

Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factors Ansatz

Controllability of active steering system failures: a human factors approach

Dipl.-Psych. **Alexandra Neukum**, IZVW, Würzburg;
Dr.-Ing. **Wolfgang Reinelt**, ZF Lenksysteme GmbH, Schwäbisch Gmünd

Zusammenfassung

Der Beitrag thematisiert den Begriff der Kontrollierbarkeit, der die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Fall technischer Fehler kennzeichnet. Vorgestellt wird ein methodischer Zugang, der zur Bewertung der Kontrollierbarkeit von Fehlfunktionen eines aktiven Lenksystems (Active Front Steering) gewählt wurde. Der Ansatz basiert auf der Analyse der Fahrerreaktion im Fehlerfall und leitet daraus die zur Bewertung herangezogenen Parameter ab. Als grundlegendes Kriterium dient die subjektiv tolerierte Fehlergröße. Eingegangen wird weiterhin auf Möglichkeiten der Generalisierbarkeit des Ansatzes auf der Basis funktionaler Zusammenhänge zwischen fahrdynamischen Kenngrößen und Fahrerurteil.

1 Einleitung

Zentrale Untersuchungsgegenstände im Bereich der Fahrerunterstützungs- und Fahrerassistenzsysteme sind in der Regel Fragen des Zugewinns an Komfort und aktiver Sicherheit durch Entlastung des Fahrers (Reduzierung der Workload). Die Frage der Kontrollierbarkeit (Controllability), die eines der Kernproblembereiche der Fahrerassistenz auf der Stabilisierung- und Führungsebene darstellt (Kopf, 1998), findet bislang in empirischen Untersuchungen nur wenig Berücksichtigung.

Kontrollierbarkeit ist nach Reichart, Dilger & Winner (1994) allgemein als „Beherrschbarkeit von unerwartetem Systemverhalten im Fehlerfalle des technischen Systems“ definiert (vgl. auch MISRA, 1994) und kennzeichnet damit die erfolgreiche Kompensation technischer Fehler durch den Fahrer. Dieser Aspekt der Funktionssicherheit, d.h. der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Fehlerfall, stellt neben Fragen einer nutzergerechten Systemfunktionalität (Usability, Learnability etc.) einen wesentlichen Prüfgegenstand im Prozess der Entwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme dar (Becker et al., 2004, Jung, 2004).

Generell ist zur Validierung eines technischen Sicherheits- bzw. Abschaltkonzepts der Nachweis zu führen, dass die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug aufrechterhalten bleibt. Aufgrund ausfallbedingter Zustände und Zustandsübergänge dürfen keine sicherheitskritischen Situationen entstehen. Das Fahrzeug muss auch im Fehlerfall vom Fahrer kontrolliert werden können.

Mit der generellen Forderung der Kontrollierbarkeit ergeben sich aus psychologisch-ergonomischer Perspektive und in Abhängigkeit von der Funktionalität der derzeit vorhandenen und künftig verfügbaren Assistenzsysteme sehr heterogene Fragestellungen, die von Aspekten der Sensumotorik (etwa die Adaptation an ein plötzlich verändertes Lenkübertragungsverhalten des Fahrzeugs, z.B. Neukum & Krüger, 2003, Freitag et al., 2001) bis zu Fragen der Vigilanz und des Situationsbewusstseins bei der Überwachung (teil)automatisierter Systeme reichen (z.B. Buld, Tietze & Krüger, 2005, Nilsson 1995, Stanton & Young, 2000, Lee & See, 2004).

Zur Beurteilung der jeweils gegebenen Sicherheitsanforderungen in Bezug auf Fragen der Mensch-Maschine-Interaktion werden angemessene und praktikable methodische Ansätze benötigt. Allgemein anerkannte methodische Standards, die die Anforderungen an im geschlossenen Regelkreis durchzuführende Validierungsuntersuchungen für technische Sicherheitskonzepte definieren, fehlen derzeit. Zu diesem Fazit kommen auch Becker et al. (2004): "Unfortunately, Human Machine Interaction (HMI) and ADAS Usability as a subject are still "immature" and not fully understood. This situation reveals the strong need for further method development to come to the definition of uniform "metrics" for ADAS systems in the future".

Der vorliegende Text setzt sich zum Ziel, einen Beitrag zur Methodenentwicklung zu leisten und diskutiert den Begriff der „Kontrollierbarkeit“ und dessen Operationalisierung am Beispiel der von BMW AG und ZF Lenksysteme GmbH gemeinsam entwickelten Aktivlenkung (Active Front Steering). Am Beispiel eines konkreten Fehlerbilds wird ein methodischer Ansatz zur Prüfung der Kontrollierbarkeit skizziert und die Kriterien dargestellt, die zur Beschreibung und Bewertung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Fehlerfall herangezogen wurden. Weiterhin eingegangen wird auf Fragen der Generalisierbarkeit der Ergebnisse.

2 Methodischer Zugang zur Bewertung der Kontrollierbarkeit

2.1 Zur Struktur des Ansatzes

Definitionsgemäß beschäftigt sich die Kontrollierbarkeit mit dem Ergebnis der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion beim Auftreten eines technischen Fehlers. Daraus ergibt sich als erste Aufgabe die Messung dieses Ergebnisses in fahrdynamischen Größen, die sowohl durch

den Fehler selbst wie durch die Fahrereingriffe bestimmt sind. Aus dieser Betrachtung resultiert eine fehlerstärkenbezogene Darstellung der Fehlerwirkung in objektiven Kenngrößen. Dabei ist darauf zu achten, dass der gesamte sicherheitsrelevante Bereich der Kontrollierbarkeit experimentell abgedeckt wird. Die Frage, welche fahrdynamischen Größen in welchen Zeitbereichen relevant sind, ist nur durch eine genaue Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens zu beantworten.

Auf Basis dieser Fehlerwirkungsfunktionen sind allerdings noch keine Aussagen über die Größe der tolerierbaren Fehlerwirkungen möglich. Deswegen tritt neben die Messbarkeit der Fehlerwirkung das Problem der Bewertung dieser Wirkungen in Bezug auf die Kontrollierbarkeit. Der hier vorgestellte Ansatz zentriert sich auf die Bewertung der Störung durch den Fahrer und ist insoweit subjektiv. Um die subjektive Bewertung erfassen zu können, muss ein psychometrisches Messinstrument entwickelt werden, das erlaubt, die Fehlerwirkung in Abstufungen zu erfassen, die dem Erfahrungshorizont des Normalfahrers entsprechen. Unter welchen Bedingungen dies möglich ist, wurde in mehreren Untersuchungen gezeigt (z.B. Neukum, Krüger & Schuller 2001).

Ist sowohl die Messbarkeit der Fehlerwirkung in objektiven Kenngrößen wie auch in subjektiven Größen der Kontrollierbarkeit gegeben, können in einem dritten Schritt beide Messansätze miteinander vereint werden, indem nicht mehr die objektiven und subjektiven Größen auf die Fehlergröße selbst bezogen werden, sondern auf deren Auswirkungen. Dahinter steckt die Überlegung, dass die Grundlage des Fahrerurteils nicht die Fehlergröße selbst, sondern das Gesamt der durch den Fehler ausgelösten Störung und der darauf folgenden Fahreraktionen ist. Aus dieser Tatsache folgt sofort, dass die gleiche durch den Fehler ausgelöste fahrdynamische Störung in ihrer Wirkung durchaus unterschiedlich sein kann, je nachdem, wie der Fahrer auf sie reagiert. Dies betrifft sowohl den intraindividuellen Fall, dass der gleiche Fahrer auf den gleichen Fehler unterschiedlich reagiert wie den interindividuellen Fall, dass unterschiedliche Fahrer mit dem gleichen Fehler unterschiedlich umgehen. Betrachtet man statt der Fehlergröße selbst also die fahrdynamische Auswirkung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, gewinnt man die Möglichkeit zu prüfen, wie die generelle Funktionalität zwischen fahrdynamischem Störungsergebnis und der subjektiven Bewertung der Kontrollierbarkeit aussieht.

Gelingt die Darstellung einer solchen generellen Funktionalität, ist auch die Frage anzugehen, ob diese Funktion unabhängig vom untersuchten Fahrzeug ist. Eine fehlerbezogene Darstellung wird sich immer der Frage gegenüber sehen, wie der Fehler sich in das Fahrverhalten des konkret untersuchten Fahrzeugs umsetzt. Betrachtet man dagegen die fahrdyna-

mischen Auswirkungen des Fehlers, besteht die Möglichkeit zu prüfen, ob eine fahrzeugunabhängige Bestimmung der Kontrollierbarkeit möglich ist.

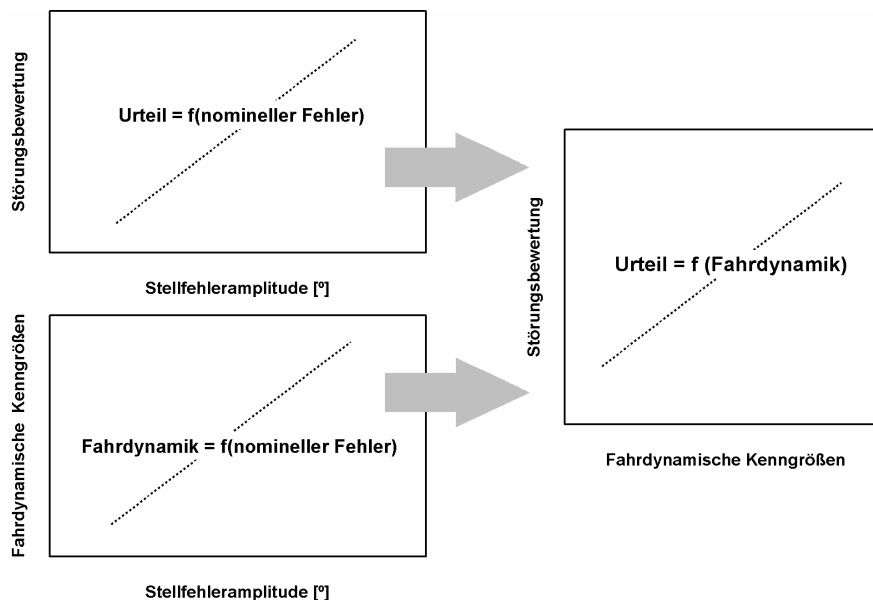


Abbildung 1: Übersicht der Analyseschritte: Untersuchung der Fehlerauswirkungen in subjektiven und objektiven Kenngrößen (links) und Analyse der Abhängigkeiten der subjektiven Bewertung von fahr-dynamischen Größen (rechts).

Der vorgeschlagene Ansatz wird in Abbildung 1 noch einmal verdeutlicht. Die Grafik links unten stellt die Untersuchung der Fehlerauswirkung in objektiven Kenngrößen in Abhängigkeit von der Fehlergröße dar und entspricht der oben dargestellten ersten Aufgabe der Messbarkeit der Störung. Die Grafik links oben symbolisiert die subjektive Bewertung der Kontrollierbarkeit der Störungsauswirkung. Unter der Überlegung, dass die Urteilsgrundlage die fahr-dynamische Gesamtauswirkung des Fehlers und der darauf folgenden Fahreraktion ist, wird die Funktionalität zwischen dem Mess- und Bewertungsansatz direkt überprüft. Die daraus resultierende rechte Abbildung definiert die Kontrollierbarkeit in fahr-dynamischen Größen und kann als Grundlage für weitere Prüfungen dienen, in denen untersucht wird, von welchen Größen die aufgefundene Funktionalität abhängig ist (z.B. Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit usw.).

2.2 Systemfehler am Beispiel von Active Front Steering und ihre Untersuchung

Beim aktiven Vorderradlenksystem Active Front Steering wird die Lenkübersetzung durch Überlagerung von zusätzlichen Lenkwinkeln geschwindigkeitsabhängig variiert. Zur Verbesserung der Handlichkeit ist bei niedrigen Geschwindigkeiten eine direktere Lenkübersetzung wirksam. Active Front Steering addiert hier zur Fahrereingabe einen entsprechenden Winkel hinzu. Im Bereich hoher Fahrgeschwindigkeiten, bei denen eine indirektere Lenkübersetzung zur Erhöhung des Komforts, der Fahrbarkeit und zur Verbesserung des Geradeauslaufs beiträgt, wird ein entsprechender Winkel subtrahiert (Köhn et al., 2003).

Beim Auftreten von Fehlfunktionen wird der sichere, die Lenkbarkeit gewährleistende Zustand durch Abschaltung des Stellmotors erreicht, da der unabhängig von der Funktion der Aktivlenkung permanent gegebene mechanische Durchgriff als Rückfallebene erhalten bleibt (Eckrich et al., 2002). Die Frage der Kontrollierbarkeit im Falle potentieller Fehlfunktionen wurde als Teil eines umfassenden Sicherheitskonzepts zu einem frühen Stadium der Systementwicklung aufgegriffen und war Gegenstand einer Sicherheitsstudie, die die Analyse und Bewertung der im Fehlerfall gegebenen Anforderungen zum Ziel hatte.

Die Studie umfasste unterschiedliche aus technischen Analysen abgeleitete Fehlerbilder, für die die stärksten Auswirkungen auf den Fahrer zu erwarten waren. Um den Bewertungsansatz der Studie darzustellen, wird hier ausschließlich auf die Analyse sog. „irreversibler“ Lenkwinkelfehler eingegangen (vgl. Neukum & Krüger 2003). Bei diesem Störungsbild kommt es durch Systemfehler bedingt zu unbeabsichtigten Lenkaktionen an den Vorderrädern, die in Betrag und Richtung nicht der Lenkradbewegung entsprechen. Für den Fahrer relevante reaktionsauslösende Größen sind mit dem Fehler einhergehende Lenkmoment- und Lenkradwinkeländerungen, die von querdynamischen Fahrzeugreaktionen und daraus entstehenden Spurabweichungen gefolgt sind. Im Fehlerfall entsteht damit für den Fahrer ein kompensatorischer Aufwand zur Fahrzeugstabilisierung und zum Ausgleich auftretender Kursabweichungen. Nach Arretieren des Stellmotors durch die Sicherheitsreaktion ist in Folge des Fehlers die konstante Lenkübersetzung der mechanischen Rückfallebene gegeben und es kann – bedingt durch Eigenschaften des Lenkstrangs – ein Schiefstand des Lenkrads resultieren.

Mit dem Ziel, den Bereich sicherheitsrelevanter Störungen zu definieren, wurden im Fahrversuch quantitativ unterschiedliche Stellfehlergrößen synthetisch erzeugt. Weiterhin untersucht wurde die Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

Teilnehmer der Untersuchung waren insgesamt N=30 Fahrer mit durchschnittlicher Fahrerfahrung (Altersgruppe: 25-60, jeweils N=15 Frauen und Männer) und fünf professionelle Fah-

rer. Die Versuche wurden in einem instrumentierten 5er BMW (E39) auf abgesperrtem Testgelände durchgeführt. Abgedeckt wurden Fahrgeschwindigkeiten von 50-150 km/h (für eine nähere Beschreibung der Untersuchungsbedingungen siehe Neukum & Krüger 2003).

2.3 Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion: Objektive Kenngrößen

Entsprechend der Darstellung in Kap. 2.1 ist der Ausgangspunkt der Analyse die Betrachtung der zeitlichen Struktur der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Fehlerfall. Diese Analyse dient der Generierung geeigneter objektiver Parameter, die aus den Zeitverläufen der Bedieneingaben und fahrdynamischen Messgrößen gewonnen werden. Die Analyse stützt sich nicht auf vorab definierte Zeitintervalle oder verwendet Integrale, sondern basiert auf Zeitfenstern, die aus den individuellen und fehlerspezifischen Daten ermittelt werden. Die zeitliche Charakteristik der Fahrerreaktionen weist – wie in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt – zwei Phasen auf.

Beobachtbar ist zunächst eine reflexartige Reaktion kurzer Dauer (t_2-t_1), die durch das initial auftretende Lenkmoment bzw. die Lenkradbewegung ausgelöst wird. Diese erste haptisch ausgelöste und damit sehr schnelle Reaktion des Fahrers trägt im Fall der lenkungsspezifischen Fehlercharakteristik nicht zur Kompensation des Fehlers bei, sondern kann zu einer Verstärkung der störungsbedingt auftretenden Fahrzeugreaktionen und Querabweichungen führen, wenn der fehlerinduzierte Lenkmomentenanstieg bzw. die Winkeländerung mit einer entsprechend starken Gegenreaktion beantwortet wird. In der Regel handelt es sich jedoch um ein kurzes Gegenmoment oder Festhalten des Lenkrads, das zu geringen Winkeldifferenzen führt. Der Zeitpunkt der zweiten Extremamplitude (t_2) kennzeichnet den Beginn des kompensatorischen Eingriffs.

Für beide Phasen erfolgt eine Analyse der Lenkgeschwindigkeiten. Weiterhin wird die Gesamtdauer der Störung – operationalisiert über eine gegenüber der ungestörten Geradeausfahrt erhöhte Lenkaktivität – ermittelt. Analog zu den aus dem im Lenkradwinkelsignal unterscheidbaren Phasen der Erstreaktion und der Kompensation werden objektive Kriterien aus den Fahrzeugbewegungsgrößen (Extrema der Gierraten und Querschleunigungen) herangezogen.

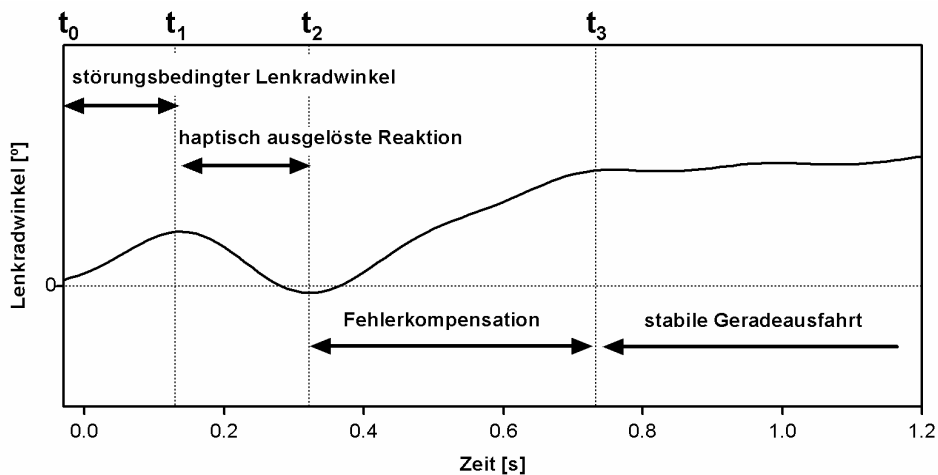


Abbildung 2: Zeitliche Einteilung der Phasen der Fahrerreaktion im Fall irreversibler Stellfehler.

Die objektiven Kenngrößen aus Erstreaktions- und Kompensationsphase zeigen erwartungsgemäß deutliche Abhängigkeiten von der Stellfehleramplitude. Wesentlich ist dabei, dass die Varianz der kompensatorischen Reaktionen mit steigender Fehlergröße deutlich zunimmt. Je größer der Fehler, desto weniger vorhersagbar sind die in der Folge der Erstreaktion zu beobachtenden Fahreraktivitäten. Abbildung zeigt dies am Beispiel der Verteilungen der Extrema der Gierraten und Querbeschleunigungen bei Fahrgeschwindigkeiten von 50 und 150 km/h.

Es zeigt sich weiterhin, dass deutliche Überlappungen in den Verteilungen pro Fehlerstufe zu finden sind. Inhaltlich bedeutet dies, dass unterschiedliche Fehlergrößen mit gleichen Giergeschwindigkeiten bzw. Querbeschleunigungen verbunden sind.

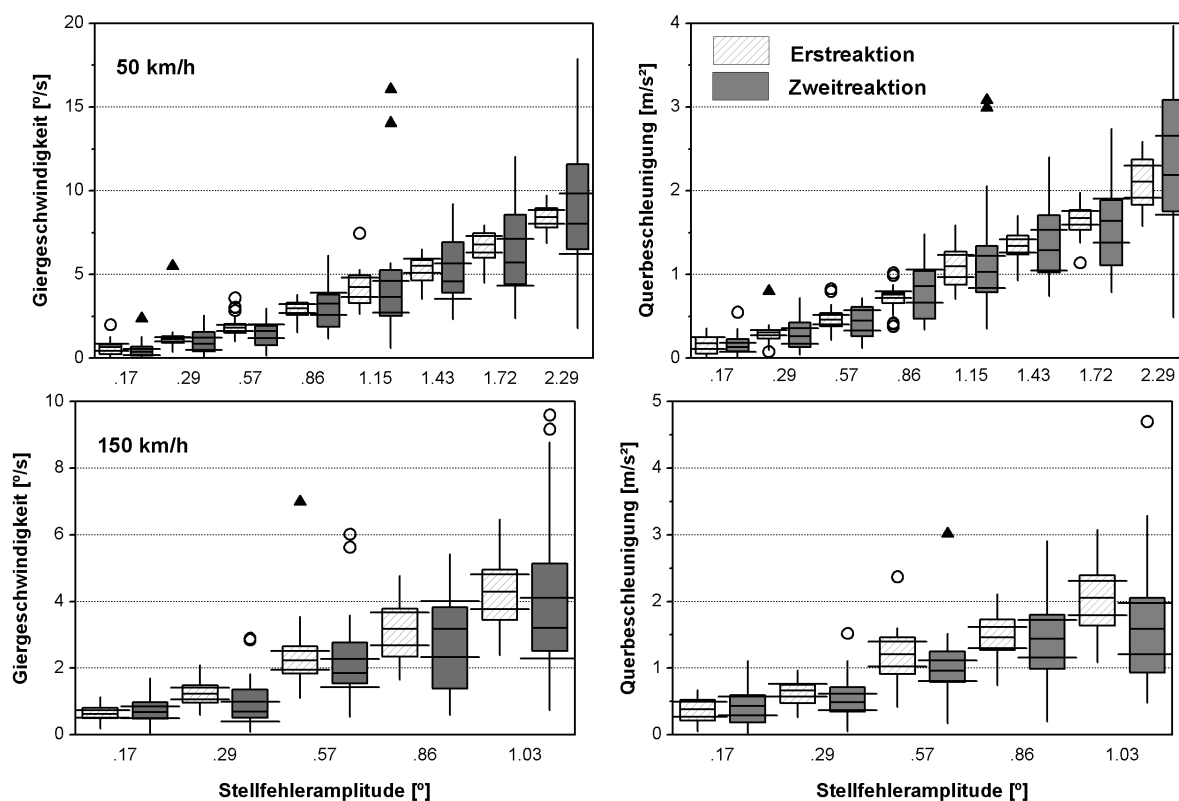


Abbildung 3: Verteilungen der Extrema der Gierraten und Querbeschleunigungen bei Fahrgeschwindigkeiten von 50 und 150 km/h.

2.4 Bewertungskriterium: Subjektiv tolerierte Fehlergröße

Die aus der Analyse der objektiven Daten gezeigten Beispiele verdeutlichen, dass in der Untersuchung ein weiter Bereich von Störgrößen abgedeckt wurde. Offen bleibt jedoch die Frage, welche der Störungsbereiche als Einschränkungen des Komforts oder als sicherheitsrelevante Fehler zu kennzeichnen sind. In der einschlägigen Literatur liegen bis dato keine Kenngrößen und Leistungsstandards vor, die eine solche Klassifikation erlauben.

In der vorliegenden Studie wurde zur Evaluation der Kontrollierbarkeit ein Weg beschritten, der das Erleben des Fahrers und damit ein subjektives Maß zum Kriterium erhebt. Eingesetzt wurde die von Neukum & Krüger (2003) im Rahmen der Studie entwickelte Skala zur Störungsbewertung, deren Aufbau in Abbildung 4 gezeigt ist.

Bei der Skala handelt es sich um ein eindimensionales, hierarchisches Skalierungsverfahren, das in den Grobkategorien fünf Bereiche der Störungsauswirkung unterscheidet: „nichts bemerkt“, „die Störung wurde bemerkt“, „das Fahren wurde gestört“, „die Störung war ge-

fährlich“, „das Fahrzeug war nicht mehr beherrschbar“. Die drei mittleren Kategorien sind weiter in je drei Stufen unterteilt, woraus insgesamt eine 11-stufige Skala resultiert. In der Instruktion werden die Verbalkategorien wie folgt erläutert:

- Die Kategorie „Spürbarkeit“ (Urteile 1-3) umfasst 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 „Störung des Fahrens“ (Urteile 4-6) betrifft Fehler, die wegen auftretender Spurabweichungen und Fahrzeugreaktionen einen deutlichen, aber vom Fahrer als vertretbar eingeschätzten kompensatorischen Aufwand erfordern. In diese Kategorie fallen auch dem Fahrer aus dem Alltag bekannte und zu bewältigende Kurshaltungsstörungen.
- Der Fehler soll als „gefährlich“ (Urteile 7-9) eingestuft werden, wenn der Aufwand zur Kompensation des Fehlers sehr hoch und nicht mehr tolerierbar ist.

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

Abbildung 4: Skala zur Bewertung der Auswirkung von Störungen.

Anders als bei Einstufungen der „subjektiv empfundenen Sicherheit“ (z.B. sehr unsicher – sehr sicher) ist die subjektive Toleranzgrenze durch den Skalenaufbau, d.h. die Benennung der Kategorien, und die Instruktion eindeutig definiert: tolerierbare Fehler sollen maximal als „Störung“, aber nicht als „gefährlich“ beurteilt werden.

Mit Blick auf spätere Validierungsuntersuchungen, in denen Vergleiche zu anderen Kurshaltungsstörungen vorgenommen werden, verweist die Kategorienbenennung explizit nicht auf Lenksystemfehler oder technisch bedingte Systemreaktionen. Dies ermöglicht es dem Probanden, einen Bezug zu aus dem Alltag bekannten Störungen herzustellen.

Zur Bewertung der Lenksystemfehler werden nicht die Mittelwerte der Urteile, sondern die gesamte Verteilung herangezogen, um der Variabilität innerhalb heterogener Fahrergruppen gerecht zu werden.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass gegen subjektive Methoden – auch wenn sie bei ergonomischen Fragestellungen die am häufigsten eingesetzten Verfahren darstellen, in der Literatur eine Reihe inhaltlicher und methodischer Einwände vorgebracht wurden (für eine aktuelle Diskussion siehe z.B. Annett, 2002; Hancock, Weaver & Parasuraman, 2002). Hinreichend beschrieben sind Urteilseffekte, die aufgrund von Skalengestaltungen und Versuchsdesign (Reihenfolgeeffekte etc.) zustande kommen. Problematisch für die Anwendung subjektiver Verfahren sind weiterhin mögliche Einstellungseffekte oder negative Urteilshaltungen, denen z.B. die prinzipielle Ablehnung eines Systems oder die Meinung, „dass Lenksystemstörungen grundsätzlich nicht auftreten dürfen“, zugrunde liegt. Aufgrund solcher Effekte zustande gekommene Einzelurteile können jedoch nicht die Basis für die Zurückweisung eines technischen Sicherheitskonzepts sein.

Für das praktische Vorgehen ergibt sich damit die Notwendigkeit, erhobene Urteilsdaten – auch wenn sie als Basiskriterien herangezogen werden – immer in Zusammenhang mit objektiven Indikatoren zu betrachten. Wird eine Störung von der überwiegenden Zahl der Fahrer als tolerierbar und nur in Ausnahmefällen als sicherheitsrelevant beurteilt, erfolgt grundsätzlich eine Einzelfallanalyse. Diese vergleicht die Zeitfunktionen der objektiven Messgrößen der als sicherheitskritisch beurteilten Fahrt im Vergleich zu Fahrten anderer Probanden bei gleicher Fehlerausprägung. Ausgeschlossen werden muss, dass im fraglichen Einzelfall tatsächlich eine fahrdynamisch relevante Situation gegeben war.

Aus Abbildung 5 ist zu sehen, dass es anhand der Skala möglich ist, unterschiedliche Störungsstärken deutlich zu differenzieren. Der Vergleich der beiden Versuchsbedingungen (die Bandbreite der Stellfehler wurde geschwindigkeitsabhängig variiert) zeigt weiterhin einen deutlichen Einfluss der Fahrgeschwindigkeit: bei geringerem Tempo werden die gleichen Stellfehler weniger kritisch beurteilt.

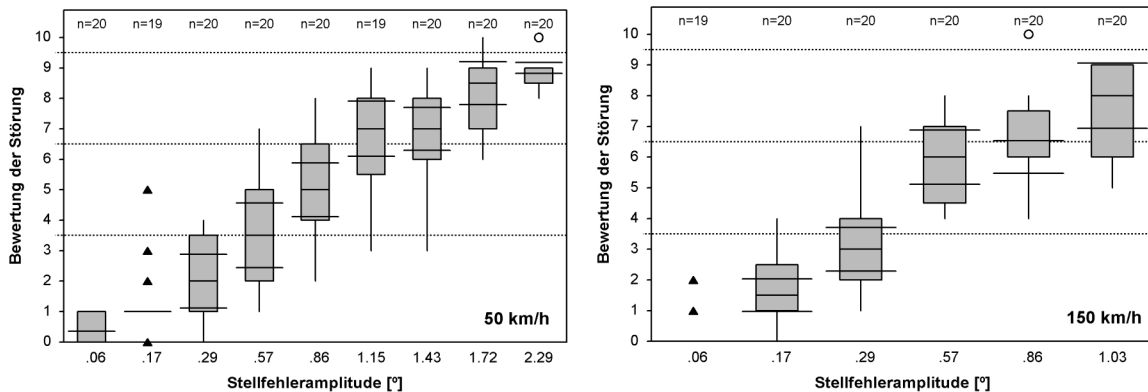


Abbildung 5: Boxplotverteilungen der Fahrerurteile bei Fahrgeschwindigkeiten von 50 und 100 km/h.

Der Vergleich der Fahrerurteile mit objektiven Kriterien der Spurhaltung (Fahrbahnrandüberschreitungen) zeigt, dass das Pylonenkriterium deutlich weniger zwischen den Störungsstärken differenziert. Eine Festlegung von Toleranzkriterien auf der Basis von Fahrbandüberschreitungen lässt Stellfehler zu, die von den Fahrern nicht mehr akzeptiert werden.

Begrifflich ist das verwendete Kriterium der subjektiven Toleranz der Lenksystemfehler als Untermenge der Kontrollierbarkeit bzw. Beherrschbarkeit aufzufassen und stellt damit ein konservatives Kriterium für die Beurteilung der Sicherheitsrelevanz dar.

2.5 Wahrnehmungs- und handlungsorientierte Analyse

Die bisherige Analyse betrachtet Niveau und Varianz subjektiver und objektiver Kenngrößen in Abhängigkeit von technisch definierten Fehlern. Nicht beantwortet ist mit dieser Analyse weder die Frage, was Grundlage der subjektiven Bewertung ist, noch die Frage der Generalisierbarkeit und damit der Übertragbarkeit der Aussagen auf andere Fahrzeuge. Hierfür sind zwei wesentliche Gründe anzuführen:

- Bei den angegebenen Fehlergrößen handelt es sich um nominelle Radlenkwinkel, die theoretisch dann erreicht werden, wenn der gesamte Stellmotorfehler verlustfrei an die Vorderräder weitergeleitet werden würde. Dies ist aufgrund der Eigenschaften des Lenkstrangs selbst bei Fixierung des Lenkrads (Open Loop Messungen) nicht der Fall. Beim Vergleich unterschiedlicher Fahrzeuge müssen eine Vielzahl lenksystem- und fahrzeugspezifischer Einflussgrößen und Eigenschaften sowie weiterhin Einflüsse der Fahrsituation, wie z.B. der Geschwindigkeit, Berücksichtigung finden.
- Ein zweites Argument resultiert aus den Bedingungen der Closed-Loop Untersuchungen, bei denen sich aufzeigen lässt, dass durch den Fahrereinfluss nicht erst die

Kompensation, sondern bereits die initiale Störungsstärke moderiert wird. Die tatsächlich auftretende querdynamische Reaktion in Folge des nominellen Fehlers ist abhängig von der zum Zeitpunkt des Fehlers gegebenen Haltekraft am Lenkrad. Je höher die Haltekraft ist, desto größer sind die Auswirkungen des Stellfehlers auf den Radlenkwinkel und es resultieren stärkere querdynamische Reaktionen. Die Bandbreite möglicher Fahrzeugreaktionen lässt sich aufzeigen in Versuchen mit fixiertem und freiem Lenkrad.

Da der technisch definierte Fehler und daraus resultierende Auswirkungen (in Form von Lenkmomenten und Fahrzeugbewegungsgrößen) nicht gleichzusetzen sind, lassen sich Hinweise auf für den Fahrer relevante Einflussgrößen nur aus ex-post Analysen gewinnen (vgl. hierzu auch Neukum, 2001; Neukum, Krüger & Schuller, 2001). Diese betrachten die Fahrerurteile in direkter Abhängigkeit von den tatsächlich aufgetretenen fahrdynamischen Reaktionen.

Das Vorgehen sei im Folgenden am Beispiel der als Parameter herangezogenen Extremwerte der Gierraten demonstriert. Die querdynamischen Größen werden zunächst klassifiziert, um in Hinblick auf die Funktionsanpassung an die Urteilsmittelwerte eine Gleichgewichtung der einzelnen querdynamischen Bereiche zu gewährleisten (Abbildung 6). Die in der Phase der Erstreaktion aufgetretenen Gierraten wurden in Intervalle von $0.5^\circ/\text{s}$ -Schritten eingeteilt, wobei Werte bis $5.5^\circ/\text{s}$ berücksichtigt wurden. (Oberhalb dieser Bereiche sind die Klassen nur durch sehr wenige Fälle besetzt). Für jedes Intervall werden die Mittelwerte der Störungsbewertungen berechnet. Diese sind in der nachstehenden Abbildung über den Klassenmitten aufgetragen.

Ganz deutlich ist die gegenüber den bisherigen Analysen verringerte Varianz der Urteile innerhalb der Klassen der Giergeschwindigkeit zu sehen. Dies ist ein strenger Beleg dafür, dass die subjektive Störungsbewertung sehr viel stärker von dem fahrdynamischen Ergebnis abhängig ist als von der technisch definierten Fehlergröße.

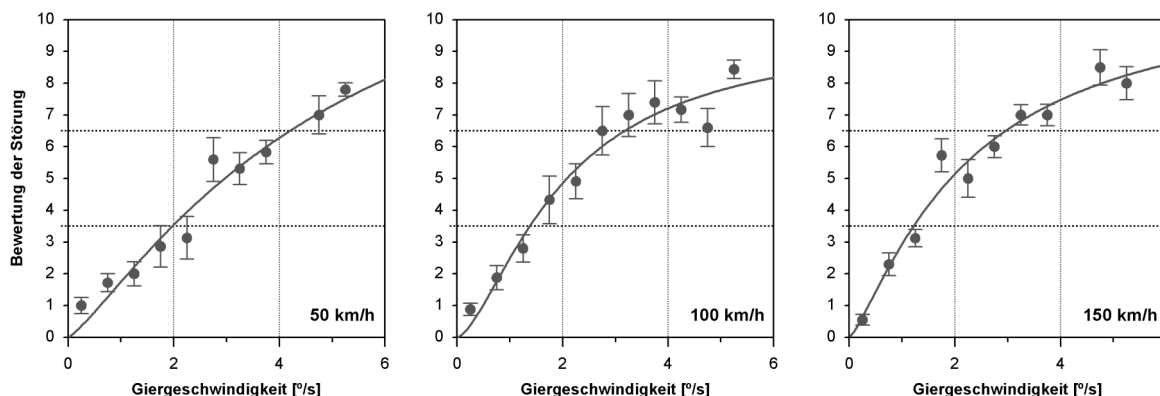


Abbildung 6: Abhängigkeit der Urteile (Mittelwerte und Standardfehler) von der Stärke der Erstreaktion.

An die Mittelwerte der Urteile wurden Sigma-Funktionen, der Form $y = a/(1+(b/x)^c)$ angepasst. Diese Funktionsform wurde ausgehend von der Überlegung gewählt, dass sich die Urteile bei geringen Störungsgrößen im Schwellenbereich bewegen und bei hoher Querdynamik ebenfalls keine Differenzierungen mehr vorgenommen werden. Der Verlauf entspricht damit prinzipiell einer S-förmigen Funktion. Da es nicht Zielsetzung der Untersuchung war, den Schwellenbereich (wann wird eine Störung überhaupt wahrgenommen?) und den Gefährlichkeitsbereich im Detail zu untersuchen, wurden die Urteile in den Randintervallen zusammengefasst. Die resultierenden Abhängigkeiten repräsentieren damit den interessierenden Ausschnitt der Funktion.

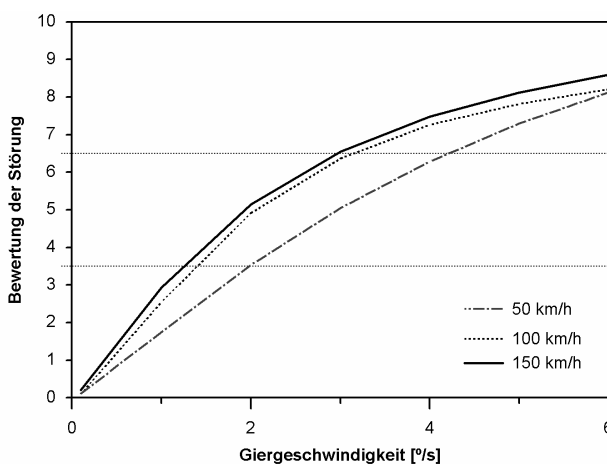


Abbildung 7: Abhängigkeit der Störungsbewertungen von der Stärke der Erstreaktion am Beispiel der Gierrate. Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten.

In Abbildung 7 sind die Urteilsfunktionen zum Vergleich der Geschwindigkeiten 50, 100 und 150 km/h aufgetragen. In den Gierraten zeigt sich ein systematischer Geschwindigkeitseinfluss: mit steigender Geschwindigkeit werden geringere Gierraten toleriert. Die der subjektivi-

ven Toleranzgrenze entsprechenden objektiven Kennwerte variieren zwischen 3°/s bei 150 km/h und 4°/s bei 50 km/h.

Mit Hilfe dieser ex-post Analysen lassen sich Größenordnungen objektiver Kennwerte herausarbeiten, unterhalb derer die Auswirkungen eines Stellfehlers verbleiben sollten. Die Bewertung der Wirkung nomineller bzw. technisch definierter Stellfehler könnte zukünftig – dies gilt unter der Voraussetzung einer weiteren Validierung dieser objektiven Kriterien – bereits im Open Loop erfolgen, wobei die „worst case“-Bedingung eines fixierten Lenkrads zugrunde gelegt werden muss.

Verallgemeinerungen dieser aus den ex-post Analysen gewonnenen Kriterien sind nur auf der Basis von umfassenden Fahrzeugvergleichsuntersuchungen möglich. In solchen Studien könnten die Angaben über die Größenordnungen der fahrdynamischen Parameter zur gezielten Hypothesenprüfung herangezogen werden. Weiterhin zu prüfen ist der moderierende Einfluss unterschiedlicher Fahrzeugeigenschaften.

3 Zusammenfassung

Zur Bewertung der Kontrollierbarkeit von Fehlfunktionen aktiver Lenksysteme wurde ein neuer methodischer Zugang vorgestellt. Die Grundannahme ist, dass die Grundlage der Bewertung der Kontrollierbarkeit von technischen Fehlern das Gesamtergebnis der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Fehlerfall ist. Daraus resultiert (1) als Notwendigkeit eine genaue Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Aus dieser Analyse ist abzuleiten, welche fahrdynamischen Kenngrößen in welchen Zeitbereichen geeignet sind, diese Interaktion abzubilden. In einem Schritt (2) wird auf der Basis psychometrischer Überlegungen eine neue Störungsskala eingeführt, über die der Normalfahrer als Experte den Grad der Störung beurteilen kann. In einem Schritt (3) werden die auf die Fehlergröße bezogenen objektiven fahrdynamischen Kennwerte und die ebenfalls auf die Fehlergrößen bezogenen subjektiven Bewertungen so zusammengeführt, dass die Störungsbewertung in Abhängigkeit von ihren Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion betrachtet werden. Die so entstehende Funktion trägt der Tatsache Rechnung, dass die Grundlage der subjektiven Bewertung die Resultante aus Fahrzeug- und Fahrerreaktion ist. Diese Funktionalität ist in zukünftigen Untersuchungen daraufhin zu prüfen, ob sie fahrzeugunabhängig ist. In diesem Fall wäre es möglich, technische Störungen im open loop auf ihre fahrdynamische Auswirkungen hin zu untersuchen und aus den so gewonnenen objektiven Kenngrößen auch ohne weitere closed loop-Versuche auf ihre Kontrollierbarkeit hin zu bewerten.

4 Literatur

- Annett, J. (2002). Subjective rating scales: science or art? *Ergonomics*, 45(14), 966-987.
- Becker, S., Brockmann, M., Jung, C., Mihm, J., Schollinski, H.-L., Schwarz, J. et al. (Eds.). (2004). RESPONSE 2 - ADAS: From market introduction scenarios towards a code of practice for development and evaluation (Final Report: Deliverable D4).
- Buld, S., Tietze, H. & Krüger, H.-P. (2005). Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In M. Maurer & C. Stiller (Eds.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (pp. 161-188). Düsseldorf: Springer.
- Eckrich, M., Pischinger, M., Krenn, M., Bartz, R. & Munnix, P. (2002, 08.-09.10.2002). Die Aktivlenkung - Anforderungen an Sicherheitstechnik and Entwicklungsprozess. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen.
- Freitag, R., Moser, M., Hartl, M., Koepf, J. & Eckstein, L. (2001). Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen mit Steer-by-Wire Funktionalität. VDI-Berichte, 1646, 837-857.
- Hancock, P. A., Weaver, J. L. & Parasuraman, R. (2002). Sans subjectivity - ergonomics is engineering. *Ergonomics*, 45(14), 991-994.
- Jung, C. (2004, 29.-30.04.2004). How to develop a safety case: BMW's Active Front Steering and functional safety standards. RESPONSE 2 - Final Workshop, Cologne.
- Köhn, P., Wachinger, M., Fleck, R., Brenner, P. & Reimann, G. (2003). Aufbau und Funktion der Aktivlenkung von BMW. Tagung Fahrwerktechnik, München.
- Kopf, M. (1998). MMI Lösungen für Fahrerassistenzsysteme. Tagung "Fahrerassistenzsysteme", Essen: Haus der Technik.
- Lee, J. D. & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46(1), 50-80.
- MISRA. (1994). Development guidelines for vehicle based software: MIRA.
- Neukum, A. (2001). Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop - Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes. In K. Becker (Ed.), *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen. Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und Komponenten* (Haus der Technik Fachbuch, Band 12, pp. 1-20). Renningen: expert.
- Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. VDI-Berichte, 1791, 297-318.
- Neukum, A., Krüger, H.-P. & Schuller, J. (2001). Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? VDI-Berichte, 1613, 13-32.

- Nilsson, L. (1995). Safety effects of adaptive cruise control in critical traffic situations. Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems, 3, 1254-1259.
- Reichart, G., Dilger, E. & Winner, H. (1994). Iterative Safety Design Process - Ein Ansatz zur Sicherheitsanalyse und -bewertung künftiger Fahrzeugsysteme. VDI-Berichte, 1152, 87-100.
- Stanton, N. A. & Young, M. S. (2000). A proposed psychological model of driving automation. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 1(4), 315-331.