele Bewegungskenngrößen erst dann als bewertbar an, wenn positive Korrelationszusammenhänge zu Subjektivurteilen nachgewiesen werden.<sup>110</sup> Auch Zomotor et al.<sup>111</sup> widersprechen Jürgensohn in einer umfangreichen Zusammenfassung von Prüfverfahren und beurteilen die bisherigen Erkenntnisse als vielversprechend. Zwar bestehe eine Lücke zwischen der Bewertung des Fahrverhaltens durch Open-Loop-Kennwerte und dem geschlossenen Regelkreis, diese sei aber durch die Kenntnis weiterer relevanter Kriterien zu schließen. Ähnlich wie Jürgensohn<sup>112</sup> sehen Zomotor et al. dabei die Betrachtung des geschlossenen Regelkreises und die Verwendung von geeigneten Fahrermodellen zur Nachbildung des menschlichen Regelverhaltens als notwendig an.<sup>113</sup> Der folgende Abschnitt geht daher auf bisher bekannte Untersuchungen zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen für das Fahrzeugverhalten auf Basis von subjektiven Beurteilungen durch Normalfahrer im geschlossenen Regelkreis ein.

### 2.2.1 Closed-Loop-Studien zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen

Bekannte Aussagen zu subjektiven Akzeptanzgrenzen für Abweichungen des Fahrzustandes von einem stationären Ausgangsfahrzustand resultieren aus Untersuchungen von Lenksystemstörungen. Neukum/Krüger<sup>114</sup> kritisieren im Vorfeld der durchgeführten Untersuchungen, dass eine Bewertung verschiedener Fahrzeuge untereinander in der Regel nur relativ zueinander und nicht absolut erfolge. Daher könne keine absolute Aussage über Akzeptanzgrenzen getroffen werden. Sie stellen daher eine klassifizierte Subjektiv-Skala vor, die einen direkten Rückschluss auf eine mögliche subjektive Gefährdungsgrenze zulässt, siehe Bild 2.8.

---

<sup>107</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 28f

<sup>108</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 14

<sup>109</sup> Meyer-Tuve, Heißing (2007): Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik

<sup>110</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 24

<sup>111</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>112</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 31f

<sup>113</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>114</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 302ff

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar | 10 |
| Gefährlichkeit                     | 9  |
|                                    | 8  |
|                                    | 7  |
| Störung des Fahrens                | 6  |
|                                    | 5  |
|                                    | 4  |
| Spürbarkeit                        | 3  |
|                                    | 2  |
|                                    | 1  |
| nichts bemerkt                     | 0  |

Bild 2.8 Skala zur Störungsbewertung (SSB) nach Neukum/Krüger<sup>115</sup>

Diese Störbewertungsskala enthält eine Klassifizierung der subjektiven Beurteilung in fünf Kategorien, wobei die Kategorien „Spürbarkeit“, „Störung des Fahrens“ und „Gefährlichkeit“ von den befragten Testpersonen jeweils in drei Feinbewertungsschritte differenziert werden können. Insgesamt ergibt sich eine 11-stufige Skala mit klar ersichtlicher Trennung zwischen einer empfundenen Störung des Fahrens (4-6) und der Bewertung als „sicherheitskritische Situation“ (7-10). Die Störbewertungsskala erzielt nach Neukum/Krüger eine hohe Skalenakzeptanz und wird zur Bewertung von Störungen eines stationären Ausgangsfahrzustandes durch Überlagerungslenkung AFS (Active Front Steering)<sup>116</sup>, Aufschaltung von fehlerhaften Zusatzlenkmomenten durch eine EPS (Electric Power Steering)<sup>117,118,119</sup>, Aufschaltung von StörLenkwinkeln an der Hinterachse<sup>120</sup> und durch Vertikaldynamikstörung in Kurvenfahrt<sup>121</sup> verwendet.

Zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen der Fahrzeugreaktion bei Störung durch eine Überlagerungslenkung (AFS) werden in Geradeausfahrt mit 50/100/150 km/h und bei einer Fahrbahnbreite von 3 m verschieden starke Lenkwinkelfehler aufgeschaltet.<sup>122</sup> Die subjektive Beurteilung der Störungen durch Normalfahrer wird anschließend u.a. den objektiven Kenngrößen der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  und der maximalen Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  gegenübergestellt, siehe Definition

<sup>115</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

<sup>116</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

<sup>117</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

<sup>118</sup> Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions

<sup>119</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>120</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung

<sup>121</sup> Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug- Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen

<sup>122</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failure, S. 4ff

der Kenngrößen in Kapitel 2.2.2. Anhand des 85-%-Quantils der Störbewertungen werden geschwindigkeitsabhängige Akzeptanzgrenzen für  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  und  $\Delta a_{y,\max}$  abgeleitet:<sup>123</sup>

- 50 km/h:  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 4,0^\circ/\text{s}$ ,  $\Delta a_{y,\max} = 1,25 \text{ m/s}^2$
- 100 km/h:  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 3,0^\circ/\text{s}$ ,  $\Delta a_{y,\max} = 1,25 \text{ m/s}^2$
- 150 km/h:  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 2,5^\circ/\text{s}$ ,  $\Delta a_{y,\max} = 1,25 \text{ m/s}^2$

Dies bedeutet, mindestens 15 % der Testpersonen beurteilen die angegebenen Gierstörungenbeträge und Querschleunigungen als gefährlich. Wesp untersucht 2011 die Subjektivbeurteilungen von Hinterradlenkeingriffen nach identischem Muster und nennt auf Basis des 85 %-Quantils folgende Akzeptanzgrenzen:<sup>124</sup>

- 100 km/h:  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 12,0^\circ/\text{s}$ ,  $\Delta a_{y,\max} = 2,8 \text{ m/s}^2$
- 150 km/h:  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7,8^\circ/\text{s}$ ,  $\Delta a_{y,\max} = 3,0 \text{ m/s}^2$

Diese von Wesp genannten Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen und Querschleunigungen durch Hinterradlenkeingriffe liegen deutlich oberhalb der Empfehlungen von Neukum et al. für Lenksystemstörungen an der Vorderachse. Die maximale Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  korreliert bei Störungen des Lenksystems nach Neukum et al.<sup>125</sup> zwar am besten mit der Subjektivbeurteilung von Normalfahrern, die Fahrerurteile sind bei variiertem Fahrgeschwindigkeit jedoch über der auftretenden Querschleunigungsabweichung annähernd konstant.<sup>126</sup>

Bild 2.9 vergleicht die subjektive Störbewertung von Gierstörungen durch AFS und EPS in Geradeausfahrt bei 100 km/h (links) und durch Störung der Vertikaldynamik in Kurvenfahrt bei 50-70 km/h mit variiertem Ausgangsquerschleunigung (rechts). Nach Bild 2.9 (links) ist die Störbeurteilung von Gierstörungen durch AFS und EPS bei gleicher Fahrgeschwindigkeit nicht signifikant verschieden. Die Störbeurteilung von Lenksystemstörungen an der Vorderachse fällt bei vergleichbaren Gierstörungen nach Bild 2.9 (rechts) jedoch deutlich kritischer aus als die Beurteilung von Vertikaldynamikstörungen (ca. um den Faktor 2 bei identischen Gierstörungen). Die durch aktive Vertikaldynamikverstellung an der Hinterachse verursachten Gierstörungen werden erst oberhalb von  $8^\circ/\text{s}$  teilweise als gefährlich eingestuft.<sup>127</sup>

---

<sup>123</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

<sup>124</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

<sup>125</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

<sup>126</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

<sup>127</sup> Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 92

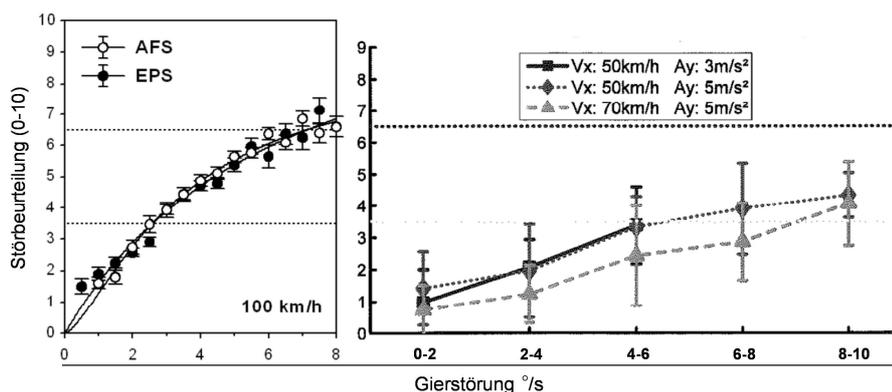


Bild 2.9 Bewertungen von Gierstörungen durch Lenksystemstörungen (links)<sup>128</sup> und durch Vertikaldynamikstörung in Kurvenfahrt (rechts)<sup>129</sup> auf Basis der Störbewertungsskala

Ein möglicher Erklärungsansatz für die deutliche Abweichung der Störbeurteilung zwischen Lenksystemstörungen an der Vorderachse und Störungen durch Hinterradlenkeingriffe oder Vertikaldynamikstörungen ist die reflexgeschuldete Reaktion von Fahrern auf spürbare Störungen in der Lenkung.<sup>130</sup> Nach Krüger resultiert bei Lenksystemstörungen an der Vorderachse nach etwa 70 ms eine typische, der ursprünglichen Störung entgegen gerichtete Lenkmomentenspitze, die aus einem Eigenreflex der Haltemuskulatur resultiert.<sup>131</sup> Dieser initiale Reflex führt nach Wallentowitz et al. wiederum zu einer überhöhten Lenkkorrektur durch den Fahrer und somit zu einem erhöhten Spurbreitenbedarf in der Kompensationsphase.<sup>132</sup> Die Reaktionszeit auf nicht in der Lenkung spürbare Kursstörungen wird von Krüger hingegen lediglich zwischen 0,8-1 Sekunden angenommen.

Neben den verwendeten Bewegungskennwerten wie der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  oder der maximalen Querbeschleunigungsdifferenz  $\Delta a_{y,\max}$  wurde in den Closed-Loop-Studien von Wallentowitz et al. und Freitag et al.<sup>133</sup> auch das konkrete Kurshaltevermögen der Testpersonen betrachtet. Wallentowitz et al. ermitteln den sogenannten *Spurbreitenbedarf SBB* in Abhängigkeit der aufgeschalteten Lenkmomentenstörungen und unterscheiden dabei den primären Spurbreitenbedarf und den sekundären Spurbreitenbedarf. Der *Primärspurbedarf* ist die maximale Querabweichung des Fahrzeugs in Richtung der eigentlichen Fehleraufschaltung. Der *Sekundärspurbedarf* resultiert aus der anschließenden Kompensationsreaktion des Fahrers in die Gegen-

<sup>128</sup> Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions, S. 374

<sup>129</sup> Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 80

<sup>130</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>131</sup> Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

<sup>132</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>133</sup> Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

richtung. In den Untersuchungen zu Lenksystemstörungen an der Vorderachse wurde im Vergleich zu dem Primärspurbedarf ein durchgängig höherer Sekundärspurbedarf beobachtet.<sup>134</sup> In Kurvenfahrt besteht nach der genannten Studie von Wallentowitz et al. zudem auch ohne Störaufschaltung ein generell erhöhter Spurbedarf, so dass die aufgeschalteten Lenksystemstörungen keine weitere Erhöhung des Spurbreitenbedarfs zur Folge haben. Über einen Auswertzeitraum von vier Sekunden nach Störaufschaltung werden folgende mittlere Spurbreitenbedarfe genannt:

- Ungestörte Geradeausfahrt: 0,16 m
- Geradeausfahrt mit maximaler untersuchter Lenksystemstörung: 0,33 m
- Natürlicher Seitenwind: 0,28 m

Der Spurbreitenbedarf infolge natürlichen Seitenwinds wird hierbei offenbar als Referenzkriterium für eine beherrschbare Lenksystemstörung verwendet. Eine konkrete Akzeptanzgrenze für den maximal tolerierbaren Spurbreitenbedarf wird nicht genannt.

Freitag et al. untersuchen die Auswirkung von Lenksystemstörungen an der Vorderachse (Übersetzungs- und Lenkwinkelsprünge) auf das Kursführungsvermögen von Normalfahrern in den Testmanövern Geradeausfahrt, Handlingparcours, Slalom und ISO-Spurwechsel. Dabei wird konkret auf die Kursführungsaufgabe des Fahrers verwiesen und als Kriterium ein Verlassen der ursprünglichen Fahrspur von 0,2 m und 0,4 m verwendet. Auf Basis der Ergebnisse wird eine Beschränkung des untersuchten, maximal tolerierbaren Lenkwinkelsprungs durch autonomes Falschlenken eines Lenksystems an der Vorderachse von  $0,35^\circ$  bei 100 km/h und von  $0,2^\circ$  bei 150 km/h gefordert. Die zugehörige sprungartige Änderung der Lenkübersetzung sollte der Studie nach einen Wert von  $\Delta i_s = 3$  nicht überschreiten.<sup>135</sup>

In der Beurteilung von geeigneten Kriterien zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen sehen Neukum/Krüger die Subjektivbeurteilung als das wesentliche Kriterium an: Die Erfüllung der Fahraufgabe, sprich die Fähigkeit zur Kurshaltung, wird zwar als notwendiges, aber nicht als hinreichendes Kriterium betrachtet.<sup>136</sup> Tuzar fordert 2007 hingegen eine verstärkte Tendenz zur objektiven Leistungsindikation im Zusammenspiel zwischen Mensch und Fahrzeug.<sup>137</sup>

---

<sup>134</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>135</sup> Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

<sup>136</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 299

<sup>137</sup> Tuzar (2007): Einfluss von Fahrversuchen auf das Human-Machine-Interaction-Design in Fahrzeugen

## 2.2.2 Bewegungskennwerte zur Bewertung der Fahrsicherheit

Die Zusammenfassung der Testverfahren und Forschungsergebnisse aus Anhang 8.3 weist eine Vielzahl an bekannten und offenbar geeigneten Kennwerten zur Beurteilung des subjektiven Fahrverhaltens nach. Nicht alle dieser Kennwerte stehen jedoch in einem direkten Zusammenhang mit der Beurteilung der Stabilität bzw. der Fahrsicherheit, sondern bilden teilweise lediglich subjektive Gefallensurteile der Fahreigenschaften ab, wie z.B. der KD-Wert im ISO-Spurwechsel.<sup>138</sup> Tabelle 2.3 (oben) zeigt eine Übersicht derjenigen Testverfahren und Kennwerte, die der Literatur zufolge eine gute Eignung dafür besitzen, die subjektive Fahrsicherheit in den bekannten Testmanövern zu objektivieren. Dabei bestätigen sich die Aussagen von Rönitz bzw. auch Wallentowitz et al., wonach das Gierverhalten und die auftretenden Schwimmwinkel in fast allen stationären und instationären Manövern dazu geeignet erscheinen, die Fahrsicherheit bzw. die Stabilität des Fahrzeugverhaltens zu bewerten.<sup>139,140</sup> In Tabelle 2.3 (unten) sind die gängigsten und in dieser Arbeit verwendeten Kennwerte zur Beschreibung der Fahrsicherheit in Brems- und Ausweichtests definiert.

Die Übersicht aus Tabelle 2.3 zeigt, dass in den hervorgehobenen Bremsmanövern stets die Giergeschwindigkeits- oder Querschleunigungsabweichung (Maximalwerte oder Ein-Sekunden-Werte)  $\dot{\psi}_{1s/\max}; \Delta a_{y,1s/\max}$  als besonders geeignet zur Beschreibung der Fahrsicherheit betrachtet werden.<sup>141,142,143,144,145,146,147,148,149,150,151,152,153,154,155</sup> Zur Beurteilung der Stabilität in Kurvenbremsung oder in stationärer Kreisfahrt wird zusätzlich der Schwimmwinkel  $\beta_{SP,1s/\max}$  betrachtet.<sup>156,157,158</sup>

<sup>138</sup> Dibbern (1992): Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel

<sup>139</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

<sup>140</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>141</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

<sup>142</sup> Ehlich et al. (1983): Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern

<sup>143</sup> Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

<sup>144</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>145</sup> ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

<sup>146</sup> Kuralay (1986): Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten

<sup>147</sup> Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

<sup>148</sup> Rompe (1978): Testverfahren für das Bremsen in der Kurve

<sup>149</sup> Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

<sup>150</sup> Rompe, Grunow (1980): Fahrverhalten von PKW beim Bremsen in der Kurve auf nassen Fahrbahnen

<sup>151</sup> Rompe, Heißing (1984): Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften

<sup>152</sup> Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

<sup>153</sup> Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

<sup>154</sup> Zomotor, Kuhn (1982): Verbesserung der Aktiven Sicherheit von Personenwagen-Caravan-Zügen

<sup>155</sup> Zomotor et al. (1982): Stabilität und aerodynamisches Störverhalten von PKW-Wohnanhängerzügen

<sup>156</sup> Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße

<sup>157</sup> Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>158</sup> Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

Tabelle 2.3 Übersicht und Definition der Kennwerte zur Beurteilung der Fahrsicherheit in den relevanten Testverfahren, u.a. basierend auf der umfangreichen Recherche von Dietrich<sup>159</sup>

| Kategorie              | Testverfahren  | Relevante Fahrsicherheits-Kennwerte  |
|------------------------|--|--|
| Geradeausverhalten     | Bremsen auf $\mu$ -split   | $\Delta\dot{\psi}_{1s}; \bar{a}_{y,1s}; \Delta y$  |
|                        | Geradeausbremsung  | $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}; a_{y,1s/\max}$ + benötigte Lenkaktivität  |
|                        | Seitenwind (Gebläse)   | $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ + kombinierte Kennwerte aus $\psi; \dot{\psi}; a_y$  |
| Übergangsverhalten     | Dreieckimpuls  | $a_{y,\max}; \int \beta_{SP}; \beta_{SP,\max}$   |
|                        | ISO Spurwechsel  | $\beta_{SP}; \bar{v}_{Fzg}; T_{\dot{\psi}/a_y}; \phi_{\dot{\psi}/a_y}$ + Kippsicherheit (Two Wheel Lift)   |
|                        | Lenkwinkelsprung   | $U_{\dot{\psi}:a_y}; T_{\dot{\psi}:a_y}$   |
| Wechselkurvenverhalten | Frequenzgang   | $D_{\dot{\psi}}; T_Z; \omega$  |
|                        | Giervverstärkung (f= 0,2 Hz)   | $\dot{\psi}_{stat} / \delta_{H,stat}$ (Giervverstärkungsfaktor GV)   |
|                        | Lenkungspendeln  | $\left( \begin{matrix} (\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,1} \\ (\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,2} \end{matrix} ; t_{a_{y,\max,1}}; t_{\delta_{H,\max,1}} \right) = f(a_{y,0})$ |
|                        | Slalom Test  | Kippsicherheit (Two Wheel Lift)  |
|                        | VDA Test / Elchtest  | siehe ISO-Spurwechsel  |
|                        | Weavetest  | - (kein Bezug zur Beurteilung der Fahrsicherheit)  |
|                        | ADAC Ausweichtest  | - (nur subjektive Beurteilung der Schleuderstabilität)   |
|                        | NHTSA Fishhook   | Kippsicherheit (Two Wheel Lift)  |
| NHTSA Sine with dwell  | $\Delta\psi_{\max}; \frac{\dot{\psi}(t_o + 1s)}{\dot{\psi}_{\max}}; \frac{\dot{\psi}(t_o + 1,75s)}{\dot{\psi}_{\max}}; \Delta y$ |  |
| Kurvenverhalten        | Bremsen in der Kurve   | $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}; \dot{\psi}_{\max} / \dot{\psi}_{ref}; \Delta a_{y,1s}; \beta_{SP,1s/\max}$  |
|                        | Gaswegnahme in der Kurve   | siehe Bremsen in der Kurve   |
|                        | Instationäre Kreisfahrt  | $\Delta\dot{\psi}_{1s}$  |
|                        | Stationäre Kreisfahrt  | $EG; SG; \beta_{SP}$   |

| Fahrsicherheits-Kennwert   | Definition  |
|--|---|
| $\Delta\dot{\psi}_{1s}$  | Differenz der Giergeschwindigkeit zu ihrem stationären Ausgangswert genau eine Sekunde nach Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt (z.B. durch Bremsvorgänge, Lastwechsel oder Lenksystemstörungen). |
| $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  | Maximale Differenz der Giergeschwindigkeit zu ihrem stationären Ausgangswert infolge einer Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt.   |
| $\Delta\dot{\psi}_{ref,1s} = \dot{\psi}(1s) - \frac{v_x(1s)}{R_0}$                     | Differenz der Giergeschwindigkeit zur aktuellen Referenzgierrate $\dot{\psi}_{ref}$ (s.u.) genau eine Sekunde nach Unterbrechung der stationären Kreisfahrt.  |
| $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max} = \max \left[ \dot{\psi}(t) - \frac{v_x(t)}{R_0} \right]$ | Maximale Differenz der Giergeschwindigkeit zur aktuellen Referenzgierrate $\dot{\psi}_{ref}$ infolge einer Unterbrechung der stationären Kreisfahrt.  |
| $\dot{\psi}_{ref} = \frac{v_x(t)}{R_0}$  | Theoretische Giergeschwindigkeit, die bei aktueller Fahrgeschwindigkeit mindestens benötigt wird, um weiterhin den Ausgangsradius $R_0$ zu befahren.  |
| $\Delta a_{y,1s}$  | Differenz der Querbeschleunigung zu ihrem stationären Ausgangswert genau eine Sekunde nach Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt.   |
| $\Delta a_{y,\max}$  | Maximale Differenz der Querbeschleunigung zu ihrem stationären Ausgangswert infolge einer Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt.  |
| $\beta_{SP,1s}$  | Schwimmwinkel im Fahrzeug-Schwerpunkt genau eine Sekunde nach Unterbrechung des stationären Ausgangszustands (z.B. Kurvenbremsen).  |
| $\beta_{SP,\max}$  | Maximalwert des Schwimmwinkels im Fahrzeug-Schwerpunkt während des betrachteten Fahrmanövers (Brems- oder Ausweichmanöver).   |
| $\beta_{HA,1s}$  | Schwimmwinkel an der Hinterachse genau eine Sekunde nach Unterbrechung des stationären Ausgangszustands (z.B. Kurvenbremsen).   |
| $\beta_{HA,\max}$  | Maximalwert des Schwimmwinkels an der Hinterachse während des betrachteten Fahrmanövers (Brems- oder Ausweichmanöver).  |

<sup>159</sup> Dietrich (2009): Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten, S. 24ff

Darüber hinaus werden jedoch auch die Querabweichung  $\Delta y$  in  $\mu$ -split Bremsung<sup>160</sup> und die benötigte Lenkaktivität in Geradeausbremsung<sup>161,162,163</sup> als geeignete Kriterien zur Objektivierung beschrieben.

In Spurwechseltests und Ausweichmanövern (ISO-Spurwechsel, VDA-Ausweichtest, NHTSA Sine with dwell) gilt ebenfalls der Schwimmwinkel  $\beta_{SP,max}$ <sup>164,165,166,167</sup> bzw. eine hohe Gierwinkelabweichung  $\Delta\psi_{max}$ <sup>168</sup> zur Fahrtrichtung als Kriterium für die Stabilität des Fahrzeugverhaltens. Die Verwendung weiterer Kennwerte macht jedoch auch deutlich, dass die Stabilität des Fahrzeugs nicht als ausreichendes Kriterium für eine hohe Fahrsicherheit in Ausweichtests angesehen wird: Das querdynamische Ansprechverhalten, objektiviert durch möglichst geringe Ansprechzeiten  $T_{\dot{\psi}/a_y}$ , geringe Phasenverzögerungen  $\phi_{\dot{\psi}/a_y}$  von Gierrate und Querschleunigung<sup>169,170</sup> oder durch einen geforderten Mindest-Querversatz  $\Delta y$ <sup>171,172</sup> wird ebenfalls als wichtiger Bestandteil eines sicheren Fahrverhaltens angesehen.

Auch in Open-Loop-Tests mit synthetischen Lenkeingaben (Dreieckimpuls, Lenkwinkelsprung) wird der Zielkonflikt zwischen der bewerteten Stabilität (möglichst niedrige maximale Schwimmwinkel  $\beta_{SP}$  und Schwimmwinkelintegrale  $\int \beta_{SP}$  bzw. geringe Überschwingweiten von Gierrate und Querschleunigung  $U_{\dot{\psi}/a_y}$ ) und einer ausreichenden querdynamischen Performance (möglichst hohe Querschleunigung  $a_{y,max}$  bzw. niedrige Ansprechzeiten  $T_{\dot{\psi}/a_y}$ ) thematisiert.<sup>173,174</sup> In allen Testverfahren mit hoher wechselseitiger Querdynamikbeanspruchung (ISO-Spurwechsel, Slalom-Test, VDA-Test/Elchtest, NHTSA Fishhook, NHTSA Sine with dwell) wird zusätzlich die Kippsicherheit des

<sup>160</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>161</sup> Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

<sup>162</sup> Lorenz et al. (1986): Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten

<sup>163</sup> Rompe, Ehlich (1987): Stand der objektiven Bewertung von Reifen- und Fahrwerkseigenschaften

<sup>164</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>165</sup> Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

<sup>166</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>167</sup> Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

<sup>168</sup> Uffelmann (1981): Lastwechselreaktion des frontgetriebenen PKW bei Kurvenfahrt

<sup>169</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>170</sup> Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

<sup>171</sup> Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

<sup>172</sup> NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-8

<sup>173</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

<sup>174</sup> Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

Testfahrzeugs durch das unerwünschte Auftreten eines Radabhebens von mehr als zwei Rädern (Two Wheel Lift) bewertet.<sup>175,176,177</sup>

### 2.2.3 Bekannte Akzeptanzgrenzen für die Bewegungskennwerte

Das Fahrverhalten wird heute also in zahlreichen Tests überprüft und durch objektive Bewegungskenngrößen charakterisiert. Eine Entscheidung, ob das Fahrzeug ein sicheres Fahrverhalten aufweist, kann jedoch wie eingangs erwähnt nur auf Basis von Akzeptanzgrenzen für die relevanten Bewegungskennwerte aus Tabelle 2.3 getroffen werden. Tabelle 2.4 fasst daher alle bekannten bzw. veröffentlichten Akzeptanzgrenzen für die zur Beschreibung der Fahrsicherheit in der Literatur als wesentlich erachtete Kenngrößen der Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}$  und des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt  $\beta_{sp}$  zusammen. In Kurvenbremsung ist nach Fiat eine maximale Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{max}$  von 50 % im Vergleich zur Ausgangsgierrate  $\dot{\psi}_{ref}$  bei Bremsbeginn tolerierbar.<sup>178</sup> Im Lastwechselfall stellt eine Gierbeschleunigung  $\ddot{\psi}$  größer  $5^\circ/s^2$  nach Otto eine Gefährlichkeitsgrenze dar.<sup>179</sup> Der Schwimmwinkel  $\beta_{sp}$  sollte in Kurvenbremsung nach einer schwedischen Fahrsicherheitsstudie<sup>180</sup> aus dem Jahr 1974 maximal  $20^\circ$  betragen und nach Rompe et al.<sup>181</sup> 1980 eine Sekunde nach Bremsbeginn maximal  $15^\circ$ . Auch Witte sieht 1995 Schwimmwinkel im Schwerpunkt des Fahrzeugs bis  $20^\circ$  als unkritisch aus Fahrersicht an.<sup>182</sup> Konstante Schwimmwinkel bis  $4^\circ$  können 1989 nach Kudritzki zudem vom Fahrer nicht wahrgenommen werden.<sup>183</sup> Demgegenüber stehen Veröffentlichungen aus der jüngeren Vergangenheit, die geringere Akzeptanzgrenzen für Schwimmwinkel vermuten lassen: Nach Jürgensohn (1997) werden bereits Schwimmwinkel  $\beta_{sp}$  ab  $4^\circ$  im „Normalfahrbereich“ als unangenehm eingestuft.<sup>184</sup> Keinert<sup>185</sup> nennt 2004 im Rahmen einer Forschungsarbeit eine Akzeptanzgrenze von  $5^\circ$  Schwimmwinkel bei Impulsenkung, während  $5^\circ$  Schwimmwinkel für von Glasner<sup>186</sup> 2009 noch nicht als kritisch zu beurteilen sind. Ein kritisches Fahrverhalten beginnt nach von Glasner erst ab  $10^\circ$  Schwimmwinkel.

<sup>175</sup> Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

<sup>176</sup> Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

<sup>177</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>178</sup> Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

<sup>179</sup> Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

<sup>180</sup> Rundkuist (1974): Steerability During Emergency Braking

<sup>181</sup> Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

<sup>182</sup> Witte (1995): Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen

<sup>183</sup> Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungskenngrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>184</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 14

<sup>185</sup> Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

<sup>186</sup> von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

Eine Ursache für die deutlichen Abweichungen zwischen den genannten Akzeptanzgrenzen könnte in der Verwendung des Schwimmwinkels im Fahrzeugschwerpunkt als objektivem Bewegungskennwert begründet sein: Nach Kapitel 2.1.1 geht neben den Schräglaufwinkeln der jeweiligen Fahrzeugachsen anteilig auch der Lenkradwinkel in den Schwimmwinkel des Fahrzeugschwerpunkts mit ein. Somit besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt und dem Fahrzustand des Fahrzeugs.

Tabelle 2.4 Veröffentlichte Akzeptanzgrenzen der Giergeschwindigkeitsabweichung und des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt

| Testverfahren   | Kennwert                     | genannte Akzeptanzgrenze   |
|---|------------------------------|--|
| <b>Fiat, 1975</b><br>Bremsen in der Kurve   |                              | $\leq 0,5 \cdot \dot{\psi}_{ref}$  |
| <b>Otto 1987</b><br>Gaswegnahme in der Kurve                                      |                              | Gefährlichkeitsgrenze <b>57ss</b> Gierbeschleunigung $\ddot{\psi}_{max}$<br>(keine Angabe zu Giergeschwindigkeitsabweichung) |
| <b>Neukum/Krüger, Wallentowitz, 2006</b><br>Kreisfahrt - Vertikaldynamikstörungen |                              | <b>&gt;67s</b> häufig störend, <b>&gt;87s</b> teilweise gefährlich   |
| <b>Neukum/Krüger - VDA AK 2007</b><br>Störung durch Überlagerungslenkung (AFS)    | $\Delta \dot{\psi}_{max/1s}$ | <b>47s</b> (50 km/h), <b>37s</b> (100 km/h), <b>2,57s</b> (150 km/h)   |
| <b>Neukum/Krüger - 2010</b><br>Störung durch Lenkmomentenaufschaltung (EPS)       |                              | Beurteilung analog AFS   |
| <b>Wesp 2011</b><br>Störung durch Hinterradlenkeingriffe (HSR)                    |                              | <b>127s</b> (100 km/h), <b>7,87s</b> (150 km/h)  |
| <b>Schwedischer Vorschlag 1974</b><br>Bremsen in der Kurve                        |                              | Empfehlung <b>&lt;20°</b>  |
| <b>Rompe/Grunow/Tupova 1980</b><br>Bremsen in der Kurve                           |                              | Empfehlung <b>&lt;15°</b>  |
| <b>Kudritzki 1989</b><br>allgemeine Angabe  | $\beta_{SP,max/1s}$          | bis <b>4°</b> nicht wahrgenommen   |
| <b>Witte 1995</b><br>allgemeine Angabe  |                              | bis <b>20°</b> nicht als kritisch beurteilt  |
| <b>Jürgensohn 1997</b><br>allgemeine Angabe                                       |                              | ab <b>4°</b> als unangenehm eingestuft   |
| <b>Keinert, 2004</b><br>Stabilitätsbewertung Lenkimpuls                           |                              | ab <b>5°</b> für den Fahrer kritisch   |
| <b>von Glasner, 2009</b><br>allgemeine Angabe                                     |                              | <b>5°</b> unkritisch, ab <b>10°</b> kritisches Fahrverhalten   |

Weitere Aussagen zu tolerierbaren Giergeschwindigkeitsabweichungen  $\Delta \dot{\psi}_{max}$  wurden in den zusammengefassten Closed-Loop-Studien zur Störungsbeurteilung von Lenksystem- und Fahrwerkstörungen in Kapitel 2.2.1 abgeleitet. Die Ergebnisse erscheinen ebenfalls nicht einheitlich, wobei Gierstörungen infolge von Lenksystemstörungen<sup>187,188,189,190</sup> (AFS, EPS) nach Tabelle 2.4 scheinbar deutlich kritischer beurteilt werden als Gierstörungen infolge von Vertikaldynamikstörungen<sup>191</sup> oder durch Hinterrad-

<sup>187</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

<sup>188</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

<sup>189</sup> Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions

<sup>190</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>191</sup> Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug- Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen

lenkeingriffe<sup>192</sup>. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Störungsursache einen maßgebenden Einfluss auf die erzielte subjektive Fahrsicherheit von Normalfahrern hat. Somit sind die genannten Akzeptanzgrenzen aus den Untersuchungen zu Lenksystemstörungen an der Vorderachse nicht direkt auf die Bewertung des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern übertragbar. Die genannten Akzeptanzgrenzen auf Basis einer Hinterradlenkung erscheinen hierzu vielversprechender, da durch eine Hinterradlenkung zwar Einfluss auf das Fahrverhalten genommen wird, jedoch keine unmittelbare Veränderung des Lenkradmoments infolge der Störaufschaltung resultiert.

## 2.3 Fahrsicherheit und Fahrzeugführung

Im Anschluss an die Zusammenfassung der bekannten Fahrmanöver und Beurteilungskriterien des Fahrverhaltens wird in diesem Abschnitt die Bedeutung des Begriffs „Fahrsicherheit“ als Bestandteil der „Aktiven Sicherheit“ diskutiert. Dabei wird auf die bestehenden Kenntnisse bezüglich des Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug bei der Bewältigung einer Fahraufgabe eingegangen und es werden mögliche Ansatzpunkte aus dem Bereich der regelungstechnischen Fahrermodelle zur Prüfung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch Normalfahrer erörtert.

### 2.3.1 Aktive Sicherheit

Unter dem Begriff „Aktive Sicherheit“ werden seit den 60er-Jahren

*„...alle Maßnahmen und Einrichtungen am Fahrzeug zur Verhinderung von Unfällen in Folge von technischen Mängeln, dem Menschen nicht angepassten Fahreigenschaften oder Fahrfehlern...“*

zusammengefasst.<sup>193</sup>

Die Maßnahmen der Aktiven Sicherheit werden 1967 von Wilfert in die vier Teilbereiche

- Fahrsicherheit,
- Konditionssicherheit,
- Wahrnehmungssicherheit und
- Bediensicherheit

aufgeteilt, siehe Bild 2.10. Diese Aufteilung besteht bis heute, siehe Braess/Donges<sup>194</sup>.

---

<sup>192</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung

<sup>193</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>194</sup> Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen

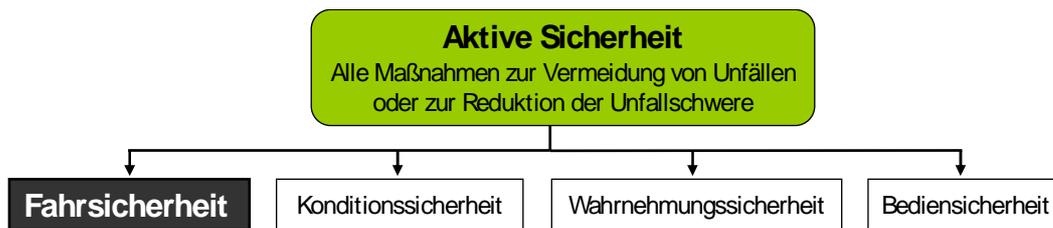


Bild 2.10 Einteilung der Aktiven Sicherheit in vier Kategorien nach Wilfert<sup>195</sup> (1967)

Als Bestandteil der Aktiven Sicherheit beinhaltet die Fahrsicherheit dementsprechend all jene Maßnahmen, die der optimalen Anpassung des Fahrverhaltens an den Fahrer dienen, mit dem Ziel, Unfälle bereits in ihrer potentiellen Entstehungsphase zu verhindern. Das Fahrverhalten wird durch die Fahrzeugreaktion auf alle Fahrerhandlungen und Störungen im geschlossenen Regelkreis aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt beschrieben.<sup>196,197</sup> Dabei bestimmt nach Rompe/Heißing die „richtige Funktion“ des Systems aus Fahrer, Fahrzeug, Straße und Umwelt die Straßenverkehrssicherheit.<sup>198</sup> Zur Beschreibung dieser „richtigen Funktion“ existieren zahlreiche qualitative Beschreibungen einer geeigneten Anpassung des Fahrverhaltens an den Menschen. So muss das Fahrzeug diversen Autoren zufolge an die Fähigkeiten und Eigenschaften des Fahrers angepasst werden<sup>199,200,201,202,203</sup>, vorhersehbar und erwartungsgemäß auf die Regeltätigkeiten des Menschen reagieren<sup>204,205,206,207</sup> und möglichst unempfindlich gegenüber Störgrößen sein.<sup>208</sup>

Als wichtigste Aufgabe des Fahrers im Regelkreis aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt nach Bild 2.11 wird die Fahrzeugführung und die Stabilisierung des Fahrzeugs auf einem sicheren Sollkurs verstanden.<sup>209,210,211,212,213</sup> Dabei ist nach Donges/Rompe (1982)

<sup>195</sup> Wilfert (1967): Sicherheitsprobleme bei der Entwicklung von Personenwagen, S. 48ff

<sup>196</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

<sup>197</sup> Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>198</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

<sup>199</sup> Donges (2009): Fahrerhaltensmodelle

<sup>200</sup> Hoffmann (1975): Human Control of Road Vehicles, S. 105ff

<sup>201</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage

<sup>202</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

<sup>203</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

<sup>204</sup> Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

<sup>205</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>206</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

<sup>207</sup> Schöggel (2007): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

<sup>208</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>209</sup> Bruder et al (2009): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

<sup>210</sup> Bubb (2003): Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?, S. 257ff

<sup>211</sup> Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

<sup>212</sup> Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

<sup>213</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

die Wahl sicherer Führungsgrößen durch den Fahrer für einen sicheren Fahrtverlauf entscheidend und der zulässige Bewegungsbereich durch Fahrsituation, Fahrbahnmarkierung und Beschilderungen vorgegeben. Schafft es der Fahrer also, sein Fahrzeug auf einem sicheren Sollkurs zu stabilisieren, kann die Fahrt als objektiv sicher angesehen werden.

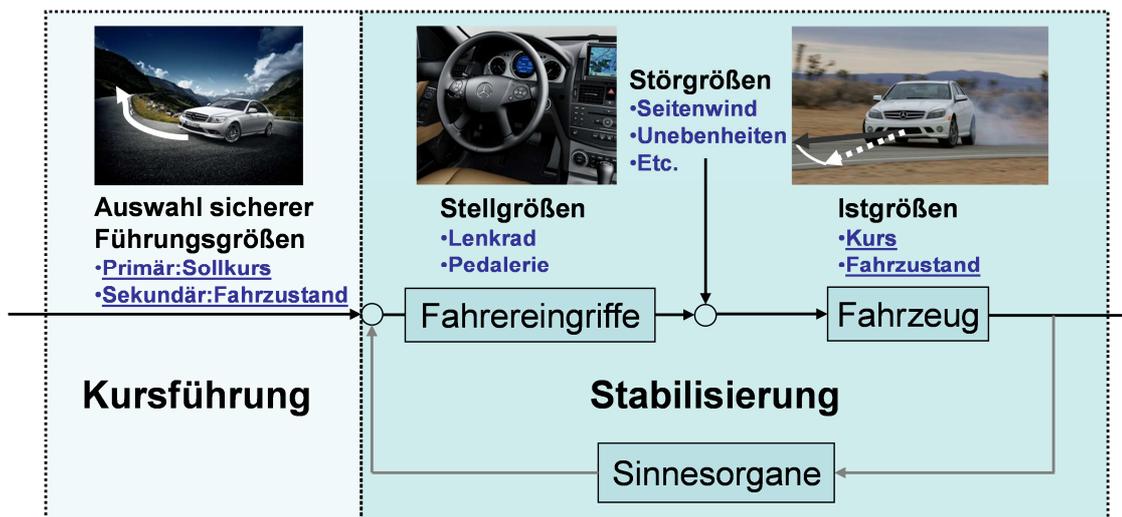


Bild 2.11 Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt, unterteilt in die beiden Hauptaufgaben des Fahrers basierend auf Donges/Rompe<sup>214</sup>

Auf Basis der Theorie verschiedener Handlungsebenen der menschlichen Informationsverarbeitung nach Rasmussen<sup>215</sup> ordnet Donges<sup>216</sup> die Aufgabe der Kursführung aus Bild 2.11 einem bewussten, regelbasierten Entscheidungsprozess zu. Die anschließende Stabilisierung des Fahrzeugs auf diesem bewusst gewählten Sollkurs wird als weitestgehend unbewusste Handlung angesehen, die nach dem Muster zuvor erlernter Reiz-/Reaktionsschemata ablaufe. Der Übergang zwischen regelbasierter und reflektorischer Handlung wird von Donges allerdings als fließend beschrieben: Der Fahrer kann seine zunächst unbewussten Reaktionen im Anschluss an die erlebte Situation analysieren und sein Verhaltensmuster für zukünftige Situationen adaptieren. Daher ist der Fahrer speziell in nicht alltäglichen Situationen, z.B. einem benötigten Ausweichvorgang mit hoher Kraftschlussausnutzung oder der Bremsung auf glatter Fahrbahn, auf ein Fahrverhalten angewiesen, das zu seinen zuvor erlernten Handlungsmustern passt. Auf ein für ihn unerwartetes Fahrverhalten kann der Fahrer nicht angemessen reagieren, da seine Stabilisierungshandlungen nach Donges auf bisherigen Erfahrungen beruhen. Diese Erfahrungen sammelt der Fahrer nach McAdam im quasi-stationären Bereich des Fahrverhaltens,

<sup>214</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren, S. 6

<sup>215</sup> Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

<sup>216</sup> Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

innerhalb dessen die Querkraft nahezu proportional zu den Lenkeingaben verläuft.<sup>217</sup> Die Güte des Fahrverhaltens im Sinne der Aktiven Sicherheit kann also daran gemessen werden, ob der Fahrer auch in ungewohnten Fahrsituationen, welche starke Bremsenriffe oder schnelle und heftige Lenkbewegungen zur Unfallvermeidung erfordern können, in der Lage ist, das Fahrzeug auf einem sicheren Kurs zu stabilisieren. Speziell in den 70er-Jahren herrscht die Überzeugung vor, eine wirksame Unfallvermeidung sei nur durch eine bessere Handhabung der Fahrzeuge zu erzielen<sup>218</sup> und ein optimal an den Menschen angepasstes Fahrverhalten müsse zur Minimierung des Unfallrisikos beitragen.<sup>219,220</sup>

### 2.3.2 Unfallursachen

Durch die Analyse von Unfallursachen und der Unfallentstehung können Potentiale hinsichtlich einer möglichen Steigerung der Aktiven Sicherheit durch eine Unterstützung des Fahrers bei der Vermeidung von Unfällen identifiziert werden.<sup>221</sup> Die Forderung aus den 70er-Jahren, das Fahrzeugverhalten müsse für eine wirksame Unfallvermeidung besser an den Fahrer angepasst werden, kann zunächst allerdings in keinen direkten Bezug zu den aus der Unfalldatenerhebung bekannten Unfallursachen gesetzt werden: Pro Unfall können durch die Polizeibeamten in Deutschland beispielsweise maximal zwei der möglichen allgemeinen Unfallursachen (u.a. Straßenverhältnisse, Witterungseinflüsse oder Hindernisse) und jeweils maximal drei personenbezogene Falschverhalten bei Hauptverursacher und einer weiteren Person dokumentiert werden.<sup>222</sup> Diese Unfallursachen geben jedoch keine eindeutigen Hinweise auf einen möglichen Kontrollverlust durch ein übermäßig schwer zu beherrschendes Fahrverhalten. Wie von Gründl erörtert, werden vielmehr der Fahrer und sein Falschverhalten bereits Ende des 19. Jahrhunderts als die Hauptursache von Verkehrsunfällen angesehen.<sup>223</sup> Diese Einschätzung bleibt auch im Verlauf des 20. Jahrhunderts bestehen.<sup>224</sup> Nach der von Gründl angeführten GIDAS-Datenbank (German in Depth Accident Study) werden im Zeitraum von 1973 bis 2005 93,5 % aller Verkehrsunfälle auf menschliches Falschverhalten zurückgeführt. Im Berichtsjahr 2010 des statistischen Bundesamtes entfallen auf jeden Verkehrsunfall mit Personenschaden im Mittel sogar 1,2 menschliche Fehler.<sup>225</sup> Bild 2.12 zeigt den Anteil des statistisch erfassten menschlichen Falschverhaltens in Verkehrsunfällen mit Ge-

<sup>217</sup> McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

<sup>218</sup> Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

<sup>219</sup> Hoffmann (1975): Human Control of Road Vehicles, S. 105ff

<sup>220</sup> Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>221</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

<sup>222</sup> Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010, S. 10

<sup>223</sup> Gründl (2005): Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen

<sup>224</sup> Schurmann (1994): On the use of discrete proprioceptive-tactilewarning systems during manual control

<sup>225</sup> Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010, S. 41

töteten im Jahr 2010 in Deutschland. Mit ca. 40 % ist der Anteil einer nicht an die Umgebungsbedingungen oder Beschilderungen angepassten Fahrgeschwindigkeit am größten, gefolgt von einer falschen Straßenbenutzung und einer eingeschränkter Verkehrstüchtigkeit. Allgemeine Ursachen wie Straßenglätte, Regen, Schnee oder Sichtbehinderungen sind bei 17 % aller Unfälle mit Personenschaden mitauslösend, während technische Defekte nur bei 0,7 % aller beteiligten Fahrzeuge festgestellt werden.

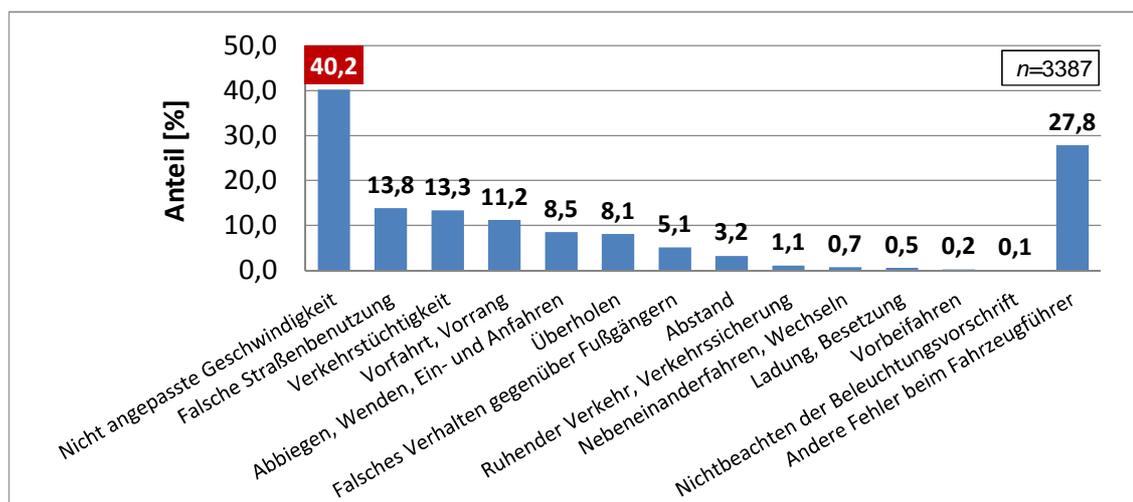


Bild 2.12 Anteil des menschlichen Falschverhaltens in Verkehrsunfällen mit Getöteten in Deutschland (2010), nach den Daten des Statistischen Bundesamtes

Daher darf zu Recht, wie z.B. von Jürgensohn, infrage gestellt werden, ob aus der Betrachtung von Unfallursachen überhaupt Rückschlüsse auf ein unzureichend an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten getroffen werden können.<sup>226</sup> Nach Zomotor et al. bedeutet Fahrsicherheit im Sinne der Aktiven Sicherheit insbesondere aber auch die Ausprägung einer größtmöglichen Fehlertoleranz gegenüber möglichen Fehlhandlungen des Fahrers.<sup>227</sup> Die Hauptursache „menschliches Falschverhalten“ in Verkehrsunfällen steht also in keinem direkten Widerspruch zu dem vorhandenen Entwicklungsziel, das Fahrverhalten „optimal“, sprich im Sinne einer größtmöglichen Fehlertoleranz, an den Fahrer anzupassen.

Nach Braun/Ihme und Bild 2.13 entstehen Unfälle in Gefahrensituationen dann, wenn der Fahrer den zur Stabilisierung des Fahrzeugs verfügbaren Spielraum durch fehlerhafte oder ganz ausbleibende Reaktion so lange nicht nutzt, bis der Unfall letztlich eintritt. Dabei wird nach Bild 2.13 von einer externen Störung als Unfallinitial ausgegangen, die den Stabilisierungsspielraum verringert und zusätzlich eine zielgerichtete Handlung des Fahrers zur Stabilisierung notwendig macht.

<sup>226</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 24ff

<sup>227</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

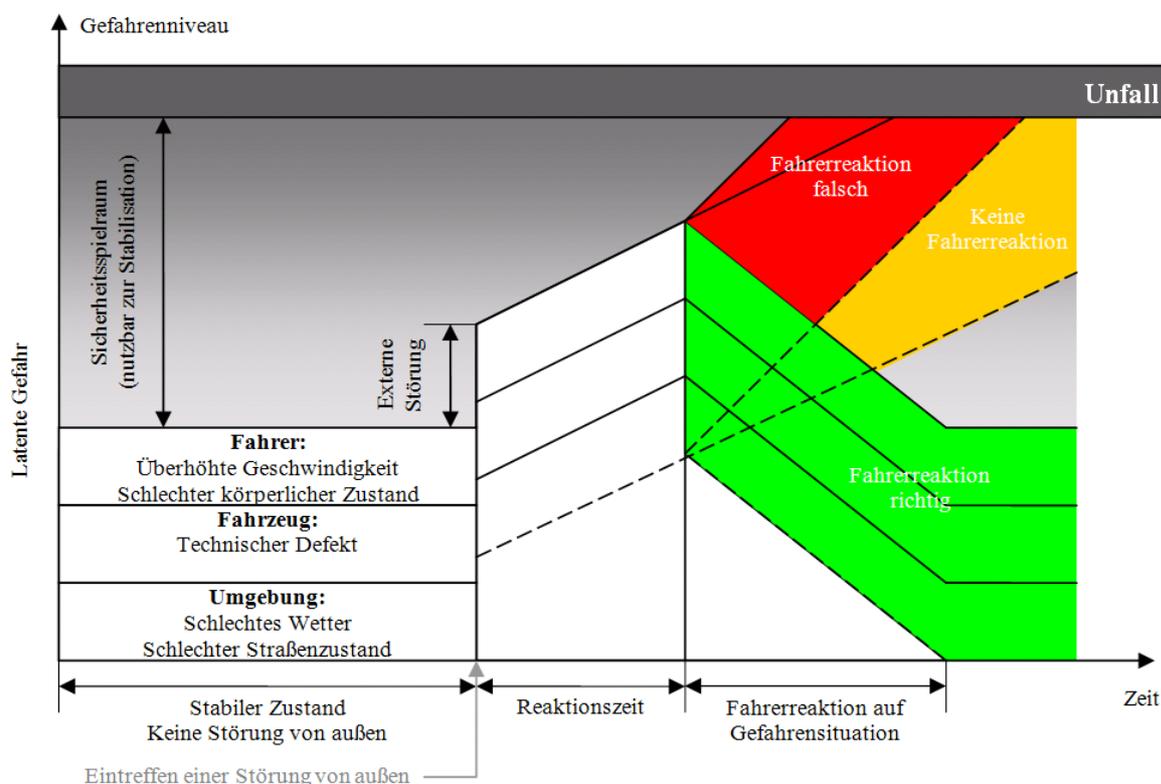


Bild 2.13 Sicherheitspielraum in der Stabilisierungsphase nach Braun/Ihme<sup>228</sup>

Diese Darstellung kann auch auf das Fahrverhalten in kritischen Fahrsituationen übertragen werden: Nach Braun/Ihme besteht demnach bereits in ungestörter Fahrt eine „latente Gefahr“, die durch ungünstige Umgebungsbedingungen (z.B. Straßenglätte), das Fahrzeug selbst (technische Defekte) und den Menschen (z.B. erhöhte Fahrgeschwindigkeit oder eingeschränkte Fahrtüchtigkeit) beeinflusst wird. Hierin finden sich die wesentlichen aus der Unfallstatistik bekannten Unfallursachen aus Bild 2.12 wieder. Des Weiteren kann eine auf das Fahrverhalten bezogene „Störung“ in dieser Modellbetrachtung z.B. durch das Auftreten eines Hindernisses oder das Ausbrechen des Fahrzeugs auf glatter Fahrbahn gegeben sein. In beiden Fällen ist eine zielgerichtete Fahrerhandlung zur Stabilisierung des Fahrzeugs auf einem sicheren Sollkurs notwendig.

In der Darstellung nach Bild 2.13 würde nun neben technischen Defekten auch ein nicht an die Fähigkeiten des Fahrers angepasstes Fahrverhalten das Verunfallungsrisiko erhöhen, indem eine „richtige Reaktion“ des untrainierten Normalfahrers zur Stabilisierung des Fahrzeugverhaltens unwahrscheinlich ist. Das menschliche Falschverhalten tritt in dieser Überlegung erst durch ein offensichtlich unzureichend sicheres Fahrergebnis (Unfall) zu Tage und steht somit in einem direkten Zusammenhang mit dem Fahrverhalten des Fahrzeugs. Da nach bisherigen Erkenntnissen angenommen werden kann, dass

<sup>228</sup> Braun/Ihme (1983): Definition kritischer Situationen im Kraftfahrzeugverkehr – Eine Pilotstudie

die Reaktionen des Fahrers während der Stabilisierung des Fahrzeugs weitestgehend unbewusst ablaufen<sup>229</sup> und hierbei auf vorherige Erfahrungen im quasi-stationären Bereich zurückgegriffen wird<sup>230</sup>, ist das Falschverhalten des Fahrers bei der Stabilisierung des Fahrzeugs folgerichtig nur durch eine geeignete Anpassung des Fahrverhaltens an den Menschen vermeidbar.<sup>231</sup> Einschränkend ist jedoch zuzusagen, dass dies nur für zielgerichtete Handlungen des Fahrers gelten kann, die zur Einhaltung sicherer Führungsgrößen des Fahrzeugs aufgewandt werden. Ab einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit kann das Fahrzeug infolge physikalischer Grenzen nicht mehr auf einem sicheren Kurvenradius gehalten werden. Ebenso können Fehleinschätzungen des Straßenverlaufs, Unaufmerksamkeit und Passivität durch eingeschränkte Fahrtüchtigkeit unabhängig von einem unzureichend an den Fahrer angepassten Fahrverhalten zu einem Verlust der Fahrzeugkontrolle führen. Einen Ausgleich dieser Defizite streben wiederum die bereits vorhandenen oder zukünftig entwickelten Systeme der Fahrerassistenz an.

Die Unfalldisposition in Abhängigkeit der Fahrweise und der Fahrerfahrung wird von Braess/Donges nach Bild 2.14 diskutiert:

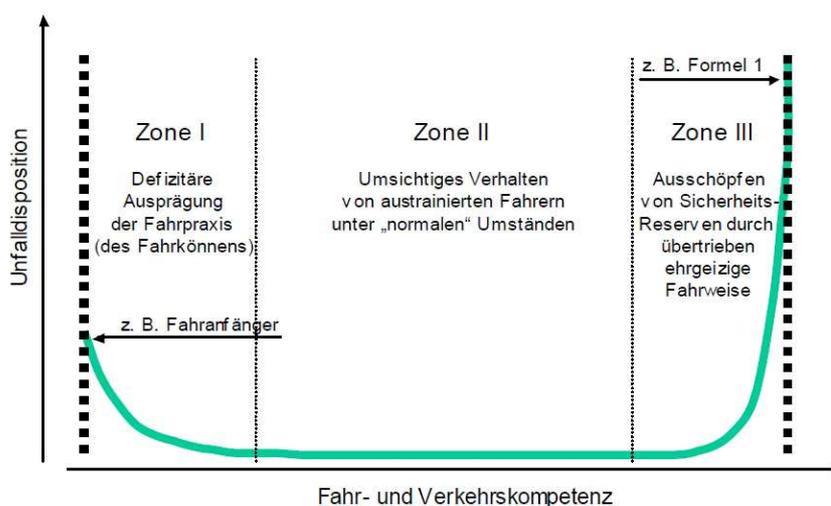


Bild 2.14 Unfalldisposition in Abhängigkeit der Fahrpraxis und der Fahrweise nach Braess/Donges<sup>232</sup>

Demnach sind Fahrer mit defizitärer Ausprägung des Fahrkönnens in *Zone 1* einem erhöhten Verunfallungsrisiko ausgesetzt. Gleiches gilt für Fahrer mit hoher Fahrkompetenz in *Zone 3*, die durch „ehrgeizige Fahrweise“ den physikalischen Grenzbereich ausloten. Fahrern mit austrainiertem Fahrkönnen und „umsichtiger“ Fahrweise in *Zone 2* wird dementsprechend ein niedrigeres Verunfallungsrisiko zugeschrieben. Der Einfluss

<sup>229</sup> Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

<sup>230</sup> McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

<sup>231</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage

<sup>232</sup> Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen, S. 3

der Fahrerfahrung auf die Häufigkeit des menschlichen Falschverhaltens im Straßenverkehr wird durch zwei von Braess/Donges zitierte Studien belegt: Mit steigender Fahrpraxis wird ein durchschnittliches Niveau der Häufigkeit menschlichen Falschverhaltens erreicht und die Unfallhäufigkeit nähert sich asymptotisch durchschnittlichen Werten an.<sup>233</sup>

Eine Begründung suchen Braess et al. im Lernprozess des Fahrzeugführers: Mit steigender Fahrerfahrung sinkt nach Donges der Anteil an bewusstem, regelbasiertem Handeln des Fahrers und das erlernte situationsabhängige Handeln geht in unbewusste Handlungsmuster über.<sup>234</sup> Der Abruf dieser geeigneten Handlungsmuster zur Situationsbewältigung beansprucht in der Theorie der menschlichen Informationsverarbeitung nach Rasmussen deutlich weniger Zeit als die bewusste Auswahl von geeigneten Lösungsstrategien unter einer Vielzahl von Handlungsalternativen.<sup>235</sup> Somit reagiert der Fahrer in bereits bekannten Fahrsituationen nicht nur richtig, sondern auch schneller. In unfallrelevanten Situationen kann dieser Gewinn an Zeit nach Donges ausschlaggebend sein.<sup>236</sup> Unabhängig von der individuellen Fahrerfahrung wird daher gefordert, den Bedarf an bewussten Handlungen zur Fahrzeugführung zu minimieren.<sup>237</sup> Ein Vergleich der 2010 in Deutschland dokumentierten Unfallursachen zeigt, dass jungen Fahrern in Unfallsituationen häufiger überhöhte Geschwindigkeit und Abstandsfehler vorgeworfen werden, während ältere Fahrer hingegen häufiger die Vorfahrt missachten.<sup>238</sup> Zu dem von Braess/Donges nach Bild 2.14 angeführten defizitären Fahrkönnen von Fahranfängern kann analog zu *Zone 3* also auch eine ehrgeizigere Fahrweise als Erklärung für signifikant erhöhte Unfallzahlen von Fahranfängern herangezogen werden.

Die Schwierigkeit bei der Interpretation von Unfallstatistiken besteht in der Identifikation von Unfällen, die durch ein besser an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten tatsächlich vermeidbar gewesen wären. Dieser Anteil kann aus der Unfallstatistik aufgrund der fehlenden Informationen zum tatsächlichen Unfallhergang in der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug zunächst nicht entnommen werden.

Dennoch verbleibt eine Möglichkeit zur Analyse der Wirkpotentiale für die Optimierung des Fahrverhaltens auf Basis von Unfallzahlen:

- 1. Identifizierung der Unfalltypen mit vermutetem Bezug zum Fahrverhalten

---

<sup>233</sup> Willmes-Lenz (2003): Internationale Erfahrung mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger

<sup>234</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

<sup>235</sup> Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

<sup>236</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

<sup>237</sup> Förster (1987): Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft?

<sup>238</sup> Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010

- 2. Betrachtung der Entwicklung von Unfallzahlen infolge bereits bekannter Weiterentwicklungen des Fahrverhaltens (z.B. durch ABS oder ESP)
- 3. Rückschluss auf aktuelle Entwicklungspotentiale

### 1. Relevante Unfalltypen:

Die Unfallstatistik in Deutschland unterscheidet sieben verschiedene Unfalltypen, siehe Bild 2.11. Hiervon kann insbesondere der „Fahrerunfall“ in einen direkten Bezug zum Fahrverhalten gesetzt werden. Ein Fahrerunfall liegt nach dem Statistischen Bundesamt vor, wenn der Fahrer ohne Fremdeinwirkung die Kontrolle über sein Fahrzeug verliert. Ein Fahrerunfall ist somit immer das Resultat eines fehlerhaften Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug auf der Kursführungs- und Stabilisierungsebene nach Bild 2.11. Dies kann jedoch auch durch Müdigkeit oder Ablenkung geschehen.

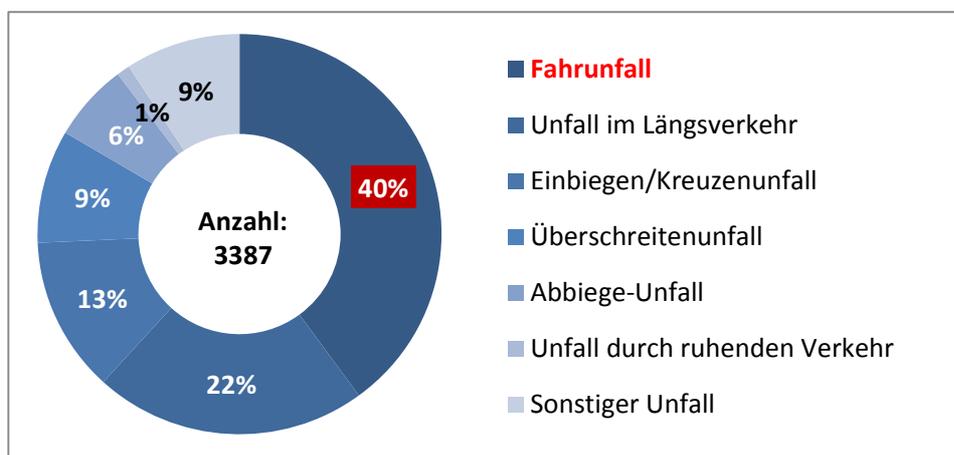


Bild 2.15 Anteil der statistisch erfassten Unfalltypen an der gesamten Anzahl von Verkehrsunfällen mit Getöteten in Deutschland (2010), nach Daten des Statistischen Bundesamtes

Bei Fahrerunfällen kann, wie oben diskutiert, allerdings nicht belegt werden, ob der Unfall durch menschliches Falschverhalten unvermeidbar war (z.B. durch stark überhöhte Geschwindigkeit, falsche Einschätzung des Straßenverlaufs und Bewusstlosigkeit), oder der Fahrer durch ein unzureichend an die Fahrfertigkeiten von Normalfahrern angepasstes Fahrverhalten des Fahrzeugs überrascht und überfordert wurde. Fahrerunfälle hatten 2010 in Deutschland nach Bild 2.15 mit ca. 40 % den höchsten Anteil aller Unfalltypen an Verkehrsunfällen mit Getöteten. Dieser Anteil wird im internationalen Vergleich bestätigt: Nach mehreren 2006 von Knoll zusammengetragenen Studien geht tödlichen Unfällen in 40 % aller Fälle ein Schleudern des Fahrzeugs (Kontrollverlust) voraus.<sup>239</sup>

<sup>239</sup> Knoll (2006): Der Sicherheitsaspekt von ESP in Realunfällen

Seit 2006 ist der Anteil von Fahrurfällen an tödlichen Unfällen in Deutschland wiederum nahezu unverändert geblieben (2006: 42 %).<sup>240</sup>

## 2. Retrospektive Betrachtung von Unfallzahlen:

Das Potential zur Vermeidung von Fahrurfällen durch ein besser an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten konnte vor wenigen Jahren durch die Einführung des elektronischen Stabilitätsprogramms ESP nachgewiesen werden. ESP unterstützt den Fahrer in kritischen Situationen, indem es die Schleudergefahr in Kurvenfahrt, während Ausweichsituationen oder in Bremsmanövern durch gezielte Einzelradbremsung verringert.<sup>241</sup> Radselektive Einzelradbremsen nehmen also Einfluss auf das Fahrverhalten, indem die Fahrzeugreaktion auf Fahrereingaben in Richtung eines stabileren Fahrzustandes verändert wird. Die nachträgliche Betrachtung der Unfallstatistik von Fahrzeugen, die mit ESP ausgestattet sind, ergibt nach den von Fach et al. in Bild 2.16 zusammengefassten Studien mehrerer Fahrzeughersteller (DaimlerChrysler, Toyota, VW, Renault/Peugeot, Ford) und von Behörden (NHTSA, IHS, SRA Schweden) eine signifikante Verringerung von Fahrurfällen bzw. ESP-sensitiven Unfällen im Vergleich zu Fahrzeugen ohne ESP.

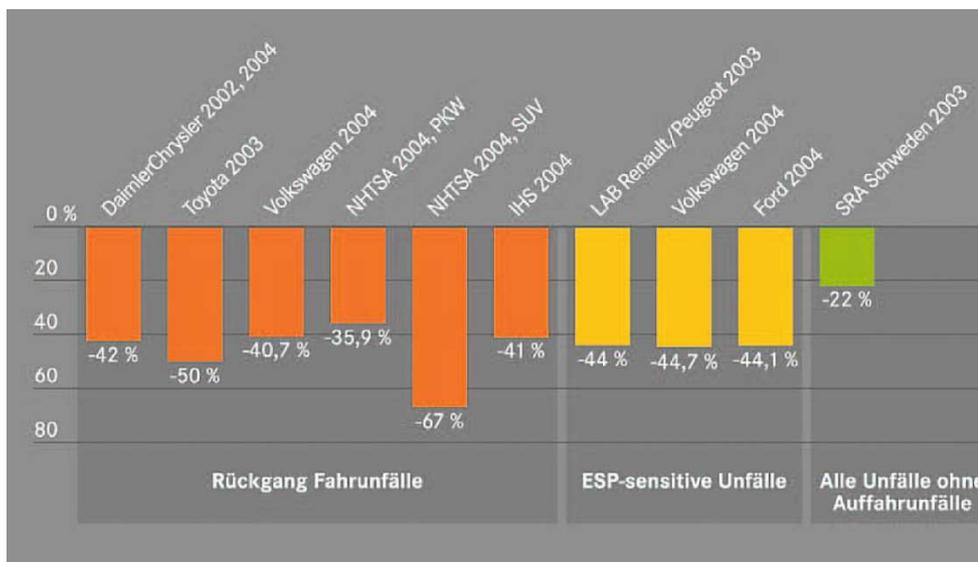


Bild 2.16 Statistisch nachgewiesene Wirksamkeit von ESP bei der Vermeidung von Unfällen, zusammengestellt von Fach et al.<sup>242</sup>

Die Ergebnisse der Studien ohne Unterscheidung der jeweiligen Fahrzeugklasse liefern vergleichbare Ergebnisse des Rückgangs an Fahrurfällen bzw. ESP-sensitiven Unfällen im Bereich zwischen 40-50 %. Eine Ausnahme stellt die in Bild 2.16 angeführte schwe-

<sup>240</sup> Vorndran (2007): Unfallgeschehen im Straßenverkehr

<sup>241</sup> Mücke, Breuer (2007): Bewertung von Sicherheitssystemen im Fahrversuch

<sup>242</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme, S. 70

dische Studie dar (Bild 2.16, rechts, -22 %), in der alle Verkehrsunfälle bis auf Auffahrunfälle gemeinsam betrachtet werden. Die Verkehrssicherheitsbehörde der USA (NHTSA) weist zusätzlich auf einen im Vergleich zu PKW deutlicheren Rückgang von Fahrnfällen bei SUVs hin (67 % zu 36 %).<sup>243</sup> Neben der nachträglichen Analyse von Unfallzahlen existieren zusätzlich Probandenstudien in Realfahrten und an Fahr simulatoren, die eine Wirksamkeit des ESP zur nahezu vollständigen Vermeidung von Schleuderunfällen belegen.<sup>244,245,246</sup>

### 3. Rückschluss auf verbleibende Optimierungspotentiale:

Mit Einführung des ESP werden rückblickend zuvor ungenutzte Potentiale zur Verbesserung des Fahrverhaltens aufgezeigt und genutzt. Der Rückgang von Fahrnfällen um ca. 40-50 % bestätigt die Annahme, dass menschliches Falschverhalten zwar stets als die Hauptursache von Verkehrsunfällen genannt wird, zahlreiche Fahrnfälle aber dennoch durch ein optimal an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten vermeidbar sind. In den letzten Jahren stagniert der Anteil von Fahrnfällen am gesamten Unfallgeschehen.<sup>247,248</sup> Dieser Umstand könnte darin begründet liegen, dass keine weitere Verbesserung des Fahrverhaltens der am Straßenverkehr teilnehmenden Fahrzeuge im Hinblick auf die Fahrsicherheit erzielt wurde, aber auch auf ein fehlendes weiteres Optimierungspotential des Fahrverhaltens hinweisen.

Die Gegenüberstellung der objektiven Bewegungskennwerte eines Fahrzeugs aus Kapitel 2.2.2 mit dessen tatsächlicher Unfalldisposition im realen Straßenverkehr könnte dieser Fragestellung nachgehen und Hinweise auf konkrete Verbesserungspotentiale des Fahrverhaltens von einzelnen im Markt befindlichen Fahrzeugen liefern. Hierzu fehlen jedoch fahrzeugindividuelle Statistiken und zudem könnte das Ergebnis durch den jeweiligen Fahrerkreis eines Fahrzeugs (vgl. Sportwagen und Limousine) mit abweichender mittlerer Ausprägung von Fahrfertigkeit und Fahrstil<sup>249</sup> nicht eindeutig einem Einfluss des Fahrverhaltens zugeordnet werden. Ob eine weitere Reduzierung von Fahrnfällen durch die Verbesserung des Fahrverhaltens möglich ist, kann also aus den aktuellen Unfallzahlen nicht abgeleitet werden. Der nach wie vor hohe Anteil von Fahrnfällen an der gesamten Anzahl tödlicher Unfälle (ca. 40 %) schließt ein weiteres Verbesserungspotential des Fahrverhaltens hinsichtlich eines verbesserten Kurshaltevermögens durch Normalfahrer zumindest nicht aus.

---

<sup>243</sup> NHTSA (2004): Preliminary Results Analysing the Effectiveness of ESC, Evaluation Note

<sup>244</sup> Faulhaber (2003): Wirksamkeit und Akzeptanz des ESP durch Normalfahrer

<sup>245</sup> Papelis et al. (2004): Study of ESC Assisted Driver Performance Using a Driving Simulator

<sup>246</sup> Yamamoto, Kimura (1996): Influence of ABS on Rollover Accidents

<sup>247</sup> Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010

<sup>248</sup> Vorndran (2007): Unfallgeschehen im Straßenverkehr

<sup>249</sup> Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen

### 2.3.3 Regelkreis Mensch-Fahrzeug

Einen weiteren Ansatz zur Analyse möglicher Optimierungspotenziale des Fahrverhaltens hinsichtlich einer verbesserten Stabilisierbarkeit durch Normalfahrer stellt die Betrachtung des Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug während der Kursführungsaufgabe dar. Seit den 50er- und 60er-Jahren wird neben dem Versuch der Objektivierung von Subjektivurteilen in standardisierten Testverfahren daher auch daran geforscht, das Zusammenwirken zwischen Fahrer und Fahrzeug besser zu verstehen und in Form von sogenannten *Fahrermodellen* beschreiben zu können, siehe z.B. Enke<sup>250</sup>, Fiala<sup>251</sup> und Kondo<sup>252</sup>. Diese Fahrermodelle beschreiben den geschlossenen Regelkreis und reichen von der abstrakten Veranschaulichung der Kursführungsaufgabe bis hin zu konkreten regelungstechnischen Anwendungen. Nach Zomotor ist ein Unfall hierbei immer das Resultat des Versagens einer oder mehrerer Komponenten des Regelkreises.<sup>253</sup>

Ein bekanntes Modell zur Veranschaulichung der Fahrzeugführung ist das 1982 von Donges<sup>254</sup> vorgestellte „3-Ebenen“ Modell, welches auf der Theorie zielgerichteter menschlicher Tätigkeiten von Rasmussen<sup>255</sup> beruht. Nach Rasmussen wird zwischen *wissensbasiertem*, *regelbasiertem* und *fertigkeitsbasiertem* Verhalten unterschieden, siehe Bild 2.17 (links). Die sensorischen Informationen stoßen demnach entweder einen Entscheidungsprozess an (wissensbasiertes Verhalten), erlauben eine bewusste assoziative Zuordnung zu einer zielführenden Handlung (regelbasiertes Verhalten) oder führen zu einer direkten und unbewussten sensumotorischen Reaktion. Nach Donges können die Aufgaben des Fahrers nach folgender Entsprechung in die Verhaltenskategorien von Rasmussen eingeteilt werden:

- Wissensbasiertes Verhalten: Navigation und Routenplanung auf Basis von Informationen zum Straßennetz
- Regelbasiertes Verhalten: Bewusste Auswahl von Führungsgrößen (Sollkursverlauf und Sollgeschwindigkeit)
- Fertigkeitsbasiertes Verhalten: Weitestgehend unbewusste Stabilisierung der Istgrößen des Fahrzeugs auf den gewählten Führungsgrößen unter Einflussnahme auf die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs.

---

<sup>250</sup> Enke (1966): Zusammenwirken von Fahrzeuglenker und Automobil, S.37ff

<sup>251</sup> Fiala, Wallner (1968): Untersuchung des Systems Fahrzeug-Fahrer bei einer Lenkung mit Zeitvorhalt

<sup>252</sup> Kondo (1953): Directional stability (when steering is added)

<sup>253</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 330

<sup>254</sup> Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183ff

<sup>255</sup> Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

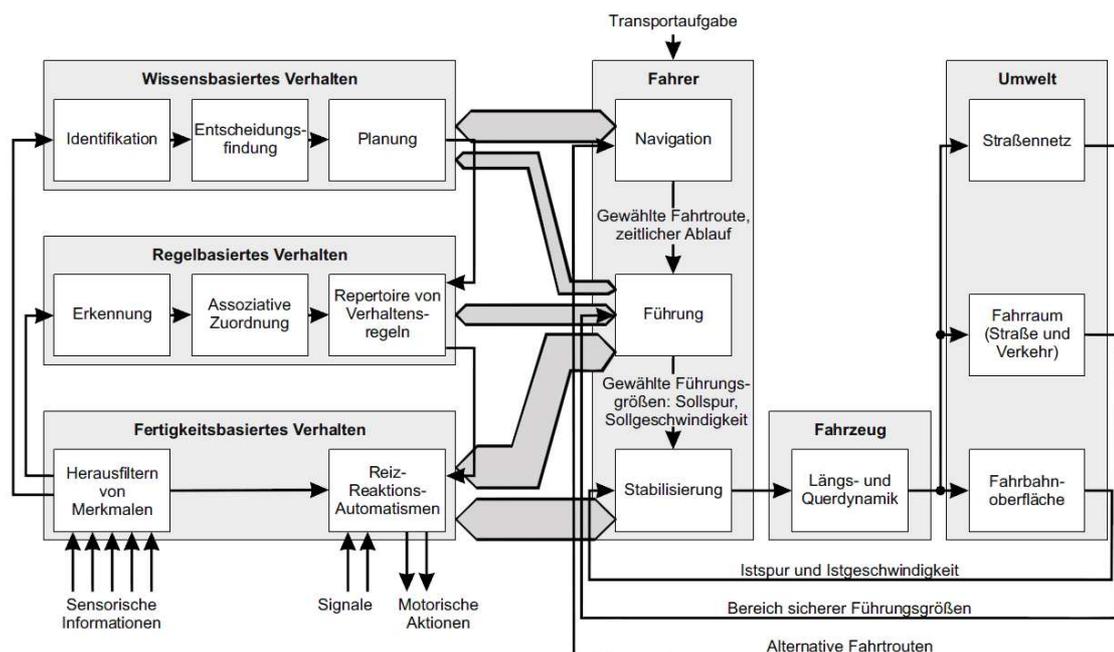


Bild 2.17 Kombination des 3-Ebenen Modells für zielgerichtete menschliche Tätigkeiten von Rasmussen<sup>256</sup> mit dem hierarchischen 3-Ebenen Modell der Fahrzeugführung nach Donges<sup>257</sup>, dargestellt von Donges<sup>258</sup>

Der „dynamische Prozess“ des Fahrens findet nach Donges hierbei auf der bereits diskutierten Führungs- und Stabilisierungsebene statt.<sup>259</sup> Demnach ist die bewusste antizipatorische Regelung auf der Führungsebene als eine Art Vorsteuerung (Open-Loop) zu sehen, während die unbewusste Nachregelung auf der Stabilisierungsebene die Regelabweichungen zwischen Soll- und Istgrößen reduzieren soll (Closed-Loop). Donges räumt, wie bereits erwähnt wurde, aber auch ein, dass der Übergang zwischen regelbasiertem Verhalten und reflektorischer Handlung fließend sei. Der Anteil der bewussten Handlungen zur Stabilisierung des Fahrzeugs nimmt nach Donges mit steigender Fahrerfahrung ab, weshalb sich der auftretende Zeitverzug einer Reaktion des Fahrers zur Stabilisierung des Fahrzeugs reduziert. Dieser Umstand ist für die Bewältigung einer kritischen Fahrsituation von Bedeutung, da in Abhängigkeit der Handlungsebene nach Donges und Bild 2.18 unterschiedliche Zeithorizonte einer notwendigen Fahrerhandlung auf ein potentiell kritisches Ereignis resultieren: Ist eine bewusste Entscheidung auf der Führungsebene erforderlich, können mehrere Sekunden oder sogar Minuten bis zur Handlungsauslösung notwendig sein, während auf der Stabilisierungsebene eine direkte Reaktion im niedrigen Sekundenbereich möglich ist.

<sup>256</sup> Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

<sup>257</sup> Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183ff

<sup>258</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle, S. 15

<sup>259</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle, S. 16f

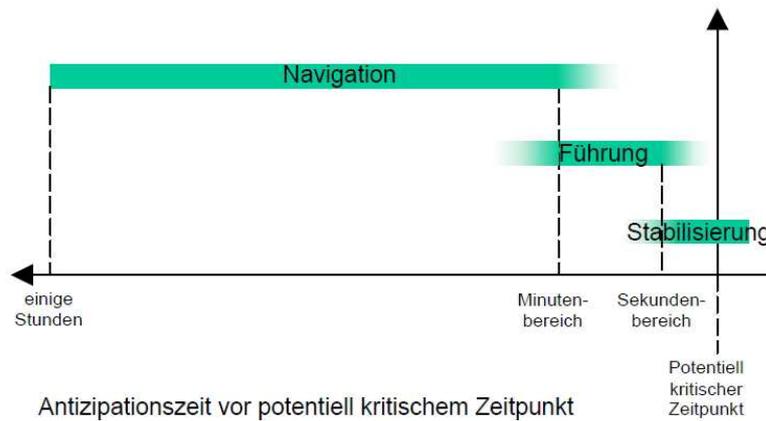


Bild 2.18 Typische Zeithorizonte der Fahrerhandlungen auf Navigations-, Bahnführungs-, und Stabilisierungsebene nach Donges<sup>260</sup>, zusammengefasst von Braess/Donges<sup>261</sup>

Nach Braess/Donges ist die Reaktionszeit auch von der Komplexität der zu verarbeitenden Gefahrensituation abhängig, sprich davon, ob bewusste Handlungsschritte notwendig werden. Dahingegen scheint ein hoher Aufforderungsgrad die Reaktionszeit signifikant zu verringern, siehe Untersuchungsergebnisse von Zomotor<sup>262</sup> und Stanczyk<sup>263</sup>. Tabelle 2.5 zeigt eine Übersicht der bekannten Aussagen zu ermittelten oder angenommenen Reaktionszeiten in Abhängigkeit der auftretenden Situation. Als allgemeine Reaktionszeit ohne konkreten Bezug zur Situation nimmt das Oberlandesgericht Hamburg 1979 nach Krochmann<sup>264</sup> eine Reaktionszeit von maximal 0,8 s bzw. 0,3 s bei „guten Fahrern“ an. Die minimale Reaktionszeit aus physiologischer Sicht liegt nach Krochmann bei 0,16 s. Bosch<sup>265</sup> nennt Reaktionszeiten größer als 0,3 s, verweist aber auf die starke Abhängigkeit von persönlichen und äußeren Faktoren: Eingübte Reflexhandlungen führen demnach neben einer guten körperlichen Verfassung und einer gut zu überblickenden, auffälligen Situation zu einer kleineren Reaktionszeit. Notwendige „Wahlhandlungen“, komplizierte und schwer erkennbare Situationen verzögern nach Bosch hingegen analog zur Aussage von Braess/Donges<sup>266</sup> die notwendige Reaktion.

<sup>260</sup> Donges (1977): Untersuchung und Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern

<sup>261</sup> Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen, S. 9

<sup>262</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>263</sup> Stanczyk, Jurecki (2008): Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen

<sup>264</sup> Krochmann (1979): Reaktionszeit von Kraftfahrern

<sup>265</sup> Robert Bosch GmbH (2004): Fahrstabilisierungssysteme, S. 12f

<sup>266</sup> Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen, S. 9

Tabelle 2.5 Übersicht der in bekannten Studien ermittelten und veröffentlichten Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Situation bzw. des Reizes, teilweise enthalten bei Dietrich<sup>267</sup>

| Situation/Reiz                         | Quelle              | Jahr | genannte Reaktionszeiten  |
|--|---------------------|------|---|
| Allgemeine Reaktionszeit von Fahrern   | Krochmann           | 1979 | Oberlandesgericht Hamburg:<br>maximal <b>0,8 s</b> , bei guten Fahrern <b>0,3 s</b><br>minimal mögliche physiologische Reaktionszeit: <b>0,16 s</b> |
|  | Bosch GmbH          | 2004 | > <b>0,3 s</b> , starke Abhängigkeit von inneren und äußeren Faktoren   |
| Bremung auf Fußgänger                  | Zomotor             | 1991 | abhängig vom Aufforderungsgrad (jeweils 5%-95%)<br>niedrig.: ca. <b>0,85-1,6 s</b> , hoch: ca. <b>0,3-1,17 s</b>                                    |
| Bremung auf ein Hindernis              | Stanczyk et al.     | 2008 | abhängig vom Abstand zum Hindernis (jeweils 5%-95%)<br>großer Abst.: ca. <b>0,25-0,8 s</b> , geringer Abst.: ca. <b>0,15-0,6 s</b>                  |
| Bremung auf Vorderfahrzeug             | Mücke/Breuer        | 2007 | <b>0,4-0,6 s</b>  |
|  | Krochmann           | 1979 | bei Tag: <b>0,57-0,9 s</b> (5 %, 99 %)<br>bei Nacht: <b>0,69-1,15 s</b> (5 %, 99 %)   |
| Lenkmomentenstörung (Impuls)           | Krüger              | 2000 | <b>0,07 s</b> aus Eigenreflex der Haltermuskulatur,<br>Erhöhung der Greifkräfte zwischen <b>0,08-0,12 s</b>   |
| Lenkmomentenstörung (Rechteckfunktion) | Neukum et al.       | 2009 | kompensatorische Lenkeingabe ab ca. <b>0,18-0,22 s</b>  |
| Lenkmomentenstörung (Rampe)            |                     |      | ca. <b>0,7 s</b>  |
| Lenkmomentenänderung                   |                     |      | <b>0,15 s</b> (Mittelwert)  |
| Querschleunigungsänderung              | Mitschke et al.     | 1974 | <b>0,2 s</b> (Mittelwert)   |
| Gierwinkeländerung                     |                     |      | <b>0,3 s</b> (Mittelwert)   |
| Stabilisierung (Fahrermodell)          | Donges              | 2009 | Totzeit ca. <b>0,5 s</b>  |
| Störung der Kurshaltung                | Wallentowitz et al. | 2002 | ca. <b>0,8-1,0 s</b>  |

In vier der bekannten Studien aus Tabelle 2.5 wird die Reaktionszeit von Fahrern in Bremssituationen untersucht: Zomotor ermittelt bei Bremsung auf unterschiedlich auffällige Fußgänger-Attrappen bei hohem Aufforderungsgrad (gute Sichtbarkeit, plötzliches Auftreten) eine signifikant niedrigere Reaktionszeit (ca. 0,3-1,17 s) als bei Bremsung auf schlecht sichtbare Fußgänger (ca. 0,85-1,6 s).<sup>268</sup> Auch Stanczyk et al. ermitteln eine deutliche Abhängigkeit der Bremsreaktionszeit in Abhängigkeit des Aufforderungsgrades. Bremsungen auf Hindernisse in Nahdistanz erfolgen demnach signifikant schneller (0,15-0,6 s) als Bremsungen auf weiter entfernte Hindernisse (0,25-0,8 s).<sup>269</sup> Mücke/Breuer ermitteln 2007 eine Reaktionsspanne von 0,4-0,6 s bei Bremsung auf ein Vorderfahrzeug.<sup>270</sup> Die von Krochmann 1979 angegebenen Reaktionszeiten liegen mit 0,57-0,9 s bei ungestörten Sichtbedingungen und 0,69-1,15 s bei Nacht deutlich über dieser Angabe aus.<sup>271</sup> Die unterschiedlichen Ergebnisse bestätigen die Vermutung einer Abhängigkeit der Reaktionszeiten von äußeren Einflussfaktoren und insbesondere dem Aufforderungsgrad einer Situation. Gut sichtbare und plötzlich im Nahbereich vor dem Fahrzeug auftretende Bremsziele führen nach den zitierten Studien zusammenfassend zu einer Minimierung der Reaktionszeit.

<sup>267</sup> Dietrich (2009): Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten, S. 53ff

<sup>268</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 335ff

<sup>269</sup> Stanczyk, Jurecki (2008): Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen

<sup>270</sup> Mücke, Breuer (2007): Bewertung von Sicherheitssystemen im Fahrversuch

<sup>271</sup> Krochmann (1979): Reaktionszeit von Kraftfahrern

Weitere auf die querdynamische Kursführung bezogene Reaktionszeiten werden in Untersuchungen zu Lenkmomentenstörungen und in einer Studie zur Kursführung bei schiefziehenden Bremsen abgeleitet: Bei impulsartigen Lenkmomentenänderungen tritt nach Krüger bereits nach 0,07 s eine Reaktion durch den Eigenreflex der Haltemuskulatur auf.<sup>272</sup> Neukum et al.<sup>273</sup> belegen eine Erhöhung der Greifkräfte bei Lenkmomentenstörungen in Rechteckform nach bereits 0,08-0,12 s und eine kompensatorische Lenkeingabe ab ca. 0,18-0,22 s bzw. 0,2-0,25 s<sup>274</sup> in einer weiteren Veröffentlichung. Bei nicht schlagartig spürbarer, rampenförmiger Erhöhung der Lenkmomentenstörung erfolgt eine Reaktion nach Neukum et al. hingegen erst nach ca. 0,7 s. Das Lenkmoment ist nach Neukum et al. die zentrale Feedback-Größe für den Fahrer. Die durch den Fahrer eingebrachte Lenkgeschwindigkeit zur Kompensation einer Störung ist dabei in etwa proportional zu der störungsinduzierten Lenkradgeschwindigkeit. Bei hohen störbedingten Lenkgeschwindigkeiten werden teilweise sogar stärkere Fahrerreaktionen im Vergleich zur Ausgangsstörung beobachtet, was zu einer destabilisierenden Überkompensation der Störung hinsichtlich der querdynamischen Kursführungsaufgabe führen kann.<sup>275</sup>

Bereits 1974 untersuchen Mitschke/Niemann<sup>276</sup> die Fahrerreaktion infolge von schiefziehenden Bremsen mit dem Ziel, die gemessenen Lenkreaktionen des Fahrers über Koeffizientenbestimmung eines regelungstechnischen Fahrermodells zu erklären. Nach seinen Ergebnissen reagiert der Fahrer bereits nach 0,15 s auf Lenkmomentenänderungen, was mit den Ergebnissen von Neukum et al. vergleichbar ist. Die Reaktion auf Änderungen der Querschleunigung erfolgt nach 0,2 s und ab 0,3 s reagieren die Fahrer der Koeffizientenanalyse zufolge auch auf Änderungen des Gierwinkels. Donges<sup>277</sup> untersucht die Reaktionszeit (Totzeit) des Fahrers ebenfalls durch die Methode der Anpassung von Parametern eines Fahrermodells an das real erfasste Fahrerverhalten während der Stabilisierung des Fahrzeugs. Als Ergebnis wird eine mittlere Totzeit von ca. 0,5 s genannt. Die Totzeit sei jedoch von der Zeit abhängig, die dem Fahrer zur Stabilisierung des Fahrzeugs zur Verfügung steht: Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sinkt die Totzeit des Fahrers demnach deutlich ab, da die Stabilitätsreserve der Fahrzeugquerdynamik mit steigender Fahrgeschwindigkeit abnehme. Die bestimmte Totzeit von 0,5 s liegt wiederum deutlich unter der allgemeinen Angabe von 0,8-1 s durch Wallentowitz<sup>278</sup> in Bezug auf Fahrerreaktionen zur Kompensation von Störungen in der Kurshaltung.

---

<sup>272</sup> Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

<sup>273</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

<sup>274</sup> Neukum et al. (2010): Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung

<sup>275</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

<sup>276</sup> Mitschke, Niemann (1974): Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen

<sup>277</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

<sup>278</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

### 2.3.4 Anwendung von Fahrermodellen zur Bewertung der Fahrsicherheit

In den Untersuchungen von Donges<sup>279</sup> und Wallentowitz<sup>280</sup> wird deutlich, dass regelungstechnische Fahrermodelle dazu verwendet werden können, die Regelungstätigkeiten des Fahrers zur Kurshaltung nachzubilden und zu analysieren. In diesem Abschnitt wird daher auf die bekannten Ansätze zur mathematischen und logischen Beschreibung von Fahrermodellen eingegangen und ihre heutige Anwendbarkeit zur Bewertung der Fahrsicherheit diskutiert. Die mögliche Idealvorstellung formulieren Zomotor et al. 1977 als die Ermittlung von optimalen Fahreigenschaften des Fahrzeugs auf alleiniger Basis von „virtuellen Fahren“.<sup>281</sup>

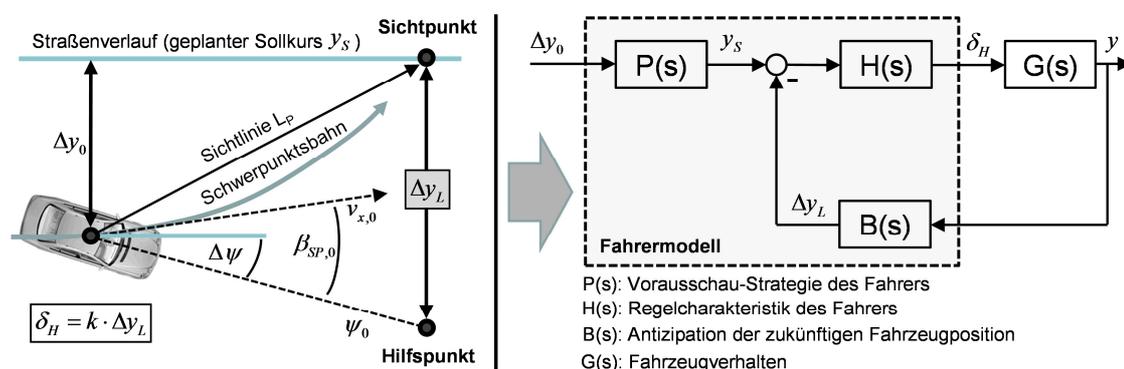


Bild 2.19 Fahrermodell zur Ausregelung von Querabweichungen nach Kondo<sup>282</sup> (links) und allgemeiner Basisregelkreis Mensch-Fahrzeug für sogenannte Vorausschaumodelle (rechts), z.B. nach Keen<sup>283</sup> oder Plöchl/Edelmann<sup>284</sup>

Bild 2.19 (links) zeigt den frühen Ansatz eines regelungstechnischen Fahrermodells zur Beschreibung des Kursführungsverhaltens während der Ausregelung einer initialen Querabweichung  $\Delta y_0$  nach Kondo 1953. Der virtuelle Fahrer schätzt nach diesem Modell die zukünftige Querabweichung des Fahrzeugschwerpunkts  $\Delta y_L$  in einer bestimmten Vorausschauweite  $L_p$  ab, indem er den Abstand zwischen der Verlängerung der Fahrzeug-X-Achse (Hilfspunkt) und dem Sichtpunkt im Abstand  $L_p$  auf dem gewählten Sollkurs  $y_{Soll}$  prädiziert. Die resultierende Lenkradwinkeleingabe  $\delta_H$  des Fahrers wird als proportional zur antizipierten Querabweichung  $\Delta y_L$  angenommen.

$$\delta_H = k \cdot \Delta y_L \tag{2.29}$$

<sup>279</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

<sup>280</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>281</sup> Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>282</sup> Kondo (1953): Directional stability (when steering is added)

<sup>283</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 6

<sup>284</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 703

Das so gebildete Fahrermodell von Kondo ist in der Lage, einfache Kursabweichungen durch auftretenden Seitenwind auszuregeln. Alle Modelle, die auf einer Vorausschaustrategie des Fahrers beruhen, können durch den Basisregelkreis aus Bild 2.19 (rechts) beschrieben werden. Hierbei repräsentiert das Übertragungsglied  $P(s)$  nach Plöchl/Edelmann<sup>285</sup> die Vorausschau-Strategie des Fahrers für die Führungsgröße  $y_s$ ,  $H(s)$  entspricht dem Regelverhalten des Fahrers zur Kompensation der Querabweichung mit der Stellgröße  $\delta_H$ ,  $G(s)$  ist die Übertragungsfunktion des Fahrzeugs (Fahrzeugverhalten) und  $B(s)$  steht für die Antizipation der zukünftigen Regelabweichung  $\Delta y_L$  oder weiteren Bewegungszuständen des Fahrzeugs - z.B. der Gierwinkelfehler  $\Delta\psi$  oder der Krümmungsabweichung  $\Delta\kappa$  bei Donges<sup>286</sup> - auf Basis der aktuellen Istgrößen des Fahrzeugs. Diese Aufteilung entspricht im Wesentlichen der Einteilung der Handlungsebenen nach Donges aus Bild 2.17<sup>287</sup> mit

- $P(s)$  = Kursführungsebene (Auswahl sicherer Führungsgrößen)
- $H(s) + B(s)$  = Stabilisierungsebene.

Für das Fahrermodell von Kondo ergibt sich nach Plöchl/Edelmann mit der Vorausschauzeit  $T_p = L_p / v_x$  die regelungstechnische Entsprechung

$$P(s) = B(s) = e^{-T_p s}; H(s) = k. \quad (2.30)$$

Auf Basis des allgemeinen Regelkreises für Vorausschaumodelle aus Bild 2.19 (rechts) können beliebige Erweiterungen der Fahrermodelle durch eine Anpassung von  $P(s)$ ,  $H(s)$  und  $B(s)$  abgeleitet werden. Die weitere Entwicklung der Fahrermodelle seit 1953 ist 2007 bereits von Plöchl/Edelmann und 2008 von Keen<sup>289</sup> umfangreich zusammengetragen worden. Demnach beziehen sich die meisten Fahrermodelle auf die Ausregelung von seitlichen Kursabweichungen innerhalb eines Vorausschauintervalls.<sup>290</sup> Die charakteristischen Übertragungsglieder des Vorausschaumodells werden in den 70er-Jahren unter zusätzlicher Einbeziehung des Gierwinkelfehlers  $\Delta\psi$  oder der Bahnkrümmungsdifferenz  $\Delta\kappa$  erweitert.<sup>291,292,293</sup> Der mit Abstand stärkste Anteil im Regelverhalten des Fahrers  $H(s)$  ist nach Donges durch die Gierwinkeldifferenz  $\Delta\psi$  gegeben (P-Anteil), gefolgt

<sup>285</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 702

<sup>286</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

<sup>287</sup> Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183ff

<sup>288</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 703

<sup>289</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 3ff

<sup>290</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 702ff

<sup>291</sup> Donges (1978): A two-level model of driver steering behaviour

<sup>292</sup> McRuer et al. (1977): New results in driver steering control models, S. 381ff

<sup>293</sup> McRuer et al. (1975): Measurement of driver-vehicle multiloop response properties with a single disturbance input, S. 490ff

von der Reaktion auf Krümmungsdifferenzen  $\Delta\kappa$  (D-Anteil) und der Ausregelung von Querabweichungen  $\Delta y$  (I-Anteil).<sup>294</sup> Nach Meyer-Tuve/Heißing bezieht der Fahrer die für ihn wichtigen Rückmeldungen zu 90 % über optische Signale.<sup>295</sup> Das „2-Ebenen“-Fahrermodell von Donges<sup>296</sup> unterscheidet in die bereits aus Bild 2.17 bekannten Handlungskategorien „Kursführung“ (Open-Loop-Vorsteuerung) und „Stabilisierung“ (Closed-Loop-Regelung) und wird in weiteren Forschungsarbeiten ergänzt, um beispielsweise das Lenkverhalten von Fahrern im nichtlinearen Bereich besser abbilden zu können oder Randbegrenzungen der Fahrbahn zu berücksichtigen. Hierzu wird u.a. eine Adaption des Fahrerhaltens an das Fahrzeugverhalten vorgesehen<sup>297</sup> und eine weitere Ebene zur Positionskontrolle eingeführt.<sup>298</sup>

In den Erweiterungen von Fahrermodellen aus den 80er- und 90er-Jahren werden gleichzeitig aber auch die Schwierigkeiten bei der exakten Nachbildung der Regeltätigkeiten des Fahrers deutlich. Diese bestehen in der Anpassung des Fahrerhaltens an ein variierendes und teilweise nichtlineares Fahrzeugverhalten auf der Stabilisierungsebene und in der Berücksichtigung von Entscheidungshandlungen des Fahrers auf der Kursführungsebene. Fahrer erlernen das Lenkverhalten nach McAdam im linearen Bereich<sup>299</sup> und adaptieren ihre Regeltätigkeiten an das Fahrzeugverhalten, siehe Ungoren/Peng.<sup>300</sup> Diese Adaption entspricht nach Ungoren/Peng in der Regelungstechnik einer Invertierung des Fahrzeugverhaltens  $G(s)$  in der Übertragungsfunktion des Reglers  $H(s)$  und einer verbesserten Antizipation des zukünftigen Fahrzeugverhaltens in  $B(s)$  durch Kenntnis des tatsächlichen Fahrzeugverhaltens. Beispiele für nichtlineare Fahrzeugregler sind neben Bösch<sup>301</sup> auch bei Mayr/Freund<sup>302</sup> oder Vögel et al.<sup>303</sup> zu finden. Eine Möglichkeit, sowohl Nichtlinearitäten zu berücksichtigen als auch menschliche Entscheidungsprozesse nachzubilden, sind nach Plöchl/Edelmann sogenannte Fuzzy Logic Controller (FLC).<sup>304</sup> Durch FLC werden einfache „wenn – dann“-Verknüpfungen erstellt und hiermit versucht, menschliches Denken und Entscheiden nachzubilden.<sup>305,306</sup> Auf diese Weise können allgemeine Regeln für die Kursführung oder Stabilisierung formuliert werden, z.B. zurückhaltendere Lenktätigkeiten bei hohen Fahrgeschwindig-

---

<sup>294</sup> Donges (2009): Fahrerhaltensmodelle

<sup>295</sup> Meyer-Tuve, Heißing (2007): Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik

<sup>296</sup> Donges (1978): A two-level model of driver steering behaviour

<sup>297</sup> Bösch (1991): Der Fahrer als Regler

<sup>298</sup> Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

<sup>299</sup> McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

<sup>300</sup> Ungoren, Peng (2005): An adaptive lateral preview driver model, S. 245ff

<sup>301</sup> Bösch (1991): Der Fahrer als Regler

<sup>302</sup> Mayr, Freund (1992): Design of nonlinear path control in automated vehicle guidance, S. 613ff

<sup>303</sup> Vögel et al. (2003): An optimal control approach to real-time vehicle guidance, S. 84ff

<sup>304</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 712ff

<sup>305</sup> Zadeh et al. (1997): Neural network and fuzzy logic applications to vehicle systems, S. 132ff

<sup>306</sup> Zeyada et al. (2000): Driver modeling using fuzzy logic controls

keiten<sup>307</sup> oder die Wahl maximaler Längsverzögerungen.<sup>308</sup> Bei Xi/Qun wird 1994 durch FLC ein Regelansatz mit 49 sich selbst organisierenden Regeln vorgestellt.<sup>309</sup> Seit den 90er-Jahren werden auch neuronale Netze (NN) zur Eignung für Fahrermodelle untersucht, z.B. von Kageyama et al.<sup>310</sup> oder Kraiss/Küttelwesch<sup>311</sup>, und erzielen nach Kageyama eine befriedigende Annäherung an reale Fahrerhandlungen in Kreisfahrten. Darüber hinaus werden Kombinationen von verschiedenen Regelungskonzepten in „hybriden Fahrermodellen“ vorgenommen, siehe Jürgensohn.<sup>312</sup> Die Verwendung von FLC oder NN umfasst hierbei i.d.R. die Abbildung von regelbasierten Prozessen auf der Kursführungsebene zur Verarbeitung von Umgebungsinformationen.<sup>313,314,315,316</sup> Für die Nachbildung des Closed-Loop-Regelkreises zur Stabilisierung des Fahrzustandes haben sich hingegen nach Donges (2009) die Methoden der klassischen Regelungstechnik bewährt.<sup>317</sup>

Die Anwendbarkeit von Fahrermodellen ist im Hinblick auf das von Zomotor ausgegebene Ziel der Optimierung des Fahrzeugverhaltens auf Basis virtueller Testfahrer umstritten. So kritisiert Jürgensohn 1997 den Umstand, dass Fahrermodelle in der Fahrzeugentwicklung praktisch keine Verwendung fänden.<sup>318</sup> Zudem sei, ebenfalls nach Jürgensohn, der Testfahrer für die Subjektivbeurteilung des Fahrverhaltens kaum ersetzbar und es könne kein einheitliches Fahrermodell für alle Anwendungen geben.<sup>319</sup> Plöchl/Edelmann verweisen 2007 auf das Missverhältnis zwischen dem hochgradig nichtlinearen Fahrzeugverhalten und den internen Vorausschaumodellen der Fahrermodelle und beschreiben die Simulation des Closed-Loop-Verhaltens im Grenzbereich daher als „unmögliche Herausforderung“.<sup>320</sup> Auch Meyer-Tuve/Heißing<sup>321</sup> sehen die Darstellung des Grenzbereichs 2007 als problematisch an, wohingegen Lin et al.<sup>322</sup> 2004 die gegebene Möglichkeit beschreiben, die Fahrbarkeit und Fahrsicherheit eines Fahrzeugs anhand von Fahrermodellen beschreiben zu können. Hierfür sprechen ebenfalls

---

<sup>307</sup> Hessburg, Tomizuka (1994): Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance, S. 55ff

<sup>308</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 213ff

<sup>309</sup> Xi, Qun (1994): Driver-vehicle-environment closed-loop simulation of handling and stability using fuzzy control theory, S. 172ff

<sup>310</sup> Kageyama et al. (1999): Driver's Control Algorithm using Neural Network Modeling

<sup>311</sup> Kraiss, Küttelwesch (1990): Teaching neural networks to guide a vehicle

<sup>312</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 177ff

<sup>313</sup> Cheng, Fujioka (1997): A hierarchical driver model

<sup>314</sup> Kageyama, Pacejka (1991): On a new driver model with fuzzy control, S. 314ff

<sup>315</sup> Kageyama et al. (1999): Driver's Control Algorithm using Neural Network Modeling

<sup>316</sup> Song et al. (2000): Cognitive and hybrid model of human driver, S. 1ff

<sup>317</sup> Donges (2009): Fahrerhaltensmodelle

<sup>318</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 11

<sup>319</sup> Willumeit, Jürgensohn (1999): Fahrermodelle - ein kritischer Überblick

<sup>320</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 724

<sup>321</sup> Meyer-Tuve, Heißing (2007): Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik

<sup>322</sup> Lin et al. (2004): Stability and Performance Studies of Electronic Chassis Control

einige in der jüngeren Vergangenheit durchgeführte Studien, die auf Basis der Verwendung von Fahrermodellen Rückschlüsse auf die Fähigkeiten von Normalfahrern in der Stabilisierungsebene zulassen und somit potentiell auch Gestaltungshinweise für ein sicheres Fahrzeugverhalten liefern können:

In der Studie von Keen<sup>323</sup> wird 2008 zur Nachbildung der Lenktätigkeiten eines Probandenkollektivs im VDA-Ausweichtest ein Ansatz aus einem Vorausschaumodell mit mehreren Referenzpunkten und einem internen Fahrzeugmodell des Fahrers verwendet. Die Parameter des Modells werden für jeden Fahrer anhand der real erfassten Lenktätigkeiten bestimmt. Das Ergebnis zeigt eine hohe Streubreite der Lenktätigkeiten und ermittelten Modellparameter für verschiedene Fahrer. Die Lenktätigkeiten eines einzelnen Fahrers folgen nach Keen hingegen einem individuellen Muster und das „Fähigkeitslevel“ eines Fahrers lasse sich vor allem durch das Verständnis des nichtlinearen Bereiches des Fahrzeugverhaltens ausdrücken. Diese Aussage deckt sich mit einer Studie zum doppelten Fahrspurwechsel von Müller-Beßler et al.<sup>324</sup> 2008, der zufolge Normalfahrer keine bleibenden Erfahrungen im nichtlinearen Bereich des Fahrzeugverhaltens besitzen. Die im linearen Bereich erlernten Fahrfertigkeiten sind nach Müller-Beßler et al. zwar tendenziell richtig, eilen der Fahrzeugbewegung aber zu stark nach, während sogenannte „Profifahrer“ ein temporäres Übersteuern des Fahrzeugs mit gezielten und schnellen Lenkreaktionen stabilisieren können. Ein Fahrzeug sei für Normalfahrer daher umso besser beherrschbar, je eher das Fahrverhalten im Grenzbereich den Zusammenhängen aus dem linearen Bereich ähnelt. Ein System gilt generell als besser vorhersehbar durch den Menschen, wenn die Ordnung des Systems möglichst klein ist bzw. im Idealfall ein rein lineares System vorliegt.<sup>325</sup>

Wenzel et al.<sup>326</sup> untersuchen 2005 ebenfalls den doppelten Fahrspurwechsel auf Basis eines mathematischen Fahrermodells, um den Nutzen von einer Stabilitätskontrolle durch Überlagerungslenkung (AFS) nachzuweisen. Ohne AFS treten in Interaktion mit dem virtuellen Fahrer hierbei Schwimmwinkel  $\beta_{SP,max}$  bis zu  $7^\circ$  auf, mit aktiver Stabilisierung hingegen nur maximal  $3^\circ$  Schwimmwinkel. Gleichzeitig wird der Lenkbedarf des virtuellen Testfahrers durch AFS reduziert. Bereits 1995 wurde mittels eines erweiterten „2-Ebenen“ Fahrermodells das Stabilisierungspotenzial einer Hinterradschräglauflaufwinkelregelung (HSR) in  $\mu$ -split Bremsung und im ISO-Spurwechsel nachgewiesen. Dem Fahrermodell gelingt es mit aktiver HSR trotz dominantem Fahrereinfluss besser, der Solltrajektorie zu folgen.<sup>327</sup> In einer weiteren Studie zur Analyse des Lenkverhaltens

---

<sup>323</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 63ff

<sup>324</sup> Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

<sup>325</sup> Schmidtke, Bernotat (1993): Ergonomie, 3. Auflage

<sup>326</sup> Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

<sup>327</sup> Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

von Normalfahrern in Notsituationen werden die Probanden mit einem plötzlich vor dem Fahrzeug auftauchenden Hindernis konfrontiert.<sup>328</sup> Das Hindernis taucht entweder weit vor dem Fahrzeug oder in kurzer Distanz auf. Die erfassten Lenktätigkeiten werden anschließend dazu verwendet, die Modellparameter Vorausschauzeit  $T_p$  in  $P(s)$  und Verstärkungsfaktor  $k$  in  $H(s)$  des verwendeten Fahrermodells zu bestimmen. Es wird festgestellt, dass bei kurzer Distanz zum Hindernis höhere Verstärkungsfaktoren  $k_i$  und kürzere Vorausschauzeiten  $T_{p,i}$  auftreten als in „normaler“ Fahrt ohne auftretendes Hindernis. Tritt das Hindernis in einem größeren Abstand vor dem Fahrzeug auf, bleiben die Modellparameter hingegen nahezu konstant. Diese Studie von Nagai et al. belegt neben der bereits aus 2.3.3 bekannten Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Aufforderungsgrad einer Situation auch eine ansteigende Intensität der Stabilisierungshandlungen von Fahrern in kritisch empfundenen Ausweichsituationen.

Die von Plöchl/Edelmann<sup>329</sup> genannten Stabilisierungsgrenzen des Fahrers, beschrieben durch seine Reaktionszeit, den Vorausschaubereich und die Korrekturstärke der Lenkeingaben variieren offensichtlich mit den individuellen Fähigkeiten, Testbedingungen und Umgebungsfaktoren. Darüber hinaus ist es möglich, eine relative Verbesserung der Stabilisierbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch aktive Lenksysteme wie AFS oder HSR im Vergleich mit unregelten Fahrwerken nachzuweisen.<sup>330,331</sup> Es existiert jedoch kein anerkanntes Fahrermodell oder ein virtuelles Probandenkollektiv, auf dessen Basis die angestrebte Ableitung von Akzeptanzgrenzen für die charakteristischen Bewegungskennwerte für Normalfahrer in Brems- und Ausweichsituationen gelingen könnte.

## 2.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde der aktuelle Stand der Forschung auf dem Themengebiet der objektiven Bewertung von Fahrsicherheit im Hinblick auf die Möglichkeit zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen zusammengetragen. Dem Ergebnis nach entspricht es heute dem Stand der Technik in der Fahrzeugentwicklung, das Fahrzeugverhalten messtechnisch zu erfassen und anhand von charakteristischen Kenngrößen zu beschreiben.<sup>332</sup> Die Testverfahren - wie z.B. das Bremsen in der Kurve, das Bremsen auf  $\mu$ -split oder der ISO-Spurwechselltest - wurden weitestgehend standardisiert und in Normungen überführt.<sup>333,334,335</sup> Die geeigneten Kennwerte zur Bewertung der Fahrstabilität wurden in

---

<sup>328</sup> Nagai et al. (1997): Application of genetic algorithm to analysis of driver's behaviour in collision avoidance, S. 626ff

<sup>329</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 727

<sup>330</sup> Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

<sup>331</sup> Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

<sup>332</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>333</sup> ISO 7975 (2006): Braking in a turn, Open-loop test method (third edition)

den letzten ca. 40 Jahren durch ihre Korrelation mit Subjektivbeurteilungen von Testfahrern bestimmt. Zur Beurteilung der Stabilität in Bremsmanövern hat sich heute vor allem die Giergeschwindigkeitsabweichung vom stationären Ausgangszustand eine Sekunde nach Bremsbeginn  $\Delta\dot{\psi}_{1s}$  oder deren maximale Abweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  durchgesetzt. Eine Auswertung der Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,1s/\max}$  und des Schwimmwinkels  $\beta_{SP,1s/\max}$  wird ebenfalls empfohlen. Auch in Spurwechseltests und in Ausweichmanövern ist der maximale Schwimmwinkel  $\beta_{SP,\max}$  ein anerkanntes Maß für die Stabilität des Fahrzeugverhaltens. Die durchgeführte Recherche zeigt jedoch, dass im Gegensatz zur Standardisierung der Testverfahren keine allgemeingültigen oder normierten Akzeptanzgrenzen für die bekannten charakteristischen Bewegungskenngrößen abgeleitet wurden. Auch in der Literatur sind nur wenige und teilweise deutlich voneinander abweichende Empfehlungen für die Definition von Akzeptanzgrenzen der Bewegungskenngrößen enthalten. Die einzigen bekannten Anhaltswerte für das zulässige Gierverhalten in Standardfahrmanövern liefern 1975 Fiat und 1987 Otto. Demnach soll die Giergeschwindigkeit in Kurvenbremsungen maximal um 50 % vom Ausgangswert abweichen<sup>336</sup> und die Gierbeschleunigung einen „Gefährlichkeitsgrenzwert“ von  $5^\circ/s^2$  Gierbeschleunigung während Lastwechsels nicht überschreiten.<sup>337</sup> Die veröffentlichten Akzeptanzgrenzen für den maximalen Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt sind unterschiedlich und variieren zwischen  $5-20^\circ$ .<sup>338,339,340,341,342</sup> Die Eignung des Schwimmwinkels im Fahrzeugschwerpunkt als objektive Bewegungskenngröße kann aufgrund des fehlenden eindeutigen Bezugs zum Fahrzustand des Fahrzeugs jedoch angezweifelt werden.

Einzig für das in den USA und Kanada zulassungsrelevante Open-Loop-Testverfahren *Sine with dwell* werden in der FMVSS No. 126<sup>343</sup> aufgrund der Notwendigkeit von definierten Prüfkriterien direkt auch die Akzeptanzgrenzen zum Nachweis der Gierstabilität genannt: Die Gierrate muss eine Sekunde bzw. 1,75 Sekunden nach Beendigung der Lenkeingaben auf weniger als 35 % bzw. 20 % der maximalen Gierrate während des Manövers abgesunken sein. Zusätzlich muss das Fahrzeug während des Manövers mindestens einen definierten Seitenversatz von 1,22 m (bei PKW) erzielen. Aufgrund der

<sup>334</sup> ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

<sup>335</sup> ISO 3888-1 (1999): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change

<sup>336</sup> Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

<sup>337</sup> Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

<sup>338</sup> Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

<sup>339</sup> Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

<sup>340</sup> von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

<sup>341</sup> Witte (1995): Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen

<sup>342</sup> Rundkuist (1974): Steerability During Emergency Braking

<sup>343</sup> NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-1ff

fehlenden Standardisierung von Akzeptanzgrenzen in den übrigen Testverfahren kann zum heutigen Zeitpunkt trotz der umfangreichen Bemühungen zur Objektivierung des Fahrzeugverhaltens kein eindeutiger objektiver Nachweis der Fahrsicherheit eines Fahrzeugs abgeleitet werden.

Ein vielversprechender Ansatz zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen wird in der Methodik zur Störbeurteilung von Gierstörungen infolge des Falschverhaltens von elektronischen Fahrzeugkomponenten nach Neukum/Krüger identifiziert.<sup>344</sup> Die angewandte Störbeurteilungsskala erlaubt einen direkten Rückschluss auf potentielle Gefährlichkeitsgrenzen und wurde bereits erfolgreich eingesetzt, um subjektive Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen infolge von Lenksystemstörungen an Vorder- und Hinterachse abzuleiten.<sup>345,346</sup> Die genannten Akzeptanzgrenzen weichen jedoch stark voneinander ab und die klassifizierte Bewertungsskala wurde bisher nicht zur Beurteilung des Grundfahrzeugverhaltens in Brems- oder Ausweichmanövern verwendet. Unter Berücksichtigung der Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Aktiven Sicherheit ist ein objektiv sicheres Fahrerergebnis dann gegeben, wenn es dem Fahrer gelingt, einen sicheren Sollkurs zu wählen und das Fahrzeug im Anschluss auf diesem Sollkurs zu stabilisieren. Gelingt dies nicht, wird in der Unfallstatistik von einem „Fahrerunfall“ gesprochen, auf den ca. 40 % aller Unfälle mit Todesopfern entfallen. Diese Statistik schließt ein weiteres Potential hinsichtlich der Unfallreduzierung durch eine verbesserte Anpassung des Fahrzeugverhaltens an die Fähigkeiten von Normalfahrern nicht aus. Es sind jedoch keine Statistiken bekannt, die eine Korrelation des objektiven Fahrzeugverhaltens mit der realen Unfalldisposition erlauben.<sup>347</sup> Zudem existiert keine Studie, in der auf Basis des objektiven Kurshaltevermögens von Normalfahrern geprüft wird, bis hin zu welchen Grenzen der charakteristischen Bewegungskenngrößen noch ein sicheres Fahrerergebnis erzielt wird. Dies liegt vor allem an der Annahme, eine sichere Subjektivbeurteilung des Fahrzeugverhaltens sei in jedem Fall gleichbedeutend mit einer objektiv sicheren Bewältigung der Fahraufgabe.<sup>348</sup>

Weiterhin wurden die bestehenden Ersatzmodelle des Zusammenwirkens zwischen Mensch und Fahrzeug aufgezeigt. Dem gängigen Verständnis nach, handelt es sich bei der Fahrzeugführung um eine Mischform aus bewussten Entscheidungshandlungen zur Wahl sicherer Führungsgrößen und der unbewussten Stabilisierung des Fahrzeugverhaltens auf der sogenannten Stabilisierungsebene.<sup>349,350</sup> Die Handlungen zur Stabilisierung

---

<sup>344</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

<sup>345</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S.10f

<sup>346</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

<sup>347</sup> ISO 17288-1 (2002): Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method

<sup>348</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

<sup>349</sup> Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183

des Fahrzeugs werden dabei vom Fahrer im linearen Bereich des Fahrverhaltens erlernt und in ihren Grundmustern auch in kritischen Situationen nicht variiert.<sup>351,352,353</sup> Die Reaktionszeit und die Reaktionsintensität der Lenkreaktion von Normalfahrern scheinen jedoch nach den zusammengetragenen Veröffentlichungen stark vom Aufforderungsgrad der Situation, von der Art des Reizes selbst und von persönlichen Faktoren des Fahrers abhängig zu sein. Ebenso wird Fahrern eine individuell stark variierende Fahrfertigkeit zugeschrieben.<sup>354,355</sup> Eine hohe Fahrfertigkeit zeichnet sich durch kurze Reaktionszeiten, schnelle stabilisierende Lenkbewegungen und die Kenntnis des nichtlinearen Fahrverhaltens aus.<sup>356,357</sup>

Heute werden neben klassischen Fahrversuchen vereinzelt auch Fahrermodelle angewandt, um weitere Erkenntnisse über die Regeltätigkeiten des Fahrers zu erlangen und die Beurteilung der Fahrsicherheit durch virtuelle Testfahrer vorzunehmen. Mit Ausnahme der Abbildung von Fahrerhandlungen im Grenzbereich, siehe zusammenfassende Darstellung von Plöchl/Edelmann<sup>358</sup>, wird die Möglichkeit nachgewiesen, das individuelle Lenkverhalten von Normalfahrern beispielsweise im VDA-Ausweichtest durch heutige Fahrermodelle annähernd genau abzubilden, siehe Keen<sup>359</sup>. Oft wird jedoch versucht, ein einziges repräsentatives Fahrermodell abzuleiten, wobei die bekannte individuelle Streubreite der Fahrfertigkeit von Normalfahrern vernachlässigt wird. Durch eine individuelle Parametrierung auf Basis realer Probandenkollektive wie von Keen 2008 könnte es zukünftig gelingen, die Fahrstabilität eines Fahrzeugs auch durch „virtuelle Probandenkollektive“ zu bewerten. Für eine Aussage zur Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern oder von hohen Schwimmwinkeln in Ausweichtests kann heute jedoch auf kein geeignetes, virtuelles Fahrerkollektiv zurückgegriffen werden. Eine Studie zur Bewertung der Beherrschbarkeit von Normalfahrern in Brems- und Ausweichtests kann daher im Rahmen dieser Arbeit nur auf Basis eines realen Probandenkollektivs erfolgen.

---

<sup>350</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

<sup>351</sup> McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

<sup>352</sup> Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

<sup>353</sup> Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften?

<sup>354</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 248f

<sup>355</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

<sup>356</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 248f

<sup>357</sup> Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

<sup>358</sup> Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 724

<sup>359</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control

## 3 Versuchskonzept

### 3.1 Zielsetzung

Unter Berücksichtigung der bestehenden Erkenntnisse zur objektiven Beurteilung von Fahrsicherheit soll eine Testmethodik abgeleitet werden, die es erlaubt, den bisher nicht bekannten Zusammenhang zwischen den charakteristischen Bewegungskenngrößen aus Kapitel 2.2 und dem tatsächlichen Kurshaltevermögen von Normalfahrern in Brems- und Ausweichtests herzustellen. Das Ziel hierbei ist es, die charakteristischen Open-Loop-Kennwerte des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests  $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$  und  $\beta_{SP,1s/\max}$  zu variieren und auf Basis der Testergebnisse Vorschläge für Akzeptanzgrenzen hinsichtlich einer objektiv sicheren Beherrschbarkeit durch Normalfahrer abzuleiten. Hierzu werden zunächst geeignete Versuchs-Hypothesen aufgestellt und das benötigte Versuchskonzept sowie die benötigten Versuchsinstrumente zur Prüfung dieser Hypothesen in Brems- und Ausweichtests abgeleitet.

### 3.2 Hypothesen

Tabelle 3.1 fasst die untersuchten Hypothesen und Fragestellungen zur Beherrschbarkeit von Gierstörungen, Querschleunigungsabweichungen und hohen Schwimmwinkeln zusammen. Es wird zunächst eine hochsignifikante Korrelation zwischen der subjektiven Beherrschbarkeit und der Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$  angenommen. Zusätzlich wird vermutet, dass die subjektive Beherrschbarkeit im Vergleich zu dem tatsächlichen Kurshaltevermögen deutlich konservativer, d.h. kritischer ausfällt.<sup>360</sup> Aufgrund der empfohlenen Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen infolge von Hinterradlenk-eingriffen<sup>361</sup> zwischen 7,8°/s und 12°/s und ersten kritischen Subjektivbeurteilungen von Vertikaldynamikstörungen<sup>362</sup> ab 8°/s werden erste Fahrstreifenverletzungen in Bremsmanövern im Bereich zwischen ca. 5-10°/s Gierstörung erwartet. Die Kursabweichung sollte hierbei der Erwartung nach mit zunehmender Gierstörung signifikant ansteigen und somit ein geeigneter Indikator für die Schwierigkeit der Aufgabenbewältigung sein. Da bisher veröffentlichte Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen deutlich von der Fahrgeschwindigkeit abhängig sind, siehe Kapitel 2.2.1, werden mit steigender Fahrgeschwindigkeit sowohl eine signifikant ansteigende Kursabweichung als auch eine signifikant verschlechterte Subjektivbeurteilung angenommen. Dementsprechend wer-

---

<sup>360</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

<sup>361</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

<sup>362</sup> Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 92

den bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit erste Fahrstreifenverletzungen bereits bei niedrigeren Gierstörungen erwartet. Für die Abhängigkeit der Subjektivbeurteilung und des Kurshaltevermögens von der Querschleunigungsabweichung wird keine signifikante Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit angenommen, siehe Ergebnisse von Neukum et al. und Wesp. Ebenfalls kann in bisherigen Studien zur Beurteilung von Gierstörungen kein Gewöhnungseffekt oder Reihenfolgeeffekt der subjektiven Beurteilung nachgewiesen werden.<sup>363,364</sup> Der ausbleibende Gewöhnungseffekt ist auch für das objektive Kurshaltevermögen zu prüfen.

Tabelle 3.1 Versuchs-Hypothesen zur subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit von Gierstörungen, Querschleunigungsabweichungen und Schwimmwinkeln in Brems- bzw. Ausweichtests

| Wert                         | Kategorie           | Hypothesen   |
|------------------------------|---------------------|--|
| $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ | Subjektiv           | $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ zeigt beste und hochsignifikante Korrelation    |
|                              |                     | Subjektivkriterium ist konservativer als ein Kurshaltekriterium              |
|                              | Kurshaltung         | Erste Fahrstreifenverletzungen zwischen 5-10 %s $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ |
|                              |                     | Kursabweichung steigt mit $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ eindeutig an          |
|                              | Fahrgeschwindigkeit | Höhere Fahrgeschwindigkeit -> größere Kursabweichung                         |
|                              |                     | Höhere Fahrgeschwindigkeit -> schlechteres Subjektivurteil                   |
|                              |                     | " -> Fahrstreifenverletzungen bei niedrigeren $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$   |
|                              | Fahrmanöver         | Signifikante Unterschiede im Subjektivurteil                                 |
|                              |                     | Signifikante Unterschiede im Kurshaltevermögen                               |
|                              | Gewöhnungseffekt    | keine Gewöhnungseffekte über Versuchsanzahl vorhanden                        |
| $\Delta a_{y,1s/\max}$       | Fahrgeschwindigkeit | Höhere Fahrgeschwindigkeit -> identische Kursabweichung                      |
|                              |                     | Höhere Fahrgeschwindigkeit -> identische Subjektivbeurteilung                |
|                              |                     | " -> Erste Fahrstreifenverletzungen bei identischen $\Delta a_{y,1s/\max}$   |
| $\beta_{SP/HA,\max}$         | Subjektiv           | $\beta_{SP/HA,\max}$ zeigen höchste und hochsignifikante Korrelation         |
|                              | Kurshaltung         | Eingeschränktes Kurshaltevermögen ab 5-10° $\beta_{SP/HA,\max}$              |

In Bezug auf die Unterscheidung der Subjektivbeurteilung zwischen verschiedenen Fahrmanövern kann aus der Literatur keine eindeutige Hypothese abgeleitet werden. Während Neukum et al. eine identische Bewertung von Gierstörungen in Geradeaus- und Kurvenfahrt angeben<sup>365</sup>, werden in anderen Studien kritischere Bewertungen in Kurvenfahrt<sup>366,367,368</sup> oder kritischere Bewertungen in Geradeausfahrt beobachtet.<sup>369,370</sup>

<sup>363</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 8

<sup>364</sup> Wesp et al. (2009): Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge

<sup>365</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenkensystems

<sup>366</sup> Schmidt et al. (2007): Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System

<sup>367</sup> Switkes (2006): Handwheel force feedback with lanekeeping assistance

<sup>368</sup> Switkes et al. (2007): Driver response to steering torque disturbances

<sup>369</sup> Amberkar et al. (2000): Diagnostic development for an electric power steering system

<sup>370</sup> Schmidt (2007): Wann spürt der Fahrer überhaupt? Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchung des Fahrers während der Kurshaltungsaufgabe in Geradeaus- und Kurvenbremsung die Hypothese einer signifikant unterschiedlichen Subjektivbeurteilungen und Kursabweichungen gewählt.

In Ausweichtests wird eine hochsignifikante Korrelation der Subjektivbeurteilung mit dem auftretenden Schwimmwinkel im Fzg.-Schwerpunkt angenommen. Auf Basis der bekannten Grenzwertempfehlungen aus der jüngeren Vergangenheit<sup>371,372</sup> wird eine Einschränkung des Kurshaltevermögens von Normalfahrern in Ausweichsituationen zwischen 5-10° Schwimmwinkel vermutet. Heutige Reifen erreichen ihr Kraftschlussmaximum im Bereich zwischen ca. 5-10° Schräglaufwinkel.<sup>373,374</sup> Dabei entspricht der Schräglaufwinkel an der Hinterachse – ohne zusätzliche Lenkeingriffe und unter Vernachlässigung von Vor- und Nachspur – im Einspurmodell dem Schräglaufwinkel der Hinterräder. Werden HA-Schwimmwinkel  $\beta_{HA}$  im Bereich zwischen 5-10° erzielt, kann das Kraftschlussmaximum der Hinterachse also überschritten werden und ein instabiler Fahrzustand resultieren. Daher wird in dieser Arbeit ebenfalls die Eignung des maximalen HA-Schwimmwinkels zur Erklärung von Subjektivbeurteilungen und des Kurshaltevermögens untersucht.

### 3.3 Ableitung der Testmethodik

Die Testmethodik zur Ermittlung des objektiven Kurshaltevermögens von Normalfahrern in Abhängigkeit der charakteristischen Bewegungskennwerte besteht in der Variation des Grundfahrzeugverhaltens durch eine Hinterradverstellung. In den durchgeführten Brems- und Ausweichtests wird geprüft, ob infolge der jeweiligen Verstellungsausprägung noch von einer sicheren Kursführung ausgegangen werden kann. Zur Nachweisbarkeit einer sicheren Kursführung werden Pylonen-markierte Fahrgassen definiert, die durch Normalfahrer sicher, d.h. ohne Fahrstreifenverletzung, bewältigt werden sollen. Die Auswahl der Hinterradverstellung erfolgt aufgrund des fahrphysikalisch vergleichbaren Zusammenhangs von Giergeschwindigkeitsabweichungen infolge einer Hinterradverstellung oder eines Lastwechsel- bzw. Bremsvorgangs in Kurvenfahrt, siehe Validierung in Kapitel 3.4. Die Testmanöver, Bewertungskriterien und benötigten Versuchsinstrumente dieser Arbeit ergeben sich aus den Anforderungen zur Prüfung der Versuchshypothesen aus Tabelle 3.1.

---

<sup>371</sup> Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

<sup>372</sup> von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

<sup>373</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>374</sup> Schmid, Förschl (2009): Vom realen zum virtuellen Reifen – Reifenmodellparametrierung, S. 188ff

### 3.3.1 Testmanöver zur Bewertung von Gierstörungen

#### 1. Manöverdefinition:

Die erforderlichen Fahrmanöver zur Bewertung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern werden aus der systematischen Variation der möglichen stationären Ausgangsfahrzustände und einer anschließenden Bremsbehandlung nach Bild 3.1 abgeleitet. Aus einem zunächst stationären Fahrzustand in Geradeaus- oder Kurvenfahrt kann eine Gierstörung entweder an einen Bremsvorgang gekoppelt oder für die Testperson überraschend (ohne gleichzeitige Bremsung) aufgeschaltet werden. Aufgrund der Annahme einer abweichenden Beanspruchung des Fahrers in Geradeaus- und Kurvenfahrt werden bei einer identischen Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 80 km/h alle vier der möglichen Varianten

- 1. Geradeausbremsung ; 2. ungebremste Geradeausfahrt
- 3. Kurvenbremsung; 4. ungebremste Kurvenfahrt

durchgeführt.

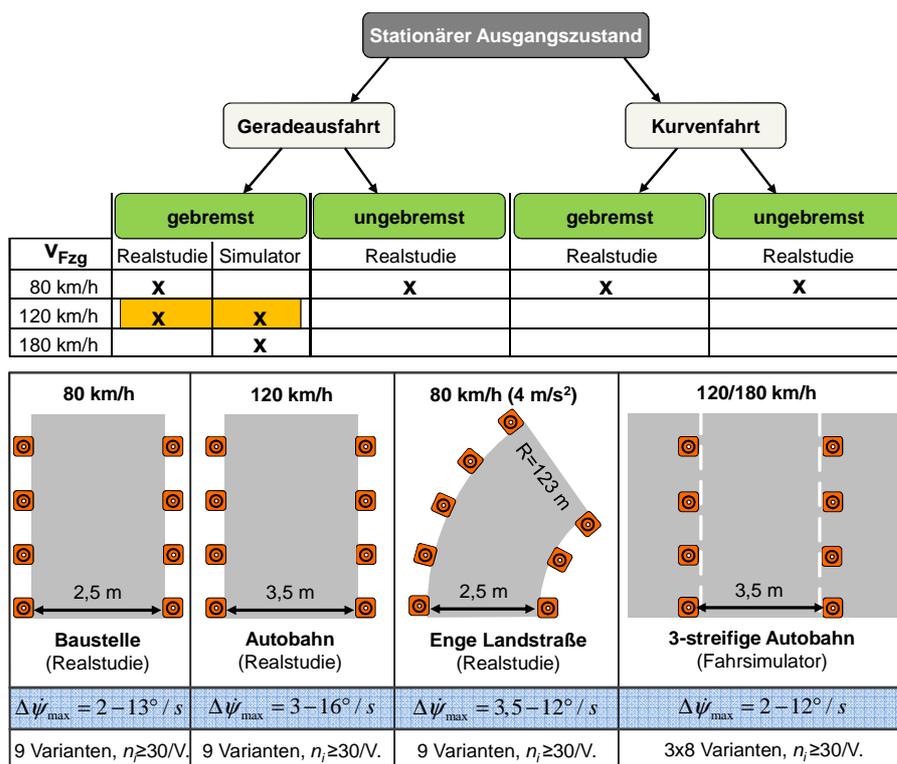


Bild 3.1 Ableitung der notwendigen Testmanöver zur Bewertung der Gierstörungs-Hypothesen

Eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h wird üblicherweise im Bereich von Autobahnbaustellen<sup>375</sup>, aber auch im Bereich von kurvenreichen Strecken auf Überland-

<sup>375</sup> Bundesministerium für Verkehr (2001): Sicherung von Arbeitsstellen (RSA-95)

straßen vorgefunden und stellt daher eine geeignete Fahrgeschwindigkeit zur Prüfung des Kurshaltevermögens auf verengten Fahrbahnstreifen dar. Darüber hinaus werden Geradeausbremsungen aus 120 km/h und 180 km/h durchgeführt, um die vermutete Abhängigkeit des Kurshaltevermögens und der Subjektivbeurteilung von der Fahrgeschwindigkeit bewerten zu können. Die Testmanöver mit Ausgangsfahrgeschwindigkeiten von 80-120 km/h finden in einer Realstudie unter Verwendung eines Versuchsfahrzeugs mit aktiver Hinterradverstellung statt, siehe Kapitel 3.4. Die Beherrschbarkeit von Gierstörungen im Bereich einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h wird hingegen aus Sicherheitsgründen nur am dynamischen Fahrsimulator der Daimler AG untersucht. Zum Nachweis der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse aus der Fahrsimulatorstudie auf die real durchgeführten Bremsmanöver findet eine Wiederholung der identischen Geradeausbremsungsvarianten aus 120 km/h auch am Fahrsimulator statt. Die benötigten Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichungen  $> 10^\circ/\text{s}$  können durch die verwendete Hinterradverstellung in allen Testmanövern erzielt werden. Die Auslösung eines Lenkeingriffs der Hinterradverstellung wird zu diesem Zweck über eine Steuerungslogik an den Moment der Bremsbetätigung durch den Fahrer gekoppelt.

## 2. Testvarianten

Um eine Beurteilung der aufgestellten Hypothesen vornehmen zu können, ist neben der Prüfung von hinreichend hohen Gierstörungen ( $> 10^\circ/\text{s}$ ) auch eine ausreichend feine Abstufung zwischen zwei benachbarten Beurteilungsvarianten der Gierstörungen bzw. des charakteristischen Fahrzeugverhaltens vorzusehen. Die Beträge der charakteristischen Gierstörungen und weiterer Bewegungskennwerte infolge eines Hinterradlenkeingriffs werden in Open-Loop-Versuchen bestimmt. Der Lenkwinkelsprung an der Hinterachse zur Variation des Fahrzeugverhaltens in Bremsmanövern wird in der Realstudie zwischen  $\delta_h = 0,00^\circ - 2,00^\circ$  in Schritten von  $\Delta\delta_h = 0,25^\circ$  variiert. In den beiden durchgeführten Studien mit Normalfahrern wird anschließend die Beherrschbarkeit des resultierenden Fahrzeugverhaltens im durch die Fahrer geschlossenen Regelkreis geprüft. Die Aufschaltung der HA-Lenkwinkel geschieht dabei irreversibel, d.h. es erfolgt keine direkte Rückstellung im Anschluss an eine Störung. Hierdurch soll eine eventuelle Erhöhung der Störbeurteilung durch doppelte Aufschaltung vermieden, siehe Neukum et al.<sup>376</sup>.

Tabelle 3.2 zeigt die resultierenden charakteristischen Open-Loop-Gierstörungen  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  infolge der variierten Hinterradlenkwinkel  $\delta_h$  in allen Bremsmanövern der Realstudie und am Fahrsimulator. Am Fahrsimulator werden die entsprechenden HA-Stellwinkel so gewählt, dass annähernd ganzzahlige Gierstörungen resultieren. In allen Bremsma-

<sup>376</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

növern der Realstudie wird im relevanten Bereich zwischen 5-10°/s Open-Loop-Gierstörung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  ein Abstand zwischen zwei benachbarten Störintensitäten von maximal ca. 2°/s Differenz der Giergeschwindigkeitsabweichung erzielt.

Tabelle 3.2 Übersicht der mittleren Open-Loop-Gierstörungen und HA-Stellwinkel in den Bremsversuchen der Realstudie und am Fahrsimulator

| Maximale Gierstörungen (Open-Loop), %s |  |                   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|--|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Testmanöver                            | Instrument                                 | HA-Stellwinkel, ° |      |      |      |      |      |      |      |      |
|  |  | 0.00              | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 2.00 |
| Geradeausbremsung 80 km/h              | Testfahrzeug mit HSR                       | 0,0               | 2,1  | 4,3  | 5,9  | 7,7  | 9,1  | 10,3 | 11,3 | 13,4 |
| Kurvenbremsung 80 km/h                 |  | 1,5               | 3,4  | 4,4  | 6,4  | 8,2  | 9,5  | 10,2 | 10,4 | 11,9 |
| Geradeausbremsung 120 km/h             |  | 0,0               | 2,9  | 5,8  | 7,9  | 9,8  | 11,2 | 12,8 | 13,4 | 16,1 |
| Testmanöver                            | (Anpassung HA-Stellwinkel an Zielvariante) |                   |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Geradeausbremsung 120 km/h             | Fahrsimulator                              | 0                 | 2    | 4    | 6    | 7    | 8    | 10   | 12   |      |
| Geradeausbremsung 180 km/h             |  | 0                 | 2    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 10   |      |

Am Fahrsimulator wird im Bereich der erwarteten Akzeptanzgrenzen eine noch geringere Abstufung von 1°/s Giergeschwindigkeitsabweichung vorgesehen. Zur Erklärung: Die Fahrsimulatorstudie wird im Anschluss an die Realstudie durchgeführt, so dass die Ergebnisse der Realstudie zur Präzisierung der Erwartungsbereiche für die Akzeptanzgrenzen verwendet werden können. An diesen möglichst eng gewählten Stützpunkten kann eine direkte Bewertung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit erfolgen, während zur Beurteilung von abweichenden Gierstörungen eine Inter- oder Extrapolation der Ergebnisse erfolgen müsste. Insbesondere die Extrapolation der Ergebnisse ist hierbei nach Neukum zu vermeiden.<sup>377</sup> In den Bremsmanövern der Realstudie werden durch neun verschiedene Stellwinkel an der Hinterachse jeweils neun verschiedene Gierstörungsvarianten untersucht. Bei Aufschaltung der Hinterradlenkwinkel  $\delta_h$  in ungebremster Geradeaus- oder Kurvenfahrt werden hingegen nur 4 Varianten untersucht, da lediglich eine punktuelle Vergleichsprüfung stattfinden soll. Am Fahrsimulator werden bei Geradeausbremsung aus 120 km/h und 180 km/h jeweils 8 Abstufungen der Gierstörung verwendet. Darüber hinaus wird am Fahrsimulator eine weitere Variante der Geradeausbremsung aus 120 km/h mit einer erhöhten Verstellgeschwindigkeit der verwendeten Hinterachslenkung untersucht (20°/s statt 4°/s Lenkgeschwindigkeit), um den Einfluss einer kürzeren Verzugszeit des auftretenden Gierstörungsmaximums nach Bremsbeginn zu prüfen.

### 3. Gestaltung der Fahrgassen

Die aufgeschalteten Gierstörungen bzw. Hinterradlenkwinkel  $\delta_h$  müssen durch die Normalfahrer sicher stabilisiert werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Bewertung des resultierenden objektiven Kurshaltevermögens ist die Vorgabe eines eindeutigen und si-

<sup>377</sup> Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

chere Sollkursverlaufs. Zu diesem Zweck sollen die Fahrstreifen der bereits vorgestellten Testmanöver durch deutlich sichtbare Pylonen-Markierungen seitlich begrenzt werden. Die Vorteile einer Pylonen-Markierung im Gegensatz zu einer farblich hervorgehobenen Fahrstreifenbegrenzung sind der höhere Aufforderungsgrad für den Fahrer, eine Kollision zu vermeiden, und das leicht wahrnehmbare Kollisionsereignis für den Fall einer Fahrgassenverletzung. Insgesamt werden vier verschiedene Pylonen-begrenzte Fahrgasstypen verwendet, siehe Bild 3.1. Die Unterschiede bestehen in der Fahrgassenbreite, der gefahrenen Geschwindigkeit und der Krümmung der Fahrgasse. In Geradeausfahrten und Geradeausbremsungen auf dem Fahrstreifentyp „Baustelle“ werden eine Fahrstreifenbreite von 2,5 m und eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h vorgesehen. Diese Fahrstreifenbreite entspricht der Mindestvorgabe für Behelfsfahrstreifen nach der in Deutschland gültigen Richtlinie für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen.<sup>378</sup> Die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h. Die Mindestfahrstreifenbreite von Überlandstraßen in dünn besiedelten Gebieten beträgt hingegen 2,75 m (RAS-Q).<sup>379</sup> Für den Fahrstreifentyp „enge Landstraße“ wird dennoch analog zu den vorgesehenen Geradeausbremsungen aus 80 km/h eine Fahrstreifenbreite von nur 2,5 m gewählt. Durch diese identische Auswahl soll die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu Geradeausbremsungen sichergestellt werden, da bekannte Studien eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Fahrstreifenbreite vermuten lassen, vergleiche Schmidt et al.<sup>380</sup> und Switkes<sup>381,382</sup> mit Schmidt<sup>383</sup>. Zudem soll durch die Wahl einer engen Fahrstreifenbreite von 2,5 m in Kurvenfahrt eine hohe Anforderung an den Fahrer zur Kurshaltung sichergestellt werden und somit vermieden werden, dass Fahrer die Kurve durch eine individuelle Linienwahl bewusst „schneiden“. Die individuelle Ausnutzung von Handlungsspielräumen durch den Fahrer ist in der Forschung bekannt.<sup>384</sup> Ebenfalls wird die Forderung eines ausreichenden Anforderungsgrades für die Versuchsgestaltung genannt.<sup>385</sup>

Nach zwei Übersichten von Forschungsergebnissen in Bild 3.2 entspricht eine Querbeschleunigung von ca.  $4 \text{ m/s}^2$  der maximalen Querbeschleunigung, die Normalfahrer abgesehen von Notsituationen zur Kurshaltung aufbringen. Die maximal ausgenutzten Querbeschleunigungen bis  $4 \text{ m/s}^2$  durch Normalfahrer finden ebenfalls bei Bachmann et

<sup>378</sup> Bundesministerium für Verkehr (2001): Sicherung von Arbeitsstellen (RSA-95)

<sup>379</sup> FGSV (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen - Querschnitt (RAS-Q)

<sup>380</sup> Schmidt et al. (2007): Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System

<sup>381</sup> Switkes (2006): Handwheel force feedback with lanekeeping assistance

<sup>382</sup> Switkes et al. (2007): Driver response to steering torque disturbances

<sup>383</sup> Schmidt (2007): Wann spürt der Fahrer überhaupt? Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug

<sup>384</sup> Bruder et al (2009): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

<sup>385</sup> Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße

al. Bestätigung.<sup>386</sup> Der in dieser Studie verwendete Radius des Kurvenstücks „enge Landstraße“ wird daher entsprechend einer stationären Querb beschleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$  bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $80 \text{ km/h}$  zu  $R = 123 \text{ m}$  abgeleitet. Die Einfahrt in das Kurvenstück wird in Form einer *Klotoide* gestaltet, um einen „fließenden“ und somit beherrschbaren Übergang in die stationäre Kreisfahrt zu gewährleisten. Heutige Straßenkurvenverläufe sind ebenfalls als Klotoiden konstruiert, um notwendige Lenkwinkelsprünge während des Einlenkvorgangs in Kurvenfahrten zu vermeiden.<sup>387,388</sup>

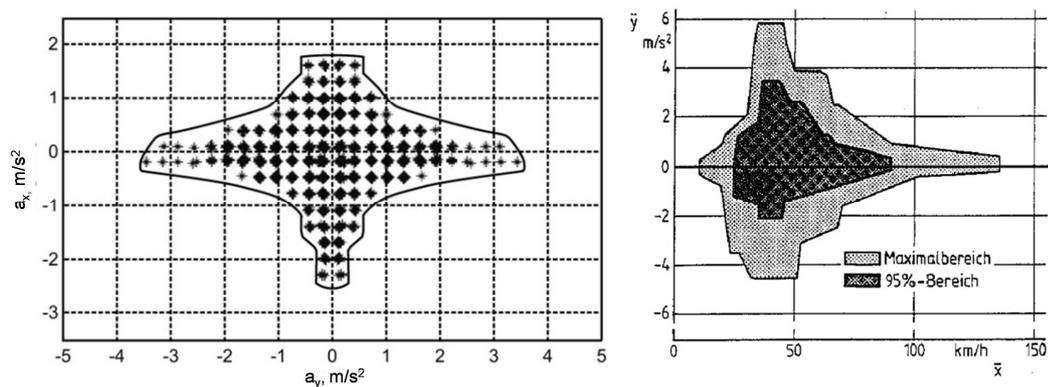


Bild 3.2 g-g-Diagramm des Fahrertyps „normal“ (links)<sup>389</sup>, Bereich der Fahrgeschwindigkeit und Querb beschleunigung bei kurviger Landstraßenfahrt (rechts)<sup>390</sup>

Die Bewertung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Geradeausbremsung bei erhöhten Fahrgeschwindigkeiten erfolgt auf den Fahrstreifentypen „Autobahn“ (Realstudie,  $120 \text{ km/h}$ ) und „3-streifige Autobahn“ (Fahrsimulatorstudie,  $120\text{-}180 \text{ km/h}$ ). Die Fahrstreifenbreite der gängigen Entwurfsklassen EK1/2 beträgt nach der Richtlinie für die Anlage von Autobahnen (RAA)<sup>391</sup> mindestens  $3,5 \text{ m}$  und wird für diese Studie folglich übernommen. Der Fahrstreifentyp „Autobahn“ und die weiteren Fahrstreifentypen „Baustelle“ und „enge Landstraße“ werden in der Realstudie auf einer großen Asphaltfläche ohne direkte umliegende Straßenbebauung dargestellt. In der Simulationsumgebung des Fahrsimulators kann hingegen eine realistische, 3-streifige Autobahnstrecke für die Durchführung der Geradeausbremsungen gewählt werden. Um einen mit der Realstudie vergleichbaren Raumeindruck zu gewährleisten, wird der mittlere Fahrstreifen für die zu verwendende Fahrspur ausgewählt und ebenfalls mit einer deutlich sichtbaren Pylonenbegrenzung versehen.

<sup>386</sup> Bachmann et al. (1995): Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn

<sup>387</sup> Mitschke, Wallentowitz (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge

<sup>388</sup> FGSV (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen - Querschnitt (RAS-Q)

<sup>389</sup> Wegscheider, Prokop (2005): Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen, S. 17ff

<sup>390</sup> Hackenberg, Heißing (1982): Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr

<sup>391</sup> FGSV (2008): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)

#### 4. Stichprobenumfang und Probandenauswahl

Auf den dargestellten Fahrstreifentypen sollen die benötigten Fahrmanöver und Testvarianten nach Bild 3.1 bzw. Tabelle 3.2 durchgeführt werden. Die Bewertbarkeit der Hypothesen und somit die Aussagekraft der Ergebnisse sind dabei neben der Variantenanzahl vor allem von der Auswahl eines geeigneten Probandenkollektivs und der Definition einer geeigneten Stichprobengröße abhängig.

In den in dieser Arbeit durchgeführten Studien zur Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern werden insgesamt 51 verschiedene Kombinationen aus einem Fahrmanöver und einem HA-Lenkwinkel geprüft. Die Auswahl von Normalfahrern anstelle von geübten Testfahrern erfolgt aufgrund des formulierten Ziels dieser Arbeit, die kundenrepräsentative Beherrschbarkeit von Gierstörungen zu bewerten. Die geforderte Anzahl von 30 verschiedenen Fahrern pro Testvariante ergibt sich zum einen aus der Stichprobenanzahl vergleichbarer Studien<sup>392</sup>, vor allem aber aus statistischen Überlegungen: Zum Nachweis der Beherrschbarkeit einer Gierstörungsvariante wird in dieser Arbeit das objektive Kurshaltevermögen betrachtet, siehe Kapitel 3.3.3. Mit der im Fahrversuch ermittelten Anzahl von erfolgreichen Fahrten pro Variante kann unter der Annahme einer Binomialverteilung<sup>393</sup> der Ergebnisse eine bestimmte Wahrscheinlichkeit des Eintritts einer sicheren Kursführung nachgewiesen werden. Soll beispielsweise eine Wahrscheinlichkeit von  $p = 0,85$  für die sichere Beherrschbarkeit einer Situation auf dem üblichen 95 %-Signifikanzniveau nachgewiesen werden, so müssten bei nur 18 Testpersonen alle Versuchspersonen das Manöver bestehen (lediglich 94,6 % Signifikanzerzielung bei 17/18 erfolgreichen Manövern). Ab 19 Testpersonen kann die Hypothese  $p = 0,85$  auch bei einem einzelnen negativen Fahrergebnis noch auf dem 95 %-Signifikanzniveau nachgewiesen werden (95,4 %) und ab  $n = 30$  bei zwei negativen Fahrergebnissen (95,2 %). Dieser Nachweis ist im Hinblick auf die Bewertung der funktionalen Sicherheit nach ISO 26262-3<sup>394</sup> entscheidend, die in Kapitel 6 diskutiert wird. Zur Steigerung der Robustheit der Studie gegen Einzelereignisse erfolgt die Durchführung der Studie also mit mindestens 30 unterschiedlichen Normalfahrern pro Testvariante. Als Kriterium für die Repräsentanz des ausgewählten Normalfahrerkollektivs dient die statistische Verteilung von Alter und Geschlecht der Führerscheinbesitzer in Deutschland nach der Statistik des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) aus Bild 3.3. Das KBA unterscheidet in fünf Altersgruppen (< 18, 18-24, 25-44, 45-64 und > 65 Jahre). Mit Ausnahme der Altersgruppe < 18 Jahre wird für die Studie gefordert, jede Altersgruppe mit einem Anteil von mindestens 10 % oder höher zu vertreten, siehe Bild 3.3. Zudem

---

<sup>392</sup> Wesp et al. (2009): Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge

<sup>393</sup> Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage

<sup>394</sup> ISO 26262-3 (2011): Functional safety – Part 3: Concept phase

soll ein Anteil weiblicher Versuchspersonen im Bereich der KBA-Statistik von 41 % mit einer maximal tolerierten Abweichung von  $\pm 5$  % erzielt werden.

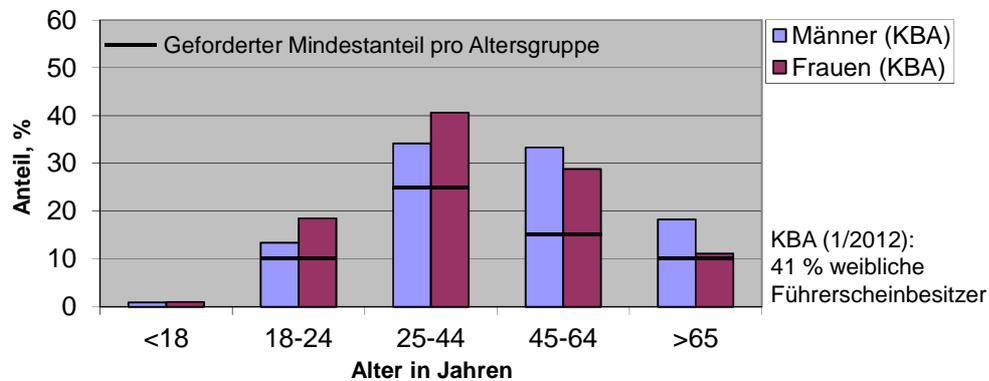


Bild 3.3 Altersverteilung der Führerscheinbesitze in Deutschland nach KBA (01/2012) und geforderter Mindestanteil an Testpersonen für jede Altersgruppe

Aufgrund der hohen Anzahl an benötigten Versuchsvarianten werden zur Reduktion der Versuchsdauer eines einzelnen Probanden insgesamt jeweils ca. 100 Probanden benötigt. Der Nachweis eines eventuell vorhandenen Gewöhnungseffekts der Subjektivbeurteilung oder des objektiven Kurshaltevermögens über der Versuchsdauer wird durch die Wiederholung der ersten Variante am Ende der Versuche mit  $n > 50$  der 100 Fahrer in der Realstudie und  $n > 100$  Fahrer in der Studie am Fahrsimulator erzielt. Um potentielle Gewöhnungseffekte so gering wie möglich zu halten, werden die Gierstörungen in stochastisch wechselnder Richtung aufgeschaltet. Eine wechselnde Aufschaltung in beide Richtungen wird auch von Mitschke/Niemann empfohlen.<sup>395</sup> Die Abfolge der Fahrmanöver ist für jeden Fahrer identisch, während die Auswahl der jeweiligen Gierstörungsvariante nach einer vorab definierten stochastischen Variation erfolgt: Eine vollständige Permutation ist aufgrund der Anzahl der Versuchsvarianten nicht möglich. Daher basiert die Versuchsreihenfolge für jede Testperson auf einem angewandten Zufallszahlengenerator unter Berücksichtigung fester Regeln:

- Die Manöverabfolge ist festgelegt
- Eine identische Gierstörungsvariante (= Testmanöver + HA-Lenkwinkel) darf einer Testperson nicht doppelt zugeordnet werden (Ausnahme: Beabsichtigte Wiederholfahrt zu Ende der Versuchsreihe)
- Es erfolgt eine Gleichverteilung von drei vorab klassifizierten Störintensitäten (niedrig, mittel und hoch) auf die Testpersonen
- Die benötigte Anzahl der Wiederholfahrten ( $n_i \geq 30$ ) für jede Gierstörungsvariante mit unterschiedlichen Testpersonen wird erzielt

<sup>395</sup> Mitschke, Niemann (1974): Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen

Auf diese Weise erfolgt eine zufällige Zuordnung der durchgeführten Gierstörungsvarianten auf die Testpersonen ohne Häufung von vergleichbaren Störintensitäten bei einer Testperson und ohne unbeabsichtigte Wiederholfahrten.

### 3.3.2 Testmanöver zur Bewertung von überhöhten Schwimmwinkeln

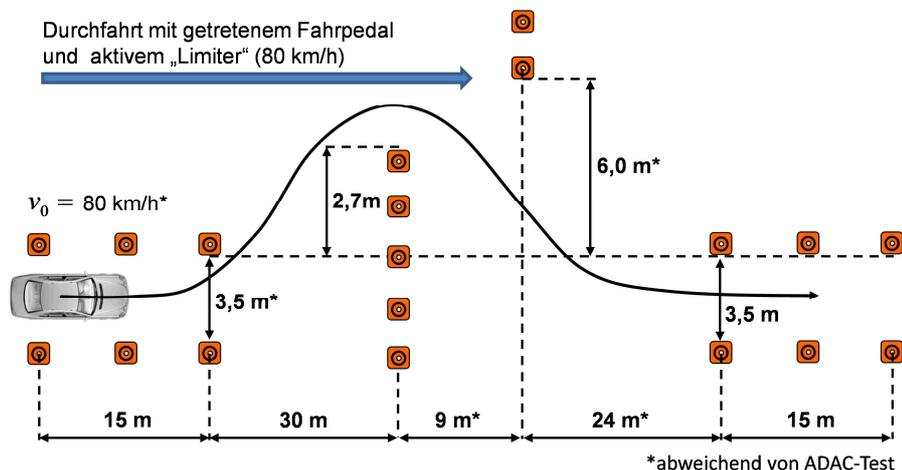


Bild 3.4 Abgewandelter ADAC-Ausweichtest zur Prüfung der Beherrschbarkeit erhöhter Schwimmwinkel in einem Ausweichtest

Zur Bewertung von überhöhten Schwimmwinkeln  $\beta_{SP/HA}$  in Ausweichsituationen wird ein Ausweichtest verwendet, der in seinen Abmaßen dem ADAC-Ausweichtest ähnelt. Im Gegensatz zu VDA oder ISO-Spurwechselttest erhält der Fahrer in diesem Ausweichtest durch die Gestaltung eines Hindernisses in Ausgangsfahrtrichtung eine eindeutige Aufforderung zum aktiven Ausweichen, was die Eindeutigkeit der Wahl eines sicheren Sollkurses durch den Fahrer unterstützt. Eine Weiterfahrt ohne Ausweichen hat unmittelbar eine Kollision mit den Hindernis-Pylonen zur Folge. Die Einfahrtgeschwindigkeit beträgt 80 km/h, um einen vergleichbaren Geschwindigkeitsbereich in Bezug auf die untersuchten Kurvenbremsungen abzubilden. Die Abmaße des verwendeten Ausweichtests werden durch Anpassung in Vorversuchen so gewählt, dass ohne ein auffälliges Fahrverhalten (keine hohen Schwimmwinkel und Querschleunigungen) für die meisten Normalfahrer eine sichere Durchfahrt ohne Pylonenkontakte möglich ist.

Der Ausweichtest ist nur im geschlossenen Regelkreis durchführbar. Daher werden im Gegensatz zu den variierten Gierstörungen in Bremsmanövern keine im Open-Loop ermittelten Kennwerte der maximalen Schwimmwinkel  $\beta_{\max,SP/HA}$  ermittelt. Die resultierenden Schwimmwinkel sind in einem Ausweichtest bei einem identischen Fahrverhalten vor allem von den Lenkeingaben des Fahrers abhängig. Durch ein zusätzliches, querschleunigungs-proportionales Mitlenken der Hinterachse mit

$$\delta_h = k_{prop} \cdot a_y \quad (3.1)$$

kann die Eigenlenkcharakteristik des Fahrzeugs jedoch in Richtung eines übersteuernden Fahrverhaltens und somit in Richtung größerer Schwimmwinkel bei gleicher Lenkeingabe verschoben werden. Der Mitlenkfaktor wird im Ausweichtest zwischen  $k_{prop} = 0,00 \dots 0,20 \text{ s}^2/\text{m}$  mit einer Schrittweite von  $\Delta k_{prop} = 0,05 \text{ s}^2/\text{m}$  variiert. Die eigentliche Bewertungsgröße – der maximal auftretende Schwimmwinkel im Schwerpunkt oder an der Hinterachse  $\beta_{SP/HA}$  – kann nicht direkt variiert werden, sondern muss im Anschluss an die Probandenstudie durch die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten bestimmt werden. Jeder Proband absolviert zwei zeitlich voneinander getrennte Ausweichtests mit nur einer Übungsfahrt, um mögliche Trainings- und Gewöhnungseffekte so gering wie möglich zu halten. Hieraus ergeben sich theoretische 200 Ausweichtsituationen mit 100 verschiedenen Normalfahrern.

### 3.3.3 Subjektive und objektive Beherrschbarkeit

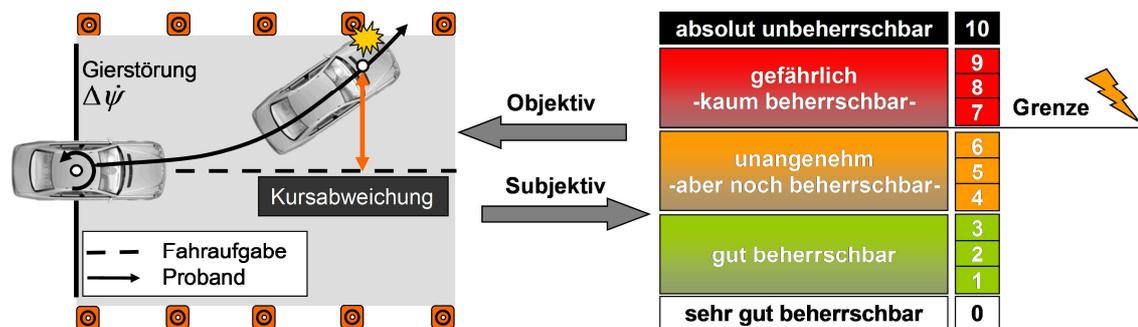


Bild 3.5 Bewertungskriterien der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit

Bild 3.5 zeigt die verwendeten Kriterien zur Bewertung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit durch Normalfahrer in den Brems- und Ausweichtests. Die Bewertung der subjektiven Beherrschbarkeit  $B_S$  erfolgt anhand einer an die bewährte Störbeurteilungsskala<sup>396</sup> von Neukum/Krüger angelehnte Beherrschbarkeits-Skala nach Bild 3.5 (rechts). Die Beherrschbarkeitsskala ist ebenfalls 11-stufig und in die 5 Hauptkategorien

- sehr gut beherrschbar ( $B_S = 0$ ),
- gut beherrschbar ( $B_S = 1-3$ ),
- unangenehm, aber noch beherrschbar ( $B_S = 4-6$ ),
- gefährlich, kaum beherrschbar ( $B_S = 7-9$ ) und
- absolut unbeherrschbar ( $B_S = 10$ )

<sup>396</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

unterteilt. Die definierte Beherrschbarkeitsskala erlaubt somit ebenfalls eine klare Abtrennung zwischen dem Bereich eines lediglich „unangenehmen“ Fahrverhaltens und einer durch die Testperson empfundenen Gefährdung ( $B_S \geq 7$ ). Die Kategorien wurden im Vergleich zur Störbeurteilungsskala von der Begrifflichkeit der „Störung“ des Fahrverhaltens losgelöst, da in dieser Arbeit das variierte Grundfahrzeugverhalten in Brems- und Ausweichtests untersucht werden soll. Speziell in Ausweichtests ist durch ein kontinuierliches Mitlenken der Hinterachse keine explizite Störung des Fahrverhaltens wahrnehmbar. Die Beherrschbarkeit einer Situation kann hingegen auch in einem Ausweichtest beurteilt werden und steht zudem in einem direkten Zusammenhang mit der Erfüllung der Fahraufgabe. Die Abfrage der Beherrschbarkeit der erlebten Fahrsituation erfolgt jeweils im direkten Anschluss an eine Versuchsvariante.

Die Erfüllung der Fahraufgabe wird nach Kapitel 2.3.1 in der Literatur als die Hauptaufgabe des Fahrers verstanden und daher in dieser Arbeit als das objektive Kriterium für die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens verwendet. Die Fahraufgabe gilt als nicht erfüllt, wenn der Fahrer von dem definierten Fahrstreifen abkommt und mit einer Pylone kollidiert. Dieses Entscheidungskriterium findet sowohl in den Bremsmanövern als auch in den Ausweichtests Anwendung. Zusätzlich soll in den Bremsmanövern auch der tatsächliche Kursverlauf infolge einer Gierstörung erfasst werden. Auf Basis des Kursverlaufs können die maximale Kursabweichung und der minimal auftretende Fahrstreifenabstand infolge einer Gierstörung als weitere objektive Kriterien der Beherrschbarkeit bestimmt werden. In Ausweichtests erscheint die Anwendung dieser zusätzlichen Kriterien hingegen nicht sinnvoll, da der Sollkurs im ADAC-Test vom Fahrer individuell gewählt werden kann. In den Bremsmanövern werden die Probanden hingegen dazu aufgefordert, den Fahrstreifen möglichst mittig zu befahren und keinesfalls zu verlassen. Die seitliche Kursabweichung wird in der späteren Auswertung der Ergebnisse auf die Außenkanten der Reifen von Vorder- und Hinterachse bezogen, da die Position der Reifen maßgebend für ein potentiell Verlassen der Fahrbahn ist. Eine Erfassung der Kursabweichung ist durch die Verwendung eines Differential-GPS-Systems der Firma iMAR (iTraceRT-F200-E und iREF-L1L2 RTK GPS Basisstation) mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 2$  cm (Herstellerangabe) vorgesehen, siehe Kapitel 4.3.

### **3.4 Variation von Gierstörungen und Schwimmwinkeln mittels HSR**

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits auf die eingesetzte Methode der Variation von Gierstörungen in Bremsmanövern und der Gierstabilität in Ausweichtests durch eine Hinterradverstellung verwiesen. Dieser Abschnitt erläutert die Auswahl der Hinterradverstellung als Versuchsinstrument und weist die Eignung der Hinterradverstellung zur Variation von Gierstörungen in Bremsmanövern nach.

### 3.4.1 Wirkprinzip

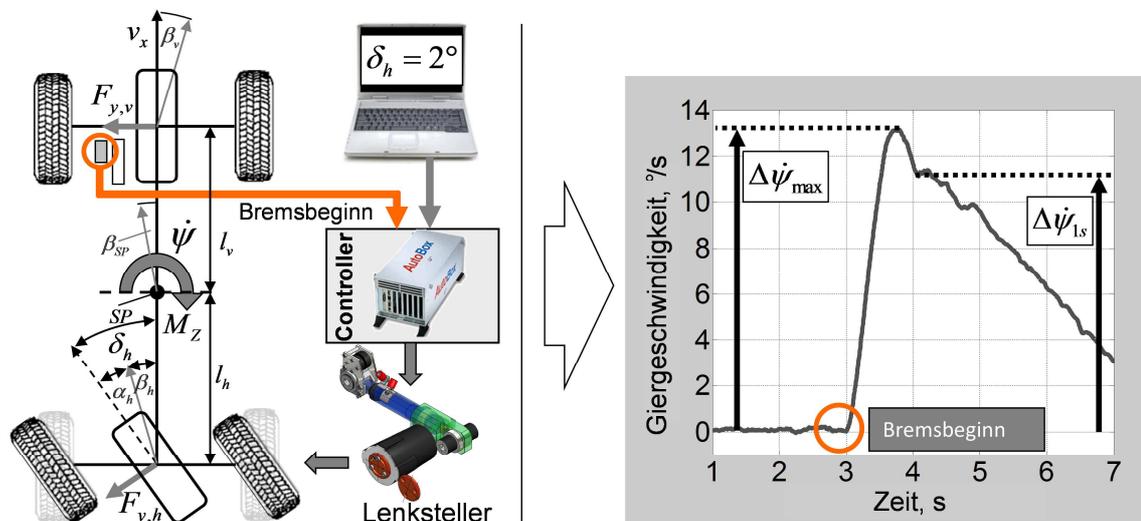


Bild 3.6 Wirkprinzip der Hinterradverstellung zur Variation von bremsgetriggerten Gierstörungen

Zur Durchführung der Studie muss das Fahrzeugverhalten im Moment der Bremsbetätigung durch den Fahrer variiert werden können. Der Eingriff soll zudem möglichst nah an ein nicht durch Lenksystemfalschgriffe gestörtes Fahrverhalten verschiedener Fahrzeuge z.B. in Kurvenbremsung oder in Ausweichsituationen heranreichen, um Ergebnisse zu erzielen, die auf das Fahrverhalten übertragbar sind. Eingriffe in die Lenkung der Vorderachse kommen daher aufgrund der bekannten reflexbedingten Reaktion der Fahrer auf sprunghafte Änderungen des Lenkradmoments<sup>397,398,399</sup> nicht in Frage, sofern nicht gleichzeitig eine Kompensation der Lenkradmomentenänderung durch Steer-by-Wire vorgenommen wird. Ebenfalls ist eine gezielte Beeinflussung des Fahrzeugverhaltens durch Störungen von außen, beispielsweise durch Unebenheitsanregungen, Reibwertsprünge oder Seitenwind, nicht im exakten Moment der Bremsbetätigung darstellbar. Aus diesem Grund wird zur reproduzierbaren und zeitlich steuerbaren Variation von Gierstörungen eine Hinterradlenkung verwendet, die einen vordefinierten HALenkswinkel  $\delta_h$  genau im Moment der Bremsbetätigung auslöst, siehe Bild 3.6 (links). Die Hinterradverstellung wird im verwendeten Versuchsfahrzeug – ein Fahrzeug der Mercedes-Benz C-Klasse des Typs S204 – durch den Tausch der beiden Querlenker der Hinterachse mit einer Linearaktorik realisiert. Diese Linearaktorik ist an eine Autobox gekoppelt, die wiederum alle relevanten Signale zur Hinterradverstellung, wie z.B. die Bremspedalbetätigung oder die aktuelle Querbeschleunigung  $a_y$ , empfängt. Durch diesen

<sup>397</sup> Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

<sup>398</sup> Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenkensystems

<sup>399</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

Aufbau ist es möglich, die entsprechende Logik zur Aktivierung der HA-Verstellung im Moment der Bremsung durch den Fahrer darzustellen und ebenfalls ein querbeschleunigungsproportionales Mitlenken in Ausweichtests zu realisieren.

Aus der Schräglaufsteifigkeit der Hinterachse  $c_{\alpha,h}$  resultiert im Einspurmodell unter der Annahme einer Sprungfunktion des Hinterradlenkwinkels in Bremsmanövern und eines zeitlich nicht verzögerten Aufbaus der Seitenkräfte an den gelenkten Rädern zum Zeitpunkt der Verstellung  $t = 3 \text{ s}$  nach Bild 3.6 (rechts) die Seitenkraftdifferenz an der Hinterachse und das Giermoment um die Hochachse des Fahrzeugs

$$M_z(t = 3 \text{ s}) = \Delta F_{y,h} \cdot \cos \delta_h \cdot l_h. \quad (3.2)$$

Unter Berücksichtigung der Gierträgheit  $\Theta_z$  des Fahrzeugs resultiert aus der Seitenkraftdifferenz an der Hinterachse zu Stellbeginn wiederum die Gierbeschleunigung

$$\ddot{\psi}(t = 3 \text{ s}) = \frac{\delta_h \cdot c_{\alpha,h} \cdot \cos \delta_h \cdot l_h}{\Theta_z}. \quad (3.3)$$

Der Anstieg der Giergeschwindigkeit für  $t > 3 \text{ s}$  führt zu einer Veränderung der Schräglaufwinkelzustände  $\alpha_i$  an Vorder- und Hinterachse. Die hieraus resultierenden Seitenkraftdifferenzen an beiden Achsen wirken dem erzeugten Giermoment entgegen. Zum Zeitpunkt des vollständigen Ausgleichs des Giermoments ( $t \approx 3,7 \text{ s}$ ) erreicht die Giergeschwindigkeitsabweichung ihr Maximum (Bild 3.6, rechts). Aufgrund der gleichzeitigen Geschwindigkeitsreduktion des Fahrzeugs während einer Bremsung sinkt die Giergeschwindigkeit im weiteren Verlauf der dargestellten Messung des Versuchsfahrzeugs ab. Dieses Verhalten entspricht dem Wirkprinzip nach einem Übersteuern infolge Kurvenbremsung oder eines Lastwechsels. Auch infolge einer Kurvenbremsung verliert die Hinterachse nach Kapitel 8.3.2 an Schräglaufsteifigkeit, was zu einer zusätzlichen Eindrehbewegung des Fahrzeugs in die Kurve führen kann. Die Hinterradverstellung erscheint daher als eine geeignete Methode zur Variation des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern.

Diese Aussage kann ebenfalls für die Variation des Grundfahrzeugverhaltens durch eine Hinterradlenkung hinsichtlich der Stabilität in dynamischen Ausweichtsituationen getroffen werden: Nach Kapitel 2.1.2 ist die Summen-Schräglaufsteifigkeit  $c_{\alpha,h}$  der Hinterachse in Relation zur Summen-Schräglaufsteifigkeit der Vorderachse  $c_{\alpha,v}$  für die Gierstabilität des Fahrzeugs maßgebend. Durch ein querbeschleunigungsproportionales, gegensinniges Mitlenken der Hinterachse mit  $\delta_h = k_{prop} \cdot a_y$  weichen die Hinterräder dem ansteigenden Schwimmwinkel an der Hinterachse  $\beta_{HA}$  während eines Anlenkvorgangs aus und der effektiv wirksame Schräglaufwinkel an den Hinterrädern  $\alpha_{h,i}$  wird reduziert.

Hieraus resultiert wiederum eine Reduktion der Summen-Schräglaufsteifigkeit  $c_{\alpha,h}$  in Bezug auf den Schwimmwinkel der Hinterachse  $\beta_{HA}$ . Das Fahrverhalten wird also in Richtung eines instabileren Gierverhaltens verändert, d.h. bei identischen Lenkeingaben resultieren höhere Schwimmwinkel  $\beta_{SP/HA}$ .

### 3.4.2 Validierung in Vorversuchen

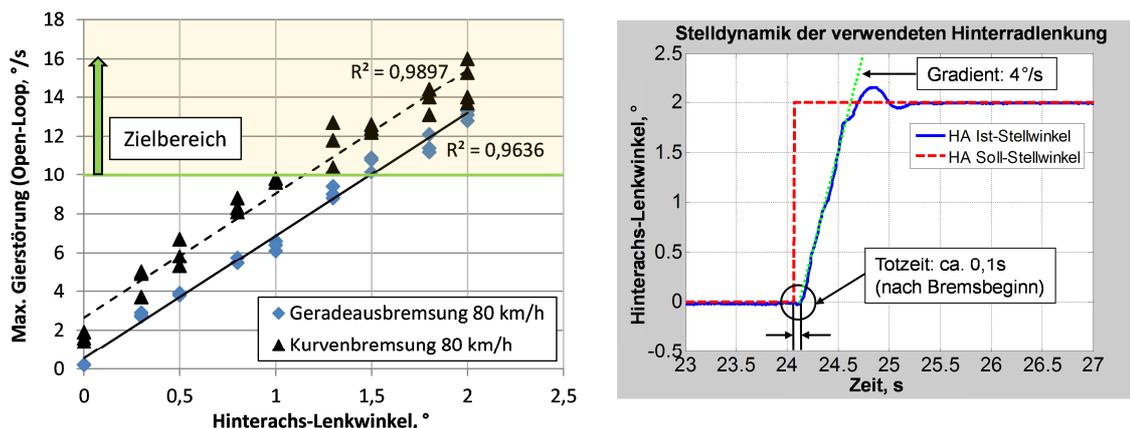


Bild 3.7 Eignungsnachweis der verwendeten HSR zur Variation von Gierstörungen in Geradeaus- und Kurvenbremsung und Stelldynamik der HSR

In Vorversuchen wird geprüft, ob eine reproduzierbare Abstufung der Gierstörungen durch eine Hinterradverstellung möglich ist. Bild 3.7 (links) zeigt die Abhängigkeit der auftretenden Gierstörungen von der Aufschaltung verschiedener Lenkwinkels  $\delta_h$  in Geradeausbremsung und in Kurvenbremsung aus 80 km/h. Nach einer Totzeit von ca. 0,1 s ab Bremsbeginn zeigt die Verstellaktorik nach Bild 3.7 (rechts) ein annähernd lineares Anstiegsverhalten mit einer Verstellgeschwindigkeit von ca.  $\dot{\delta}_h = 4^\circ/s$ . Die Verstellung wird aufgrund ihrer linearen Charakteristik und niedrigen Überschwingweiten durch eine einfache Schaltregelung realisiert. Die Verstellung erfolgt über die Bestromung des Linearaktors mit 24V Gleichspannung in die gewünschte Stellrichtung, sobald eine definierte Sollwertdifferenz

$$\Delta\delta_h = \delta_{h,soll} - \delta_{h,ist} \tag{3.4}$$

überschritten wird. Die erzielten Open-Loop-Gierstörungen mit fixiertem Lenkrad aus Bild 3.7 (links) weisen die Möglichkeit zur reproduzierbaren Variation von Gierstörungsmaxima  $\Delta\dot{\psi}_{max}$  bis in den Zielbereich  $> 10^\circ/s$  durch eine an das Bremspedal gekoppelte Hinterradverstellung nach. In den Wiederholversuchen wird jedoch eine Streubreite der Ergebnisse bei Messungen mit identischem HA-Stellwinkel beobachtet. Die Ursache wird in der manuellen Fixierung des Lenkrads, fahrbahninduzierten Störungen und einer abweichenden Bremsintensität der Wiederholfahrten vermutet.

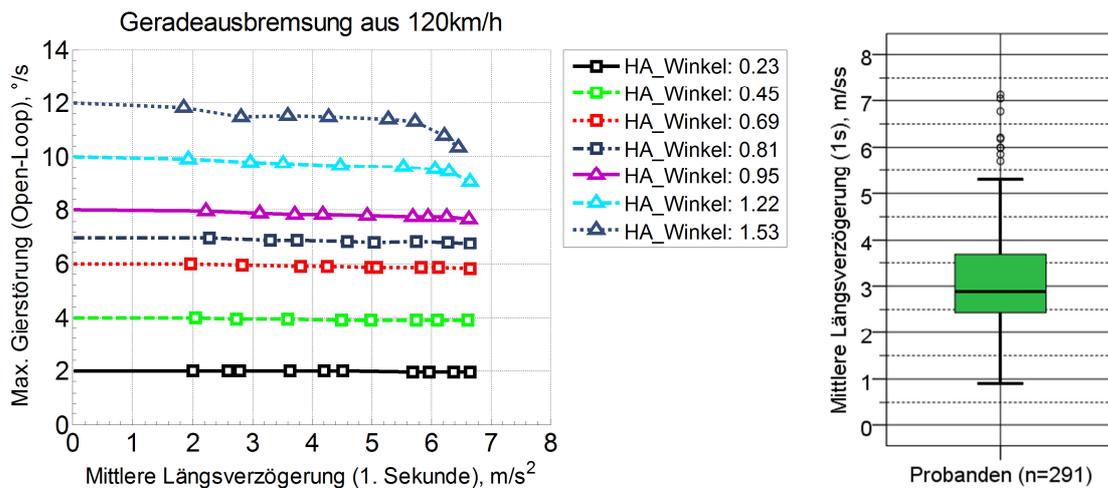


Bild 3.8 Abhängigkeit der maximalen Gierstörungen von der Bremsintensität in Geradepreisung aus 120 km/h bei konstantem Lenkradwinkel und jeweils konstantem HA-Lenkwinkel (links, Simulation) sowie tatsächliche Verteilung der mittleren Längsverzögerung der 291 Probanden in Geradepreisung aus 120 km/h (rechts, Realstudie)

Zur Prüfung des Einflusses einer abweichenden Bremsintensität auf den Betrag der Gierstörung wird das am Fahrsimulator der Daimler AG verwendete und in Kapitel 3.5 validierte FADYS-Simulationsmodell herangezogen. In dieser Prüfung nach Bild 3.8 (links) wird die mittlere Längsverzögerung innerhalb der ersten Sekunde nach Bremsbeginn bei ideal konstanter Lenkradstellung ( $0^\circ$ ) variiert und der Verlauf der Gierstörungsmaxima bei Aufschaltung eines jeweils konstanten HA-Stellwinkels in Geradepreisung aus 120 km/h ermittelt. Das Ergebnis aus Bild 3.8 (links) zeigt bis hin zu einer Ausgangsgierstörung von ca.  $7^\circ/\text{s}$  bei ungebremster Aufschaltung keine relevante Reduktion der Gierstörung in Abhängigkeit einer gesteigerten Bremsintensität ( $< 0,2^\circ/\text{s}$ ). Erst ab Ausgangsgierstörungen von ca.  $8^\circ/\text{s}$  und einer mittleren Bremsverzögerung innerhalb der ersten Sekunde nach Bremsbeginn  $> 5 \text{ m/s}^2$  wird eine Reduktion um bis zu  $0,4^\circ/\text{s}$  Gierstörungsdifferenz ersichtlich. Bei weiterer Erhöhung der Ausgangsgierstörung ( $10^\circ/\text{s}$  und  $12^\circ/\text{s}$ ) tritt diese Reduktion bereits bei niedrigeren Bremsintensitäten auf und beträgt oberhalb von  $5 \text{ m/s}^2$  mittlerer Längsverzögerung bis zu  $1,8^\circ/\text{s}$  bzw. 15 % Reduktion. Eine Begründung der deutlicheren Reduktion der Gierstörungen bei hohen HA-Stellwinkeln und hohen Längsverzögerungen kann in der ansteigenden Verzugszeit bis zum Erreichen des Gierstörungsmaximums gefunden werden, siehe spätere Gegenüberstellung in Bild 3.11. Während eine Gierstörung von  $2^\circ/\text{s}$  bereits 0,4 s nach Bremsbeginn erzielt wird, verzögert sich die Anstiegszeit bei einer Gierstörung von  $12^\circ/\text{s}$  um weitere 0,2 s auf insgesamt 0,6 s. Zu diesem Zeitpunkt ist die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs bei hohen Längsverzögerungen bereits deutlich reduziert und die Radlastverschiebung von Hinterachse in Richtung Vorderachse infolge der hohen Längsverzögerung deutlicher ausgeprägt. Bis hin zu einer Verzugszeit von ca. 0,5 s kann hingegen keine für die Versuchsdurchführung relevante Abweichung festge-

stellt werden ( $< 0,2^\circ/s$  bei Vollbremsung). Als Konsequenz der beobachteten Verminderung der Gierstörungen bei hohen HA-Stellwinkeln in Kombination mit hohen Bremsintensitäten werden die Probanden in der durchgeführten Studie dazu aufgefordert, lediglich mittelstarke Bremsungen durchzuführen. Zusätzlich werden die Open-Loop-Störungen zur Auswertung der Studie im Bereich einer mittleren Längsverzögerung ermittelt. Bild 3.8 (rechts) zeigt die tatsächlich erzielte Verteilung der mittleren Längsverzögerung von 291 Testfahrten mit ca. 100 Probanden in der ersten Sekunde nach Bremsbeginn bei Geradeausbremsung aus 120 km/h. Der Boxplot zeigt einen Median von ca.  $2,85 \text{ m/s}^2$  Längsverzögerung an, d.h. ca. 50 % aller Probanden bremsen mit einer geringeren Intensität als  $3 \text{ m/s}^2$ . Des Weiteren bremsen 95 % aller Probanden im Bereich von ca.  $1-5,3 \text{ m/s}^2$  mittlerer Längsverzögerung. Nur einzelne Fahrer führen entgegen der Anweisung eine Vollbremsung durch. In diesem überwiegend vorliegenden Bereich der mittleren Längsverzögerung kann bis hin zu Gierstörungen von  $12^\circ/s$  nach Bild 3.8 (links) noch von geringen Abweichungen infolge der Bremsintensität ausgegangen werden.

Aufgrund der bereits geschilderten Abhängigkeit der resultierenden Schwimmwinkel  $\beta_{SP/HA}$  von den Closed-Loop-Lenkeingaben des Fahrers in Ausweichsituationen kann im Vorfeld der Studie kein umfassender objektiver Beleg der Eignung der Hinterradverstellung zur Abdeckung des gewünschten Zielbereichs der Schwimmwinkel erfolgen. In Vorversuchen wird jedoch in Stichproben mit einzelnen Normalfahrern nachgewiesen, dass der vorhandene Stellbereich der Hinterradlenkung von maximal  $\delta_{h,\max} = 2^\circ$  ausreicht, um hinreichend hohe Schwimmwinkel  $\beta_{HA} > 5^\circ$  an der Hinterachse zu provozieren. Um ungewünschte Stabilisierungseingriffe durch das Regelsystem ESP zu vermeiden, werden in Zusammenarbeit mit dem entsprechenden Zulieferer die sogenannten „Regelschwellen“ des verbauten ESP angepasst. Durch diese veränderten Regelschwellen greift das ESP erst bei größeren Abweichungen der Gierrate oder des Schwimmwinkels von den intern berechneten Sollwerten ein. Eine vollständige Deaktivierung des ESP wird nicht gewählt, um die Anzahl der Schleudervorfälle zu minimieren. Die erhöhten Regelschwellen ermöglichen sowohl die Erzielung der gewünschten Schwimmwinkelbereiche als auch eine ungestörte Aufschaltung von Hinterradlenkeingriffen zur Variation von Gierstörungen in Geradeaus- und Kurvenbremsungen.

### 3.5 Variation von Gierstörungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten

Die Studie zur Bewertung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern ist in zwei bereits genannte Versuchsbestandteile aufgeteilt:

- Realstudie bis 120 km/h

- Fahrsimulatorstudie bis 180 km/h

Somit können auch Gierstörungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten ohne eine Gefährdung der Probanden untersucht werden. Eine Untersuchung von Gierstörungen in der Fahrsimulation kann jedoch nur dann zielführend eingesetzt werden, wenn die Simulationsumgebung alle realen Fahreindrücke hinreichend genau abbildet. Da der Fahrer nach seine Informationen zur Kursführung zu 90 % aus optischen Informationen bezieht<sup>400</sup> und auch das Lenkmoment als eine zentrale Feedbackgröße für den Fahrer gilt, die maßgebend seine Lenkreaktionen beeinflusst<sup>401,402,403</sup>, gehört neben einer exakten Bewegungsdarstellung auch eine korrekte Rückmeldung des Lenkmoments und ein realer Umgebungseindruck zu den notwendigen Anforderung an eine geeignete Simulationsumgebung. In der durchgeführten Studie wird der Ende 2010 neu eröffnete Daimler-Fahrsimulator in Sindelfingen verwendet.

### 3.5.1 Fahrsimulator der Daimler AG

Der Fahrsimulator der Daimler AG nach Bild 3.9 (oben) entspricht in Anlehnung an die Einordnung von Bruder et al.<sup>404</sup> einer Simulationsumgebung mit dynamischer Bewegungssimulation, 360° Rundumprojektion, einer vollständigen Cockpitgestaltung (Gesamtfahrzeug) und einem realistischen Feedback an allen Bedienelementen wie z.B. Lenkrad und Pedalerie. Zur Darstellung einer realitätsgetreuen Bewegungssimulation wird das „Testfahrzeug“ vollständig in dem auf sechs beweglichen Stützen gelagerten Kohlefaserdom (Hexapod) platziert, siehe Hahlbrock et al.<sup>405</sup>. Die Darstellung der Querbewegungen des Fahrzeugs erfolgt durch ein seitliches Verfahren des Hexapods auf einer 12 m langen Magnetschiene. Dabei werden nach Hahlbrock et al. Verfahrgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s erzielt und auftretende Querbeschleunigungen können innerhalb des Verfahrwegs bis in den Grenzbereich realitätsgetreu dargestellt werden. Die Gier-, Wank-, und Nickbewegungen des Fahrzeugs werden durch eine räumliche Drehung des Doms infolge einer entsprechenden Längenänderung der sechs Stützpfeiler ermöglicht. Lediglich die Längsverzögerung kann aufgrund eines fehlenden Längsverfahrwegs nur eingeschränkt nachgestellt werden. Sie wird durch eine zusätzliche Nickbewegung nachgeahmt. Die Umgebung wird durch eine 360°-Leinwand mit acht Hochleistungsprojektoren abgebildet und perspektivisch auf den Fahrer ausgerichtet. Im Motorraum des Fahrzeugs befindet sich eine Leistungselektronik und entsprechende Aktuatoren zur Darstellung des angeforderten Lenkmoments.

---

<sup>400</sup> Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

<sup>401</sup> Neukum et al. (2010): Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung

<sup>402</sup> Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

<sup>403</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>404</sup> Bruder et al. (2007): Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung

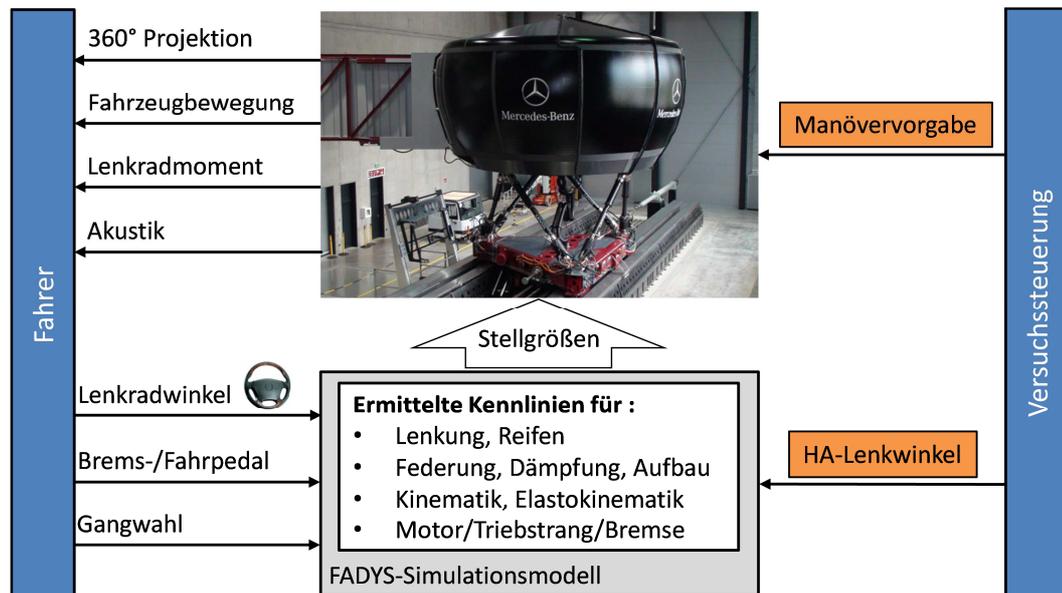


Bild 3.9 Versuchsaufbau zur Darstellung von Gierstörungen am Fahrsimulator der Daimler AG

Bild 3.9 zeigt die Versuchsstruktur zur Darstellung und Bewertung von Gierstörungen am Fahrsimulator. Die Stellgrößen des Daimler AG-Fahrsimulators wie Querbeschleunigung  $a_y$ , Gierrate  $\dot{\psi}$  oder das Lenkradmoment  $M_H$  werden durch das interne Fahrdynamiksimulationsprogramm FADYS der Daimler AG berechnet. FADYS ist eine modular aufgebaute, echtzeitfähige Simulationssoftware und besteht nach Dragon<sup>406</sup> und Baumann<sup>407</sup> aus verschiedenen erweiterbaren Programmbausteinen, die anhand von Kennlinien beschrieben werden. Die Kennlinien für Lenkung, Reifen, Federung, Dämpfung, Motor, Triebstrang, Bremse und weitere Fahrwerksbestandteile werden an Prüfständen oder durch den Abgleich mit realen Fahrdynamikmessungen ermittelt. Für die durchgeführte Studie kann auf ein bereits bestehendes Simulationsmodell für ein vergleichbares Versuchsfahrzeug zurückgegriffen werden. Das Modell wird um die Möglichkeit erweitert, einen vorgegebenen HA-Lenkwinkel  $\delta_h$  im Moment der Bremsbetätigung aufzuschalten. Darüber hinaus werden die Lenkungskennlinie und weitere Fahrzeugparameter wie die exakte Achslastverteilung an das Versuchsfahrzeug aus der Realstudie angepasst. Bei der nachgebildeten Hinterradverstellung wird die Verstelldynamik der verwendeten Linearaktorik aus der Realstudie hinsichtlich Totzeit (0,1 s ab Bremsbeginn) und Verstellgeschwindigkeit (4°/s) berücksichtigt.

<sup>405</sup> Hahlbrock et al. (2011): Die Entstehung des CFK-Fahrsimulators für Daimler

<sup>406</sup> Dragon (1996): FADYS Fahrdynamikmodell, S. 117ff

<sup>407</sup> Baumann (2003): Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität, S. 54f

FADYS bildet nach Bild 3.9 gemeinsam mit dem Hexapod-Fahrsimulator und dem Fahrer einen geschlossenen Regelkreis. Die Versuchssteuerung leitet zusätzlich die benötigten Manöveranweisungen zur Abbildung der Versuchsfahrbahn und der Verkehrssituation an den Fahrsimulator weiter. Am Fahrsimulator kann im Gegensatz zur Realstudie eine automatisierte Ablaufsteuerung implementiert werden, die im Anschluss an die Abfrage der subjektiven Beherrschbarkeit direkt das nächste Manöver initiiert, Details siehe Kapitel 4.2.

### 3.5.2 FADYS Modellvalidierung

Neben der Möglichkeit einer realitätsnahen Bewegungsdarstellung am Daimler AG-Fahrsimulator hängt die Vergleichbarkeit der Bewegungsdarstellung zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie maßgeblich von der Eignung des verwendeten Simulationsprogramms ab, sowohl das Grundfahrzeugverhalten als auch Hinterradlenkeingriffe valide nachstellen zu können. Zum Nachweis der Eignung des an den Versuchsträger der Realstudie angepassten Simulationsmodells werden in Bild 3.10 der benötigte Lenkradwinkel (links) und das auftretende Lenkradmoment (rechts) während eines Lenkungsziehens bei 100 km/h über der Querschleunigung dargestellt. Sowohl der Lenkradwinkel als auch das Lenkradmoment aus der Simulation folgen der Messung ohne nennenswerte Abweichung. Lediglich die maximal erzielte Querschleunigung des Testfahrzeug aus Bild 3.10 (rechts) wird durch das Simulationsmodell nicht vollständig erreicht. Bis hin zu einer Querschleunigung von ca.  $8 \text{ m/s}^2$  kann jedoch von einem identischen stationären Lenkverhalten ausgegangen werden. Das virtuelle Testfahrzeug wurde am Daimler AG-Fahrsimulator zudem in dynamischen Spurwechseltests von den zugehörigen Baureihen-Experten eindeutig als Mercedes-Benz C-Klasse des Typs *S204* mit der entsprechenden Lenkungs- und Fahrwerksvariante subjektiv bewertet und bestätigt.

Bild 3.11 (links) vergleicht den Zeitverlauf von drei verschiedenen Open-Loop-Gierstörungen in FADYS-Simulation und Messungen des Versuchsfahrzeugs. Die Gegenüberstellung der Gierstörungen belegt, dass bei identischen Maximalwerten der Gierstörungen ein nahezu identischer Zeitverlauf erzielt werden kann. Dies bestätigt auch die Übersicht der Zeitverzögerungen der jeweiligen Maximalwerte der Gierstörungen ab Bremsbeginn aus Bild 3.11 (rechts) mit einer identischen HA-Verstellgeschwindigkeit von  $4^\circ/\text{s}$  in Simulation und realer Messung. Eine signifikante Abweichung zwischen Simulation und Testfahrzeug ist auch hier nicht erkennbar. Das FADYS-Simulationsmodell ist in der Lage, sowohl das Grundfahrzeugverhalten als auch die Aufschaltung von Gierstörungen durch eine Hinterradverstellung valide darzustellen. Die betragsmäßig geringsten Gierstörungen von ca.  $2^\circ/\text{s}$  treten hierbei ca. 0,4 s nach Bremsbeginn auf, während die maximale Gierstörung in der Realstudie von  $16^\circ/\text{s}$  erst

nach ca. 0,8 s verzeichnet wird. Die Ursache ist eine begrenzte Stellgeschwindigkeit von  $\dot{\delta}_h = 4^\circ/s$  der Linearaktorik des Versuchsträgers.

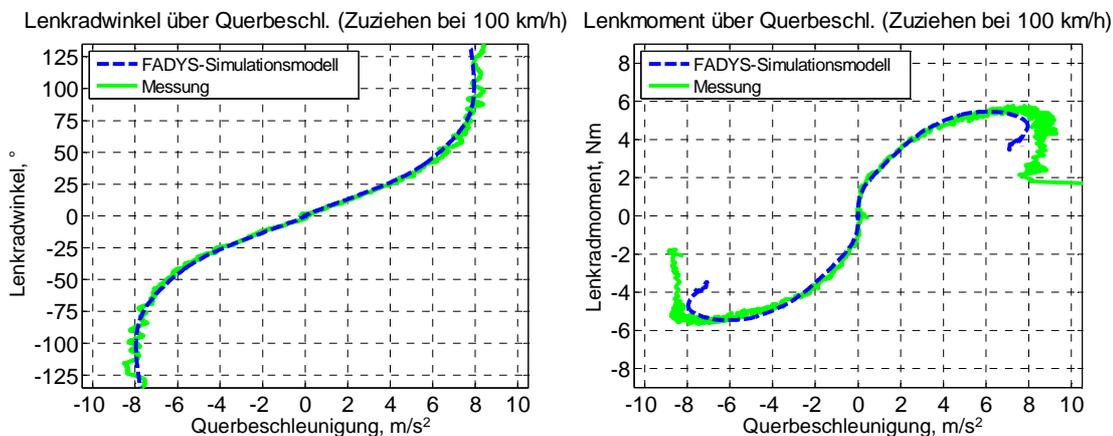


Bild 3.10 Vergleich des Eigenlenkverhaltens und des Lenkmoments von FADYS-Simulationsmodell und dem verwendeten Versuchsfahrzeug

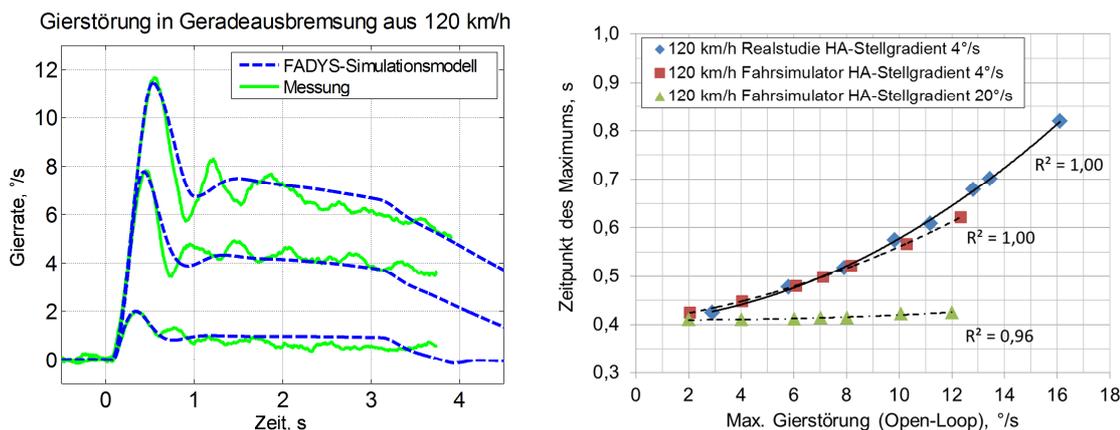


Bild 3.11 Vergleich des Zeitverlaufs der aufgeschalteten Gierstörungen von FADYS-Simulationsmodell und dem verwendeten Versuchsfahrzeug

Bild 3.11 (rechts) zeigt die zusätzliche Versuchsvariante der Geradeausbremsung aus 120 km/h am Fahrsimulator mit erhöhter HA-Verstellgeschwindigkeit (20°/s statt 4°/s). Infolge der schnelleren Verstellung werden hohe Gierstörungen ebenfalls bereits ca. 0,4 s nach Bremsbeginn erzielt. Eine weitere Erhöhung der Verstellgeschwindigkeit  $\dot{\delta}_h$  führt hingegen zu keiner weiteren Reduktion der Verzugszeit. Diese Beobachtung erscheint plausibel, da selbst der zugehörige HA-Störwinkel der maximalen Gierstörungsausprägung bei 120 km/h ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 12^\circ/s$ ;  $\delta_{h,\max} = 1,33^\circ$ ) mit einer Verstellgeschwindigkeit von  $\dot{\delta}_h = 20^\circ/s$  bereits 67 ms nach Lenkbeginn anliegt, was in etwa der Dauer einer Umdrehung des verwendeten Reifentyps bei 120 km/h entspricht (ca. 60 ms). Eine weiter gesteigerte Verstellgeschwindigkeit bewirkt aufgrund der Berücksichtigung des Ein-

laufverhaltens eines Reifens<sup>408</sup> durch FADYS keinen weiter beschleunigten Anstieg der Seitenkraft.

Um den möglichen Einfluss einer geringeren Verzugszeit des Gierstörungsmaximums auf die resultierende Beherrschbarkeit einer identischen Gierstörung auszublenden, wird der Verstellgradient der Hinterachslenkung bei Geradeausbremsungen aus 180 km/h auf die erzielten Verzugszeiten in Geradeausbremsung aus 120 km/h angepasst. Hierfür ist eine minimale Reduzierung des Verstellgradienten von 4°/s auf ca. 3,3°/s notwendig.

### 3.6 Fazit

Zur Beurteilung des Zusammenhangs zwischen den charakteristischen Fahrsicherheitskennwerten in Bremsmanövern und der resultierenden Beherrschbarkeit durch Normalfahrer sollen Geradeaus- und Kurvenbremsungen mit Geschwindigkeiten von 80 km/h (Kurvenbremsung) bis hin zu 180 km/h (Geradeausbremsung) durchgeführt werden. Die gewählte Breite der mit Pylonen begrenzten Fahrgassen richtet sich dabei mit Ausnahme des Kurventeilstücks nach den in Deutschland üblichen Mindestfahrspreibreiten des jeweiligen Streckentyps (2,5 m in Autobahnbaustellen, 3,5 m auf Autobahnen). In Kurvenfahrt werden aufgrund einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse ebenfalls 2,5 m Fahrstreifenbreite verwendet. Das Testkonzept zur Bewertung von Gierstörungen umfasst insgesamt 51 Testvarianten, die mit jeweils mindestens 30 verschiedenen Normalfahrern pro Variante absolviert werden müssen. Im Gegensatz zu bisherigen Probandenstudien soll in dieser Arbeit das objektive Kurshaltevermögen - repräsentiert durch auftretende Fahrstreifenverletzungen, Kursabweichungen und den minimalen Abstand zur Fahrstreifenbegrenzung - ermittelt werden. Auf Basis der bewährten Störbeurteilungsskala<sup>409</sup> von Neukum/Krüger wird zudem eine eigene Beherrschbarkeitsskala abgeleitet, die zur subjektiven Beurteilung des Grundfahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests verwendet werden kann. In einer aktiven Hinterradverstellung wird das geeignete Testinstrument zur Variation des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests identifiziert. Über Lenkwinkelsprünge an der Hinterachse können in allen Testmanövern reproduzierbare Gierstörungen  $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max} > 10^\circ/\text{s}$  angeregt werden. Durch ein querbeschleunigungsproportionales Mitlenken der Hinterachse resultiert zudem eine deutlich reduzierte Gierstabilität bei identischen Lenkradwinkeleingaben. Eine Untersuchung der Beherrschbarkeit von hohen Schwimmwinkeln soll in einem Ausweichtest durchgeführt werden.

---

<sup>408</sup> Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, S. 195ff

<sup>409</sup> Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

Die Untersuchung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen im Hochgeschwindigkeitsbereich bis 180 km/h erfolgt am Fahrsimulator der Daimler AG. Der Fahrsimulator bietet durch seine realitätsnahe Bewegungs- und Umgebungsdarstellung gute Voraussetzungen für die zu prüfende Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Bremssituationen. Das Simulationsmodell zur Bewegungssteuerung des Fahrsimulators zeigt eine valide Anpassung des Grundfahrzeugverhaltens und des Fahrzeugverhaltens infolge von Hinterradlenkeingriffen an das eingesetzte Testfahrzeug aus der Realstudie.

## 4 Durchführung und Methodik der Auswertung

In der folgenden Durchführung der Studie soll das resultierende Kurshaltevermögen und die subjektive Beherrschbarkeit von Normalfahrern in Abhängigkeit der Variation von charakteristischen Bewegungskenngrößen durch eine Hinterradverstellung ermittelt werden. Zur Umsetzung des in Kapitel 3 abgeleiteten Versuchskonzepts wird ein Versuchsfahrzeug mit der benötigten Hinterradverstellung ausgerüstet und mit Messtechnik zur Erfassung der Bewegungsgrößen und der exakten Position des Fahrzeugs versehen. Die Durchführung ist in die Realstudie auf dem Testgelände in Papenburg bis 120 km/h und eine Folgestudie am Fahrsimulator bis 180 km/h unterteilt.

### 4.1 Durchführung der Realstudie im kontrollierten Feld

#### 4.1.1 Versuchsfahrzeug



Bild 4.1 Verwendeter Versuchsträger mit Hinterradverstellung und Messtechnikaufbau

Bild 4.1 zeigt das Versuchsfahrzeug des Typs Mercedes-Benz C-Klasse (S204) mit Messtechnikaufbau und Leistungselektronik zur Ansteuerung der Hinterradverstellung im Kofferraum des Fahrzeugs. Durch die Zusatzgewichte der beiden 12 V-Batterien sowie des höheren Gewichts der beiden Linearaktoren an der Hinterachse, die anstelle der Querlenker verbaut werden, ist die Gewichtsverteilung des Fahrzeugs nach Tabelle 4.1 in Richtung eines minimal hecklastigen Fahrzeugs verschoben (Gewichtsverteilung VA/HA 48/52 %). Das messfertige Gesamtgewicht inklusive Fahrer und Beifahrer liegt mit 1934 kg jedoch im üblichen Bereich heutiger Mittel- und Oberklassefahrzeuge.

Tabelle 4.1 Fahrzeugdaten des messfertigen Versuchsfahrzeugs

| Mercedes Benz C-Klasse Kombi (S204), Modelljahr: 2009 |          |            |        |                              |            |
|---|----------|------------|--------|------------------------------|------------|
| Gewicht (messfertig)                                  | Radstand | Spurbreite |        | Gewichtsverteilung VA/HA [%] | Reifen     |
|   |          | vorne      | hinten |                              |            |
| 1934 kg   | 2,760 m  | 1,545      | 1,548  | 48/52                        | 225/45 R17 |

#### 4.1.2 Probandenkollektiv und Testvarianten

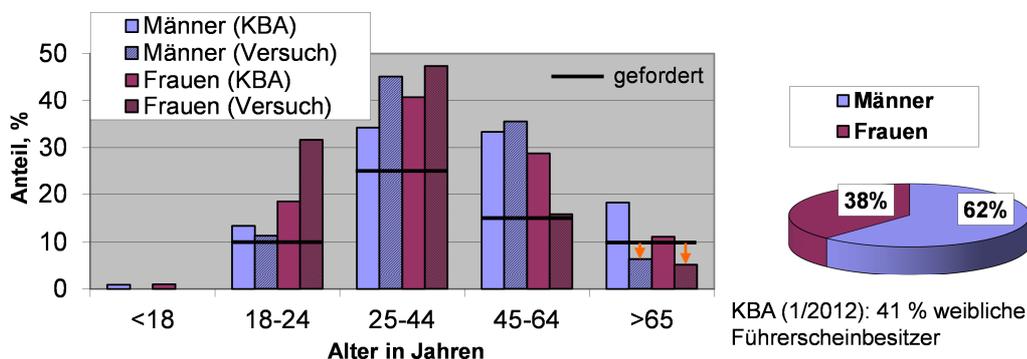


Bild 4.2 Übersicht der Alters- und Geschlechtsverteilung der akquirierten Probanden (Realstudie) im Vergleich zur Statistik der Führerscheinbesitzer in Deutschland (nach Kraftfahrtbundesamt KBA, Stand 1/2012)

In Kapitel 3.3 wurde auf die benötigte Probandenanzahl und die Forderung einer repräsentativen Alters- und Geschlechtsverteilung des Probandenkollektivs im Hinblick auf die statistische Führerscheinverteilung in Deutschland eingegangen. Bild 4.2 zeigt die erzielte Zusammensetzung des Probandenkollektivs von 100 Normalfahrern in der Studie auf einem Testgelände („Realstudie“). Der Anteil weiblicher Probanden an der Gesamtverteilung entspricht mit 38 % der Vorgabe von 41 %  $\pm 5$  % und somit annähernd der tatsächlichen Verteilung. Auch die Forderung nach mindestens jeweils 10 % Anteil männlicher und weiblicher Fahrer in der Altersgruppe 18-24 Jahre, > 25 % in der Altersgruppe 25-44 Jahre und > 15 % in der Altersgruppe 45-64 Jahre kann erfüllt werden. Lediglich oberhalb von 65 Jahren sind anstelle der geforderten 10 % Anteil nur 6 % der männlichen und 5 % der weiblichen Testpersonen im Probandenkollektiv der Realstudie enthalten. Die Probandenverteilung kann in Summe als annähernd repräsentativ für die Verteilung von Normalfahrern im öffentlichen Straßenverkehr angesehen werden.

In Tabelle 4.2 ist die Anzahl der absolvierten Testvarianten mit Lenkwinkelsprung an der Hinterachse und die Anzahl aller Ausweichtests mit verändertem Mitlenkfaktor an der Hinterachse aufgelistet. Die geforderte Probandenanzahl von  $n > 30$  unterschiedlicher Testpersonen kann bis auf die ungestörte Geradeausbremsung aus 120 km/h (nur  $n = 29$ ) in jedem Bremsmanöver erzielt werden. In jeweils  $n = 24-27$  Fahrten pro Variante können mittels Differential-GPS die exakten Kursverlaufsdaten erfasst werden (geringer Anteil an Ausfällen aufgrund technischen Defekts). Die jeweils erste Testvariante (Geradeausbremsung aus 120 km/h mit verschiedenen Stellwinkelaufschaltungen) wird bei  $n = 53$  Fahrern als Referenzfahrt am Ende der Versuchsreihe wiederholt, um Gewöhnungseffekte zu prüfen. In ungebremster Geradeaus- und Kurvenfahrt mit 80 km/h konnte hingegen nicht in jeder Variante die geforderte Mindestanzahl von 30 verschiedenen auswertbaren Probandenfahrten pro Variante erzielt werden ( $n_{\min} = 25$ ).

Tabelle 4.2 Erzielte Abdeckung der Versuchsvarianten durch das Probandenkollektiv in der Realstudie

| Testmanöver in der Realstudie      | HA-Stellwinkel-Varianten, ° |      |      |      |      |                  |      |      |      |
|------------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------------------|------|------|------|
|                                    | 0,00                        | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25             | 1,50 | 1,75 | 2,00 |
| <b>Geradeausfahrt mit 120 km/h</b> | Probandenanzahl (n)         |      |      |      |      |                  |      |      |      |
| gebremst:                          | 29                          | ≥30  | ≥30  | ≥30  | ≥30  | ≥30              | ≥30  | ≥30  | ≥30  |
| Referenzfahrten:                   | 6                           | 6    | 6    | 6    | 5    | 5                | 6    | 6    | 7    |
| <b>Geradeausfahrt mit 80 km/h</b>  | Probandenanzahl (n)         |      |      |      |      |                  |      |      |      |
| gebremst:                          | ≥30                         | ≥30  | ≥30  | ≥30  | ≥30  | ≥30              | ≥30  | ≥30  | ≥30  |
| ungebremst:                        | 29                          |      | ≥30  |      | 29   |                  | 27   |      | ≥30  |
| <b>Kurvenfahrt mit 80 km/h</b>     | Probandenanzahl (n)         |      |      |      |      |                  |      |      |      |
| gebremst:                          | ≥30                         | ≥30  | ≥30  | ≥30  | ≥30  | ≥30              | ≥30  | ≥30  | ≥30  |
| ungebremst:                        | ≥30                         |      | ≥30  |      | ≥30  |                  | 25   |      | ≥30  |
| <b>Ausweichtest mit 80 km/h</b>    | Mitlenkfaktor $k_{prop}$    |      |      |      |      | Σ Probanden: 100 |      |      |      |
|                                    | 0,00                        | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |                  |      |      |      |
|                                    | Probandenanzahl (n)         |      |      |      |      |                  |      |      |      |
| 80 km/h:                           | 31                          | 33   | 37   | 25   | 37   |                  |      |      |      |

In den durchgeführten Ausweichtests wird wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben keine Gleichverteilung der Testpersonen auf die fünf vorkonfigurierten Varianten des querbeschleunigungsproportionalen Mitlenkfaktors  $k_{prop}$  gewählt. Die variierten Mitlenkfaktoren werden aufgrund der beobachteten Verteilung der resultierenden Schwimmwinkel während der durchgeführten Ausweichtests hin zu höheren Mitlenkfaktoren verschoben, um eine ausreichende Abdeckung des Schwimmwinkelbereichs  $\beta_{SP/HA}$  zwischen 5-10° zu erzielen.

#### 4.1.3 Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80-120 km/h

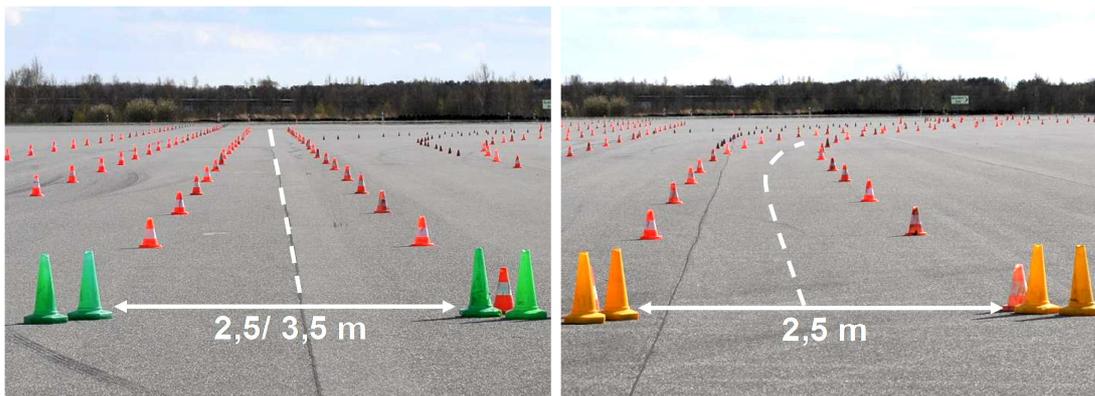


Bild 4.3 Versuchslayout der Pylonen-begrenzten Fahrgassen in Geradeaus- und Kurvenbremsung

Die durchgeführten Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80 km/h und 120 km/h werden - wie in Kapitel 3.3 definiert - durch die Gestaltung eines Fahrstreifens mit Pylonen-Begrenzung dargestellt, siehe Bild 4.3. Die Fahrstreifenbreite von 2,5/3,5 m in Geradeausbremsung und 2,5 m in Kurvenbremsung entspricht dem Abstand zwischen den jeweiligen Innenkanten der begrenzenden Pylonen. Nach Einfahrt in die Pylonengasse mit der jeweils festgelegten Fahrgeschwindigkeit erfolgt eine Bremsanforderung

durch den beifahrenden Versuchsbegleiter an den Fahrer. Die anschließende Bremsung löst nach Kapitel 3.4 automatisch einen Lenkeingriff an der Hinterachse aus, der wiederum wie beschrieben zu einer Gierbewegung des Fahrzeugs führt. Im Vorfeld der Versuchsdurchführung werden die Probanden darauf hingewiesen, dass ein Verlassen des Fahrstreifens und der Kontakt mit einer Pylone gleichbedeutend mit einem möglichen Unfallereignis in einer realen Fahrsituation sind. Im direkten Anschluss an die Durchführung wird die subjektive Beherrschbarkeit nach der in Kapitel 3.3.3 abgeleiteten „Beherrschbarkeitsskala“ abgefragt. Durch den Versuchsbegleiter (Beifahrer) sowie einen außenstehenden Beobachter werden alle aufgetretenen Pylonenkontakte dokumentiert. Während jeder Einzelfahrt werden zudem alle Bewegungsgrößen des Fahrzeugs und der exakte Kursverlauf des Fahrzeugs mittels entsprechender Messtechnik und Differential-GPS erfasst, Details siehe Kapitel 4.3.

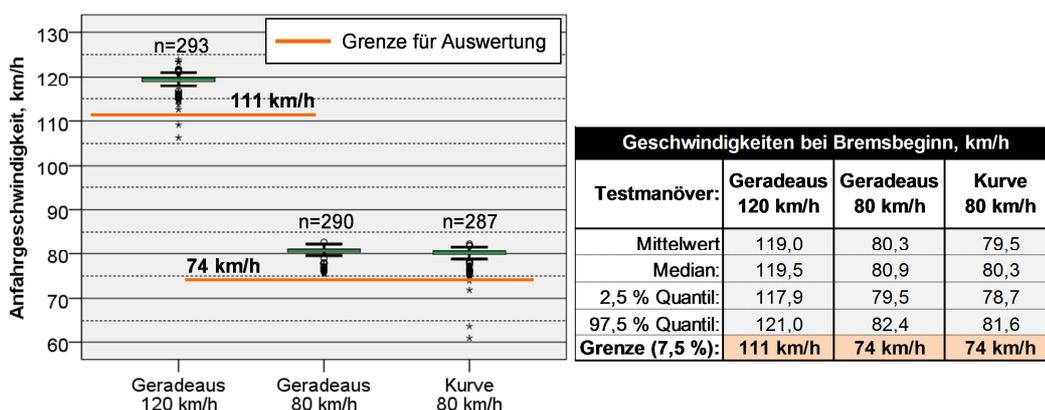


Bild 4.4 Erzielte Anfangsgeschwindigkeiten vor Bremsbeginn mittels Limiter-Funktion

Durch die Verwendung der „Limiter“-Funktion des Testfahrzeugs können die Zielgeschwindigkeiten (80 und 120 km/h) vor Bremsbeginn von fast allen Probanden reproduzierbar erreicht werden, siehe Boxplot-Darstellung und zugehörige Tabelle in Bild 4.4. Bei Anwendung des Limiters kann die definierte Zielgeschwindigkeit manuell eingestellt und das Fahrpedal anschließend dauerhaft betätigt werden. Das Antriebsmoment wird bei Annäherung an die Zielgeschwindigkeit automatisch reduziert und die Zielgeschwindigkeit eingeregelt. In Geradeausbremsung erzielen 95 % aller Testpersonen eine Fahrgeschwindigkeit unmittelbar vor Bremsbeginn zwischen 117,9 und 121 km/h. Die Ausgangsfahrgeschwindigkeiten bei Geradeaus- und Kurvenbremsung mit einer Zielgeschwindigkeit von 80 km/h liegen bei 95 % aller Probanden im Bereich zwischen 79,5-82,4 km/h (Geradeausbremsung) bzw. 78,7-81,6 % (Kurvenbremsung). Die wenigen in Bild 4.4 erkennbaren Fahrten mit deutlichen Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit > 7,5 % fließen nicht in die Bewertung mit ein. In der Übersicht aller ausgewerteten Wiederholfahrten von identischen Versuchsvarianten aus Tabelle 4.2 sind bereits nur die ausgewerteten Testfahrten enthalten. Auch in den weiteren durchgeführten Testmanö-

vern, wie z.B. den ungebremsten Geradeaus- und Kurvenfahrten sowie dem Ausweichtest, wird durch die Verwendung der Limiter-Funktion eine reproduzierbare Ausgangsfahr-geschwindigkeit erzielt.

#### 4.1.4 Ausweichtest

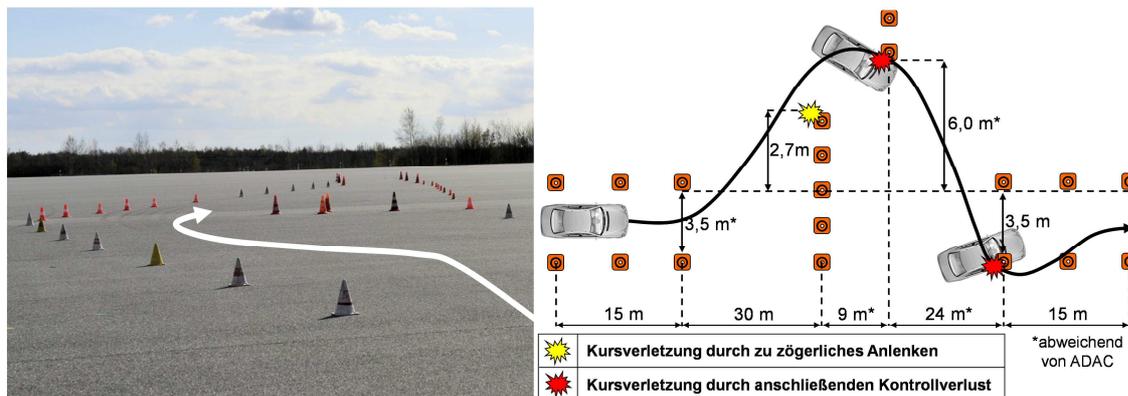


Bild 4.5 Versuchslayout des Ausweichtests auf dem Prüfgelände (links) und Klassifizierung der erfassten Kursverletzungen (rechts)

Der Aufbau des abgewandelten ADAC-Ausweichtests erfolgt ebenfalls nach der Vorgabe des Versuchskonzepts. Um die Kursführungsaufgabe für die Normalfahrer eindeutiger zu gestalten, wird der gesamte Fahrschlauch seitlich von Pylonen begrenzt, siehe Bild 4.5 (links). Die Anfahrt auf das zu umfahrende Hindernis erfolgt mit limitierten 80 km/h Fahrgeschwindigkeit. Die Probanden werden angewiesen, den Fuß während der Durchfahrt nach Möglichkeit nicht vom Fahrpedal zu nehmen, um die Fahrgeschwindigkeit auch während der anschließenden Ausweichsituation vergleichbar zu halten. Die dauerhafte Fahrpedalbetätigung während des Anlenkens wird bereits in einer Übungsfahrt angewandt und eingeübt. Durch diese Anweisung soll eine ungewünschte Bremsung der Fahrer vor dem Ausweichen vermieden werden, die in Ausweichsituationen bei mehr als 10 % der Fahrer beobachtet werden kann.<sup>410,411</sup>

Die eigentliche Versuchsvariante – die Variation des destabilisierenden Mitlenkfaktors der Hinterachse  $k_{prop}$  – wird erst unmittelbar vor dem Moment des ersten Einlenkens in der Bewertungsfahrt aktiv geschaltet. Im Anschluss an die Durchfahrt erfolgt analog zur Durchführung der Bremsmanöver eine direkte Beurteilung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch die Testperson. Bei der Bewertung von Fahrstreifenverletzungen bietet sich in den Ausweichtests nach Bild 4.5 (rechts) jedoch eine Unterscheidung an: Kollisionen mit den Hindernis-Pylonen in Ausgangsfahrtrichtung werden in dieser Arbeit auf ein zu zögerliches Anlenken durch den Fahrer bzw. ein zu geringes

<sup>410</sup> Braber, Bukman (1998): Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens bei Ausweichmanövern

<sup>411</sup> Bruder et al. (2007): Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung

Ansprechverhalten des Fahrzeugs auf die Lenkbefehle des Fahrers zurückgeführt, während Pylonenkontakte im weiteren Verlauf des Ausweichtests auf eine fehlende Stabilisierbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch die Testperson hinsichtlich einer sicheren Kursführung hinweisen.

Von den theoretisch möglichen 200 Ausweichtests aus zwei Versuchsvarianten mit 100 Normalfahrern konnten insgesamt nur 163 auswertbare Fahrten durchgeführt werden. Ca. 20 % der Normalfahrer werden von der Schwierigkeit der Fahraufgabe überfordert und führen keine zielgerichteten Lenkbewegungen aus, um das Hindernis zu umfahren. Es resultieren ausschließlich Kollisionen mit mehreren Pylonen des Hindernisses oder die Fahrgeschwindigkeit wird vor Erreichen des Hindernisses stark reduziert. Es werden ausschließlich Fahrten ausgewertet, in denen der Fahrer eine Anfahrtschwindigkeit von 74 km/h überschreitet und maximal die in Bild 4.5 (rechts) markierte äußere Pylone des Hindernisses touchiert wird. Bei Kollisionen mit mehreren Pylonen des Hindernisses oder einer Unterschreitung der Fahrgeschwindigkeit von 74 km/h vor dem ersten Anlenken durch Bremsung oder zu zögerliche Fahrpedalbetätigung wird die Testfahrt für ungültig erklärt und geht nicht in die Auswertung mit ein.

## 4.2 Durchführung der Fahrsimulatorstudie

Die Fahrsimulatorstudie am Daimler-Fahrsimulator in Sindelfingen findet im Anschluss an die „Realstudie“ in Papenburg statt. Aufgrund der örtlichen Distanz kann nicht auf das Probandenkollektiv der Realstudie aus Papenburg zurückgegriffen werden. Zusätzlich findet eine Anpassung des Versuchslayouts zur optimierten Ablaufsteuerung der Bewertung von Gierstörungen in Bremsmanövern am Fahrsimulator statt. Die Zusammensetzung des Probandenkollektivs erfolgt analog zur Realstudie nach der Vorgabe des Versuchskonzepts aus Kapitel 3.3.1.

### 4.2.1 Probandenkollektiv und Testvarianten

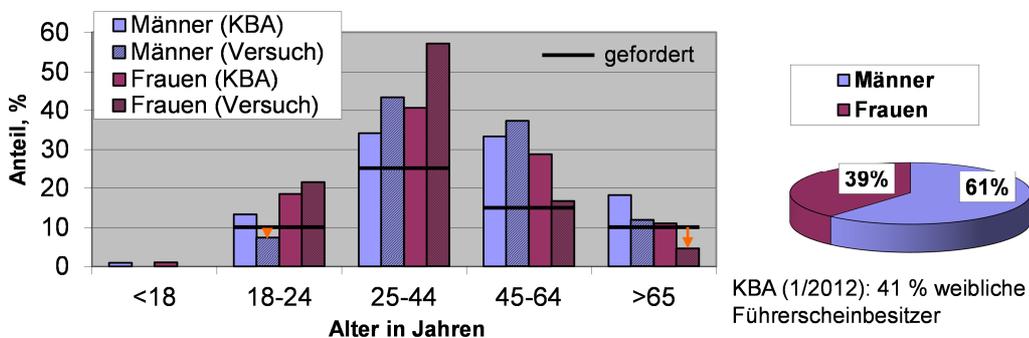


Bild 4.6 Übersicht der Alters- und Geschlechtsverteilung der akquirierten Probanden (Fahrsimulatorstudie) im Vergleich zur Statistik der Führerscheinbesitzer in Deutschland (KBA, Stand 1/2012)

Das eingesetzte Probandenkollektiv aus  $n = 104$  Normalfahrern zeigt nach Bild 4.6 ebenfalls eine gute Repräsentanz der realen Führerscheinbesitze: Der Anteil weiblicher Probanden am gesamten Probandenkollektiv liegt mit 39 % nur 2 % unterhalb der statistischen Verteilung in Deutschland (Stand 01/2012). Im Gegensatz zur Realstudie können auch ältere männliche Fahrer ( $> 65$  Jahre) mit dem geforderten Anteil  $> 10$  % an allen männlichen Teilnehmern akquiriert werden. Der Anteil männlicher Versuchsteilnehmer in der Altersgruppe von 18-24 Jahre liegt mit ca. 7,5 % hingegen ebenso wie die Anzahl der weiblichen Versuchsteilnehmer oberhalb von 65 Jahre mit ca. 5 % knapp unterhalb des im Vorfeld geforderten Anteils von 10 %.

Tabelle 4.3 Erzielte Abdeckung der Versuchsvarianten durch das Probandenkollektiv am Fahrsimulator

| Testmanöver am Fahrsimulator          | Gierstörungs-Varianten, %s |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------------------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                                       | 0                          | 2   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 10  | 12  |  |
| <b>Geradeausbremsung aus 120 km/h</b> | Probandenanzahl (n)        |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| Verstellgradient 4%:                  | ≥30                        | ≥30 | ≥30 | -   | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 |  |
| Verstellgradient 20%:                 | ≥30                        | ≥30 | ≥30 | -   | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 |  |
| <b>Geradeausbremsung aus 180 km/h</b> | Probandenanzahl (n)        |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| Verstellgradient ca. 3,3%:            | ≥30                        | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 | ≥30 | -   |  |
| Referenzfahrten:                      | 14                         | 14  | 12  | 11  | 13  | 14  | 12  | 14  | -   |  |
| $\Sigma$ Probanden: 104               |                            |     |     |     |     |     |     |     |     |  |

Mit 104 Testpersonen kann die geforderte Anzahl von mindestens 30 verschiedenen Fahrern pro Testvariante nach Tabelle 4.3 in jeder Variante erzielt bzw. überschritten werden. Die Referenzfahrten zur Prüfung von eventuellen Gewöhnungseffekten werden als jeweils letzte Fahrt eines Probanden mit mindestens zehn verschiedenen Fahrern pro Gierstörungsvariante in Geradeausbremsungen aus 180 km/h durchgeführt.

#### 4.2.2 Geradeausbremsungen aus 120-180 km/h

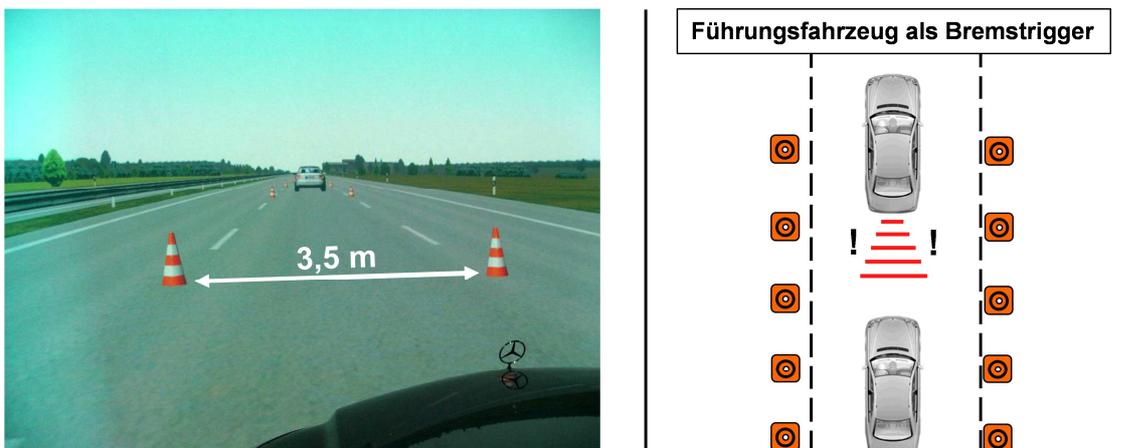


Bild 4.7 Versuchslayout der Pylonen-begrenzten Fahrgasse mit vorausfahrendem Führungsfahrzeug am Fahrsimulator

Im Testablauf am Fahrsimulator wird eine automatisierte Versuchssteuerung eingesetzt, d.h. die feste Reihenfolge der vorgesehenen Gierstörungsvarianten und Fahrgeschwin-

digkeiten ist in einem Ablaufplan gespeichert. Zur weiteren Vereinfachung der Durchführung wird auf dem verwendeten Streckenmodul „3-streifige Autobahn“ nach Bild 4.7 ein vorausfahrendes „Führungsfahrzeug“ eingesetzt, welches die Probanden an die vorgegebene Zielgeschwindigkeit heranführt (120 oder 180 km/h) und anschließend zur Bremsung zwingt. Die Zielgeschwindigkeit wird wie in der Realstudie über eine Limiter-Funktion eingestellt und gehalten. Nach Erreichen der Zielgeschwindigkeit und nach Ablauf einer variierten Zeitdauer verzögert das vorausfahrende Fahrzeug. Die auf diese Weise erzwungene Bremsreaktion des Fahrers aktiviert wiederum analog zur Realstudie die automatische Aufschaltung eines variierten HA-Lenkswinkels. Somit kann eine realistische (alltägliche) Fahrsituation nachgestellt werden. Nach Abfrage der subjektiven Beherrschbarkeit wird die nächste Variante des Ablaufplans ausgelöst und das Führungsfahrzeug beschleunigt erneut auf die Zielgeschwindigkeit. Durch die Kopplung der Bremsauslösung des Führungsfahrzeugs an ein Erreichen der definierten Zielgeschwindigkeit mit einem Zielkorridor von  $\pm 2$  km/h werden in allen Versuchsvarianten der Fahrsimulatorstudie im Vergleich zur Realstudie noch geringere Abweichungen der Ausgangsfahrgeschwindigkeit beobachtet.

### 4.3 Verwendete Messtechnik

Tabelle 4.4 Übersicht der verwendeten Messtechnik

| Messgröße            | Einheit    | Messtechnik  | Frequenz | Messgenauigkeit    |
|----------------------|------------|--|----------|--------------------|
| Fahrgeschwindigkeit  | km/h       | Correvit S350 Aqua (1)                                   | 200 Hz   | $\pm 0,2$ %        |
| Schwimmwinkel        | Grad (°)   |  | 200 Hz   | $\pm 0,2^\circ$    |
| Längsbeschleunigung  | $m/s^2$    | GPS gestützte Kreiselpattform<br>iTraceRT-F200-E (2)     | 200 Hz   | $\pm 0,0001 m/s^2$ |
| Querbearschleunigung |            |  | 200 Hz   |                    |
| Gierrate             | $^\circ/s$ | iTraceRT-F200-E (2)                                      | 200 Hz   | $\pm 0,2^\circ/h$  |
| Gierwinkel           | Grad (°)   |  | 200 Hz   | $\pm 0,01^\circ$   |
| Lenkradwinkel        | Grad (°)   | Fzg.-internes CAN Signal                                 | 200 Hz   | $\pm 1^\circ$      |
| Fzg.-Position        | m          | iTraceRT-F200-E (1) + iREF-L1L2 RTK GPS Basisstation (2) | 100 Hz   | $\pm 0,02$ m       |

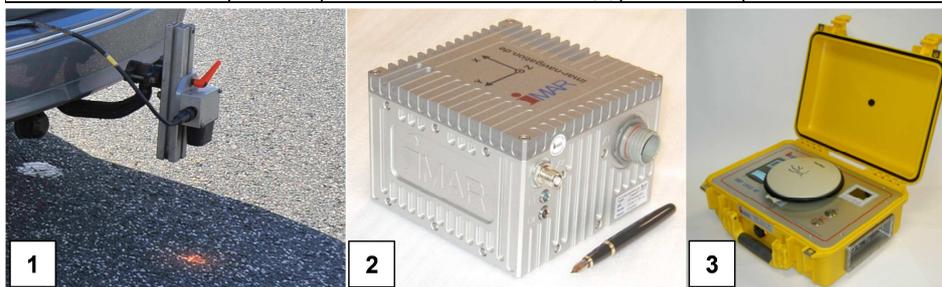


Tabelle 4.4 zeigt die verwendete Messtechnik und die erzielten Messgenauigkeiten zur Erfassung der benötigten Bewegungsgrößen, Lenktätigkeiten und der Position des Fahrzeugs. Der Fahrgeschwindigkeitsvektor  $v_{corr}$  und der Schwimmwinkel am Ort der Leuchtpunktmessung  $\beta_{corr}$  werden anhand des bereits in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Correvit-Sensors ermittelt. Der Correvit-Sensor ist nach Tabelle 4.4 (unten links) mittig am

Heck des Testfahrzeugs befestigt und überträgt die Messsignale mit einer Messfrequenz von 200 Hz an die zentrale Messrechneinheit. Die Berechnung der Fahrgeschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung erfolgt mit dem bekannten Schwimmwinkel am Messpunkt  $\beta_{corr}$  zu

$$v_x = v_{corr} \cdot \cos(\beta_{corr}) \quad (4.1)$$

Anhand der erfassten Gierrate  $\dot{\psi}$  und der bekannten Fahrzeugeigenschaften wie Spurweite an Hinter- und Vorderachse  $b_{HA/VA}$ , Radstand  $l$ , Abstand der Hinter- und Vorderachse zum Schwerpunkt des Fahrzeugs  $l_h, l_v$  und dem vermessenen Abstand von Correvit zu Hinterachse  $l_{corr,HA}$  kann die Quergeschwindigkeit  $v_{y,i}$  an einem beliebigen Punkt des Fahrzeugs mit bekanntem Längs- und Querabstand zum Correvit  $l_{x,i}, l_{y,i}$  bestimmt werden

$$v_{y,i} = v_{corr} \cdot \sin(\beta_{corr}) - \dot{\psi} \cdot \sqrt{l_{x,i}^2 + l_{y,i}^2} \cdot \cos \left[ \arctan \left( \frac{l_{y,i}}{l_{x,i}} \right) \right] \quad (4.2)$$

Somit ergeben sich die für diese Arbeit gesuchten Schwimmwinkel an der Hinter- und Vorderachse  $\beta_{HA/SP}$  zu

$$\beta_{HA} = \arctan \left( \frac{v_{y,HA}}{v_x} \right) = \arctan \left( \frac{v_{corr} \cdot \sin(\beta_{corr}) - \dot{\psi} \cdot l_{corr,HA}}{v_{corr} \cdot \cos(\beta_{corr})} \right) \quad (4.3)$$

und

$$\beta_{SP} = \arctan \left( \frac{v_{corr} \cdot \sin(\beta_{corr}) - \dot{\psi} \cdot (l_{corr,HA} + l_h)}{v_{corr} \cdot \cos(\beta_{corr})} \right). \quad (4.4)$$

Die Gierrate  $\dot{\psi}$ , der Gierwinkel  $\psi$  sowie die horizontierten Beschleunigungen des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung  $a_{x,y}$  werden über eine GPS-gestützte Kreiselpattform erfasst. Auf den Einbau eines Messlenkrads zur präzisen Messung von Lenkradwinkel und Lenkmoment wird hingegen verzichtet, um die Testpersonen nicht unnötig zu irritieren. Die Genauigkeit des ausgewerteten Lenkradwinkelsignals über Fahrzeug-CAN von ca.  $1^\circ$  Lenkwinkel ist für die Untersuchung der Lenktätigkeiten des Fahrers in dieser Studie ausreichend.

Neben der Dokumentation von Pylonenkontakten besteht für eine detailliertere Auswertung des objektiven Kurshaltevermögens die Notwendigkeit, eine möglichst exakte Nachverfolgung des erzielten Kursverlaufs durchführen zu können. Zu diesem Zweck wird die GPS-gestützte Kreiselpattform (iTraceRT-F200-E) durch den Einsatz einer GPS-Basisstation (iREF-L1L2 RTK) zu einem Differential-GPS erweitert (iREF-L1L2 RTK).

### 4.3.1 Funktionsweise des verwendeten Differential-GPS-Systems

Eine übliche GPS-gestützte Kreiselplattform (z.B. iTraceRT-F200-E) kann die Position des Fahrzeugs (bzw. der Kreiselplattform) laut Herstellerangaben der Firma iMAR nur mit einer Genauigkeit von etwa 1,8 m erfassen. Die Ursache liegt in der Differenz zwischen der tatsächlichen und theoretischen Laufzeit der Signale zwischen der GPS-Plattform und den zur Ortung verwendeten Satelliten. Die theoretische Laufzeit entspricht aufgrund von atmosphärischen Störungen hierbei nicht den tatsächlichen Laufzeiten. Somit kommt es zu Verfälschungen der ermittelten Position. Bei Verwendung einer Basisstation (in dieser Studie: iREF-L1L2 RTK) wird die Position der Basisstation über eine Dauer von mehreren Minuten hinweg anhand von GPS-Daten exakt bestimmt. Durch die Kenntnis der exakten Position kann die Basisstation im Anschluss die tatsächlichen Laufzeiten berechnen und in Differenz zu den theoretischen Laufzeiten setzen, deren Verwendung zu einer ungenauen Positionserfassung führen würde. Diese Differenz wird von der Basisstation über Funkkontakt einmal pro Sekunde an die im Fahrzeug platzierte GPS-gestützte Kreiselplattform übertragen. Anhand der bekannten Differenz aus den theoretischen und tatsächlichen Laufzeiten kann die Position der im Fzg. platzierten Kreiselplattform mit einer deutlich gesteigerten Genauigkeit von ca. 2 cm bestimmt werden (Herstellerangabe iMAR). Die Einhaltung dieser Herstellerangabe wird vor Ort durch wiederholte Messung einer identischen Fahrzeugposition verifiziert.

### 4.3.2 Kursverlaufbestimmung in Geradeausfahrt

Durch die Verwendung eines Differential-GPS ist die Voraussetzung geschaffen, den Kursverlauf des Fahrzeugs exakt nachverfolgen zu können. Der Kursverlauf muss jedoch auf die durchfahrenen Pylonengassen bezogen werden, um die seitliche Kursabweichung in Bezug auf die Fahrstreifenbegrenzung bestimmen zu können. Zudem ist für die anschließende Analyse eines sicheren Fahrtverlaufs nicht die Position am Ort der Kreiselplattform (Kofferraum) entscheidend, sondern die Position der Fahrzeugkarosserie in Bezug zur Fahrstreifenbegrenzung. In dieser Arbeit wird daher die Position und seitliche Kursabweichung der äußeren Reifenschultern aller vier Räder als Bewertungskriterium verwendet. Durch die Wahl dieses Kriteriums kann eine Auswertung der Annäherung oder des tatsächlichen Überfahrens der Fahrstreifenbegrenzung mit den Rädern des Testfahrzeugs erfolgen.

Bild 4.8 zeigt die Ermittlung des Kursverlaufs bzw. der Position einer Reifenschulter in Bezug auf die Fahrstreifenbegrenzung in geradlinig verlaufenden Fahrgassen (Geradeausbremsung). Zur Ermittlung der Lage des Fahrstreifens wird die Position der Innenkante der ersten und letzten in Bild 4.8 (links) hervorgehobenen Pylonen bestimmt.

Durch die Verbindung der beiden Punkte (1 und 2) resultiert die linke Fahrstreifenbegrenzung bzw. das Koordinatensystem mit X-Achse  $X'$ , Y-Achse  $Y'$  und Gierwinkel  $\psi'$ .

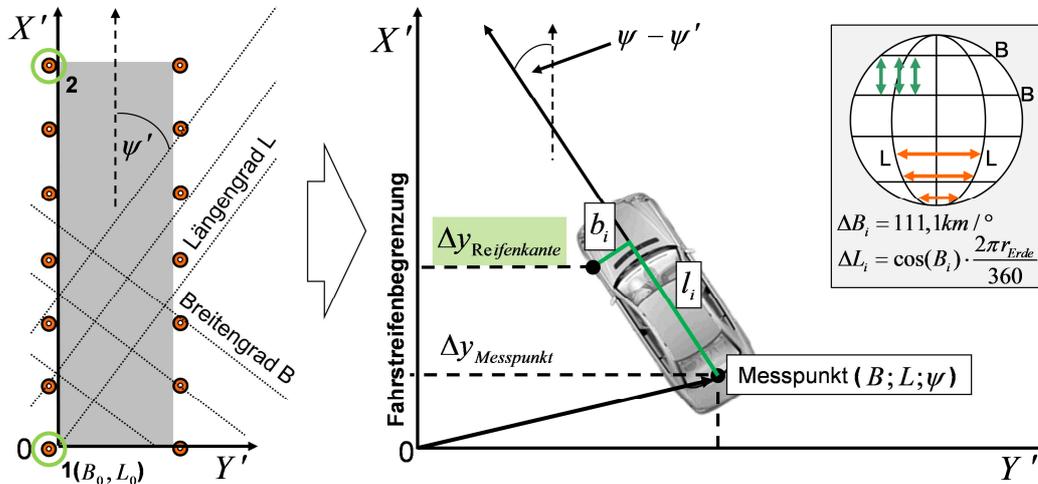


Bild 4.8 Bestimmung des Kursverlaufs mittels Differential-GPS in Geradeausfahrt

Das Koordinatensystem der Fahrgasse schneidet das GPS-Koordinatensystem aus den orthogonal zueinander verlaufenden Längen- und Breitengraden im Transformationswinkel  $\psi'$ . Der Abstand zwischen zwei Breitengraden  $\Delta B_i$  ist konstant (ca. 111,1 km/°), während der Abstand von zwei benachbarten Längengraden  $\Delta L_i$  in Abhängigkeit des Breitengrades bestimmt werden kann.

$$\Delta L_i = \cos(B_i) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Erde}}}{360} \quad (4.5)$$

Auf dem Messgelände in Papenburg beträgt der Abstand zweier Längengrade ca. 66,86 km/°. Die Querabweichung des Messpunkts zur Fahrstreifenbegrenzung kann in den Längsfahrgassen mit den gemessenen Werten der Längen- und Breitengrade  $L, B$  nach Bild 4.8 zu

$$\Delta y_{\text{Messpunkt}} = (L - L_0) \cdot \Delta L_i \cdot \cos(\psi') + (B - B_0) \cdot \Delta B_i \cdot \sin(\psi') \quad (4.6)$$

bestimmt werden. Mit dem gemessenen Gierwinkel des Fahrzeugs  $\psi$ , dem Längsabstand der Kreiselpattform zur jeweiligen Fahrzeugachse  $l_i$  und dem Abstand der Fahrzeugmitte zur äußeren Reifenkante  $b_i$  kann – ebenfalls in Bild 4.8 (rechts) skizziert – eine Umrechnung des seitlichen Abstands zur Fahrstreifenbegrenzung vom Messpunkt auf die gewünschte Position

$$\Delta y_{\text{Reifenkante}} = \Delta y_{\text{Messpunkt}} - l_i \cdot \sin(\psi - \psi') - b_i \cdot \cos(\psi - \psi') \quad (4.7)$$

erfolgen. Diese Berechnung wird für alle 4 Reifenkanten in Bezug auf den Abstand zur linken und rechten Fahrstreifenbegrenzung durchgeführt.

### 4.3.3 Kursverlaufbestimmung in Kurvenfahrt

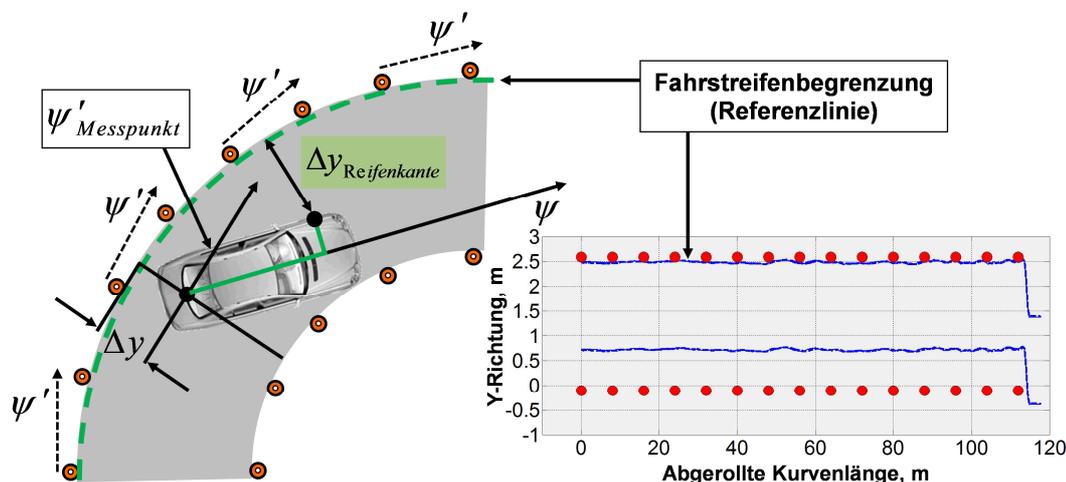


Bild 4.9 Bestimmung des Kursverlaufs mittels Differential-GPS in Kurvenfahrt

In Kurvenfahrt ist die Bestimmung des Kursverlaufs hingegen nicht durch die Ermittlung einer geraden Referenzlinie durch zwei Begrenzungspunkte möglich. Nach Bild 4.9 ist der entsprechende Gierwinkel  $\psi'$  über der Kreisbahn nicht konstant, sondern folgt der Kurvengeometrie. Es bestehen zwei Möglichkeiten zur Bestimmung des Kursverlaufs innerhalb der Pylonengasse:

- 1.: Annahme eines idealen Kreisradius ( $123 \text{ m} \pm \text{ halbe Fahrstreifenbreite}$ ) und Verwendung von ebenfalls zwei Referenzpunkten auf der Fahrstreifenbegrenzung zur Fixierung des idealen Kreisbogens.
- 2.: Vollständige Einzelpunktvermessung der Fahrstreifenbegrenzung zur Bildung einer gekrümmten Referenzlinie.

In dieser Arbeit wird aufgrund der Unabwägbarkeit des exakt getroffenen Kreisradius eine Einzelpunktvermessung der kompletten Fahrstreifenbegrenzung gewählt. Die auftretenden Abweichungen sind in diesem Verfahren nur auf einen lokalen Positionierungsfehler des Fahrzeugs bei der Vermessung der Fahrstreifenbegrenzung bezogen. Ein systematischer Fehler bei fehlerhafter Annahme eines exakten Kreisradius ist somit ausgeschlossen. Die Kurve wird in zwei Wiederholungsfahrten  $< 5 \text{ km/h}$  mit einer möglichst exakten Überdeckung der Außenkante des linken kurvenäußeren Vorderrads mit der Fahrstreifenbegrenzung abgefahren. Bei einer Messfrequenz von  $100 \text{ Hz}$  entspricht dies einem maximalen Abstand zwischen zwei Referenzpunkten der Messung von  $\Delta l_{ref} = 1,4 \text{ cm}$ .

Die Ermittlung des Abstands eines beliebigen Punktes des Fahrzeugs von der Fahrstreifenbegrenzung kann nun durch die Suche nach dem Minimum aus der Differenz der absoluten Position des ausgewählten Punktes und allen Messpunkten der Referenzlinie erfolgen.

$$\Delta y_i = \min \left( \sqrt{[(L_i - L_{ref}) \cdot \Delta L_i]^2 + [(B_i - B_{ref}) \cdot \Delta B_i]^2} \right) \quad (4.8)$$

Liegt ein Messpunkt hierbei genau zwischen 2 Referenzpunkten und exakt auf der eigentlichen Referenzlinie würde bei punktueller Abstandsbetrachtung ein maximaler Fehler der Abstandsbestimmung von  $1/2 \cdot \Delta l_{ref} = 0,7$  cm auftreten. Um diesen Fehler zu vermeiden, wird zwischen dem ermittelten Referenzpunkt mit minimalem Abstand zum relevanten Fahrzeugpunkt und den beiden benachbarten Referenzpunkten linear interpoliert und der minimale Abstand des auszuwertenden Fahrzeugpunktes zu dieser Interpolationslinie bestimmt. Der mögliche Fehler infolge dieser linearen Interpolation resultiert nur noch aus der Krümmung der Referenzlinie zwischen den Referenzpunkten, siehe Abbildung in Tabelle 4.5 (rechts)

Die absolute Position eines Punktes im GPS-Koordinatensystem  $(L_i, B_i)$  – z.B. der Außenkante des Reifens – kann ausgehend vom Messpunkt zu

$$L_i = L_{Messpunkt} + \frac{l_i \cdot \sin(\psi)}{\Delta L_i} + \frac{b_i \cdot \cos(\psi)}{\Delta B_i} \quad (4.9)$$

und

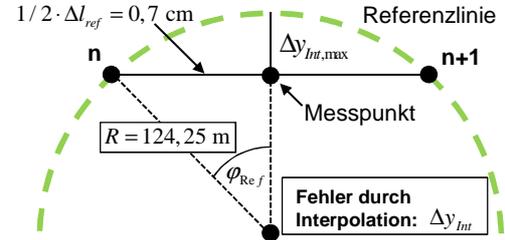
$$B_i = B_{Messpunkt} + \frac{l_i \cdot \cos(\psi)}{\Delta L_i} + \frac{b_i \cdot \sin(\psi)}{\Delta B_i}. \quad (4.10)$$

bestimmt werden. Bild 4.9 zeigt das Ergebnis der Kursverlaufbestimmung für die Reifenaußenkante des linken Vorderrades in einer Wiederholfahrt an der Pylonenbegrenzung. Der berechnete Kursverlauf entspricht einer plausiblen Folgefahrt des linken Vorderrades entlang der Fahrstreifenbegrenzung. Während der Plausibilisierungsfahrt treten keine Abweichungen von der Referenzlinie  $>$  ca. 5 cm auf. Zusätzlich soll eine detaillierte Fehlerabschätzung der Abstandsbestimmung eines beliebigen Fahrzeugpunktes von der Fahrstreifenbegrenzung erfolgen.

### 4.3.4 Fehlerabschätzung der Abstandsbestimmung

Tabelle 4.5 Fehleranteile bei der Abstandsbestimmung zur Fahrstreifenbegrenzung

| Fehleranteile der Messgrößen     |                          |   |              |
|----------------------------------|--------------------------|---|--------------|
| Messgröße                        | Fehler                   | Fehleranteile                           | Fehlerbetrag |
| Position: $y_{\text{Messpunkt}}$ | $\Delta y_{\text{Mess}}$ | GPS: $\Delta y_{\text{GPS}}$            | 2,0 cm       |
| Referenzlinie: $y_{\text{ref}}$  | $\Delta y_{\text{ref}}$  | GPS: $\Delta y_{\text{GPS}}$            | 2,0 cm       |
|                                  |                          | Interpolation: $\Delta y_{\text{Int}}$  | 0,00002 cm   |
|                                  |                          | Positionierung: $\Delta y_{\text{Pos}}$ | 3,0 cm       |
| Gierwinkel: $\psi$               | $\Delta \psi$            | Gierwinkel: $\Delta \psi$               | 0,01°        |



Die Genauigkeit des berechneten Abstands eines Fahrzeugpunktes zur Pylonenbegrenzung wird durch die Fehleranteile aus Tabelle 4.5 (links) bestimmt. Neben der Ungenauigkeit der Positionserfassung von  $\Delta y_{\text{GPS}} = 2$  cm treten zusätzliche Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Referenzlinie durch Interpolation zwischen zwei Referenzpunkten ( $\Delta y_{\text{Int}}$ ) und die Ungenauigkeit der Positionierung des Fahrzeugs an den Pylonen ( $\Delta y_{\text{Pos}}$ ) auf, siehe Tabelle 4.5 (links). Der maximal mögliche Fehler durch die angewandte Interpolation zwischen zwei Referenzpunkten  $\Delta y_{\text{Int,max}}$  ergibt sich nach der Skizze aus Tabelle 4.5 (rechts) zu

$$\Delta y_{\text{Int,max}} = R - \frac{1/2 \cdot \Delta l_{\text{ref}}}{\tan \left[ \arcsin \left( \frac{1/2 \cdot \Delta l_{\text{ref}}}{R} \right) \right]} = 0,2 \mu\text{m} \quad (4.11)$$

und ist somit vernachlässigbar. Der Positionierungsfehler  $\Delta y_{\text{Pos}}$  aus der Ungenauigkeit der Aufstellung der Pylonen und der Positionierung des Fahrzeugs zur Vermessung an den Pylonen wird über die maximal aufgetretene seitliche Abweichung der Reifenaußenkante des Fahrzeugs in Bezug zur markierten Referenzposition einer Pylone während der Referenzfahrt auf  $\Delta y_{\text{Pos}} = \text{ca. } 3$  cm geschätzt. Hinzu kommt der Abstandsfehler aufgrund einer Umrechnung der Position des Messpunktes auf die interessierende Position der Reifenaußenkanten durch den Gierwinkelfehler  $\Delta \psi = 0,01^\circ$ .

Der gesamte Fehler der Abstandsberechnung für einen vom Messpunkt abweichenden Fahrzeugpunkt  $y_i$  ergibt sich sowohl in Kurvenfahrt als auch in Geradeausfahrt aus der Berechnungsgleichung der Differenz  $\Delta y_i$  zwischen einer fehlerbehafteten Referenzlinienposition  $y_{\text{ref}}$  und der mittels fehlerbehaftetem Gierwinkel  $\psi$  und fehlerbehaftetem Messpunkt  $y_{\text{Messpunkt}}$  bestimmten Position des auszuwertenden Fahrzeugpunktes  $y_i$ .

$$\Delta y_i = \left[ y_{\text{Messpunkt}} - l_i \cdot \sin(\psi - \psi') - b_i \cdot \cos(\psi - \psi') \right] - y_{\text{ref}} \quad (4.12)$$

Für die Kurvenfahrt bedeutet diese Vereinfachung analog zur Geradeausfahrt, dass die Position eines Messpunktes und die Position der Referenzlinie ( $L_i, B_i$ ) nur durch ihren Abstandsanteil  $y$  bezogen auf die Referenzlinie ausgedrückt werden. In Geradeausfahrt ist der Gierwinkel  $\psi'$  der Fahrstreifenbegrenzung konstant, während der zugehörige Gierwinkel  $\psi'$  der Referenzlinie in Kurvenfahrt von der Position des auszuwertenden Fahrzeugpunktes abhängt, siehe Bild 4.9. Zur Fehlerbetrachtung wird weiterhin vereinfachend  $\psi - \psi' = 0$  angenommen, d.h. der auszuwertende Fahrzeugpunkt bewegt sich parallel zur Fahrstreifenbegrenzung. Durch diese Vereinfachungen kann der mittlere quadratische Fehler des berechneten Abstands der Reifenaußenkante eines Rades an der Vorderachse von der tatsächlichen Fahrstreifenbegrenzung aus Gleichung (4.12) nach der Theorie der Fehlerfortpflanzung<sup>412</sup> mit  $l_i = 3\text{m}$  Abstand der Vorderachse zur Position des Messpunktes allgemein zu

$$\Delta(\Delta y_i) = \pm \sqrt{\left( \frac{\partial \Delta y_i}{\partial y_{\text{Mess}}} \cdot \Delta y_{\text{Mess}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta y_i}{\partial y_{\text{ref}}} \cdot \Delta y_{\text{ref}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta y_i}{\partial \psi} \cdot \Delta \psi \right)^2} \quad (4.13)$$

und unter Berücksichtigung der Zusammensetzung von  $\Delta_{\text{ref}}$  aus  $\Delta y_{\text{Pos}}$  und  $\Delta y_{\text{GPS}}$  zu

$$\Delta(\Delta y_i) = \pm \sqrt{2 \cdot (\Delta y_{\text{GPS}})^2 + (\Delta y_{\text{Pos}})^2 + (\Delta \psi \cdot l_i)^2} = \pm 4,12\text{cm} \quad (4.14)$$

berechnet werden. Diese Fehlerabschätzung trifft in guter Näherung die beobachteten Maximalwerte der Abweichungen bei einer Wiederholfahrt an der Fahrstreifenbegrenzung. Die Genauigkeit der Kursverlaufbestimmung kann in dieser Arbeit also mit ca.  $\pm 4\text{ cm}$  angegeben werden.

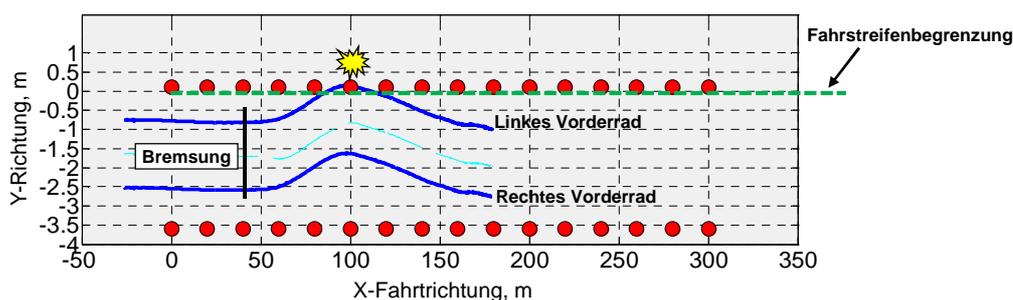


Bild 4.10 Ermittelter Kursverlauf einer Testperson infolge einer Gierstörung in Geradeausbremsung aus 120 km/h mit Pylonenkontakt

Für die Genauigkeit der Kursverlaufbestimmung spricht auch der Zusammenhang zwischen den beobachteten Pylonenkontakten und den dazugehörigen minimalen Abständen der Reifenaußenkanten von der Fahrstreifenbegrenzung: Bei insgesamt 128 beo-

<sup>412</sup> Stetter (1992): Meßtechnik an Maschinen und Anlagen

bachteten Testfahrten mit variiertem Gierstörungsaufschaltung und anschließendem Pylonenkontakt werden in 98,4 % der Fälle auch durch das Differential-GPS Fahrstreifenverletzungen nachgewiesen, siehe z.B. in einer Geradeausbremsung aus 120 km/h nach Bild 4.10.

Am Fahrsimulator muss hingegen keine Messtechnik zur Erfassung des Kursverlaufs eingesetzt werden. Es liegt eine exakte Kenntnis der virtuellen Position des Fahrzeugs auf der Versuchsstrecke vor.

#### 4.4 Methodik der Auswertung

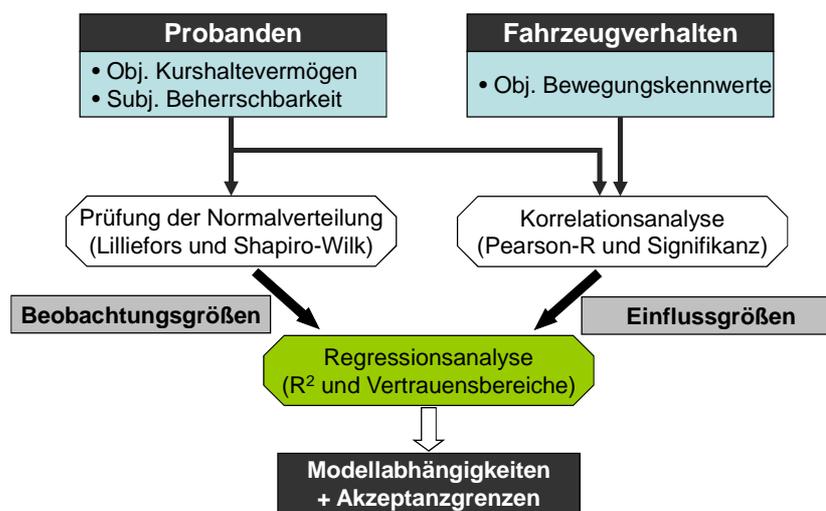


Bild 4.11 Methodik der Auswertung zur Ableitung von Modellabhängigkeiten und Akzeptanzgrenzen für die charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen

Im Anschluss an die Versuchsdurchführungen der beiden Studien auf einer realen Teststrecke und am Fahrsimulator soll eine Gegenüberstellung des objektiven Kurshaltevermögens und der subjektiven Beherrschbarkeit mit den objektiven Bewegungskennwerten der Fahrdynamik erfolgen. Das Ziel der in Bild 4.11 dargestellten Methodik ist es, zunächst durch Korrelationsanalysen diejenigen Einflussgrößen zu identifizieren, die den stärksten Zusammenhang mit der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit aufweisen. Dieser Zusammenhang soll anschließend mittels Regressionsanalyse auf konkrete Modellabhängigkeiten übertragen werden. Die Kenntnis der konkreten Modellabhängigkeiten für die Beobachtungsgrößen (subjektive und objektive Beherrschbarkeit) soll in einem letzten Schritt die Ableitung von Akzeptanzgrenzen für die objektiven Fahreigenschaftskennwerte ermöglichen. In den folgenden Abschnitten wird auf die Ermittlung der benötigten Kennwerte aus den vorhandenen Messdatenaufzeichnungen eingegangen und es werden die eingesetzten Methoden aus dem Bereich der Statistik diskutiert.

#### 4.4.1 Kennwerte und Messdatenaufbereitung

Tabelle 4.6 zeigt die betrachteten Kennwerte und Bewertungskriterien in den Brems- und Ausweichmanövern zur Bewertung der aufgestellten Hypothesen in Kapitel 3.2.

Tabelle 4.6 Übersicht der verwendeten Kennwerte zur Gegenüberstellung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit mit den objektiven Bewegungskennwerten des Fahrzeugs

| Untersuchte Kennwerte (Beobachtungsgrößen und Einflussgrößen) |                    |   |   |  |
|---|--------------------|---|---|--|
| Testmanöver<br>(Realstudie + Fahr Simulator)                  | Beobachtungsgrößen |   | Einflussgrößen  |  |
|   | Open-Loop          | Closed-Loop   | Open-Loop   | Closed-Loop  |
| Geraderausbremsung 80 km/h                                    | -                  | Subjektivbeurteilung $B_i$                                | $\Delta\dot{\psi}_{1s}$ $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ $\Delta\dot{\psi}_{ref,1s}$ $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$ | -  |
| Kurvenbremsung 80 km/h  |                    | Kurshaltung $\Delta y_{\max,4s}$ $\Delta y_{ref,\min,4s}$ | $\Delta a_{y,\max}$ $\Delta a_{y,1s}$   |  |
| Geradeausbremsung 120 km/h                                    |                    | Lenkarbeit (Integral von $\delta_H$ )                     | $\beta_{HA,\max}$ $\beta_{SP,\max}$ $\beta_{HA,1s}$ $\beta_{SP,1s}$   |  |
| Geradeausbremsung 180 km/h                                    |                    | Pylonenkontakte   | $\delta_h$  |  |
| Ausweichtest 80 km/h  | -                  | Subjektivbeurteilung $B_{S,i}$                            |   | $\beta_{HA,\max}$ $\beta_{SP,\max}$ $\dot{\psi}_{\max}$ $a_{y,\max}$ |
|   |                    | Lenkarbeit (Integral von $\delta_H$ )                     | $k_{prop}$  |  |
|   |                    | Pylonenkontakte   |   |  |

Die Beobachtungsgrößen beinhalten diejenigen Kennwerte und Kriterien, die Aufschluss über die Beherrschbarkeit einer Situation geben sollen. Diese Beobachtungsgrößen werden ausschließlich innerhalb der Closed-Loop-Durchführung ermittelt und bestehen innerhalb der Bremsmanöver aus den Kriterien

- Subjektivbeurteilung der Beherrschbarkeit  $B_{S,i}$ ,
- objektives Kurshaltevermögen (maximale Kursabweichung  $\Delta y_{\max,4s}$  und minimaler Fahrstreifenabstand  $\Delta y_{ref,\min,4s}$  innerhalb von 4 Sekunden nach Bremsbeginn),
- resultierende Lenkarbeit der Testperson zur Stabilisierung des Fahrzeugs in der Fahrgasse (Aufintegration der Lenkradgeschwindigkeit über 3 Sekunden) und
- beobachtete Unfallereignisse mit den begrenzenden Pylonen.

Die Wahl des Auswertzeitraums der Kurshaltungskennwerte  $\Delta y_{\max,4s}$  und  $\Delta y_{ref,\min,4s}$  von jeweils vier Sekunden nach Bremsbeginn ist an eine Studie zur Untersuchung von Lenksystemstörungen<sup>413</sup> angelehnt. Nach dieser Studie sind die Korrekturhandlungen des Fahrers nach spätestens vier Sekunden abgeschlossen. Für die Auswertung der Lenkarbeit wird in dieser Arbeit ein minimal reduzierter Zeitraum von nur drei Sekunden gewählt, um eine zeitliche Überschneidung des Auswertzeitraums mit einer bereits abgeschlossenen Korrekturhandlung zu reduzieren. Da die Wahl des Sollkurses innerhalb eines Ausweichtests von der Lenkstrategie der jeweiligen Testperson abhängt, werden in den Ausweichtests nur die subjektive Beherrschbarkeit, die Lenkarbeit zwischen

<sup>413</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

Ein- und Ausfahrgasse und die tatsächlich aufgetretenen Fahrstreifenverletzungen als Maß für die objektive Beherrschbarkeit erfasst.

Die genannten Beobachtungsgrößen sollen den objektiven Fahreigenschaftskennwerten (Einflussgrößen) gegenübergestellt werden. Die charakteristischen Einflussgrößen der Bremsmanöver werden dabei ausschließlich in reproduzierbaren Open-Loop-Messungen mit fixiertem Lenkrad und bei mittlerer Bremsintensität ermittelt. Die vermuteten relevanten Kennwerte sind nach Kapitel 2.2.2

- die maximale Abweichung der Gierrate  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  und die Abweichung der Gierrate zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn  $\Delta\dot{\psi}_{1s}$  in allen Bremsmanövern
- die Abweichung der Gierrate von der Referenzgierrate in Kurvenbremsung  $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$ ,  $\Delta\dot{\psi}_{ref,1s}$ ,
- die Abweichung der Querschleunigung in Geradeaus- und Kurvenbremsung  $\Delta a_{y,\max}$ ,  $\Delta a_{y,1s}$  und
- der Schwimmwinkel im Schwerpunkt und an der Hinterachse  $\beta_{HA,\max}$ ,  $\beta_{HA,1s}$ ,  $\beta_{SP,\max}$ ,  $\beta_{SP,1s}$ .

Der Zusammenhang zwischen der resultierenden Beherrschbarkeit und dem eingesetzten Stellwinkel der Hinterachse  $\delta_h$  wird ebenfalls geprüft. In den Ausweichsituationen können in Open-Loop-Durchführung außer der Stellvariante selbst (Mitlenkfaktor  $k_{prop}$ ) keine geeigneten objektiven Bewegungskennwerte ermittelt werden. Die resultierenden Schwimmwinkel  $\beta_{HA,\max}$ ,  $\beta_{SP,\max}$  und die Maximalwerte der Gierrate  $\dot{\psi}_{\max}$  und Querschleunigung  $a_{y,\max}$  werden in jedem Closed-Loop-Testdurchlauf eines Probanden individuell erfasst und zur Auswertung anschließend in verschiedene Betragsklassen unterteilt.

Zur Ermittlung der charakteristischen Kennwerte aus den erfassten Bewegungsgrößen des Fahrzeugs - wie z.B. der Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  oder der Querschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  - muss eine Aufbereitung der Messdaten erfolgen, um eine Verfälschung der tatsächlichen Maximalwerte durch ein vorhandenes Signalrauschen oder durch Messartefakte zu vermeiden. Hierzu wird in dieser Arbeit das Verfahren einer „gleitenden Mittelwertbildung“ angewandt. Bei der gleitenden Mittelwertbildung wird über eine definierte Anzahl von Messpunkten bzw. definierte Messdauer (Spannweite  $d$ ) ein Mittelwert gebildet. Bei einer gleitenden Mittelwertbildung besteht daher die Gefahr einer Verfälschung des tatsächlichen Nutzsignals, sofern die Mittelwertbildung über eine zu große Anzahl von Messpunkten bzw. eine zu große Messdauer

erfolgt. Die Wahl der geeigneten Spannweite erfolgt am Beispiel der Gierrate  $\dot{\psi}(t)$  nach Bild 4.12 über Suche nach einem Sattelpunkt in der Differenz des gefilterten Maximalbetrags einer Gierstörung zum ungefilterten Maximalbetrag des Signals.

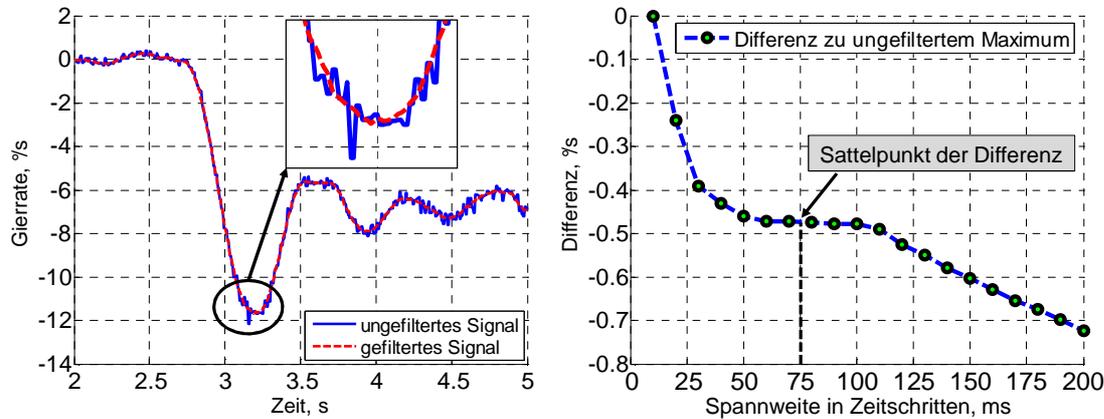


Bild 4.12 Filterung der Messsignale über eine gleitende Mittelwertbildung mit definierter Spannweite

Nach Bild 4.12 (rechts) tritt bei einer Spannweite von  $d = 15$  (75 ms Messdauer) ein erkennbarer Sattelpunkt auf. Im Bereich dieses Sattelpunktes zwischen einer Spannweite von ca.  $d = 10$ -20 (50-100 ms) tritt bei einer Änderung der Spannweite keine Änderung des ermittelten Maximalbetrags der Gierrate auf. Die Ausprägung eines Sattelpunktes ist somit ein deutliches Indiz für den Übergang einer vollständigen Signalglättung des Signals hin zu einer Verfälschung des Nutzsignals bei einer weiteren Erhöhung der Spannweite. In Bild 4.12 (links) ist der relevante Ausschnitt um den Bereich des auftretenden Gierstörungsmaximums des ungefilterten Signals und des gefilterten Signals mit einer Spannweite von  $d = 15$  (75 ms) hervorgehoben. Bei dieser Spannweite tritt lediglich eine sichtbare Signalglättung und keine Verfälschung des Nutzsignals auf. In dieser Arbeit wird für die erfassten Messgrößen Giergeschwindigkeit, Querbeschleunigung und Schwimmwinkel daher eine Spannweite von  $d = 15$  (75 ms) verwendet.

Als Ergebnis der Kennwertbildung liegen alle im Open-Loop oder Closed-Loop ermittelten Beobachtungsgrößen und Einflussgrößen für die weitere Analyse der Ergebnisse mittels statistischer Verfahren vor.

#### 4.4.2 Statistische Methoden

Nach der in Bild 4.11 dargestellten Auswertungsmethodik soll durch eine Korrelationsanalyse zunächst untersucht werden, welche der charakteristischen objektiven Bewegungskennwerte am besten dazu geeignet sind, die ermittelte objektive und subjektive Beherrschbarkeit durch Normalfahrer zu erklären. Die beiden relevanten Kriterien der Korrelationsanalyse sind die Stärke des gefundenen Zusammenhangs - ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten  $R_P$  nach Pearson - und das Signifikanzniveau  $\alpha_s$  der

gefundenen Abhängigkeit, siehe z.B. Lozán /Kausch<sup>414</sup>. Der Korrelationskoeffizient  $R_p$  beschreibt die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen den untersuchten Einflussgrößen und Beobachtungsgrößen und kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Ein Betrag nahe  $R_p = 1$  entspricht dabei einem funktionalen Zusammenhang zwischen den beiden voneinander abhängigen Größen.<sup>415</sup> Zur Prüfung der Signifikanz  $\alpha_s$  des vermuteten Zusammenhangs wird als Ausgangshypothese  $H_0$  angenommen, es bestünde keine Abhängigkeit zwischen den beiden untersuchten Größen. Diese Hypothese wird nach Bortz et al.<sup>416</sup> nur dann zugunsten der Annahme einer vorhandenen Abhängigkeit verworfen, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhafte Ablehnung der Ausgangshypothese ein definiertes Signifikanzniveau  $\alpha_s$  unterschreitet. Die Wahrscheinlichkeit der fehlerhaften Ablehnung der Ausgangshypothese wird als Fehler „1. Art“ bezeichnet und muss üblicherweise ein Signifikanzniveau zur Ablehnung der Ausgangshypothese von  $\alpha_s = 0,05$  oder  $0,01$  unterschreiten (5 % oder 1 % Signifikanzniveau).<sup>417</sup> Das Ergebnis der Korrelationsuntersuchung ist die Kenntnis der geeigneten Einflussgrößen zur Erklärung der festgestellten subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit.

Diese am besten geeigneten objektiven Bewegungskennwerte können nun verwendet werden, um die Modellabhängigkeit zwischen dem Fahrzeugverhalten und der resultierenden Beherrschbarkeit genauer zu quantifizieren. Hierzu werden in dieser Arbeit Regressionsanalysen mit linearen und quadratischen Modellansätzen durchgeführt. Das Ziel ist es, die Modellabhängigkeit durch eine Funktion nach dem Muster  $f(\text{Bewegungskennwert}) = \text{objektive bzw. subjektive Beherrschbarkeit}$  beschreiben zu können. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  eines gewählten Modellansatzes wird nach Fahrmeir<sup>418</sup> zu

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.15)$$

berechnet und gibt Aufschluss über die Anpassungsgüte des Modellansatzes an die Beobachtungswerte. Hierbei entspricht  $y_i$  dem jeweiligen Beobachtungswert (abhängige Variable) an der Stelle  $x_i$  (erklärende Variable),  $\bar{y}$  dem Mittelwert aller Beobachtungswerte und  $\hat{y}_i$  dem Wert der Modellfunktion an der Stelle  $x_i$ . Zur Modellanpassung an die

<sup>414</sup> Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage, S. 186ff

<sup>415</sup> Sachs, Hedderich (2009): Angewandte Statistik, 13. Auflage, S. 103

<sup>416</sup> Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 101

<sup>417</sup> Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 100f

<sup>418</sup> Fahrmeir et al. (2009): Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, S. 99

Beobachtungsgrößen werden die Parameter des Modellansatzes so gewählt, dass die Summe aller quadrierten Abweichungen  $\hat{\varepsilon}_i$  zwischen den Beobachtungsgrößen  $y_i$  und den zugehörigen Modellwerten  $\hat{y}_i$

$$\sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.16)$$

einen minimalen Wert annimmt.<sup>419</sup> Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  nach Gleichung (4.15) sagt also aus, welcher Anteil der Summe aller quadrierten Abweichungen der Beobachtungsgrößen  $y_i$  von ihrem Mittelwert  $\bar{y}$  durch den Modellansatz erklärt werden kann. Ein Bestimmtheitsmaß von 1 entspricht einer vollständigen Erklärung der Beobachtungsgrößen. Die resultierende Funktion zur Abbildung des Modellzusammenhangs bezieht sich für Werte von  $R^2 < 1$  jedoch immer auf die Abhängigkeit des Mittelwerts der Beobachtungsgrößen von der erklärenden Variable. Daher werden zusätzlich Vertrauensbereiche (Konfidenzintervalle) für die Regression betrachtet.<sup>420</sup> Diese bestehen in der Berechnung von Vertrauensbereichen für die Regressionskurve der prognostizierten Mittelwerte und für den Vorhersagebereich einer zukünftigen Einzelstichprobe auf einem Wahrscheinlichkeitsniveau von üblicherweise 95 %, Details siehe Lozán/Kausch.<sup>421</sup> Der Vertrauensbereich für einen Erwartungswert wird demnach auch „Vorhersagebereich“ genannt und kennzeichnet den Wertebereich, innerhalb dessen eine zukünftige Einzelstichprobe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zu erwarten ist.

Zur Konstruktion von Konfidenzintervallen und zur Durchführung von zahlreichen Hypothesentests (z.B. der Prüfung auf identische Mittelwerte zweier Stichproben mittels t-Test nach) ist die Kenntnis der Verteilungsmaße der Beobachtungsgrößen notwendig (Erwartungswerte, Varianzen).<sup>422</sup> In diesem Fall wird von „parametrischen“ Verfahren gesprochen.<sup>423</sup> Daher wirken sich normalverteilte Beobachtungsgrößen positiv auf die Genauigkeit der Konfidenzintervalle und der Hypothesentests aus, während nicht normalverteilte Stichproben zu einer Unschärfe dieser Tests führen können.<sup>424</sup> Die Prüfung der Normalverteilung für Stichprobenumfänge mit unbekanntem Verteilungsmaß kann auf Basis des Kolmogorov-Smirnov-Tests nach Lilliefors<sup>425</sup> oder des Shapiro-Wilk-Tests<sup>426</sup> erfolgen. Insbesondere der Shapiro-Wilk-Test gilt als effektive Methode zur

<sup>419</sup> Fahrmeir et al. (2009): Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, S. 98

<sup>420</sup> Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 196

<sup>421</sup> Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage, S. 199ff

<sup>422</sup> Sachs, Hedderich (2009): Angewandte Statistik, 13. Auflage, S. 410

<sup>423</sup> Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 130

<sup>424</sup> Fahrmeir et al. (2009): Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, S. 111ff

<sup>425</sup> Sachs, Hedderich (2009): Angewandte Statistik, 13. Auflage, S. 396

<sup>426</sup> Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage, S. 83

Prüfung der Normalverteilungshypothese bei kleinen Stichprobenumfängen von  $n < 20$  bis  $n = 50$  und wird daher in dieser Arbeit ergänzend zum Lilliefors-Test verwendet. Im Gegensatz zur Prüfung auf signifikante Korrelationszusammenhänge wird bei der Prüfung der Normalverteilung als Ausgangshypothese  $H_0$  angenommen, es läge tatsächlich eine Normalverteilung vor. Diese Hypothese wird nur verworfen, wenn die Wahrscheinlichkeit der fehlerhaften Beibehaltung dieser Hypothese größer als  $1 - \alpha_s$  wird (Fehler „2. Art“, Signifikanzniveau üblicherweise  $\alpha_s = 0,05$ ).<sup>427</sup> Daher handelt es sich bei den genannten Tests um eine Prüfung der Normalverteilungshypothese, nicht aber um einen Nachweis der tatsächlichen Normalverteilung.

#### 4.4.3 Prüfung auf Normalverteilung der Beobachtungsgrößen

Die Prüfung der Normalverteilungshypothese der zentralen Beobachtungsgrößen dieser Arbeit wird bereits in diesem Kapitel diskutiert, da das Ergebnis eine Aussage über die Güte und Anwendbarkeit der statistischen Methoden beinhaltet. Tabelle 4.7 zeigt die erzielten Signifikanzniveaus der subjektiven Beherrschbarkeit  $B_{S,i}$  und der maximalen seitlichen Kursabweichung innerhalb von vier Sekunden nach Bremsbeginn  $\Delta y_{\max,4s}$  nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lilliefors (KS) und Shapiro-Wilk-Test (SW). Die Prüfung erfolgt für jede der insgesamt 51 Gierstörungsvarianten aus 6 verschiedenen Bremsmanövern, die jeweils mit ca.  $n = 30$  Wiederholfahrten abgedeckt sind. Es wird erwartet, dass die Beobachtungsgrößen bei fester Open-Loop-Gierstörung bzw. fester HA-Verstellung in der Closed-Loop-Studie normalverteilt sind ( $H_0$ ).

Nach Tabelle 4.7 kann diese Normalverteilungshypothese  $H_0$  nicht für alle Testvarianten beibehalten werden. Nur in 39,2 % der Fälle für die maximale Kursabweichung und in 35,3 % der Fälle für die Subjektivbeurteilung ist das Signifikanzniveau nach mindestens einem der beiden Testverfahren (KS + SW) größer als 0,05. In 60,2 % bzw. 64,7 % der Fälle müsste die Normalverteilungshypothese hingegen verworfen werden. Die Ursachen werden in der Detail-Betrachtung der einzelnen Verteilungen deutlich: Beide Testverfahren (KS und SW) reagieren sensibel auf „Ausreißer“, d.h. Einzelstichproben, die vom Erwartungswert um mehr als das 3-fache der Standardabweichung abweichen. Diese Ausreißer treten insbesondere bei der maximalen Kursabweichung auf und verfälschen das Testergebnis für die übrigen zur Normalverteilung tendierenden Kursabweichungen, siehe z.B. Variante Kurvenbremsung aus 80 km/h ohne beobachteten Ausreißer mit einem Stellwinkel von  $1^\circ$  ( $\alpha_s$  nach Shapiro-Wilk = 0,79). Dennoch kann in dieser Arbeit keine Ausblendung der Ausreißer erfolgen, da zur Betrachtung der resultie-

---

<sup>427</sup> Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 100f

renden Fahrsicherheit gerade diejenigen Einzelfahrten von Interesse sind, in denen eine hohe Kursabweichung infolge einer Gierstörung resultiert.

Tabelle 4.7 Signifikanzniveaus der Prüfung auf Normalverteilung für die subjektive und objektive Beherrschbarkeit in allen Bremsmanövern anhand Lilliefors-Test und Shapiro-Wilk-Test

| Signifikanzniveaus der Normalverteilungshypothese     |                   |                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|-------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Realstudie  | Kriterium         | HA-Stellwinkel, ° |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|   |                   | 0,00              |      | 0,25 |      | 0,50 |      | 0,75 |      | 1,00 |      | 1,25 |      | 1,50 |      | 1,75 |      | 2,00 |      |
|   |                   | KS                | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   |
| Geradeausbremsung 80 km/h                             | Kursabweichung:   | 0,18              | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,20 | 0,79 | 0,20 | 0,09 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
|   | Subjektivurteile: | 0,00              | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,52 | 0,20 | 0,23 |      |
| Kurvenbremsung 80 km/h                                | Kursabweichung:   | 0,20              | 0,02 | 0,20 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,20 | 0,33 | 0,02 | 0,01 | 0,11 | 0,24 | 0,01 | 0,00 | 0,20 | 0,16 | 0,02 | 0,00 |
|   | Subjektivurteile: | 0,00              | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,10 | 0,16 | 0,00 | 0,01 |
| Geradeausbremsung 120 km/h                            | Kursabweichung:   | 0,00              | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,20 | 0,15 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
|   | Subjektivurteile: | 0,00              | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,17 | 0,06 | 0,04 | 0,00 | 0,07 | 0,01 | 0,20 | 0,20 | 0,25 |
| Fahrsimulator   | Kriterium         | Gierstörung, °/s  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|   |                   | 0                 |      | 2    |      | 4    |      | 5    |      | 6    |      | 7    |      | 8    |      | 10   |      | 12   |      |
|   |                   | KS                | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   | KS   | SW   |
| Geradeausbremsung 120 km/h<br>(HA-Stellgradient 47s)  | Kursabweichung:   | 0,20              | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,01 | -    | -    | 0,20 | 0,10 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
|   | Subjektivurteile: | 0,00              | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | -    | -    | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,11 | 0,13 | 0,09 | 0,12 | 0,20 | 0,61 |
| Geradeausbremsung 120 km/h<br>(HA-Stellgradient 207s) | Kursabweichung:   | 0,04              | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | -    | -    | 0,16 | 0,17 | 0,20 | 0,21 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,01 |
|   | Subjektivurteile: | 0,00              | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | -    | -    | 0,09 | 0,29 | 0,00 | 0,02 | 0,20 | 0,21 | 0,09 | 0,14 | 0,01 | 0,04 |
| Geradeausbremsung 180 km/h                            | Kursabweichung:   | 0,01              | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,20 | 0,81 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 0,17 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | -    | -    |
|   | Subjektivurteile: | 0,00              | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,20 | 0,28 | 0,00 | 0,01 | 0,09 | 0,23 | 0,02 | 0,03 | -    | -    |

KS: Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lilliefors; SW: Shapiro-Wilk-Test / markierte Felder: Normalverteilungshypothese wird nicht verworfen

Bei der Subjektivbeurteilung kommt es hingegen speziell bei niedrigen Stellwinkeln bzw. niedrigen Gierstörungen zu einer Häufung der einzelnen Beurteilungen auf niedrigen Werten der klassifizierten Beherrschbarkeitsskala. Hierdurch wird die Prüfung der Normalverteilungshypothese erschwert. Bei hohen Gierstörungen ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} \geq 6^\circ/\text{s}$ ) am Fahrsimulator bzw. hohen Stellwinkeln an der Hinterachse ( $\delta_h \geq 1^\circ$ ) in der Realstudie wird erwartungsgemäß eine größere Varianz der Subjektivbeurteilungen innerhalb einer Störvariante erzielt. Infolge dieser höheren Varianz steigt der Anteil derjenigen Verteilungen, für die weiterhin eine Normalverteilung angenommen werden kann, auf 60,7 %. Auf Basis der durchgeführten Prüfungen der Normalverteilungshypothese kann zusammengefasst also keine generelle Aussage getroffen werden, ob die maximalen Kursabweichungen oder die subjektiven Beherrschbarkeitsurteile der Testpersonen normalverteilt sind. Die Stichproben zeigen einen grundsätzlichen Trend zur Normalverteilung, dieser wird jedoch durch Ausreißer der Kursabweichung und durch geringe Spannbreiten der Subjektivbeurteilung bei niedrigen Störaufschaltungen abgeschwächt. Bei der Anwendung von parameterbasierten Verfahren (z.B. von Vertrauensbereichen für das Kurshaltevermögen) sind für einzelne Verteilungen somit statistische Unschärfen in den abgeleiteten Aussagen zu erwarten, die durch ein geeignetes Zusatzkriterium unterstützt werden müssen, um belastbare Erkenntnisse abzuleiten. Für den Nachweis einer geforderten Wahrscheinlichkeit der Beherrschbarkeit einer Störaufschaltung durch Normalfahrer wird zur späteren Ableitung von Akzeptanzgrenzen in Kapitel 6 zusätzlich ein Binomialansatz auf Basis der aufgetretenen Pylonenkontakte gewählt. Die Anwendung der Korrelations- und Regressionsanalysen zur Bestimmung des Zusammenhangs zwi-

schen der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit mit den objektiven Bewegungskenngrößen ist hingegen nicht parameterbasiert und kann daher auch ohne Vorliegen einer Normalverteilung der Beobachtungsgrößen erfolgen.

## 4.5 Fazit

Die Durchführung der beiden Studien auf einem realen Testgelände und an einem dynamischen Fahrsimulator zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests kann entsprechend den Konzeptvorgaben erfolgen. Das Testgelände bietet die benötigten Platzverhältnisse, um die jeweiligen Fahrgassen so zu platzieren, dass die geforderten Anfahrgeschwindigkeiten reproduzierbar erzielt werden. Die unterschiedlichen Probandenkollektive aus jeweils ca. 100 Fahrern sind vergleichbar zusammengesetzt und an die Verteilung der Führerscheinbesitze in Deutschland angelehnt. Insgesamt werden 51 verschiedene Gierstörungsvarianten von jeweils mindestens 29 Fahrern absolviert und bewertet. In 128 Einzelfahrten der Realstudie und 53 Einzelfahrten am Fahrsimulator werden Fahrstreifenverletzungen mit Pylonen-Unfällen verzeichnet. In den Bremsmanövern kann der tatsächliche Kursverlauf infolge einer Gierstörung in Geradeaus- und Kurvenbremsung durch die Verwendung eines Differential-GPS mit einer Genauigkeit von ca. 4 cm in Bezug auf die vorhandenen Fahrstreifenbegrenzungen ermittelt werden. Als Referenzpunkte für den Kursverlauf werden die Reifenaußenkanten aller vier Räder des Testfahrzeugs gewählt.

Aus den durchgeführten Testfahrten können die benötigten Kennwerte für die Auswertung der objektiven Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens abgeleitet werden. In den durchgeführten Bremsmanövern werden als objektive Kennwerte neben den Unfallereignissen mit begrenzenden Pylonen die maximal auftretenden seitlichen Kursabweichungen und die minimalen Seitenabstände zur Fahrstreifenbegrenzung während der Stabilisierungsphase verwendet. In Ausweichtests werden hingegen nur die konkreten Unfallereignisse mit den begrenzenden Pylonen ausgewertet, da keine eindeutige Referenztrajektorie existiert. Zur Auswertung der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens in Abhängigkeit der charakteristischen Bewegungskenngrößen werden Korrelations- und Regressionsanalysen angewandt. Diese Verfahren können auch für nicht normalverteilte Stichproben angewandt werden. Die Prüfung der Normalverteilungshypothese der Beobachtungsgrößen zeigt, dass eine Normalverteilung der Beobachtungsgrößen nicht in allen der 51 Testvarianten angenommen werden kann. Hierdurch ergeben sich Einschränkungen bei der Anwendung von parameterbasierten Verfahren (Konfidenzintervalle und Vergleiche von Mittelwerten). Die Ursache sind auftretende „Ausreißer“ in der Kursabweichung von einzelnen Testpersonen und die erwartungsgemäß geringen Varianzen der klassifizierten Subjektivurteile bei niedrigen Störausprägungen.

## 5 Ergebnisse

Die aufgezeichneten Daten der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit der durchgeführten Real- und Fahrstudie werden verwendet, um das objektive Kurshaltevermögen in Abhängigkeit der geeigneten Bewegungskenngrößen zu quantifizieren und die aufgestellten Hypothesen zu prüfen. Im Vorfeld der Beschreibung konkreter Modellabhängigkeiten durch Regressionsansätze wird in Korrelationsanalysen ermittelt, welche der bekannten charakteristischen Bewegungskenngrößen - wie z.B. die maximale Giergeschwindigkeitsabweichung in Bremsmanövern  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  oder der maximale Hinterachs-Schwimmwinkel  $\beta_{HA,\max}$  in Ausweichtests - am besten dazu geeignet sind, die resultierende objektive und subjektive Beherrschbarkeit zu erklären.

### 5.1 Korrelationen der untersuchten Kenngrößen

#### 5.1.1 Bremsmanöver (80-180 km/h)

Tabelle 5.1 Korrelation der charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen mit der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit im Closed-Loop

| Kennwert                      | Korrelationskoeffizient "R <sub>p</sub> " (Pearson) |           |            |             |            |            |                        |           |            |             |            |            |                     |           |            |             |            |            |                            |           |            |             |            |            |            |  |  |  |  |  |
|-------------------------------|---|-----------|------------|-------------|------------|------------|------------------------|-----------|------------|-------------|------------|------------|---------------------|-----------|------------|-------------|------------|------------|----------------------------|-----------|------------|-------------|------------|------------|------------|--|--|--|--|--|
|                               | Closed-Loop   |           |            |             |            |            | Subj. Beherrschbarkeit |           |            |             |            |            | Max. Kursabweichung |           |            |             |            |            | Min. Fahrstreifenabstand** |           |            |             |            |            | Lenkarbeit |  |  |  |  |  |
|                               | Realstudie  |           |            | Simulator   |            |            | Realstudie             |           |            | Simulator   |            |            | Realstudie          |           |            | Simulator   |            |            | Realstudie                 |           |            | Simulator   |            |            |            |  |  |  |  |  |
| <b>Open-Loop</b>              | <b>K80</b>  | <b>80</b> | <b>120</b> | <b>120*</b> | <b>180</b> | <b>180</b> | <b>K80</b>             | <b>80</b> | <b>120</b> | <b>120*</b> | <b>180</b> | <b>180</b> | <b>K80</b>          | <b>80</b> | <b>120</b> | <b>120*</b> | <b>180</b> | <b>180</b> | <b>K80</b>                 | <b>80</b> | <b>120</b> | <b>120*</b> | <b>180</b> | <b>180</b> |            |  |  |  |  |  |
| $\Delta\dot{\psi}_{\max}$     | 0,70  | 0,73      | 0,72       | 0,69        | 0,69       | 0,69       | 0,29                   | 0,55      | 0,49       | 0,63        | 0,73       | 0,68       | 0,21                | 0,40      | 0,41       | 0,57        | 0,63       | 0,65       | 0,62                       | 0,72      | 0,69       | 0,69        | 0,65       | 0,64       |            |  |  |  |  |  |
| $\Delta\dot{\psi}_{1s}$       | 0,55  | 0,69      | 0,64       | 0,69        | 0,70       | 0,69       | 0,34                   | 0,55      | 0,48       | 0,63        | 0,72       | 0,66       | 0,24                | 0,41      | 0,40       | 0,56        | 0,61       | 0,63       | 0,48                       | 0,67      | 0,61       | 0,69        | 0,65       | 0,64       |            |  |  |  |  |  |
| $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$ | 0,70  | -         | -          | -           | -          | -          | 0,29                   | -         | -          | -           | -          | -          | 0,22                | -         | -          | -           | -          | -          | 0,62                       | -         | -          | -           | -          | -          |            |  |  |  |  |  |
| $\Delta\dot{\psi}_{ref,1s}$   | 0,57  | -         | -          | -           | -          | -          | 0,34                   | -         | -          | -           | -          | -          | 0,24                | -         | -          | -           | -          | -          | 0,49                       | -         | -          | -           | -          | -          |            |  |  |  |  |  |
| $\Delta a_{y,\max}$           | 0,68  | 0,73      | 0,73       | 0,69        | 0,70       | 0,69       | 0,27                   | 0,54      | 0,49       | 0,63        | 0,73       | 0,68       | 0,19                | 0,39      | 0,41       | 0,57        | 0,63       | 0,65       | 0,61                       | 0,72      | 0,69       | 0,69        | 0,65       | 0,64       |            |  |  |  |  |  |
| $\Delta a_{y,1s}$             | 0,61  | 0,69      | 0,68       | 0,68        | 0,70       | 0,70       | 0,33                   | 0,56      | 0,49       | 0,64        | 0,72       | 0,69       | 0,29                | 0,41      | 0,42       | 0,57        | 0,62       | 0,66       | 0,55                       | 0,69      | 0,66       | 0,68        | 0,65       | 0,64       |            |  |  |  |  |  |
| $\beta_{HA,\max}$             | 0,68  | 0,73      | 0,70       | 0,69        | 0,69       | 0,70       | 0,32                   | 0,56      | 0,49       | 0,63        | 0,73       | 0,69       | 0,25                | 0,40      | 0,41       | 0,57        | 0,63       | 0,66       | 0,61                       | 0,71      | 0,68       | 0,68        | 0,65       | 0,64       |            |  |  |  |  |  |
| $\beta_{SP,\max}$             | 0,68  | 0,73      | 0,70       | 0,69        | 0,69       | 0,70       | 0,31                   | 0,56      | 0,49       | 0,63        | 0,73       | 0,69       | 0,25                | 0,40      | 0,41       | 0,57        | 0,63       | 0,66       | 0,61                       | 0,71      | 0,67       | 0,68        | 0,65       | 0,64       |            |  |  |  |  |  |
| $\delta_h$                    | 0,70  | 0,73      | 0,71       | 0,69        | 0,69       | 0,69       | 0,31                   | 0,57      | 0,49       | 0,63        | 0,73       | 0,69       | 0,25                | 0,41      | 0,42       | 0,57        | 0,63       | 0,66       | 0,61                       | 0,72      | 0,68       | 0,68        | 0,65       | 0,64       |            |  |  |  |  |  |
| n:                            | 284   | 290       | 291        | 260         | 259        | 264        | 237                    | 239       | 242        | 260         | 259        | 264        | 237                 | 239       | 242        | 260         | 259        | 264        | 284                        | 290       | 291        | 260         | 259        | 264        |            |  |  |  |  |  |

Signifikanzniveau beidseitig jeweils < 0,01; K: Kurvenbremsung; Übrige: Geradeausbremsung; \*: Erhöhter Stellgradient (207s); \*\*: R<sub>p</sub> = negativ  
 Markierte Felder: Jeweils stärkste Korrelation

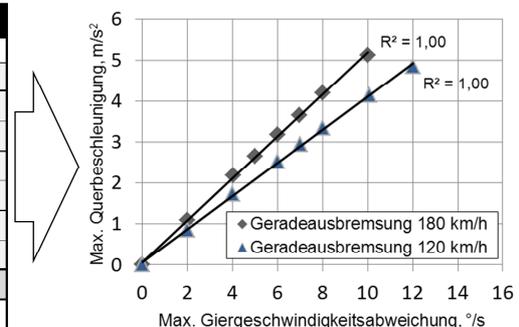
Tabelle 5.1 zeigt die Übersicht der ermittelten Korrelationskoeffizienten  $R_p$  der Bewegungskennwerte mit den gewählten Beurteilungskriterien in den durchgeführten Bremsmanövern. Alle aufgeführten Korrelationszusammenhänge beinhalten ein Signifikanzniveau von  $\alpha_s < 0,01$  und sind somit hochsignifikant. Aufgrund des nahezu funktionalen Zusammenhangs der Bewegungskenngrößen untereinander in den Geradeausbremsungen ( $R_p \approx 1$ ), siehe Geradeausbremsung aus 180 km/h in Tabelle 5.2, kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, welcher Kennwert der Bewegungsgrößen  $\dot{\psi}$ ,  $a_y$  oder  $\beta_{SP/HA}$  die objektive und subjektive Beherrschbarkeit in Geradeausbremsung am besten erklärt. Der funktionale Zusammenhang zwischen zahlreichen „gleichwertigen“

Bewegungskenngrößen wird auch von Rompe et al. genannt.<sup>428</sup> In Kurvenbremsung aus 80 km/h (Spalten „K80“ in Tabelle 5.1) erscheinen die Maximalwerte der Giergeschwindigkeitsabweichung im Vergleich zu den häufig postulierten Ein-Sekunden-Werten hingegen deutlich besser geeignet, die subjektive Beherrschbarkeit der Testpersonen zu erklären ( $R_{P,\Delta\dot{\psi}_{\max}/\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}}=0,7$  im Vergleich zu  $R_{P,\Delta\dot{\psi}_{1s}/\Delta\dot{\psi}_{ref,1s}}=0,55/0,57$ ). Dies gilt ebenfalls für den Zusammenhang der Bewegungskenngrößen mit der benötigten Lenkarbeit. Das objektive Kurshaltevermögen (maximale Kursabweichung und minimaler Begrenzungsabstand) korreliert in Kurvenbremsung wiederum stärker mit den Ein-Sekunden-Werten (z.B.  $R_{P,\Delta a_{y,1s}}=0,29$  zu  $R_{P,\Delta a_{y,\max}}=0,19$ ). Die Korrelationszusammenhänge mit dem objektiven Kurshaltevermögen sind in Kurvenbremsung im Vergleich zu den Geradeausbremsungen jedoch deutlich schwächer ausgeprägt ( $\Delta R_{P,i}=0,2-0,4$ ). Die Ursache liegt in der im Vergleich zur Geradeausfahrt unpräziseren Kursführung der Testpersonen in Kurvenfahrt auch in ungestörter Fahrt, siehe Kapitel 5.2. Die Stellvariante  $\delta_h$  weist aufgrund des funktionalen Zusammenhangs mit den Bewegungskenngrößen erwartungsgemäß ebenfalls eine durchgängig hochsignifikante Korrelation mit den gewählten Beobachtungsgrößen auf.

In Summe zeigen insbesondere die maximale Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  (bzw. die auf die Fahrgeschwindigkeit bezogene Abweichung zur Referenzgiergeschwindigkeit  $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$  in Kurvenbremsung) und die maximale Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  eine durchgängig gute Eignung zur Erklärung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit. In dieser Arbeit wird aufgrund der mehrheitlichen Verwendung der Giergeschwindigkeitsabweichung zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens in der Literatur eine Auswertung der Beherrschbarkeit über der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) gewählt.

Tabelle 5.2 Nachweis des funktionalen Zusammenhangs zwischen den charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen in Geradeausbremsung aus 180 km/h am Fahr Simulator

| Kennwert                                | Korrelationskoeffizient "R <sub>P</sub> " (Pearson) |                         |                     |                   |                   |                   |            |
|---|---|-------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|
|   | Geradeausbremsung aus 180 km/h                      |                         |                     |                   |                   |                   |            |
| Open-Loop                               | $\Delta\dot{\psi}_{\max}$                           | $\Delta\dot{\psi}_{1s}$ | $\Delta a_{y,\max}$ | $\Delta a_{y,1s}$ | $\beta_{HA,\max}$ | $\beta_{SP,\max}$ | $\delta_h$ |
| $\Delta\dot{\psi}_{\max}$               | 1,00  | 0,99                    | 1,00                | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 1,00       |
| $\Delta\dot{\psi}_{1s}$                 | 0,99  | 1,00                    | 1,00                | 0,99              | 0,99              | 0,99              | 0,99       |
| $\Delta a_{y,\max}$                     | 1,00  | 1,00                    | 1,00                | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 1,00       |
| $\Delta a_{y,1s}$                       | 1,00  | 0,99                    | 0,99                | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 1,00       |
| $\beta_{HA,\max}$                       | 1,00  | 0,99                    | 1,00                | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 1,00       |
| $\beta_{SP,\max}$                       | 1,00  | 0,99                    | 1,00                | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 1,00       |
| $\delta_h$                              | 1,00  | 0,99                    | 1,00                | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 1,00       |
| $R_P = 1$ : "funktionaler Zusammenhang" |   |                         |                     |                   |                   |                   |            |



<sup>428</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 12f

## 5.1.2 Ausweichtest (80 km/h)

Tabelle 5.3 Korrelation der charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen mit der subjektiven Beherrschbarkeit im Ausweichtest

| Kennwert         | Korrelationskoeffizient " $R_p$ " (Pearson) |            |                  |                  |            |              |             |            |
|------------------|---|------------|------------------|------------------|------------|--------------|-------------|------------|
|                  | Bewertungskriterium                         |            | Kenngröße        |                  |            |              |             |            |
|                  | Subj. Beherrschbarkeit                      | Lenkarbeit | $\beta_{HA,max}$ | $\beta_{SP,max}$ | $\alpha_h$ | $\psi_{max}$ | $a_{y,max}$ | $k_{prop}$ |
| $\beta_{HA,max}$ | 0,54  | 0,67       | 1,00             | 0,99             | 0,93       | 0,80         | 0,82        | 0,49       |
| $\beta_{SP,max}$ | 0,55  | 0,67       | 0,99             | 1,00             | 0,91       | 0,83         | 0,81        | 0,49       |
| $\alpha_h$       | 0,43  | 0,77       | 0,93             | 0,91             | 1,00       | 0,80         | 0,84        | 0,13**     |
| $\psi_{max}$     | 0,47  | 0,77       | 0,80             | 0,83             | 0,80       | 1,00         | 0,78        | 0,26       |
| $a_{y,max}$      | 0,39  | 0,69       | 0,82             | 0,81             | 0,84       | 0,78         | 1,00        | 0,20*      |
| $k_{prop}$       | 0,40  | -0,01**    | 0,49             | 0,49             | 0,13**     | 0,26         | 0,20*       | 1,00       |

Signifikanzniveau: < 0,01; Abweichungen: \* : < 0,05; \*\*: kein signifikanter Zusammenhang

Im Ausweichtest aus 80 km/h besteht zwischen den im Closed-Loop-Modus ermittelten Bewegungskenngrößen untereinander im Gegensatz zu den diskutierten Open-Loop-Kenngrößen in Geradeausbremsung kein funktionaler Zusammenhang, siehe Tabelle 5.3. Somit werden unterschiedliche Korrelationszusammenhänge mit der subjektiven Beherrschbarkeit und dem Lenkaufwand deutlich: Die maximalen Schwimmwinkel im Schwerpunkt oder an der Hinterachse  $\beta_{max,SP/HA}$  zeigen hierbei die beste Eignung zur Erklärung der subjektiven Beherrschbarkeit ( $R_{p,\beta_{max,HA/SP}} = 0,55/0,54$ ). Dieser Zusammenhang ist deutlich stärker ausgeprägt als die korrelativen Zusammenhänge des Mitlenkfaktors  $k_{prop}$ , der maximalen Querbeschleunigung  $a_{y,max}$  oder des anhand eines Einspurmodells berechneten Schräglaufwinkels an der Hinterachse  $\alpha_h = \beta_{HA} - \delta_{HA}$  ( $R_{p,k_{prop}} = 0,4$ ;  $R_{p,a_{y,max}} = 0,39$ ,  $R_{p,\alpha_h} = 0,43$ ). Die resultierende Lenkarbeit, definiert als das Integral der Lenkradgeschwindigkeit (im Betrag) zwischen Ein- und Ausfahrgasse, korreliert am besten mit der maximalen Gierrate und dem maximalen Schräglaufwinkel an der Hinterachse ( $R_{p,\psi_{max}} = R_{p,\alpha_h} = 0,77$ ). Der Kausalzusammenhang ist hierbei jedoch nicht eindeutig zu klären, da eine beidseitige Abhängigkeit zwischen der Lenktätigkeit des Fahrers und der Stabilität des Fahrzustandes besteht. Fahrer, die während des Ausweichvorgangs hohe Lenkwinkel aufbringen, können hierdurch entweder verstärkte Fahrzeugreaktionen verursachen oder den Fahrzustand stabilisieren. Der nicht nachweisbare Zusammenhang zwischen dem Mitlenkfaktor  $k_{prop}$  und der Lenkarbeit ( $R_p \approx 0$ ) könnte dafür sprechen, dass die Testpersonen ihr individuelles Lenkmuster unabhängig von der Variation des Fahrzeugverhaltens beibehalten, siehe auch Keen<sup>429</sup>, und die Intensität der Fahrzeugreaktion somit vor allem von der Intensität der Lenkeingaben bzw. des Lenkaufwandes abhängt. Andererseits erscheint auch eine Kompensation des bei einem Mitlenken der Hinterachse prinzipiell reduzierten Lenkradwinkelbedarfs durch einen

anschließenden höheren Korrekturbedarf des destabilisierten Fahrverhaltens möglich. Zur Beschreibung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit in Kapitel 5.5 wird bevorzugt der maximale Hinterachs-Schwimmwinkel gewählt, da im Vergleich zum erzielten Schwimmwinkel im Fahrzeug-Schwerpunkt ein direkterer Zusammenhang zum Schräglaufwinkel der Räder an der Hinterachse und somit zum Fahrzustand besteht.

## 5.2 Objektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern

Zur Bewertung der objektiven Beherrschbarkeit werden die beiden Kriterien

- maximale Kursabweichung  $\Delta y_{\max,4s}$
- und minimaler Begrenzungsabstand von der Fahrstreifenbegrenzung  $\Delta y_{\text{ref},\min,4s}$

der Reifenaußenkanten der Räder innerhalb von vier Sekunden nach Bremsbeginn bzw. Aufschaltung des HA-Lenkswinkels verwendet und über der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung (maximale Gierstörung) aufgetragen. Die erzielten Maximal- und Minimalwerte der Testpersonen werden überwiegend innerhalb von zwei Sekunden und in wenigen Fällen erst innerhalb von vier Sekunden nach Störaufschaltung erzielt, was den Erkenntnissen von Wallentowitz et al. bei der Untersuchung von Lenksystemeingriffen an der Vorderachse entspricht.<sup>430</sup>

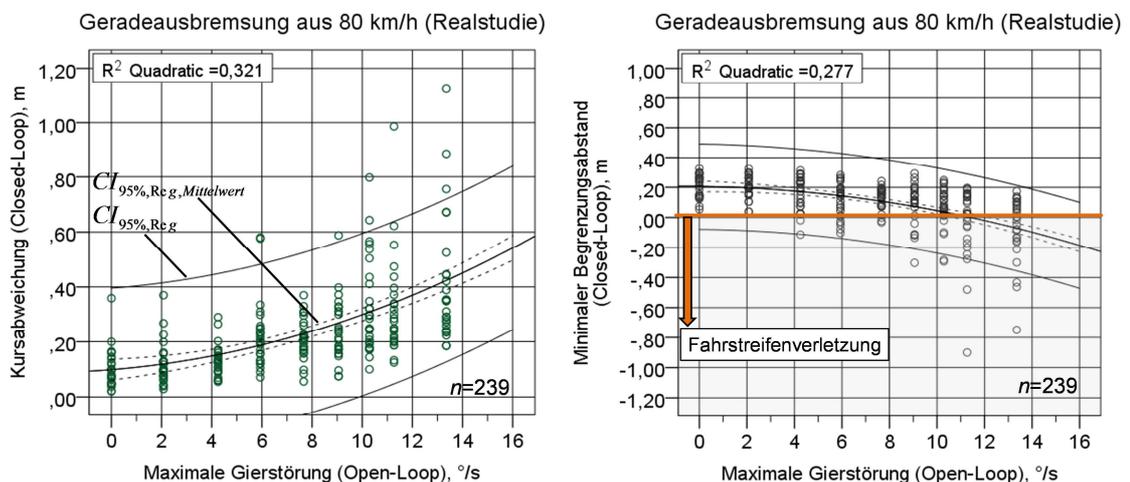


Bild 5.1 Maximale Kursabweichungen und minimale Begrenzungsabstände der Testpersonen in Abhängigkeit der Open-Loop-Maximalwerte der Gierstörungen in Geradeausbremsung aus 80 km/h

Bild 5.1 zeigt die vollständige Verteilung der maximalen Kursabweichungen (links) und der minimalen Begrenzungsabstände (rechts) im Closed-Loop am Beispiel der Geradeausbremsung aus 80 km/h über den neun Varianten der maximalen Open-Loop-

<sup>429</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 231ff

<sup>430</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

Gierstörung. Ein Unterschreiten des Begrenzungsabstandes von 0 m stellt hierbei eine „Fahrstreifenverletzung“ mit potentiell Pylonkontakt dar. Die Regressionslinien verdeutlichen einen progressiven Anstieg der mittleren maximalen Kursabweichung und eine entsprechend progressive Abnahme des mittleren minimalen Begrenzungsabstandes. Ebenso werden speziell bei hohen Gierstörungen die durchgängig in allen Bremsmanövern beobachteten „Ausreißer“ in der Kursabweichung und des Begrenzungsabstandes deutlich. Die Verteilung der Kursabweichungen und der Begrenzungsabstände ist zudem heteroskedastisch. Eine heteroskedastische Verteilung liegt vor, wenn die Varianzen der Beobachtungsgrößen der einzelnen Verteilungen untereinander nicht identisch sind.<sup>431</sup> Die Varianzen der Kursabweichungen und der Begrenzungsabstände nehmen in den Bremsmanövern – wie in Bild 5.1 deutlich wird – bei hohen Gierstörungsvarianten zu und weichen signifikant voneinander ab. Die in Bild 5.1 skizzierten Vertrauensbereiche für den Verlauf der Regression  $CI_{95\%, \text{Re } g, \text{Mittelwert}}$  und die Vertrauensbereiche (Erwartungswerte) für eine Einzelstichprobe  $CI_{95\%, \text{Re } g}$  setzen jedoch die Annahme einer Homoskedastizität, also einer konstanten Varianz, voraus. Somit können mit diesem Verfahren keine zuverlässigen Vorhersagen oder Vergleiche der objektiven Beherrschbarkeit für eine einzelne Gierstörungsvariante vorgenommen werden. In den folgenden Auswertungen wird daher die Betrachtung der Regressionskurven der einzelnen Mittelwerte und ihrer individuellen Vertrauensbereiche (95 %-Niveau) für einen Vergleich der Gierstörungsvarianten in den verschiedenen Bremsmanövern gewählt.

### 5.2.1 Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie)

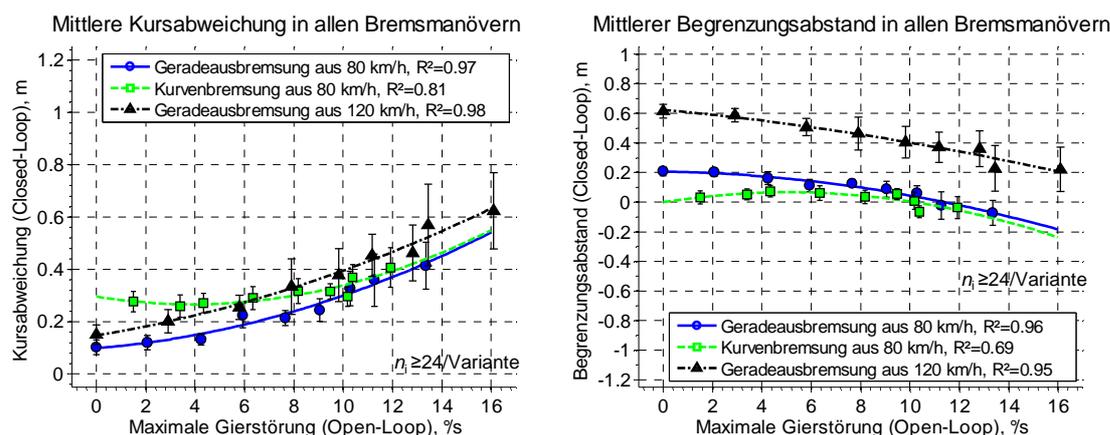


Bild 5.2 Mittelwerte der maximalen Kursabweichung und des minimalen Begrenzungsabstandes in den Bremsmanövern der Realstudie in Abhängigkeit der Open-Loop-Maximalwerte der Gierstörungen

Die mittlere Kursabweichung  $\Delta \bar{y}_{\text{max}, 4,5}$  steigt sowohl in Geradeausbremsung aus 80 km/h als auch in Geradeausbremsung aus 120 km/h progressiv über dem Betrag der Open-

<sup>431</sup> Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 193

Loop-Gierstörung an, siehe Bild 5.2 (links). Dementsprechend fällt der mittlere Begrenzungsabstand  $\Delta\bar{y}_{ref,min,4s}$  in den Geradeausbremsungen über der Gierstörung progressiv ab, siehe Bild 5.2 (rechts). In ungestörter Geradeausbremsung aus 80 km/h werden im Mittel 10 cm Kursabweichung erzielt, bei  $13,3^\circ/s$  ca. 42 cm. Die mittlere Kursabweichung bei erhöhter Ausgangsfahrgeschwindigkeit (120 km/h) ist im Vergleich zur Geradeausbremsung aus 80 km/h konstant zwischen ca. 5-10 cm erhöht. Eine Steigerung dieser annähernd konstanten Abweichung bei hohen Open-Loop-Gierstörungen kann nicht beobachtet werden. Der mittlere Begrenzungsabstand in Geradeausbremsung aus 80 km/h beträgt im ungestörten Fall 0,2 m und sinkt bei einer maximalen Gierstörung von  $13,3^\circ/s$  auf im Mittel ca. -7 cm ab, was einer Überschreitung der Fahrstreifenbegrenzung entspricht. In Geradeausbremsung aus 120 km/h beträgt die Fahrstreifenbreite 3,5 m statt 2,5 m, weshalb die mittleren Begrenzungsabstände im Vergleich zur Geradeausbremsung aus 80 km/h jeweils um ca. 40 cm höher ausfallen. Aus diesem Grund wird trotz der im Mittel um ca. 5-10 cm erhöhten Kursabweichung auch bei einer maximalen Gierstörung von  $16,1^\circ/s$  noch ein mittlerer Begrenzungsabstand von ca. 0,2 m erzielt. Die Abhängigkeit der mittleren maximalen Kursabweichung und des mittleren minimalen Begrenzungsabstands von der Open-Loop-Gierstörung kann über einen quadratischen Modellansatz mit  $R^2 = 0,95 - 0,98$  annähernd auf dem Niveau eines funktionalen Zusammenhangs beschrieben werden.

Der Verlauf der mittleren Kursabweichung und des mittleren Begrenzungsabstands weichen in Kurvenbremsung aus 80 km/h hingegen deutlich von den beobachteten Zusammenhängen in Geradeausbremsung ab, siehe Bild 5.2: Bereits in ungestörter Kurvenbremsung ( $\Delta\dot{\psi}_{ref,max} = 1,5^\circ/s$ ) tritt eine mittlere Kursabweichung von ca. 0,28 m auf. Der im Vergleich zur Geradeausfahrt erhöhte seitliche Platzbedarf von Testpersonen während einer Kurvenfahrt wurde bereits von Wallentowitz et al. beobachtet.<sup>432</sup> Bis ca.  $10^\circ/s$  Open-Loop-Gierstörung ist in Kurvenbremsung keine signifikante Erhöhung der mittleren Kursabweichung bzw. kein signifikanter Abfall des mittleren Begrenzungsabstandes nachweisbar. Ab ca.  $10^\circ/s$  Open-Loop-Gierstörung liegen die Mittelwerte der Kursabweichung und des Begrenzungsabstandes anschließend annähernd im Bereich der Kursabweichungen und Begrenzungsabstände in Geradeausbremsung aus ebenfalls 80 km/h.

Aufgrund des eingeschränkten Kurshaltevermögens der Normalfahrer in Kurvenfahrt werden bereits ohne zusätzliche Aufschaltung eines Hinterrad-Lenk winkels Fahrstreifenverletzungen beobachtet. Bild 5.3 zeigt die Übersicht der prozentualen Fahrstreifenverletzungen und Pylonenkontakte in den jeweiligen Gierstörungsvarianten der Gerade-

---

<sup>432</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

aus- und Kurvenbremsungen. Die Unterscheidung von Fahrstreifenverletzungen und Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten wird vorgenommen, da kurzzeitige Fahrstreifenverletzungen vor dem Auftreten eines Pylonenkontakts durch den Fahrer korrigiert werden können. Insbesondere bei Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80 km/h treten zahlreiche Fahrstreifenverletzungen ohne beobachtete Pylonenkontakte auf. In Geradeausbremsung aus 120 km/h ist dies hingegen nur in wenigen Einzelfahrten der Fall. Die Ursache der deutlichen Differenz zwischen dem Anteil der Fahrstreifenverletzungen und dem Anteil der Pylonenkontakte in den Bremsungen aus 80 km/h kann in der hohen Anzahl an Fahrstreifenverletzungen im Bereich weniger Zentimeter durch die enge Fahrgasse (2,5 m) und in dem bei 80 km/h größeren Zeitfenster für eine erfolgreiche Kurskorrektur vor der nächsten Pylone im Vergleich zu einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit (Stellabstand = konstante 10 m) vermutet werden. Bei geringen Fahrstreifenverletzungen und geringen Kollisionsgeschwindigkeiten ist die Erkennbarkeit von Pylonenkontakten durch den Versuchsbeobachter zudem erschwert.

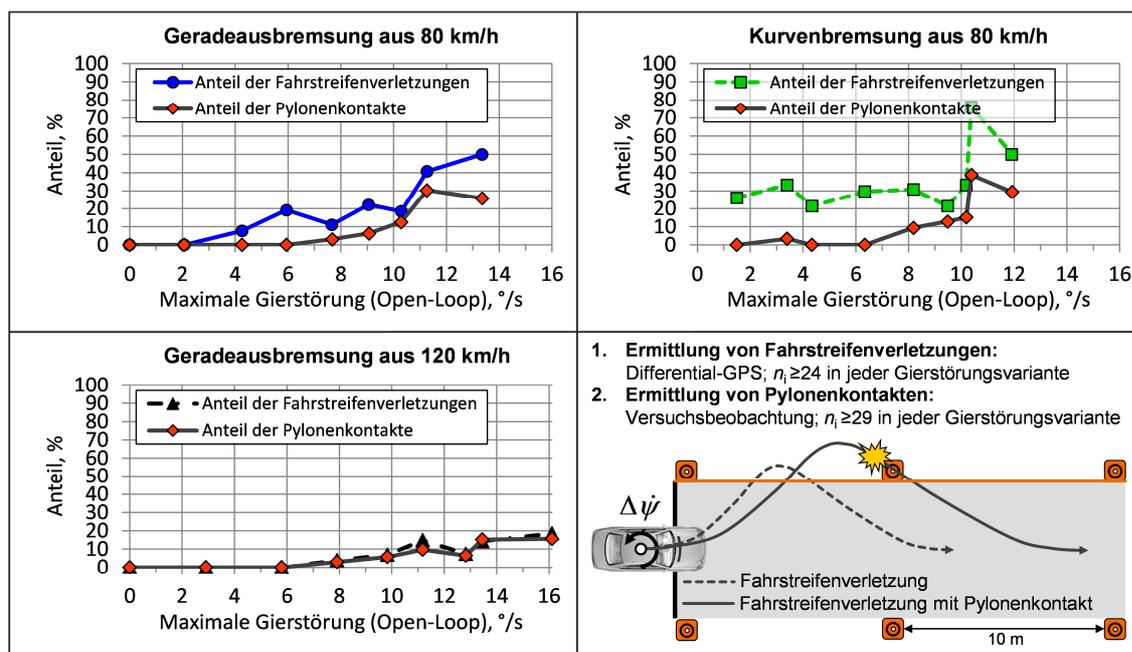


Bild 5.3 Übersicht der Fahrstreifenverletzungen und beobachteten Pylonenkontakte in Abhängigkeit der Open-Loop-Gierstörungen in den Bremsmanövern der Realstudie

In den Geradeausbremsungen aus 80 km/h treten erste Fahrstreifenverletzungen bei 4,3°/s Open-Loop-Gierstörung auf, während erste Pylonenkontakte erst bei 7,7°/s beobachtet werden. Bei 13,3°/s Open-Loop-Gierstörung verlassen 50 % der Testpersonen den Fahrstreifen und in 26 % der Fälle, also etwa zur Hälfte, kollidieren sie nachweislich mit einer Pylone. Bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit werden bis 6°/s Open-Loop-Gierstörung überhaupt keine Fahrstreifenverletzungen verzeichnet. Die Anteile bei der maximalen Störausprägung von 16,1°/s liegen in Geradeausbremsung aus 120 km/h im

Vergleich zur Geradeausbremsung aus 80 km/h aufgrund des breiteren Fahrstreifens (3,5 m) bei nur ca. 19 % Fahrstreifenverletzungen und ca. 16 % Pylonenkontakte. In Kurvenbremsung werden beginnend mit der ungestörten Kurvenbremsung bis hin zu ca. 10°/s Open-Loop-Gierstörung durchgängig ca. 20-30 % Fahrstreifenverletzungen registriert. Bei 3,4°/s Open-Loop-Gierstörung resultiert hieraus ein erster beobachteter Pylonkontakt. Ein weiterer Pylonkontakt wird erst bei einer Gierstörung von 8,2°/s verzeichnet.

## 5.2.2 Störaufschaltung ohne gleichzeitige Bremsbetätigung bei 80 km/h

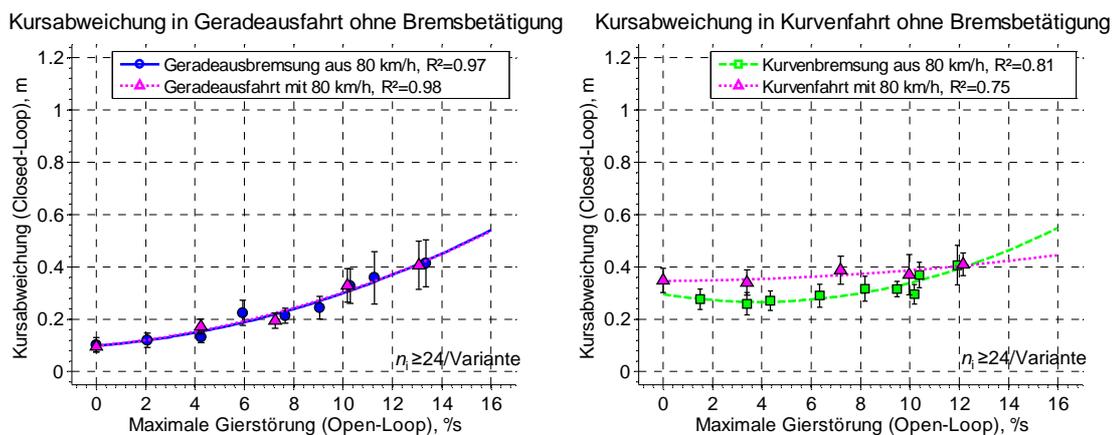


Bild 5.4 Objektives Kurshaltevermögen bei Störaufschaltung der HA-Lenkwinkel ohne gleichzeitige Fahrerbremsung in Geradeaus- und Kurvenfahrt mit 80 km/h

In den durchgeführten Bremsmanövern wird die Hinterachs-Störaufschaltung an die Bremsbetätigung des Fahrers gekoppelt, um die benötigte Variation des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern darstellen zu können. In bisherigen Studien zur Störbeurteilung von Lenksystemeingriffen werden die Störungen hingegen in freier Geradeaus- und Kurvenfahrt aufgeschaltet. Bild 5.4 vergleicht die resultierenden Mittelwerte der maximalen Kursabweichungen infolge einer unerwarteten Aufschaltung der Hinterachs-Lenkeingriffe mit den resultierenden Kursabweichungen bei Kopplung der Störaufschaltungen an eine Bremsbetätigung. Bei einer unerwarteten Störaufschaltung in Geradeausfahrt mit 80 km/h kann nach Bild 5.4 (links) kein Einfluss der Methodik der Störaufschaltungen auf das resultierende Kurshaltevermögen festgestellt werden. Die Regressionskurven (quadratischer Modellansatz) von Geradeausfahrt und Geradeausbremsung verlaufen nahezu deckungsgleich und auch die einzelnen Mittelwerte können bei ähnlichen Open-Loop-Gierstörungen als identisch eingestuft werden (z.B. bei ca. 2°/s, ca. 7-8°/s und ca. 13°/s). Die ermittelte Beherrschbarkeit in Geradeausbremsungen ist also auf die Beherrschbarkeit von zufälligen Störaufschaltungen direkt übertragbar.

Zufällige Störaufschaltungen führen in Kurvenfahrt im Bereich zwischen ca. 1,5°/s und 10°/s hingegen zu einer um ca. 7-10 cm erhöhten Kursabweichung. Bei ca. 12°/s Open-

Loop-Gierstörung sind die erzielten mittleren Kursabweichungen wiederum vergleichbar. Da bereits in ungestörter Kurvenfahrt mit ca. 35 cm eine signifikant höhere mittlere Kursabweichung im Vergleich zur Kurvenbremsung ohne zusätzliche Störaufschaltung erzielt wird (nur ca. 28 cm), ist die Ursache jedoch nicht alleine in der zufälligen Aufschaltung der Gierstörungen zu sehen. Vielmehr kann vermutet werden, dass die Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit infolge der Bremsbetätigung zu einer verbesserten Kurshaltung durch die Normalfahrer beiträgt.

### 5.2.3 Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulator)

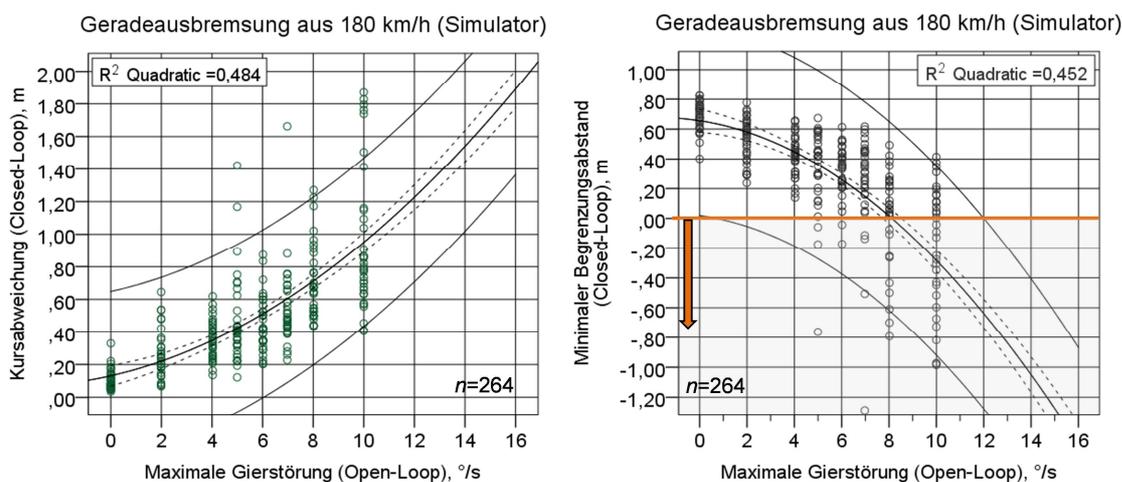


Bild 5.5 Objektives Kurshaltevermögen der Testpersonen in Geradeausbremsung aus 180 km/h am Fahrsimulator

Die Verteilungen der maximalen Kursabweichungen und der minimalen Begrenzungsabstände in den Geradeausbremsungen aus 180 km/h am Fahrsimulator zeigen eine mit der Realstudie vergleichbare Verteilungscharakteristik, siehe Bild 5.5: Es werden signifikant ansteigende bzw. voneinander abweichende Varianzen der Beobachtungsgrößen über dem Betrag der maximalen Gierstörung erzielt (heteroskedastische Verteilung). Ebenfalls tritt eine über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörung ansteigende Anzahl von Fahrstreifenverletzungen auf, die eine spätere Beurteilung der objektiven Beherrschbarkeit hinsichtlich von Akzeptanzgrenzen in Kapitel 6.1 ermöglicht.

Bild 5.6 vergleicht die objektive Beherrschbarkeit der bereits diskutierten Geradeausbremsungen aus 120 km/h (Realstudie) mit den drei am Fahrsimulator durchgeführten Bremsmanövervarianten:

- 120 km/h und zur Realstudie identischer HA-Stellgradient ( $\dot{\delta}_h = 4^\circ/\text{s}$ )
- 120 km/h und ein erhöhter Stellgradient ( $\dot{\delta}_h = 20^\circ/\text{s}$ ) zur Prüfung des Einflusses eines variierten Zeitpunkts der erzielten Open-Loop-Gierstörungsmaxima

- 180 km/h und identische Zeitpunkte der Open-Loop-Gierstörungsmaxima im Vergleich zur Realstudie ( $\dot{\delta}_h = \text{ca. } 3^\circ/\text{s}$ ).

In den Geradeausbremsungen aus 120 km/h mit identischem HA-Stellgradienten ( $4^\circ/\text{s}$ ) werden am Fahrsimulator im Vergleich zu den Ergebnissen der Realstudie ab ca.  $\Delta\dot{\psi}_{\text{max}} = 6^\circ/\text{s}$  Open-Loop-Gierstörung deutlich erhöhte Mittelwerte der Kursabweichung  $\Delta\bar{y}_{\text{max},4s}$  und deutlich reduzierte mittlere Begrenzungsabstände  $\Delta\bar{y}_{\text{ref},\text{min}4s}$  bei vergleichbaren Open-Loop-Gierstörungen beobachtet, siehe Bild 5.6 (links). Die mittleren Kursabweichungen sind am Fahrsimulator ab  $\Delta\dot{\psi}_{\text{max}} = 6^\circ/\text{s}$  um mehr als 50 % erhöht und die mittlere Kursabweichung bei maximaler Störausprägung von  $\Delta\dot{\psi}_{\text{max}} = 16,1^\circ/\text{s}$  (Realstudie) wird in der Fahrsimulatorstudie bereits bei ca.  $10^\circ/\text{s}$  Open-Loop-Gierstörung erzielt bzw. übertroffen.

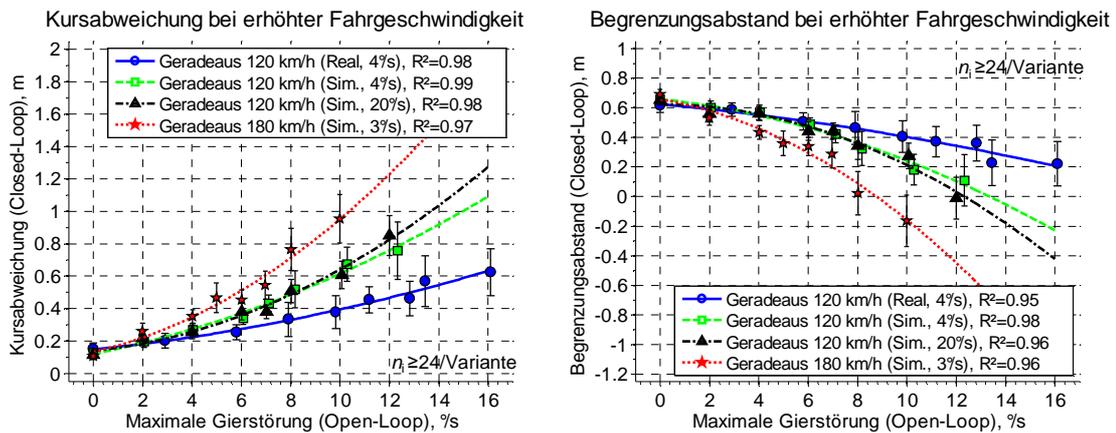


Bild 5.6 Vergleich der mittleren Kursabweichung und der mittleren Begrenzungsabstände zwischen Realstudie (120 km/h) und Fahrsimulatorstudie (120-180 km/h) in Abhängigkeit der maximalen Gierstörung

Auch der Vergleich der mittleren Begrenzungsabstände zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie aus Bild 5.6 (rechts) belegt ab  $6^\circ/\text{s}$  Gierstörung zur mittleren Kursabweichung identische Differenzen zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie. Das erzielte Kurshaltevermögen der Normalfahrer in der Fahrsimulatorstudie ist also nur eingeschränkt auf die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens des realen Testfahrzeugs übertragbar. Die Ursache dieser signifikanten Abweichung kann an folgende mögliche Unterschiede zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie geknüpft sein:

- abweichende mittlere Fahrfertigkeit des akquirierten Normalfahrerkollektivs
- verändertes Regelverhalten der Normalfahrer aufgrund der in Teilen virtuellen Umgebung (Umgebungsdarstellung, Akustik)
- verändertes Regelverhalten bzw. veränderte Blickführung aufgrund der Verwendung eines vorausfahrenden virtuellen Führungsfahrzeugs

- Abweichungen der Bewegungs- und Lenkmomentdarstellung am Hexapod-Simulator im Vergleich zur Realstudie (Bremsverzögerungen  $a_{x,i}$  sind beispielsweise nur durch eine zusätzliche Nickbewegung darstellbar)

Der tatsächliche Kausalzusammenhang kann auf Basis der statistischen Auswertung nicht belegt werden. Dennoch können die Ergebnisse der Fahrstudie verwendet werden, um die Sensitivität der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit auf eine erhöhte Verstellgeschwindigkeit  $\dot{\delta}_r$  und eine erhöhte Fahrgeschwindigkeit (180 km/h) zu prüfen, siehe ebenfalls Bild 5.6: Bei einer erhöhten Verstellgeschwindigkeit  $\dot{\delta}_r$  und somit geringeren Zeitverzügen der maximalen Open-Loop-Gierstörungen kann demnach sowohl auf Basis der mittleren Kursabweichungen  $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$  (Bild 5.6, links) als auch auf Basis der minimalen Begrenzungsabstände  $\Delta\bar{y}_{\text{ref min},4s}$  (Bild 5.6, rechts) keine signifikante Differenz der objektiven Beherrschbarkeit nachgewiesen werden. Die objektive Beherrschbarkeit scheint also nur vom Betrag der Gierbewegungsstörung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ , nicht aber vom Zeitverzug der maximalen Störausprägung  $t_{\dot{\psi}_{\max}}$  abhängig zu sein.

Im Gegensatz hierzu ist das objektive Kurshaltevermögen bei Geradeausbremsung aus 180 km/h im Vergleich zu einer Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 120 km/h bereits ab geringen Open-Loop-Gierstörungen von 2°/s statistisch signifikant und im Betrag deutlich vermindert. Die erzielten Mittelwerte der maximalen Kursabweichungen  $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$  in Geradeausbremsung aus 180 km/h liegen bei identischen Gierstörungen zwischen im Minimum 26,2 % ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7^\circ/\text{s}$ ) und im Maximum 47,5 % ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$ ) oberhalb der mittleren Kursabweichungen in Geradeausbremsung aus 120 km/h. In den Bremsmanövern mit jeweils identischer Open-Loop-Gierstörung wird ab  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 2^\circ/\text{s}$  eine mittlere Differenz von

$$\bar{\Delta}(\Delta\bar{y}_{\max,4s}) = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{\Delta\bar{y}_{\max,180\text{km/h},i} - \Delta\bar{y}_{\max,120\text{km/h},i}}{\Delta\bar{y}_{\max,120\text{km/h},i}}}{6} = 35,5\% \quad (5.1)$$

beobachtet. Die absolute Differenz der mittleren Begrenzungsabstände  $\Delta\bar{y}_{\text{ref},\text{min},4s}$  nimmt über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörungen tendenziell zu und beträgt bei  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$  nach Bild 5.6 (rechts) ca. 0,4 m. Zudem wird in Geradeausbremsung aus 180 km/h bereits bei einer Open-Loop-Gierstörung von 10°/s ein negativer mittlerer Begrenzungsabstand von -0,2 m erzielt.

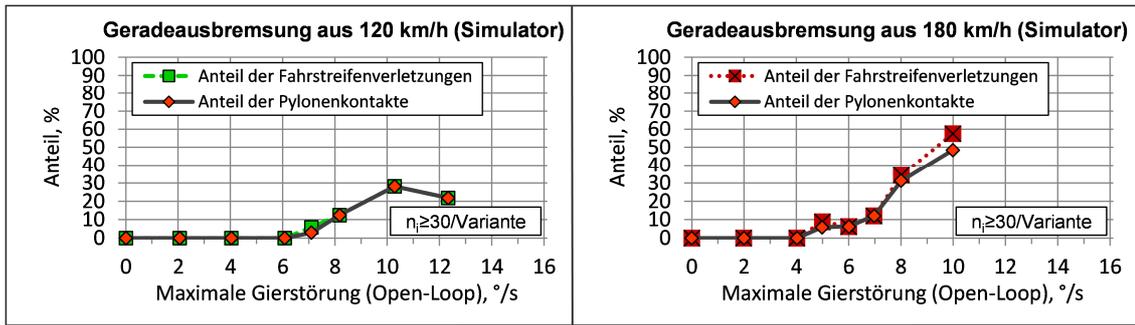


Bild 5.7 Übersicht der Fahrstreifenverletzungen und beobachteten Pylonenkontakte in Abhängigkeit der Open-Loop-Gierstörungen in Geradeausbremsung am Fahrsimulator

Als Konsequenz treten in Geradeausbremsung aus 180 km/h nach Bild 5.7 (rechts) bereits ab  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 5^\circ/\text{s}$  Open-Loop-Gierstörung Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten auf. Bei  $10^\circ/\text{s}$  Open-Loop-Gierstörung verlassen schließlich 58 % der Normalfahrer den Fahrstreifen und fast alle (48 %) touchieren dabei mindestens eine Pylone. In Geradeausbremsung aus 120 km/h ist das Kurshaltevermögen einzelner Normalfahrer erst bei  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7^\circ/\text{s}$  erschöpft und der Anteil der Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten beträgt bei  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$  nur 28 %.

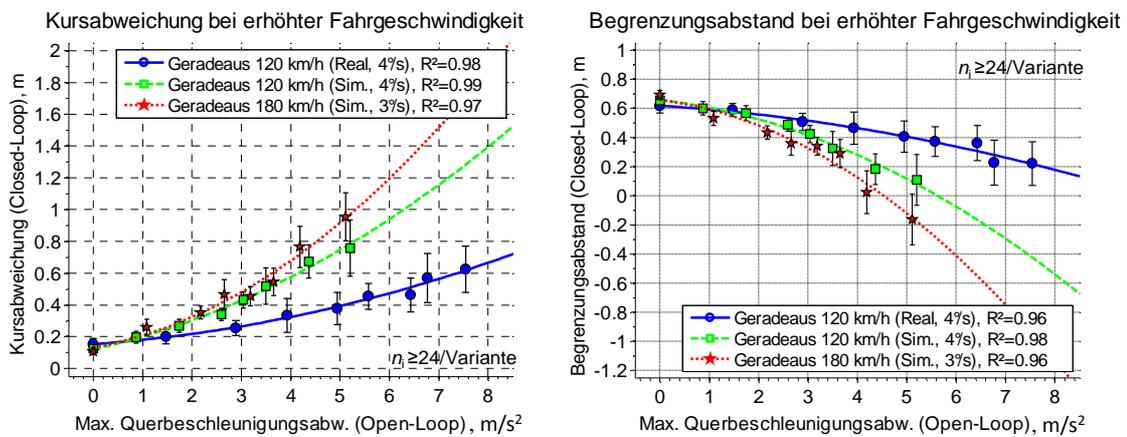


Bild 5.8 Mittlere Kursabweichung und mittlere Begrenzungsabstände in Abhängigkeit der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung

In Bild 5.8 wird die objektive Beherrschbarkeit von Hinterachs-Störaufschaltungen durch Normalfahrer über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  dargestellt (im Gegensatz zu der bisherigen Darstellung über  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ ). Auch anhand von  $\Delta a_{y,\max}$  können die bisher diskutierten Abhängigkeiten der Beobachtungsgrößen von der Störausprägung erwartungsgemäß durch quadratische Regressionskurven beschrieben werden. Der progressive Anstieg der Kursabweichung bzw. der progressive Abfall der Begrenzungsabstände wird auch über der maximalen Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  deutlich. Ebenfalls bleiben die Abweichungen der Beobachtungs-

größen zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie nach Bild 5.6 und Bild 5.8 bestehen. Keiner der betrachteten Open-Loop-Kennwerte kann also die Abweichung zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie erklären. Der Einfluss einer erhöhten Ausgangsfahrge- schwindigkeit (180 km/h im Vergleich zu 120 km/h) auf die mittlere Kursabweichung und den mittleren Begrenzungsabstand ist hingegen bei Verwendung der maximalen Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  als charakteristischem Bewegungskennwert reduziert: Bei Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichungen zwischen  $\Delta a_{y,\max} = 3\text{--}3,5\text{ m/s}^2$  kann keine signifikante Differenz der Mittelwerte der beiden Einzelverteilun- gen von Kursabweichung und Begrenzungsabstand nachgewiesen werden. Erst ab  $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 4\text{ m/s}^2$  werden wiederum deutliche, aber weiterhin im Vergleich zur Dar- stellung über der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta \dot{\psi}_{\max}$  (Gierstörung) ge- ringere Abweichungen beobachtet.

### 5.3 Subjektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern

Als Ergänzung der vorgestellten objektiven Beherrschbarkeit von Gierstörungen bzw. von HA-Störaufschaltungen wird in diesem Abschnitt die subjektive Beurteilung der Beherrschbarkeit durch Normalfahrer diskutiert. Hierdurch wird eine Gegenüberstellung mit der objektiven Beherrschbarkeit sowie ein Vergleich mit bisherigen Studien ermög- licht.

#### 5.3.1 Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie)

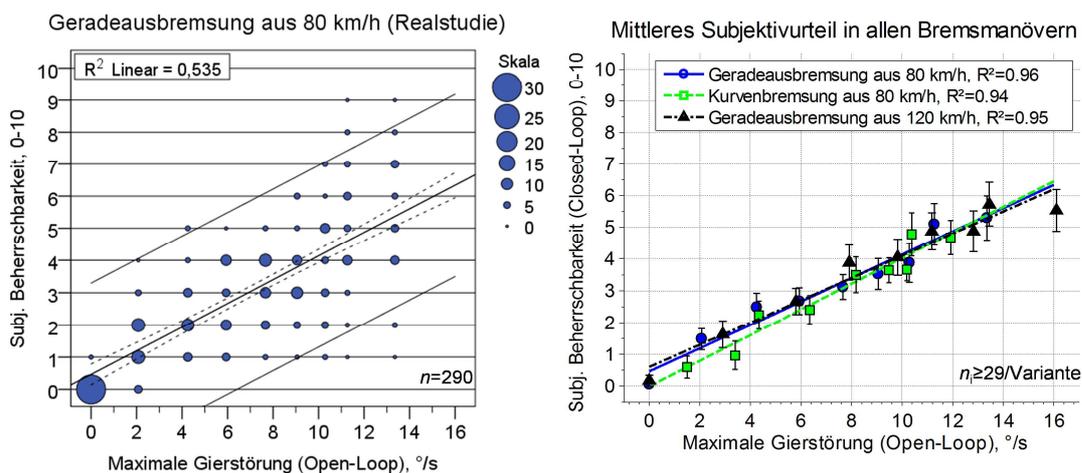


Bild 5.9 Mittlere subjektive Beherrschbarkeit infolge der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichungen (Gierstörungen) in den Bremsmanövern der Realstudie, bereits veröffentlicht<sup>433</sup>

<sup>433</sup> Simmermacher, Winner (2011): Lane Keeping Ability of normal Drivers in Braking Manoeuvres

Die Verteilungscharakteristik der Einzelbeurteilungen aus Bild 5.9 (links) in Geradeausbremsung aus 80 km/h entspricht dabei ebenfalls einer heteroskedastischen Verteilung mit über  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  ansteigenden Varianzen. Die auf einer konstanten Varianz basierenden Vertrauensbereiche der gesamten Regressionskurve können daher nicht für die Vorhersage einer Einzelstichprobe verwendet werden. Im Unterschied zur Charakteristik der objektiven Beherrschbarkeit von Bremsmanövern steigt die subjektive Störbeurteilung in allen Bremsmanövern der Realstudie aus Bild 5.9 (rechts) jedoch nicht progressiv, sondern linear über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörung an. Die Regression der Mittelwerte in den einzelnen Gierstörungsvarianten zeigt mit  $R^2 = 0,93 - 0,96$  eine fast vollständige Varianzerklärung. Somit kann von einem linearen Verlauf der mittleren Subjektivbeurteilung über der Gierstörung ausgegangen werden. Zudem sind keine Abweichungen zwischen der Subjektivbeurteilung in Geradeausbremsung aus 120 und 80 km/h nachweisbar. Bei Kurvenbremsung aus 80 km/h können zwar vereinzelt statistisch signifikante Abweichungen der Mittelwerte des Subjektivurteils nachgewiesen werden, die Regressionsgerade der mittleren Bewertung in Bild 5.9 (rechts) zeigt jedoch betragsmäßig vergleichbare Subjektivbeurteilung mit geringfügig um ca. 0,5 Bewertungspunkte unkritischer bewerteten Gierstörungen unterhalb von  $\Delta\dot{\psi}_{ref,max} = 4^\circ/s$ .

### 5.3.2 Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrstudie)

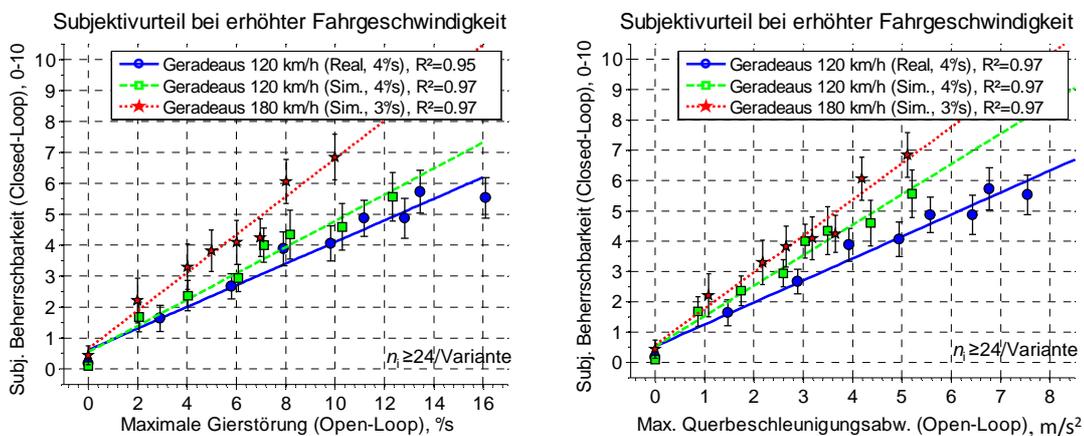


Bild 5.10 Vergleich der mittleren Subjektivbeurteilung zwischen Realstudie (120 km/h) und Fahrstudie (120-180 km/h) über den maximalen Gierstörungen und Querbeschleunigungsabweichungen

Im Unterschied zu den signifikanten und im Betrag deutlichen Abweichungen der objektiven Beherrschbarkeit in identischer Geradeausbremsung aus 120 km/h zwischen Real- und Fahrstudie zeigen sich für die Subjektivbeurteilung nach Bild 5.10 (links) geringere Differenzen: In den Einzelvarianten mit vergleichbaren Gierstörungsbeträgen (ca.  $6^\circ/s$ , ca.  $8^\circ/s$  und ca.  $10^\circ/s$ ) können keine statistisch signifikanten Abweichungen der Mittelwerte der Subjektivurteile voneinander nachgewiesen werden. Erst

ab ca.  $12^\circ/\text{s}$  tritt erstmals eine statistisch signifikant Abweichung auf. Dennoch deutet der Verlauf der Regressionsgerade für beide Geradeausbremsungen eine um ca. 20 % geringfügig kritischere Subjektivbeurteilung in den Bremsmanövern am Fahrsimulator an. Diese Tendenz kann in Abhängigkeit von  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  jedoch nicht durchgängig statistisch belegt werden. Die Abweichungen der mittleren Subjektivurteile in Geradeausbremsung aus 180 km/h sind hingegen mit Ausnahme der Einzelvarianten bei  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 0^\circ/\text{s}$ ,  $2^\circ/\text{s}$  und  $7^\circ/\text{s}$  im Vergleich zur Geradeausbremsung aus 120 km/h (Fahrsimulator) statistisch signifikant und im Betrag deutlich ausgeprägt. Die prozentuale Differenz liegt ab einer Gierstörung von  $2^\circ/\text{s}$  im Minimum bei ca. 6 % ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7^\circ/\text{s}$ ), im Maximum bei ca. 49 % ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$ ) und im Mittel bei ca. 34 %. Diese prozentuale Abweichung der mittleren Subjektivurteile bei erhöhter Ausgangsfahrgeschwindigkeit (180 km/h) entspricht in etwa der prozentualen Abweichung der mittleren Kursabweichungen (ca. 36 %). Bei Auswahl der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  als objektivem Bewegungskennwert in Bild 5.10 (rechts) nähern sich die Subjektivbeurteilungen analog der objektiven Beherrschbarkeit einander an. Im Bereich zwischen  $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 3\text{-}3.5 \text{ m/s}^2$  können keine statistisch signifikanten Abweichungen der mittleren Subjektivbeurteilungen voneinander nachgewiesen werden. Die mittleren Störbeurteilungen in Geradeausbremsung aus 180 km/h sind oberhalb von  $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 4 \text{ m/s}^2$  wiederum statistisch signifikant und im Betrag deutlich höher ausgeprägt als bei Bremsung aus 120 km/h.

Die Abweichung der mittleren Subjektivbeurteilungen in identischer Geradeausbremsung aus 120 km/h zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie werden durch die Darstellung über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  nach Bild 5.10 (rechts) in einzelnen Stellvarianten wiederum statistisch signifikant und im Betrag deutlicher ausgeprägt als in der Darstellung über der Open-Loop-Gierstörung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ .

## 5.4 Vergleich von subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit

In bisherigen Studien zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen für Lenksystemstörungen wird – wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben – davon ausgegangen, dass die Subjektivbeurteilung im Vergleich zu einer erfolgreichen Kurshaltung das „konservativere“ und somit geeignetere Kriterium darstellt.<sup>434</sup> Zur Bewertung dieser Hypothese wird die subjektive Beherrschbarkeit dem objektiven Kurshaltevermögen gegenübergestellt. Zusätzlich er-

<sup>434</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

folgt eine Betrachtung der subjektiven Beherrschbarkeit in allen Einfahrten, in denen der Fahrstreifen durch die Räder des Fahrzeugs verletzt wird und ein konkretes Unfallereignis mit einer Pylone auftritt.

#### 5.4.1 Gegenüberstellung in Geradeausbremsungen aus 80-180 km/h

Bild 5.11 zeigt die mittleren maximalen Kursabweichungen  $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$  und die mittleren minimalen Begrenzungsabstände  $\Delta\bar{y}_{\text{ref},\min,4s}$  über der mittleren Störbeurteilung durch Normalfahrer in Geradeausbremsungen aus 80 km/h (Realstudie), 120 km/h (Realstudie + Fahrsimulator) und 180 km/h (Fahrsimulator). Aufgrund der bereits diskutierten linearen Abhängigkeit der Subjektivbeurteilung von den Open-Loop-Bewegungskennwerten und der progressiven Zusammenhänge der objektiven Beobachtungskriterien wird erwartungsgemäß eine progressive Zunahme der mittleren Kursabweichung und eine progressive Abnahme des mittleren Begrenzungsabstandes über der linearen Zunahme der mittleren Subjektivbeurteilung festgestellt.

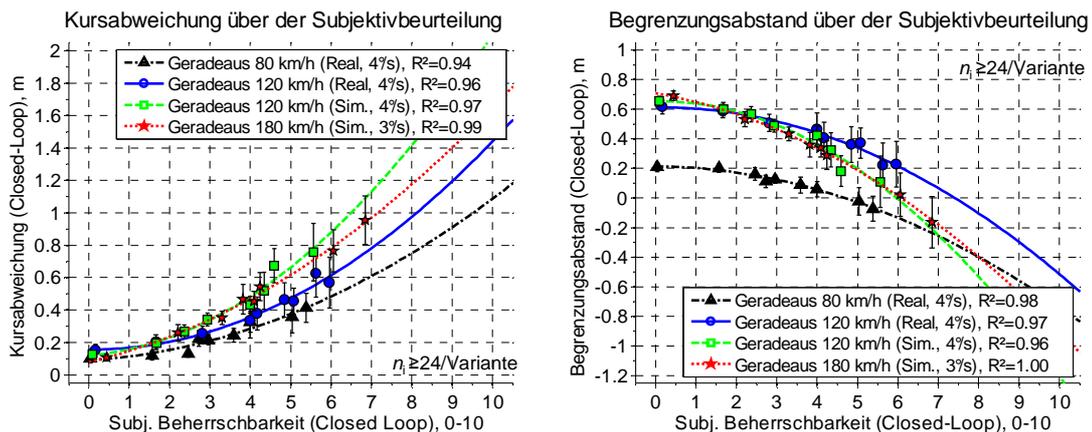


Bild 5.11 Gegenüberstellung des objektiven Kurshaltevermögens und der subjektiven Beherrschbarkeit in Geradeausbremsung aus 80-180 km/h

Die in Bild 5.11 dargestellten Zusammenhänge zwischen subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit sind durch quadratische Modellansätze mit einer hohen Varianzaufklärung abbildbar ( $R^2 = 0,94 - 1,00$ ). Innerhalb der Geradeausbremsungen am Fahrsimulator scheint zudem unabhängig von der Ausgangsfahrgeschwindigkeit ein konstanter Zusammenhang zwischen der mittleren Kursabweichungen, den mittleren Begrenzungsabständen und den mittleren Subjektivbeurteilungen der untersuchten Hinterachs-Störvarianten zu bestehen. Bis auf eine Einzelvariante kann bei vergleichbarer Subjektivbeurteilung keine statistisch signifikante Abweichung der Mittelwerte der objektiven Beherrschbarkeit voneinander festgestellt werden. Die Regressionskurven der Bremsmanöver am Fahrsimulator aus 120 und 180 km/h verlaufen sowohl für die Kursabweichung als auch für die mittleren Begrenzungsabstände annähernd deckungsgleich.

In der Gegenüberstellung des Zusammenhangs von subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit weichen die Ergebnisse der Realstudie jedoch von der Fahrsimulatorstudie ab: Vergleichbare mittlere Kursabweichungen und Begrenzungsabstände werden im Vergleich der beiden Geradeausbremsungen aus 120 km/h ab mittleren Störausprägungen ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} > \text{ca. } 6^\circ/\text{s}$  Gierstörung) in den Bremsungen am Fahrsimulator im Mittel um etwa einen ganzen Bewertungspunkt schlechter beurteilt. Vergleichbare Kursabweichungen in Geradeausbremsungen aus 80 km/h bei reduzierter Fahrstreifenbreite (2,5 m statt 3,5 m) werden innerhalb der Realstudie über alle Gierstörungsausprägungen hinweg – mit Ausnahme der ungestörten Fahrt – im Mittel nochmals um etwa einen Bewertungspunkt schlechter beurteilt als die Bremsungen aus 120 km/h in Realfahrt. Als Ursache hierfür kann der aufgrund einer geringeren Fahrstreifenbreite (2,5 m) bereits ohne Störaufschaltung im Mittel um ca. 40 cm niedrigere Begrenzungsabstand angenommen werden, siehe Bild 5.11 (rechts).

Während innerhalb der Fahrsimulatorstudie ein geschwindigkeitsübergreifender Zusammenhang zwischen objektiver und subjektiver Beherrschbarkeit nicht ausgeschlossen werden kann, scheint also auch hier eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Auswahl des Versuchsinstruments zu bestehen. Die auftretenden Begrenzungsabstände sind zudem nach Bild 5.11 (rechts) bei abweichenden Fahrstreifenbreiten kein geeignetes Kriterium zur manöverübergreifenden Erklärung der subjektiven Beherrschbarkeit von Gierstörungen. Der Zusammenhang zwischen mittlerer Kursabweichung, mittlerem Begrenzungsabstand und der mittleren Subjektivbeurteilung kann also nicht als allgemein gültig angesehen werden.

#### 5.4.2 Subjektive Beherrschbarkeit von Fahrstreifenverletzungen

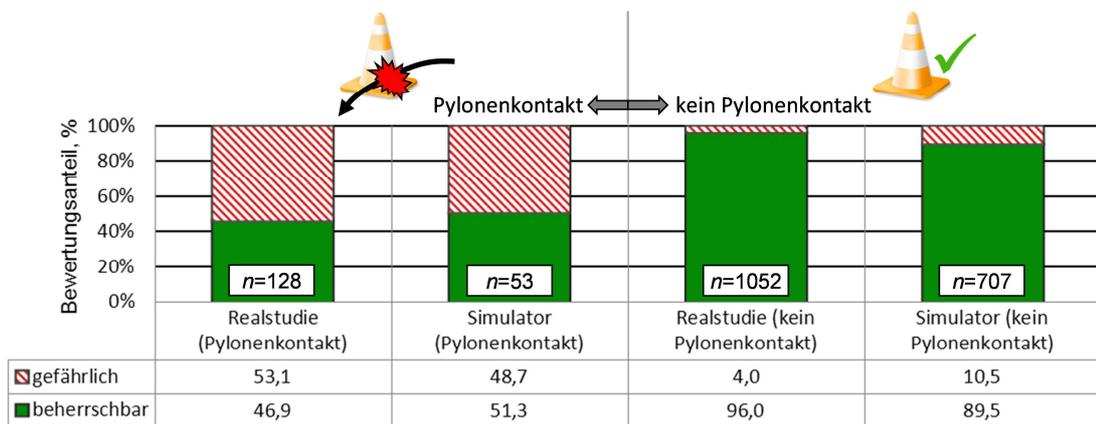
Tabelle 5.4 vergleicht die subjektive Einstufung der Beherrschbarkeit durch Normalfahrer in Fahrten mit und ohne auftretende Pylonen-Kollision infolge einer Fahrstreifenverletzung. Dabei wird die subjektive Einstufung anhand der in der verwendeten Beherrschbarkeitsskala enthaltenen subjektiven Akzeptanzgrenze in die beiden Klassen

- „beherrschbar“ ( $B_{S,i} = 0-6$ ) und
- „gefährlich“ ( $B_{S,i} = 7-10$ )

eingeteilt. Den Annahmen aus der Literatur folgend, dürften keine Pylonenkontakte auftreten, die durch die Normalfahrer nicht als gefährlich eingestuft werden. In der Realstudie werden von 128 Pylonenkontakten durch Hinterrad-Störaufschaltung jedoch nur 53,1 % der Fahrten als „gefährlich“ eingestuft und in den untersuchten Bremsmanövern am Fahrsimulator nur 48,7 %. Dieses Ergebnis weicht deutlich von der Erwartungshaltung ab, da die Probanden im Vorfeld der Tests konkret auf den Bezug eines Pylonenkontakts zu einem möglichen realen Unfallereignis hingewiesen wurden. Im Gegensatz

zu dieser Abweichung von der erwarteten Subjektivbeurteilung werden Fahrten ohne Pylonenkontakt in der Realstudie zu 96 % auch als subjektiv „beherrschbar“ eingestuft. Am Fahrsimulator bewerten ca. 90 % das Fahrzeugverhalten als beherrschbar, wenn keine Pylone touchiert wird.

Tabelle 5.4 Subjektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern in Abhängigkeit von aufgetretenen Pylonenkontakten



Die subjektive Beherrschbarkeit ist in dieser Studie also nicht dazu geeignet, eine objektiv sichere Kurshaltung zu erklären. Ein objektiv sicheres Kurshaltevermögen schließt wiederum speziell in der Realstudie einen Großteil der subjektiven Fahrsicherheit mit ein (96 %) und erscheint damit als das geeignetere Kriterium, um die objektive Fahrsicherheit infolge von Hinterachs-Störaufschaltungen zu bewerten.

### 5.4.3 Nachweis von Trainingseffekten über der Versuchsdauer

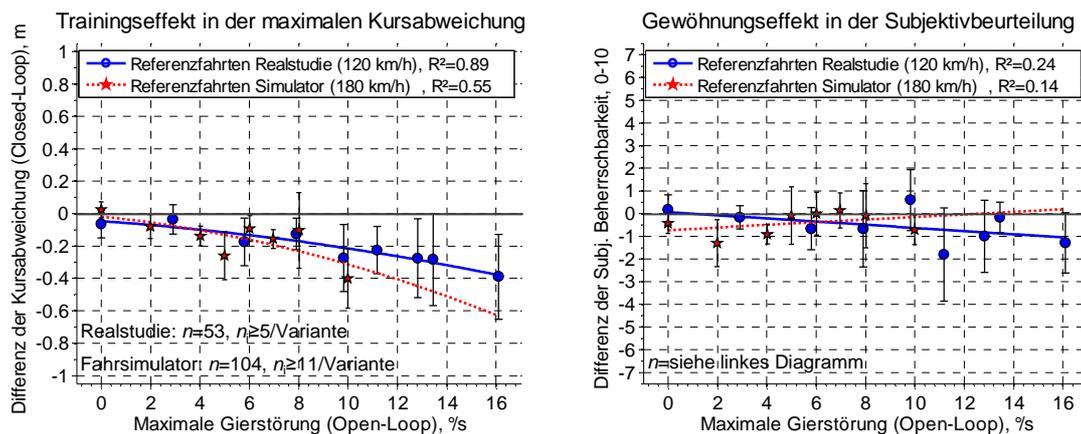


Bild 5.12 Prüfung von Trainingseffekten in der Kursabweichung und Gewöhnungseffekten in der Subjektivbeurteilung

Zum Abschluss der Diskussion des objektiven und subjektiven Kurshaltevermögens in Bremsmanövern wird geprüft, ob die Anzahl der Versuchswiederholungen zu einem nachweisbaren Trainingseffekt im erzielten Kurshaltevermögen oder zu Gewöhnungseffekten in der Subjektivbeurteilung der Normalfahrer führt. Hierzu wird die Differenz

der Kursabweichung und des Subjektivurteils zwischen der ersten Versuchsvariante eines Probanden und der letzten Versuchsvariante (Referenzfahrt) mit identischer Open-Loop-Gierstörung bzw. HA-Störaufschaltung ermittelt. Da es sich bei der Prüfung der Ausgangshypothese  $H_0 =$  „kein Gewöhnungs- oder Trainingseffekt“ um einen „einseitigen“ Test handelt, werden die 90 %-Vertrauensbereiche der Mittelwerte dieser Differenzen bei der jeweiligen Gierstörungsvariante gebildet, dargestellt in Bild 5.12. Schließt der 90 %-Vertrauensbereich eines Mittelwerts die Null-Linie nicht mit ein, wird die Ausgangshypothese auf dem üblichen Signifikanzniveau von  $\alpha_s = 0,05$  zu Gunsten der Annahme eines auftretenden Trainings- oder Gewöhnungseffekts verworfen. Die Prüfung der Trainingseffekte in der mittleren maximalen Kursabweichung  $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$  aus Bild 5.12 (links) belegt nachweisbare Trainingseffekte ab Open-Loop-Gierstörungen von  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = \text{ca. } 6^\circ/\text{s}$  in Geradeausbremsung aus 120 km/h (Realstudie). Der Verlauf der quadratischen Regressionskurve signalisiert zudem eine progressive Zunahme des Trainingseffekts über der Open-Loop-Gierstörung ( $R^2 = 0,89$ ). Auch in Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrstudie) sind bis auf eine Ausnahme ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$ ) in allen Versuchsvarianten der Geradeausbremsung aus 180 km/h ab  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 2^\circ/\text{s}$  Trainingseffekte nachweisbar. Im Maximum werden mittlere -0,4 m Differenz der  $n_i \geq 11$  Referenzfahrten beobachtet ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$ ), im Minimum nur -0,1 m ( $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$ ).

Die mittleren Differenzen der Subjektivbeurteilungen in den Referenzfahrten zeigen hingegen keine durchgängig nachweisbaren Gewöhnungseffekte in der Subjektivbeurteilung. Vereinzelt werden in den Referenzfahrten sogar kritischere mittlere Subjektivbeurteilungen erzielt. Die ausbleibende Nachweisbarkeit von Gewöhnungs- bzw. von „Reihenfolgeeffekten“ entspricht den Beobachtungen aus anderen Studien zur subjektiven Beurteilung von Lenksystemstörungen.<sup>435</sup>

Während das objektive Kurshaltevermögen signifikanten Trainingseffekten unterworfen ist, kann also von weitestgehend versuchsdauerunabhängigen Subjektivbeurteilungen ausgegangen werden. Bei Absolvierung von nur einer Gierstörungsvariante pro Versuchsperson würde das objektive Kurshaltevermögen in Richtung eines verschlechterten mittleren Kurshaltevermögens verschoben. Dennoch ist das objektive Kurshaltevermögen aufgrund des dargestellten Zusammenhangs der zu ca. 50 % subjektiv als unkritischen beurteilten Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten aus Tabelle 5.4 nach den Ergebnissen dieser Studie das konservativere Kriterium zur Beurteilung der objektiven Fahrsicherheit.

<sup>435</sup> Wesp et al. (2009): Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge

## 5.5 Beherrschbarkeit des Ausweichtests mit 80 km/h

Die Auswertung der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit im Ausweichtest erfolgt in Abhängigkeit der individuell auftretenden maximalen Closed-Loop-Hinterachs-Schwimmwinkel  $\beta_{HA,max}$ . Das objektive Kurshaltevermögen wird anhand der Anteile der drei möglichen Ereignisse

- Kursverletzungen in der Anlenkphase
- Kursverletzungen in der darauf folgenden Stabilisierungsphase
- und keine auftretende Kursverletzung

beurteilt.

### 5.5.1 Objektives Kurshaltevermögen bei hohen HA-Schwimmwinkeln

Bild 5.13 zeigt die Anteile der beobachteten Kursverletzungen mit Pylonenkontakten über den fünf gewählten Klassen der aufgetretenen maximalen Hinterachs-Schwimmwinkel. Bei HA-Schwimmwinkeln unterhalb von  $5^\circ$  werden in etwa 30 % der Fälle Kursverletzungen mit einer Pylone des zu umfahrenden Hindernisses erzielt. Bis hin zu  $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$  treten gleichzeitig keine Kursverletzungen in der nachfolgenden Stabilisierungsphase auf. Dieser Zusammenhang ist plausibel, da infolge einer zu zögerlichen Lenkanregungen – bzw. einer zu zögerlichen Fahrzeugreaktion auf die Lenkbefehle des Fahrers – nur geringe maximale Schwimmwinkel erzielt werden ( $\beta_{HA,max} < 5^\circ$ ).

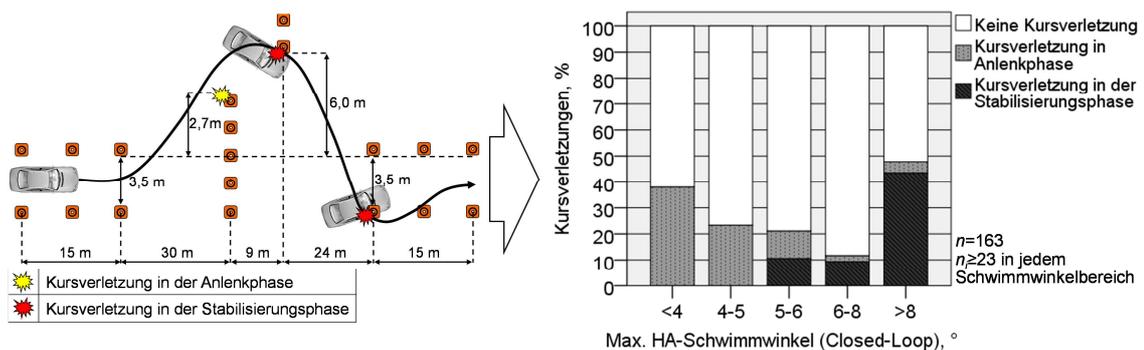


Bild 5.13 Beobachtete Kursverletzungen der Testpersonen im Ausweichtest in Abhängigkeit des maximalen HA-Schwimmwinkels, bereits veröffentlicht<sup>436</sup>

Eine erhöhte Lenkintensität, ausgedrückt über den Integralwert der Lenkradgeschwindigkeit über der Manöverdauer, führt den Ergebnissen der Korrelationsanalyse aus Kapitel 5.1.2 folgend zu höheren HA-Schwimmwinkeln. Die Fahrer können mit verstärkten Lenkeingaben dem Hindernis besser ausweichen, sind aber in den Bereichen von

<sup>436</sup> Simmermacher, Winner (2011): Beherrschbarkeit von Gierstörungen durch ein Fahrerkollektiv, S. 696ff

maximalen HA-Schwimmwinkeln  $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$  und  $6-8^\circ$  teilweise nicht mehr in der Lage, das Fahrzeug innerhalb der Fahrbahnbegrenzung zu stabilisieren. In jeweils ca. 10 % der Fälle treten Kursverletzungen auf, siehe Bild 5.13 (rechts). In den Ausweichtests mit einem maximalen HA-Schwimmwinkel  $\beta_{HA,max} > 8^\circ$  können schließlich ca. 43 % der Normalfahrer das Fahrzeug nicht mehr sicher innerhalb des vorgesehenen Fahrstreifens stabilisieren. Einen Erklärungsansatz dieser deutlichen Häufung oberhalb von  $8^\circ$  HA-Schwimmwinkel kann die Charakteristik heutiger Fahrzeug-Reifen liefern: Heutige Reifen erzielen ihr Kraftschlussmaximum im Bereich zwischen ca.  $5-10^\circ$  Schräglaufwinkel.<sup>437</sup> Der Hinterachs-Schwimmwinkel des Einspurmodells entspricht dabei abgesehen von den vorgenommenen Lenkeingriffen an der Hinterachse (bis zu  $2^\circ$  bei maximaler Querbeseleunigung) und der Hinterachskinematik in etwa dem Schräglaufwinkel der Hinterräder  $\alpha_{h,i}$ . Wird dieser Schräglaufwinkelbereich der maximalen Seitenführungskraft von ca.  $5-10^\circ$  überschritten, ist ein kritischer Seitenkraftverlust der Hinterachse und folglich ein unkontrolliertes Eindrehen des Fahrzeugs (Schleuderbewegung) zu erwarten. In dieser Studie wurde in  $n = 12$  Ausweichtests ein HA-Schwimmwinkel oberhalb von  $10^\circ$  erzielt. Sowohl ein zu zögerliches Anlenken als auch eine zu starke Fahrzeugreaktion in Form hoher HA-Schwimmwinkel führen zu einer Einschränkung der objektiven Fahrsicherheit in Ausweichtests.

Das beobachtete Kurshaltevermögen von Normalfahrern in Abhängigkeit des HA-Schwimmwinkels aus Bild 5.13 (rechts) gilt ebenfalls für den Zusammenhang des Kurshaltevermögens in Bezug auf die maximalen Schwimmwinkel im Schwerpunkt des Fahrzeugs  $\beta_{SP,max}$ . Die maximalen HA-Schwimmwinkel im Bereich zwischen  $\beta_{HA,max} =$  ca.  $3-8^\circ$  entsprechen nach Bild 5.14 (rechts) den um jeweils  $\beta_{HA,max} - \beta_{SP,max} =$  ca.  $1,2-1,5^\circ$  niedrigeren Schwimmwinkeln im Schwerpunkt des Fahrzeugs  $\beta_{SP,max}$ .

### 5.5.2 Subjektive Beherrschbarkeit von hohen HA-Schwimmwinkeln

Die Verteilung der Einzelbeurteilungen aus Bild 5.14 (links) über den maximalen HA-Schwimmwinkeln  $\beta_{HA,max}$  zeigt eine hohe Varianz der Subjektivbeurteilung bei vergleichbaren Schwimmwinkelbeträgen. Die Regression für die Einzelbeurteilungen mit einem linearen Modellansatz kann dementsprechend nur eine geringe Varianzaufklärung von ca. 29 % aufweisen. Zur Verdeutlichung des linearen Modellzusammenhangs zwischen der mittleren Subjektivbeurteilung und den maximalen Schwimmwinkel im Closed-Loop werden die Ausweichtests in fünf Schwimmwinkel-Klassen mit jeweils mindestens 30 Einzelfahrten unterteilt. Die  $n = 12$  Ausweichtests mit deutlich überhö-

<sup>437</sup> Schmid, Förschl (2009): Vom realen zum virtuellen Reifen – Reifenmodellparametrierung, S. 188ff

ten Schwimmwinkeln  $\beta_{HA,max} > 10^\circ$  werden für die Auswertung der Modellabhängigkeit nicht berücksichtigt.

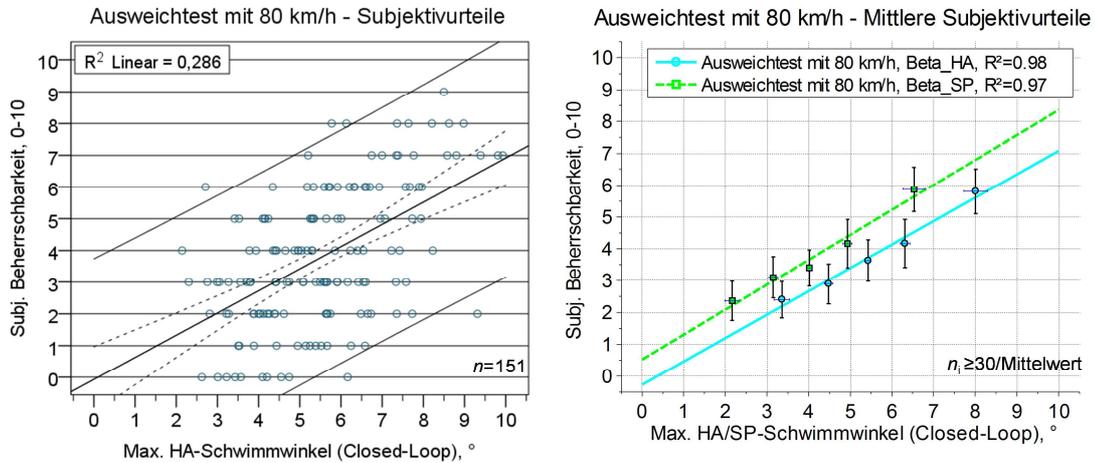


Bild 5.14 Subjektivbeurteilung in Abhängigkeit hoher HA- und SP-Schwimmwinkel im Ausweichtest mit 80 km/h

Die Regressionskurve der jeweils fünf gebildeten Mittelwerte der Störbeurteilung zeigt nach Bild 5.14 (rechts) eine eindeutig lineare Tendenz über den auftretenden mittleren Schwimmwinkeln an der Hinterachse und im Schwerpunkt des Fahrzeugs mit einer Varianzaufklärung von  $R^2 = 0,97-0,98$ . Im Bereich zwischen  $\beta_{HA,max} = \text{ca. } 3-8^\circ$  bzw.  $\beta_{SP,max} = \text{ca. } 1,8-6,5^\circ$  kann in dieser Studie also von einem linearen, sogar nahezu proportionalen Anstieg der mittleren Störbeurteilung über den auftretenden HA-/SP-Schwimmwinkel in Ausweichtests ausgegangen werden.

## 5.6 Fazit

Die Untersuchung der Hinterrad-Störaufschaltungen belegt einen hochsignifikanten Korrelations-Zusammenhang der objektiven sowie subjektiven Beherrschbarkeit mit der maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{max}$ . Zwischen den verschiedenen objektiven Bewegungskenngrößen aus  $\dot{\psi}$ ,  $a_y$  und  $\beta_{HA/SP}$  besteht ein annähernd funktionaler Zusammenhang. Daher kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, welcher der gängigen Bewegungskennwerte am besten zur Erklärung des Kurshaltevermögens geeignet ist. Die Maximalwerte  $\Delta\dot{\psi}_{max}$ ,  $a_{y,max}$  und  $\beta_{HA/SP,max}$  sind in dieser Studie jedoch speziell in Kurvenbremsung besser als die oftmals postulierten Ein-Sekunden-Werte dazu geeignet, die subjektive Beherrschbarkeit und den Lenkaufwand zu erklären. Bei verringerten Zeitverzügen der Maximalwerte nach Störaufschaltung durch eine erhöhte Verstelldynamik der Hinterachse ( $\dot{\delta}_h = 20^\circ/\text{s}$  statt  $4^\circ/\text{s}$ ) tritt zudem keine nachweisbare Veränderung der mittleren Kursabweichungen oder der mittleren

Abstände von der Fahrstreifenbegrenzung über identischen Giergeschwindigkeitsabweichungen  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  (Gierstörungen) auf. Dies spricht für die Auswahl von zeitlich unabhängigen Maximalwerten der Bewegungskenngrößen als objektive Open-Loop-Kennwerte.

Die mittlere maximale Kursabweichung der Normalfahrer steigt in allen durchgeführten Bremsmanövern der Real- und Fahrsimulatorstudie progressiv über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörungen an. Gleichzeitig nimmt der verbleibende mittlere Abstand von der Fahrstreifenbegrenzung progressiv ab. Die mittleren Störbeurteilungen steigen in allen Bremsmanövern linear über der Störausprägung an. Die Abhängigkeit der Mittelwerte der objektiven Kurshaltungskriterien (Kursabweichung, Begrenzungsabstand) von der Störausprägung kann in allen Geradeausbremsungen (80-180 km/h) durch quadratische Modellansätze fast vollständig erklärt werden (Varianzaufklärung  $R^2 = 0,95-0,99$ ). Eine vergleichbare Anpassungsgüte wird für die mittleren Subjektivbeurteilungen durch lineare Modellansätze erzielt ( $R^2 = 0,94-0,97$ ). Erste Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten werden in den Geradeausbremsungen aus 80-120 km/h im Bereich zwischen  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7-8^\circ/\text{s}$  beobachtet. Das Kurshaltevermögen ist in Geradeausfahrt mit 80 km/h zudem unabhängig davon, ob die Störungen für den Fahrer unerwartet oder an die Bremsbetätigung gekoppelt aufgeschaltet werden. Im Gegensatz zu den Geradeausbremsungen tritt in Kurvenbremsung aus 80 km/h bereits in ungestörter Fahrt ein deutlich eingeschränktes Kurshaltevermögen auf, in dessen Folge ca. 26 % der Fahrer geringe Fahrstreifenverletzungen ohne Pylonenkontakte erzielen. Erste signifikante Einschränkungen des objektiven Kurshaltevermögens in Kurvenbremsung im Vergleich zur ungestörten Fahrt können erst ab ca.  $\Delta\dot{\psi}_{\text{ref},\max} = 10^\circ/\text{s}$  nachgewiesen werden.

In der Fahrsimulatorstudie wird im Vergleich zur Realstudie bei identischen Geradeausbremsungen aus 120 km/h ab ca.  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 6^\circ/\text{s}$  eine um mehr als 50 % höhere mittlere Kursabweichung erzielt. Die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie sind somit nicht eingeschränkt auf die Beherrschbarkeit des realen Testfahrzeugs übertragbar. Bei erhöhter Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 180 km/h treten im Vergleich zu Geradeausbremsungen aus 120 km/h (Fahrsimulator) eine um ca. 36 % höhere Kursabweichung und eine um ca. 34 % verschlechterte Subjektivbeurteilung von identischen Open-Loop-Gierstörungen auf. Bereits ab  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 5^\circ/\text{s}$  werden in Geradeausbremsung aus 180 km/h erste Pylonenkontakte beobachtet. Bei Verwendung der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  als objektivem Bewegungskennwert ist die fahrgeschwindigkeitsabhängige Differenz der Beobachtungsgrößen geringer ausgeprägt und im Bereich mittlerer Störaufschaltungen bis  $\Delta a_{y,\max} = 3,5 \text{ m/s}^2$  sogar nicht nach-

weisbar. Erste Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten treten am Fahrsimulator bei ähnlichen Querschleunigungsabweichungen von  $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 3 \text{ m/s}^2$  (120 km/h) und  $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 2,7 \text{ m/s}^2$  (180 km/h) auf. In der Realstudie werden in Geradeausbremsung aus 120 km/h erste Pylonenkontakte hingegen erst bei  $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 3,9 \text{ m/s}^2$  erzielt.

Im Vergleich der subjektiven und objektiven Bewertungskriterien erscheint das objektive Kurshaltevermögen trotz der über die Versuchsdauer nachweisbaren Trainingseffekte in der maximalen Kursabweichung in dieser Studie als das geeignetere und im Vergleich zur Subjektivbeurteilung entgegen der Erwartung konservativere Beurteilungskriterium für die erzielte Fahrsicherheit. Aufgetretene Pylonenkontakte werden in der Realstudie nur zu ca. 53 % als subjektiv „gefährlich“ eingestuft. Erfolgt eine objektiv sichere Fahrt (kein Pylonenkontakt) resultiert in der Realstudie in 96 % der Fälle auch eine subjektive Einschätzung als „beherrschbar“.

In den durchgeführten Ausweichtests sind die auftretenden maximalen Closed-Loop-Schwimmwinkel der Einzelfahrten am besten dazu geeignet, den Zusammenhang des Fahrzeugverhaltens mit der subjektive Beherrschbarkeit zu erklären. Es besteht ein linearer Zusammenhang der mittleren Subjektivbeurteilung über den auftretenden Schwimmwinkeln im Schwerpunkt und an der Hinterachse. Die Normalfahrer zeigen in den Ausweichtests zudem ein weitestgehend vom Fahrzeugverhalten unabhängiges Lenkverhalten. Ein korrelativer Zusammenhang der Lenkarbeit mit dem Mitlenkfaktor der Hinterachse ist nicht nachweisbar ( $R_P = -0,01$ ). Die Intensität der Lenkeingaben ist neben dem variierten Mitlenkfaktor der Hinterachse jedoch ausschlaggebend dafür, ob hohe HA- und SP-Schwimmwinkel erzielt werden. Im Bereich geringer HA-Schwimmwinkel von  $\beta_{HA,\max} < 5^\circ$  bzw. geringer SP-Schwimmwinkel von  $\beta_{SP,\max} < 3,7^\circ$  treten keine Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase auf, allerdings erfolgt in ca. 30 % der Fälle eine Kollision mit dem Hindernis. Im Bereich zwischen  $\beta_{HA,\max} = 5\text{-}6^\circ$  bzw.  $\beta_{SP,\max} = 3,7\text{-}4,6^\circ$  werden in 10 % der Fahrten erste Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase beobachtet. Bei maximalen HA-Schwimmwinkeln von  $\beta_{HA,\max} > 8^\circ$  bzw. SP-Schwimmwinkeln von  $\beta_{SP,\max} > 6,5^\circ$  wird das Fahrzeug schließlich in ca. 43 % der Ausweichtests nicht mehr korrekt innerhalb der Fahrgasse stabilisiert.

## 6 Ermittlung von Akzeptanzgrenzen und Ausblick

Das erklärte Ziel dieser Arbeit besteht in der Ermittlung von Akzeptanzgrenzen für die objektiven Bewegungskennwerte des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests. Auf Basis des ermittelten objektiven Kurshaltevermögens in Kapitel 5 wird daher eine Methode vorgestellt, die das objektive Kurshaltevermögen der Normalfahrer mit der erzielten Fahrsicherheit verknüpft und daraus nachvollziehbare Akzeptanzgrenzen für die objektiven Bewegungskenngrößen des Fahrzeugverhaltens ableitet. Die Ergebnisse dieser Diskussion werden anschließend mit den Erkenntnissen aus bisherigen Untersuchungen von Lenksystemstörungen verglichen und in ihrer Bedeutung für die Absicherung des Fahrzeugverhaltens diskutiert.

### 6.1 Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen in Bremsmanövern

#### 6.1.1 Methodik

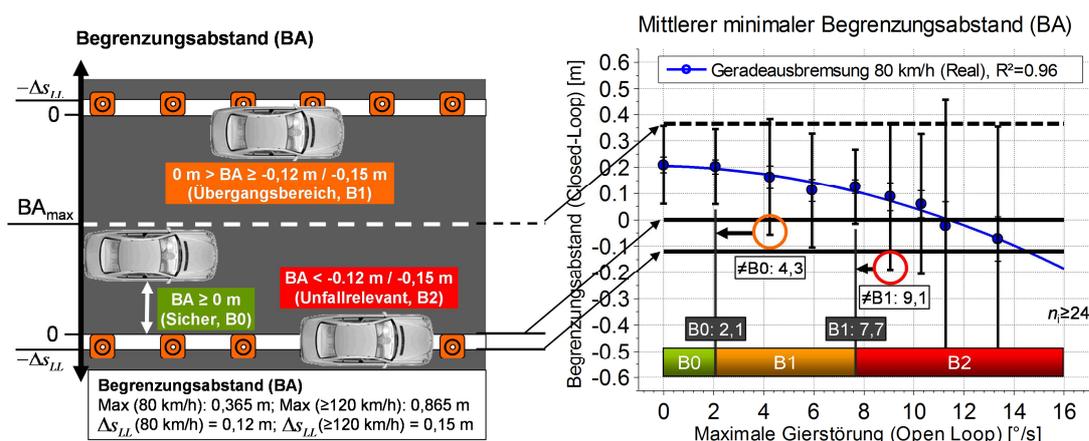


Bild 6.1 Bewertungsmethodik zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen in Bremsmanövern

Unter dem Begriff „Fahrsicherheit“ wird in dieser Arbeit eine sichere Kursführung der Normalfahrer innerhalb der definierten Fahrgassen verstanden. Schafft es der Fahrer, sein Fahrzeug innerhalb der Pylonen-begrenzten Fahrgasse zu stabilisieren, kann in jedem Fall von einem sicheren Fahrerergebnis ausgegangen werden. Reale Fahrstreifen sind nach der deutschen Richtlinie für Straßenmarkierungen RMS-1<sup>438</sup> in der Regel durch eine Leitlinie vom Gegenverkehr getrennt und nach außen hin durch eine Randlinie begrenzt. Sowohl Leitlinie als auch Randlinie werden mindestens als „Schmalstrich“ ausgeführt und besitzen auf Autobahnen eine Breite von mindestens  $\Delta s_{LL} = 15$  cm und auf anderen Straßen eine Breite von mindestens  $\Delta s_{LL} = 12$  cm. Verlässt der Fahrer infolge

<sup>438</sup> FGSV (1993): Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS-1)

einer Hinterachs-Störaufschaltung den Fahrstreifen, bietet sich nach Bild 6.1 eine Unterteilung der Fahrstreifenverletzungen in drei Kategorien an:

- B0: Stabilisierung innerhalb des Fahrstreifens (sicheres Fahrerergebnis)
- B1: Fahrstreifenverletzung ohne Überfahren der Begrenzungslinie
- B2: Fahrstreifenverletzung mit Überfahren der Begrenzungslinie.

Bei geringen Fahrstreifenverletzungen (B1) innerhalb der Breite der Begrenzungslinie ist ein Verunfallungsrisiko noch als niedrig einzuschätzen. Bei Überdeckungen mit dem Gegenverkehr oder einem Abkommen von der Fahrbahn durch ein Überfahren der Begrenzungslinie (B2) wird in dieser Arbeit hingegen von einem unfallrelevanten Ereignis mit möglichen Sach- und Personenschäden ausgegangen. Zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen für die objektiven Bewegungskennwerte wird ein statistisches Maß benötigt, das eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit von unfallrelevanten Fahrstreifenverletzungen durch Normalfahrer treffen kann. Der Anspruch an die Absicherung des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern ist idealerweise die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch alle Normalfahrer. Der Nachweis eines Beherrschbarkeitsanteils von 100 % kann statistisch jedoch nicht sinnvoll erbracht werden. Zudem erscheint es unwahrscheinlich, dass ein Fahrzeug in Bremsmanövern – unabhängig von der Konstitution und der Fahrfertigkeit eines Fahrers – durch alle Führerscheinbesitzer auch ohne Hinterachs-Störeingriffe jederzeit sicher geführt wird. Nach Bild 6.1 (rechts) wird zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen der 95 %-Erwartungsbereich des erzielten Begrenzungsabstands über der maximalen Open-Loop-Gierstörung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  (bzw.  $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$  in Kurvenbremsung) und der maximalen Open-Loop-Querbesehleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  verwendet. Der 95 %-Erwartungsbereich zeigt an, in welchem Bereich der Begrenzungsabstand einer weiteren Einzelfahrt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegen wird. Da für das Kurshaltevermögen nur Abweichungen des Begrenzungsabstands in Richtung zu Fahrstreifenverletzungen relevant sind, entspricht der 95 %-Erwartungsbereich einem Intervall mit nur 2,5 % statistischer Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines kritischeren Begrenzungsabstands. Die Verwendung der 95 %-Erwartungsbereiche zur Ableitung von objektiven Akzeptanzgrenzen erscheint also als ein geeignetes und – im Vergleich zu den in bekannten Studien verwendeten 85 %-Quantilen<sup>439,440</sup> der subjektiven Störbeurteilung – konservatives Kriterium für eine Absicherungsaussage des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern.

---

<sup>439</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

<sup>440</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

Die gesuchten Akzeptanzgrenzen auf dem Beherrschbarkeitsniveau B0 oder B1 ergeben sich nach Bild 6.1 (rechts) aus denjenigen Störvarianten, in denen keine Überschneidung der Erwartungsbereiche mit der Innenkante der Begrenzungslinie (Niveau B0) oder der Außenkante der Begrenzungslinie (Niveau B1) auftritt. Wird in der jeweils rechts benachbarten nächst höheren Störvariante eine kritischer eingestufte Überschneidung des Erwartungsbereichs mit der Begrenzungslinie erzielt, so wird aufgrund der beabsichtigten konservativen Aussage für die erzielte Fahrsicherheit das jeweils kritischere Beherrschbarkeitsniveau (B1 oder B2) für die nicht untersuchten Störausprägungen im Zwischenraum zwischen den beiden untersuchten Störvarianten angenommen, siehe am Beispiel der Geradeausbremsung aus 80 km/h aus Bild 6.1 (rechts). Das optimale Beherrschbarkeitsniveau B0 kann in Geradeausbremsung aus 80 km/h nur bis hin zu Open-Loop-Gierstörungen  $\Delta\dot{\psi}_{\max} \leq 2,1^\circ$  angenommen werden, da ab  $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 4,3^\circ/\text{s}$  bereits eine Überschneidung des 95 %-Erwartungsbereichs mit der Begrenzungslinie auftritt. Das Beherrschbarkeitsniveau B1 kann wiederum bis  $\Delta\dot{\psi}_{\max} \leq 7,7^\circ/\text{s}$  angenommen werden. Ab einer Open-Loop-Gierstörung von  $9,1^\circ/\text{s}$  überschreitet der Vertrauensbereich die Begrenzungslinie und es wird von unfallrelevanten Einschränkungen des Kurshaltevermögens ausgegangen (Niveau B2). Auf Basis der 95 %-Erwartungsbereiche für die subjektive Beherrschbarkeit können ebenfalls subjektive Akzeptanzgrenzen ermittelt werden, siehe Darstellungen in Anhang 8.2. Das resultierende subjektive Beherrschbarkeitsniveau B0 liegt in dieser Betrachtung vor, wenn der Erwartungsbereich der Subjektivbeurteilung keine Bewertungen der Kategorie „gefährlich“ enthält ( $B_{S,i} < 7$ ).

Die Erwartungsbereiche des Begrenzungsabstands werden auf Basis der ermittelten Verteilungen der Begrenzungsabstände in den jeweiligen Testvarianten bestimmt. Von den sechs Einzelverteilungen der Begrenzungsabstände derjenigen Störaufschaltungen, für die weiter unten eine konkrete Beherrschbarkeitsgrenze auf dem B1-Niveau bestimmt wird, kann in Geradeausbremsung aus 80 km/h (Realstudie), Geradeausbremsung aus 120 km/h ( $\dot{\delta}_h = 20^\circ/\text{s}$ , Fahrsimulatorstudie) und Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulatorstudie) analog der Prüfung in Kapitel 4.4.3 eine Normalverteilung der Begrenzungsabstände angenommen werden. Unter Verwendung der parameterbasierten Vertrauensbereiche sind in diesen Bremsmanövern somit statistisch belastbare Grenzen zu erwarten. Um die ermittelten Akzeptanzgrenzen auf Basis von statistisch ungenauer prüfbar, da durch einzelne Ausreißer nicht nachweislich normalverteilten Begrenzungsabstände in Kurvenbremsung aus 80 km/h (Realstudie), Geradeausbremsung aus 120 km/h (Realstudie) und Geradeausbremsung aus 120 km/h ( $\dot{\delta}_h = 4^\circ/\text{s}$ , Fahrsimulatorstudie) abzusichern, wird die Beherrschbarkeit der Störaufschaltungen zusätzlich über einen Binomialansatz bewertet. Dieser zweite Bestandteil zur Ableitung von Akzep-

tanzgrenzen ist an die Bewertung der Kontrollierbarkeit eines Störereignisses nach den Vorgaben aus ISO 26262-3<sup>441</sup> zur Einstufung von Störungen des Fahrverhaltens durch ein mögliches Falschverhalten von elektronischen Fahrzeugkomponenten angelehnt. Die Normschrift zur Absicherung der funktionalen Sicherheit fordert hierbei eine Einstufung der Störungen in

- Fehlerschwere (Severity, S1-3)
- Auftrittswahrscheinlichkeit der kritischen Fahrsituation (Exposure, E1-E4)
- und Beherrschbarkeit des Falschverhaltens (Controllability, C0-C3)

zur Ableitung der ASIL-Einstufung (QM, A, B, C, D). Die ASIL-Einstufungen beinhaltet als Ergebnis eine tolerierte Fehlerhäufigkeit für die bewertete Störung, deren Überschreitung durch geeignete Maßnahmen in der Fahrzeugentwicklung ausgeschlossen werden muss.

Die genannten Beherrschbarkeitsklassen C0-C1 sind in Probandenversuchen üblicherweise aufgrund des zu hohen benötigten Stichprobenumfangs nicht nachweisbar (C0: 100 %, C1:  $\geq 99$  %). Die Absicherung in Probandenstudien erfolgt daher in der Regel auf dem Niveau C2 ( $\geq 90$  %). Eine Absicherung der Wahrscheinlichkeit, dass mindestens 90 % der Fahrer in der Lage sind, eine Störsituation zu beherrschen, ist nach der ISO-Norm über die Prüfung der Hypothese  $p_{\text{beherrschbar}} = 0,85$  auf dem Signifikanzniveau von 95 % zulässig. Die eingesetzte Probandenanzahl in dieser Studie ist auf den Nachweis dieses Kriteriums ausgelegt ( $n = 30/\text{Variante}$ ). Als Indikator für eine durch den Fahrer nicht mehr beherrschbare Situation werden die in Real- und Fahrsimulatorstudie aufgezeichneten Pylonenkontakte verwendet. Zum Nachweis der Beherrschbarkeit auf dem C2-Niveau der funktionalen Sicherheit dürfen maximal zwei der 30 Fahrer mit einer Pylone kollidieren.

### 6.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden Methoden zur Definition von Akzeptanzgrenzen für die durchgeführten Bremsmanöver auf dem definierten Beherrschbarkeitsniveau B0-B1 (Objektiv) und C2 (ISO 26262-3) sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die Auflistung enthält ebenfalls die ermittelten Akzeptanzgrenzen auf Basis der Erwartungsbereiche für die Subjektivbeurteilung (Spalte „Subjektiv“). In den durchgeführten Geradeausbremsungen aus 80 und 120 km/h der Realstudie werden auf dem Beherrschbarkeitsniveau B1 Akzeptanzgrenzen für eine Open-Loop-Gierstörung von ca.  $\Delta\dot{\psi}_{\text{max,Obj,B1}} = 8^\circ/\text{s}$  ermittelt (7,7°/s und 7,9°/s). Die zugehörigen Open-Loop-Querbeschleunigungen liegen bei

---

<sup>441</sup> ISO 26262-3 (2011): Functional safety – Part 3: Concept phase

$\Delta a_{y,\max,Obj,B1} = 3,2-3,9 \text{ m/s}^2$ . Im Bereich dieser Störausprägungen kann ebenfalls noch die Annahme einer Beherrschbarkeit der Bremsmanöver durch Normalfahrer auf dem C2 Niveau nach ISO 26262-3 angenommen werden. Die auf Basis der auftretenden Kollisionsereignisse abgeleiteten Akzeptanzgrenzen auf dem C2-Niveau betragen im Vergleich höhere Grenzwerte von  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Fusi,C2} = 9,1-9,8^\circ/\text{s}$ .

Tabelle 6.1 Übersicht der ermittelten Akzeptanzgrenzen für die maximale Gierstörung und Querschleunigungsabweichung in den durchgeführten Bremsmanövern

| Akzeptanzgrenzen |                                      | Objektiv                         |                 |                          |                            | ISO 26262                        |                          | Subjektiv                        |                          |
|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Realstudie       | Akzeptanzkriterium:                  | CI (95 %) Begrenzungsabstand     |                 |                          |                            | p(Pylonenkontakt)                |                          | CI (95%) Subj.                   |                          |
|                  | Obj. Kennwert:                       | $\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$ |                 | $\Delta a_{y,\max}$      |                            | $\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$ | $\Delta a_{y,\max}$      | $\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$ | $\Delta a_{y,\max}$      |
|                  | Beherrschbarkeitsniveau:             | B0                               | B1              | B0                       | B1                         | C2 (Fusi)                        | C2 (Fusi)                | B0                               | B0                       |
|                  | Geradeausbremsung aus 80 km/h (47s)  | $\leq 2,1\%$                     | $\leq 7,7\%$    | $\leq 0,9 \text{ m/s}^2$ | $\leq 3,2 \text{ m/s}^2$   | $\leq 9,1\%$                     | $\leq 3,7 \text{ m/s}^2$ | $\leq 9,1\%$                     | $\leq 3,7 \text{ m/s}^2$ |
|                  | Kurvenbremsung aus 80 km/h (47s)     | -                                | $(\leq 10,2\%)$ | -                        | $(\leq 3,1 \text{ m/s}^2)$ | $\leq 6,4\%$                     | $\leq 2,2 \text{ m/s}^2$ | $\leq 10,2\%$                    | $\leq 3,1 \text{ m/s}^2$ |
|                  | Geradeausbremsung aus 120 km/h (47s) | $\leq 5,8\%$                     | $\leq 7,9\%$    | $\leq 2,9 \text{ m/s}^2$ | $\leq 3,9 \text{ m/s}^2$   | $\leq 9,8\%$                     | $\leq 5,0 \text{ m/s}^2$ | $\leq 5,8\%$                     | $\leq 2,9 \text{ m/s}^2$ |
| Fahr Simulator   | Akzeptanzkriterium:                  | CI (95 %) Begrenzungsabstand     |                 |                          |                            | p(Pylonenkontakt)                |                          | CI (95%) Subj.                   |                          |
|                  | Obj. Kennwert:                       | $\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$ |                 | $\Delta a_{y,\max}$      |                            | $\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$ | $\Delta a_{y,\max}$      | $\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$ | $\Delta a_{y,\max}$      |
|                  | Beherrschbarkeitsniveau:             | B0                               | B1              | B0                       | B1                         | C2 (Fusi)                        | C2 (Fusi)                | B0                               | B0                       |
|                  | Geradeausbremsung 120 km/h (47s)     | $\leq 7,1\%$                     | $\leq 7,1\%$    | $\leq 3,0 \text{ m/s}^2$ | $\leq 3,0 \text{ m/s}^2$   | $\leq 7,1\%$                     | $\leq 3,0 \text{ m/s}^2$ | $\leq 6,1\%$                     | $\leq 2,6 \text{ m/s}^2$ |
|                  | Geradeausbremsung 120 km/h (207s)    | $\leq 7,0\%$                     | $\leq 7,0\%$    | $\leq 2,9 \text{ m/s}^2$ | $\leq 2,9 \text{ m/s}^2$   | $\leq 7,0\%$                     | $\leq 2,9 \text{ m/s}^2$ | $\leq 7,0\%$                     | $\leq 2,9 \text{ m/s}^2$ |
|                  | Geradeausbremsung aus 180 km/h (37s) | $\leq 4,0\%$                     | $\leq 6,0\%$    | $\leq 2,2 \text{ m/s}^2$ | $\leq 3,2 \text{ m/s}^2$   | $\leq 6,0\%$                     | $\leq 3,2 \text{ m/s}^2$ | $\leq 2,0\%$                     | $\leq 1,1 \text{ m/s}^2$ |

Für die Kurvenbremsung aus 80 km/h kann auf Basis der Vertrauensbereiche für den Begrenzungsabstand hingegen keine eindeutige Akzeptanzgrenze abgeleitet werden, da das Kurshaltevermögen bereits in ungestörter Kurvenfahrt nur ein B2-Niveau aufweist, siehe Anhang 8.1. Als Akzeptanzgrenze auf dem B1-Niveau wird daher diejenige Störausprägung verwendet, für die noch keine signifikante Abweichung des objektiven Kurshaltevermögens von der ungestörten Kurvenbremsung nachgewiesen werden kann ( $\Delta \dot{\psi}_{ref,\max,Obj,B1} = 10,2^\circ/\text{s}$ ). Zudem gilt für Kurvenbremsungen mit dieser Störausprägung eine subjektive Beherrschbarkeit auf dem B0-Niveau, d.h. der 95 %-Erwartungsbereich der Subjektivbeurteilung überschreitet nicht die Akzeptanzgrenze hin zu einer Einstufung als „gefährlich“. Eine Beherrschbarkeit der Kurvenbremsungen auf dem C2-Niveau nach ISO 26262-3 kann anhand der aufgetretenen Pylonenkontakte hingegen nur bis  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Fusi,C2} = 6,4^\circ/\text{s}$  angenommen werden. Die Akzeptanzgrenzen auf Basis der Subjektivbeurteilungen sind in der Realstudie für Bremsungen aus 80 km/h vergleichbar oder weniger konservativ als die objektive Einstufung über die erzielten Begrenzungsabstände. Für die Geradeausbremsungen aus 120 km/h wird mit  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Subj,B0} = 5,8^\circ/\text{s}$  wiederum eine minimal konservativere subjektive Akzeptanzgrenze erzielt, die vergleichbar mit dem objektiven B0-Beherrschbarkeitsniveau ist. Die ermittelten Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen in Geradeausbremsungen aus 120 km/h am Fahr Simulator zeigt auf dem Beherrschbarkeitsniveau B1 mit den Ergebnissen der Realstudie vergleichbare Akzeptanzgrenzen von ca.  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Obj,B1} = 7^\circ/\text{s}$ . Dabei werden zugehörige Open-

Loop-Querbeschleunigungsabweichungen von  $\Delta a_{y,\max,Obj,B1} = 2,9-3,0 \text{ m/s}^2$  erzielt. Erst bei einer Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 180 km/h wird entsprechend des bereits nachgewiesenen signifikant verschlechterten Kurshaltevermögens über identischen Gierstörungen eine Akzeptanzgrenze von  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Obj,B1} = 6^\circ/\text{s}$  ermittelt. Die Akzeptanzgrenze der Querbeschleunigungsabweichung für Geradeausbremsungen aus 180 km/h ist auf dem B1-Niveau mit  $\Delta a_{y,\max,Obj,B1} = 3,2 \text{ m/s}^2$  nach Tabelle 6.1 in etwa über der Fahrgeschwindigkeit konstant. Die abgeleiteten Akzeptanzgrenzen  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Fusi,C2}$  und  $\Delta a_{y,\max,Fusi,C2}$  für eine Annahme des C2-Niveaus nach ISO 26262-3 sind innerhalb der Fahrstudie mit den ermittelten Akzeptanzgrenzen auf B1-Niveau durchgängig identisch. Die subjektiven Akzeptanzgrenzen bewegen sich für Geradeausbremsungen aus 120 km/h ebenfalls in einem vergleichbaren Bereich ( $\Delta \dot{\psi}_{\max,Subj,B0} = 6,1-7^\circ/\text{s}$ ), während Geradeausbremsungen aus 180 km/h durch die Probanden bereits ab  $\Delta \dot{\psi}_{\max} = 4^\circ/\text{s}$  teilweise als „gefährlich“ eingestuft werden, so dass bereits ab  $4^\circ/\text{s}$  kein subjektives B0-Niveau mehr erzielt werden kann. Die subjektiven Akzeptanzgrenzen  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Subj,B0} = 2,0^\circ/\text{s}$  und  $\Delta a_{y,\max,Subj,B0} = 1,1 \text{ m/s}^2$  fallen somit bei Hochgeschwindigkeit (180 km/h) im Gegensatz deutlich konservativer als die objektiven Akzeptanzgrenzen aus.

In Summe kann durch die vorgestellte konservative Methode eine objektive Akzeptanzgrenze zur Absicherung eines objektiv für den Großteil der Normalfahrer beherrschbaren Fahrzeugverhaltens im Geschwindigkeitsbereich von 80-120 km/h zwischen ca.  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Grenze} = 7-8^\circ/\text{s}$  angegeben werden. Bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit ist nach dem verwendeten B1-Beherrschbarkeitskriterium von einer minimalen Reduzierung der tolerierbaren Giergeschwindigkeitsabweichung auf ca.  $\Delta \dot{\psi}_{\max,Grenze} = 6^\circ/\text{s}$  auszugehen, während eine konstante tolerierbare Querbeschleunigungsabweichung von ca.  $\Delta a_{y,\max,Grenze} = 3 \text{ m/s}^2$  angegeben werden kann. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Grundfahrzeugverhalten von weiteren Fahrzeugen der Klein-, Mittel- oder Oberklasse verschiedener Hersteller wird im Rahmen dieser Studie nicht untersucht und kann daher nicht belegt werden. Aufgrund der – trotz festgestellter Abweichungen der mittleren Kursabweichungen um mehr als 50 % oberhalb von  $6^\circ/\text{s}$  Gierstörung – ähnlichen Resultate für die abgeleiteten Akzeptanzgrenzen am Fahrstudie im Vergleich zu der durchgeführten Realstudie wird jedoch eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit auf weitere im Markt befindliche Fahrzeuge vermutet.

### 6.1.3 Vergleich mit bisherigen Studien

Tabelle 6.2 vergleicht die in dieser Arbeit abgeleiteten objektiven Akzeptanzgrenzen für Hinterachs-Störaufschaltungen in Bremsmanövern mit den Ergebnissen der bereits bekannten Untersuchungen zur subjektiven Akzeptanz von Störaufschaltungen durch Überlagerungslenkung (AFS)<sup>442</sup> und durch Hinterradlenkeingriffe (HSR)<sup>443</sup>.

Tabelle 6.2 Vergleich der ermittelten Akzeptanzgrenzen mit anderen Studien zu Lenksystemstörungen

| Genannte Akzeptanzgrenzen                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Fahrgeschwindigkeit:                         | 50 km/h             |                     | 80 km/h             |                     | 100 km/h            |                     | 120 km/h            |                     | 150 km/h            |                     | 180 km/h            |                     |
| Kennwert:                                    | $\Delta\psi_{\max}$ | $\Delta a_{y,\max}$ |
| Einheit:                                     | °s                  | m/s <sup>2</sup>    |
| <b>Neukum/Krüger - VDA AK 2007</b>           |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Störung durch Überlagerungslenkung (AFS)     | 4,0                 | 1,25                | -                   | -                   | 3,00                | 1,25                | -                   | -                   | 2,50                | 1,25                | -                   | -                   |
| <b>Wesp 2011</b>                             |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Störung durch Hinterradlenkeingriffe (HSR)   | -                   | -                   | -                   | -                   | 12,00               | 2,80                | -                   | -                   | 7,80                | 3,00                | -                   | -                   |
| <b>Eigene Studie (R: Real; S: Simulator)</b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Störung durch HSR in Bremsmanövern           | -                   | -                   | 7,7 <sup>R</sup>    | 3,2 <sup>R</sup>    | -                   | -                   | 7,9 <sup>R</sup>    | 3,9 <sup>R</sup>    | -                   | -                   | 6,0 <sup>S</sup>    | 3,2 <sup>S</sup>    |

Beide der genannten Studien nutzen das 85 %-Quantil der subjektiven Störbeurteilung für die Ableitung von Akzeptanzgrenzen. Die Ergebnisse der untersuchten AFS-Störungen sind erwartungsgemäß auch nach den Ergebnissen dieser Studie nicht auf die Beherrschbarkeit von Hinterachs-Störaufschaltungen in Bremsmanövern übertragbar, siehe Vergleich der einzelnen subjektiven Beurteilungen bei vergleichbaren Fahrgeschwindigkeiten aus Bild 6.2 (links). Die Ursache besteht in den bereits in Kapitel 2.2.1 diskutierten schreckhaften Reaktionen von Fahrern auf spürbare Störungen in der Vorderachs-Lenkung, die zu einer Überkompensation der auftretenden Störungen durch starke Lenkradkorrekturen führen.<sup>444</sup>

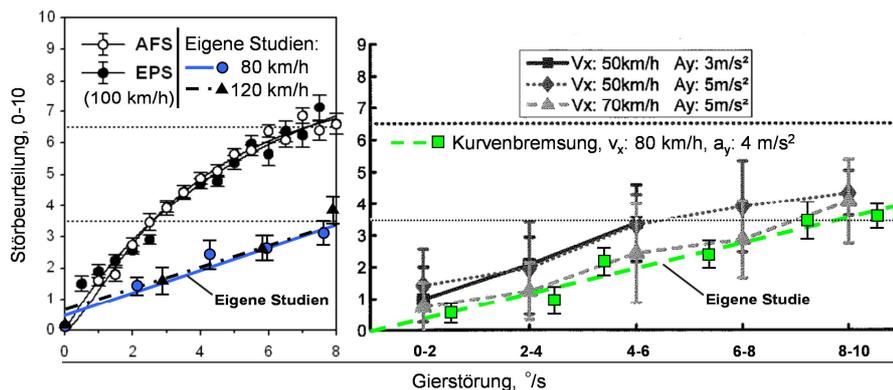


Bild 6.2 Vergleich der Störbeurteilungen in Geradeaus- und Kurvenbremsung mit den bisherigen Studien zur subjektiven Beherrschbarkeit von Lenksystemstörungen bei Neukum et al.<sup>445</sup> und Schmidt et al.<sup>446</sup>

<sup>442</sup> Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 11

<sup>443</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

<sup>444</sup> Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

<sup>445</sup> Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions, S. 374

Die subjektive Störbeurteilung von Fahrwerkeingriffen, die nicht in die Lenkung des Fahrers eingreifen, scheint nach dem Vergleich der mittleren Subjektivurteile in Kurvenbremsung aus 80 km/h mit der Beurteilung von Vertikaldynamikstörungen aus Bild 6.2 (rechts) annähernd vergleichbar zu sein. Dementsprechend zeigt auch der Vergleich mit den von Wesp für Hinterradaufschaltungen ohne Bremsingriffe ermittelten subjektiven Akzeptanzgrenzen ähnlichere Ergebnisse:<sup>447</sup> In den durchgeführten Geradeausbremsung aus 80 km/h und 120 km/h (eigene Studie) würden nach einem zu Wesp identischen Subjektivkriterium (85 %-Quantil der Subjektivbeurteilung, d.h. > 15 % Beurteilungen als „gefährlich“) auch in dieser Studie deutlich höhere und weniger konservative subjektive Akzeptanzgrenzen für die Open-Loop-Gierstörungen von  $\Delta\dot{\psi}_{\max,Subj,85\%} = 11,3^\circ/s$  (80 km/h) und  $12,8^\circ/s$  (120 km/h) sowie  $\Delta a_{y,\max,Subj,85\%} = 4,3 \text{ m/s}^2$  (80 km/h) und  $6,4 \text{ m/s}^2$  (120 km/h) ermittelt. Bei Störaufschaltungen in Fahrten mit 100 km/h wird durch Wesp eine vergleichbare Akzeptanzgrenze von  $\Delta\dot{\psi}_{\max,Subj,85\%} = 12,0^\circ/s$  angegeben. Die dabei auftretende Querbeschleunigungsabweichung  $\Delta a_{y,\max}$  ist bei einer vergleichbaren Gierstörung jedoch deutlich größer als die Querbeschleunigungen des in dieser Arbeit eingesetzten Versuchsfahrzeugs. Dies spricht für ein deutlich voneinander abweichendes Fahrverhalten der verwendeten Testfahrzeuge und gleichzeitig für eine bessere Übertragbarkeit der subjektiven Beherrschbarkeit zwischen verschiedenen Fahrzeugen anhand der Giergeschwindigkeitsabweichung  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  als objektivem Bewegungskennwert. Bei Störaufschaltung in Fahrten mit 150 km/h werden von Wesp vergleichbare Giergeschwindigkeits- und Querbeschleunigungsabweichungen als subjektive Akzeptanzgrenzen genannt ( $\Delta\dot{\psi}_{\max,Subj,85\%} = 7,8^\circ/s$ ,  $\Delta a_{y,\max,Subj,85\%} = 3,0 \text{ m/s}^2$ ). Eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit wirkt sich in den Untersuchungen von Wesp also ebenfalls deutlich auf eine Erhöhung der Störbeurteilung von Normalfahrern aus. In den Geradeausbremsungen aus 180 km/h werden auch in dieser Arbeit selbst auf Basis des 85 %-Quantils der Subjektivbeurteilung im Vergleich mit den objektiven Akzeptanzgrenzen konservative  $\Delta\dot{\psi}_{\max,Subj,85\%} = 5^\circ/s$  und  $\Delta a_{y,\max,Subj,85\%} = 2,7 \text{ m/s}^2$  erzielt. Im niedrigen bis mittleren Fahrgeschwindigkeitsbereich scheint die in dieser Arbeit vorgestellte Ermittlung von Akzeptanzgrenzen auf Basis der 95 %-Vertrauensbereiche des Begrenzungsabstands und der C2 Beherrschbarkeit nach ISO 26262-3 im Vergleich mit der bekannten Studie zu Hinterrad-Störaufschaltungen das deutlich konservativere Kriterium zu sein. Erst ab Fahrgeschwindigkeiten  $\geq 150 \text{ km/h}$  zeigt auch das subjektive Kriterium der 85 %-Quantilen einen direkteren Bezug zu der erzielten objektiven Beherrschbarkeit.

<sup>446</sup> Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 80

<sup>447</sup> Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

## 6.2 Akzeptanzgrenzen für Schwimmwinkel im Ausweichtest

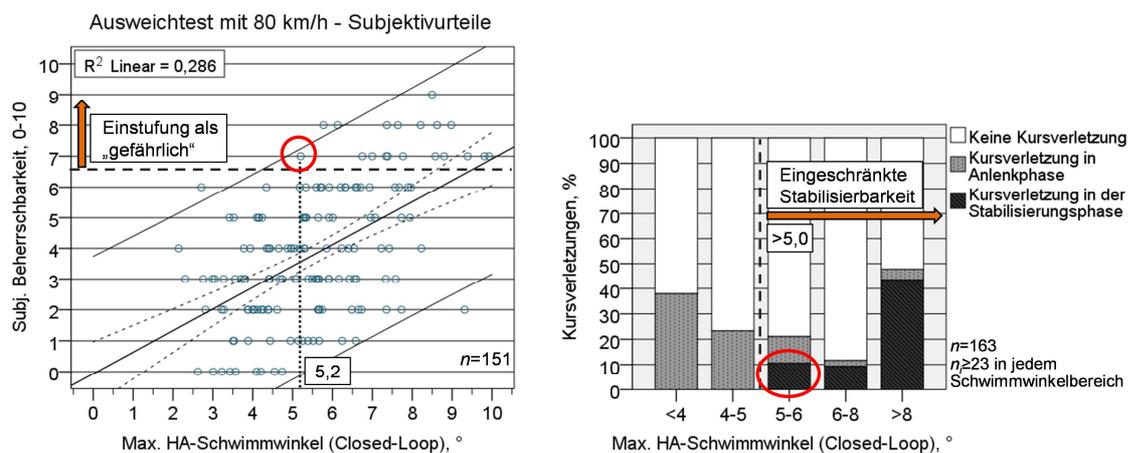


Bild 6.3 Subjektive und objektive Akzeptanzgrenze des HA-Schwimmwinkels in Ausweichtests mit 80 km/h

Im Gegensatz zu den untersuchten Hinterachs-Störaufschaltungen in Bremsmanövern erfolgt in Ausweichtests keine Darstellung der erzielten Beherrschbarkeit oder der erzielten Subjekturteile über festen Open-Loop-Bewegungskennwerten. Das Kurshaltevermögen und die subjektive Beherrschbarkeit zeigen stattdessen einen stärkeren und plausiblen Zusammenhang mit den im Closed-Loop auftretenden maximalen Schwimmwinkeln. Um statistisch belastbare Aussagen für eine mögliche Akzeptanzgrenze der Schwimmwinkel ableiten zu können, wurden die Anteile der aufgetretenen Kursverletzungen in Kapitel 5.5 über fünf annähernd gleichverteilte Kategorien der erzielten maximalen Closed-Loop-Hinterachs-Schwimmwinkel aufgetragen, siehe Bild 6.3 (rechts). Während Kursverletzungen in der Anlenkphase auf zögerliche Lenkeingaben des Fahrers bzw. einer zu geringen Reaktion des Fahrzeugs auf die Lenkbefehle des Fahrers zurückzuführen sind, ist aus dieser Darstellung ersichtlich, dass erste Fahrer ab Schwimmwinkeln von  $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$  erstmals nicht mehr in der Lage sind, das Fahrzeug nach dem Ausweichvorgang korrekt innerhalb des vorgegebenen Fahrstreifens zu stabilisieren. Der Kausalzusammenhang zwischen einer eingeschränkten Kurshaltung und den auftretenden HA-Schwimmwinkeln kann jedoch nur vermutet werden. Daher wird zusätzlich ein Vergleich mit ersten Einschränkungen der subjektiven Beherrschbarkeit gewählt: Erste Subjekturteile der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens in der Kategorie „gefährlich“ treten hierbei nach Bild 6.3 (links) ebenfalls ab ca.  $\beta_{HA,max} = 5,2^\circ$  auf und liegen zwischen  $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$  bei einem mit den Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase vergleichbaren Anteil von ca. 10 %. In dieser Studie kann also auf Basis der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit eine Akzeptanzgrenze von ca.  $\beta_{HA,max,Grenze} \leq 5^\circ$  vorgeschlagen werden, innerhalb der das Fahrzeug durch alle Fahrer sowohl subjektiv als auch objektiv sicher zu stabilisieren ist. Diese Akzeptanzgrenze

entspricht nach Kapitel 5.5.2 Schwimmwinkeln im Fzg.-Schwerpunkt von  $\beta_{SP,max,Grenze} \leq 3,7^\circ$ . Dieser Wert liegt in einem Bereich, der auch von Jürgensohn<sup>448</sup> als noch nicht „unangenehm“ eingestuft wird ( $< 4^\circ$ ) und unterhalb der genannten Grenze von  $\beta_{SP,max} = 5^\circ$ , ab der nach Keinert<sup>449</sup> ein „kritisch zu beherrschendes“ Fahrverhalten vorliegt.

Bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Basis des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt ist aufgrund des in Kapitel 2.2.2 diskutierten, nicht eindeutigen Zusammenhangs zum Fahrzustand jedoch besondere Vorsicht geboten. Auch die Übertragbarkeit der ermittelten Akzeptanzgrenze für den HA-Schwimmwinkel auf andere Fahrzeuge und abweichende Fahrgeschwindigkeiten in Ausweichtests wird in dieser Arbeit nicht untersucht und kann somit auf Basis der gewählten Stichprobe bei 80 km/h zunächst nicht angenommen werden.

### 6.3 Bedeutung der Ergebnisse und Ausblick

Die ermittelten Akzeptanzgrenzen für die Bewegungskenngrößen des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern infolge von Hinterachs-Störaufschaltungen repräsentieren den Bereich einer nachgewiesenen objektiv sicheren Kursführbarkeit des Fahrzeugs durch Normalfahrer. Hieraus ergibt sich eine Relevanz für die Absicherungsumfänge des Grundfahrzeugverhaltens in allen Testverfahren, die das Fahrzeugverhalten objektiv auf Basis von Giergeschwindigkeits- oder Querbeschleunigungsabweichungen im Vergleich zu einem stationären Ausgangszustand bewerten. Dies sind insbesondere die standardisierten Testverfahren

- Geradeausbremsung und  $\mu$ -Split Bremsung (ISO 14512)
- Kurvenbremsung (ISO 7975) und Lastwechsel in der Kurve (ISO 9816).

Unter der Annahme einer Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den durchgeführten Geradeausbremsungen aus 80-180 km/h und Kurvenbremsungen aus 80 km/h auf die Beherrschbarkeit des Grundfahrzeugverhaltens kann das Fahrverhalten eines Fahrzeugs auf Basis der ermittelten Akzeptanzgrenzen auch in standardisierten Open-Loop-Tests ohne Fahrereinfluss abgesichert werden. Als maximal tolerierbare Werte für die maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichungen können  $\Delta\dot{\psi}_{max,Grenze} = 7-8^\circ/s$  (80-120 km/h) und  $\Delta\dot{\psi}_{max,Grenze} = 6^\circ/s$  (bis 180 km/h) empfohlen werden. Die maximale Querbeschleunigungsabweichung sollte ca.  $\Delta a_{y,Grenze} = 3m/s^2$  nicht überschreiten. Aus der Literatur ist bekannt, dass ein Teil der am Markt befindlichen Fahrzeuge einzelner Fahrzeughersteller deutlich höhere Giergeschwindigkeitsabweichungen aufweisen ( $\geq$

---

<sup>448</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 14

10°/s), als zur Gewährleistung eines objektiv sicheren Kurshaltevermögens durch Normalfahrer in dieser Arbeit empfohlen werden können.<sup>450</sup> Hier kann ein weiteres Potential zur Verbesserung der Fahrsicherheit durch Berücksichtigung der vorgestellten Akzeptanzgrenzen vermutet werden. Speziell in Kurvenbremsung kann durch eine optimierte Bremskraftverteilung das in die Kurve eindrehende Moment und somit auch die Giergeschwindigkeitsabweichung theoretisch vollständig vermieden werden, siehe Ergebnisse von Opelka.<sup>451</sup> In anderen Testmanövern, z.B. der  $\mu$ -Split Bremsung, besteht hingegen ein Zielkonflikt zwischen der gewünschten Längsverzögerung und dem auftretenden Giermoment infolge der Kraftdifferenz auf der  $\mu$ -high und  $\mu$ -low Seite. Das Ziel neuer Fahrwerksentwicklungen ist hierbei die Erhöhung der „Sicherheitsreserve“ bei einer gleichzeitigen Verbesserung der Fahrperformance, z.B. durch den Einsatz einer Überlagerungslenkung.<sup>452</sup> Hier können die ermittelten Akzeptanzgrenzen eingesetzt werden, um das fahrdynamische Potential unter Einhaltung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch Normalfahrer bis hin zu der unter dieser Randbedingung maximal erzielbaren Fahrperformance zu erhöhen und hierdurch ebenfalls die Fahrsicherheit des Fahrzeugs zu erhöhen. Eine absolute Übertragbarkeit der nachgewiesenen Grenzen des objektiven Kurshaltevermögens in Abhängigkeit der objektiven Fahreigenschaften auf andere Fahrzeuge wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht belegt. Eine sinnvolle Erweiterung dieser Arbeit stellt also die Untersuchung von Giergeschwindigkeits- und Querschleunigungsabweichungen für verschiedene Fahrzeugtypen der Kompakt-, Mittel- und Oberklasse oder auch SUVs nach der vorgestellten Bewertungsmethodik dar. Als Ergebnis dieser erweiterten Untersuchung könnte die Allgemeingültigkeit der beschriebenen Zusammenhänge des objektiven Fahrzeugverhaltens im Open-Loop mit der Beherrschbarkeit durch Normalfahrer im Closed-Loop weiter in Richtung einer allgemeingültigen Aussage präzisiert werden.

Die Betrachtung des objektiven Kurshaltevermögens in Ausweichtests belegt exemplarisch, dass auf Basis einer objektiven Betrachtung der erzielten Fahrsicherheit auch in dynamischen Lenkmanövern nachvollziehbare Akzeptanzgrenzen für die im Closed-Loop auftretenden maximalen Schwimmwinkel abgeleitet werden können. Diese Grenzwerte können für die Auslegung von elektronischen Fahrwerksregelsystemen (z.B. ESP, AFS oder HSR) verwendet werden. Hierzu wird jedoch eine Erweiterung dieser Stichprobe auf die Beherrschbarkeit von Ausweichtests im höheren Geschwindigkeitsbereich (> 80 km/h) und von anderen Fahrzeugtypen empfohlen, um den ermittelten Anhaltswert von  $\beta_{HA,max,Grenze} = 5^\circ$  zu verifizieren.

---

<sup>449</sup> Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

<sup>450</sup> Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 609

<sup>451</sup> Opelka (2011): Simulationsbasierte Optimierung von ESP-Eingriffen, S. 108f

<sup>452</sup> Thies et al. (2009): Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb

## 7 Zusammenfassung

Die Beschreibung des Fahrzeugverhaltens durch charakteristische Bewegungskennwerte in standardisierten Testmanövern entspricht heute dem Stand der Technik bei den OEMs. Für eine vollständige Absicherungsaussage werden jedoch zusätzlich objektive Akzeptanzgrenzen dieser Bewegungskennwerte benötigt. Die bekannten Ansätze zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen basieren ausschließlich auf der Subjektivbeurteilung durch Experten oder Normalfahrer und können somit keinen objektiven Beleg der sicheren Kursführbarkeit eines Fahrzeugs durch Normalfahrer erbringen. In dieser Arbeit werden das objektive Kursführungsvermögen von Normalfahrern in Brems- und Ausweichtests untersucht und auf Basis von objektiven Beurteilungskriterien Akzeptanzgrenzen für die charakteristischen Bewegungskennwerte ermittelt.

Die Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) eine Sekunde nach Bremsbeginn  $\Delta\dot{\psi}_{1s}$  oder ihr Maximalwert  $\Delta\dot{\psi}_{\max}$  sind nach bekannten Studien und Veröffentlichungen geeignete Kennwerte zur Beschreibung der subjektiven Beherrschbarkeit in Bremsmanövern. In Fahrmanövern mit dynamischer Lenkanregung wird überwiegend auf hohe Schwimmwinkel als Kriterium für die erzielte Fahrsicherheit verwiesen. Bekannte Grenzwertaussagen zu subjektiv tolerierbaren Gierstörungsmaxima sind uneinheitlich und betragen zwischen  $2,5^\circ/\text{s}$  und  $12^\circ/\text{s}$ . Kritische Schwimmwinkel im Schwerpunkt des Fahrzeugs werden ebenfalls uneinheitlich zwischen  $5\text{-}20^\circ$  angenommen.

In einer Real- und Fahrsimulatorstudie mit jeweils ca. 100 Normalfahrern wird das Kurshaltevermögen in Geradeausbremsungen aus  $80\text{-}180\text{ km/h}$ , Kurvenbremsung aus  $80\text{ km/h}$  und einem Ausweichtest mit  $80\text{ km/h}$  untersucht. Die charakteristische Open-Loop-Gierstörung wird in Bremsmanövern durch eine an die Bremsbetätigung gekoppelte Hinterradverstellung bis hin zu ca.  $16^\circ/\text{s}$  stimuliert. Mittels Hinterradverstellung werden in Ausweichtests zudem hohe Schwimmwinkel erzeugt. Geprüft wird, ob die Probanden das Fahrzeug innerhalb der Pylonen-markierten Fahrgassen sicher stabilisieren können. Der Kursverlauf und die Bewegungskennwerte des Fahrzeugs werden über hochpräzise Inertial- und Differential-GPS-Messtechnik erfasst.

Die mittlere Kursabweichung steigt über dem Betrag der Gierstörungen erwartungsgemäß in allen Bremsmanövern progressiv an. Entsprechend werden progressiv absinkende mittlere Abstände von der Fahrstreifenbegrenzung beobachtet. Das Kurshaltevermögen ist bei konstanter Ausgangsfahrgeschwindigkeit hingegen unabhängig vom Zeitverzug des Auftretens einer Gierstörung ab Störbeginn. Ebenso ist es für das erzielte Kurshaltevermögen in Geradeausfahrt mit  $80\text{ km/h}$  unerheblich, ob eine Gierstörung an die Bremsung gekoppelt oder für den Fahrer überraschend aufgeschaltet wird. Bei einer Erhöhung der Ausgangsfahrgeschwindigkeit von  $120$  auf  $180\text{ km/h}$  können bei identischen

Gierstörungen um ca. 36 % höhere mittlere Kursabweichungen und deutlich absinkende mittlere Begrenzungsabstände nachgewiesen werden. In Kurvenbremsung ist das Kurshaltevermögen der Probanden hingegen bereits in ungestörter Fahrt eingeschränkt und es kommt in ca. 26 % der Fahrten zu Fahrstreifenverletzungen.

Die Ableitung von Akzeptanzgrenzen erfolgt in den Bremsmanövern auf Basis der 95 %-Erwartungsbereiche des minimalen Begrenzungsabstands und der zusätzlichen Prüfung einer Beherrschbarkeitswahrscheinlichkeit  $\geq 90$  % nach ISO 26262-3. In Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80-120 km/h kann für Real- und Fahrstudie eine Akzeptanzgrenze der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung von ca.  $\Delta\dot{\psi}_{\max,Grenze} \approx 7-8^\circ/\text{s}$  abgeleitet werden. Bei Geradeausbremsung aus 180 km/h liegt die Grenze des Nachweises einer objektiv sicheren Kursführung durch die Normalfahrer bei verminderten  $\Delta\dot{\psi}_{\max,Grenze} = 6^\circ/\text{s}$ . Die ermittelte Akzeptanzgrenze für die zugehörigen Querbeschleunigungsabweichungen ist in dieser Studie mit  $\Delta a_{y,Grenze} = 3 \text{ m/s}^2$  über der Fahrgeschwindigkeit konstant. In Ausweichtests aus 80 km/h treten im Bereich von Hinterachs-Schwimmwinkeln zwischen  $5-6^\circ$  erstmals Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase auf. Eine objektiv sichere Kursführung kann daher nur bis hin zu maximalen Schwimmwinkeln von  $\beta_{HA,\max,Grenze} = 5^\circ$  nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verknüpfen die in standardisierten Testverfahren ermittelten Open-Loop-Kennwerte des Fahrzeugverhaltens in Bremsmanövern mit dem Nachweis einer objektiv sicheren Kursführbarkeit durch Normalfahrer. Die daraus abgeleiteten Akzeptanzgrenzen leisten somit einen Beitrag dazu, die bisher bestehende Lücke zwischen dem bekannten objektiven Fahrzeugverhalten und der abzusichernden Beherrschbarkeit von Kraftfahrzeugen durch Normalfahrer im geschlossenen Regelkreis weiter zu verringern.

## 8 Anhang

### 8.1 Erwartungsbereiche der Begrenzungsabstände

#### 8.1.1 Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung

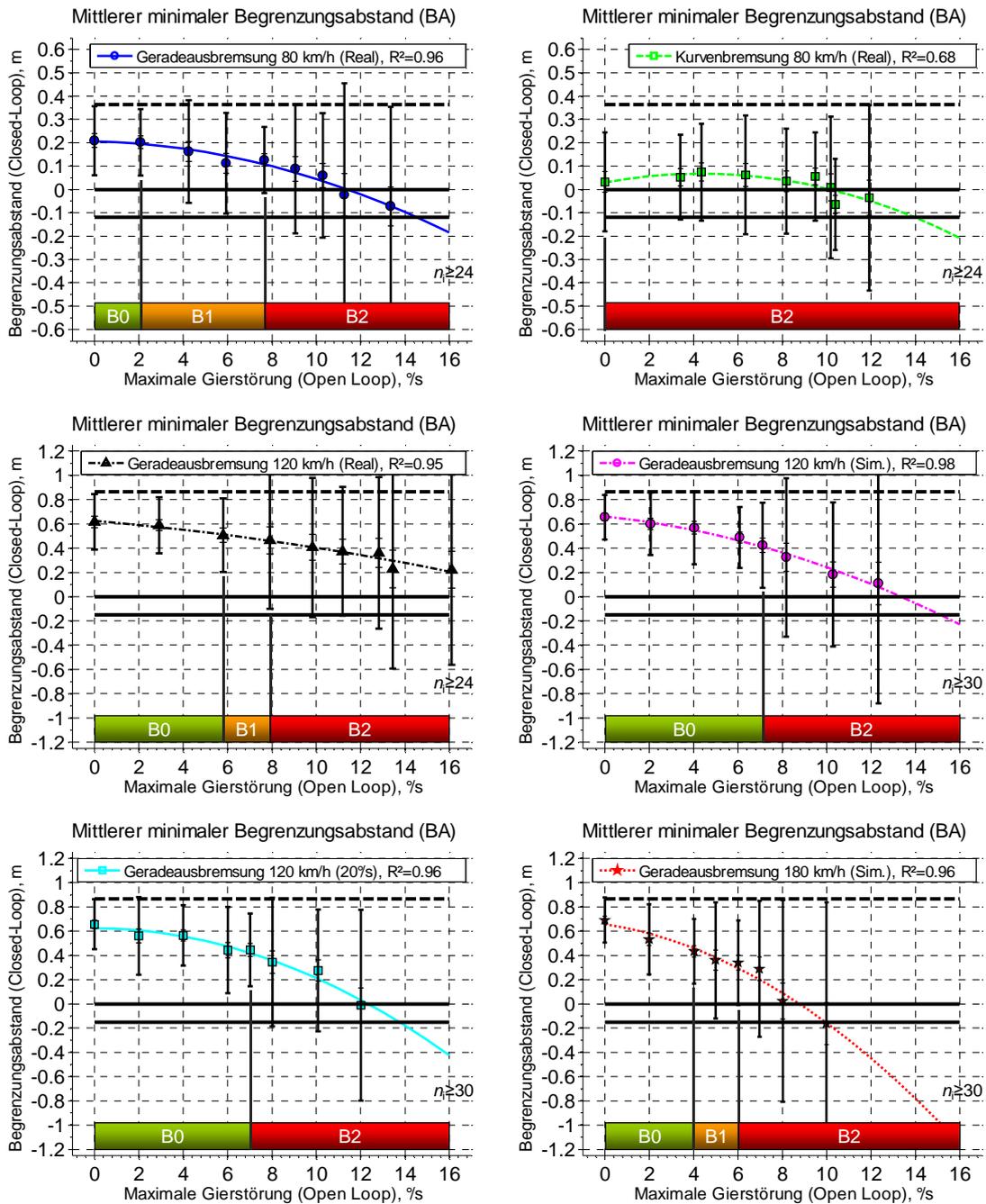


Bild 8.1 95 Mittelwerte und 95 %-Erwartungsbereiche des minimalen Begrenzungsabstandes über der maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) in den durchgeführten Bremsmanövern

### 8.1.2 Auftragung über der Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung

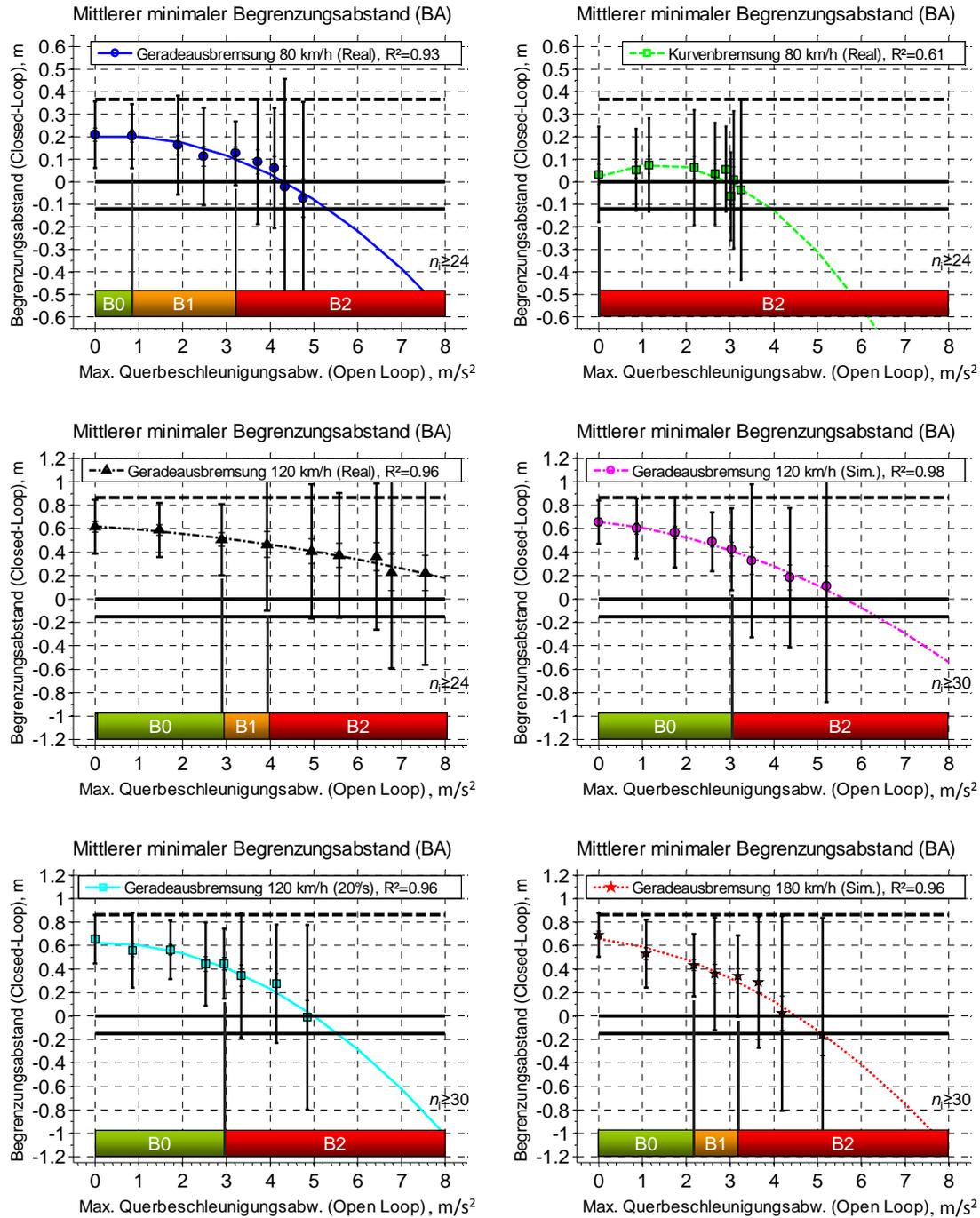


Bild 8.2 Mittelwerte und 95 %-Erwartungsbereiche des minimalen Begrenzungsabstandes über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung in den durchgeführten Bremsmanövern

## 8.2 Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung

### 8.2.1 Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung

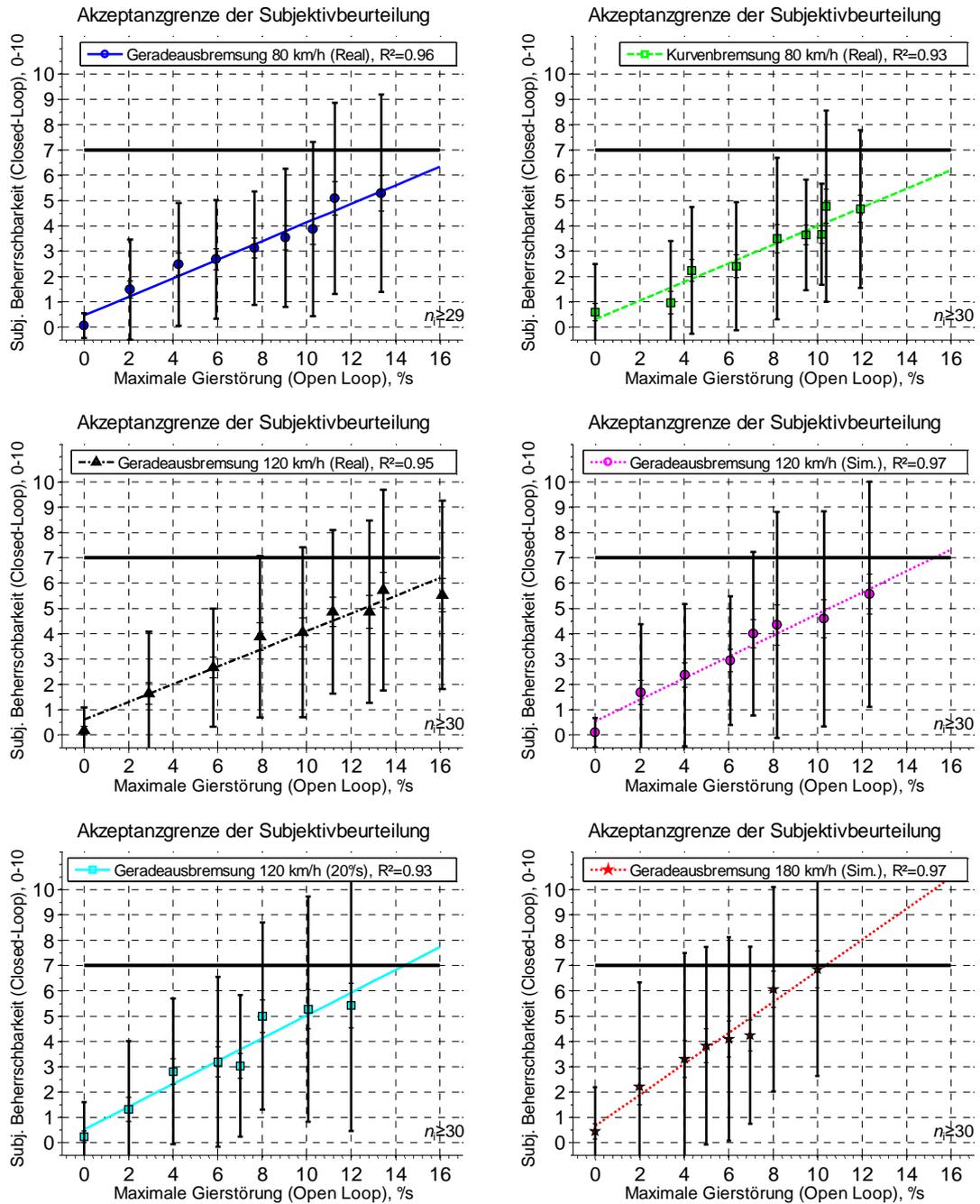


Bild 8.3 Mittelwerte und 95 %-Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung über der maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) in den durchgeführten Bremsmanövern

### 8.2.2 Auftragung über der Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung

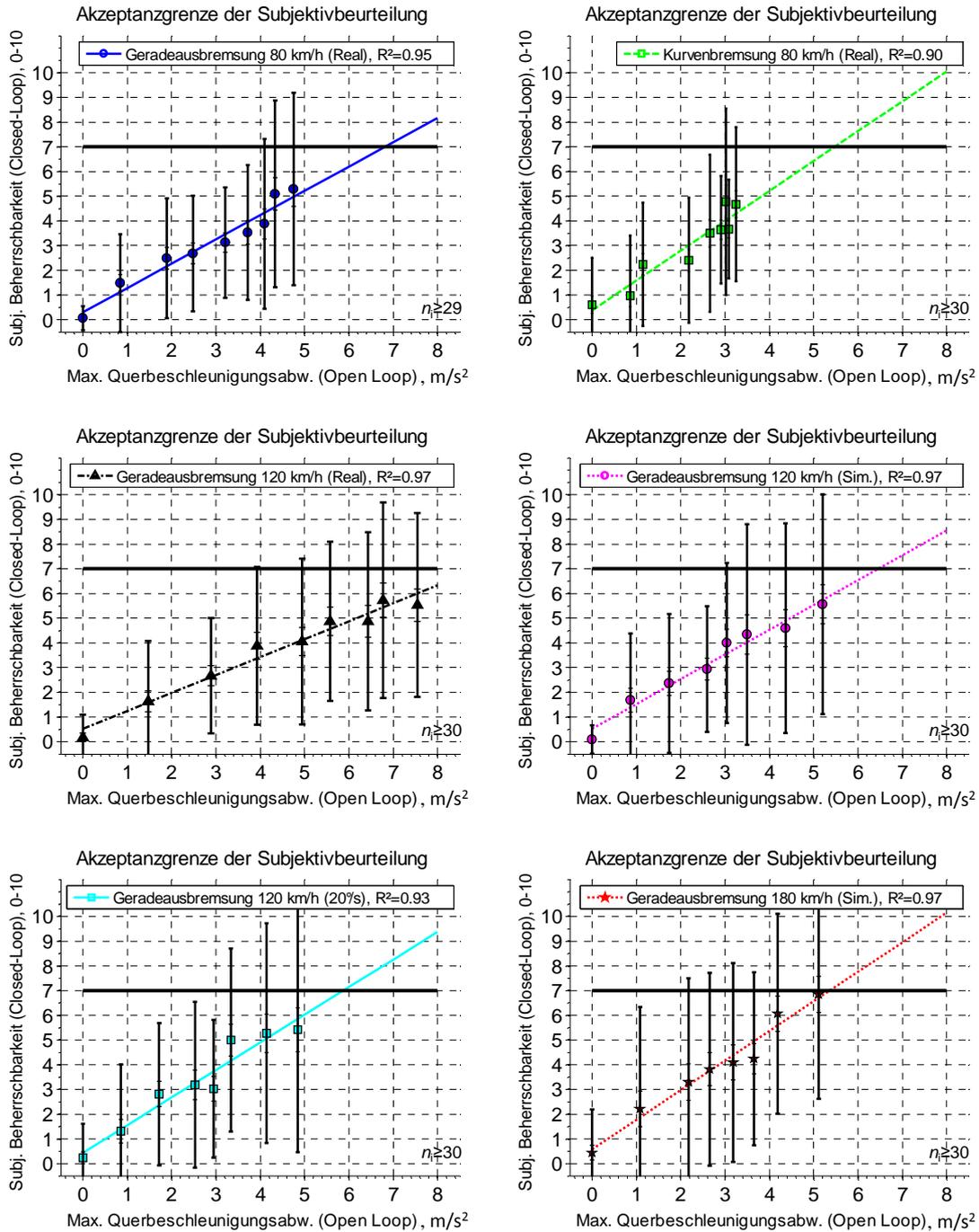


Bild 8.4 Mittelwerte und 95%-Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung in den durchgeführten Bremsmanövern

## 8.3 Standardisierte Testverfahren

Dieser Abschnitt beschreibt in Ergänzung von Kapitel 2.2 die Durchführung und die bekannten Bewegungskennwerte zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens in den standardisierten Testverfahren. Diese Zusammenfassung basiert insbesondere auf den umfangreichen Darstellungen der aktuellen Testverfahren und Bewertungskriterien von Zomotor et al.<sup>453</sup> (1997-1998) und Dietrich<sup>454</sup> (Diplomarbeit 2009) und beschränkt sich auf diejenigen Testmanöver, die zur Beurteilung der Stabilität bzw. Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens angewandt werden.

### 8.3.1 Geradeausverhalten

Im Bereich des Geradeausverhaltens wird das Fahrverhalten infolge Bremsung ( $\mu$ -Split), leichten Lenkanregungen mit geringen Querbeschleunigungen (Gespannstabilität, Lenkungspendeln, Weavetest) und äußeren Störeinflüssen (Seitenwind) bewertet. Zur Bewertung der Fahrstabilität wird von Zomotor et al. insbesondere auf die Testmanöver  $\mu$ -Split Bremsung und Seitenwindempfindlichkeit eingegangen.

#### 1. Geradeausbremsung auf $\mu$ -Split (ISO 14512)

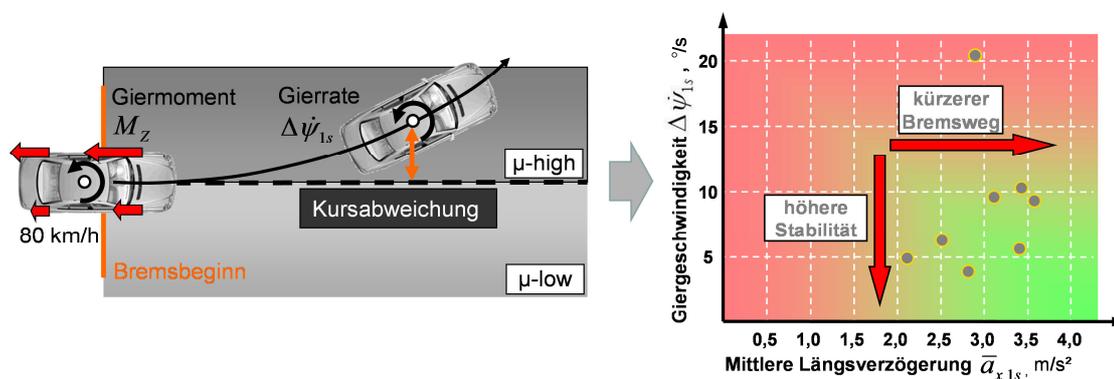


Bild 8.5 Durchführung und Auswertung der Geradeausbremsung auf  $\mu$ -Split Bedingungen nach ISO 14512<sup>455</sup>

Auf winterlich glatten oder verunreinigten Fahrbahnen können inhomogene Reibwertverhältnisse auftreten. Die Bremsstabilität bei Geradeausbremsung auf gemischten Reibwerten wird in dem Standardmanöver  $\mu$ -Split Bremsung nach Bild 8.5 und der 1999 eingeführten ISO 14512 geprüft. In diesem Manöver wird das Fahrzeug auf einer einseitig glatten Fahrbahn aus 80 km/h mit maximalem Pedaldruck verzögert. Durch die Reibwertdifferenz zwischen  $\mu$ -high und  $\mu$ -low Seite können die Räder des Fahrzeugs unterschiedliche hohe Längskräfte absetzen. Aus der Summen-Kraftdifferenz  $\Delta F_x$  zwi-

<sup>453</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>454</sup> Dietrich (2009): Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten

schen beiden Fahrzeugseiten und der Spurbreite  $s_b$  resultiert das Giermoment um die Hochachse des Fahrzeugs zu

$$M_z = \Delta F_x \cdot \frac{s_b}{2}, \quad (5.2)$$

in deren Folge das Fahrzeug in Richtung  $\mu$ -high Seite eindreht. Die Bremskräfte der Räder auf der  $\mu$ -high Seite werden heute durch Schlupfregelsysteme begrenzt, um die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs aufrecht zu erhalten. Zusätzlich können stabilisierende Eingriffe durch aktive Lenksysteme erfolgen.<sup>456,457</sup>

Die  $\mu$ -Split Bremsung kann sowohl in Open-Loop (fixed control) als auch Closed-Loop-Durchführung erfolgen. Die ISO Norm empfiehlt die Betrachtung der mittleren Längsverzögerung  $\bar{a}_{x,1s}$  über die Dauer einer Sekunde nach Bremsbeginn

$$\bar{a}_{x,1s} = \frac{(v_0 - v_{1s})}{1s} \quad (5.3)$$

als Maß für das Verzögerungsvermögen sowie die Betrachtung der resultierenden Giergeschwindigkeit eine Sekunde nach Bremsbeginn als Maß für die Stabilität bzw. Beherrschbarkeit des Fahrzeugs.

$$\Delta\psi_{1s} = \frac{1}{0,2s} \cdot \int_{0,9s}^{1,1s} \psi(t) dt \quad (5.4)$$

Aus (5.2) ist ersichtlich, dass bei einer Bremsung auf gemischten Reibwerten ein Zielkonflikt zwischen einer möglichst hohen Längsverzögerung und einer möglichst niedrigen Giergeschwindigkeitsabweichung besteht. Eine hohe mittlere Längsverzögerung ist nur durch verstärktes Abbremsen der Räder auf der  $\mu$ -high Seite möglich, wodurch das Giermoment und somit auch die Giergeschwindigkeitsabweichung ansteigen. Ziel ist eine möglichst hohe Längsverzögerung bei einer vorhersehbaren und „müheles“ beherrschbaren Gierreaktion des Fahrzeugs.<sup>458</sup> Zur Bewertung der Fahrstabilität kann nach Heißing/Brandl zusätzlich die seitliche Kursabweichung herangezogen werden. Trotz der etablierten Gegenüberstellung von Giergeschwindigkeitsabweichung und Bremsvermögen wurden bisher keine Akzeptanzgrenzen hinsichtlich der erzielten Fahrsicherheit für das Gierverhalten des Fahrzeugs in  $\mu$ -split Bremsung veröffentlicht.

<sup>455</sup> ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

<sup>456</sup> Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

<sup>457</sup> Thies et al. (2009): Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb

<sup>458</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

## 2. Geradeausbremsung und Lastwechselverhalten

Neben gemischten Reibwertverhältnissen können auch schiefziehende Bremsen, Fahrwerkeinflüsse oder Fahrbahnunebenheiten eine Störung des Geradeausverhaltens bei Lastwechsel- oder Bremsmanövern verursachen.<sup>459,460</sup> Die objektive Beurteilung des resultierenden Fahrverhaltens erfolgt nach Zomotor et al. vergleichbar zur Beurteilung des Fahrverhaltens in  $\mu$ -Split Bremsung. Auch hier haben sich die Bewegungskenngrößen zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn oder Lastwechsel als Beurteilungskriterien bewährt.<sup>461,462</sup> Neben den Momentanwerten der Bewegungsgrößen nach einer Sekunde werden teilweise auch Momentanwerte nach einer halben Sekunde oder die Maximalwerte der Bewegungsgrößen als Kenngrößen für das Fahrverhalten verwendet.<sup>463</sup> Bei Closed-Loop-Durchführung wird nach den von Zomotor et al. zitierten Quellen zusätzlich die zur Kurshaltung benötigte Lenkaktivität betrachtet.<sup>464,465,466</sup>

## 3. Seitenwindempfindlichkeit (ISO 12021-1)

Das Fahrverhalten infolge Seitenwind wird in reproduzierbarer Vorbeifahrt an einer stationären Seitenwindanlage geprüft. Untersuchungen bei natürlichem Seitenwind haben sich aufgrund der eingeschränkten Reproduzierbarkeit nicht bewährt.<sup>467</sup> Der Windvektor greift während der Vorbeifahrt am Seitenwindgebläse im sogenannten Druckpunkt des Fahrzeugs an und erzeugt durch den Längs- und Vertikalabstand des Druckpunkts vom Fahrzeugschwerpunkt ein Gier- und Wankmoment.<sup>468</sup> Die Vorbeifahrt erfolgt nach ISO 12021-1<sup>469</sup> mit einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h bei einer mittleren Seitenwindgeschwindigkeit von 20 m/s und einer Mindestlänge der Windgeneratorstrecke von 15 m. Das Seitenwindmanöver wird bevorzugt im Open-Loop mit fixiertem Lenkrad durchgeführt. Ebenfalls bekannt ist die Durchführung dieses Testmanövers im Closed-Loop, wobei der Fahrer versucht, das Fahrzeug auf dem Ausgangskurs zu stabilisieren.<sup>470</sup>

Zur objektiven Bewertung des Seitenwindverhaltens sind in ISO 12021-1 und bei Zomotor et al. insbesondere der zeitliche Verlauf der Giergeschwindigkeit und der Querbeseleunigung angeführt. Neben der Verwendung von Maximalwerten wird in der ISO-

---

<sup>459</sup> Mitschke, Niemann (1974): Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen

<sup>460</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>461</sup> Kuralay (1986): Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten

<sup>462</sup> Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

<sup>463</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>464</sup> Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

<sup>465</sup> Lorenz et al. (1986): Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten

<sup>466</sup> Rompe, Ehlich (1987): Stand der objektiven Bewertung von Reifen- und Fahrwerkseigenschaften

<sup>467</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>468</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>469</sup> ISO 12021-1 (1996): Sensivity to lateral wind

Norm die Analyse von Impulswerten dieser Bewegungsgrößen vorgeschlagen. Der Impulswert ist als Mittelwert der Gier- oder Querschleunigungsreaktion innerhalb des Zeitraums definiert, in dem die jeweilige Bewegungsgröße einen größeren Wert als 50 % des auftretenden Maximalwerts annimmt. Zusätzlich kann die seitliche Kursabweichung des Fahrzeugs bei konstantem Lenkradwinkel als Beurteilungskennwert verwendet werden, siehe auch.<sup>471</sup> Nach Zomotor et al.<sup>472,473</sup> korreliert der Anstieg der Giergeschwindigkeit signifikant mit der Subjektivbeurteilung von Testfahrern. Panhorst weist einen in den meisten Fällen eindeutigen Zusammenhang zwischen maximaler Giergeschwindigkeit und den zugehörigen Subjektivbeurteilungen nach.<sup>474</sup> Bei geringen Seitenwindgeschwindigkeiten nennen Maeda et al. die Wankbeschleunigung als entscheidende Größe.<sup>475</sup> Zusätzlich existieren Untersuchungen zu Kennwerten, die aus mehreren Bewegungskenngrößen zusammengesetzt sind und so eine verbesserte Abbildung der Subjektivurteile erzielen.<sup>476,477,478</sup> Nach Willumeit et al. (1986) wird das Seitenwindverhalten beispielsweise dann positiv bewertet, wenn die Effektivwerte von Gierwinkel, Giergeschwindigkeit und Querschleunigung klein sind, die Giergeschwindigkeit zu Beginn der Seitenwindeinfahrt jedoch schnell ansteigt.

### 8.3.2 Kurvenverhalten

Die Testverfahren zur Prüfung des Kurvenverhaltens beschreiben das Fahrverhalten in stationärer Kreisfahrt und infolge von Lastwechsel- oder Bremsreaktionen aus einer anfänglich stationären Kreisfahrt heraus. Das stationäre Übertragungsverhalten und die Fahrzeugreaktion während Kurvenbremsung sind nach von Glasner Bestandteil der nötigen Prüfprozeduren zur Definition von Mindestanforderungen an das Fahrverhalten.<sup>479</sup>

#### 1. Stationäre Kreisfahrt (ISO 4138)

Die stationäre Kreisfahrt ist nach Zomotor et al. die älteste Methode zur Prüfung der Fahreigenschaften eines Fahrzeugs<sup>480</sup> und wird zur Bestimmung des sogenannten Eigenlenkverhaltens verwendet, siehe Kapitel 2.1.2. Bereits Ende der 30er- / Anfang der 40er-Jahre wurde zur Beschreibung des Kurvenverhaltens eines Fahrzeugs der benötigte

<sup>470</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>471</sup> Scholz et al. (2008): Aktive Fahrwerkssysteme am Beispiel einer neuen Hinterachslenkung

<sup>472</sup> Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

<sup>473</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>474</sup> Panhorst (2002): Objektive und Subjektive Beurteilung des Seitenwindverhaltens von PKW

<sup>475</sup> Maeda et al. (1996): Aerodynamic Effects on the Vehicle Stability in High Speed Running

<sup>476</sup> Panhorst (2002): Objektive und Subjektive Beurteilung des Seitenwindverhaltens von PKW

<sup>477</sup> Willumeit et al. (1991): Korrelation von Untersuchungsergebnissen zur Seitenwindempfindlichkeit

<sup>478</sup> Willumeit et al. (1986): Verfahren zur Korrelation von Fahrzeugverhalten und Fahrerbeurteilung bei Seitenwind

<sup>479</sup> von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 12ff

<sup>480</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

Lenkradwinkel über der Querbeschleunigung aufgetragen.<sup>481</sup> 1982 sind die Vorschläge zur Durchführung der stationären Kreisfahrt in eine ISO-Norm<sup>482</sup> übernommen worden. Das Fahrverhalten in stationärer Kreisfahrt kann wie bereits beschrieben auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

- Steigerung der Fahrgeschwindigkeit auf konstantem Kurvenradius von 40 m, siehe Bild 8.6
- Lenkungszuziehen bei konstanter Fahrgeschwindigkeit

Aufgrund des geringeren Platzbedarfs empfiehlt die ISO-Norm eine Durchführung auf einem konstanten Kreisradius.

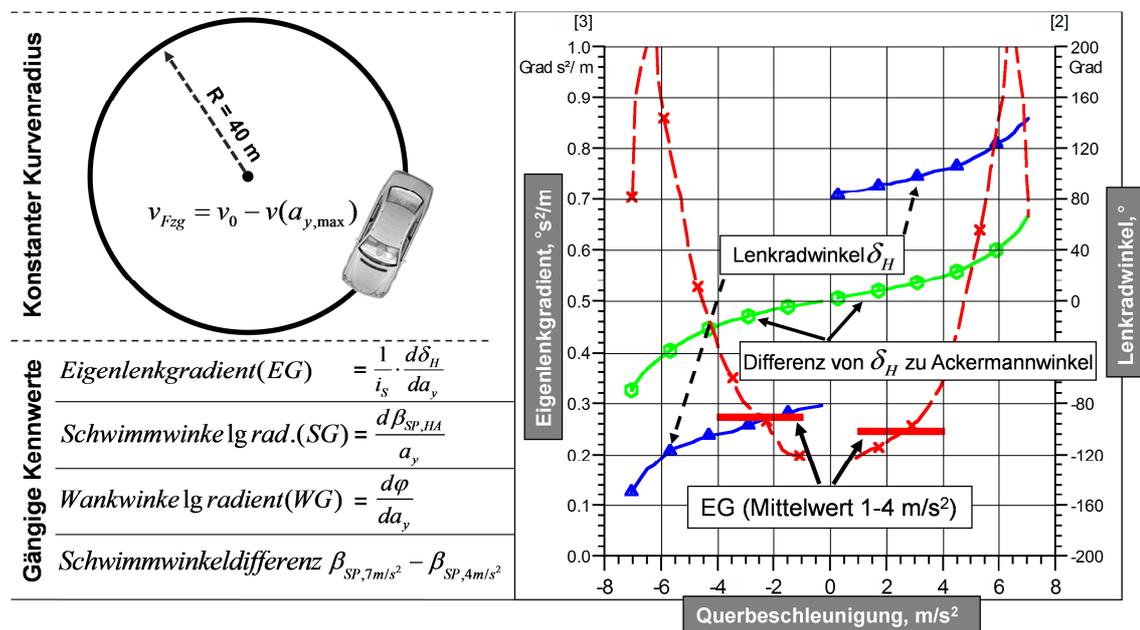


Bild 8.6 Durchführung der stationären Kreisfahrt auf konstantem Kurvenradius und gängige charakteristische Kenngrößen

Ausgehend von der Geschwindigkeit  $v_0$  nahe Stillstand wird die Geschwindigkeit langsam bis zur Erreichung der maximal möglichen Querbeschleunigung  $a_{y,max}$  gesteigert. Der benötigte Lenkradwinkel nahe des Stillstands ( $a_y = 0 \text{ m/s}^2$ ) entspricht zunächst dem Ackermannwinkel  $\delta_A$  und steigt bei einem untersteuernd ausgelegten Fahrzeug nach Bild 8.6 (rechts) mit erhöhter Querbeschleunigung kontinuierlich an. Als Kennwerte werden Lenkradwinkel  $\delta_H$ , Schwimmwinkel  $\beta_{SP,HA}$ , Wankwinkel  $\varphi$  und Lenkradmoment

<sup>481</sup> Stonex (1941): Car Control Factors and their Measurement

<sup>482</sup> ISO 4138 (1982): Steady state circular test procedure

$M_H$  als Funktion der Querbewegung bzw. deren auf die Querbewegung bezogenen Gradienten betrachtet. Der Lenkradwinkelgradient

$$\text{Lenkradwinkelgradient} = \frac{d\delta_H}{da_y} \quad (5.5)$$

ist bezogen auf die Lenkübersetzung  $i_s$  bei konstantem Kurvenradius und somit konstantem Ackermannwinkel auch als Eigenlenkgradient

$$EG = \frac{1}{i_s} \cdot \text{Lenkradwinkelgradient} \quad (5.6)$$

bekannt und ein Maß für das Unter- bzw. Übersteuerverhalten eines Fahrzeugs, siehe auch Kapitel 2.1.2. In den von Rompe/Hei3ing 1984 zusammengefassten Kenngrößen zur Bewertung des stationären Kurvenverhaltens werden zusätzlich die Schräglaufwinkeldifferenz von Vorder- zu Hinterachse  $\alpha_v - \alpha_h$ , die Differenz von Lenkradwinkel zu Ackermannwinkel  $\delta_H - \delta_A$ , der Quotient aus Lenkradwinkel und Ackermannwinkel  $\delta_H / \delta_A$  sowie der Gierverstärkungsfaktor  $GV = \dot{\psi} / \delta_H$  jeweils als Funktion der Querbewegung betrachtet.<sup>483</sup> Nach einer von Zomotor et al.<sup>484</sup> angeführten aktuelleren Studie aus dem Jahr 1997 sind der Schwimmwinkelgradient im linearen Bereich bis ca.  $4 \text{ m/s}^2$  Querbewegung und die Schwimmwinkeldifferenz im nichtlinearen Bereich  $\beta_{SP,7\text{m/s}^2} - \beta_{SP,4\text{m/s}^2}$  für einen Vergleich zwischen verschiedenen Fahrzeugen am besten geeignet.<sup>485</sup> Auch nach den Zusammenfassungen von Zomotor et al.<sup>486</sup> aus dem Jahr 1977 und von Horn<sup>487</sup> 1985 wird dem Schwimmwinkel in stationärer Kreisfahrt ein deutlicher Einfluss auf die empfundene Fahrstabilität beigemessen. Niedrige Schwimmwinkel werden demnach als angenehmer beurteilt. Zwar sind die Kennwerte zur Objektivierung des Fahrverhaltens in stationärer Kreisfahrt allgemein anerkannt, dennoch existieren hinsichtlich der optimalen Gestaltung des Fahrverhaltens nur qualitative Vorstellungen: So ist nach Zomotor et al. beispielsweise der optimale Übergang in den Grenzbereich noch nicht geklärt.<sup>488</sup> Ein möglichst linearer Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Querbewegung bis hin zu hohen Querbewegungen steigert nach Donges/Wimberger<sup>489</sup> die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens, der Übergang in den Grenzbereich ( $a_y > 7 \text{ m/s}^2$ ) sollte sich jedoch für ein subjektiv sicheres

<sup>483</sup> Rompe, Hei3ing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

<sup>484</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>485</sup> Brunkow (1997): Ermittlung von Kennwerten zur objektiven Fahrzeugbeurteilung

<sup>486</sup> Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>487</sup> Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße, S. 22ff

<sup>488</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

Fahrempfinden durch eine spürbare Zunahme des Lenkradwinkelbedarfs ankündigen.<sup>490</sup> Bezüglich der „Direktheit“ des Fahrverhaltens, ausgedrückt durch den auf die Querschleunigung bezogenen Lenkradwinkelbedarf, sollte das Fahrzeug nach Horn weder zu unhandlich noch zu empfindlich ausgelegt sein.<sup>491</sup> Es besteht Einigkeit darin, dass Fahrzeuge für eine Beherrschbarkeit durch Normalfahrer stationär untersteuernd ausgelegt sein müssen.<sup>492,493</sup> Ein untersteuerndes Fahrverhalten bedeutet, dass die Querschleunigung bei konstanter Fahrgeschwindigkeit nur dann ansteigt, wenn der Fahrer zusätzlich in die Kurve einlenkt, siehe Kapitel 2.1.2.

## 2. Instationäre (durch Fahrbahnunebenheiten gestörte) Kreisfahrt

Eine erweiterte Bewertung der Fahrstabilität eines Fahrzeugs in Kurvenfahrt kann durch die Betrachtung des Fahrverhaltens infolge einer Störung durch Fahrbahnunebenheiten vorgenommen werden. Hierbei wird das Fahrzeug in einer zunächst stationären Kurvenfahrt über eine definierte Straßenunebenheit bewegt und die Fahrzeugreaktion messtechnisch erfasst. Dieses Manöver hat nach Zomotor et al.<sup>494,495</sup> durch die Verbesserungen der Fahrwerke an Bedeutung verloren, weshalb nur wenige aktuelle Untersuchungen bekannt sind. Charakteristische Bewegungskennwerte sind nach Zomotor et al. (1997/1998) die normierte, auf die Ausgangsgerate bezogene Giergeschwindigkeitsdifferenz und die absolute Gierreaktion. Hierbei werden insbesondere die Zeitwerte der Gierreaktion  $\psi_{1s}$  eine Sekunde nach Störungseintritt als geeignete Kennwerte genannt.

## 3. Bremsen in der Kurve (ISO 7975)

Das Testverfahren Bremsen in der Kurve wird aufgrund der Häufigkeit von Kurvenbremsungen im realen Straßenverkehr und des Bezugs zur Fahrsicherheit als eines der wichtigsten Testmanöver bezeichnet.<sup>496,497,498</sup> Die Vorschläge zur Durchführung dieses Testmanövers wurden daher bereits 1985 in eine ISO-Norm<sup>499</sup> überführt. Aus einer stationären Kreisfahrt heraus wird das Fahrzeug in der ersten Variante der ISO-Norm (1985) mit fixiertem Lenkrad (Open-Loop) aus folgenden Anfangsbedingungen abgebremst:

- Radius 30-50 m, Ausgangsquerbeschleunigung  $5 \text{ m/s}^2$

---

<sup>489</sup> Donges, Wimberger (1992): Performance of BMW's Active Rear-Axle Kinematics

<sup>490</sup> Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

<sup>491</sup> Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße

<sup>492</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeug

<sup>493</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>494</sup> Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>495</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>496</sup> von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 13

<sup>497</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>498</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

- Radius 100 m, Ausgangsquerbeschleunigung  $4 \text{ m/s}^2$

In der aktuellen Fassung der Norm<sup>500</sup> (2006) wird der Teststandard auf

- Radius 100 m, Ausgangsquerbeschleunigung  $5 \text{ m/s}^2$

festgelegt.

Der Bremsdruck wird in mehreren Wiederholungsbremungen, beginnend bei einer mittleren Längsverzögerung  $a_x$  von  $2 \text{ m/s}^2$ , mit der Schrittweite  $\Delta a_x$  von maximal  $1 \text{ m/s}^2$  bis hin zum Erreichen der maximal möglichen Bremsverzögerung  $a_x$  gesteigert. Zusätzlich wird das Kurvenbremsverhalten durch die Fahrzeughersteller auch in weiteren Betriebspunkten untersucht, z.B. aus maximaler Ausgangsquerbeschleunigung oder in Form des Hochgeschwindigkeitskurvenbremsens aus Geschwindigkeiten  $> 200 \text{ km/h}$ .

Wie in 2.1.2 diskutiert wurde, summieren sich unter Vernachlässigung der Achskinematik folgende Effekte zu einem übersteuernd oder untersteuernd wirkenden zusätzlichen Giermoment um die Fahrzeughochachse  $M_Z$ :

1. Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse und daraus resultierende Verringerung der Summenschräglaufsteifigkeit  $c_{\alpha,h}$  an der Hinterachse bei gleichzeitiger Erhöhung der Summenschräglaufsteifigkeit  $c_{\alpha,v}$  an der Vorderachse
2. Seitlich zur Karosserie versetzt angreifende Längskräfte aufgrund der unter Seitenkraft zur Kurveninnenseite hin verschobenen Aufstandsflächen der Reifen.
3. Reduzierung der Schräglaufsteifigkeiten aller vier Einzelräder durch kombinierte Schlupfbeanspruchung bei hohen Längsschlupfwerten
4. Ausprägung der radindividuellen Bremskraftverteilung an den vier Einzelrädern

Während die Radlastverschiebung zwischen Hinter- und Vorderachse und die Summe der seitlich versetzt angreifenden Längskräfte nur von der Intensität der Bremsung selbst abhängen, kann die Bremskraftverteilung achsweise oder radindividuell erfolgen. Bei achswiseiger Bremskraftverteilung kann nach 2.1.2 eine Über- oder Untersteuerneigung des Fahrzeugs durch „Überbremsen“ von entweder Vorder- oder Hinterachse erzeugt werden. Bei niedrigen und mittleren Längsverzögerungen werden jedoch keine hohen Längsschlupfwerte erzielt, so dass die gebremsten Räder kaum an Seitenkraft einbüßen, siehe z.B. Reifenkennfeld bei Reimpell/Sponagel.<sup>501</sup> Bei achswiseiger Bremskraftverteilung überwiegt somit bis hin zu mittleren Längsverzögerungen das Giermo-

<sup>499</sup> ISO 7975 (1985): Braking in a turn – Open loop test procedure (first edition)

<sup>500</sup> ISO 7975 (2006): Braking in a turn, Open-loop test method (third edition)

<sup>501</sup> Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage

ment  $M_{Z, \text{Radlastverschiebung}}$  aus der Radlastverschiebung zwischen Vorder- und Hinterachse, welches das Fahrzeug bei Bremsung weiter in die Kurve eindreht.<sup>502</sup> Erst bei stärkerer Verzögerung bzw. einem tatsächlichen „Überbremsen“ der Räder an der Vorderachse wird die übertragbare Seitenkraft der Vorderräder reduziert und das Fahrzeugverhalten in Richtung Untersteuern verändert. Dementsprechend zeigen auch Fahrzeuge, die durch achsweise Bremskraftverteilung untersteuernd ausgelegt sind (verstärkte Bremsung an der Vorderachse), bis hin zu mittleren Verzögerungen ein tendenziell übersteuerndes Bremsverhalten, welches erst bei hohen Längsverzögerungen in ein untersteuerndes Fahrzeugverhalten übergeht.<sup>503,504</sup> Ein vollständiges Blockieren der Räder wird bei heutigen Fahrzeugen durch das Bremsschlupfregelsystem ABS verhindert, so dass nach Donges/Rompe (1982) bei hohen Längsverzögerungen trotz Untersteuertendenz kein vollständiger Verlust der Lenkbarkeit auftritt.

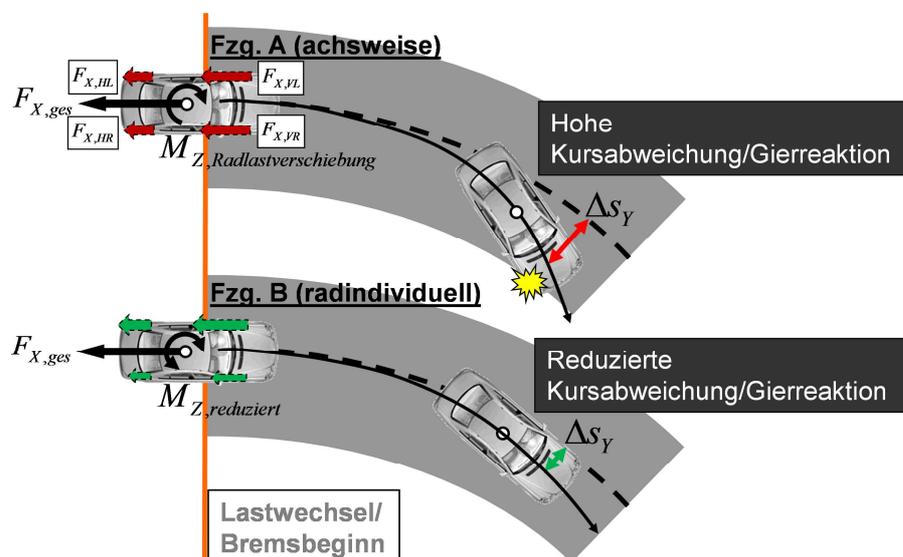


Bild 8.7 Gierreaktion und Kursabweichung bei Kurvenbremsung mit achsweiser Bremskraftverteilung (oben) und stabilisierender radindividueller Bremskraftverteilung (unten)

Im Gegensatz zu einer achsweisen Bremskraftverteilung kann das Giermoment mittels radindividueller Bremskraftverteilung auch bei niedrigen Radschlupfwerten beeinflusst werden. Durch stärkeres Abbremsen der kurvenäußeren Räder ist es theoretisch möglich, das durch die Radlastverschiebung zwischen Hinter- und Vorderachse und die im Reifenlatsch seitlich versetzt angreifenden Bremskräfte auftretende, übersteuernd wirkende Giermoment  $M_{Z, \text{Radlastverschiebung}}$  vollständig zu kompensieren.

<sup>502</sup> Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

<sup>503</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

<sup>504</sup> Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

Bild 8.7 vergleicht das exemplarische Bremsverhalten eines Fahrzeugs mit achsweiser Bremskraftverteilung (Fahrzeug A) und eines Fahrzeugs mit radindividueller Bremskraftverteilung (Fahrzeug B) im Bereich einer mittleren Längsverzögerung. Fahrzeug A (Bild 8.7, oben) zeigt aufgrund der Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse und der im Reifenlatsch seitlich versetzt angreifenden Bremskräfte ein deutlich übersteuerndes Fahrverhalten und weicht in der Folge deutlich vom Ausgangskurs ab. Bei Fahrzeug B (Bild 8.7, unten) wird das verzögerungsinduzierte Giermoment  $M_{Z, \text{Radlastverschiebung}}$  hingegen durch eine im Vergleich zu den kurveninneren Rädern stärkere Bremsung der kurvenäußeren Räder kompensiert und die Kursabweichung infolge des geringeren Summengiermoments  $M_{Z, \text{reduziert}}$  minimiert.

In der zugehörigen ISO-Norm<sup>505</sup> werden zahlreiche Bewegungskenngrößen zur Auswertung des Kurvenbremsverhaltens vorgeschlagen, u.a. die Zeitwerte der Differenz der Gierrate und der Querbeschleunigung zu den jeweiligen Referenzwerten

$$\Delta\dot{\psi}(t) = \dot{\psi}(t) - \frac{v_x(t)}{R_0} \quad \text{mit} \quad \dot{\psi}_{ref} = \frac{v_x(t)}{R_0} \quad (5.7)$$

$$\Delta a_y(t) = a_y(t) - \frac{v_x^2(t)}{R_0} \quad \text{mit} \quad a_{y,ref} = \frac{v_x^2(t)}{R_0} \quad (5.8)$$

Die Referenzwerte der Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}_{ref}$  und Querbeschleunigung  $a_{y,ref}$  entsprechen derjenigen Giergeschwindigkeit bzw. Querbeschleunigung, mit der das Fahrzeug bei der jeweils aktuellen Fahrgeschwindigkeit  $v_x(t)$  exakt den Ausgangsradius  $R_0$  befahren würde. Weitere in ISO 7975 genannte Beurteilungsgrößen sind die Verhältnisse der Maximalwerte von Giergeschwindigkeit, Querbeschleunigung und Schwimmwinkel im Fzg.-Schwerpunkt zu den jeweiligen Ausgangswerten sowie die maximale Giergeschwindigkeitsdifferenz nach (5.7) als Funktion der mittleren Längsverzögerung bis zum Stillstand des Fahrzeugs  $\bar{a}_x$

$$\left( \frac{\dot{\psi}_{max}}{\dot{\psi}_0}; \frac{a_{y,max}}{a_{y,0}}; \frac{\beta_{max}}{\beta_0}; \Delta\dot{\psi}_{max} \right) = f_i(\bar{a}_x) \quad (5.9)$$

Ebenfalls vorgeschlagen werden das Verhältnis von Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung zu ihren jeweiligen Ausgangswerten, der Schwimmwinkel im Fzg.-Schwerpunkt und die seitliche Abweichung des Fzg.-Schwerpunkts vom Ausgangsradius, jeweils zum Zeitpunkt  $t_n = 1$  s nach Bremsbeginn und in Abhängigkeit der mittleren Längsverzögerung.

<sup>505</sup> ISO 7975 (1985): Braking in a turn – Open loop test procedure (first edition)

$$\left( \frac{\dot{\psi}_{t_n}}{\dot{\psi}_0}; \frac{a_{y,t_n}}{a_{y,0}}; \beta_{t_n}; \Delta_{y,SP} \right) = f_i(a_x, t_n) \quad (5.10)$$

Allerdings räumt die Normungsschrift 1985 auch ein, dass nach damaligem Wissensstand nicht bekannt sei, welche Bewegungskenngrößen zur Beschreibung eines sicheren Fahrzeugverhaltens am geeignetsten sind. Die Untersuchung der geeigneten Kenngrößen war Gegenstand zahlreicher Studien in den 70er- bis 90er-Jahren. Demnach werden nach der Zusammenfassung der Testverfahren 1997/1998 von Zomotor et al.<sup>506</sup> in Open-Loop-Durchführung mit fixiertem Lenkrad vor allem die Giergeschwindigkeit, Querbesehleunigung und der Schwimmwinkel zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn vorgeschlagen.<sup>507,508,509,510,511,512,513,514,515,516,517</sup> Dabei finden insbesondere die auf den jeweiligen Ausgangswert bezogenen Bewegungskenngrößen in Abhängigkeit der Längsverzögerung Verwendung. Teilweise wird auch die Abweichung der Giergeschwindigkeit vom Referenzwert zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn verwendet, siehe Zomotor<sup>518</sup> und (5.7). Die Verwendung der Ein-Sekunden Werte wird in wie folgt begründet:<sup>519</sup> Der Fahrer könne auf die Fahrzeugreaktion erst nach Ablauf der üblichen Reaktionszeit reagieren und das Fahrzeug stabilisieren. Das Fahrzeugverhalten nach einer Sekunde sei daher „...so charakteristisch, dass es auch für den geschlossenen Regelkreis wichtige Hinweise gibt.“. Nach einer aktuelleren Studie aus dem Jahr 2005 wird zur Bewertung der Fahrstabilität während des Hochgeschwindigkeitskurvenbremsens aus 200 km/h hingegen die maximale Abweichung der Giergeschwindigkeit von ihrem stationären Ausgangswert verwendet.<sup>520</sup> Als ergänzende Open-Loop-Kenngrößen werden in weiteren Veröffentlichungen die Winkel- oder Seitenabweichung des Fahrzeugs vom Ausgangsradius verwendet.<sup>521,522,523</sup> In Closed-Loop-Untersuchungen zum Kurvenbremsverhalten werden der Lenkradwinkelverlauf während der Bremsung in ei-

<sup>506</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

<sup>507</sup> Ehlich et al. (1983): Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern

<sup>508</sup> Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

<sup>509</sup> Kuralay (1986): Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten

<sup>510</sup> Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

<sup>511</sup> Rompe (1978): Testverfahren für das Bremsen in der Kurve

<sup>512</sup> Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

<sup>513</sup> Rompe, Grunow (1980): Fahrverhalten von PKW beim Bremsen in der Kurve auf nassen Fahrbahnen

<sup>514</sup> Rompe, Heißing (1984): Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften

<sup>515</sup> Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

<sup>516</sup> Zomotor, Kuhn (1982): Verbesserung der Aktiven Sicherheit von Personenwagen-Caravan-Zügen

<sup>517</sup> Zomotor et al. (1982): Stabilität und aerodynamisches Störverhalten von PKW-Wohnanhängerzügen

<sup>518</sup> Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

<sup>519</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>520</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

<sup>521</sup> Rompe (1978): Testverfahren für das Bremsen in der Kurve

<sup>522</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

<sup>523</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

ner markierten Kurvengasse<sup>524,525</sup> und der benötigte Lenkradwinkel zur Einhaltung des Ausgangsradius bewertet.<sup>526</sup>

Nach einer Veröffentlichung von Zomotor et al. aus den 80er-Jahren korrelieren die folgenden Kenngrößen besonders signifikant mit dem Subjektivurteil von Testfahrern:<sup>527</sup>

- der auf den Startwert bezogene Maximalwert der Giergeschwindigkeit
- die maximale Gierwinkelabweichung eine Sekunde nach Bremsbeginn
- der Zeitwert (eine Sekunde nach Bremsbeginn) und Maximalwert des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt

Eine weitere Studie zur Stabilität in Kurvenbremsung aus höheren Kurvengeschwindigkeiten (bis 180 km/h und mit verschiedenen Ausgangsquerbeschleunigungen) nennt 2005 den quadratischen Mittelwert der Gierbeschleunigung über dem Auswertzeitraum  $t_e$  mit der Messfrequenz  $f$  als den am besten geeigneten Kennwert zur Objektivierung von Subjektivurteilen in Kurvenbremsung.<sup>528</sup>

$$\ddot{\psi}_{QuMW} = \frac{\left| \sum_{t_0}^{t_e} \ddot{\psi}_i \cdot |\dot{\psi}_i| \right|}{\sum_{t_0}^{t_e} \ddot{\psi}_i \cdot |\dot{\psi}_i|} \cdot \sqrt{\frac{\left| \sum_{t_0}^{t_e} |\dot{\psi}_i| \right|^2}{f \cdot t_e}} \quad (5.11)$$

Durch die Mittelwertbildung der Gierbeschleunigung über den gesamten Auswertzeitraum  $t_e$  könne demnach eine quantitative Unterscheidung der Intensität der Gierreaktion des Fahrzeugs erfolgen. Ein Fahrzeug mit abklingender Gierbeschleunigung weise die Tendenz auf, sich selbst zu stabilisieren und sei daher dem Kennwert zufolge besser beherrschbar. Der Bericht weist jedoch gleichzeitig auf den fehlenden wissenschaftlichen Beleg dieser Empfehlung hin.

In den bisher veröffentlichten Forschungsergebnissen sind nur wenige Empfehlungen für Akzeptanzgrenzen der jeweils verwendeten Bewegungskennwerte zur Beschreibung der Fahrstabilität enthalten. Der Automobilhersteller Fiat schlägt 1975 innerhalb des ISO-Komitees vor, die Giergeschwindigkeit in Kurvenbremsung sollte generell das 1,5-fache der Ausgangsgiergeschwindigkeit nicht überschreiten.<sup>529</sup> Rompe et al.<sup>530</sup> nennen

<sup>524</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>525</sup> Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

<sup>526</sup> Rompe, Heißing (1984): Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften

<sup>527</sup> Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

<sup>528</sup> Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

<sup>529</sup> Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

<sup>530</sup> Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

1980 einen maximal tolerierbaren Schwimmwinkel von  $15^\circ$  eine Sekunde nach Bremsbeginn, während eine schwedische Fahrsicherheitsstudie<sup>531</sup> 1974 einen maximalen Schwimmwinkel von  $20^\circ$  über der gesamten Manöverdauer als Sicherheitsgrenze beschreibt. Es existieren jedoch – ähnlich wie zu dem Testmanöver *stationäre Kreisfahrt* – weitere qualitative Gestaltungshinweise für ein sicheres Fahrzeugverhalten: So soll die Bewertung der Fahreigenschaften nach Rompe/Heißing<sup>532</sup> vor allem anhand der resultierenden seitlichen Kursabweichung und der Gierstabilität erfolgen. Das Fahrzeug sollte hierbei im Idealfall nicht vom eingeschlagenen Kurs abweichen und keine zusätzliche Drehbewegung um die Hochachse erfahren.<sup>533</sup> Ein leichtes zusätzliches Eindrehen in die Kurve kann den Fahrer nach Heißing/Brandl<sup>534</sup> und Schick/Bunz<sup>535</sup> zwar bei der Kursführungsaufgabe unterstützen, sollte nach Heißing/Brandl mit steigender Fahrgeschwindigkeit jedoch abnehmen. Zusätzlich ist für die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch den Fahrer die erzielbare Längsverzögerung und das bei hohen Längsverzögerungen verbleibende Lenkvermögen ein wesentliches Kriterium.<sup>536,537</sup> Neben der geforderten Gierstabilität wird von Rompe et al. daher ein Bereich für das verbleibende Lenkvermögen in Abhängigkeit des erzielbaren Bremsvermögens empfohlen, siehe Bild 8.8.

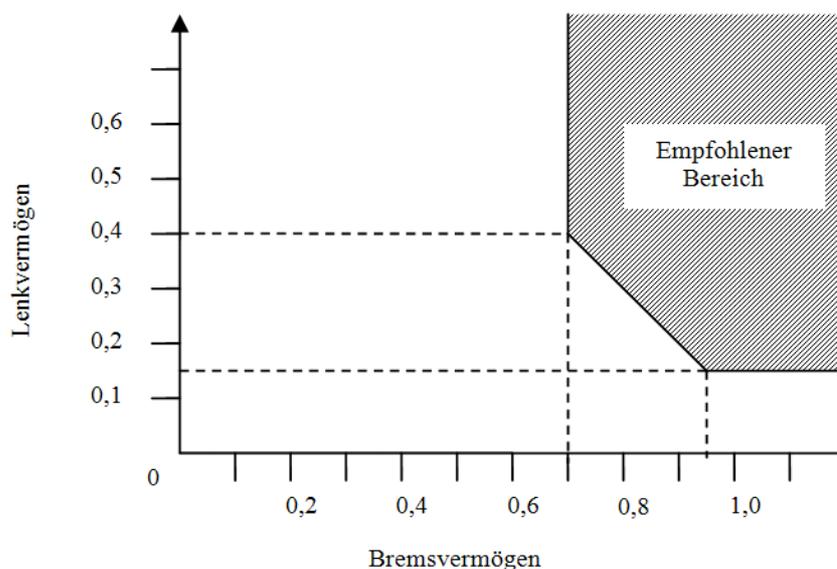


Bild 8.8 Empfohlener Bereich für das Lenk- und Bremsvermögen in Kurvenbremsung<sup>538</sup> (1980)

<sup>531</sup> Rundkuist (1974): Steerability During Emergency Braking

<sup>532</sup> Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

<sup>533</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>534</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>535</sup> Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

<sup>536</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 17ff

<sup>537</sup> Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

<sup>538</sup> Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

#### 4. Lastwechselreaktion (Gaswegnahme oder Gasstoß in der Kurve)

Neben den Testmanövern stationäre Kreisfahrt und Kurvenbremsung existieren zahlreiche Untersuchungen zum Lastwechselverhalten bei Gaswegnahme oder eines Gasstoßes in Kurvenfahrt. Die Wirkzusammenhänge ähneln dabei den Effekten während einer Kurvenbremsung: Wird aus einer stationären Kreisfahrt heraus der Antriebsschlupf weggenommen, resultiert eine Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse und die zuvor benötigten Antriebskräfte an den Rädern zur Überwindung der Fahrwiderstände entfallen. Diese Antriebskräfte wirken in einer Kreisfahrt jedoch stabilisierend, da sie aufgrund der Verschiebung der Reifenaufstandsflächen unter Seitenkraft in Richtung Kurveninnenseite seitlich versetzt angreifen und somit ein der Gierbewegung des Fahrzeugs entgegengesetztes Giermoment erzeugen.<sup>539</sup> Sowohl der Wegfall der Antriebskraft als auch die Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse bewirken bei Gaswegnahme ein zusätzlich in die Kurve eindrehendes Giermoment.

Während die Gaswegnahme für alle Fahrzeuge untersucht wird und in einer eigenen Norm zusammengefasst ist<sup>540</sup>, besitzt das Manöver Gasstoß aus einer stationären Kreisfahrt nur für hinterrad- oder allradangetriebene Fahrzeuge eine Relevanz hinsichtlich der Beurteilung des Fahrverhaltens. Ein hoher Längsschlupf an den Hinterrädern reduziert die übertragbare Seitenkraft der Hinterachse<sup>541</sup> und kann so eine deutliche Übersteuertendenz hervorrufen. Die gleichzeitig auftretende Längskraft wirkt nach Reimpell/Sponagel (1988) hingegen stabilisierend, weshalb es bei einer Kurvenfahrt im Bereich der Kraftschlussgrenze sinnvoll sein kann, das Fahrzeug mit geringem Antriebsschlupf "auf Zug zu halten", um die stabilisierende Längskraft aufrecht zu erhalten und die destabilisierenden Effekte einer plötzlichen Gaswegnahme zu vermeiden.

Die Open-Loop-Testdurchführung der Gaswegnahme (fixed control) aus einer stationären Kreisfahrt ist in der Norm ISO 9816<sup>542</sup> definiert und kann ebenfalls entweder mit konstanter Ausgangsfahrgeschwindigkeit oder auf einem festen Kurvenradius erfolgen:

- Konstanter Kurvenradius: Empfohlen werden 100 m Kurvenradius, minimal sollte der Kurvenradius 40 m betragen.
- Konstante Ausgangsfahrgeschwindigkeit: Als Standardwert werden 100 km/h genannt, Abweichungen sollten in 20 km/h Schritten gewählt werden.

---

<sup>539</sup> Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage

<sup>540</sup> ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method

<sup>541</sup> Heißing, Ersoy (2008): Fahrwerkhandbuch, 2. Auflage

<sup>542</sup> ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method

- Bei beiden Varianten der Durchführung: Initiale Ausgangsquerbeschleunigung sollte  $4 \text{ m/s}^2$  betragen und in weiteren Versuchen mit  $0,5 \text{ m/s}^2$  Querbewegungsbeschleunigungsdifferenz oder einer geringeren Differenz gesteigert werden.

Aus der jeweiligen stationären Kreisfahrt mit einem fixierten Lenkrad heraus wird das Gaspedal sprunghaft gelöst. Die charakteristischen Bewegungskennwerte werden über der Ausgangsquerbeschleunigung  $a_{y,0}$  aufgetragen und sind vergleichbar mit den zur Beurteilung des Kurvenbremsverhaltens gebildeten Bewegungskennwerten: Neben der mittleren Längsverzögerung  $\bar{a}_{x,t_n}$  werden vor allem die auf die Referenzgierrate  $\dot{\psi}_{\text{Ref},t_x}$  und Referenzquerbeschleunigung  $a_{y,\text{Ref},t_x}$  bezogenen Kennwerte zum Zeitpunkt  $t_n = 1 \text{ s}$  oder zum Zeitpunkt der maximalen Abweichung  $t_{\text{max}}$

$$\frac{\dot{\psi}_{t_n}}{\dot{\psi}_{\text{Ref},t_n}}; \frac{\dot{\psi}_{\text{max}}}{\dot{\psi}_{\text{Ref},t_{\text{max}}}} = f(a_{y,0}) \text{ mit } \dot{\psi}_{\text{ref}} = \frac{v_x(t)}{R_0} \quad (5.12)$$

$$\frac{a_{y,t_n}}{a_{y,\text{Ref},t_n}} = f(a_{y,0}) \text{ mit } a_{y,\text{ref}} = \frac{v_x^2(t)}{R_0} \quad (5.13)$$

verwendet. Die Norm empfiehlt ebenfalls eine Auswertung der maximalen Gierratenabweichung  $\Delta \dot{\psi}_{\text{max}}$  und der Abweichung nach einem festen Auswertzeitraum  $\Delta \dot{\psi}_{t_n}$  vom Referenzwert  $\dot{\psi}_{\text{ref}}$  sowie eine Auswertung der absoluten Gierbeschleunigung nach einer Sekunde  $\ddot{\psi}_{t_n}$

$$(\Delta \dot{\psi}_{\text{max}} = (\dot{\psi}_t - \dot{\psi}_{\text{Ref},t})_{\text{max}}; \Delta \dot{\psi}_{t_n} = \dot{\psi}_{t_n} - \dot{\psi}_{\text{Ref},t_n}; \ddot{\psi}_{t_n}) = f(a_{y,0}) \quad (5.14)$$

Weitere charakteristische Kennwerte sind der maximale Schwimmwinkel  $\beta_{\text{max}}$ , die maximale Differenz des Schwimmwinkels im gesamten Auswertzeitraum (2 Sekunden) zum Ausgangswert  $\beta_{\text{max}} - \beta_0$  und zum Zeitpunkt  $t_n = 1 \text{ s}$  nach Lastwechsel  $\beta_{t_n} - \beta_0$ . Ebenso wird die Differenz aus der momentanen Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}_{t_n}$  und der berechneten Giergeschwindigkeit  $a_{y,t_n} / v_{x,t_n}$  zum Zeitpunkt  $t_n$

$$\dot{\beta}'_{t_n} = \dot{\psi}_{t_n} - \frac{a_{y,t_n}}{v_{x,t_n}} \quad (5.15)$$

zur Auswertung vorgeschlagen. Dieser Kennwert beschreibt den Schwimmwinkelgradienten zum Zeitpunkt  $t_n$  unter Vernachlässigung des aktuellen Schwimmwinkels und der eine Sekunde nach Lastwechselbeginn vorherrschenden Längsverzögerung des Fahrzeugs.

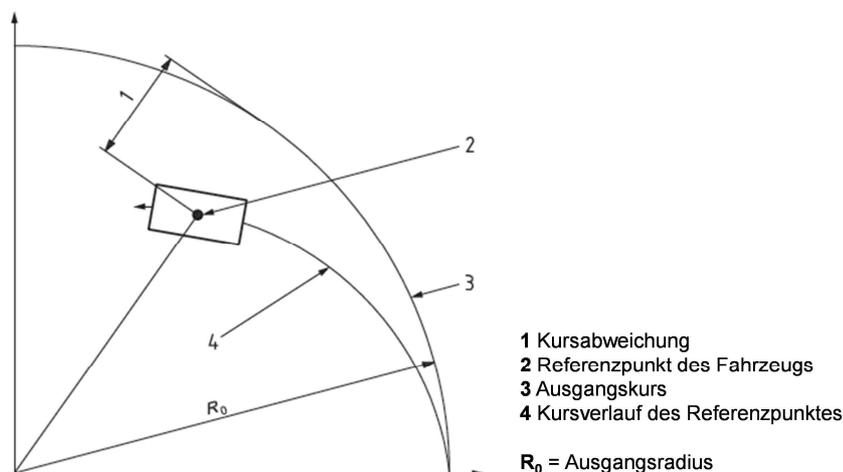


Bild 8.9 Bestimmung der Kursabweichung infolge Gaswegnahme in der Kurve nach ISO 9816<sup>543</sup>

Zusätzlich kann nach Bild 8.9 die Abweichung des Fahrzeugschwerpunktes (Referenzpunkt) von der ursprünglichen Kreisbahn  $\Delta y_{t_n}$  betrachtet werden. Hierbei wird der Auswertzeitraum zu  $t_n = 2$  s gewählt, während zur Bildung der übrigen Kenngrößen durch die Norm ein Auswertzeitpunkt von  $t_n = 1$  s nach Lastwechselbeginn empfohlen wird.

Nach der Zusammenfassung von Zomotor et al.<sup>544</sup> werden zur Beschreibung des Open-Loop-Fahrverhaltens (fixed control) infolge Lastwechsels neben den häufig verwendeten Ein-Sekundenwerten der Giergeschwindigkeits- und Querbeschleunigungsänderung<sup>545,546</sup> oder der Veränderung von Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung gegenüber ihren Referenzwerten<sup>547,548</sup> auch Kennwerte genannt, die sich auf die Veränderung des Bahnkurvenverhaltens des Fahrzeugs beziehen. Hierbei sind die Radiusveränderung bezogen auf den Ausgangsradius<sup>549,550,551</sup>, die Kursabweichung der Schwerpunktsbahn<sup>552,553</sup> oder der Fahrspurvergleich über der Fahrgeschwindigkeit<sup>554</sup> zu nennen. Lorenz et al. ziehen für einen Vergleich des Fahrverhaltens verschiedener Fahrzeuge sogar das Radwellenmoment bei Lastwechsel und beschleunigter Kreisfahrt heran.<sup>555</sup> Diese Vielzahl an Kennwerten belegt den Wunsch der bekannten Untersuchungen,

<sup>543</sup> ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method, S. 8

<sup>544</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>545</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

<sup>546</sup> Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

<sup>547</sup> Heißing et al. (1982): Vergleichende Messungen zum Fahrverhalten von PKW

<sup>548</sup> Heißing et al. (1983): Fahreigenschaften des vierradgetriebenen Audi Quattro

<sup>549</sup> Bantle et al. (1977): Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928

<sup>550</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

<sup>551</sup> Uffelmann (1981): Lastwechselreaktion des frontgetriebenen PKW bei Kurvenfahrt

<sup>552</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

<sup>553</sup> Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

<sup>554</sup> Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

Kennwerte zu identifizieren, die das Fahrverhalten verschiedener Fahrzeuge bestmöglich differenzierbar machen, ohne dabei jedoch eine konkrete Bewertung des Fahrverhaltens hinsichtlich der erzielten Fahrsicherheit vorzunehmen. Daher wurde zunächst ein sehr breites Spektrum an möglichen Kennwerten betrachtet. Heute hat sich analog zum Testmanöver „Bremsen in der Kurve“ die Giergeschwindigkeitsabweichung eine Sekunde nach Lastwechsel als wesentliches Beurteilungskriterium durchgesetzt.<sup>556</sup> Ein konkreter Bezug zur Beherrschbarkeit durch Normalfahrer wird hingegen nur von Otto im Jahr 1987 genannt, der als Grenzwert für das Gierbeschleunigungsverhalten einen „Gefährlichkeitsgrenzwert“ von  $\ddot{\psi}_{\text{grenz}} = 5^\circ/\text{s}^2$  anführt.<sup>557</sup> Oberhalb dieser Schwelle empfiehlt Otto zur Beurteilung des Fahrverhaltens infolge des Lastwechsels in der Kurve einen eigenen Kennwert aus der Summe der mittleren Giergeschwindigkeitsdifferenz zum Referenzwert  $\Delta\bar{\psi}_{\text{Ref},0,5\text{s}-1\text{s}}$ , geteilt durch die angenommene mittlere Reaktionszeit von 0,75 s, und der mittleren Gierbeschleunigung im Bereich zwischen 0,5 Sekunden und einer Sekunde, der als Bereich einer möglichen Lenkkorrektur angesehen wird.

$$\text{Kennwert(Otto)} = \frac{\Delta\bar{\psi}_{\text{Ref},0,5\text{s}-1\text{s}}}{0,75\text{s}} + \bar{\psi}_{0,5\text{s}-1\text{s}} \quad (5.16)$$

Unterhalb der genannten Gefährlichkeitsgrenze von  $5^\circ/\text{s}^2$  Gierbeschleunigung sollte nach Otto (1987) die Zeitdauer betrachtet werden, bis das kurveninnere Vorderrad in Open-Loop-Durchführung erstmalig den Fahrstreifen verlässt. Die Fahrstreifenbreite wird hierbei zu 3,5 m gewählt. Weitere Veröffentlichungen von Akzeptanzgrenzen sind für dieses Manöver nicht bekannt.

### 8.3.3 Übergangsverhalten

Das sogenannte Übergangsverhalten beschreibt das Fahrzeugverhalten in Manövern, die einen Übergang von Geradeaus- in Kreisfahrt oder von Kreisfahrt in Geradeausfahrt beinhalten. Hierzu zählen neben dem *Lenkwinkelsprung* und dem *Dreieckimpuls* trotz enger Verwandtschaft zu den Reaktions- und Ausweichtests (zugehörig zum Wechselkurvenverhalten) auch der *Fahrstreifenwechsel* und der *ISO-Spurwechsel*.

#### 1. Lenkwinkelsprung

Der *Lenkwinkelsprung* findet seit 1978 Verwendung und ist nach Zomotor et al. die älteste Methode zur Prüfung des Übergangsverhaltens.<sup>558</sup> 1988 wurde dieses Open-Loop-

<sup>555</sup> Lorenz et al. (1986): Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten

<sup>556</sup> Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

<sup>557</sup> Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

<sup>558</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

Testmanöver zusammen mit weiteren Prüfungsverfahren in der ISO-Norm 7401<sup>559</sup> zusammengefasst.

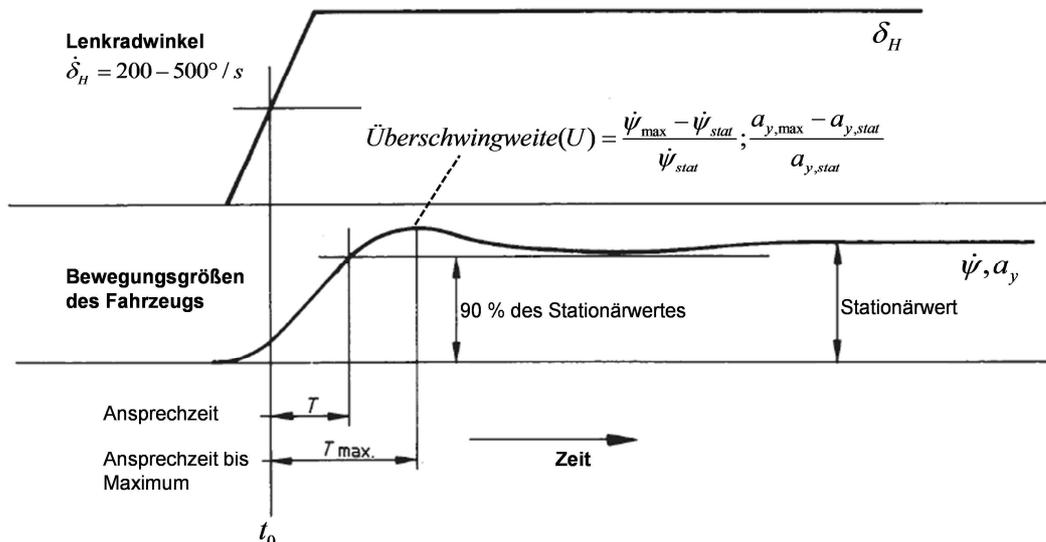


Bild 8.10 Durchführung und Auswertung des Lenkwinkelsprungs nach ISO 7401

Aus einer stationären Geradeausfahrt mit 80 km/h Fahrgeschwindigkeit wird der Lenkwinkel nach Bild 8.10 und ISO 7401 mit einer Lenkwinkelgeschwindigkeit zwischen  $\dot{\delta}_H = 200-500^\circ/s$  sprunghaft auf den Zielwert eingestellt. Der Zielwert des Lenkwinkels sollte einer stationären Querbeschleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$  (alternativ  $2 \text{ m/s}^2$  oder  $6 \text{ m/s}^2$ ) entsprechen. Die Fahrzeugreaktion, gemessen in Form der Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  und Querbeschleunigung  $a_y$ , folgt zeitverzögert nach und zeigt vor Erreichen des stationären Endzustandes eine für das jeweilige Fahrzeug charakteristische Überschwingweite  $U_{\dot{\psi};a_y}$ . Im Lenkwinkelsprung werden die Zeitverzögerungen bis Erreichen von 90 % des Stationärwertes bzw. des Maximums

$$T_{\dot{\psi};a_y} = t(\dot{\psi} = 0,9 \cdot \dot{\psi}_{stat}); t(a_y = 0,9 \cdot a_{y,stat}) \quad (5.17)$$

$$T_{\max,(\dot{\psi};a_y)} = t(\dot{\psi} = \dot{\psi}_{\max}); t(a_y = a_{y,\max}), \quad (5.18)$$

die bezogenen Überschwingweiten

$$U_{\dot{\psi};a_y} = \frac{\dot{\psi}_{\max} - \dot{\psi}_{stat}}{\dot{\psi}_{stat}} \cdot \frac{a_{y,\max} - a_{y,stat}}{a_{y,stat}} \quad (5.19)$$

und die stationäre Gierverstärkung

<sup>559</sup> ISO 7401 (1988): Lateral transient response test methods

$$GV_{stat} = \left( \frac{\dot{\psi}}{\delta_H} \right)_{stat} \quad (5.20)$$

als charakteristische Bewegungskenngrößen für das Fahrverhalten verwendet. Die Zeitverzögerung  $T_{\dot{\psi};a_y} / T_{\max,(\dot{\psi};a_y)}$  werden auf den Startzeitpunkt  $t_0$  bezogen, zu dem 50 % des späteren stationären Lenkradwinkels anliegen. Die Eignung und Anwendbarkeit dieser Kennwerte zur Beurteilung des Fahrverhaltens im Lenkwinkelsprung wird nach Zomotor et al.<sup>560</sup> in zahlreichen bekannten Publikationen bestätigt.<sup>561,562,563,564,565,566,567,568,569</sup> Vor Normierung des Lenkwinkelsprungs wird teilweise auch die auf den Stationärwert der Giergeschwindigkeit bezogene Gierreaktion  $\dot{\psi} / \dot{\psi}_{stat}$  betrachtet, siehe Zusammenfassung von Horn.<sup>570</sup> Der 1988 zunächst in der Norm enthaltene *TB-Wert* als das Produkt aus der Ansprechzeit  $T_{\max,\dot{\psi}}$  und dem stationär erzielten Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt  $\beta_{SP,stat}$

$$TB = T_{\max,\dot{\psi}} \cdot \beta_{SP,stat} \quad (5.21)$$

wurde hingegen inzwischen aus der Norm entfernt, da dessen Verwendbarkeit in Forschungskreisen umstritten ist. Während Zomotor et al.<sup>571</sup> auf gute Korrelationsergebnisse des TB-Wertes mit der Subjektivbeurteilungen von Testfahrern hinweisen, kritisiert z.B. Jürgensohn<sup>572</sup> die gefundenen Korrelationen als zu fahrzeugabhängig und somit nicht allgemein anwendbar. Speziell bei Fahrzeugen, die mit einer Hinterradverstellung ausgestattet sind und somit je nach Auslegung der Hinterachslenkung gar keine oder nur sehr geringe Schwimmwinkel  $\beta_{SP}$  aufweisen können, sei nach Jürgensohn keine signifikante Korrelation des TB-Wertes mit der Subjektivbeurteilung von Fahrern nachweisbar.

Als Maß für die Fahrstabilität gelten insbesondere die Überschwingweite und die Ansprechzeit. Bei zu großen Werten der Überschwingweite kann das Fahrzeug demnach

<sup>560</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>561</sup> Bantle et al. (1977): Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928

<sup>562</sup> Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

<sup>563</sup> Ehlich et al. (1983): Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern

<sup>564</sup> Kreutz et al. (2009): Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering

<sup>565</sup> Oberdieck et al. (1980): Identifizierung nichtlinearer Fahrzeugeigenschaften

<sup>566</sup> Reichelt (1984): Identifikationsmethoden für die Fahrdynamik

<sup>567</sup> Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

<sup>568</sup> Thies et al. (2009): Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb

<sup>569</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>570</sup> Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße, S. 22ff

<sup>571</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>572</sup> Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage

instabil werden.<sup>573</sup> Außerdem wird eine „ausreichend kleine“ Anstiegszeit und Überschwingweite gefordert.<sup>574</sup>

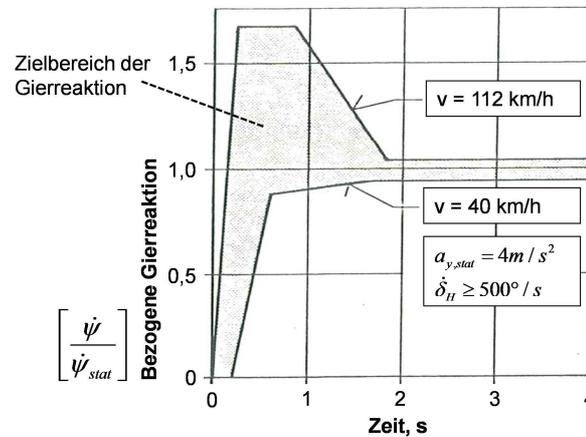


Bild 8.11 Vorgeschlagene Grenzkurven der Giergeschwindigkeitsreaktion auf einen Lenkwinkelsprung nach dem ESV-Projekt der USA (1969), abgebildet von Weir/Zellner<sup>575</sup>

Ein konkreter Vorschlag für Akzeptanzgrenzen wurde im Rahmen des ESV-Projekts (Enhanced Safety of Vehicles-Projekt) Ende der 60er-Jahre in den USA erarbeitet, abgebildet bei Weir/Zellner (1977): Demnach sollte die bezogene Gierreaktion bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten innerhalb einer skizzierten Hüllkurve bleiben, siehe Bild 8.11. Eine zu hohe Überschwingweite bei höheren Geschwindigkeiten (112 km/h) ist demnach ebenso zu vermeiden wie ein zu träges Ansprechen bei niedrigen Geschwindigkeiten (40 km/h). Horn kritisiert 1985 jedoch die Methodik zur Ableitung dieser Grenzkurven, da sie lediglich dem damals aktuellen Stand der Fahrzeuge in den USA angepasst worden seien.<sup>576</sup>

## 2. Dreieckimpuls

Ein weiteres in der ISO 7401 enthaltenes Open-Loop-Testmanöver ist der *Dreieckimpuls*, in dem das Fahrzeug aus stationärer Geradeausfahrt mit einem dreieckförmigen Lenkwinkelimpuls mit einer Impulsdauer von 0,3-0,5 s angeregt wird. Die Lenkradwinkelamplitude wird nach der Norm ebenfalls an einer stationären Querschleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$  bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h ausgerichtet. Ausgewertet wird der Frequenzgang bzw. das Übertragungsverhalten von Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  und Querschleunigung  $a_y$  über dem Lenkradwinkel  $\delta_H$

<sup>573</sup> Scholz et al. (2008): Aktive Fahrwerkssysteme am Beispiel einer neuen Hinterachslenkung

<sup>574</sup> Kreutz et al. (2009): Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering

<sup>575</sup> Weir, Zellner (1977): The Application of Handling Requirements to an RSV-Type Vehicle

<sup>576</sup> Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße, S. 28f

$$\left( \frac{\dot{\psi}}{\delta_H} \right); \left( \frac{a_y}{\delta_H} \right).$$

In Studien der jüngeren Vergangenheit (2005) zu objektiven Bewertungsverfahren für radschlupfbasierte Regelsysteme wird das Testmanöver *Dreieckimpuls* in leicht abgewandelter Form verwendet, um den Zielkonflikt zwischen der erzielten querdynamischen Performance und der verbleibenden Stabilität zu bewerten.<sup>577,578</sup> Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 100 km/h, während die Lenkradwinkelamplitude in einem breiteren Spektrum (50-270°) als in der Norm vorgesehen variiert wird. Als Kriterium für die querdynamische Performance wird von Fach et al. die maximal erzielte Querbeschleunigung  $a_{y,max}$  infolge des Dreieckimpulses gegen das Stabilitätskriterium des Schwimmwinkelintegrals über die gesamte Manöverdauer  $\int \beta_{SP}$  aufgetragen, siehe Bild 8.12.

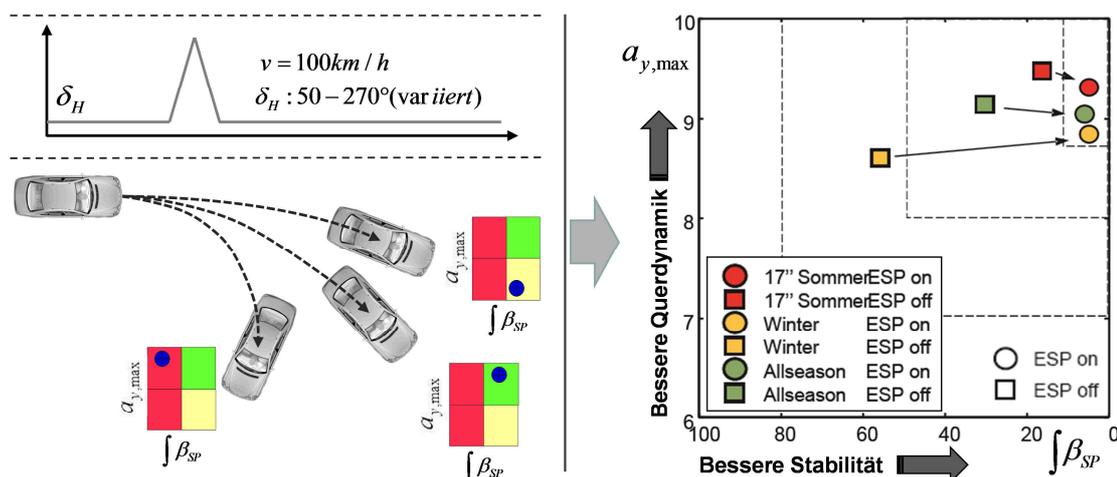


Bild 8.12 Bewertung des Zielkonflikts zwischen Stabilität und maximaler Querdynamik im Testmanöver Dreieckimpuls nach Fach et al.<sup>579</sup>

In der Gegenüberstellung von Fahrperformance und Stabilität nach Bild 8.12 (links) ist ein Fahrverhalten erwünscht, welches auf die Lenkeingabe mit einer ausreichenden Querbeschleunigung reagiert, dabei aber kein zu hohes Schwimmwinkelintegral aufweist. Die Studie verdeutlicht mit ihren Ergebnissen den stabilisierenden Einfluss des Regelsystems ESP bei im Einzelfall (Variante „Winter“) sogar gleichzeitig erhöhter Querdynamik, siehe Bild 8.12 (rechts). Konkrete Zielgrößen oder Akzeptanzgrenzen werden jedoch nicht genannt. Nach Keinert (2004) sind Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt größer 5° im Allgemeinen für den Fahrer jedoch kritisch zu beherrschen.

<sup>577</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

<sup>578</sup> Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

<sup>579</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme, S. 72ff

### 3. ISO-Spurwechsel

Das Testmanöver *ISO-Spurwechsel* ist nach Zomotor et al.<sup>580</sup> das heute am häufigsten durchgeführte Closed-Loop-Testverfahren und wurde bereits 1975 innerhalb der ISO-Normungsgremien diskutiert. Der durch drei Pylonengassen vorgegebene doppelte Spurwechsel lässt eine subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens in realen Ausweichsituationen im Bereich mittlerer bis höherer Fahrgeschwindigkeiten zu (üblicherweise bis maximal 120-140 km/h). Durch wechselseitige Lenkanregungen können je nach Anregungsfrequenz hohe Amplitudenausschläge der Fahrzeugreaktion resultieren.<sup>581</sup> Eine Normierung dieses in realen Versuchsfahrten ausschließlich im geschlossenen Regelkreis durchgeführten Closed-Loop-Testmanövers wurde zunächst nicht vorgenommen, da ein zu großer Fahrereinfluss auf die resultierenden objektiven Ergebnisse besteht.<sup>582</sup> Die Normierung dieses Testverfahrens in ISO 3888-1<sup>583</sup> folgt daher erst 1999 und beschreibt lediglich die Durchführung des ISO-Spurwechsels nach Bild 8.13.

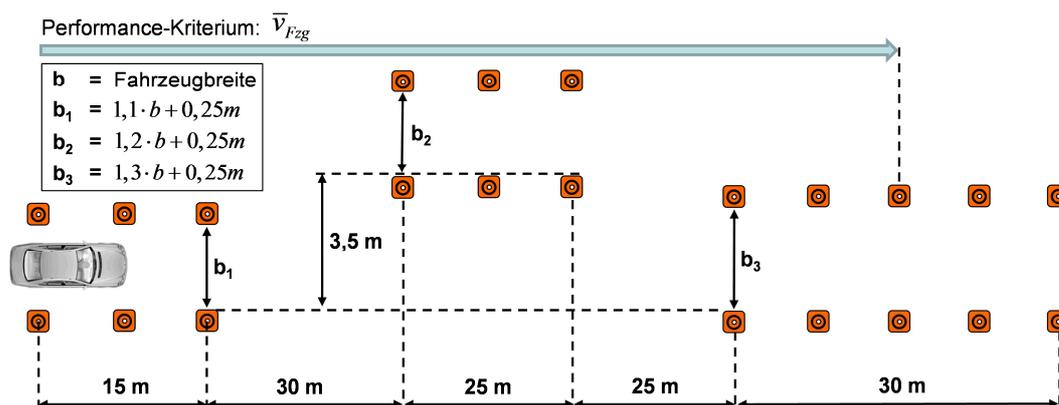


Bild 8.13 Abmaße des ISO-Spurwechsels nach ISO 3888-1

Um den Fahrereinfluss zu minimieren, ist die Breite der Pylonengassen  $b_1$ ,  $b_2$  und  $b_3$  von der Breite  $b$  des Fahrzeugs abhängig definiert und möglichst eng bemessen.<sup>584</sup> Charakteristische Bewegungskennwerte zur Beurteilung des Fahrverhaltens werden von der Norm aufgrund des Fahrereinflusses nicht vorgeschlagen.

Das gängige Hauptkriterium für die erzielte querdynamische Performance ist die maximal mögliche mittlere Durchfahrtsgeschwindigkeit  $\bar{v}_{Fzg}$  zwischen der Einfahrt in die erste Pylonengasse und der Mitte der letzten Pylonengasse.<sup>585,586</sup> Zur Bewertung des Fahr-

<sup>580</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>581</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>582</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

<sup>583</sup> ISO 3888-1 (1999): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change

<sup>584</sup> Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 24

<sup>585</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

verhaltens werden Maximalwerte, Mittelwerte, Integralwerte oder Zeitverzüge der Bewegungskennwerte untereinander von Schwimmwinkel  $\beta_{SP}$ <sup>587,588,589</sup>, Gierwinkel  $\psi$ <sup>590</sup>, Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  oder Gierbeschleunigung  $\ddot{\psi}$ <sup>591,592</sup>, Querb beschleunigung  $a_y$ <sup>593,594,595</sup>, Wankwinkel  $\varphi$ <sup>596</sup> und Lenkaufwand  $\delta_H$ <sup>597,598,599</sup> verwendet oder zusammengesetzte Kennwerte wie z.B. der *KD-Wert*<sup>600</sup>. Der KD-Wert wird nach Dibbern (1992) als Produkt der Differenz des maximalen Lenkradwinkels zwischen erstem und zweitem Fahrspurwechsel  $\Delta\delta_{\max,2}$  und dem Zeitverzug  $2,5\tau_{0(\delta,ay)}$  zwischen Lenkradwinkel und Querb beschleunigung aus der zugehörigen Kreuzkorrelationsfunktion gebildet:

$$KD = \Delta\delta_{\max,2} + 2,5\tau_{0(\delta,ay)} \quad (5.22)$$

Der KD-Wert korreliert nach Dibbern gut mit der Subjektivbeurteilung von Testfahrern. Die übrigen bekannten Aussagen zu Kennwerten mit der höchsten Korrelation zur Subjektivbeurteilungen sind unterschiedlich und lassen keine eindeutige Aussage zu: Nach Kudritzki erklärt die maximale Gierbeschleunigung  $\ddot{\psi}_{\max}$  die Subjektivbeurteilung am besten<sup>601</sup>, während Zomotor et al. die Subjektivbeurteilung hauptsächlich von der erforderlichen Lenkbewegung des Fahrers abhängig sehen.<sup>602</sup> Heißing/Brandl heben neben der erforderlichen Lenkarbeit zur Kurshaltung den Gierwinkel und die Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Lenkgeschwindigkeit hervor<sup>603</sup>, während Horiuchi et al. ihrerseits der Querb beschleunigung eine höhere Bedeutung für die Subjektivbeurteilung beimessen.<sup>604</sup>

Ein einheitlicheres Bild entsteht bei der Betrachtung von bekannten Gestaltungsmerkmalen für das Fahrverhalten im ISO-Spurwechsel. Nach Heißing/Brandl soll der Gier-

<sup>586</sup> Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

<sup>587</sup> Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

<sup>588</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>589</sup> Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

<sup>590</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>591</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>592</sup> Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>593</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>594</sup> Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

<sup>595</sup> Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

<sup>596</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>597</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>598</sup> Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

<sup>599</sup> Zomotor et al. (1974): Doppelter Fahrspurwechsel

<sup>600</sup> Dibbern (1992): Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel

<sup>601</sup> Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>602</sup> Zomotor et al. (1974): Doppelter Fahrspurwechsel

<sup>603</sup> Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

<sup>604</sup> Horiuchi, Yuhara (1996): Prediction of Vehicle Handling Qualities Using Multi-Input Driver Model

geschwindigkeitsaufbau zeitlich möglichst unverzögert und proportional zur Lenkgeschwindigkeit erfolgen. Eine Umkehrung dieses Zusammenhangs, d.h. ein träges Ansprechen der Gierreaktion, deutliche Phasenverzüge  $\phi_{\psi}$ , „hektische Übergänge“ und ein Ausbrechen des Fahrzeugs in Form hoher Schwimmwinkel sind nach Heißing/Brandl und Rau<sup>605</sup> zu vermeiden. Auch nach Bergmann<sup>606</sup> soll die Querkraft zur Vermeidung eines unsicheren Fahrverhaltens beim Wechsel der Lenkrichtung ohne spürbaren Zeitverzug folgen. Dies wird durch einen hohen Schwimmwinkelbeschleunigungskoeffizienten indiziert. Während dem Phasenverzug zwischen Gierreaktion bzw. Querbesehleunigung und den Lenkradwinkleingaben in der Literatur eine hohe Bedeutung beigemessen wird, konnte von Wesp in einer Studie aus dem Jahr 2008 bei konstanter Giervverstärkung keine signifikante Unterscheidung der Subjektivbeurteilung in Abhängigkeit der variierten Phasendifferenz zwischen Gierrate und Querbesehleunigung untereinander nachgewiesen werden.<sup>607</sup> Eine kurze Ansprechzeit  $T_{\psi}$  der Gierreaktion wird in einer Studie von Lincke et al. neben kleinen Schwimmwinkeln jedoch positiv beurteilt.<sup>608</sup>

Trotz der zahlreichen genannten Kriterien existieren für den ISO-Spurwechsel keine bekannten objektiven Akzeptanzgrenzen für das Fahrverhalten. Einzige Ausnahme ist die Betrachtung der Kippsicherheit eines Fahrzeugs, die dann erfüllt ist, wenn mindestens drei Räder des geprüften Fahrzeugs auf der Fahrbahn verbleiben.<sup>609</sup> Die überwiegende Anzahl der bekannten Studien zu Spurwechselmanövern wurde mit beruflichen Testfahrern durchgeführt. Aus der jüngeren Vergangenheit existieren aber auch Studien, die der Forderung von Braess/Seiffert<sup>610</sup> Rechnung tragen und den Normalfahrer aufgrund der im Vergleich deutlich unterschiedlichen Bewertungsmaßstäbe und Fahrfertigkeiten direkt mit einbeziehen. Hierdurch verschärft sich zunächst die ohnehin bestehende Problematik einer eingeschränkten Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Testpersonen. Neben den erwartungsgemäß hohen Abweichungen zwischen den Lenkstrategien verschiedener Fahrer wird in den bekannten Studien aber auch eine „intraindividuelle Stabilität“ der Lenkeingaben von einzelnen Testperson nachgewiesen<sup>611,612</sup> und von Neukum et al.<sup>613</sup> als „charakteristische Handschrift“ bezeichnet. Diese „Handschrift“ wird nach Neukum et al. auch in anspruchsvollen Situationen, z.B.

---

<sup>605</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>606</sup> Bergmann (1973): Measurement and Subjective Evaluation of Vehicle Handling

<sup>607</sup> Wesp et al. (2009): Die Systemauslegung von hinterachsgelenkten Fahrzeugen

<sup>608</sup> Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

<sup>609</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

<sup>610</sup> Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

<sup>611</sup> Jürgensohn et al. (1997): Die Handschrift des Lenkens

<sup>612</sup> Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control

<sup>613</sup> Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften?

einen Spurwechsel mit hoher Querb beschleunigungsanforderung, nicht verändert und beschränkt somit den Geschwindigkeitsbereich, den ein ungeübter Fahrer bewältigen kann. Abweichungen von diesem personenspezifischen Lenkmuster werden überdies bei hohen Anforderungen an den Fahrer im Lenkradwinkelverlauf sichtbar und vom Fahrer selbst als „Fahrfehler“ interpretiert. Als Ergebnis ihrer Analyse des ISO-Spurwechsels geben Neukum et al. den Bereich niedriger Anforderungen an den Fahrer im Bereich zwischen  $4\text{--}5\text{ m/s}^2$  Querb beschleunigung und den Bereich hoher Anforderungen oberhalb von  $7\text{ m/s}^2$  an. Während die Durchführung eines Spurwechsels mit Expertenfahren darauf abzielt, objektive Unterschiede bezüglich des Fahrverhaltens darzulegen und zu bewerten, z.B. zur Prüfung des Potentials einer aktiven Hinterachskinematik<sup>614</sup>, wird von Neukum et al. zur Erfassung von Subjektivurteilen in Studien mit Normalfahrern empfohlen, auf die Abfrage von konkreten Fahreigenschaften, wie z.B. „Ansprechverhalten“, „Direktheit“, „Fahrstabilität“ oder „Zielgenauigkeit“, zu verzichten und stattdessen eine Abfrage der Aufgabenschwierigkeit vorzunehmen.

### 8.3.4 Wechselkurvenverhalten

Die bekannten Manöver des Wechselkurvenverhaltens sind der *Frequenzgang* und dessen Sonderformen

- *Gierverstärkung*
- *Weavetest*
- *10 x 18 m Slalom*

Hinzu kommen das *Lenkungspendeln* und die mittlerweile überwiegend genormten Reaktions- und Ausweichtests, in deren Closed-Loop- oder Open-Loop-Durchführung entweder wechselseitige Fahrzeugreaktionen resultieren (Lenkungspendeln) oder das Fahrzeug durch wechselseitige Lenkeingaben angeregt wird (Reaktions- und Ausweichtests).

#### 1. Gierverstärkung (stationäres Übertragungsverhalten)

Das Testmanöver Gierverstärkung ist ein Open-Loop-Testverfahren und wird nach Rau<sup>615</sup> dazu verwendet, das stationäre Gierübertragungsverhalten des Fahrzeugs bei konstanter Querb beschleunigung im gesamten Geschwindigkeitsbereich zu ermitteln. Der Gierverstärkungsfaktor

$$\text{Gierverstärkung}(GV) = \frac{\dot{\psi}_{stat}}{\delta_{H,stat}} \quad (5.23)$$

<sup>614</sup> Donges et al. (1990): Funktion der aktiven Hinterachskinematik von BMW

<sup>615</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

beschreibt hierbei das stationäre Übertragungsverhalten der Giergeschwindigkeit, bezogen auf einen stationären Lenkradwinkel. Dieses Testmanöver ist dennoch im Bereich des Wechselkurvenverhaltens angesiedelt, da die Lenkanregung in Form eines Sinusfrequenzgangs mit einer Lenkfrequenz von 0,2 Hz erfolgt. Bei dieser geringen Lenkfrequenz kann eine quasistationäre Fahrzeugreaktion angenommen werden. Zur Ermittlung des Gierverstärkungsfaktors  $GV$  wird die Fahrgeschwindigkeit - beginnend bei  $v = 20$  km/h - in Schritten von  $\Delta v = 20$  km/h bis hin zur maximalen Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs gesteigert. Die Lenkradwinkelamplitude wird jeweils einer Querbeschleunigungsamplitude von  $4 \text{ m/s}^2$  angepasst.

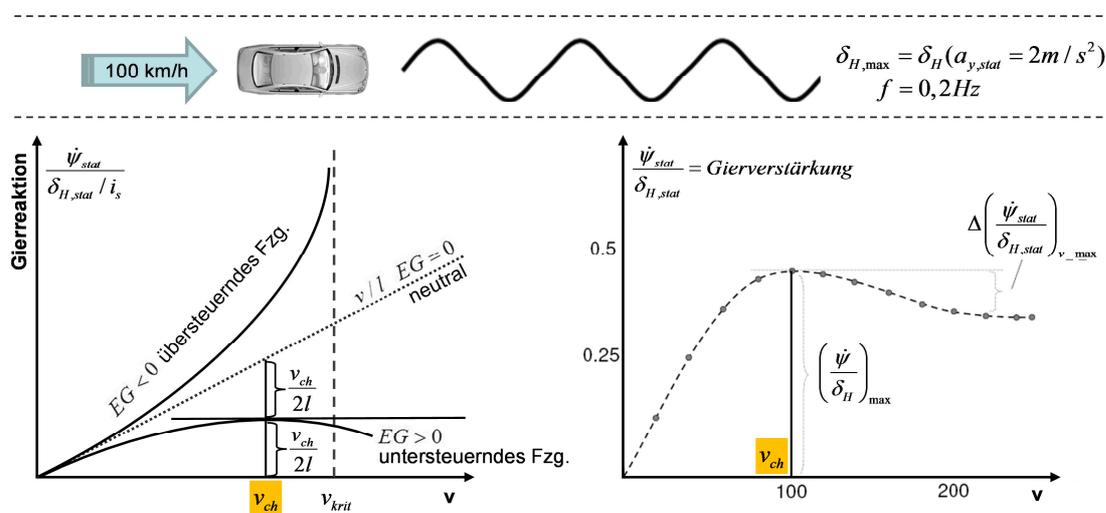


Bild 8.14 Charakteristische Gierreaktion in Abhängigkeit des Eigenlenkverhaltens (links) nach Zomotor<sup>616</sup> und gemessene Gierverstärkung eines heutigen Fahrzeugs (rechts) nach Rau<sup>617</sup>

Bild 8.14 (links) zeigt die charakteristische Gierreaktion eines Fahrzeugs in Abhängigkeit der drei unterschiedlichen Eigenlenkcharakteristika. Die Gierverstärkung eines untersteuernden Fahrzeugs erzielt nach Zomotor bei der charakteristischen Fahrgeschwindigkeit  $v_{ch}$  ihr Maximum und fällt im Anschluss stetig ab. Ein neutrales Fahrzeug ( $EG = 0$ ) zeigt hingegen einen linearen Anstieg der Gierverstärkung, deren Wert sich bei konstanter Lenkübersetzung  $i_s$  aus dem stationären Übertragungsverhalten

$$\left( \frac{\dot{\psi}}{\delta_H / i_s} \right)_{stat} = \frac{v}{l + EG \cdot v^2} \quad (5.24)$$

zu

<sup>616</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 112

<sup>617</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 38

$$\left( \frac{\dot{\psi}}{\delta_H / i_s} \right)_{EG=0,stat} = \frac{v}{l} \quad (5.25)$$

berechnet. Die Gierverstärkung eines übersteuernden Fahrzeugs strebt bei der kritischen Fahrgeschwindigkeit  $v_{krit}$  gegen unendlich. Die charakteristische Geschwindigkeit der heute ausnahmslos stationär untersteuernd ausgelegten Fahrzeuge liegt nach Zomotor im Bereich zwischen ca. 65-100 km/h.<sup>618</sup>

Der Vergleich der Gierverstärkung eines linearisierten Einspurmodells nach Bild 8.14 (links) mit dem gemessenen Gierverstärkungsverlauf eines realen Fahrzeugs in Bild 8.14 (rechts) bestätigt die Grundcharakteristik der untersteuernden Auslegung des geprüften Fahrzeugs. Neben der geforderten Untersteuertendenz sind weitere Auslegungskriterien für die objektiven Kenngrößen in diesem Testmanöver bekannt: Das Maximum der Gierverstärkung (bei  $v_{ch}$ ) sollte nach Rau<sup>619</sup> im unteren bis mittleren Fahrgeschwindigkeitsbereich liegen, um bei niedrigen Geschwindigkeiten ein „direktes“ Fahrverhalten zu vermitteln. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sollte die Lenkempfindlichkeit nach Rau hingegen abnehmen und eine größtmögliche Differenz zum Maximalwert der Gierverstärkung aufweisen. Diese Empfehlung ist plausibel, da die resultierende Querbeschleunigung bei konstanter Giergeschwindigkeit proportional zur Fahrgeschwindigkeit zunimmt.

$$a_{y,stat} = v \cdot \dot{\psi}_{stat} \quad (5.26)$$

Dies bedeutet, mit steigender Fahrgeschwindigkeit werden bei konstanter Lenkübersetzung  $i_s$  geringere Lenkradwinkelamplituden für eine identische Querbeschleunigung benötigt. Eine niedrigere Sensitivität der Gierbewegung des Fahrzeugs bei Hochgeschwindigkeit unterstützt somit den Fahrer in seiner Kursführungsaufgabe. Weir/Di Marco<sup>620</sup> geben den optimalen Auslegungsbereich der maximalen Gierverstärkung 1978 mit  $GV = 0,2-0,4$  /s an.

## 2. Frequenzgang (instationäres Übertragungsverhalten)

Während in stationärer Kreisfahrt bzw. dem zuvor genannten Testmanöver *Gierverstärkung* ausschließlich das stationäre Fahrverhalten eines Fahrzeugs geprüft wird, findet durch das Testmanöver *Frequenzgang* eine Erweiterung dieser Betrachtungen auf den instationären Bereich statt. Die Open-Loop-Durchführung des Frequenzgangs wurde 1988 im Rahmen der ISO 7401<sup>621</sup> genormt. Demnach wird das Fahrzeug bei einer Fahr-

<sup>618</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 115

<sup>619</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 38f

<sup>620</sup> Weir, Di Marco (1978): Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data

<sup>621</sup> ISO 7401 (1988): Lateral transient response test methods

geschwindigkeit von 80 km/h mit einer in der Frequenz variierten, sinusförmigen Lenkradwinkeleingabe beaufschlagt und reagiert nach einem Einschwingvorgang mit einer ebenfalls sinusförmig ausgeprägten Antwort der Bewegungsgrößen. Der geprüfte Frequenzbereich der sinusförmigen Lenkanregung sollte den Bereich bis ca. 4 Hz abdecken, wobei die konstante Lenkradwinkelamplitude  $\delta_{H,\max}$  entsprechend einer stationären Querschleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$  gewählt wird. Zur Auswertung sollten mindestens drei vollständige Sinusperioden durchlaufen werden. Ausgewertet werden die Amplitudengänge, die Verstärkungsfaktoren und die Phasengänge der relevanten Bewegungsgrößen des Fahrzeugs. Die Norm sieht 1988 eine Auswertung des Frequenzgangs für die Querschleunigung  $a_y$  und die Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  vor, heute werden jedoch gängiger Weise ebenfalls die Frequenzgänge des Schwimmwinkels  $\beta$  und des Wankwinkels ausgewertet sowie zusätzliche Fahrgeschwindigkeiten gewählt, siehe z.B. Rau<sup>622</sup>:

- Amplitudengänge

$$a_{y,\max}; \dot{\psi}_{\max}; \beta_{\max}; \varphi_{\max} = f(\text{Lenkfrequenz}) \quad (5.27)$$

- Verstärkungsfaktoren

$$\frac{a_y; \dot{\psi}; \beta; \varphi}{\delta_H} = f(\text{Lenkfrequenz}) \quad (5.28)$$

- Phasengänge

$$\phi_{\frac{a_y; \dot{\psi}; \beta; \varphi}{\delta_H}} = f(\text{Lenkfrequenz}) \quad (5.29)$$

Bild 8.15 (links) zeigt einen typischen Verlauf der Gierverstärkung über der Anregungsfrequenz für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten nach Rau. Durch die bereits bekannte Abhängigkeit der Gierverstärkung von der Fahrgeschwindigkeit resultiert bei niederfrequenten (quasistationären) Lenkanregungen bis hin zur charakteristischen Fahrgeschwindigkeit eine höhere Gierverstärkung als bei verminderter Fahrgeschwindigkeit. Die Gierverstärkung erzielt bei Durchlaufen der Giereigenfrequenz des Fahrzeugs ihr Maximum. Die Überhöhung der Gierverstärkung im Resonanzbereich fällt umso höher aus, je geringer die Gierdämpfung  $D_{\dot{\psi}}$  ist. Da die Gierdämpfung eines Fahrzeugs nach Zomotor<sup>623</sup> und Kapitel 2.1.2 mit der Fahrgeschwindigkeit abnimmt, treten bei höherer Fahrgeschwindigkeit tendenziell stärkere Überhöhungen der Gierverstärkung auf, die zu einer Instabilität des Fahrverhaltens führen können. Nach Durchschreiten des Resonanzbereichs fällt die Gierverstärkung mit steigender Lenkfrequenz ab. Der Phasenwin-

<sup>622</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 39

<sup>623</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 120

kel der Giergeschwindigkeit nach Bild 8.15 (rechts) verläuft entsprechend einem System zweiter Ordnung von ca.  $0^\circ$  Phasenverzug bei niedriger Anregungsfrequenz bis hin zu  $-90^\circ$  Phasenverzug bei hochfrequenter Anregung.

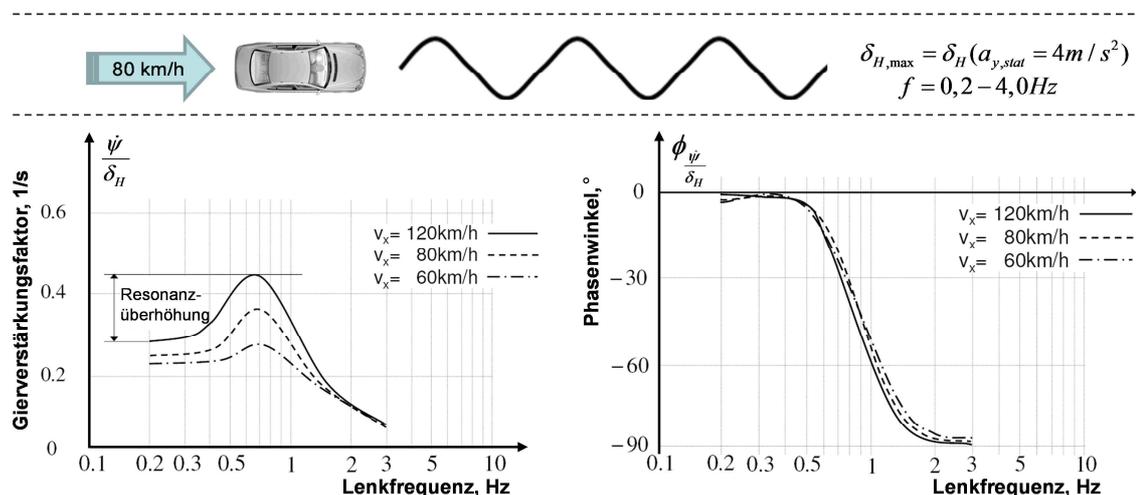


Bild 8.15 Ermittelte Gierverstärkungsverlauf (links) und Phasengang (rechts) der Giergeschwindigkeit in einem Frequenzgang nach Rau<sup>624</sup>

Für das Manöver *Frequenzgang* sind wenige Aussagen bekannt, die in einem direkten Zusammenhang mit der erzielten Fahrsicherheit des Fahrzeugs stehen. Aus den Ausführungen zur Stabilität des Fahrverhaltens bei instationärer Lenkanregung in Kapitel 2.1.2 nach Zomotor<sup>625</sup> kann jedoch das Ziel abgeleitet werden, die Resonanzüberhöhung im Bereich der Giereigenfrequenz durch eine ausreichende Gierdämpfung zu minimieren. Dies gilt speziell für den Hochgeschwindigkeitsbereich mit einer im Vergleich zu niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten deutlich verminderten Gierdämpfung. Weir/Di Marco<sup>626</sup> empfehlen für die Auslegung des Fahrverhaltens eine Gierdämpfung  $D_{\dot{\psi}}$  größer als 0,5. Zudem sollte die aus dem Übertragungsverhalten bei instationärer Lenkanregung bekannte Zählerzeitkonstante  $T_z$  kleiner als 0,3 s sein. Dies führt nach Weir/Di Marco zu einer Vergrößerung der Giereigenfrequenz  $\omega$ , wodurch das Fahrzeug bei niederfrequenten Anregungen durch den Fahrer stabiler ist. Die Giereigenfrequenz  $\omega$  sollte der Veröffentlichung nach oberhalb von 0,5 Hz liegen.

### 3. Weavetest

Der *Weavetest* ist ein 2003 ebenfalls der Normung unterworfenenes Open-Loop-Testmanöver<sup>627</sup> und kann in seiner Durchführung als Sonderfall des Frequenzgangs be-

<sup>624</sup> Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 39

<sup>625</sup> Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 117ff

<sup>626</sup> Weir, Di Marco (1978): Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data

<sup>627</sup> ISO 13674-1: Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave

trachtet werden (verminderte stationäre Querschleunigungsamplitude von  $2 \text{ m/s}^2$ , feste Lenkfrequenz von  $0,2 \text{ Hz}$  und eine Fahrgeschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$ ). Der Weavetest wird nach Braess/Seiffert vorwiegend zur Beurteilung des Lenkradmomentenverlaufs über dem Lenkradwinkel im Bereich der Lenkradmittenstellung verwendet und liefert Rückschlüsse auf die Kurskorrigierbarkeit bei kleinen Lenkanregungen auf gerader Strecke.<sup>628</sup>

Zur Auswertung werden Lenkmoment  $M_H$ , Querschleunigung  $a_y$ , Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  und Lenkradwinkel  $\delta_H$  gegeneinander aufgetragen und als Kennwerte insbesondere die jeweiligen Werte der Hysteresen und der Gradienten von  $M_H; a_y; \dot{\psi}$  um die Nulllage des Lenkradwinkels betrachtet, siehe z.B. Dettki.<sup>629</sup> Diese im Weavetest ermittelten Kennwerte werden von Zschocke dazu verwendet werden, die subjektive Beurteilung des Geradeauslaufs, der Lenkpräzision oder der Mittenzentrierung in Closed-Loop-Studien auf Überland- oder Autobahnfahrten zu erklären.<sup>630</sup>

#### 4. Lenkungspendeln

Durch das Testmanöver *Lenkungspendeln* erfolgt eine Beurteilung der Stabilität des Fahrzeugs bei plötzlich los gelassener Lenkung aus einer zuvor stationären Kreisfahrt heraus. Der Open-Loop-Test wurde 2002 genormt<sup>631</sup> und beschreibt die Durchführung bei einer Standardgeschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$  mit konstant gehaltener Fahrpedalstellung und variiert Ausgangsquerschleunigung  $a_{y,0}$ . Die Querschleunigung wird beginnend bei  $a_{y,0} = 1 \text{ m/s}^2$  in vorgeschlagener Schrittweite von  $\Delta a_y = 1 \text{ m/s}^2$  erhöht, bis entweder die Kraftschlussgrenze erreicht ist, oder das Fahrzeugverhalten instabil wird, d.h. keine Selbststabilisierung bei freier Lenkung mehr vorhanden ist und das Fahrzeug sich bei frei gegebener Lenkung „aufschaukelt“.

Als charakteristische Kennwerte werden das Verhältnis des ersten und zweiten Maximums nach Freigabe des Lenkrads von Schwimmwinkel  $\beta_{SP}$ , Gierrate  $\dot{\psi}$  und Lenkradwinkel  $\delta_H$

$$\frac{(\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,1}}{(\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,2}} = f(a_{y,0}), \quad (5.30)$$

die Werte des zweiten Maximums nach Freigabe des Lenkrads

<sup>628</sup> Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

<sup>629</sup> Dettki (1997): Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von PKW

<sup>630</sup> Zschocke (2009): Objektive und subjektive Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen, S. 113ff

<sup>631</sup> ISO 17288-1 (2002): Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method

$$(\beta_{SP}; \psi; \delta_H)_{\max,2} = f(a_{y,0}) \quad (5.31)$$

und die Verzugszeiten der ersten Maxima von Querschleunigung und Lenkradwinkel bezogen auf den Zeitpunkt  $t_{50}$

$$t_{a_{y,\max,1}}; t_{\delta_{H,\max,1}} = f(a_{y,0}), \quad (5.32)$$

verwendet. Der Zeitpunkt  $t_{50}$  beschreibt hierbei den Zeitpunkt, zu dem der Lenkradwinkel nach Lenkradfreigabe erstmals auf 50 % des Ausgangslenkradwinkels  $\delta_{H,0}$  zurückgefallen ist.

Obwohl der Untersuchungsinhalt dieses Testmanövers das Thema Fahrstabilität behandelt, sind keine über die Normierung hinaus gehenden Informationen zur Korrelation der genannten Kennwerte mit Subjektivurteilen bekannt. Ebenfalls wurden auf Basis der genannten Kennwerte bisher keine objektiven Auslegungskriterien abgeleitet.

### 5. Reaktions- und Ausweichtests (VDA, Elchtest, ADAC Ausweichtest)

Neben dem ISO-Spurwechsel aus ISO 3888-1<sup>632</sup>, der in der Norm als Spurwechseltest definiert wurde und somit dem Übergangverhalten zugeordnet ist, existieren weitere Closed-Loop-Testverfahren, die explizit der Kategorie der Reaktions- und Ausweichtests zugeordnet werden: Der *VDA-Ausweichtest*, der *Elchtest* und der *ADAC-Ausweichtest*.

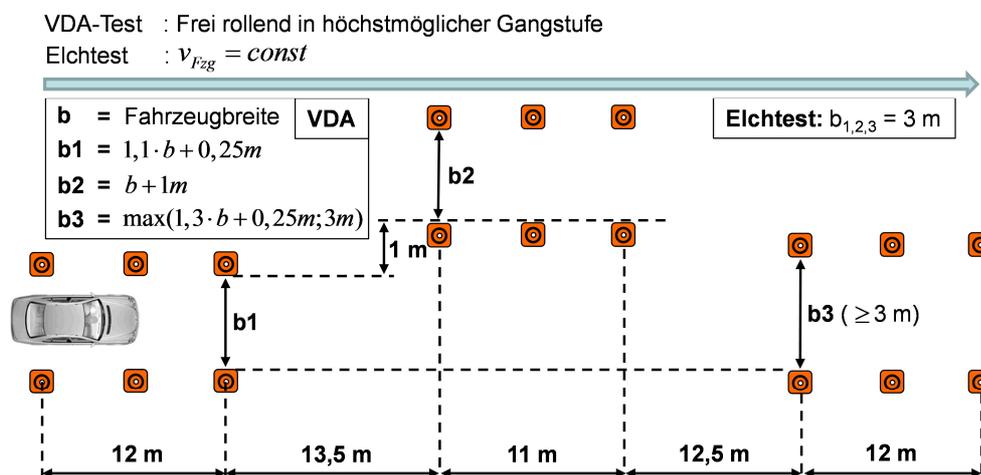


Bild 8.16 Abmaße des VDA-Ausweichtests nach ISO 3888-2 und des sogenannten „Elchtests“

Der 2002 in ISO 3888-2<sup>633</sup> ebenfalls genormte VDA-Ausweichtest nach Bild 8.16 basiert auf dem bereits zuvor bekannten „Elchtest“ und wurde mit der Zielsetzung ange-

<sup>632</sup> ISO 3888-1 (1999): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change

<sup>633</sup> ISO 3888-2 (2002): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance

passt – analog der Definition des ISO-Spurwechsels – den Handlungsspielraum der Testfahrer zu minimieren, um besser vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Der Unterschied zwischen dem genormten VDA-Ausweichtest und dem Elchtest aus Bild 8.16 besteht zum einen in der beim VDA-Test von der Breite  $b$  des Fahrzeugs abhängigen Fahrgassenbreite, zum anderen erfolgt die Durchfahrt des VDA-Tests frei rollend in der höchstmöglichen Gangstufe, während die Fahrgeschwindigkeit beim Elchtest konstant gehalten wird.

Zwar wird der ISO-Spurwechsel in der Literatur deutlich häufiger behandelt als der VDA- oder Elchtest, die Bewertungskriterien des VDA-Ausweichtests sind nach Heiβing/Ersoy<sup>634</sup> jedoch mit den Kriterien des ISO-Spurwechsels vergleichbar: Demnach sollte die Gierreaktion des Fahrzeugs den Lenkeingaben des Fahrers möglichst ohne Phasenverzug folgen, während „hektische Überreaktionen“ oder eine hohe Trägheit des Fahrzeugs mit großen erforderlichen Lenkkorrekturen unerwünscht sind. Zusätzlich kann dieses Testmanöver genutzt werden, um die Wirksamkeit von elektronischen Stabilisierungssystemen hinsichtlich Kipp- und Schleudersicherheit zu bewerten und abzusichern. Die bekanntesten objektiven Kriterien sind die maximal mögliche Einfahrtsgeschwindigkeit in den VDA-Test  $v_{\max,0}$  und die im Anschluss an die Durchfahrt des Tests verbleibende Ausfahrtsgeschwindigkeit  $v_{\text{Austritt}}$ . Ein Fahrzeug mit hohem querdynamischen Potential und stabiler Hinterachse wird auch bei schneller Einfahrt in die Startgasse im Verlauf des Ausweichtests nur in geringem Maße durch Regelsysteme abgebremst, während kippgefährdete Fahrzeuge mit hoher Schwerpunktlage oder tendenziell zu Instabilität der Hinterachse neigende Fahrzeuge durch die zur Stabilisierung benötigten intensiven Radbremseingriffe verstärkt abgebremst werden. Der VDA-Test erfreut sich daher in Vergleichstests bekannter Automobil-Journale großer Beliebtheit.

Ein weiterer bekannter Ausweichtest ist der vom Allgemeinen Deutschen Automobil-Club e.V. (ADAC)<sup>635</sup> zur Beurteilung der „allgemeinen Stabilität“ durchgeführte *ADAC-Ausweichtest*. In diesem Test erfolgt abweichend zum ISO-Spurwechsel und VDA-Ausweichtest ein explizites Ausweichen von einem durch Pylonen angezeigten Hindernis in Ausgangsfahrtrichtung. Die Durchführung dieses Closed-Loop-Testverfahrens erfolgt im Schubbetrieb der höchstmöglichen Gangstufe, die eine Drehzahl größer 2000 U/min zulässt, und mit einer minimal variierten Einfahrtsgeschwindigkeit von ca.  $\pm 90$  km/h. Die Lenkradwinkeleingaben werden – abweichend zur Gestaltungsprämisse des VDA-Tests – ebenfalls bewusst variiert, um das Fahrzeugverhalten bei verschiedenen Lenkanregungen zu beurteilen.

---

<sup>634</sup> Heiβing, Ersoy (2008): Fahrwerkhandbuch, 2. Auflage

<sup>635</sup> Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (2000): Der ADAC Ausweichtest – Nie ohne ESP

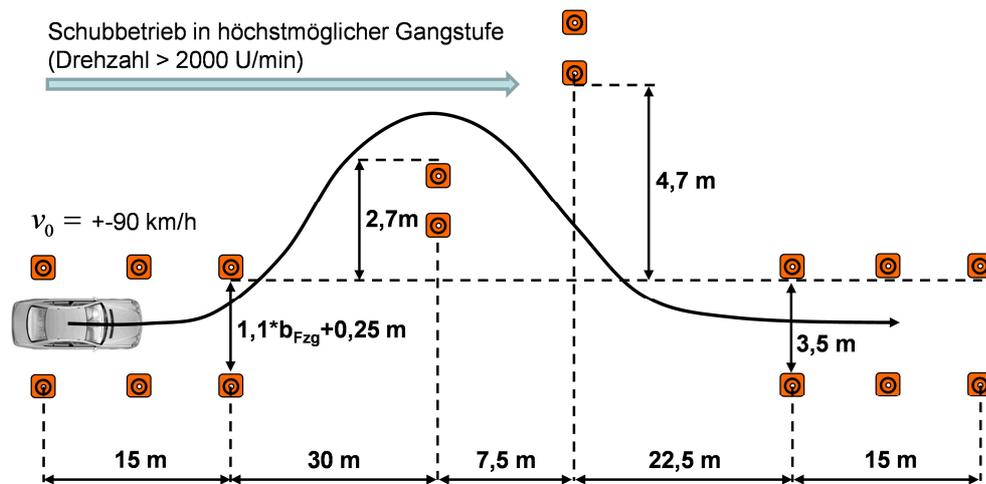


Bild 8.17 Abmaße des ADAC-Ausweichtests, Durchführung (ohne Maßangaben) beschrieben in ADAC<sup>636</sup>

Charakteristische Bewegungskennwerte zur Beurteilung der „allgemeinen Stabilität“ werden vom ADAC nicht genannt. Die Beurteilung erfolgt subjektiv.

## 6. 10x18 m Slalom

Die Durchführung des *10x18 m Slaloms* ist vor allem aus Testberichten der Automobil Fachpresse bekannt. Der Slalom wird hierbei als Closed-Loop-Test mit dem Ziel durchgeführt, die maximal mögliche mittlere Durchfahrtsgeschwindigkeit  $\bar{v}_{\max}$  des Testfahrzeugs zu ermitteln. Daher resultiert kein idealer Sinusverlauf des Lenkradwinkels. Neben dieser in Presetests üblichen Gegenüberstellung von  $\bar{v}_{\max}$  existieren keine gängigen objektiven Kennwerte zur Beurteilung des Fahrverhaltens im Slalom-Test. Das Testverfahren wird in der heutigen Fahrzeugentwicklung jedoch – gemeinsam mit weiteren Testmanövern wie z.B. dem VDA-Test - dazu verwendet, die Kippsicherheit eines Fahrzeugs infolge hochdynamischer, wechselseitiger Anregung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu bewerten und abzusichern.

## 7. NHTSA Sine with dwell und NHTSA Fishhook

Seit der Einführung des elektronischen Stabilitäts-Programms *ESP*<sup>637</sup> Ende der 90er-Jahre wird die Frage nach der Wirksamkeit der verbauten Bremsregelsysteme zur Vermeidung von Schleuderunfällen und zur Erhöhung der Kippsicherheit von Kraftfahrzeugen diskutiert und untersucht.<sup>638,639,640,641</sup> Hierbei nimmt die amerikanische Sicher-

<sup>636</sup> Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (2000): Der ADAC Ausweichtest – Nie ohne ESP

<sup>637</sup> Auch bekannt unter den Bezeichnungen: *DSC* (Dynamic Stability Control), *ESC* (Electronic Stability Control) und *VSC* (Vehicle Stability Control) sowie markenspezifischen Bezeichnungen, z.B. *PSM* (Porsche Stability Management)

<sup>638</sup> Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

<sup>639</sup> Faulhaber (2003): Wirksamkeit und Akzeptanz des ESP durch Normalfahrer

<sup>640</sup> Papelis et al. (2004): Study of ESC Assisted Driver Performance Using a Driving Simulator

heitsbehörde NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) in den letzten Jahren international eine führende Rolle ein. Die NHTSA startet nach Forkenbrock<sup>642</sup> 2004 ein Programm zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens mit ESP bzw. zur Definition von geeigneten Open-Loop-Testverfahren zum Nachweis eines „effektiven Stabilisierungssystems“. <sup>643</sup> Die heute von der NHTSA bevorzugten Testmanöver sind der *Sine with dwell* (Sinus mit Verweildauer) und *Fishhook* (Fischhaken) Test. <sup>644</sup>

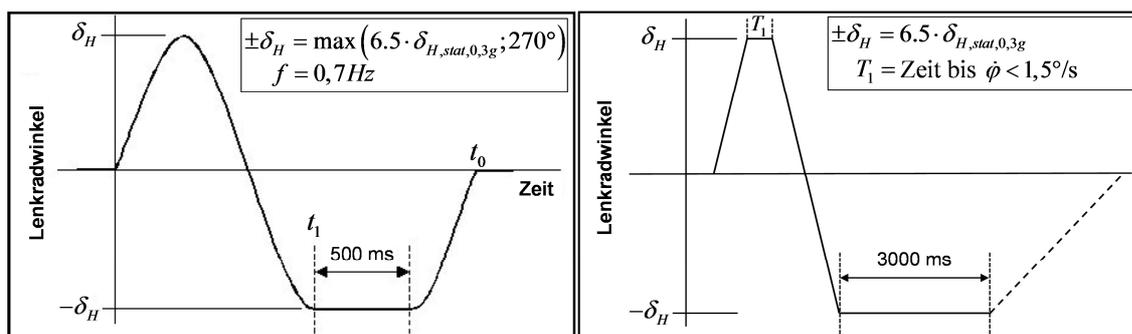


Bild 8.18 Open-Loop-Lenkradwinkeleingaben des *Sine with dwell* Tests (links)<sup>645</sup> und des *Fishhook* Tests (rechts)<sup>646</sup>

Die Lenkeingabe des *Sine with dwell* Tests nach Bild 8.18 (links) erfolgt mittels Lenkmaschine und besteht aus einer vollen Sinusperiode mit einer festen Frequenz von  $f = 0,7$  Hz und einer festen Verweildauer bei Erreichen der zweiten Amplitude von 500 ms. Durch den *Sine with dwell* Test wird ein Ausweichmanöver auf ein plötzlich auftretendes Hindernis nachgestellt. Die Amplitude des Lenkradwinkels wird ausgehend vom Bereich mittlerer Querschleunigungen bis maximal  $270^\circ$  oder dem 6,5-fachen des benötigten Lenkradwinkels  $\delta_{H,stat,0,3g}$  für eine stationäre Querschleunigung von  $3 \text{ m/s}^2$  gesteigert. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt zunächst 80 km/h und kann gesteigert werden. Während der *Sine with dwell* Test vor allem die Effizienz von elektronischen Regelsystemen zur Stabilisierung des Gierverhaltens zeigen soll, zielt der *Fishhook* Test auf den Nachweis der Wirksamkeit von Kippvermeidungslogiken. <sup>647</sup> Aus diesem Grund ist die Lenkeingabe des *Fishhook* Tests an das Wankverhalten des Testfahrzeugs gekoppelt. Hierbei wird das Lenkrad nach Bild 8.18 (rechts) durch eine Lenkmaschine zunächst mit der festen Lenkgeschwindigkeit von  $720^\circ/\text{s}$  aus der Neutralstellung auf das 6,5-fache von  $\delta_{H,stat,0,3g}$  eingeschlagen. Kurz vor Erreichen des maximalen

<sup>641</sup> Yamamoto, Kimura (1996): Influence of ABS on Rollover Accidents

<sup>642</sup> Forkenbrock (2005): NHTSA's Light Vehicle Handling and ESC Effectiveness Research Program

<sup>643</sup> Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

<sup>644</sup> Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

<sup>645</sup> NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-5

<sup>646</sup> NHTSA (2001): Notice of Proposed Rulemaking

<sup>647</sup> Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

Wankwinkels, detektiert durch ein Unterschreiten der Wankgeschwindigkeit  $\dot{\phi}$  von  $1,5^\circ/\text{s}$ , wird ein Gegenlenken mit einer im Betrag identischer Lenkgeschwindigkeit und Lenkradwinkelamplitude ausgelöst. Die Lenkradwinkelamplitude wird anschließend für eine feste Zeitdauer von 3000 ms gehalten. Durch diese Rückkopplung des Gegenlenkbegins an die Wankbewegung des Fahrzeugs soll die Kombination aus einer starken Wankreaktion und einer anschließend über einen längeren Zeitraum gehaltenen, hohen Quereschleunigung geprüft werden.<sup>648</sup> Zur Bewertung der Testergebnisse beider NHTSA Manöver wurden objektive Kriterien definiert.

### **Bewertungskriterien Fishhook:**

Während des Fishhook Tests müssen zu jedem Zeitpunkt mindestens drei Räder direkten Kontakt zur Fahrbahn besitzen. Ist dies nicht der Fall, wird von einem sogenannten „Two Wheel Lift“ (TWL) gesprochen und das Manöver gilt als nicht bestanden. Der TWL ist nach Forkenbrock<sup>649</sup> die beste Methode zum Nachweis der Wirksamkeit von Kippvermeidungslogiken radschlupfbasierter Regelsysteme. Darüber hinaus sollte kein Felgenkontakt mit der Fahrbahn auftreten und kein Reifendruckverlust erfolgen.<sup>650</sup>

### **Bewertungskriterien Sine with dwell:**

Das Testfahrzeug muss infolge der Lenkeingabe einen ausreichenden Querversatz erzielen und darf nach Forkenbrock nicht ins Schleudern geraten. Diese Zielsetzung wird nach FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) No. 126<sup>651</sup> durch den maximal auftretenden Gierwinkel  $\psi_{\max}$ , die verbleibende Gierrate  $\dot{\psi}(t_o + 1,0\text{s}); \dot{\psi}(t_o + 1,75\text{s})$  zu den Zeitpunkten eine Sekunde und 1,75 Sekunden nach Beendigung der Lenkeingaben (Zeitpunkt  $t_o$ ) und des erzielten Querversatzes  $\Delta y$  zu Beginn der Verweildauer ( $t_1$ ) bewertet. Der Querversatz wird mittels Aufintegration der horizontalen Quereschleunigung  $a_{y,h}$  bestimmt.

$$\Delta y(t_1) = \int_0^{t_1} \int_0^{t_1} a_{y,h} dt' dt'' \quad (5.33)$$

Die Anforderungen an die Querstabilität sind erfüllt, wenn der maximale Gierwinkel  $\psi_{\max}$  kleiner als  $90^\circ$  bleibt, die Gierrate eine Sekunde nach Beendigung der Lenkeingaben mindestens auf 35 % der maximalen Gierrate  $\dot{\psi}_{\max}$  abgefallen ist und nach 1,75 s mindestens auf 20 % der maximal aufgetretenen Gierrate  $\dot{\psi}_{\max}$ .

<sup>648</sup> Forkenbrock (2005): NHTSA's Light Vehicle Handling and ESC Effectiveness Research Program

<sup>649</sup> Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

<sup>650</sup> Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

<sup>651</sup> NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-7ff

$$\text{Kriterium 1:} \quad \Delta\psi_{\max} < 90^\circ \quad (5.34)$$

$$\text{Kriterium 2:} \quad \frac{\dot{\psi}(t_o + 1s)}{\dot{\psi}_{\max}} \leq 35\% \quad (5.35)$$

$$\text{Kriterium 3:} \quad \frac{\dot{\psi}(t_o + 1,75s)}{\dot{\psi}_{\max}} \leq 20\% \quad (5.36)$$

Der geforderte Seitenversatz  $\Delta y(t_1)$  muss bei Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) unterhalb von 3500 kg mindestens 1,83 m betragen, oberhalb von 3500 kg zGG genügen hingegen 1,22 m Seitenversatz.

$$\text{Kriterium 4.1 (zGG} \leq 3500 \text{ kg):} \quad \Delta y(t_1) \geq 1,83\text{m} \quad (5.37)$$

$$\text{Kriterium 4.2 (zGG} > 3500 \text{ kg):} \quad \Delta y(t_1) \geq 1,22\text{m} \quad (5.38)$$

Durch die Forderung eines verminderten Seitenversatzes von nur 1,22 m bei schweren Nutzfahrzeugen (zGG > 3500 kg) wird in FMVSS No. 126<sup>652</sup> einer verringerten Querperformance aufgrund der stärkeren Eingriffe des Regelsystems zur Kippvermeidung bei dieser Fahrzeugklasse Rechnung getragen.

Als ein Resultat des in diesen Tests nachgewiesenen Nutzens von ESP müssen ab dem 1. September 2011 alle neuen Fahrzeugmodelle – bis auf wenige Ausnahmen – in den USA und Kanada mit ESP ausgestattet sein. Ab 1. September 2012 müssen zusätzlich alle Anforderungen aus der FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) No. 126 erfüllt werden, u.a. eine erfolgreiche Absolvierung des Sine with dwell Tests. Das Europäische Parlament folgt der ESP-Pflicht für neue Fahrzeugmodelle ab 1. November 2011 und verabschiedet zusätzlich eine ESP-Pflicht für alle Neuzulassungen ab 1. November 2014. Bereits seit 2009 ist es zudem nicht mehr möglich, die höchste Bewertung („Fünf Sterne“) des renommierten Euro NCAP Testprogramms zur ganzheitlichen Bewertung der Fahrzeugsicherheit zu erhalten, wenn das Fahrzeug nicht mit ESP ausgestattet ist oder trotz verbautem ESP den Sine with dwell Test der NHTSA nicht erfolgreich absolviert hat.<sup>653,654</sup>

<sup>652</sup> NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-8ff

<sup>653</sup> Euro NCAP (2011): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 5.1

<sup>654</sup> Euro NCAP (2012): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 6.0

## 9 Quellen

- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (<http://www.adac.de>): Der ADAC Ausweichtest – Nie ohne ESP, 2000
- Amberkar, S.; Kushion, M.; Eschtruth, K.; Bolourchi, F.: Diagnostic development for an electric power steering system, SAE Technical Paper 2000-01-0819, 2000
- Armbruster, C.: Fahrdynamikuntersuchung von Fahrspurwechsel mit Längsverzögerung, Diplomarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2006
- Bachmann, T.; Bielaczek, C.; Breuer, B.: Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn und dessen Inanspruchnahme durch den Fahrer, ATZ 97, H.10, 1995, S. 658-667
- Bantle, M.; Braess, H.-H.: Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928, ATZ 79, Nr. 9, 1977
- Baumann, F.-W.: Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, Dissertation, Darmstadt, 2003
- Bergman, W.: Measurement and Subjective Evaluation of Vehicle Handling, SAE-Paper 730492, 1973
- Bewersdorff, S.; Pfau, J.; Roeder, S.: Simulation und Bewertung von Fahrdynamikeigenschaften im Grenzbereich, in: Sonderausgabe ATZ und MTZ 1, Springer Verlag, Berlin, Juni 2007, S. 56-59
- Bortz, J.; Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 7. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- Bösch, P.: Der Fahrer als Regler, Dissertation, Technische Universität Wien, 1991
- Braber, A.; Bukman, E.: Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens bei Ausweichmanövern, Diplomarbeit, Hogeschool van Arhem en Nijmegen, Daimler-Benz AG, Stuttgart, 1998
- Braess, H.-H.; Donges, E.: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - "Konsumierbare" oder echte Verbesserungen?, Tagung Aktive Sicherheit, München, 2006
- Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2002
- Braun, H., Ihme, J.: Definition kritischer Situationen im Kraftfahrzeugverkehr – Eine

- Pilotstudie. Automobilindustrie Nr. 3, 1983
- Bruder, R.; Abendroth, B.; Landau, K.: Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007, S. 79-95
- Bruder, R.; Fuchs, K.; Abendroth, B.; Schramm, T.: Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens in Serie und Motorsport, erschienen in: „Wie realitätsnah lässt sich Fahrerverhalten messen?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2009
- Brunkow, D.: Ermittlung von Kennwerten zur objektiven Fahrzeugbeurteilung, Diplomarbeit, FH Esslingen, 1997
- Bubb, H.: Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?, VDI-Bericht Nr. 1768, Düsseldorf, 2003, S. 257-268
- Bundesministerium für Verkehr: Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA-95), 4. überarbeitete Auflage, FGSV-Verlag GmbH, Köln, 2001
- Cheng, B.; Fujioka, T.: A hierarchical driver model, in: Proceedings of IEEE Conference on intelligent Transportation Systems, 1997, S. 960-965
- Dettki, F.: Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von PKW, in: VDI-Bericht 1335, 1997
- Dibbern, K.: Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel in Versuch und Simulation, in: VDI-Fortschrittberichte, Reihe 12, Nr. 164, 1992
- Diebold, L.; Schindler, W.; Haug, J.; Daesch, C.; Lahti, M.: Einspurmodell für die Fahrdynamiksimulation und -analyse, in: ATZ 11/2006, Jahrgang 108, 2006, S. 962-967
- Dietrich, P.: Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten des Menschen als Kraftfahrzeugführer auf Basis objektiver Fahrdynamiktests, Diplomarbeit, Hochschule Esslingen, 2009
- DIN 70000: Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, modifizierte Ausgabe, 1991
- Donges, E.: A two-level model of driver steering behaviour, in: Human Factors 20, 1978, S. 691-707
- Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen, Automobil-Industrie 27, 1982, S. 183-190
- Donges, E.: Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium für Maßnahmen zur

- Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem, in: Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, VDI-Berichte 948, Düsseldorf, 1992
- Donges, E.: Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt, Dissertation, TH Darmstadt, 1977
- Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle, in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009, S. 15-23
- Donges, E.; Auffhammer, R.; Fehrer, P.; Seidenfuß, T.: Funktion und Sicherheitskonzept der aktiven Hinterachskinematik von BMW, in: ATZ 92, Nr. 10, 1990
- Donges, E.; Rompe, K.: Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren, TÜV Rheinland, Köln, 1982
- Donges, E.; Wimberger, J.: Performance und Safety Requirements for Auxiliary Steering Equipment explained by means of the Example of BMW's Active Rear-Axle Kinematics (ARK), AVEC Yokohama, 1992
- Dragon, L.: FADYS, ein komplexes Fahrdynamikmodell für echtzeitfähige HIL-Anwendungen, VDI-Berichte 128, 1996, S. 117-130
- Ehlich, J.; Donges, E.; Rompe, K.: Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern unterschiedlicher Bauart, in: Automobil-Industrie 1983/3
- Enke, K. (1966b): Überlegungen zum Zusammenwirken von Fahrzeuglenker und Automobil, Automobil-Industrie 1, 1966, S. 37-44
- European New Car Assessment Programme (Euro NCAP): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 6.0, 2012
- European New Car Assessment Programme (Euro NCAP): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 5.1, 2011
- Fach, M.; Breuer, J.; Baumann, F.; Nuessle, M.; Unselt, T.: Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme der Aktiven Sicherheit, XXV. Internationales  $\mu$ -Symposium, Bad Neuenahr, 2005, S. 58-80
- Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- Faulhaber, A.: Wirksamkeit und Akzeptanz des Fahrdynamikregelsystems Electronic Stability Program (ESP) beim Einsatz durch Normalfahrer, Dissertation, TU-Darmstadt, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2003

- Fiala, E.; Wallner, F.: Untersuchung des Systems Fahrzeug-Fahrer bei einer Lenkung mit Zeitvorhalt, Forschungsbericht 47, Institut für Kraftfahrzeugtechnik der TU Berlin, Berlin, 1968
- Fiat: Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures, ISO/TC 22/SC 9: Vehicle dynamics and road-holding ability, documents 84 and 85, 1975
- Forkenbrock, G.-J. (NHTSA / VRTC): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program, 19<sup>th</sup> ESV Conference, Washington D.C., 2005
- Forkenbrock, G.-J.; Elsasser, D.-H.: (NHTSA / VRTC): A Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology, Presentation, 2008
- Forkenbrock, J.; Elsasser, D.-H.; O`Harra, B. (NHTSA): NHTSA`s Light Vehicle Handling and ESC Effectiveness Research Program, Traffic Research Center, Inc. United States, Paper Number 05-0221, 2005
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) R1, FGSV-Verlag GmbH, Köln, 2008
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf: Richtlinien für die Anlage von Straßen - Querschnitt (RAS-Q), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 1996
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit: Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS-1), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 1993
- Förster, H.-J.: Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft?, Abschiedsvorlesung, Uni Karlsruhe, 1987
- Freitag, R.; Moser, M.; Hartl, M.; Koepernik, J.; Eckstein, L.: Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen mit Steer-by-Wire Funktionalität, VDI-Berichte Nr. 1646, 2001
- Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, Universität Regensburg, 2005
- Grunow, D.; Heißing, B.; Otto, H.: Testverfahren für Personenkraftwagen mit automatischen Blockierverhinderern beim Bremsen, in: Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 280, 1983
- Hackenberg, U.; Heißing, B.: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr, ATZ 84, Nr. 7/8, 1982

- Hahlbrock, L.; Heim, C.; Kacza, M.: Die Entstehung des CFK-Fahrsimulators für Daimler, Der INNOVATION REPORT, CFK-Valley Stade e.V., 2011
- Haus, J.; Lauinger, N.: Optische Gitter: Die Abbildung der Realität, in: laser-journal, 4/2007, Nr. 2, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007, S. 39-43
- Heißing, B.; Brandl, H.-J.: Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens, Vogel Fachbuch, Würzburg, 2002
- Heißing, B.; Ersoy, M.: Fahrwerkhandbuch, 2.Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- Heißing, B.; Grunow, D.; Rompe, K.: Vergleichende Messungen zum Fahrverhalten von PKW mit Front-, Heck- und Allradantrieb, in: Automobil-Industrie 1982/3
- Heißing, B.; Rompe, K.; Bensinger, J.: Untersuchung der Fahreigenschaften des vier-  
radgetriebenen Audi Quattro, in: ATZ 85, Nr. 1, 1983
- Hessburg, T.; Tomizuka, M.: Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance, in: Control Systems magazine, 14, 1994, S. 55-63
- Hoffmann, E.R.: Human Control of Road Vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol. 5, 1975, S. 105-126
- Horiuchi, S.; Yuhara, N.: An analytical Approach to the Prediction of Vehicle Handling Qualities Using Multi-Input Driver Model, AVEC 96, Aachen, 1996
- Horn, A.: Fahrer - Fahrzeug - Kurvenfahrt auf trockener Straße, Dissertation, TU Braunschweig, 1985
- ISO 12021-1: Road vehicles – Sensivity to lateral wind, First edition, 1996
- ISO 13674-1: Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test, First edition, 2003
- ISO 14512, Passenger cars - Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction – Open-loop test method, 1999
- ISO 17288-1, Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method, First edition, 2002
- ISO 26262-3: Road vehicles – Functional safety – Part 3: Concept phase, 2011
- ISO 3888-1, Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change, First edition, 1999

- ISO 3888-2, Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance, First edition, 2002
- ISO 4138: Road vehicles; steady state circular test procedure, First Edition, 1982
- ISO 7401: Road vehicles; Lateral transient response test methods, 1988
- ISO 7975, Road vehicles – Braking in a turn – Open loop test procedure, 1985 (first version)
- ISO 7975: Passenger cars, Braking in a turn, Open-loop test method, Third edition, 2006
- ISO 9816: Passenger cars – Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method, 2006 (second edition)
- Jürgensohn, T.: Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, Pro Universitate Verlag, Sinzheim, 1997
- Jürgensohn, T.; Jung, R.; Willumeit, H.P.: Die Handschrift des Lenkens, ATZ 99, Nr.4, 1997
- Kageyama, I.; Pacejka, H.-B.: On a new driver model with fuzzy control, in: Vehicle System Dynamics Supplement, 20, 1991, S. 314-324
- Kageyama, I; Arai, A.; Nomura, T.: An Analysis of Driver's Control Algorithm using Neural Network Modeling, Vehicle System Dynamics Supplement, 33, 1999, S. 122-130
- Keen, S.-D.: Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, Dissertation, Department of Engineering, University of Cambridge, 2008
- Keinert, R.: Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance, Diplomarbeit, Hochschule Esslingen, 2004
- Knoll, P.-M.; Langwieder, K.: Der Sicherheitsaspekt von ESP in Realunfällen - Überlegungen zum volkswirtschaftlichen Nutzen von prädiktiven Fahrerassistenzsystemen, Tagung Aktive Sicherheit, München, 2006
- Kondo, M.: Directional stability (when steering is added), in: Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, 7, 1953
- Kraiss, K.-F.; Küttelwesch, H.: Teaching neural networks to guide a vehicle through an obstacle course by emulating a human teacher, in: Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, 1990, S. 333-337

- Kreutz, M.; Horn, M.; Zehetner, J.: Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering systems, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 47, No. 12, 2009
- Krochmann, J.: Reaktionszeit von Kraftfahrern, Institut für Lichttechnik, TU Berlin, 1979
- Krüger, H.-P.: Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen - Zur Humanisierung der Mensch-Maschine-Kommunikation, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2000, S. 1331-1342
- Kudritzki, D.: Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens, VDI-Fortschrittberichte, Reihe 12, Nr. 32, Berlin, 1989
- Kuralay, N.-S.: Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten von PKW, in: *Automobil-Industrie 1986/5*
- Lin, M.; Popov, A.A.; McWilliam, S.: Stability and Performance Studies of Driver-Vehicle Systems with Electronic Chassis Control, *Vehicle System Dynamics Supplement 41*, 2004, S. 477-486
- Lincke, W.; Richter, B.; Schmidt, R.: Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance, SAE-Paper 730489, 1973
- Lorenz, K.; Dietrich, Ch.; Donges, E.: Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten von Fahrzeugen in Standardbauweise, in: *ATZ 88*, Nr. 2 und 3, 1986
- Lozán, J.-L.; Kausch, H.: *Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler*, 4. Auflage, Deutsche Bibliothek –CIP, Hamburg, 2007
- Lugner, P.; Plöchl, M.: Additional 4WS and Driver Interaction, *Vehicle System Dynamics*, 24, 8, 1995, S. 639-658
- Maeda, K.; Sakai, H.; Tomiyama, M.: Analysis of Aerodynamic Effects on the Vehicle Stability in High Speed Running, AVEC 96, Aachen, 1996
- Mayr, R.; Freund, E.: On the design of nonlinear path control in automated vehicle guidance, in: *Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on intelligent Robots and Systems*, 1992, S. 613-620
- McAdam, C.-C.: Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, in: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-11, S. 393-399, 1981
- McRuer, D.-T.; Allen, R.-W.; Weir, D.-H.; Klein, R.-H.: New results in driver steering control models, in: *Human Factors*, 19, S. 381-397, 1977

- McRuer, D.-T.; Weir, D.-H.; Jex, H.-R.; Magdaleno, R.-E.; Allen, R.-W.: Measurement of driver-vehicle multiloop response properties with a single disturbance input, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-5, S. 490-497, 1975
- Meyer-Tuve, H.; Heißing, B.: Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik über einen modellbasierten Ansatz, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C: Fahrverhalten, Springer Verlag, Berlin, 1990
- Mitschke, M.; Marezke, J.; Otto, H.: Untersuchung des Fahrverhaltens von PKW bei Kurvenfahrt, in: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 466, 1986
- Mitschke, M.; Niemann, K.: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen, ATZ 76, Nr. 3, 1974
- Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer Verlag, Berlin, 2004
- Mücke, S.; Breuer, J.: Bewertung von Sicherheitssystemen im Fahrversuch, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Müller-Beßler, B.; Henze, R.; Küçükay, F.: Reproduzierbare querdynamische Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, in: ATZ 04/2008, Jahrgang 110, 2008, S. 358-365
- Nagai, M.; Onda, M.; Katagiri, T.: Application of genetic algorithm to analysis of driver's behaviour in collision avoidance, Int. Journal of Vehicle Design, Vol. 18, Nr. 6, 1997, S. 626-638
- Neukum, A.: Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop – Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes, in: Becker, K.: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II, expert verlag, Renningen, 2002, S. 1-20
- Neukum, A.: Controllability of erroneous steering torque interventions: Driver reactions and influencing factors, chassis.tech plus, München, 2010
- Neukum, A.; Krüger, H.-P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, VDI-Berichte 1791, 2003, S. 297-318
- Neukum, A.; Krüger, H.-P.; Frömmig, L.; Henze, R.; Küçükay, F.: Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung und Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, Fachtagung „Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen“, 4 - Haus der Technik Fach-

buch, 2010

Neukum, A.; Krüger, H.-P.; Schuller, J.: Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? VDI-Bericht Nr. 1613, 2001

Neukum, A.; Leonhard, A.; Lübbecke, T.; Ufer, E.; Krüger, H.-P.; Engels, F.; van der Jagt, P.: Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenkensystems, VDI-Berichte Nr. 2085, 2009

Neukum, A.; Ufer, E.; Paulig, J.; Krüger, H.-P.: Controllability of superposition steering system failures, steering.tech, München, 2008

NHTSA: FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Final Regulatory Impact Analysis, 2007

NHTSA: Notice of Proposed Rulemaking, Docket No. NHTSA-2001-9663; Notice 2, 2001

NHTSA; Dang, J.: Preliminary Results Analysing the Effectiveness of Electronic Stability Control Systems (ESC), Evaluation Note, DOT HS 809 790, 2004

Oberdieck, W.; Richter, B.; Zimmermann, P.: Identifizierung nichtlinearer Fahrzeugeigenschaften, in: Automobilindustrie 1980/2

Opelka, J.-M.: Simulationsbasierte Optimierung von ESP-Eingriffen unter Berücksichtigung objektiver Stabilitätsgrenzwerte in der Fahrsicherheit, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2011

Otto, H.: Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, Dissertation, TU Braunschweig 1987

Panhorst, T.: Objektive und Subjektive Beurteilung des Seitenwindverhaltens von PKW, Diplomarbeit, DaimlerChrysler AG, Sindelfingen, 2002

Papelis, Y.-E.; Brown, T.; Watson, G.; Holtz, D.; Pan, W.: Study of ESC Assisted Driver Performance Using a Driving Simulator, SAE World Congress, Doc.-Nr. 04-003-PR, Detroit, 2004

Plöchl, M.; Edelmann, J.: Driver models in automobile dynamics application, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, Nr. 7–8, 2007, S. 699-741

Rashevsky, N.: Neglected Factors in Highway Safety, University of Michigan, Mental Health Research Institute, Grant GM-12032-01, 1966

Rasmussen, J.: Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 13, 1983, S. 139-193

- Rau, M.: Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik mittels Verspannungslenkung, Dissertation, Uni Stuttgart, 2007
- Reichelt, W.: Identifikationsmethoden für die Fahrdynamik, in: ATZ86, Nr. 9, 1984
- Reimpell, J.; Sponagel, P.: Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1988
- Riedel, A.; Arbinger, R.: Subjektive und Objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von PKW. FAT Schriftenreihe 139, 1997
- Riekert, P.; Schunck, T.E.: Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs, Ingenieurs-Archiv, 1940
- Robert Bosch GmbH: Fahrstabilisierungssysteme, Plochingen, 2004
- Rompe, K.: Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests von Kraftfahrzeugen, in: ATZ 84, Nr. 1, 1982
- Rompe, K.: Testverfahren für das Bremsen in der Kurve, Kolloquiumsreihe "Aktive Sicherheit", TÜV-Verlag, 1978
- Rompe, K.; Donges, E.: Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen, in: Automobil-industrie 1983/2
- Rompe, K.; Ehlich, J.: Zum Stand der objektiven Bewertung von Reifen- und Fahrwerkseigenschaften, in: VDI Berichte 650, 1987
- Rompe, K.; Grunow, D.: Fahrverhalten von PKW beim Bremsen in der Kurve auf nassen Fahrbahnen, in: Automobil-Industrie 1980/4
- Rompe, K.; Grunow, D.; Tupová, J.: Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve und Ermittlung geeigneter Bewertungskriterien, VDI Bericht Nr.262, Düsseldorf, 1980
- Rompe, K.; Heißing, B.: Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften, "Bewertungsverfahren für die Sicherheit von Personewagen", TÜV-Verlag, 1984
- Rompe, K.; Heißing, B.: Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen: Quer- und Längsdynamik, 1. Auflage, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1984
- Rönitz, R.: Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW - Eine Übersicht, Kolloquiumsreihe "Aktive Sicherheit", TÜV Rheinland, 1978
- Rundkuist, S.: Swedish Experimental Safety Vehicle Program: Steerability During

- Emergency Braking, Summary Report, 1974
- Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik, 13. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- Sagan, E.: Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007, S. 17-29
- Schick, B.; Bunz, D.; TÜV Automotive GmbH, TÜV SÜD Gruppe: Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten, VDI-Berichte Nr. 1912, München, 2005
- Schmid, A.; Förstl, S.: Vom realen zum virtuellen Reifen – Reifenmodellparametrierung, ATZ 03/2009, S. 188-193
- Schmidt, G.: Wann spürt der Fahrer überhaupt? Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug, VDI-Berichte 2015, 2007
- Schmidt, G.; Scholz, S.; Neukum, A.; Krüger, H.-P. (IZVW); Passek, J.; Schrüllkamp, T.; Wallentowitz, H. (ika): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, FAT-Schriftenreihe 208, VDA, 2006, S. 52-102
- Schmidt, G.; Switkes, J.-P.; Kiss, M.; Gerdes, J.-C.: Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System, in: GZVB (Ed.), AAET 2007, Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 2007
- Schmidtke, H.; Bernotat, R.; Ergonomie, 3. Auflage, Hanser Verlag, München, 1993
- Schögl, P.: Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens in Serie und Motorsport, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Scholz, R.; Eitzinger, S.; Kober, W.; Rosinger, W.: Aktive Fahrwerkssysteme am Beispiel einer neuen Hinterachslenkung ...hilft es auch dem Reifen?, 6. Tag des Fahrwerks, Aachen, 2008
- Schurmann, J.: On the use of discrete proprioceptive-tactilewarning systems during manual control - The steering wheel as an active controller device, Dissertation, Hochschule der Bundeswehr München, Waxmann Verlag, Münster, 1994
- Simmermacher, D., Winner, H.: Lane Keeping Ability of normal Drivers depending on selectively varied Yaw Rate Deviation in Braking Manoeuvres, EAEC 2011, Valencia

- Simmermacher, D.; Winner, H.: Beherrschbarkeit von Gierstörungen durch ein Fahrerkollektiv, in: ATZ 113, Nr. 9, 2011, S. 696-701
- Song, B.; Delorme, B.; VanderWerf, J.: Cognitive and hybrid model of human driver, in: Proceedings of the intelligent Vehicles Symposium, 2000, S. 1-6
- Stanczyk, T.-L.; Jurecki, R.: Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen - neue Fahrbahn- und Fahrsimulatorversuche, erschienen in: VKU, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008
- Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle 2010, Fachserie 8, Reihe 7, Wiesbaden, 2011
- Stetter, H.: Meßtechnik an Maschinen und Anlagen, Vieweg+Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- Stonex, K.-A.: Car Control Factors and their Measurement, SAE Technical Paper 410092, 1941
- Switkes, J.-P.: Handwheel force feedback with lanekeeping assistance: Combined dynamics, stability and bounding, Dissertation, Stanford University, 2006
- Switkes, J.-P.; Schmidt, G.; Kiss, M.; Gerdes, J.-C.: Driver response to steering torque disturbances: A user study on assisted lanekeeping, IFAC Symposium on Advances in Automotive Controls (AAC) 2007, Monterey Coast, 2007
- Thies, A.; Krimmel, H.; Pollmeyer, S.: Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb, Potenziale für Fahrdynamik und Fahrsicherheit, chassis.tech 2009, München, 2009
- Tuzar, G.-D.: Der Einfluss von Fahrversuchen auf das Human-Machine-Interaction-Design in Fahrzeugen, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Uffelmann, F.: Lastwechselreaktion des frontgetriebenen PKW bei Kurvenfahrt, VDI-Berichte 418, 1981
- Ullmann, S.: Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme, Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2006
- Ungoren, A.-Y.; Peng, H.: An adaptive lateral preview driver model, in: Vehicle Systems Dynamics, 43, 2005, S. 245-259
- Vögel, M.; von Stryk, O.; Bulirsch, R.; Wolter, T.-M.; Chucholowski, C.: An optimal control approach to real-time vehicle guidance, in: Mathematics - Key Technology for the Future, Springer Verlag, Berlin, 2003, S. 84-102

- von Glasner, E.-C.: Fahrdynamische Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, erschienen in: VKU, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1/2009, S. 12-20
- Vorndran, I.: Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2007
- Wallentowitz, H.; Brand, W.; Holle, M.; Schrüllkamp, T.: Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung, Tag des Fahrwerks, Aachen, 2002
- Wallner, F.: Zum Verhalten des Fahrzeuglenkers als regelungstechnisches Problem, Automobilindustrie 1/1967, S. 54-62
- Wegscheider, M.; Prokop, G.: Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen, VDI-Bericht Nr. 1900, 2005, S. 17-36
- Weir, D.-H.; Di Marco, R.-J.: Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data, SAE-Paper 780010, 1978
- Weir, D.-H.; Zellner, J.-W.: The Application of Handling Requirements to an RSV-Type Vehicle, SAE-Paper 770187, 1977
- Weiß, E.: Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechsellvorgängen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 96, Düsseldorf, 1988
- Wenzel, T.-A.; Burnham, K.-J.; Williams, R.-A.; Blundell, M.-V.: Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control, 18th International Conference on Systems Engineering, Las Vegas, Nevada, 2005
- Wesp, A.: Analyse fahrerwirksamer Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung bei gleichzeitiger Fahrerbeanspruchung durch eine Fahraufgabe, Dissertation, VDI Fortschritt-Berichte Nr. 741, Düsseldorf, 2011
- Wesp, A.; Stoff, A.; Winner, H.: Die Systemauslegung von hinterachsgelenkten Fahrzeugen als Einflussgröße auf die Fahrerbewertung im Makrosinusversuch und Spurwechsel, Haus der Technik Fachbuch 4, expert Verlag, Renningen, 2009
- Wesp, A.; Stoff, A.; Winner, H.: Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge auf die Bewertung von Fahrern im Makrosinusversuch, in: 12. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, Hannover, 2009
- Wilfert, K.: Sicherheitsprobleme bei der Entwicklung von Personenwagen, ATZ, 1967 S. 48-53
- Willmes-Lenz, G.: Internationale Erfahrung mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger, Berichte der Bundesanstalt für Stra-

- Benwesen, Heft M 144, 2003
- Willumeit, H.-P.; Jürgensohn, T.: Fahrermodelle - ein kritischer Überblick, Teil 1 und 2, in: Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, Nr. 99, 1999
- Willumeit, H.-P.; Matheis, A.; Müller, K.: Korrelation von Untersuchungsergebnissen zur Seitenwindempfindlichkeit eines Personenwagens im Fahrsimulator und Prüffeld, in: ATZ 93, Nr. 1, 1991
- Willumeit, H.-P.; Müller, K.; Dödlbacher, G.; Loos, H.: Verfahren zur Korrelation von Fahrzeugverhalten und Fahrerbeurteilung bei Seitenwind, Tagung Fahrwerktechnik, Haus der Technik Essen, 1986
- Witte, K.: Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen, Dissertation, TU Berlin, 1995
- Xi, G., Qun, Y.: Driver-vehicle-environment closed-loop simulation of handling and stability using fuzzy control theory, in: Vehicle System Dynamics Supplement, 23, 1994, S. 172-183
- Yamamoto, A.; Kimura, Y.: Influence of ABS on Rollover Accidents, 15. ESV-Konferenz, Paper-Nr.: 96-55-O-04, Washington, 1996
- Zadeh, G.-A.; Fahim, A.; El-Gindy, M.: Neural network and fuzzy logic applications to vehicle systems: literature survey, in: International Journal of Vehicle Design, 18, 1997, S. 132-193
- Zeyada, Y., El-Beheiry, E.; El-Arabi, M.; Karnopp, D.: Driver modeling using fuzzy logic controls for human-in-the-loop vehicle simulations, in: Current Advances in Mechanical Design and Production VII, Elsevier Science Ltd., Oxford, 2000
- Zomotor, A.: Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens, Automobilindustrie 1978/2, TÜV-Verlag, 1978
- Zomotor, A.; Braess, H.-H.; Rönitz, R.: Doppelter Fahrspurwechsel – Eine Möglichkeit zur Beurteilung des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen?, in: ATZ 76, Nr. 8, 1974
- Zomotor, A.; Braess, H.-H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre, Teil 1/2, ATZ 12/97 und 03/98, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1997/1998
- Zomotor, A.; Braess, H.-H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Stand und Problematik, Teil 1/2, Automobil-Industrie 1/1977 und 3/1977, 1977
- Zomotor, A.; Horn, A.; Rompe, K.: Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Test-

verfahrens, in: ATZ 82, Nr. 9, 1980

Zomotor, A.; Kuhn, W.: Beitrag zur Verbesserung der Aktiven Sicherheit von Personenwagen-Caravan-Zügen, in: ATZ 84, Nr. 11, 1982

Zomotor, A.; Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1991

Zomotor, A.; Richter, K.-H.; Kuhn, W.: Untersuchungen über die Stabilität und das aerodynamische Störverhalten von PKW-Wohnanhängerzügen, in: Automobil-Industrie 1982/3

Zschocke, A.-K.: Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen, Dissertation, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2009



# Lebenslauf

Dipl.-Ing. Daniel Simmermacher

D-80799 München

- **Persönliche Daten**

Geburtsdatum: 27.01.1982

Geburtsort: Gießen

Familienstand: ledig

Staatsangehörigkeit: deutsch

- **Schulische Ausbildung**

1988 – 1992 Grundsschule Lauterbach

1992 – 2001 Alexander-von-Humboldt-Schule Lauterbach

2001 Allgemeine Hochschulreife

- **Wehrdienst**

2001 – 2002 Nachschubausbildungszentrum 50  
Treysa

- **Studium**

2002 – 2008 Allgemeiner Maschinenbau, TU Darmstadt

2008 Abschluss als Diplom-Ingenieur

- **Berufliche Tätigkeit**

2008 – 2011 Doktorand bei der Daimler AG, Sindelfingen  
Bereich: Fahrdynamik/Fahrsicherheit

seit August 2011 Entwicklungsingenieur Fahrdynamik/Fahrerassistenz,  
BMW AG, München