

# Der Toleranzansatz als Methodik zur Bewertung der Kontrollierbarkeit höherer Eingriffsstärken bei Falschauslösung eines systeminitiierten Ausweichmanövers mit ESP-Aktorik

Norbert Schneider<sup>\*</sup>, Marcus Schmitz<sup>†</sup>, Lenne Ahrens<sup>‡</sup>,  
Christian Löffler<sup>§</sup> und Alexandra Neukum<sup>\*\*</sup>

**Zusammenfassung:** Aktuell gelten für aktiv in die Querführung eingreifende Assistenzsysteme geschwindigkeitsabhängige Grenzwerte, welche die Wirksamkeit im Nutzenfall beschränken. Die Grundlage dieser Grenzwerte bilden Toleranzgrenzen für fahrdynamische Kennwerte, die anhand von subjektiven Bewertungen der Kontrollierbarkeit von Falschauslösungen ermittelt wurden (Toleranzansatz). Um die Wirksamkeit neuer Systeme zu maximieren, sind jedoch höhere Eingriffsstärken und Grenzwerte notwendig. Vorliegende Befunde zur Kontrollierbarkeit von höheren Grenzwerten sind allerdings sehr heterogen und wenig vergleichbar. In einer Realfahrzeugstudie mit N = 65 wurde daher die Anwendung des Toleranzansatzes zur Bewertung der Kontrollierbarkeit überprüft. Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass der Toleranzansatz geeignet ist, um höhere Eingriffsstärken zu untersuchen und andererseits, dass unter Berücksichtigung bestimmter Gestaltungsmerkmale höhere Eingriffsstärken toleriert und beherrscht werden können.

**Schlüsselwörter:** Ausweichmanöver, ESP-Aktorik, Falschauslösung, Kontrollierbarkeit, Untersuchungsmethodik.

## 1 Einleitung

Aktiv in die Querführung eingreifende Assistenzsysteme könnten zur Vermeidung von Unfällen eingesetzt werden, die bisher (allein) durch Eingriffe in die Längsführung, wie z.B. einen automatischen Notbremseneingriff, nicht adressiert werden können.

---

<sup>\*</sup> Norbert Schneider ist Mitarbeiter des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW) im Bereich Human Factors (schneider@wivw.de)

<sup>†</sup> Marcus Schmitz ist Mitarbeiter des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW) im Bereich Human Factors (schmitz@wivw.de)

<sup>‡</sup> Lenne Ahrens ist Mitarbeiter der Robert Bosch GmbH in der Vorentwicklung des Geschäftsbereich Chassis Systems Control (Lenne.Ahrens@de.bosch.com)

<sup>§</sup> Christian Löffler ist Mitarbeiter der Robert Bosch GmbH in der Vorentwicklung des Geschäftsbereich Chassis Systems Control (Christian.Loefler@de.bosch.com)

<sup>\*\*</sup> Alexandra Neukum ist Leiterin des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW) (neukum@wivw.de)

Dazu ist, je nach Ausgangssituation, eine hohe Eingriffsdynamik erforderlich, um die Kollision sicher vermeiden zu können. Da aufgrund potenzieller funktionaler Unzulänglichkeiten der Umfeldsensorik und situativer Unsicherheiten nicht zu 100% gewährleistet werden kann, dass Falschauslösungen nicht auftreten, muss sichergestellt werden, dass diese durch den Fahrer übersteuert werden können. Bisher finden sich nur wenige Studien in der Literatur, die sich mit der Frage der Kontrollierbarkeit von aktiv in die Querführung eingreifender Assistenzsystemen im Falle einer Falschauslösung oder höheren Eingriffsstärken im allgemeinen beschäftigen (Bräuchle, Flehming, Rosenstiel & Kropf, 2013; Fricke et al., 2015; Gußner, Bürkle & Marberger, 2015; Hesse et al., 2013; Schieben et al., 2014; Sieber et al., 2015a; Sieber, Siedersberger, Siegel & Färber, 2015b). Allerdings ist die Befundlage insgesamt sehr heterogen. Eine mögliche Ursache hierfür können die bestehenden Unterschiede in der Eingriffs- und Situationsgestaltung sein, sodass die Ergebnisse der Studien nicht miteinander verglichen werden können. Zwar werden mögliche Einflussfaktoren, wie die Eingriffscharakteristik oder die Wahl des Aktorkonzepts diskutiert (siehe hierzu auch Schneider et al., 2017), allerdings fehlt eine systematische, zusammenfassende Erarbeitung und Beschreibung der Einflussfaktoren sowie eine vergleichbare Untersuchungs- und Bewertungsmethodik. Dies erschwert eine Einschätzung, wie sich die untersuchten Einflussfaktoren auf die Kontrollierbarkeit auswirken.

Bei der Gestaltung der Notausweichassistenten werden in der Regel starke Eingriffe in die Querdynamik vorgenommen, die anhand der aus den Grundlagenuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse als nicht kontrollierbar eingestuft werden müssten. Allerdings unterscheidet sich die Eingriffsgestaltung hinsichtlich Dauer und zeitlichem Verlauf teils deutlich von den Fehlerbildern, die im Rahmen der Grundlagenstudien zur Ermittlung der Grenzwerte untersucht wurden. Zwar lassen sich diesen Studien auch Hinweise darauf entnehmen (vgl. Neukum et al., 2010a; Schmidt, Kiss, Switkes & Gerdes, 2007), dass die Gestaltung der Eingriffscharakteristik einen Einfluss auf die Kontrollierbarkeit hat. Allerdings wurde dies nicht bei der Ermittlung der Grenzwerte berücksichtigt, da diese möglichst allgemeingültig sein sollten. Dies gilt insbesondere für die Dauer der Falschauslösungen und die Gestaltung des zeitlichen Verlaufs, wie z.B. die Anstiegssteilheit, oder die Implementierung einer Übersteuerungsmöglichkeit. Daher besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass je nach Eingriffsgestaltung auch höhere Eingriffsstärken vom Fahrer toleriert und beherrscht werden können. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sollte bei der Bewertung jedoch eine möglichst standardisierte Prüfmethodik eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Anzahl an verfügbaren Studien, sowie den allgemein anerkannten Ergebnissen, bietet sich daher die von Neukum und Krüger (2003) entwickelte Methodik an, um zu überprüfen ob auch höhere Eingriffsstärken unter gleichen Testbedingungen toleriert und beherrscht werden können.

Zu diesem Zweck wurde eine Realfahrzeugstudie durchgeführt, welche mit Hilfe des Toleranzansatzes überprüfen soll, ob und bis zu welcher Stärke höhere Eingriffsstärken bei Falschauslösung eines systeminitiierten Ausweichmanövers mit ESP-Aktorik kontrollierbar sind.

## 2 Methode

### 2.1 Beschreibung des Toleranzansatzes

In bisherigen Studien zur Bewertung der Kontrollierbarkeit von Querdynamikstörungen wurde überwiegend der von Neukum und Krüger (2003) entwickelte Toleranzansatz eingesetzt (vgl. Neukum, 2015; Neukum, Paulig, Frömmig & Henze, 2010a; Neukum, Ufer & Schwab, 2010b; Schmidt, 2009). Dabei werden mit Hilfe des subjektiven Urteils des Fahrers Toleranzgrenzen für fahrdynamische Kennwerte ermittelt. Dafür muss die eingesetzte Befragungsskala verschiedene Voraussetzungen erfüllen, um valide Ergebnisse zu erhalten (vgl. Neukum, 2015). Zentraler Bestandteil des Toleranzansatzes ist die von Neukum und Krüger (2003) entwickelte Störungsbewertungsskala (Abbildung 1; siehe auch Neukum, 2015).

|                      |    |
|----------------------|----|
| nicht kontrollierbar | 10 |
| gefährlich           | 9  |
|                      | 8  |
|                      | 7  |
| störend              | 6  |
|                      | 5  |
|                      | 4  |
| spürbar              | 3  |
|                      | 2  |
|                      | 1  |
| nichts bemerkt       | 0  |

Abbildung 1: Störungsbewertungsskala zur Bewertung von Querdynamikstörungen nach Neukum und Krüger (2003).

Die hierarchisch aufgebaute Kategorienskala verlangt im ersten Schritt eine Einstufung der Störung anhand der Verbalkategorien und im Anschluss eine genauere Differenzierung anhand der numerischen Skalenstufen. Sie zeichnet sich aus durch eine eindeutig definierte Toleranzgrenze: Vom Fahrer nicht mehr tolerierte Störungen sollen mit Skalenwerten  $\geq 7$  („gefährlich“) beurteilt werden. Die Verbalkategorien der Skala werden wie folgt erläutert (vgl. Neukum & Krüger, 2003):

- In die Kategorie "spürbar" (Urteile 1-3) fallen Störungen, die vom Fahrer bemerkt werden, die jedoch keine oder nur leichte Auswirkungen auf die Fahraufgabe haben. Verletzt sind im Wesentlichen Komfortanforderungen und kompensatorisches Handeln ist nicht oder nur in geringem Maße erforderlich.
- Die Kategorie "störend" (Urteile 4-6) betrifft Fehler, die wegen auftretender Fahrzeugreaktionen bzw. Spurabweichungen einen deutlichen, aber vom Fahrer als vertretbar eingeschätzten kompensatorischen Aufwand erfordern.
- Der Fehler soll als "gefährlich" (Urteile 7-9) eingestuft werden, wenn der Aufwand zur Kompensation des Fehlers sehr hoch und für den Fahrer nicht mehr tolerierbar ist.

Ein entscheidender Unterschied der Störungsbewertungsskala im Vergleich zu anderen subjektiven Beurteilungsinstrumenten ist, dass die Ausprägung der erlebten Störung im

Vordergrund steht und nicht der Zustand des Fahrers, welcher durch Fragen bezüglich der erlebten Beanspruchung oder der gefühlten Sicherheit erfasst werden soll (vgl. Neukum, 2015; Neukum & Krüger, 2003). Dies erlaubt es, die subjektive Bewertung des Fahrers den objektiven Kennwerten gegenüber zu stellen um zu überprüfen, bei welchen objektiven Kennwerten die subjektive Toleranzgrenze des Fahrers überschritten wurde. Wird ein Überschreiten der subjektiven Toleranzgrenze für einen bestimmten Wertbereich der objektiven Kennwerte festgestellt, dient dies als Indikator für die Festlegung einer objektiven Toleranzgrenze. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass dieses Verfahren in der Regel zu konservativeren Ergebnissen führt als die alleinige Betrachtung objektiver Kennwerte oder auf Basis der Auftretenshäufigkeit von sicherheitsrelevanten Ereignissen (vgl. hierzu auch Neukum, 2015). Im Rahmen verschiedener Studien wurden mit Hilfe des Toleranzansatzes fahrdynamische Grenzwerte für Querdynamikstörungen ermittelt (Gierate von  $\leq 5^\circ/s$  bei 50 km/h und  $\leq 3^\circ/s$  bei 100-130 km/h). Die Studien belegen auch, dass die ermittelten Grenzwerte grundsätzlich nicht von der Wahl des Aktors beeinflusst werden (vgl. Neukum et al., 2010b). Dies und die Beobachtung, dass Querdynamikstörungen bei der Geradeausfahrt mit beschränkten Platzverhältnissen kritischer beurteilt werden als bei instationären Manövern oder einer Kurvenfahrt (vgl. Neukum, 2015; Neukum et al., 2010b), hat die Bewertung der Kontrollierbarkeit von Querdynamikstörungen insgesamt deutlich vereinfacht und führte zu den oben genannten, allgemein anerkannten Grenzwerten. Im Folgenden wird dieser Ansatz herangezogen, um die Kontrollierbarkeit von fehlerhaften Eingriffen mittels einer ESP-Aktorik bei höheren Eingriffsstärken ( $> 3^\circ/s$  bei 100 km/h) zu bewerten.

## 2.2 Studienaufbau

Als Prüfzenario wurde eine Gasse mit einer Breite von 2,75 Meter gewählt, die mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h durchfahren wurde. Die Breite der Gassen orientiert sich an der Richtlinie zur Anlage von Straßen und Autobahnen (RAS-Q). Die gewählte Gassenbreite betrug 2,75 Meter für Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h und 3,00 Meter für Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h. Die Länge der aufgestellten Gassen betrug ca. 150 Meter, bei einem Längsabstand von ca. 5,00 Meter zwischen den Pylonen (vgl. Abbildung 2). Die erste Falschauslösung mit einer Zielgierrate von  $6^\circ/s$  erfolgte innerhalb der Gasse, ohne dass der Proband vorab über den Inhalt der Untersuchung aufgeklärt wurde.



Abbildung 2: Aufbau Prüfzenarien auf der Teststrecke.

Um sicherzustellen, dass die Probanden bei Gasseneinfahrt bereits die gewünschte Geschwindigkeit erreicht haben, wurde eine ca. 400 Meter lange Beschleunigungszone eingerichtet.

Zusätzlich wurde auf ausreichend große Sicherheitsbereiche links und rechts der Pylonengassen geachtet sowie auf eine entsprechende Auslaufzone (vgl. Abbildung 3).

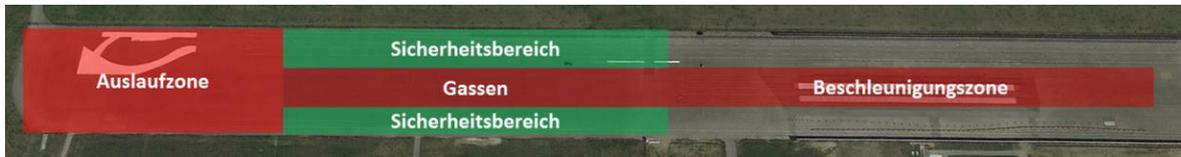


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Aufbaus der Prüfscenarien auf dem Prüfgelände.

Als Versuchsfahrzeug wurde ein Honda Acura RLX eingesetzt (vgl. Abbildung 4). Die Breite des Fahrzeugs betrug 1.89 Meter (ohne Außenspiegel). Die Auswahl und Auslösung des Fehlerbilds erfolgte durch den Versuchsleiter an zufälligen Positionen innerhalb der Pylonengasse.



Abbildung 4: Versuchsfahrzeug innerhalb der Pylonengasse (links, Mitte) und Innenansicht inklusive des Bildschirms zur Auswahl und Auslösung des Fehlerbilds durch den Versuchsleiter (rechts).

Im Rahmen von Vorversuchen wurden verschiedene Eingriffsparametrierungen erprobt, sowie eine Möglichkeit zur Ansteuerung der ESP-Aktorik entwickelt, welche es erlaubt die Zielgierrate als Parameter vorzugeben. Zusätzlich wurde eine Möglichkeit zur Erkennung der Übersteuerungsintention mit Hilfe von lenkradwinkelgeschwindigkeitsbasierten Schwellwerten implementiert, welche es erlauben das System zu degradieren und damit die Kontrollierbarkeit zu erhöhen.

### 2.3 Studiendurchführung

Die externen Studienteilnehmer wurden vorab nicht über den Zweck der Studie aufgeklärt. Ihnen wurde zunächst mitgeteilt, dass sie an einer Studie zum Thema „automatisiertes Fahren“ in Engstellen teilnehmen, um den experimentellen Aufbau zu plausibilisieren. Vor Versuchsbeginn hatten die Probanden 10 Minuten Gelegenheit sich mit dem Fahrzeug und der Fahraufgabe vertraut zu machen. Dazu wurden die Probanden instruiert, die aufgebaute Gasse mit schrittweise erhöhter Geschwindigkeit so lange zu durchfahren, bis die Zielgeschwindigkeit von 100 km/h erreicht wurde und die Probanden dazu in der Lage waren, die Gasse einhändig zu durchfahren. Danach wurden die Probanden instruiert, die Gasse nochmals mit 100 km/h zu durchfahren. Während der Durchfahrt erfolgte die erstmalige Aufschaltung des Fehlerbilds (Erstkontakt).

Anschließend wurden die Probanden gebeten, die erlebte Situation zu beschreiben und den Eingriff anhand der Störungsbewertungsskala nach Neukum und Krüger (2003a) zu bewerten. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurden zusätzliche experimentelle Variationen der Fehleraufschaltung durchgeführt, sodass die Fahrer insgesamt 21 Aufschaltungen eines Fehlerbilds erlebten. Hierbei wurde zudem die Aufschaltung aus dem Erstkontakt wiederholt, um auf mögliche Lerneffekte prüfen zu können. Der gesamte Versuch dauerte ca. 90 Minuten. Insgesamt nahmen N = 65 Fahrer an der Studie teil (davon 30 weiblich und 35 männlich). Das Alter der Fahrer variierte zwischen 18 und 80 Jahren (M = 43.54).

### 3 Ergebnisse

Von insgesamt N = 65 Fahrern, die an der Studie teilnahmen, wurden N = 61 für die Auswertungen berücksichtigt. Vier Fahrer wurden von den Auswertungen ausgeschlossen, da sie entweder Probleme bei der Umsetzung der Fahraufgabe hatten (z.B. unfallfreies Durchfahren der Pylonengasse ohne Fehleraufschaltung, Erreichen und Einhalten der vorgegebenen Zielgeschwindigkeit) oder die Instruktionen des Versuchsleiters nicht korrekt befolgten.

#### 3.1 Kontrollierbarkeitsbewertung Erstkontakt

Beim erstmaligen Erleben des Fehlerbilds (Erstkontakt) bewertete bereits bei einer initialen Gierrate von 4.5°/s ein Fahrer (13% der Fälle bei 4.5°/s) den fehlerhaften Eingriff als „gefährlich“. Weitere „gefährlich“ Urteile wurden erst ab einer initialen Gierrate von 6.5°/s beobachtet (siehe Abbildung 5). Keine der „gefährlich“ Bewertungen im Erstkontakt lässt sich auf eine nicht erfolgte Abschaltung zurückführen. Im Mittel bewerteten die Fahrer den Eingriff als „störend“ (M = 4.25), wobei die Spannweite der Urteile zwischen „spürbar“ (1-3) und „gefährlich“ (7-9) liegt (siehe Abbildung 5).

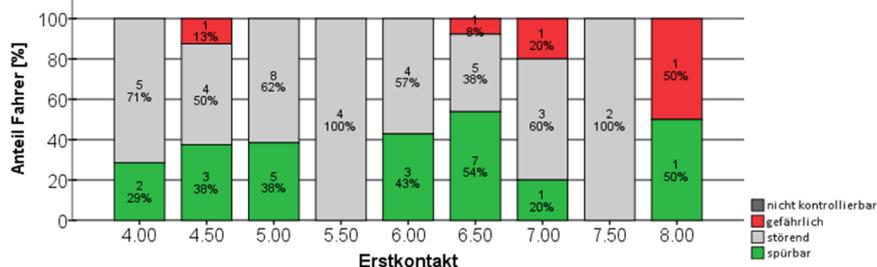


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der subjektiven Urteile entsprechend der Skalenkategorien in Abhängigkeit von der initial erreichten Gierrate im Erstkontakt.

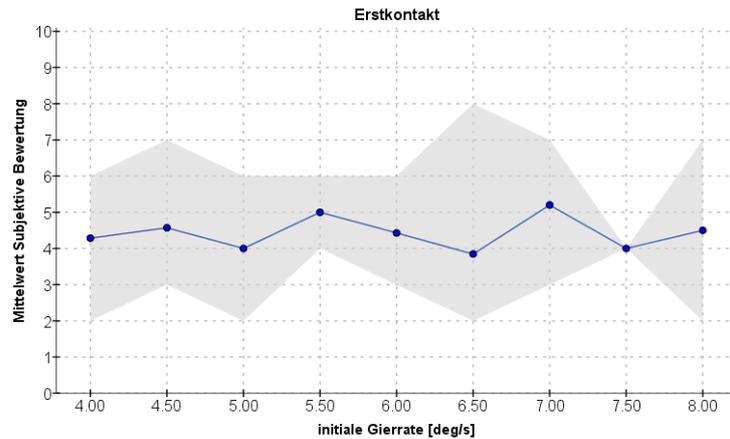


Abbildung 6: Mittelwert (blau) und Streubereich (grau) der subjektiven Urteile in Abhängigkeit von der initial erreichten Gierrate im Erstkontakt. Eingriffe mit nicht erfolgter Abschaltung werden bei der Darstellung nicht berücksichtigt. Für die Darstellung wurden die tatsächlich erreichten initialen Gierraten post-hoc klassifiziert und den entsprechenden Kategorien zugeordnet.

Bei einer Gierrate von 8°/s wurde zudem die vorgegebene Pylonengasse verlassen und es traten Pylonenfehler auf. Einzelfallüberprüfungen kommen daher sowohl für den Fall bei 4.5°/s als auch bei 6.5°/s in Betracht, um zu überprüfen, ob ein ungerechtfertigtes Urteil vorliegt oder nicht (vgl. Neukum, 2015). Bei Gierraten ab 7°/s liegen zu wenige Fälle vor und der Anteil an „gefährlich“ Urteilen überschreitet den Grenzwert von 15% sodass eine Einzelfallprüfung für diese Fälle nicht in Betracht kommt (vgl. Neukum, 2015). Die Einzelfallüberprüfung nach Neukum (2015) ergab bei einer Gierrate von 4.5°/s und 6°/s für beide Fälle keine auffälligen fahrdynamischen Kennwerte. Sowohl die Kompensationsgierrate, als auch das Lenkverhalten liegen innerhalb der Kennwertverteilung von Fällen, in denen keine „gefährlich“ Bewertung abgegeben wurde. Daher wird in beiden Fällen davon ausgegangen, dass es sich bei dem Urteil um ein „ungerechtfertigtes“ Urteil handelt. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Fahrer sich erschreckt haben und dies, entgegen der Instruktion, mit in ihre Bewertung einbezogen haben. Daher werden beide Fälle als kontrollierbar (Pass) bewertet. Die ermittelte Toleranzgrenze im Erstkontakt liegt damit bei 6.5°/s (vgl. Abbildung 7).

| Erstkontakt   | Initiale Gierrate [deg/s] |       |       |        |       |       |       |        |       |       |     |  |
|---------------|---------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-----|--|
|               | 3                         | 3.5   | 4     | 4.5    | 5     | 5.5   | 6     | 6.5    | 7     | 7.5   | 8   |  |
| Subjektiv     | Green                     | Green | Green | Red    | Green | Green | Green | Red    | Red   | Green | Red |  |
| Pylonenfehler | Green                     | Green | Green | Green  | Green | Green | Green | Green  | Green | Green | Red |  |
| Kombiniert    | Green                     | Green | Green | Green* | Green | Green | Green | Green* | Red   | Red   | Red |  |

■ Fail (Subjektiv: Urteil > 7 | Pylonenfehler | Kombiniert: auffällige Kennwerte)  
■ Pass (keine Bewertung > 7 / kein Pylonenfehler)  
■ \* Pass (weniger als 15% der Bewertungen > 7 | keine auffälligen Kennwerte)  
■ auffälliger Einzelfall

Abbildung 7: Ergebnis der finalen Kontrollierbarkeitsbewertung für den Erstkontakt entsprechend des von Neukum (2015) beschriebenen Bewertungsvorgehens.

### 3.2 Kontrollierbarkeitsbewertung Wiederholung

In der Wiederholung wurden Eingriffe ab einer Gierrate von  $4.5^\circ/s$  als „gefährlich“ bewertet. Weitere „gefährlich“ Urteile liegen bei Gierraten von  $5^\circ/s$ ,  $6^\circ/s$  und  $6.5^\circ/s$  vor. Die „gefährlich“ Urteile bei Gierraten von  $4.5^\circ/s$  und  $5^\circ/s$  lassen sich auf eine nicht erfolgte Abschaltung zurückführen, während zwei der „gefährlich“ Urteile bei  $6.5^\circ/s$  (entspricht einem Anteil von 18% der verbleibenden Fälle bei  $6.5^\circ/s$ ; siehe Abbildung 8) und ein weiteres Urteil bei  $6^\circ/s$  trotz erfolgter Abschaltung auftraten. Im Mittel bewerteten die Fahrer den Eingriff als „störend“ ( $M = 4.39$ ; siehe Abbildung 9) mit einer Spannweite der Urteile zwischen „spürbar“ (1-3) und „gefährlich“ (7-9).

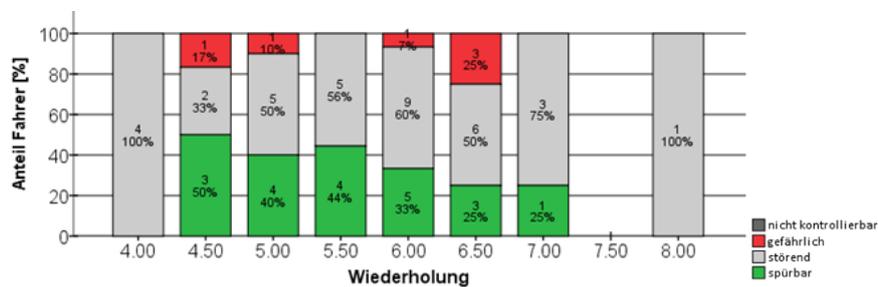


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der subjektiven Urteile entsprechend der Skalenkategorien in Abhängigkeit von der initial erreichten Gierrate im Erstkontakt.

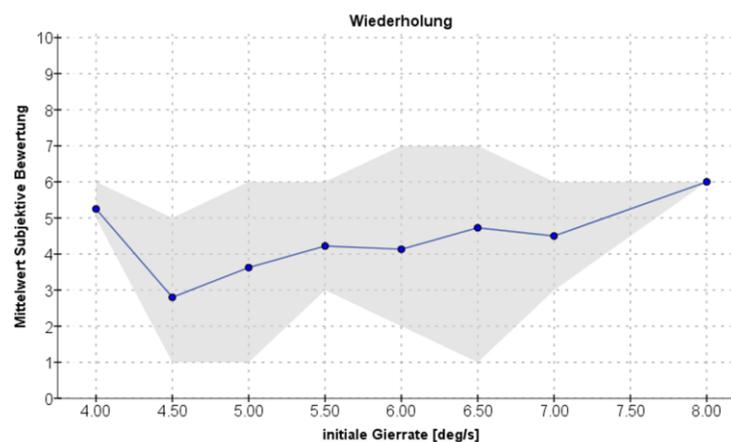


Abbildung 9: Mittelwert (blau) und Streubereich (grau) der subjektiven Urteile in Abhängigkeit von der initial erreichten Gierrate in der Wiederholung. Eingriffe mit nicht erfolgter Abschaltung werden bei der Darstellung nicht berücksichtigt. Für die Darstellung wurden die tatsächlich erreichten initialen Gierraten post-hoc klassifiziert und den entsprechenden Kategorien zugeordnet.

Der Grenzwert für den Anteil an „gefährlich“ Urteilen, bei dem eine Einzelfallüberprüfung noch in Betracht kommt, wird bereits bei einer initialen Gierrate von  $6.5^\circ/s$  überschritten. Zusätzlich wurde bereits bei einer initialen Gierrate von  $6^\circ/s$  ein Verlassen der Pylonengasse beobachtet (ohne „gefährlich“ Bewertung durch den Probanden) und ein „gefährlich“ Urteil abgegeben. Das Verlassen der Pylonengasse lässt sich mutmaßlich auf die schwache und späte Kompensationsreaktion des Fahrers zurückführen.

In Folge dessen wurde die Abschaltung erst nach 0.8 Sekunden und damit zum Zeitpunkt der Umschaltung ausgelöst. Eine vergleichbar späte und schwache Reaktion wurde im Erstkontakt nicht beobachtet und der Fahrer war hier in der Lage eine initiale Gierrate von 6.5°/s fehlerfrei zu kompensieren. Daher wird davon ausgegangen, dass der Fahrer grundsätzlich dazu in der Lage war, einen entsprechenden fehlerhaften Eingriff zu beherrschen. Die Überprüfung der fahrdynamischen Kennwerte für den Fall mit „gefährlich“ Urteil ergab keine Auffälligkeiten. In Folge dessen liegt der ermittelte Toleranzwert in der Wiederholung bei 6°/s (siehe Abbildung 10)

| Wiederholung  | Initiale Gierrate [deg/s] |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |
|---------------|---------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
|               | 3                         | 3.5  | 4    | 4.5  | 5    | 5.5  | 6     | 6.5  | 7    | 7.5  | 8    |
| Subjektiv     | Pass                      | Pass | Pass | Pass | Pass | Pass | Fail  | Fail | Pass | Fail | Fail |
| Pylonenfehler | Pass                      | Pass | Pass | Pass | Pass | Pass | Fail  | Fail | Pass | Fail | Fail |
| Kombiniert    | Pass                      | Pass | Pass | Pass | Pass | Pass | Pass* | Fail | Fail | Fail | Fail |

■ Fail (Subjektiv: Urteil > 7 | Pylonenfehler | Kombiniert: auffällige Kennwerte)  
■ Pass (keine Bewertung > 7 / kein Pylonenfehler)  
■ \* Pass (weniger als 15% der Bewertungen > 7 | keine auffälligen Kennwerte)  
■ auffälliger Einzelfall

Abbildung 10: Ergebnis der finalen Kontrollierbarkeitsbewertung für die Wiederholung entsprechend des von Neukum (2015) beschriebenen Bewertungsvorgehens.

### 3.3 Vergleich von Erstkontakt und Wiederholungsmessung

Im Folgenden wird überprüft, ob die subjektive Bewertung der Probanden Lern- oder Gewöhnungseffekten in Folge des mehrfachen Erlebens des Fehlerbilds unterliegt. Hierzu werden die Ergebnisse von Erstkontakt und Wiederholung miteinander verglichen, wobei nur Eingriffe mit erfolgter Abschaltung berücksichtigt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass kein systematischer Unterschied der initialen Gierrate zwischen Erstkontakt und Wiederholung besteht. Besteht ein Unterschied ist ein direkter Vergleich der subjektiven Bewertungen nicht ohne weiteres möglich. Im Erstkontakt betrug die initiale Gierrate im Mittel 5.61°/s ( $SD = 1.09$ ) und in der Wiederholung 5.74°/s ( $SD = 0.09$ ; vgl. Abbildung 11). Es gab keinen signifikanten Unterschied (t-Test) zwischen der initialen Gierrate beim erstmaligen Erleben und beim wiederholten Erleben des Fehlerbilds ( $t(54) = -0.856$ ,  $p = .396$ ). Somit ist die Voraussetzung erfüllt, dass kein systematischer Unterschied der initialen Gierrate zwischen Erstkontakt und Wiederholung besteht.

Im Erstkontakt wurde das Fehlerbild im Mittel mit  $M = 4.29$  ( $SD = 1.51$ ) bewertet, in der Wiederholung mit  $M = 4.24$  ( $SD = 1.55$ ). Es gab keinen signifikanten Unterschied (t-Test) der subjektiven Bewertung zwischen erstmaligem und wiederholtem Erleben des Fehlerbilds ( $t(54) = .277$ ,  $p = .783$ ). Somit liefert der Vergleich zwischen Erstkontakt und Wiederholung keine Hinweise auf einen Einfluss möglicher Lern- oder Gewöhnungseffekte auf die Bewertung der Fahrer.

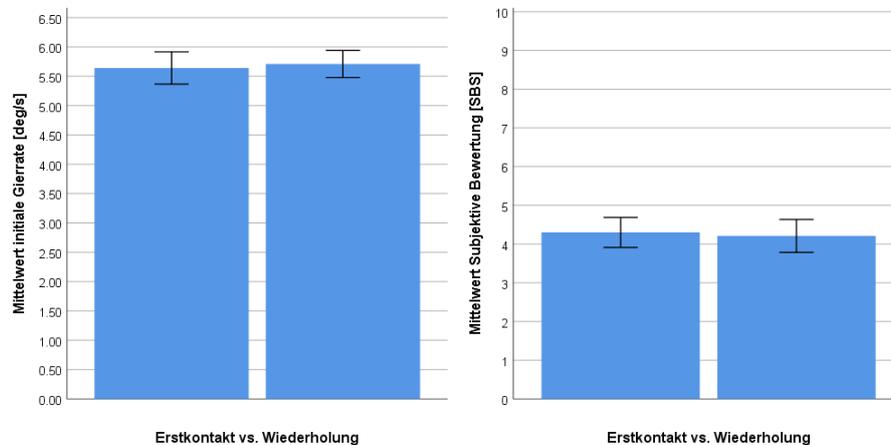


Abbildung 11: Mittelwert der initialen Gierrate für Erstkontakt und Wiederholung (links) und Mittelwert der subjektiven Bewertung für Erstkontakt und Wiederholung (rechts). Fehlerbalken entsprechen dem 95%-Konfidenzintervall. Für die Berechnung wurden nur Eingriffe mit erfolgter Abschaltung berücksichtigt. Fahrer mit fehlenden Messungen (Erstkontakt o. Wiederholung) wurden in der Darstellung ebenfalls nicht berücksichtigt.

## 4 Diskussion

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der von Neukum und Krüger (2003) entwickelte Toleranzansatz auch bei höheren Eingriffsstärken eingesetzt werden kann, um einen objektiven Grenzwert für fehlerhafte Eingriffe mit Hilfe subjektiver Maße zu ermitteln. In diesem Fall konnte gezeigt werden, dass höhere Eingriffsstärken von bis zu 6.5°/s im Erstkontakt von den Probanden toleriert und beherrscht werden. Dies gilt unter der Voraussetzung einer zuverlässig erkannten Übersteuerungsintention des Fahrers und einer daraufhin erfolgten Abschaltung des Eingriffs.

Hierbei ist zu beachten, dass subjektiv ermittelte Grenzwerte in der Regel konservativer ausfallen als Grenzwerte, welche allein anhand objektiver Maße ermittelt werden. Dies stellt nicht zwingend einen Nachteil dar, da für die Grenzwertermittlung aus ökonomischen Gründen in der Regel nur kleine Stichproben (20-30 Fahrer pro Fehlerbild) untersucht werden. Die untersuchten Fahrer stellen damit nur einen Teil der Fahrerpopulation dar, wodurch die tatsächlich zu erwartenden Streubreite der Reaktionen nur teilweise abgedeckt werden kann. Mit Hilfe des Toleranzansatzes werden jedoch objektive und subjektive Maße gegenübergestellt, um einen Grenzwert zu ermitteln, welchem auch die subjektive Einschätzung der eigenen Fahrerfertigkeiten zu Grunde liegt. Dadurch wird die ausbleibende Streubreite der Reaktionen zu einem gewissen Maß kompensiert.

Allerdings müssen bei der Anwendung des Toleranzansatzes zur Ermittlung fahrdynamischer Grenzwerte verschiedene Aspekte beachtet werden. Zum einen sind die Instruktion und die darin enthaltene Vorgabe der Verankerung der Befragungsskala entscheidend für die korrekte Anwendung.

Erfolgt diese nicht oder nur unvollständig, verankern die Fahrer die Items der Befragungsskala möglicherweise unterschiedlich, wodurch die Vergleichbarkeit und die Interpretierbarkeit der Subjektivurteile nicht mehr gewährleistet sind. Zum anderen muss bei der anschließenden Grenzwertermittlung eine detaillierte Prüfung der resultierenden fahrdynamischen Kennwerte erfolgen. Damit soll einerseits sichergestellt werden, dass die unterschiedlichen Fahrer tatsächlich vergleichbare Fehlerbilder erlebt haben (insbesondere bei Eingriffen in die Querführung kann es hier trotz identischer Soll-Anforderungen zu Abweichungen bei den erreichten Werten kommen). Andererseits bildet es die Grundlage für die Überprüfung, ob vereinzelte „gefährlich“ Urteile durch die aufgetretenen Fahrzeugreaktionen erklärt werden können oder ob es sich um „ungerechtfertigte“ Urteile handelt (vgl. Neukum, 2015). Werden diese Aspekte beachtet, stellt das standardisierte Vorgehen des Toleranzansatzes ein gutes Instrument zur Bewertung der Kontrollierbarkeit dar, welches auch bei höheren Eingriffsstärken eingesetzt werden kann. Zudem wird bei dem Vergleich des subjektiven Urteils zwischen Erstkontakt und Wiederholungsmessung deutlich, dass das subjektive Urteil der Fahrer bei vergleichbaren Störgrößen keinen Lern- oder Gewöhnungseffekten unterliegt. Dies ermöglicht zum einen effiziente Prüfanordnungen, mit deren Hilfe auch weitere Einflussfaktoren untersucht werden können. Zum anderen kann die Datenbasis für die Festlegung von fahrdynamischen Grenzwerten vergrößert werden. Ein entscheidender Vorteil bei der Anwendung des Toleranzansatzes zur Ermittlung fahrdynamischer Grenzwerte bei höheren Einsatzstärken ist zudem, dass die Vergleichbarkeit mit bereits vorliegenden Studien gewährleistet ist. Somit ist sichergestellt, dass bei der Ermittlung von neuen fahrdynamischen Grenzwerten die Ergebnisse nicht durch die eingesetzte Methodik beeinflusst werden.

## Literatur

- [1] Bräuchle, C., Flehming, F., Rosenstiel, W. & Kropf, T. (2013). Das Fahrerverhalten als Indikator für Fehlauflösungen von aktiven Kollisionsvermeidungsmanövern. VDI-Berichte, 2205, 3-14.
- [2] Fricke, N., Griesche, S., Hesse, T., Schieben, A. & Baumann, M. (2015). Driver behavior following an automatic steering intervention. *Accident Analysis & Prevention*, 83, 190–196.
- [3] Gußner, T., Bürkle, L. & Marberger, C. (2015). Erweiterung aktiver Fußgängerschutzsysteme durch eine fahrerinitiierte Ausweichunterstützung. 10. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting.
- [4] Hesse, T., Schieben, A., Heesen, M., Dziennus, M., Griesche, S. & Köster, F. (2013). Interaction design for automation initiated steering manoeuvres for collision avoidance. 6. Tagung Fahrerassistenz. München.
- [5] Neukum, A. (2015). Beherrschbarkeit fehlerhafter Eingriffe in die Fahrzeugquerdynamik. In K. Kompaß (Hrsg.), *Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit*. Haus der Technik Fachbuch. 137, S. 122-138. Renningen: expert verlag.
- [6] Neukum, A. & Krüger, H. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen–Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. VDI-Berichte, 1791, 297-318.

- [7] Neukum, A., Paulig, J., Frömmig, L. & Henze, R. (2010a). Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw. FAT-Schriftenreihe (222).
- [8] Neukum, A., Ufer, E. & Schwab, M. (2010b). Kontrollierbarkeit potenzieller Fehleingriffe des elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP). In Ika (Hrsg.), 7. Tag des Fahrwerks 2010. S. 108–123.
- [9] Schieben, A., Griesche, S., Hesse, T., Fricke, N. & Baumann, M. (2014). Evaluation of three different interaction designs for an automatic steering intervention. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, Part B, 238–251.
- [10] Schmidt, G. (2009). Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente. Dissertation, TU Braunschweig. [http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal\\_derivate\\_00007645/schmidtg\\_dissertation.pdf](http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00007645/schmidtg_dissertation.pdf)
- [11] Schmidt, G., Kiss, M., Switkes, J. & Gerdes, C. (2007). Auswirkungen haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug System. AAET.
- [12] Schneider, N., Berg, G., Paradies, S., Zahn, P., Huesmann, A. & Neukum, A. (2017). Designing Emergency Steering and Evasion Assist to Enhance Safety in Use and
- [13] Controllability. In K. Bengler, S. Hoffmann, D. Manstetten, A. Neukum & J. Drücke (Eds.), *UR:BAN Human Factors in Traffic Approaches for Safe Efficient and Stressfree Urban Traffic*. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.
- [14] Sieber, M., Schneider, M., Siegel, A., Siedersberger, K.-H. & Färber, B. (2015a). Wirksamkeit von Ausweichempfehlungen in Kombination mit Teilbremsung beim Notausweichen. In C. C. Stiller, K. Bengler, K. Dietmayer, L. Eckstein, B. Färber, M. Maurer & H. Winner (Eds.), *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2015*. S. 39–49. Darmstadt: Uni-DAS e.V.
- [15] Sieber, M., Siedersberger, K.-H., Siegel, A. & Färber, B. (2015b). Automatic Emergency Steering with Distracted Drivers: Effects of Intervention Design. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. S. 2040–2045. Los Alamitos, California: IEEE Conference Publishing Services.
- [16]