

# **Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme**

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

## **Dissertation**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Dirk Alexander Weitzel**  
aus Friedberg (Hessen)

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Tag der Einreichung: 02.07.2013

Tag der mündlichen Prüfung: 30.08.2013

Darmstadt 2013

D 17



---

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets, für die Betreuung dieser Arbeit. Seine stete Bereitschaft zur kritischen fachlichen Diskussion und seine Anregungen haben wichtige Impulse zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop, Ordinarius für Kraftfahrzeugtechnik an der TU Dresden, danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Allen Mitarbeitern von FZD danke ich für die stets gute Zusammenarbeit. Die Hilfsbereitschaft und Unterstützung sowohl fachlich als auch sozial und die gemeinsamen Erfahrungen haben mich in den vergangenen Jahren geprägt und werden mich über meine Zeit am Fachgebiet hinaus begleiten. Viele Kollegen sind in dieser Zeit zu Freunden geworden.

Danken möchte ich auch den zahlreichen Studenten, die als wissenschaftliche Hilfskräfte oder durch studentische Arbeiten an den Projekten mitgearbeitet haben. Ihre Tatkraft und Ihr Einsatz haben entscheidende Beiträge zu dieser Arbeit geliefert.

Wichtige Teile dieser Arbeit wurden durch die Bundesanstalt für Straßenwesen gefördert. Mein Dank geht insbesondere an Herrn Dr. Patrick Seiniger und Herrn Tom Michael Gasser für das Interesse an meiner Forschung und die zahlreichen fruchtbaren und zielorientierten Diskussionen.

Meinen Eltern, meiner Schwester und ihrer Familie und meinen Großeltern möchte ich für die Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungszeit danken. Euer liebevolles Verständnis, euer Vertrauen, die aufmunternden Worte und die kontinuierliche moralische Unterstützung haben mich stets in meinem Vorhaben bestärkt. Ganz besonders danken möchte ich meiner Lebensgefährtin Cécile Müller für ihre Unterstützung und große Toleranz gegenüber Einschränkungen des Privatlebens und für ihren liebevollen Zuspruch in schwierigen Abschnitten.

Alexander Weitzel

Darmstadt, Juli 2013



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Formelzeichen und Indizes</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und Forschung</b> .....	<b>3</b>
2.1 Begriffsdefinitionen.....	3
2.1.1 Nicht situationsgerechte Auslösungen .....	3
2.1.2 Kontrollierbarkeitsbegriff.....	5
2.1.3 Fahrsituation und Szenario.....	7
2.2 Fahrerassistenzsysteme mit Umfelderkennung.....	9
2.3 Risikobegriff.....	11
2.4 Rechtliche Rahmenbedingungen der funktionalen Sicherheit.....	12
2.5 ISO 26262 und Funktionale Unzulänglichkeit .....	13
2.6 Bewertung der Kontrollierbarkeit.....	17
2.7 Absicherungsmethoden .....	19
<b>3 Präzisierung der Ausgangslage, Aufgabenstellung und Vorgehen</b> .....	<b>21</b>
<b>4 Identifikation der Anforderungen an die Kontrollierbarkeitsbewertung</b> .....	<b>23</b>
4.1 Analyse nicht situationsgerechter Auslösungen .....	23
4.1.1 Ursachen.....	24
4.1.2 Gefährdungen .....	26
4.1.3 Reaktionen.....	29
4.2 Detaillierungsproblematik .....	33
4.3 Situationskollektive für statistische Erhebungen der Fahrsituationen.....	36
4.4 Probandentests gemäß ISO 26262.....	38
<b>5 Relevanzbewertung</b> .....	<b>42</b>
5.1 Ansatz zur Berechnung eines Relevanzfaktors .....	42
5.1.1 Abbildung von abhängigen Wahrscheinlichkeiten.....	48
5.2 Kontrollierbarkeitsanalogien .....	50
<b>6 Definition von Situationsparametern</b> .....	<b>52</b>
6.1.1 Umgebungsbedingungen.....	52
6.1.2 Fahrzeug .....	53
6.1.3 Fahrer .....	54
6.2 Situationsparameter im 3-Ebenen Modell .....	55
6.3 Detaillierung und Quantisierung der Situationsparameter .....	56
6.3.1 Helligkeit.....	57

6.3.2 Niederschlag .....	58
6.3.3 Verkehrsdichte.....	62
6.3.4 Straßentyp .....	63
6.3.5 Blickabwendung .....	64
<b>7 Prüfmethodik, Simulation und Versuch .....</b>	<b>66</b>
7.1 Auswahl der Verzögerungsstrategie des vorausfahrenden Fahrzeugs.....	66
7.2 Simulation .....	68
7.2.1 Simulationsergebnisse.....	72
7.3 Prüfung der Abbruchkriterien.....	76
7.4 Validierung der Kontrollierbarkeit .....	77
7.5 Untersuchungsziele .....	77
7.6 Auswahl von Test-Fällen für den Probandenversuch.....	78
7.7 Kontrollierbarkeitskriterien .....	79
7.7.1 Abstandsbasierte Betrachtungen .....	80
7.7.2 Zeitbasierte Betrachtungen .....	83
7.8 Probandenversuche.....	84
7.8.1 Probandenkollektiv .....	84
7.8.2 Versuchswerkzeug.....	85
7.8.3 Versuchsträger.....	87
7.8.4 Versuchsablauf .....	88
7.9 Auswertung .....	89
7.10 Fehlerbetrachtungen .....	90
7.11 Ergebnisse .....	92
7.11.1 Reaktionszeiten .....	92
7.11.2 Reaktionsintensitäten .....	94
7.11.3 Kontrollierbarkeitsbewertung .....	95
7.11.4 Subjektive Kontrollierbarkeitsbewertung .....	99
7.12 Erkenntnisse der Probandenversuche .....	101
<b>8 Fazit und Ausblick .....</b>	<b>103</b>
<b>9 Zusammenfassung.....</b>	<b>108</b>
<b>A Anhang.....</b>	<b>110</b>
A.1 Herleitung Anzahl Probandenversuche ISO 26262.....	110
A.2 Klimatologische Kenntage .....	111
A.3 Simulation .....	112
A.3.1 Simulationsergebnisse detailliert $v_{Start} = 60$ km/h.....	112
A.3.2 Simulationsergebnisse detailliert $v_{Start} = 80$ km/h.....	113
A.3.3 Verbleibende Reaktionszeiten Simulation .....	115
A.4 Probandenversuche.....	116
A.4.1 Messgrößen im Versuchsträger .....	116

---

A.4.2 Probandenfragebogen Kontrollierbarkeit.....	117
A.5 Einzelterme der Fehlerbetrachtung.....	118
A.6 Auswertung.....	118
A.6.1 Tabellen der statistischen Tests der Reaktionszeiten.....	118
A.6.2 Tabellen der statistischen Tests der Maximalverzögerungen.....	119
A.6.3 Tabellen der statistischen Tests der minimalen Abstände .....	120
A.6.4 Tabellen der Absolutfehler der Versuche .....	121
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen .....</b>	<b>132</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten.....</b>	<b>133</b>

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
CAN	Controller Area Network
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESC	Elektronisches Stabilitätsprogramm (von engl. Electronic Stability Control)
ETA	Event Tree Analysis
FAS	Fahrerassistenzsystem
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Failure Modes and Effects Analysis)
FTA	Fault Tree Analysis
HAZOP	Hazard-and-Operability-Study
PoNR	Point-of-No-Return
STVO	Straßenverkehrsordnung
STVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TTC	Time-to-Collision
TTR	Time-to-React
VZR	Verkehrszentralregister

---

## Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha$		Signifikanzniveau
$B$		Breite
$d$	m	Abstand
$D$	m/s <sup>2</sup>	Verzögerung
$f_{\text{Abtast}}$	Hz	Abtastfrequenz
$F$		Fehleranteil
$g$		Gewichtungsfaktor
$\vec{U}$		Unkontrollierbarkeitsvektor
$\gamma$		Konfidenzniveau
$i$		Laufvariable
$k$		Anzahl Ereignisse
$K$		Subklassenbezeichnung
$l$	cd	Lichtstärke
$L$	cd/m <sup>2</sup>	Leuchtdichte
$m$		Steigung
$n$		Anzahl
$\mu$		Reibwert
$p$		Anteil
$p_{\text{HBZ}}$	bar	Druck im Hauptbremszylinder
$q$		Querneigung
$r_{\text{Abhängig}}$		Abhängigkeitsfaktor
$RS$		Relevanzschwelle
$\rho$		Expositionswahrscheinlichkeit
$s$		Schätzungenauigkeit
$S_N$	m	Normsichtweite
$t$	s	Zeit
$\tau$	s	Zeitlücke
$\tau_B$	s	Bremsenverlustzeit
$v$		Unkontrollierbarkeitsanteil
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$w$		Wahrscheinlichkeitsanteil
$\vec{W}$		Wahrscheinlichkeitsvektor
$X$		Zufallsvariable

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>Abwendung</i>	Abwendung durch Nebenaufgabe
<i>Abbruch</i>	bei Abbruch des Versuchs
<i>Ego</i>	Ego Fahrzeug
<i>end</i>	Ende
<i>erkenn</i>	erkennbar
<i>50 %</i>	50 %-Grenze
<i>95 %</i>	95 %-Grenze
<i>99 %</i>	99 %-Grenze
<i>C</i>	Kontrollierbarkeit
<i>Cx</i>	Beliebige Kontrollierbarkeitsstufe nach ISO 26262 C0 – C3
<i>C1</i>	Kontrollierbarkeitsstufe C1 nach ISO 26262
<i>C2</i>	Kontrollierbarkeitsstufe C2 nach ISO 26262
<i>Erfolg</i>	erfolgreiche Versuche
<i>q</i>	Index 1. Parameterebene
<i>r</i>	Index 2. Parameterebene
<i>s</i>	Index 3. Parameterebene
<i>t</i>	Index 4. Parameterebene
<i>U</i>	Unkontrollierbarkeit
<i>Ux</i>	Unkontrollierbarkeit zu beliebiger Kontrollierbarkeitsstufe C0 – C3
<i>Umsetz</i>	Fußumsetzen
<i>max</i>	Maximal
<i>min</i>	Minimal
<i>PoNR</i>	Am Point-of-No-Return Limit
<i>Reakt</i>	Reaktion
<i>rel</i>	Relativ
<i>Richt</i>	Richtgeschwindigkeit
<i>schätz</i>	geschätzt
<i>Sim</i>	aus Simulation
<i>Start</i>	Bei Versuchsbeginn
<i>tr</i>	bis zur Reaktionsgrenze
<i>Umsetz</i>	Fußumsetzen
<i>Vers</i>	aus Versuch
<i>Verz</i>	Verzögerung
<i>x</i>	in x-Richtung (entspricht Fahrzeug-Longitudinalrichtung)
<i>y</i>	in y-Richtung (entspricht Fahrzeug-Lateralrichtung)
<i>Ziel</i>	Zielobjekt, Zielfahrzeug
<i>Ziel stoppt</i>	Bei Erreichen des Stillstands des Zielobjekts/Zielfahrzeugs
<i>Zuw</i>	Blickzuwendung

---

# 1 Einleitung und Motivation

Fahrerassistenzsysteme (FAS), die den Fahrer<sup>1</sup> in kritischen Fahrsituationen unterstützen, werden bereits seit vielen Jahren entwickelt. Mit dem verstärkten Einsatz von Elektronik im Fahrzeug waren dies zu Beginn Systeme auf Stabilisierungsebene wie das Anti-Blockier-System (ABS) und das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESC). Letzteres ermittelt die aktuellen Bewegungsgrößen des Fahrzeugs und erfasst den Richtungswunsch des Fahrers, um bei Abweichungen korrigierend und unterstützend einzugreifen. Mit der beständigen Evolution der mechatronischen Systeme und der Sensorik wurden zusätzlich im vorletzten Jahrzehnt Systeme entwickelt, die anhand von Sensoren wie Radar oder Video auch das Fahrzeugumfeld erfassen und wahrnehmen können und basierend auf diesen Informationen in die Fahrdynamik eingreifen. Zu Beginn der Entwicklung wurde diese Technik nur für Komfortsysteme eingesetzt, ein Beispiel hierfür ist Adaptive Cruise Control (ACC). Mit der Verfügbarkeit der Sensorik im Fahrzeug bei steigender Zuverlässigkeit der Erkennung werden diese Funktionalitäten beständig erweitert und inzwischen auch dazu eingesetzt, Unfälle zu vermeiden oder zu lindern. Diesen sogenannten „Aktiven Sicherheitssystemen“ wird ein großes Unfallvermeidungspotential zugeschrieben<sup>2</sup>. Um dieses Potential nutzen zu können, wird gefordert, dass die Systeme einen möglichst großen Teil des realen Unfallgeschehens abdecken können. Hierfür ist wiederum die Funktion in unterschiedlichsten Situationen zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, werden die Systeme immer weiter vernetzt und unterschiedliche Sensortechnologien kombiniert und fusioniert. Mit steigenden Eingriffsmöglichkeiten und Eingriffsintensitäten wird aber auch die Absicherung im Falle von Fehlern des Systems wichtiger, weil die Schwere der Folgen dieser Fehler steigt. Können fehlerhafte Auslösungen nicht ausgeschlossen werden oder sind diese nicht belastbar zu bewerten, kann ein unfallvermeidendes System entweder nicht in Serie eingesetzt werden oder der Arbeitsbereich und damit wiederum der auf das Unfallgeschehen bezogene Nutzen muss reduziert werden. Die objektive und belastbare Absicherung von fehlerhaften Eingriffen ist dadurch wichtige Voraussetzung für den Einsatz immer umfangreicher und intensiver in die Fahrdynamik eingreifender Fahrerassistenzsysteme. Diese wiederum können einen entscheidenden Beitrag zur Senkung der Unfallzahlen und damit zur Erhöhung der allgemeinen Sicherheit im Straßenverkehr liefern. Neben technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos einer Fahrerassistenzfunktion kann auch ein unfallvermeidender Eingriff durch den Bediener

---

<sup>1</sup> der Begriff Fahrer wird in dieser Arbeit geschlechtsneutral verwendet und umfasst sowohl Fahrerinnen als auch Fahrer

<sup>2</sup> bspw. Hummel et al.: Advanced Driver Assistance Systems, 2011, S. 55

die Auswirkungen begrenzen, sodass fehlerhafte Eingriffe des Systems nicht zu einem Schadensereignis führen. Nicht zuletzt vor dem Hintergrund von Produkthaftungsfragen muss dazu eine belastbare, objektiv nachvollziehbare Kontrollierbarkeitsbewertung vorliegen. Die dafür notwendigen Schritte und damit verbundenen Herausforderungen werden in dieser Arbeit analysiert und Lösungsansätze entwickelt.

---

## 2 Stand der Technik und Forschung

### 2.1 Begriffsdefinitionen

Um Eindeutigkeit der in der Folge verwendeten Begrifflichkeiten zu gewährleisten, werden diese diskutiert und definiert.

#### 2.1.1 Nicht situationsgerechte Auslösungen

Für die Betrachtung von fehlerhaften Eingriffen von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung zur Unfallvermeidung oder -milderung ist eine eindeutige Definition der Begrifflichkeiten dieser „Fehler“ notwendig.

Es erfolgt eine Unterscheidung in „Falsch positiv“ und Falsch negativ“ die hier mit den folgenden Beispielen belegt werden:

- Falsch positiv: Das System löst aus, obwohl keine Unfallgefahr besteht.
- Falsch negativ: Das System löst nicht aus, obwohl eine Unfallgefahr besteht.

In beiden Fällen ist die durch das System veranlasste Aktion nicht der Situation angemessen. Bei Unterbleiben der Auslösung verhält sich das Fahrzeug als wäre es nicht mit einem System ausgestattet. Für die Kontrollierbarkeit wird dieser Fall als unkritisch angesehen. Dies trifft allerdings nur zu, wenn sich der Fahrer nicht auf die Systemreaktion verlässt und daher bei ausbleibendem Eingriff nicht in eine kritische Situation kommt. Insbesondere bei kontinuierlich unterstützenden Komfortsystemen, wie beispielsweise ACC, ist die Gültigkeit dieser Annahme an den Systemgrenzen nachzuweisen. Weiterführende Betrachtungen hierzu finden sich bei Neukum<sup>3</sup>. In der hier vorliegenden Arbeit werden die „Aktiven Sicherheitssysteme“ betrachtet und daher für die Bewertung nur die „falsch positiven“ Auslösungen herangezogen.

Dabei kann die Ursache einer gefährlichen Situation zur Einstufung herangezogen werden. Die ISO 26262, die Anforderungen an die funktionale Sicherheit von elektronischen/elektronischen/programmierbaren Systemen im Automobilbereich festlegt, definiert sowohl einen „failure“ als auch ein „malfunction behaviour“ und einen „non-functional hazard“. Der „failure“ bezeichnet darin einen vollständigen oder teilweisen

---

<sup>3</sup>Neukum et al.: Fahrerverhalten Systemgrenzen ACC, 2008

Verlust der Funktionalität.<sup>4</sup> Börcsök unterscheidet gemäß DIN 40041 die Begrifflichkeiten nach Fehler, im englischen „nonconformity“, und Ausfall, im englischen „failure“.<sup>5</sup>

Um Eindeutigkeit zu erreichen, wird hier folgende Definition verwendet:

### **Funktional bedingte Fehler**

1. Fehlfunktion (englisch: malfunction): Durch einen Hardware oder Software bedingten Fehler innerhalb des Systems erfolgt eine nicht situationsgerechte Auslösung. Diese Fehler können durch geeignete Maßnahmen, beispielsweise durch Systemredundanzen, reduziert werden. Auf diese Fehler ist die ISO 26262 originär ausgerichtet.
2. Ausfall des Systems (englisch: failure): Durch einen Ausfall des gesamten Systems oder von Systemkomponenten unterbleibt eine notwendige Auslösung. Ausfälle können durch Diagnosefunktionen der Elektrik-Elektronik-Systemarchitektur erkannt und dem Fahrer mitgeteilt werden.

### **Funktionale Grenzen und Unzulänglichkeiten**

Aufgrund der prinzipiell unvollständig vorliegenden Umfeldrepräsentation können Auslösungen trotz unkritischer Situation erfolgen. Dabei funktioniert das System innerhalb der Spezifikation, trifft aber anhand der ihm vorliegenden Informationen eine falsche Handlungsentscheidung. Fach et al. und Ebel et al. verwenden hierzu zusammenfassend den Begriff der „funktionalen Unzulänglichkeit“.<sup>6</sup> Für die Beschreibung finden sich in der Literatur die Begriffe Fehl- und Falschauslösung, sie werden teilweise synonym verwendet. Beispielsweise wird unter „Fehlauslösung“ eine „Zuvielauslösung“ (fehlerhafte Auslösung) verstanden.<sup>7</sup> In einigen Quellen wird eine „Zuvielauslösung“ auch als „Falschauslösung“ bezeichnet.<sup>8</sup>

Der Begriff der Fehlauslösung kann als verkürzte Version sowohl der „fehlenden Auslösung“<sup>9</sup> als auch der „fehlerhaften Auslösung“ verstanden werden und ist somit nicht eindeutig.

Zusammenfassend ist die Fehlerhaftigkeit von Auslösungen von Fahrerassistenzsystemen dadurch zu charakterisieren, dass sie nicht der Situation angemessen sind. Daher

---

<sup>4</sup> ISO 26262 - 1, 2009, S. 7, 10, 11

<sup>5</sup> Börcsök: Funktionale Sicherheit, 2011, S. 56

<sup>6</sup> Fach et al.: Bewertung Beherrschbarkeit, 2010, S. 425; Ebel et al.: Ganzheitliche Absicherung, 2010, S. 394

<sup>7</sup> Dosch et al.: Was brauchen Autofahrer, 2006, S. 3 und Maurer: Entwurf Test FAS, 2012, S. 48

<sup>8</sup> s. Mages et al.: Aktive Sicherheit Kreuzungsassistent, 2007, S. 7 und Breuer: Bewertungsverfahren FAS, 2012, S. 55

<sup>9</sup> Breuer: Bewertungsverfahren FAS, 2012, S. 55

wird als zusammenfassender Oberbegriff in der Folge „nicht situationsgerechten Auslösungen“ verwendet. In Abbildung 2-1 sind die Kombinationsmöglichkeiten der Auslösungen von FAS schematisch dargestellt und der in dieser Arbeit betrachtete Fall dunkelgrau markiert.

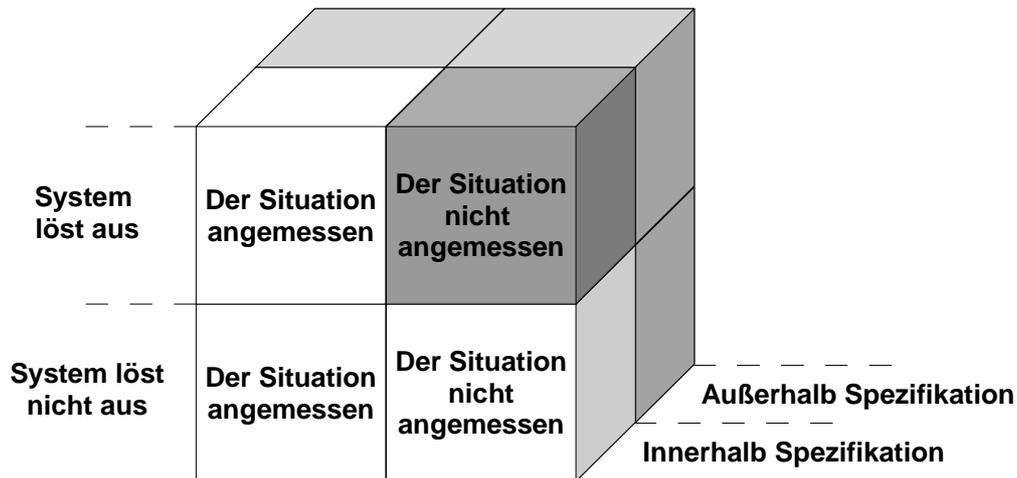


Abbildung 2-1: Klassifikation von Auslösungen von FAS

### 2.1.2 Kontrollierbarkeitsbegriff

Die ISO 26262 liegt nicht in deutscher Sprache vor. Als Begriff für die Vermeidung des Unfalls durch den Bediener/Fahrer wird dort der Begriff „Controllability“ verwendet und folgendermaßen definiert:

*“controllability*

*avoidance of the specified harm or damage through the timely reactions of the persons involved.”<sup>10</sup>*

Die Übersetzung ins Deutsche führt zu unterschiedlichen Begrifflichkeiten. Ein Fachwörterbuch für Automotive Anwendungen schlägt die Ausdrücke „Beherrschbarkeit“ und „Kontrollierbarkeit“ vor.<sup>11</sup>

Der Begriff „Beherrschbarkeit“ findet sich auch in einigen deutschsprachigen Veröffentlichungen zu funktionalen Grenzen und Fehlern von Fahrerassistenzsystemen wieder.<sup>12</sup> Im Duden wird es als „Grad, in dem etwas beherrschbar ist“<sup>13</sup> definiert, wobei das darin enthaltene „beherrschen“ unter anderem als „über jemanden, etwas [...] Macht

<sup>10</sup> ISO 26262 - 1, 2009, S. 4

<sup>11</sup> Wyhlidal, 2012

<sup>12</sup> Neukum et al.: Fahrerverhalten Systemgrenzen ACC, 2008, S. 141; Fach et al.: Bewertung Beherrschbarkeit, 2010, S. 425

<sup>13</sup> Duden, 2013

*ausüben*“, „*zügeln*“, „*unter Kontrolle halten*“, „*dominieren*“, „*bestimmen*“ definiert ist.<sup>14</sup> Die Recherche nach Verwendung des Begriffs „Beherrschbarkeit“ liefert sonst kaum Ergebnisse.

Der Begriff der „Kontrollierbarkeit“ beziehungsweise das darin enthaltene „kontrollieren“, bedeutet laut Duden „*überwachen*“, „*Kontrolle ausüben*“, „*überprüfen*“, „*in einem bestimmten Bereich [...] beherrschenden Einfluss haben*“<sup>15</sup>. Die beiden Begriffe referenzieren also entsprechend direkt aufeinander. Der Begriff „Kontrolle“ ist sowohl in der Technik als auch in anderen Bereichen häufig zu finden. Es definiert beispielsweise in der Handhabungstechnik die Überprüfung von Zuständen und Eigenschaften und gegebenenfalls den Vergleich mit Referenzwerten<sup>16</sup> oder in der Wirtschaft „*den Vergleich zwischen geplanten und realisierten Größen sowie Analyse der Abweichungssachen*“<sup>17</sup>.

Die einschlägige Literatur liefert ebenfalls ein uneinheitliches Bild. König verwendet im Zusammenhang mit dem „Code of Practice“ den Begriff „Kontrollierbarkeit“<sup>18</sup>. Kobiela unterscheidet zwischen der Beschreibung der psychologischen Zusammenhänge als Kontrollierbarkeit, und der Beschreibung der „controllability“ nach ISO 26262 als „Beherrschbarkeit“.<sup>19</sup> Auch in Gasser wird diese Unterscheidung vorgenommen.<sup>20</sup>

Die Trennung geht vermutlich auf die Übersetzung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr<sup>21</sup> zurück, dort wird festgelegt:

*„Jeder Führer muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.“*<sup>22</sup>

Diese Begrifflichkeit, auch im Hinblick auf die Übersetzung, wird von Kempen diskutiert.<sup>23</sup> Seiner Argumentation folgend, kann der Begriff der Beherrschbarkeit als abstrakter als Kontrollierbarkeit verstanden werden. Der Originaltext des Übereinkommens ist in Französisch verfasst und verwendet im ersten beschriebenen Fall den Begriff *contrôle* (Kontrolle, Prüfung, Überwachung). Im Abschnitt 13 heißt es dann: „*Tout conducteur*

---

<sup>14</sup> Duden, 2013

<sup>15</sup> Duden, 2013

<sup>16</sup> Hesse: Grundlagen Handhabungstechnik, 2006, S. 128

<sup>17</sup> Hesse: Grundlagen Handhabungstechnik, 2006, S. 128

<sup>18</sup> König: Nutzergerechte Entwicklung, 2012, S. 38

<sup>19</sup> Kobiela: Fahrerintentionserkennung, 2011, S. 35 ff

<sup>20</sup> Gasser et al.: Rechtsfolgen Fahrzeugautomatisierung, 2012, S. 25 + S. 52

<sup>21</sup> United Nations: Wiener Übereinkommen, 1968

<sup>22</sup> United Nations: Wiener Übereinkommen, 1968, Artikel 8 Abschnitt 5

<sup>23</sup> Kempen: FAS Wiener Abkommen, 2008, S. 6 ff

*de véhicule doit rester, en toutes circonstances, maître de son véhicule [...]*<sup>24</sup> wobei „[...]être maître de la situation [...]“ beispielsweise mit „Herr der Lage sein“ übersetzt wird. Dies beschreibt also eher Beherrschbarkeit.

Die für die Bewältigung einer Fahraufgabe notwendigen Arbeitsprozesse lassen sich nach Donges in die Ebenen Navigation, Führung und Stabilisierung gliedern.<sup>25</sup> Auf unterster Ebene ist eine Stabilisierung des Fahrzeugs durch einen direkten Eingriff des Fahrers in die Längs- und Querdynamik notwendig. In der Forschung werden bereits Fahrzeugführungskonzepte entwickelt, bei denen der Fahrer nicht mehr auf der Stabilisierungsebene eingreifen muss.<sup>26</sup> Auch für diese Systeme besteht die Anforderung, dass der Fahrer in der Lage sein muss, sein Fahrzeug zu beherrschen. Nach Kempen stehen diese Systeme aber nicht im Widerspruch zum Wiener Übereinkommen.<sup>27</sup>

Daraus wird geschlossen, dass Beherrschbarkeit nicht zwingend eine direkte Einflussnahme auf Stabilisierungsebene erfordert. Ebenso kann controllability auch mit Steuerbarkeit übersetzt werden, wofür bei einem Fahrzeug eine direkte Einwirkung auf die Fahrdynamik notwendig ist. Solange für die Beherrschung eines Fahrzeugs eine Steuerung notwendig ist, können nach dieser Argumentation die Begriffe Kontrollierbarkeit und Beherrschbarkeit synonym verwendet werden. Um Verwechslungen zu vermeiden, insbesondere im Bezug auf die englische Begrifflichkeit der ISO 26262 und vor dem Hintergrund, dass bei aktuellen Fahrzeugen, der Fahrer auf Stabilisierungsebene mit dem Fahrzeug interagieren muss, wird in der Folge der Begriff Kontrollierbarkeit im Sinne der Überführung von einem potentiell gefährdenden in einen risikoarmen Zustand mit der Möglichkeit des direkten Eingriffs in die Längs- und Querdynamik verwendet.

### 2.1.3 Fahrsituation und Szenario

Für die Betrachtung von geeigneten Prüffällen sind Umwelt und Umfeld des jeweiligen Fahrzeugs mit seinem Fahrer zu analysieren. Hinsichtlich der Abgrenzung der Begriffe Situation und Szenario wird der Definition nach Geyer et al.<sup>28</sup> gefolgt, die schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt ist.

---

<sup>24</sup> United Nations: Wiener Übereinkommen, 1968, Artikel 8 Abschnitt 13

<sup>25</sup> vgl. Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe in Donges: Aktive Sicherheit, 1982 S. 184

<sup>26</sup> vgl. Winner et al.: Conduct-by-Wire, 2006, S. 5

<sup>27</sup> Kempen: FAS Wiener Abkommen, 2008, S. 6 ff

<sup>28</sup> Geyer et al.: Ontology Automated Vehicles, 2013, S. 6

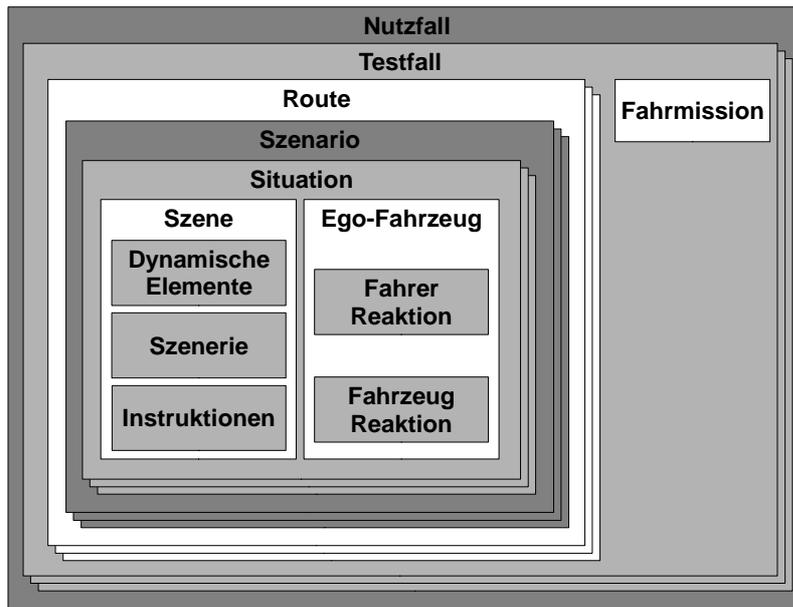


Abbildung 2-2: Begriffliche Einteilung der Einsatzbedingungen<sup>29</sup>

Für die Kontrollierbarkeitsbewertung ist diesbezüglich insbesondere die „Szenerie“ als Definition der statischen Elemente der „Szene“ relevant. Zur Szene gehören auch die „dynamischen Elemente“, wie beispielsweise die weiteren Fahrzeuge, die sich im Umfeld befinden, sowie „Instruktionen“ an den Fahrer. Szene und „Ego-Fahrzeug“ ergeben gemeinsam die Situation. Das „Szenario“ besteht dann aus mindestens einer Einzelsituation.

Der Begriff „nicht situationsgerecht“ wird basierend darauf wie folgt definiert: Das System reagiert auf die vorliegende Einzelsituation in nicht angemessener Weise. Dadurch entsteht eine neue, potentiell kritische Situation, die durch eine Reaktion des Fahrers in eine unkritische Situation überführt werden muss. Der Begriff der Kontrollierbarkeitssituation bezeichnet damit die Situation, die ohne Fahrerreaktion zu einem Unfall führt. Wird die Fahrerhandlung als Reaktion auf die Kontrollierbarkeitssituation einbezogen, entsteht ein Kontrollierbarkeitsszenario.

Analog zur vorliegenden Definition von Situation und Szenario wird das zu betrachtende Fahrzeug als „Ego Fahrzeug“ bezeichnet, das die Gefährdung verursachende Fahrzeug als „Zielfahrzeug“. Je nach Situationsausprägung kann also das Ego-Fahrzeug auch gleichzeitig Zielfahrzeug sein.

---

<sup>29</sup> vgl. Geyer et al.: *Ontology Automated Vehicles*, 2013, S. 6 (Übersetzung aus dem Englischen)

## 2.2 Fahrerassistenzsysteme mit Umfelderkennung

In zahlreichen Serienfahrzeugen sind bereits Fahrerassistenzsysteme mit Umfelderkennung im Bereich der Aktiven Sicherheit verfügbar.<sup>30</sup> Die meisten dieser Systeme haben dabei warnenden und reaktionsunterstützenden Charakter. Zu nennen sind hier beispielsweise Fahrstreifenwechselassistenten, Fahrstreifenverlassenswarner, Spurhalteassistenten und Kollisionswarnsysteme.

In Serie verfügbare weiterführende Systeme mit direktem Eingriff in die Fahrdynamik in potentiellen Unfallsituationen sind beispielsweise kollisionsvermeidende und -lindernde FAS<sup>31</sup> Diese verzögern das Fahrzeug in der Vorunfallphase selbsttätig. Teilweise werden vorgelagerte geringe Verzögerungen eingesetzt, die den Fahrer warnen, mehr Handlungsoptionen ermöglichen und gleichzeitig Geschwindigkeit reduzieren.<sup>32</sup> Da der Fahrer grundsätzlich bis kurz vor dem Unfall noch eine Ausweichoption nutzen kann, kann eine Vollverzögerung erst circa 1 Sekunde vor dem Aufprall eingesetzt werden<sup>33</sup>. Fast alle auf dem Markt befindlichen Systeme wenden daher mehrstufige Warn- und Eingriffsstrategien an, bei denen die Vollverzögerung erst ausgelöst wird, wenn ein Ausweichmanöver den Unfall nicht mehr vermeiden kann.

Aufgrund fahrphysikalischer Zusammenhänge ist bei geringen Geschwindigkeiten eine Kollision noch durch Bremsen vermeidbar, wenn eine Ausweichoption nicht mehr besteht.<sup>34</sup> Automatische Notbremssysteme können dadurch bei geringen Geschwindigkeiten einen Vollbremseingriff durchführen, weil keine Ausweichoption für den Fahrer mehr besteht. Im Geschwindigkeitsbereich bis 30 km/h<sup>35</sup> sind mehrere solcher Systeme in Serie, die das Fahrzeug noch vor der Kollision zum Stillstand bringen können. Beispiele hierfür sind Volvo City Safety, Ford Active City Stop und der VW Front Assist. Diese Systeme adressieren aber eher Unfälle mit leichtem Personen- oder Sachschaden als die Verringerung der im Straßenverkehr Verletzten oder getöteten Personen.

Für die Erfassung des Umfelds werden bei Systemen im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich teilweise Nahbereichs-Lidar-Sensoren eingesetzt. Für höhere Geschwindigkei-

---

<sup>30</sup> s. unter EuroNCAP: Rewards, 2013

<sup>31</sup> Eine Übersicht über in Europa verfügbare Systeme bietet bspw. Euro NCAP: (Pre-) Crash, 2013

<sup>32</sup> s. Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 536

<sup>33</sup> s. Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 536

<sup>34</sup> s. Stählin, Eingriffsentscheidung, 2008, S. 104

<sup>35</sup> bzw. 20 km/h nach Definition EuroNCAP: (Pre-)Crash, 2013

ten kommen Systeme mit einem oder mehreren Radarsensor(en) zum Einsatz. Teilweise werden zusätzlich Daten einer Kamera zur Situationsbewertung herangezogen.<sup>36</sup>

Aus den mit der gewählten Sensorik messbaren Umfelddaten werden in mehreren Schritten eine Umfeldbewertung und eine gegebenenfalls notwendige Handlung abgeleitet. In Abbildung 2-3 sind die Abläufe schematisch dargestellt. Die genaue Aufteilung und Gestaltung der einzelnen Schritte ist stark vom jeweiligen Gesamtsystem und dessen Einbindung im Fahrzeug abhängig.

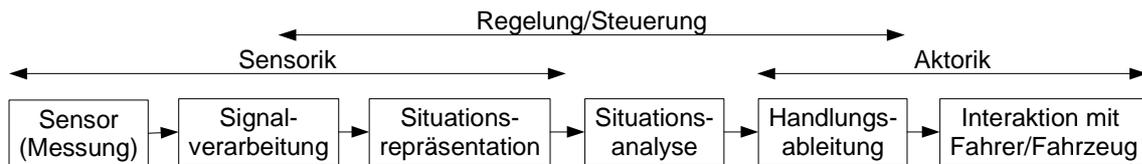


Abbildung 2-3: Schematischer Ablauf von Umfelderkennung<sup>37</sup>

Damit das System eine Handlungsentscheidung treffen kann, beispielsweise, ob eine Warnung oder ein Eingriff ausgeführt wird oder nicht, ist eine Kritikalitätsbewertung und dafür eine Prädiktion des weiteren Situationsverlaufs notwendig.

Aus diesem Ablauf ergeben sich potentielle nicht situationsgerechte Reaktionen, ohne dass dieser „Fehler“ durch einen Defekt der eingesetzten Hardware oder einem Programmfehler der Software ausgelöst wird. Begrenzt durch die grundlegenden Fähigkeiten der Sensorik, insbesondere durch die mit dem jeweiligen Messprinzip erfassbaren Merkmale der Situation, sind diese Daten über das Umfeld weder vollständig noch frei von Messungenauigkeiten. Ebenso werden bei der Erfassung Modellannahmen über das Umweltverhalten getroffen und basierend darauf auch nach der Messung noch bestimmte Daten ausgeschlossen oder vernachlässigt. Für eindeutig definierte zu erfassende Objekte bzw. auch Fahrsituationen sind dabei die Anforderungen an die Erkennungsprozesse auch klar definierbar. Beim Einsatz der Systeme im offenen System des öffentlichen Straßenverkehrs dagegen ist jedoch die umfassende und exakte Definition der Anforderungen sehr viel komplexer. Beispielsweise sind die möglichen Variationen potentieller Kollisionsobjekte wesentlich größer. Für ein kollisionsvermeidendes System können dies, neben häufig auftretenden Verkehrsteilnehmern wie Pkw, Lkw, Fahrradfahrern und Fußgängern, ebenso auch seltenere Fälle wie verlorene Ladung oder Schafherden sein. Entsprechend können sich fehlerhafte Messungen, falsche Interpretationen der Messwerte oder unzutreffende Prädiktionen ergeben, die zu einer Aktion des Systems führen, die der jeweiligen Situation nicht angemessen ist.<sup>38</sup>

---

<sup>36</sup> Pankalla et al.: FAS Integrale Sicherheit, 2010, S. 206

<sup>37</sup> in Anl. an Stiller: Fahrerassistenzsysteme, 2005, S. 8 und Darms: Sensordatenfusion, 2007, S. 9

<sup>38</sup> Beispiele hierfür in Maurer: Entwurf Test FAS, 2012, S. 48

## 2.3 Risikobegriff

Risiko ist in der Ingenieurwissenschaft allgemein als das Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensschwere definiert.<sup>39</sup> Sind Menschen in den Ablauf eingebunden, die durch gezielte Handlungen den Schaden noch abwenden können, ist auch diese „Kontrollierbarkeit“ für die Risikobestimmung als zusätzlicher Faktor zu berücksichtigen.

Um das Risiko bewerten zu können, wird neben einer möglichst objektiven Bewertung dieser drei Elemente, für die Definition des „sicheren Zustands“ auch ein Referenzrisiko benötigt. Dafür wird das sogenannte Grenzzisiko herangezogen, welches das gesellschaftlich akzeptierte Risiko darstellt. Liegt das Risiko, welches von einem Produkt ausgeht, unterhalb des Grenzzisikos, ist es als ausreichend sicher zu betrachten. Abbildung 2-4 zeigt die Risikozusammenhänge schematisch.



Abbildung 2-4: Risikozusammenhänge<sup>40</sup>

Das Grenzzisiko ist durch den aktuellen technischen Stand definiert. Ein Hersteller eines Gerätes muss entsprechend im Schadensfall nachweisen können, dass es dem Stand von Wissenschaft und Technik genügt.<sup>41</sup> Um für die Hersteller von Produkten einheitliche Richtlinien zu definieren, wird häufig eine Dokumentation des Standes der Technik und der damit verbundenen Anforderungen für die Entwicklung von sicheren Systemen in Normen vorgenommen.

<sup>39</sup> DIN ISO 31000, 2009, S. 8 u. 13

<sup>40</sup> in Anl. an DIN V 19250 und IEC 61508-5 in Börsök: Funktionale Sicherheit, 2011, S. 96, S. 192

<sup>41</sup> ProdHaftG § 3 Abs.3; vgl. auch BGH Urteil 16. Juni 2009 – VI ZR 107/08

## 2.4 Rechtliche Rahmenbedingungen der funktionalen Sicherheit

Damit ein Produkt für den Verkauf oder die Verwendung freigegeben werden kann, muss der Nachweis geführt werden, dass es ausreichend sicher ist. Verschiedene Regelwerke auf unterschiedlichen Detaillierungsstufen stellen sicher, dass hierbei auch allgemein akzeptierte Kriterien herangezogen werden. Diese folgen dem Stufenbau der Rechtsordnung. Auf höchster Ebene ist beispielsweise in Deutschland das Grundgesetz bindend,<sup>42</sup> spezifischere Gesetze in den einzelnen Teilbereichen sind an die dort festgelegten Grundsätze gebunden.<sup>43</sup> Für die funktionale Sicherheit enthält vor allem das Produkthaftungsgesetz und die Straßenverkehrsordnung (STVO) und die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (STVZO) detailliertere Ausführungen zu den Rechten und Pflichten der beteiligten Parteien. Konkrete Anforderungen im Sinne von technisch anwendbaren Methoden oder direkten Produkthanforderungen sind in Gesetzestexten jedoch nicht enthalten. Um den in den Gesetzen geforderten Stand der Technik einheitlich und verbindlich festzuhalten, existieren Technische Normen, die dies dokumentieren.<sup>44</sup> Eine für die Betrachtung der Abhängigkeiten zwischen den Regularien eingesetzte Darstellung ist die in Abbildung 2-5 dargestellte „Normenpyramide“ für technische Produkte.

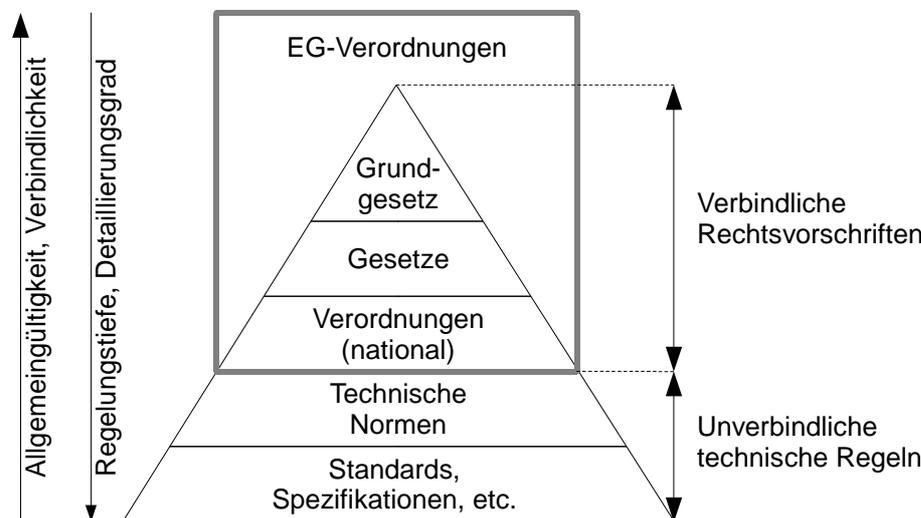


Abbildung 2-5: Normenpyramide<sup>45</sup>

<sup>42</sup> welches wiederum in den EU-rechtlichen und völkerrechtlichen Rahmen eingebunden ist

<sup>43</sup> vgl. Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland (GG) Art. 1 Abs. 3 und Art. 20 Abs. 3 und Felix: Einheit Rechtsordnung, 1998, S. 178

<sup>44</sup> für eine detailliertere Betrachtung der Zusammenhänge wird auf Weitzel et. al: Absicherungsstrategien FAS, Kap. 2 verwiesen

<sup>45</sup> in Ständer: Modellbasierte Objektivierung, 2011, S. 18, nach Losano: Turbulenzen im Rechtssystem, 2007

Ein Teilgebiet der allgemeinen Produktsicherheit ist die korrekte und sichere Funktion des Produktes. Diese wird als funktionale Sicherheit bezeichnet.<sup>46</sup> Die dafür zu erfüllenden Anforderungen bei der Gestaltung von elektrischen, elektronischen und programmierbaren elektronischen Systemen im Allgemeinen, fasst die Norm IEC/EN 61508<sup>47</sup> zusammen. Basierend darauf existiert eine Vielzahl von spezifischeren Normen, die in den unterschiedlichen technischen Bereichen deren Besonderheiten berücksichtigen. Einige Beispiele sind in Abbildung 2-6 zusammengestellt.

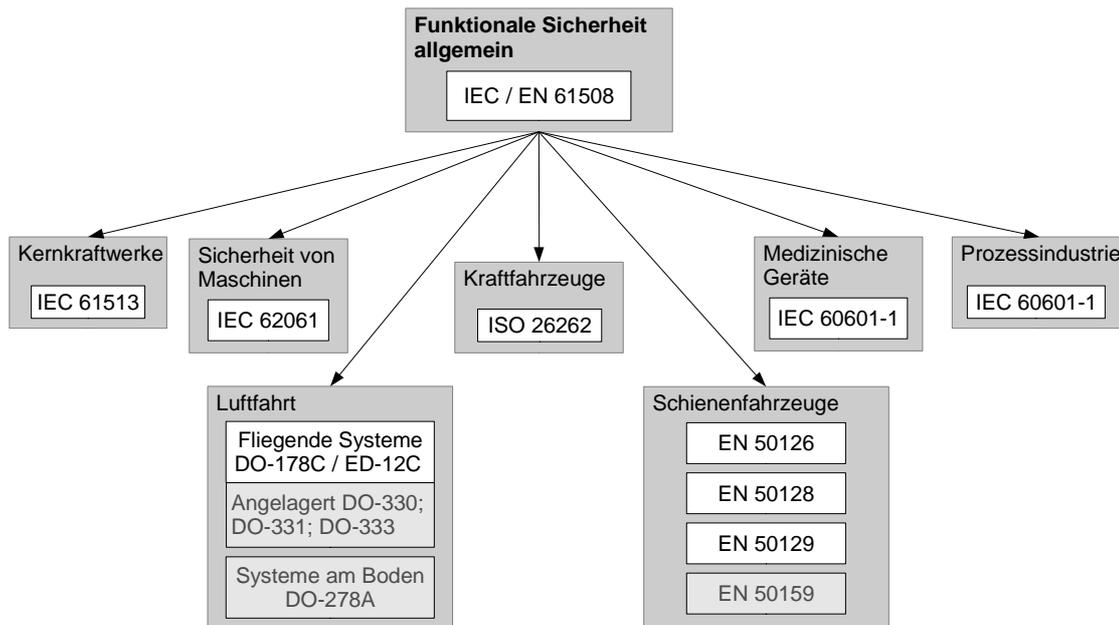


Abbildung 2-6: Technische Normen zur funktionalen Absicherung elektrischer/elektronischer/programmierbarer Systeme<sup>48</sup>

Für die Automobilentwicklung ist die im Jahre 2011 in der Erstversion veröffentlichte ISO 26262 relevant.

## 2.5 ISO 26262 und Funktionale Unzulänglichkeit

In Anwendung der Konzepte der IEC 61508 enthält die ISO 26262 Anforderungen an die Entwicklung sicherheitskritischer Komponenten und Systeme über den gesamten Produktlebenszyklus von Straßenkraftfahrzeugen, wobei zurzeit nur Personenkraftwagen bis 3,5 t adressiert sind, auch wenn für Nutzkraftfahrzeuge<sup>49</sup> und motorisierte Zwei-

<sup>46</sup> Börsök: Funktionale Sicherheit, 2011, S. 52

<sup>47</sup> IEC 61508, 2010

<sup>48</sup> s. auch Börsök: Funktionale Sicherheit, 2011 und Ständer et al.: Branchenspezifische Normen, 2008, S. 335

<sup>49</sup> Dardar et al.: Industrial Experiences ISO 26262, 2012 und Teuchert: ISO 26262 Fluch oder Segen, 2012

räder<sup>50</sup> Anpassungen erarbeitet werden. Das Vorgehen orientiert sich am allgemeinen V-Modell der Produktentwicklung<sup>51</sup>. Grundlegender Ansatz ist, bereits in der Konzeptphase zu Beginn der Entwicklung von Systemen, die Gefahren, die durch das System entstehen können, abzuschätzen und die resultierenden Risiken zu klassifizieren. Basierend darauf werden die Sicherheitsziele festgelegt und damit die Anforderungen an Methoden, Qualitätssicherung und Überwachung, sowohl während der folgenden Entwicklung als auch im späteren Betrieb, definiert.

Zu Beginn der Entwicklung sind dafür, basierend auf einer abstrakten Funktionsbeschreibung, der „Item Definition“, die Risiken abzuschätzen. Die Validität dieser Abschätzung, insbesondere für den Faktor „Controllability“ ist dann später in der „Safety Validation“ zu prüfen. Der vereinfachte Ablauf des Sicherheitsentwicklungsprozesses nach ISO 26262 ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

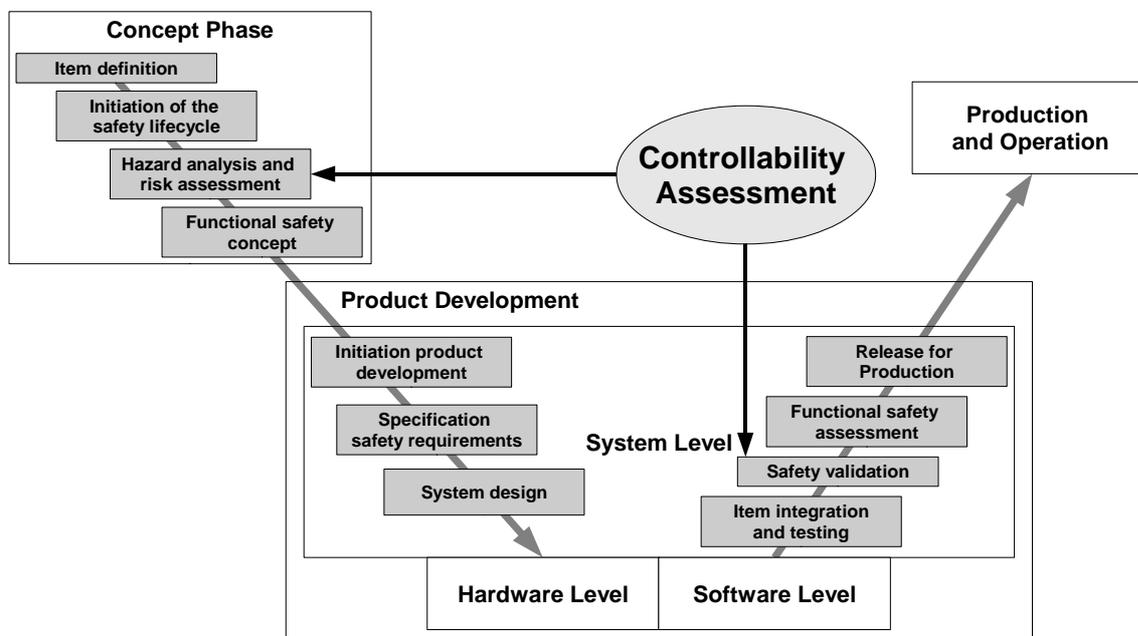


Abbildung 2-7: Entwicklungsprozess nach ISO 26262 mit Einordnung der Controllability-Bewertung<sup>52</sup>

Die Risikobewertung zu Beginn erfolgt im Rahmen der „Hazard Analysis and Risk Assessment“. Sie teilt potentielle Gefährdungen in den Kategorien Expositionswahrscheinlichkeit (**E**xposure), Schadensschwere (**S**everity) und Kontrollierbarkeit (**C**ontrollability) in drei oder vier Stufen ein. Tabelle 2-1 zeigt die „Controllability“ Klassen mit der dazugehörigen Definition.

<sup>50</sup> Bachmann et al.: Erfahrungen ISO 26262 Motorräder, 2013 und Werkmeister et al.: ISO 26262 Erfahrungen, 2012

<sup>51</sup> s. V-Modell, 2013

<sup>52</sup> in Anl. an ISO 26262 - 3, 2009, S. vi und 3

Tabelle 2-1: Einteilung der Controllability Stufen nach ISO 26262<sup>53</sup>

Class	C0	C1	C2	C3
<b>Description</b>	Controllable in general	Simply controllable	Normally controllable	Difficult to control or uncontrollable
<b>Definition</b>	Controllable in general	≥ 99%	≥ 90%	< 90%
		or more of all drivers or other traffic participants are usually able to avoid a specific harm.		

Die Bewertungen in den drei Kategorien (C, E und S) werden anhand der in Tabelle 2-2 dargestellten „ASIL Determination Matrix“ miteinander kombiniert und daraus das resultierende geforderte „Automotive Safety Integrity Level“ (ASIL) A bis D ermittelt. In der niedrigsten Risikoausprägung ist ein Qualitätsmanagement (QM) ausreichend.

Tabelle 2-2: ASIL Bestimmungsmatrix

		C1	C2	C3
<b>S1</b>	<b>E1</b>	QM	QM	QM
	<b>E2</b>	QM	QM	QM
	<b>E3</b>	QM	QM	A
	<b>E4</b>	QM	A	B
<b>S2</b>	<b>E1</b>	QM	QM	QM
	<b>E2</b>	QM	QM	A
	<b>E3</b>	QM	A	B
	<b>E4</b>	A	B	C
<b>S3</b>	<b>E1</b>	QM	QM	A
	<b>E2</b>	QM	A	B
	<b>E3</b>	A	B	C
	<b>E4</b>	B	C	D

Aus dem ASIL leiten sich Sicherheitsanforderungen („Safety Goals“) ab, die in der weiteren Produktentwicklung zu berücksichtigen sind bzw. die anzuwendende Vorgehensweisen bedingen. Die Klasse ASIL D definiert beispielweise als Anforderung an die Ausfallsicherheit von Hardwarekomponenten eine Rate nicht erkannter Fehler von  $\leq 10^{-8}$  pro Betriebsstunde.

Bei neuartigen Systemen liegt in dieser frühen Phase nur eine abstrakte funktionale Definition des betreffenden Items vor. Die Bewertung muss daher auf Basis von Ab-

<sup>53</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S. 9

schätzungen erfolgen. Diese können durch Entwicklungsstudien und anhand von Erfahrungen mit bereits getesteten Systemen gestützt werden.<sup>54</sup>

Durch dieses Vorgehen werden Sicherheitsanforderungen bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses in die Produktdefinition integriert. Dadurch können die nachfolgenden Entwicklungs- und Programmiermethoden anhand von sicherheitstechnischen Kriterien ausgewählt werden.

Die Norm ISO 26262 ist für die funktionale Sicherheit von elektrischen/elektronischen/programmierbaren Systemen ausgelegt. Wie in Kapitel 2.2 diskutiert, entstehen nicht situationsgerechte, als fehlerhaft empfundene Eingriffe von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung, jedoch nicht nur durch Versagen von Bauteilen oder fehlerhafter Funktion. Auch bei Funktion innerhalb der Spezifikationen kann durch eine unvollständige Situationswahrnehmung oder aufgrund nicht eintretender Prädiktions- bzw. Modellannahmen eine nicht situationsgerechte Reaktion des Systems auftreten. Die ISO 26262 adressiert dabei nur Systeme, bei denen eindeutig zwischen einem spezifikationsgerechten Zustand, der korrekten Funktion, und einem nichtspezifikationsgerechten Zustand, einem Fehler/Ausfall oder einem Versagen differenziert werden kann. Gefährdungen („Hazards“) entstehen dort als Resultat dieser Ausfälle bzw. Fehler. Fahrerassistenzsysteme, welche das Umfeld detektieren, interpretieren und daraus Entscheidungen über Eingriffe in die Fahrdynamik treffen, können hingegen aufgrund der großen Anzahl möglicher Fahrsituationen weder so eindeutig spezifiziert noch so getestet werden, dass fehlerhafte Eingriffe nur außerhalb der Spezifikation auftreten.<sup>55</sup>

Auch wenn die über die Systemgrenzen nach außen wirkenden, beispielsweise für den Fahrer wahrnehmbaren Effekte auf das Fahrzeug ähnlich sein können, zum Beispiel eine Verzögerung des Fahrzeugs ohne ersichtlichen Grund, unterscheiden sich die Ursachen grundsätzlich. Im durch die ISO 26262 adressierten Fall, handelt es sich um das Versagen eines Bauteils oder um eine nicht fehlerfreie Programmierung der dazugehörigen Software. Diese Fehler sind dadurch eindeutig als solche identifizierbar und können durch Entwicklungsmethodik, z.B. einer Fehlererkennung mit sehr hoher Abdeckung und Abschalt- und Degradationsmaßnahmen, auf ein Minimum reduziert werden. Wie in Kapitel 2.1.1 diskutiert, reagiert im Falle von nicht situationsgerechten Auslösungen das System jedoch gemäß seiner Spezifikation, diese deckt jedoch nicht alle theoretisch möglichen Fälle ab, die im Fahrzeugbetrieb auftreten können. Selbst wenn alle Fahrsituationen abgebildet werden könnten, kann die Anzahl der beeinflussenden Randbedingungen beliebig detailliert werden, sodass eine theoretisch unendliche Anzahl von Situationen entsteht. Aktuell sind keine Methoden bekannt, wie die dadurch entstehende Betrachtungslücke mit vertretbarem Aufwand zumindest soweit zu füllen ist, dass für

---

<sup>54</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S. 3

<sup>55</sup> vgl. Weitzel et al.: Absicherungsstrategien FAS, 2013, S50 ff

den Einsatz umfelderfassender Systeme ein hinreichendes Sicherheitsniveau nachweisbar wird.

Die in der ISO 26262 verwendete ASIL Einstufung als Risikobetrachtungsmethode wird dabei auf oberster Ebene grundsätzlich als vergleichbar angesehen. Aus Sicht des Fahrers und weiterer beteiligter Personen ist es unerheblich, ob die Ursache einer Gefährdung in funktionalen Unsicherheiten oder in Unzulänglichkeiten des Systems begründet ist, solange die Auswirkungen auf die Situation gleich oder zumindest ähnlich sind. Bereits in der nächsttieferen Systemebene, auf der die Ursachen von nicht situationsgerechtem Verhalten zu identifizieren sind, sind die in der Norm vorgeschlagenen Ansätze unter Umständen nicht mehr anwendbar. Dies gilt insbesondere auch für die Methoden zur Vermeidung solcher Gefährdungen.

Wird die nicht situationsgerechte Reaktion des Systems aus Sicht des Betroffenen (bspw. des Fahrers, aber auch anderer Verkehrsteilnehmer) betrachtet, so kann davon ausgegangen werden, dass in beiden Fällen die Auswirkungen eines fehlerhaften Eingriffs auf das Fahrzeug und damit der Eindruck für die Betroffenen vergleichbar sind. Ebel et al.<sup>56</sup> bezeichnet dies als ganzheitlichen Ansatz, der eine vergleichende Bewertung der Auswirkungen sowohl von technischen Fehlern als auch von funktionalen Unzulänglichkeiten zulässt. Inwiefern allerdings das zugrundeliegende akzeptierte Grenzkrisiko und damit die aus der ASIL-Bewertung resultierenden erlaubten Fehlerraten in beiden Fällen gleichgesetzt werden darf, wird dort bereits angezweifelt.

## 2.6 Bewertung der Kontrollierbarkeit

Eine Bewertung der Kontrollierbarkeit von FAS sowohl an den Systemgrenzen als auch bei funktionalen Unsicherheiten, ist für die Sicherheitsbewertung eines Systems notwendig. Sie ist, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, bereits zu Beginn des Produktentwicklungszyklus nach ISO 26262 durchzuführen. Hierfür geeignete bzw. bewährte Prozesse sind im „Code of Practice“<sup>57</sup> beschrieben. Er fasst empfohlene Abläufe zur sicheren Entwicklung von FAS zusammen und stellt konkrete Anwendungsbeispiele bzw. Methoden für die Betrachtung und Bewertung in den einzelnen Phasen dar. Beispielsweise sind darin Fragebögen zur situationsabhängigen Betrachtung des Zusammenwirkens von Fahrerassistenzsystemen und Fahrern in 18 Kategorien (bspw. Predictability, Trust, Comprehensibility) enthalten. Ebenso werden unterschiedliche Bewertungsmethoden wie Studien in Fahrsimulatoren, Expertenbewertungen und Probandentestes hinsichtlich der Vor- und Nachteile für die Kontrollierbarkeitsbewertung diskutiert.

---

<sup>56</sup> Ebel et al.: Ganzheitliche Absicherung, 2010, S. 396

<sup>57</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009

Darüber hinaus existieren, orientiert an den Anforderungen einzelner Phasen der Produktentwicklung, Lösungsansätze zur Bewertung nach ISO 26262. Für den Bereich des „Hazard and Risk Assessments“ stellen Kemmann und Trapp einen Ansatz vor, bei dem trotz hoher Situationsvielfalt, gestützt durch ein Reaktionsmodell, Aussagen zur Gefährdungsbeurteilung abgeleitet werden.<sup>58</sup> Darin werden die Expositionswahrscheinlichkeiten von Umgebungsfaktoren miteinander kombiniert und über ein ebenfalls statistisches Modell der Fahrerreaktion modelliert und mit dem Monte-Carlo Verfahren eine Bewertung durchgeführt. Einen ähnlichen Ansatz, ebenfalls für die Risikobewertung, wählt auch Ständer.<sup>59</sup> Ein Bezug zur späteren Validierung in Versuchen wird in beiden Quellen nicht hergestellt.

Ebel et al. beschreiben ein Verfahren, welches aus einem Fahrerreaktionsmodell in Kombination mit Dauerlaufdaten die Unfallhäufigkeit und Schwere durch Simulation ermittelt. Betrachtet wird die Gefährdung des nachfolgenden Fahrzeugs durch eine plötzliche Verzögerung des Vorfahrenden. Aus der Analyse wird ein Risikofaktor abgeleitet, der vergleichbar mit dem Vorgehen in der ISO 26262 zulässige Fehlauflöseraten des Systems definiert.<sup>60</sup>

Zur Validierung der Kontrollierbarkeit durch Probandenversuche existieren ebenfalls bereits Studien. Ein solches Verfahren zur Kontrollierbarkeitsbewertung einer Notbremsfunktion, ebenfalls bei Betrachtung des nachfolgenden Fahrzeugs, diskutiert Fach. Er setzt dafür Probandenversuche im Fahrsimulator ein.<sup>61</sup>

Hinsichtlich der Kontrollierbarkeit von unerwünschten oder ausbleibenden Eingriffen durch den Fahrer des mit dem FAS ausgestatteten Fahrzeugs, liegen ebenfalls bereits Studien vor. Neukum et. al beschreiben ein Vorgehen zur objektiven und subjektiven Kontrollierbarkeitsbewertung von Adaptive Cruise Control (ACC) an den Systemgrenzen mit Versuchen im Realverkehr.<sup>62</sup> Kobiela entwickelt einen Versuchsaufbau zur Erkennung der Fahrerintention in Fällen von nicht situationsgerechten Auslösungen. Dabei zeigt sie auf, dass Erkenntnisse zur Überstimmung der Auslösungen auch Aufschlüsse zur Kontrollierbarkeit liefern können.<sup>63</sup>

Hoffmann simuliert nicht berechtigte Auslösungen von Notbremssystemen und betrachtet die resultierende Geschwindigkeitsreduktion sowie die subjektive Bewertung der

---

<sup>58</sup> Kemmann et al.: SAHARA, 2011

<sup>59</sup> Ständer: Modellbasierte Objektivierung, 2011, S. 119

<sup>60</sup> Ebel et al.: Ganzheitliche Absicherung, 2010

<sup>61</sup> Fach et al.: Bewertung Beherrschbarkeit, 2010, S. 431

<sup>62</sup> Neukum et al.: Fahrerverhalten Systemgrenzen ACC, 2008

<sup>63</sup> Kobiela: Fahrerintentionserkennung, 2011, S. 87, 260

Situation durch den Fahrer, in den Versuchen existiert keine Überstimmungsoption.<sup>64</sup> In Unselt et al. werden bei nicht berechtigten Auslösungen eines warnenden Systems Messungen von mentalen Stress-Indikatoren durchgeführt und diese subjektiven Bewertungen aus Probandenbefragungen gegenübergestellt.<sup>65</sup>

## 2.7 Absicherungsmethoden

Für die Absicherung der funktionalen Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen im gesamten Produktentwicklungs- und -lebenszyklus wird eine Vielzahl von Methoden eingesetzt. Eine detaillierte Betrachtung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen. Vielmehr werden einzelne Ansätze vorgestellt, die für Kontrollierbarkeitsbewertung relevant sind. Für eine weiterführende Betrachtung zu Absicherungsmethoden wird auf Weitzel et. al<sup>66</sup> verwiesen.

In der frühen Entwicklungsphase werden Methoden zur Identifikation und Quantifizierung von Fehlern bzw. der daraus resultierenden Gefährdungen eingesetzt. Ein Beispiel hierfür ist die „Hazard-and-Operability-Study“ (HAZOP). Abhängig von der Konkretisierungsstufe des Produktes werden weiterführend auch Fehlerbaumanalysen (FTA: Fault-Tree-Analysis), Ereignisbaumanalysen (ETA: Event-Tree-Analysis) und Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) eingesetzt. Eine Zusammenstellung der Vor- und Nachteile der Methoden findet sich beispielsweise im Code of Practice.<sup>67</sup>

Mit steigender Konkretisierung kommen sogenannte X-in-the-Loop Techniken zum Einsatz, bei denen Systemkomponenten, in teilvirtuellen Systemen getestet werden.<sup>68</sup>

Durch Anwendung dieser Methoden sollen die durch auftretende Fehler entstehenden Gefährdungen frühzeitig identifiziert und quantifiziert werden. Basierend darauf können dann Gegenmaßnahmen bezüglich der eingesetzten Hard- und Softwarekomponenten ergriffen werden. Kann das Risiko einer Funktion dadurch nicht ausreichend reduziert werden, besteht auch die Möglichkeit, den Arbeitsbereich des Fahrerassistenzsystems zu begrenzen. Dazu werden die Eingriffsstärke oder die Eingriffsdauer begrenzt, um das Risiko zu senken, indem die Schwere des potentiellen Schadens reduziert wird. Ebenso kann gegebenenfalls durch die Begrenzung die Kontrollierbarkeit erhöht werden. Wird dies auf Soft- und Hardwareebene dicht am Aktor-Steuergerät durchgeführt, kann damit

---

<sup>64</sup> Hoffmann: Darmstädter Verfahren, 2008, S. 76 Fecher et al.: Aktive Gefahrenbremsungen, 2009, S. 148 f

<sup>65</sup> Unselt et al.: Behavioral Aspects Integrated Safety, 2011, S. 8

<sup>66</sup> Weitzel et al.: Absicherungsstrategien FAS, 2013, S. 29

<sup>67</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009, S. A52 ff

<sup>68</sup> Strasser et al.: Vernetzung von Test- und Simulation, 2010, S. 2

auch ein Großteil der Fehler in der weiteren Verarbeitungskette abgefangen und dadurch abgesichert werden.<sup>69</sup>

In Abbildung 2-8 ist dieser Ansatz beispielhaft für zwei unterschiedliche benötigte Kontrollierbarkeitsstufen dargestellt.

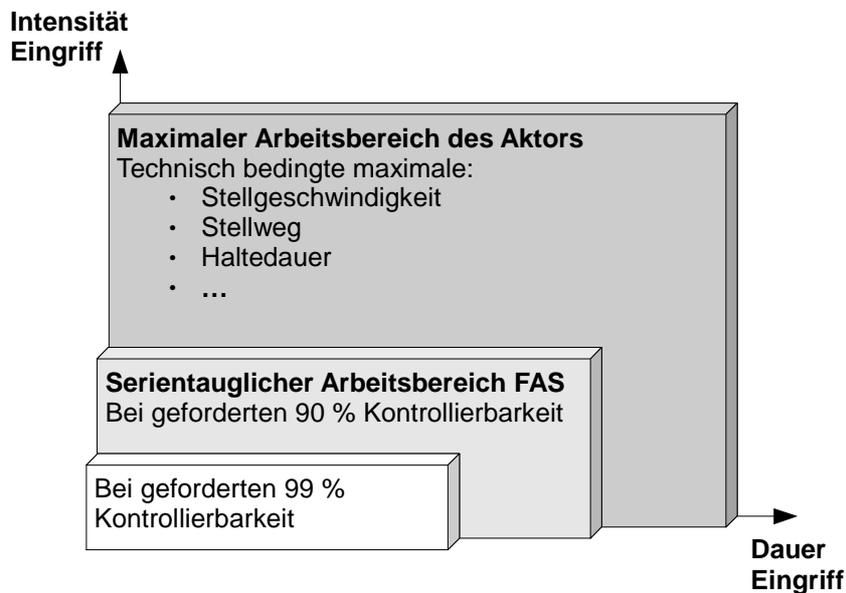


Abbildung 2-8: Begrenzung des Arbeitsbereichs zur Erhöhung der Kontrollierbarkeit<sup>70</sup>

Eine Begrenzung des Arbeitsbereiches führt jedoch unter Umständen auch zu einer Reduktion der durch das System vermeidbaren Unfälle und damit des Nutzens des Systems.<sup>71</sup>

---

<sup>69</sup> Ebel et al.: Ganzheitliche Absicherung, 2010, S. 397

<sup>70</sup> in Anl. an Ebel et al.: Ganzheitliche Absicherung, 2010, S. 397

<sup>71</sup> s. Weitzel et al.: Absicherungsstrategien FAS, 2013, S. 23 ff

---

### 3 Präzisierung der Ausgangslage, Aufgabenstellung und Vorgehen

Bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist neben den Anwendungsfällen und dem damit verbundenen notwendigen Nachweis der Wirksamkeit des Systems in realen kritischen Situationen auch sicherzustellen, dass das Risiko im Falle von nicht situationsgerechten Auslösungen des Systems begrenzt ist. Dieses Risiko wird bemessen nach der Häufigkeit, mit der das System/ das Fahrzeug einer bestimmten Situationskonfiguration ausgesetzt ist („Exposure“), der Kontrollierbarkeit („Controllability“) dieser nicht korrekten Auslösung, welche die Möglichkeit der an der Situation beteiligten Personen zur Abwendung des Schadens beschreibt, und der resultierenden Schadensschwere („Severity“), wenn es tatsächlich zu einem Unfall kommt. Die Kontrollierbarkeitsbewertung erfolgt dabei mit direkter Einbindung der beteiligten Personen, daher ist sie im Nachweis als besonders aufwändig zu bewerten, insbesondere, wenn Versuche mit unvoreingenommenen Probanden durchgeführt werden.

Für den Bereich von nicht situationsgerechten Auslösungen ergibt sich zusätzlich die Problematik, dass potentielle Gefährdungsquellen nicht mit klassischen Risikoidentifikationsmethoden betrachtet werden können, weil ein „Fehler“ des Systems nicht eindeutig definiert werden kann. Entsprechend ist eine Analyse und Definition des Zustandes „nicht situationsgerechte Auslösung“ eines Fahrerassistenzsystems notwendig, damit mögliche Folgen überhaupt betrachtet werden können.

Die Analyse des Standes der Technik in Kapitel 2 zeigt, dass bereits unterschiedliche Ansätze zur Prüfung der Kontrollierbarkeit, auch bezogen auf die ISO 26262, existieren. Die Ansätze lassen sich in zwei Bereiche gliedern. Der erste Bereich dieser Verfahren adressiert die allgemeine Bewertung des Risikos in der frühen Entwicklungsphase. Diese stellt aufgrund der abstrakten Funktionsdefinition eine Abschätzung dar. Der zweite Teil zielt auf die Validierung der Kontrollierbarkeit in Versuchen. Eine umfassende und durchgängige Betrachtung der nötigen Schritte einer objektiven und übertragbaren Bewertung der Kontrollierbarkeit, insbesondere von funktionalen Unzulänglichkeiten über alle Produktentwicklungsphasen, konnte nicht gefunden werden. Ebenso fehlt eine konkrete Aufwandsermittlung für eine belastbare, objektive Bewertung sowie die Diskussion und Darstellung der allgemeinen Umsetzbarkeit.

Da der Aufwand für die objektive Untersuchung der Kontrollierbarkeit aber allgemein als hoch eingeschätzt wird<sup>72</sup>, ist in jedem Fall eine möglichst hohe Übertragbarkeit der

---

<sup>72</sup> s. PREVENT: Code of Practice, 2009, S. 15 und ISO: ISO 26262 - 3, 2009, S. 24

Ergebnisse anzustreben. Dabei ist die direkte Verknüpfung von Versuchsergebnissen aus der Validierung mit den Kontrollierbarkeitsabschätzungen für die Ermittlung der Sicherheitsziele zu Beginn der Produktentwicklung anzustreben. Kann dies erreicht werden, ist eine direkte Rückkopplung der Erkenntnisse zwischen den beiden Entwicklungsphasen möglich. Basierend darauf sind unter Umständen auch umfangreiche Probandenversuche zu rechtfertigen, weil Erkenntnisse auch auf zukünftige Systeme anwendbar sind. In weiteren Schritten könnte anhand einer solchen Methodik auch eine sukzessive Verbesserung der verfügbaren Datenlage erfolgen.

Wird davon ausgegangen, dass die in der ISO 26262 beschriebenen Bewertungsmethoden auch auf die nicht situationsgerechte Auslösungen von FAS mit Umfeldwahrnehmung angewendet werden können, ist zudem die Definition der Anforderungen an eine objektive Bewertung in den einzelnen Schritten erforderlich.

Forschungsbedarf besteht damit hinsichtlich der Identifikation der notwendigen Schritte zur durchgängigen, objektiven und übertragbaren Bewertung der Kontrollierbarkeit von nicht situationsgerechten Auslösungen und der Definition von Anforderungen und Herausforderungen in den jeweiligen Schritten. Geeignete Methoden zur Bewältigung der Herausforderungen sind zu entwickeln. Um die Anwendbarkeit des Verfahrens zu zeigen und Schwächen und Weiterentwicklungspotential zu identifizieren, werden die entwickelte Methodik von der Abschätzung der Kontrollierbarkeit in der Gefährdungsanalyse, bis zur Darstellung und Validierung in Versuchen anhand eines Beispiels durchlaufen sowie Schlussfolgerungen und Erkenntnisse zusammengestellt.

Für die beispielhafte Anwendung der Methodik werden kollisionsvermeidende/-lindernde Systeme betrachtet, die selbsttätig in die Längsdynamik des Fahrzeugs bis zur Vollverzögerung eingreifen können. Einerseits ist die Anzahl bereits im Markt verfügbarer Systeme dieser Kategorie bereits hoch, sodass unterschiedliche Ausprägungsformen zu berücksichtigen sind, um die Übertragbarkeit zu gewährleisten. Gleichzeitig erfolgt nur ein Eingriff in die Längsdynamik, sodass die Komplexität der Situationsentwicklungen noch überschaubar bleibt.

---

## **4 Identifikation der Anforderungen an die Kontrollierbarkeitsbewertung**

### **4.1 Analyse nicht situationsgerechter Auslösungen**

Die Fahrsituation eines Fahrzeugs wird durch eine Vielzahl von Einflussparametern beschrieben. Für die Bewertung der Kontrollierbarkeit in nicht situationsgerechten Auslösungen, muss identifiziert werden, welche dieser Parameter relevant sind. Dazu ist zu ermitteln, wie die jeweiligen Parameter Einfluss auf die Situationsentstehung und den Situationsverlauf haben. Es wird unterschieden, ob diese Variationsparameter sind, die zur Unterscheidung von Situationen bzw. im Umkehrschluss zur Generierung von Prüfsituationen herangezogen werden können, oder Effekte, die durch die Situation hervorgerufen werden.

Für die Entstehung muss eine Ursache, ein Auslöser vorliegen. Fehler im Sinne der funktionalen Sicherheit sind dabei Hard- oder Softwarefehler oder -ausfälle. Ist die Ursache einer nicht situationsgerechten Auslösung jedoch in einer funktionalen Unzulänglichkeit begründet, wird angenommen, dass die Auslösung durch die Situationskonstellation erzeugt wird.

Für die Entstehung einer konkreten Gefahr, muss zusätzlich eine Gefährdung auftreten bzw. diese durch die Auslösung entstehen. Erst daraus ergeben sich die Notwendigkeit der Abwendung eines Schadens und eine Handlungsaufforderung für die beteiligten Personen. Auf diese Handlungsaufforderung müssen die beteiligten Personen reagieren. Die Auswirkungen der Reaktionen können durch Situationsumstände jedoch verzögert oder vermindert werden.

Ausgehend von der Fahrsituation muss also entsprechend eine Auslösung auftreten, die für die vorliegende Situation nicht angemessen ist. Zusätzlich muss daraus eine Gefährdung entstehen, die zu einer kritischen Situation führt. Auf diese reagiert der Fahrer, wobei seine Reaktion gegebenenfalls aufgrund der Situationsbedingungen, beispielsweise ein niedriger Reibwert, beschränkt wird. Abhängig davon, ob die daraus resultierende Vermeidungsreaktion ausreichend ist oder nicht, kommt es zum Unfall, oder der Unfall wird vermieden. Die Zusammenhänge sind schematisch in Abbildung 4-1 dargestellt.

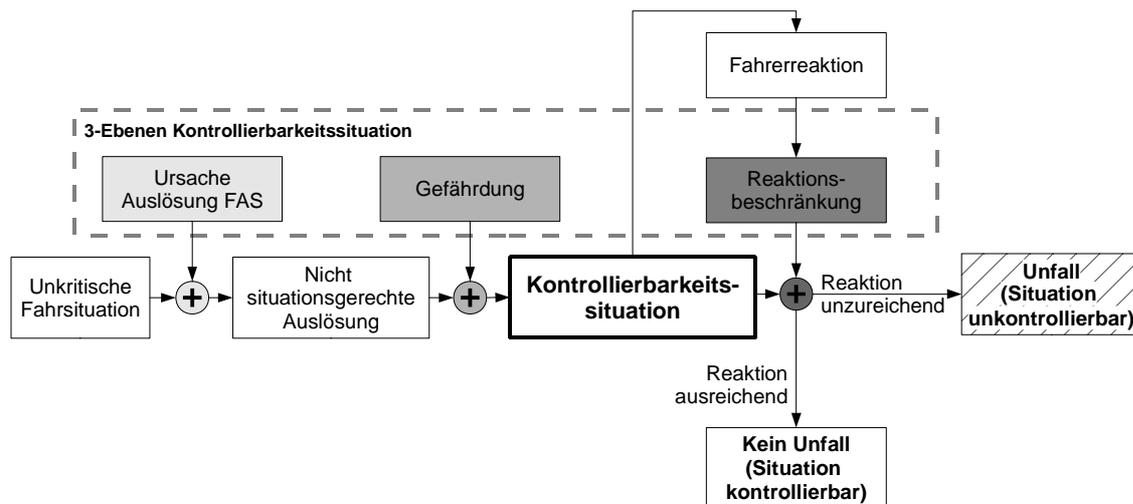


Abbildung 4-1: 3 Ebenen einer Kontrollierbarkeitssituation

Zur weiteren Strukturierung werden die 3 Ebenen mit Leitfragen versehen.

1. **Ebene:** Ursachen/Auslöser: Was kann zu nicht situationsgerechten Reaktionen führen?
2. **Ebene:** Gefährdung: Wodurch wird eine Gefährdung erzeugt?
3. **Ebene:** Reaktion: Was kann Vermeidungsreaktionen einschränken?

### 4.1.1 Ursachen

Selbst wenn nur der Bereich der funktionalen Unzulänglichkeit betrachtet wird, sind mögliche Ursachen einer nicht situationsgerechten Auslösung eines Fahrerassistenzsystems vielfältig. Sie sind beispielsweise in einer unvollständigen Wahrnehmung begründet, können aber auch aus einer inkorrekten Handlungsableitung aufgrund der vorliegenden Situationsprädiktion resultieren. Um potentielle Ursachen, die aus der Systemauslegung des Assistenzsystems resultieren, zu identifizieren, ist eine detaillierte Betrachtung der im jeweiligen System verwendeten Sensorik, der Systemarchitektur und der Entscheidungsalgorithmen notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese weitere Detaillierung nicht vorgenommen, weil dafür eine sehr spezifische Betrachtung des jeweiligen Fahrerassistenzsystems notwendig ist, was wiederum der Übertragbarkeit solcher Bewertungen nicht dienlich ist.

Die funktionalen Unzulänglichkeiten haben zudem nicht zwingend einen deterministischen Charakter, weil die „richtig-falsch“ Bewertung eine Kombination aus der Fahrerintention<sup>73</sup> und der durch das System vorgenommenen Situationsbewertung ist. Für die Analyse an der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle und der Bewertung des Gesamtsystems ist

<sup>73</sup> Kobiela: Fahrerintentionserkennung, 2011, S. 48

deshalb zu identifizieren, wie eine nicht situationsgerechte Auslösung beschrieben werden kann.

Eine nicht situationsgerechte Auslösung liegt dann vor, wenn die Reaktion des Systems nach objektiven Kriterien nicht der Situation angemessen ist. Diese Definition ist jedoch nur scheinbar trivial. Welche Reaktion objektiv angemessen ist, lässt sich in der Realität häufig nur a posteriori und unter Einbeziehung der Fahrerabsichten bestimmen. Dadurch, dass vom Assistenzsystem Entscheidungen anhand der aktuellen Informationsslage zu treffen sind, können nur Annahmen über den weiteren Verlauf der Situation und damit das Verhalten sowohl des Fahrers als auch anderer Verkehrsteilnehmer herangezogen werden. Allein daraus resultiert nach aktuellem Stand der Technik, dass Fehlentscheidungen nicht ausgeschlossen werden können, weil die Fahrerintention in vielen Situationen nicht eindeutig detektierbar ist.

Ist das objektiv erwünschte Ergebnis einer Situation bekannt, ist eine a posteriori durchgeführte Bewertung zwar anwendbar, jedoch muss dann sichergestellt werden, dass die Fahrerintention eindeutig und bei allen Fahrern gleich ist. Umgekehrt betrachtet kann eine objektiv nicht situationsgerechte Reaktion des Systems auch durch den Fahrer als korrekt wahrgenommen werden, wenn dieser die gleichen Fehler in der Situationserfassung, -bewertung und/oder Handlungsableitung macht wie das System, oder diese zumindest im Ergebnis gleich sind. Dabei kann die Fehlerquelle bei System und Fahrer unterschiedlich sein. In Abbildung 4-2 ist der Charakterisierungsbaum für nicht situationsgerechte Auslösungen dargestellt.

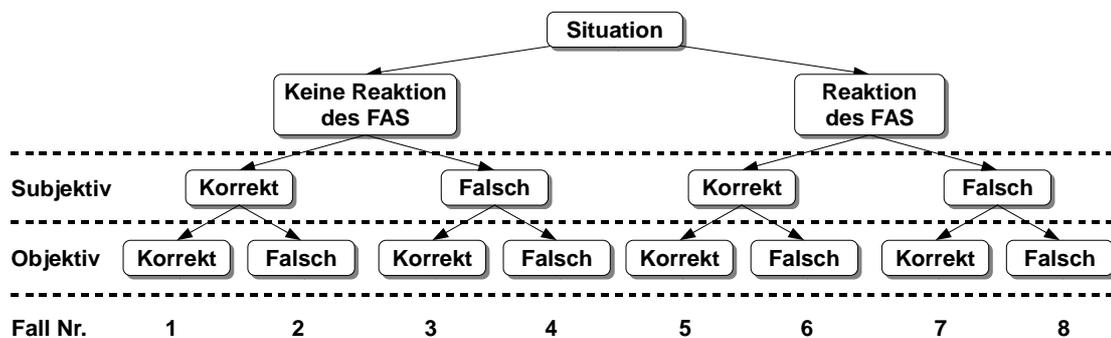


Abbildung 4-2: Charakterisierung von nicht situationsgerechten Auslösungen

Unterschieden werden kann dabei zusätzlich, zwischen der Betrachtung des Fahrers des mit dem System ausgestatteten Fahrzeugs und den Fahrern von nachfolgenden oder in der Umgebung befindlichen Fahrzeugen. Bezüglich des ausgestatteten Fahrzeugs, müssen für eine eindeutig für den Fahrer wahrnehmbare nicht situationsgerechte Auslösung Differenzen zwischen den Situationserfassungs- und -bewertungsprozessen von Fahrer und System vorliegen. Der Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs muss dagegen auf ein für ihn unvorhersehbares Verhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers reagieren. In beiden Fällen müssen die Fahrer rechtzeitig eine geeignete Reaktion einleiten, um den

Unfall zu vermeiden. Ist die gewählte Reaktionsstrategie erfolgreich, kann die Situation als kontrollierbar gewertet werden.

Nach Abbildung 4-2 sind entsprechend nur die Fälle 2, 3, 6 und 7 überhaupt für eine Kontrollierbarkeitsbewertung geeignet. Im linken Ast der Abbildung sind dabei Situationen enthalten, in denen der Fahrer eine Systemreaktion erwartet, diese aber nicht eintritt und daher eine kritische Situation entsteht. Für Komfortsysteme beispielsweise ACC Stop&Go müssen Untersuchungen dieser Fälle durchgeführt werden.<sup>74</sup> Im Fall von aktiven Sicherheitssystemen, insbesondere bei kollisionsvermeidenden und -lindernden Systemen, sind Eingriffe des Systems aber erst kurz vor dem Unfall zu erwarten. Der Fahrer kann sich daher nicht auf den Systemeingriff verlassen, ohne einen Unfall in Kauf zu nehmen. Diese Fälle werden aufgrund dessen hier vernachlässigt, da zusätzlich davon ausgegangen wird, dass sie gegenüber nicht situationsgerechten Auslösungen im rechten Ast der Abbildung 4-2 auch nur zu einem geringen Anteil auftreten.

Die Auslösung eines FAS kann dann aus Fahrersicht zwar korrekt, aber objektiv nicht der Situation angemessen sein (Fall Nr. 6). Dann besteht aber aus Fahrersicht auch kein Grund für einen Eingriff. Kommt es aufgrund einer solchen Auslösung zu einem Unfall, unterscheidet sich die Situation nicht von der Betrachtung ohne System, weil der Fahrer so gehandelt hätte wie das System.

Die Fahrzeugreaktion muss daher der Fahrerintention widersprechen, dies entspricht Fall Nummer 8. Für eine Abgrenzung zu Fall 6 sollte dieser Widerspruch aus Fahrersicht möglichst eindeutig sein. Entsprechend wird die Betrachtung auf Fall 8 nach Abbildung 4-2 beschränkt, sodass nur fehlerhafte Situationswahrnehmungen und -bewertungen des Systems herangezogen werden.

Allgemein sind für Analysen der Ursachen von Umweltfaktoren auf Kontrollierbarkeits-situationen die situativen Randbedingungen darauf zu untersuchen, ob sie einseitig die fehlerhafte Wahrnehmungen oder Bewertungen des Fahrers oder des Systems begünstigen und dadurch große Bewertungsdifferenzen erzeugen.

### 4.1.2 Gefährdungen

Gefährdungen werden durch den befahrbaren Raum definiert. Für die Bemessung des befahrbaren Raumes muss festgelegt werden, welche Auswirkungen die nicht situationsgerechte Auslösung auf das längs- und querdynamische Verhalten des Fahrzeugs hat. Dann sind Kollisionsobjekte im Umfeld des Fahrzeugs notwendig, die eine Gefährdung hervorrufen, ebenso sind auch die Objekte durch das Fahrzeug gefährdet. Handelt es sich um aktive Objekte (bspw. Zielfahrzeuge), können sie auch durch eigene Handlun-

---

<sup>74</sup> vgl. Neukum et al.: Fahrerverhalten Systemgrenzen ACC, 2008 und

gen den Unfall verhindern. Dadurch ergeben sich für jedes Zielfahrzeug Abstände oder Zeitbedingungen, wie Time-to-Collision, in denen die Vermeidungshandlung zu erfolgen hat bzw. in denen eine Vermeidung nicht mehr möglich ist. Die statischen Objekte und der Verlauf der Fahrbahn, bzw. die befahrbare Fläche um das Fahrzeug ergeben den befahrbaren Raum, in dem sich dynamisch weitere Zielfahrzeuge bewegen können.

Für nicht situationsgerechte Auslösungen längsdynamischer Systeme sind insbesondere die Abstände zu vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugen relevant. Anhand der notwendigen Gesamtreaktionszeiten zur Kollisionsvermeidung werden Bereiche vor und hinter dem Fahrzeug definiert, die die letztmöglichen Eingriffszeitpunkte darstellen.

Jede Fahrsituation bedingt eine latente Gefahr<sup>75</sup>. Kommt ein externes Ereignis hinzu, kann die Gefährdung zeitabhängig ansteigen, bis ein Unfall geschieht. Wird früh genug vor Eintritt des Unfalls eingegriffen, kann die Situation entschärft und damit der Unfall verhindert werden.<sup>76</sup> Soll dieser Eingriff durch den Fahrer erfolgen und soll die Vermeidungsreaktion bewertet werden, sind zwei Kriterien zu erfüllen. Erstens muss die Gefahr des drohenden Unfalls für den Fahrer eindeutig sein, um eine dringende Vermeidungshandlung auszulösen.<sup>77</sup> Zweitens muss ausreichend Zeit für die Erfassung der Situation, die Entscheidungsfindung und die Ausführung der Vermeidungshandlung verbleiben. Sonst wäre die Situation von Beginn an für den Fahrer unkontrollierbar.

In Folgefahrtsituationen mit nicht situationsgerechter Auslösung eines kollisionsvermeidenden und -lindernden Systems kann die Kontrollierbarkeit neben einer Überstimmungshandlung des Fahrers des ausgerüsteten Fahrzeugs, auch durch den Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs ausgeübt werden. In Abbildung 4-3 sind die oben genannten Bedingungen am Beispiel der Reaktion auf ein unvorhersehbar verzögerndes vorausfahrendes Fahrzeug dargestellt.

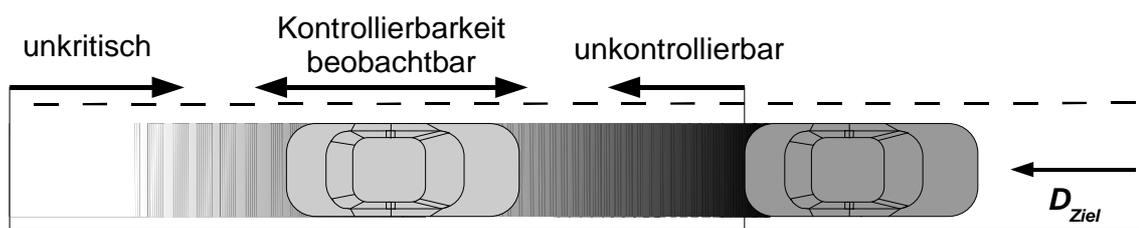


Abbildung 4-3: Beobachtungsbereiche für Kontrollierbarkeit einer längsdynamischen Situation

Dabei kann der minimale Abstand, der für die Bewertung der Kontrollierbarkeit einer spezifischen längsdynamischen Situation noch geeignet ist, anhand von bekannten Reaktionszeitgrenzen des Fahrers des nachfolgenden Fahrzeugs definiert werden. Der

<sup>75</sup> Braun et al.: Kritische Fahrsituationen, 1982 in Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 522

<sup>76</sup> Braun et al.: Kritische Fahrsituationen, 1982 in Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 522

<sup>77</sup> Muttart: Driver's Response Choice, 2005, S. 3

letztmögliche Abstand, bei dem der Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs durch einen Bremseneingriff den Unfall noch vermeiden kann, wird in der Folge als „Point-of-No-Return“ (PoNR) bezeichnet.

Der maximale Abstand, der für eine Kontrollierbarkeitsbewertung noch geeignet ist, ist schwieriger zu bestimmen. Einerseits wird er durch die Notwendigkeit einer konkreten Gefährdung begrenzt. Bei großen Abständen kann der Fahrer den weiteren Situationsverlauf abwarten, ohne direkt eine Handlung einleiten zu müssen. Ebenso kann er frühzeitig Anpassungsbremungen einleiten und dadurch verhindern, dass die Situation weiter kritisch wird. In jedem Fall ist zu erwarten, dass die Kontrollierbarkeit mit steigendem Abstand bei gleichbleibender Verzögerung des Vorfahrenden ansteigt, weil die Fahrer mehr Zeit zur Verfügung haben, die Situation zu bewerten und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Situationen mit größerem Abstand, bei denen in einer „Worst-Case“ Betrachtung davon ausgegangen wird, dass der Fahrer sehr lange bis zur Reaktion wartet, können durch Versuche abgebildet werden, bei denen bereits zu Beginn der Situation eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen vorliegt. Dies adressiert auch Situationen, bei denen die Wahrnehmungsschwellen zur Situationseinschätzung erst spät überschritten werden (bspw. bei Nachtfahrt<sup>78</sup>).

Zusammenfassend ergibt sich als Mindestanforderung, dass die Situationsparameter für eine Kontrollierbarkeitsbewertung, die Belegung der Räume um das Fahrzeug ausreichend charakterisieren müssen. Dabei ist zu unterscheiden, ob es sich um aktive Objekte handelt, die den Unfall durch eigene Handlungen vermeiden können oder um passive, bei denen das nicht der Fall ist.

Sind unterschiedliche Eingriffsstrategien des Assistenzsystems möglich, muss geprüft werden, ob sich aus den unterschiedlichen Ausprägungen auch Differenzen in den Gefährdungssituationen ergeben. Sind Unterschiede in der Kontrollierbarkeit in Abhängigkeit der Eingriffsstrategie zu erwarten müssen diese berücksichtigt werden. Handelt es sich darüber hinaus um eine kontinuierliche Eingriffsoptionen, beispielsweise eine stufenlos variierbare Verzögerung, muss die Eingriffsstrategie zusätzlich quantifiziert und diskretisiert werden. Daraus ergeben sich gegebenenfalls weitere notwendige Prüfsituationen.

---

<sup>78</sup> Wördenweber et al.: Automotive Lighting, 2007, S. 91

### 4.1.3 Reaktionen

Die unfallvermeidende, kontrollierende Reaktion kann durch Situationsparameter verzögert oder begrenzt werden. Für die Betrachtung wird zwischen dem Fahrzeug und dem Fahrer unterschieden.

#### Beeinflussung der Fahrzeugreaktion

Die Reaktion des Fahrzeugs wird begrenzt durch das Kraftschlusspotential zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Es bedingt die Kräfte, die maximal abgestützt werden und damit die maximalen Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung. Für die Betrachtung von Situationsparametern wird zwischen zwei Einflüssen unterschieden:

##### Verfügbares Kraftschlusspotentials

Durch die Verringerung des Kraftschlusspotentials werden die maximal zwischen Fahrzeug und Fahrbahn übertragbaren Kräfte reduziert. Dadurch kann einerseits die Schwere der nicht situationsgerechten Auslösung gemindert werden, indem beispielsweise die maximal darstellbare Verzögerung sinkt oder indem das Fahrerassistenzsystem das Erreichen der Kraftschlussgrenze detektiert und den Eingriff abbricht. Andererseits steht weniger Kraftschluss für die Vermeidungsreaktion zur Verfügung.

##### Aktuelle Ausnutzung des verfügbaren Kraftschlusspotentials

Durch die Fahrsituation bedingt, kann das verfügbare Kraftschlusspotential zu Beginn der Kontrollierbarkeitssituation bereits teilweise ausgenutzt sein. Insbesondere die Überlagerung von Längs- und Querkraften kann hierbei das für die Vermeidung verfügbare Kraftschlusspotential begrenzen.

Theoretisch betrachtet kann auch der technische Zustand des Fahrzeugs zu einer verzögerten oder verminderten Vermeidungsreaktion führen. In Anlehnung an die in der ISO 26262 beschriebenen zu variierenden Randbedingungen, wird in der Folge von einwandfreiem technischen Zustand des Fahrzeugs ausgegangen und dieser Einfluss nicht weiter betrachtet.<sup>79</sup>

#### Beeinflussung der Fahrerreaktion

Es wird vermutet, dass Änderungen der Fahrsituation, die durch den Fahrer wahrnehmbar sind, auch die Fahrerreaktionen beeinflussen.<sup>80</sup> Um die Auswirkungen auf die Kon-

---

<sup>79</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S. 18

<sup>80</sup> Beispiele in Olson et al.: Driver Perception Response, 2003, S. 339 ff

trollierbarkeit zu bestimmen, sind geeignete Faktoren zu identifizieren, die den Fahrerzustand beschreiben und Rückschlüsse auf Änderungen der Reaktion erlauben. Kopf<sup>81</sup> identifiziert die folgenden Einflussfaktoren auf das Fahrerverhalten und teilt sie in drei Gruppen ein:

- Sich nicht oder nur langfristig ändernde Faktoren (innerhalb von Monaten oder Jahren): Konstitution, Fahrerfahrung, Fahrkönnen, Belastbarkeit, Persönlichkeit, ...
- Sich mittelfristig ändernde Faktoren (innerhalb von Tagen oder Stunden, fahrtbezogen): Ermüdung, Tagesrhythmus, Alkohol-/Drogeneinfluss, Fahrstrategie, ...
- Sich kurzfristig ändernde Faktoren (innerhalb von Minuten oder Sekunden): gerichtete Aufmerksamkeit, Vigilanz, Beanspruchung, Anstrengung, Aktivierung, Absicht (geplante nächste Fahrmanöverfolge), Situationsbewusstsein, Emotionen, ...

Innerhalb dieser Einzelfaktoren identifiziert Kopf die Schlüsselfaktoren Fahrerzustand<sup>82</sup>, Beanspruchung, Fahrerabsicht und Situationsbewusstsein.

Auch hier kann eine Vorauswahl anhand der in der ISO 26262 gegebenen Anforderungen erfolgen. Entsprechend sind die Fahrer hinsichtlich der lang- und mittelfristigen Faktoren als durchschnittlich zum erwarteten Fahrerkollektiv<sup>83</sup> zu wählen. Nicht erwähnt wird in der Norm der Faktor der Ablenkung. Eine Ablenkung bzw. Abwendung hat direkten Einfluss auf die Reaktionszeiten des Fahrers und muss daher für die Kontrollierbarkeitsbewertung betrachtet werden.

Für die weitere Betrachtung werden nur diese kurzfristig in der Situation wirkenden Faktoren einzeln diskutiert.

### **Fahrerabsicht**

Die Fahrerabsicht wird in der Literatur teilweise auch als Fahrerintention bezeichnet.<sup>84</sup> Kopf bezeichnet damit die in unmittelbarer Zukunft beabsichtigten Manöver bzw. die Manöverfolge. Die Fahrerabsicht wird sowohl von situativen als auch von intrinsischen Motivatoren beeinflusst.<sup>85</sup> Für Kontrollierbarkeitsbetrachtungen bei nicht situationsgerechter Auslösung wird gefordert, dass die Fahrerabsicht eindeutig der Systemreaktion widerspricht.<sup>86</sup> Dadurch ist dieser Faktor Bedingung für eine Kontrollierbarkeitssituation und kann nicht als Variationsparameter herangezogen werden.

---

<sup>81</sup> Kopf: Fahrerinformations- und -assistenzsysteme, 2005, S. 118

<sup>82</sup> mit den Elementen: Ermüdung in Verbindung mit Aufmerksamkeit, Wachsamkeit bzw. Aktiviertheit

<sup>83</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S. 9

<sup>84</sup> s. Kobiela: Fahrerintentionserkennung, 2011, S. 42

<sup>85</sup> zur weiteren Diskussion des Begriffs und weiteren Quellen siehe Kobiela: Fahrerintentionserkennung, 2011, S. 42 ff

<sup>86</sup> vgl. Kapitel 4.1.1

Befindet sich der Fahrer jedoch in der Planung oder Vorbereitung eines Manövers, kann dies seine Aufmerksamkeitsverteilung bzw. sein Blickzuwendungsverhalten beeinflussen, sowie die Belastung/Beanspruchung definieren.<sup>87</sup>

### Situationsbewusstsein

Um im Straßenverkehr so handeln zu können, dass Kollisionen und Gefährdungen anderer Verkehrsteilnehmer vermieden werden, sind nach Kopf drei Aufgaben zu erfüllen. Zuerst muss der Fahrer in der Lage sein, „*relevante Fahrsituationsinformationen hinreichend aufzunehmen*“. Er muss die „*Bedeutung der Informationen im Situationskontext*“ erfassen und anhand dessen eine „*Antizipation von zukünftigen Ereignissen*“ durchführen.<sup>88</sup> Ein unzureichender Zugang zu Situationsinformationen oder deren unzureichende Aufnahme kann entsprechend die Fahrerreaktion verzögern.

Für die Erfassung der Bedeutung der Informationen im Situationskontext ist die Vereinbarkeit von Fahrzeug-, System- und Umweltverhalten mit bekannten Modellen notwendig.<sup>89</sup> Nur dann kann eine Antizipation auf Basis von getroffenen Entscheidungen stattfinden. Dieses vorhersehbare Systemverhalten wird auch häufig in der Definition von Kontrollierbarkeit gefordert.<sup>90</sup>

Reaktionsbeschränkend sind ebenso Ereignisse, die entweder keinen bekannten Modellen des Fahrers entsprechen, oder bei denen die aus dem Modell abgeleitete Handlung die Situation weiter verschlechtert. Dies kann dann kritisch für die Kontrollierbarkeit sein, wenn die wahrgenommenen Informationen einem anderen Ereignis zugeordnet werden und die gewählte Handlung deshalb verschlechternd wirkt.

Für die Kontrollierbarkeitsuntersuchungen kann daraus abgeleitet werden, dass die Modellbildung der Fahrer, die im Feld zu erwarten ist, auch im Versuch erzeugt werden muss. Wahrnehmungsverzögerungen aufgrund von Umgebungsbedingungen (bspw. Sichtbeeinträchtigungen durch Dunkelheit) sind durch Wahl der Situationsparameter abzubilden. Dadurch sind valide Annahmen über wahrnehmungsbeschränkende Faktoren zwingend erforderlich, um besonders kritische Situationskonstellationen bereits in der einleitenden Risikobewertung zu identifizieren.

Bei einer allgemeinen Formulierung der Ursachen für Wahrnehmungsverzögerung, sind Licht- und Sichtbedingungen sowie Fahrzeugreaktionen, die erst nach einer Zeitspanne die Wahrnehmungsschwellen überschreiten, zu berücksichtigen. Merkmale werden dann

---

<sup>87</sup> Praxenthaler: Sekundäraufgaben Fahrsituationen, 2003, S. 122 ff

<sup>88</sup> s. Kopf: Fahrerinformations- und -assistenzsysteme, 2005, S. 120

<sup>89</sup> vgl. bspw. Olson et al.: Driver Perception Response, 2003, S. 19 und Hollnagel: Joint Cognitive System, 2005, S. 75

<sup>90</sup> Hollnagel et al.: Joint Cognitive System, 2005, S. 136; PReVENT: Code of Practice, 2009, S. A26 und Olson et al.: Driver Perception Response, 2003, S. 113

gegenüber den optimalen Bedingungen erst später wahrnehmbar. Beispiele hierfür sind die Fahrt bei Nebel, bei der durch reduzierte Sichtweite und geringeren Kontrast Objekte erst bei geringerer Entfernung wahrnehmbar werden, sowie Fahrten bei Nacht, bei denen weniger Merkmale mit ausreichender Leuchtdichte überhaupt wahrnehmbar sind.<sup>91</sup>

Bei der Betrachtung von kritischen Folgefahrtsituationen kann zudem der Literatur entnommen werden, dass die Qualität der Schätzung der Relativgeschwindigkeit sowohl von der Situationsentwicklung als auch von den Sichtverhältnissen abhängt.<sup>92</sup>

### **Abwendung und Ablenkung**

Direkt mit verzögerter Wahrnehmung verknüpft sind auch die Faktoren Abwendung und Ablenkung. Dabei wird die Abwendung von Kopf<sup>93</sup> als vom Fahrer bewusst vorgenommene Zuwendung zu anderen Aufgaben definiert.<sup>94</sup> Die Blickabwendungsfrequenz und -dauer ist von der Belastung/Beanspruchung des Fahrers aufgrund der Komplexität der Fahrsituation und der Dringlichkeit bzw. Attraktivität der Nebenaufgabe abhängig.<sup>95</sup> Zudem kann bedingt durch eine Manöverplanung zusätzliche oder intensivere Blickabwendung auftreten.<sup>96</sup>

Ablenkung ist dagegen die unwillkürliche Zuwendung zu intensiven Reizen außerhalb des für das sichere Fahren notwendigen Blickfeldes oder das Überstrahlen des relevanten Reizes durch einen dominanteren weniger relevanten.<sup>97</sup> Darin ist auch die Blendung enthalten.

Für Kontrollierbarkeitsbewertung ist es daher notwendig die Abwendung/Ablenkung aufgrund der potentiellen Reaktionsverzögerung zu betrachten. Dabei kann Abwendung als Variationsparameter verwendet werden. Ablenkung dagegen wird durch andere Situationsparameter bedingt.

---

<sup>91</sup> Braun et al.: Kritische Fahrsituationen, 1982, S. 46

<sup>92</sup> Olson et al.: Driver Perception Response, 2003, S. 115 und Wördenweber et al.: Automotive Lighting, 2007, S. 74 ff

<sup>93</sup> Kopf: Fahrerinformations- und -assistenzsysteme, 2005, S. 122

<sup>94</sup> Die Begrifflichkeit Ablenkung und Abwendung wird in der Literatur teilweise auch genau entgegengesetzt definiert vgl. Praxenthaler: Sekundäraufgaben Fahrsituationen, 2003, S. 46

<sup>95</sup> bspw. Praxenthaler: Sekundäraufgaben Fahrsituationen, 2003, S. 122 und Klauer et al.: Driver Inattention 100 Car Data, 2010 S. 55

<sup>96</sup> Praxenthaler: Sekundäraufgaben Fahrsituationen, 2003, S. 122 und Klauer et al.: Driver Inattention 100 Car Data, 2010 S. 55

<sup>97</sup> Schmidt et al.: Physiologie des Menschen, 1985, Kap 11.27

**Belastung/Beanspruchung:**

Bedingt durch die Verkehrssituation, die Fahrerabsicht und gegebenenfalls durch eine Nebenaufgabe, ergibt sich eine Belastung des Fahrers. Diese erzeugt anhand seiner individuellen Leistungsfähigkeit eine Beanspruchung.<sup>98</sup> Kritisch sind hohe oder niedrige Belastungen.

Die individuelle Leistungsfähigkeit wird durch das Fahrerkollektiv bestimmt und muss darüber hinaus nicht variiert werden. Die Belastung durch die Fahrsituation ergibt sich aus deren Komplexität und den resultierenden Anforderungen zur Erfüllung der Fahraufgabe.<sup>99</sup>

Zusammenfassend sind für eine Kontrollierbarkeitsbewertung die potentiell reaktionsbeschränkenden Faktoren zu berücksichtigen. Bei der Darstellung in Testsituationen für Probanden ist es notwendig, die Randbedingungen bezüglich dieser Faktoren konstant zu halten bzw. diese gezielt zu variieren. Für Abschätzungen der Kontrollierbarkeit sind zusätzlich valide Modellannahmen hinsichtlich der Einflüsse der Faktoren auf die Fahrerreaktion notwendig.

## 4.2 Detaillierungsproblematik

Für die Bewertung der Kontrollierbarkeit werden Situationen benötigt, in denen die Bewertung durchgeführt wird. Dabei muss zur Gewährleistung der Objektivität die Auswahl der Situationen nachvollziehbar sein. Ein für die Auslegung häufig von FAS verwendeter Ansatz ist die Ableitung von „Use-Cases“ aus Unfallstatistiken. Aus der Analyse von Unfalldaten werden die Funktionalitäten eines Fahrerassistenzsystems definiert, die in der Lage wären, diese Unfälle zu vermeiden. Aus diesen „Use-Cases“ werden dann Test-Fälle abgeleitet, die den Systemnutzen in den adressierten Situationen messbar machen.<sup>100</sup>

Für die Betrachtung nicht situationsgerechter Auslösungen sind dagegen alle Situationen heranzuziehen, in denen das jeweilige System aktiv sein kann oder aktiviert werden könnte. Eingeschränkt werden kann diese Situationsvielfalt nur, wenn Mechanismen bekannt sind, die zur nicht situationsgerechten Auslösung führen können. Diese „Fehler“ des Systems müssen damit nicht mehr rein deterministisch sein, sondern können eine Kombination aus Wahrnehmungsungenauigkeiten oder -unvollständigkeiten der Sensorik mit der nachfolgenden Entscheidungsfindung des Systems sein. Für die Ablei-

---

<sup>98</sup> Fastenmeier et al.: Driving Task Analysis, 2006, S. 955

<sup>99</sup> Fastenmeier et al.: Driving Task Analysis, 2006, S. 955

<sup>100</sup> eine detailliertere Diskussion findet sich in Weitzel et al.: Absicherungsstrategien FAS, 2013, S. 44 ff

tung von Testfällen durch gezielte Beschränkung auf ausgewählte Einzelsituationen fehlen daher Kriterien.

Folglich müssten alle denkbaren Fahrsituationen abgebildet und hinsichtlich ihrer Kontrollierbarkeit bewertet werden. Zur Situationserzeugung kann ein generischer Ansatz verwendet werden, bei dem alle Situationsparameter miteinander frei kombiniert werden. Dazu sind die Fahrsituationen durch geeignete Parameter zu beschreiben.

Zahlreiche Arbeiten haben sich in der Vergangenheit mit der Identifikation von Fahrsituationsparametern auseinander gesetzt. Eine dabei häufig verwendete Unterteilung von Parametern erfolgt in Fahrer, Fahrzeug und Umwelt.<sup>101</sup> Die Parameter werden dann je nach Aufgabenstellung angepasst und detailliert. Abbildung 4-4 stellt dies schematisch mit beispielhaften Detaillierungen dar.

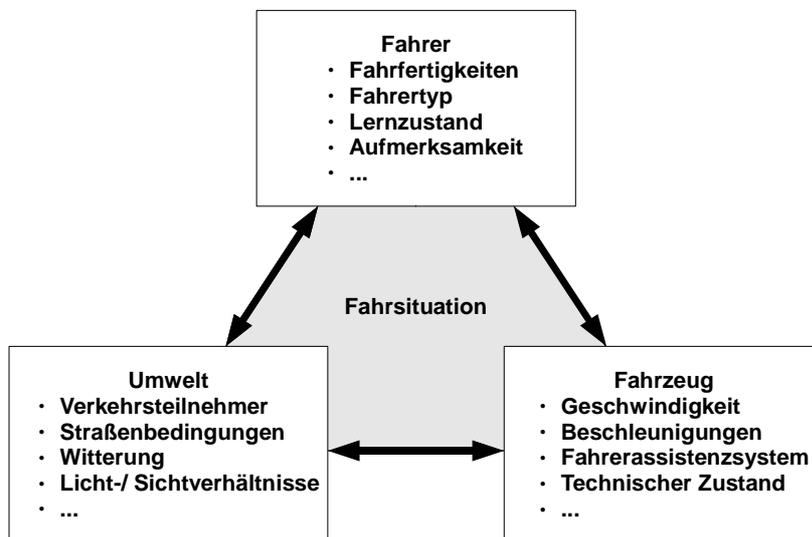


Abbildung 4-4: Beispiel für Parametereinteilung der Fahrsituation<sup>102</sup>

Diese Situationsfaktoren können beliebig detailliert werden. Für die Darstellung im Versuch ist diese Detaillierung sogar unvermeidbar, weil beispielsweise Ausgangsabstände, Witterungsbedingungen, Sichtverhältnisse usw. festzulegen sind, um ein robustes Versuchsdesign zu erhalten, welches für alle Probanden möglichst gleiche Randbedingungen schafft.<sup>103</sup>

Durch die notwendige Detaillierung kann eine „Granularisierung“ des Situationskollektivs entstehen. Indem das Gesamtkollektiv der Fahrsituationen in unendlich viele Einzereignisse zerlegt wird, verringern sich die Expositionswahrscheinlichkeiten der Ein-

---

<sup>101</sup> Benda, von et al.: Häufigkeit Verkehrssituationen, 1983; Fastenmeier: Autofahrer Verkehrssituationen, 1995, S. 48 ff; Reichart: Menschliche Zuverlässigkeit, 2001, S. 52; Domsch et al.: Referenzfahrsituationen, 2008, S. 7

<sup>102</sup> in Anl. an Benda, von et al.: Häufigkeit Verkehrssituationen, 1983; Fastenmeier: Autofahrer Verkehrssituationen, 1995, S. 48 ff; Reichart: Menschliche Zuverlässigkeit, 2001, S. 52; Domsch et al.: Referenzfahrsituationen, 2008, S. 7

<sup>103</sup> vgl. Breuer: Bewertungsverfahren FAS, 2012

zelsituationen soweit, dass alle Situationen die niedrigste Exposure-Bewertung (E1) erhalten. Dann können alle Situationen unabhängig von ihrer Kontrollierbarkeitsklasse (C0 – C3) der niedrigsten Absicherungsstufe (der mögliche schlechteste Fall ist dann ASIL A) (vgl. Tabelle 2-2, S. 15) zugeordnet werden. Auch in der Norm ist diese Gefahr beschrieben<sup>104</sup>, Lösungswege werden jedoch nicht aufgezeigt. Gemäß Code of Practice ist eine Auswahl auf die am meisten relevanten Situationen vorzunehmen, wobei eine Reduktion des Situationsumfangs durch Ähnlichkeitsbewertungen erfolgen kann. Wie dies methodisch erfolgen soll, ist nicht dargestellt.<sup>105</sup>

Ansätze zur deterministischen Ableitung<sup>106</sup> von Expositionswahrscheinlichkeiten sind dadurch stark abhängig von den gewählten Situationsparametern und deren Detaillierungstiefe. Die Auswahl eines Parametersatzes für die Beschreibung ist dabei Voraussetzung zur generischen Situationsbeschreibung. Werden bei dieser Auswahl Vereinfachungen getroffen, hat dies Auswirkungen auf die Vollständigkeit des darstellbaren Situationskollektivs.

Der gleiche Effekt ergibt sich auch für nicht situationsgerechte Auslösungen und damit die Anforderung, dass für eine objektive Bewertung eine systematische nachvollziehbare Situationsauswahl notwendig ist. Um die Verknüpfung zwischen Validierung und Risikoanalyse zu erlauben, folgt die Anforderung, dass diese Situationen auch so detaillierbar sind, dass sie grundsätzlich in Versuchen darstellbar sind. Diese Detaillierung muss jedoch hinsichtlich des Einflusses auf die Relevanz der Einzelsituation gegenüber dem gesamten abzusichernden Situationskollektiv bewertet werden.

Insofern keine Übertragbarkeit von Ergebnissen auf weitere Systeme oder Situationen nachweisbar ist, sind die Versuche theoretisch für jede denkbare und relevante nicht situationsgerechte Auslösung durchzuführen. Außerdem sind die Versuche bei Systemänderungen zu wiederholen, wenn keine Vergleichbarkeit nachweisbar ist. Im Code of Practice ist dargestellt, dass bereits für die Absicherung auf der Kontrollierbarkeitsstufe C2 mindestens 20 Versuche notwendig sind, die zudem alle positiv sein müssen.<sup>107</sup> Auf den daraus resultierenden Aufwand wird in Kapitel 4.4 eingegangen. Die notwendige Probandenanzahl ist zudem theoretisch mit der Anzahl denkbarer kritischer Situationen und gegebenenfalls zu prüfender Variationen der Eingriffsstrategie zu multiplizieren. Beschleunigungsmechanismen zur Verringerung des Prüfaufwandes sind aktuell nicht bekannt.<sup>108</sup>

---

<sup>104</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S. 10

<sup>105</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009, S. A46

<sup>106</sup> bspw. Ständer: Modellbasierte Objektivierung, 2011, S. 119 ff oder Kemmann et al.: SAHARA, 2011

<sup>107</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009, S. 15

<sup>108</sup> vgl. Weitzel et al.: Absicherungsstrategien FAS, 2013, Kap. 4.1.3

Eine Methodik zur systematischen Auswahl von für die Kontrollierbarkeitsbewertung geeigneten und relevanten Situationen kann den erforderlichen Aufwand reduzieren. Dabei ist die Relevanz der jeweiligen Einzelsituation, bezogen auf die im späteren Einsatz im realen Verkehr zu erwartenden Kontrollierbarkeitssituationen ebenso zu quantifizieren, wie die dann zu erwartende Kontrollierbarkeit. Die Methodik muss die Detaillierung von Situationsparametern zulassen und gleichzeitig eine Granularisierung, und die damit verbundene Marginalisierung von Einzelsituationen vermeiden. Damit diese Methodik am hier gewählten Beispielsystem auf Anwendbarkeit geprüft werden kann, ist auch die Auswahl eines Parametersatzes notwendig. Dieser wird hier beispielhaft erstellt und für die vorliegende Aufgabenstellung diskutiert. Der Nachweis der Vollständigkeit und Übertragbarkeit dieses Parametersatzes kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geführt werden. Insofern bei der Anwendung für die vorliegende Aufgabenstellung keine Indikatoren gefunden werden, die die Verwendbarkeit des Parametersatzes in Frage stellen, kann dieser als Ausgangspunkt für Erweiterungen und Anpassungen dienen.

### 4.3 Situationskollektive für statistische Erhebungen der Fahrsituationen

Ein als hinreichend bewerteter Satz von Situationsparametern vorausgesetzt, wird für die Bestimmung der Expositionswahrscheinlichkeiten von Situationsparametern, wie im Kapitel 4.2 diskutiert, ein repräsentatives Kollektiv von Fahrsituationen benötigt. Dieses ist abhängig vom Nutzer bzw. vom Nutzungsprofil des Fahrzeugs<sup>109</sup> und kann daher variieren. Basierend auf diesen Fahrsituationen können Expositionswahrscheinlichkeiten von Situationen ermittelt werden.

Für belastbare Betrachtungen müsste entsprechend ein repräsentatives Fahrsituationskollektiv „erfahren“ werden.<sup>110</sup> Dies liegt nach aktuellem Kenntnisstand nicht vor. Daten hierfür können groß angelegte Feldstudien wie beispielsweise die „Naturalistic Driving Study“<sup>111</sup> liefern. Auch Field Operational Tests<sup>112</sup> sind verwendbar, wenn darin auch „Baseline“-Anteile erfasst sind, in denen das Fahrerverhalten ohne Einsatz der Fahrerassistenzsysteme erfasst wurde. Voraussetzung ist, dass der ermittelte Datensatz Aussagen zu den Situationsparametern zulässt und dass die Fahrten das Nutzungssituationskollektiv hinreichend abbilden.

---

<sup>109</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S. 8

<sup>110</sup> s. Weitzel et al.: Absicherungsstrategien FAS, 2013, S. 61 f

<sup>111</sup> Neale et al.: 100 Car Naturalistic Driving Study, 2002

Liegen diese Daten nicht vor, kann als alternativer Ansatz die Expositionswahrscheinlichkeiten aus allgemeinen statistischen Erhebungen ermittelt werden. Beispielsweise kann für Pkw und das Einsatzgebiet Deutschland aus der Jahresfahrleistung von 615 Mrd. km<sup>113</sup> und dem Fahrzeugbestand von 42.927.647 Pkw<sup>114</sup> eine Durchschnittsfahrleistung von rund 14.300 km pro Jahr und Pkw ermittelt werden.

Diese Daten können mit statistischen Daten zu Witterungsbedingungen kombiniert werden. Ebenfalls existieren für den Deutschen Raum, beispielsweise vom Deutschen Wetterdienst (DWD), statistische Erhebungen zu klimatischen Besonderheiten.<sup>115</sup> Daraus lassen sich Anteile von Tagen mit besonderen Randbedingungen wie beispielsweise Regen, Schnee, Nebel ableiten. Ebenso ist beispielsweise anhand von Daten des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung<sup>116</sup> für die Verteilung von Straßentypen (Landstraße, innerstädtisch, Autobahn usw.) bezogen auf die Gesamtstrecklänge möglich.

Die Ableitung der Expositionswahrscheinlichkeit, bezogen auf das repräsentative Kilometerkollektiv aus diesen Daten, ist jedoch streng genommen nicht zulässig. Selbst wenn, wie beispielsweise zu den Straßentypen, Erhebungen über die jeweilige tatsächliche Kilometerleistung existieren,<sup>117</sup> ist damit nicht eindeutig ableitbar, wie das Fahrsituationskollektiv des jeweiligen Pkw darin enthalten ist. So haben zum Beispiel Witterungsbedingungen Einfluss darauf, ob eine Fahrt überhaupt angetreten wird<sup>118</sup>. Ebenso ist die Fahrleistung sowohl über das Jahr als auch innerhalb des Tages unterschiedlich verteilt.<sup>119</sup> Andererseits existieren in vielen Fällen keine alternativ verwendbaren statistischen Daten. In manchen Fällen existieren jedoch in der Literatur zusätzliche Studien zum Fahrerverhalten in Abhängigkeit der Situationsbedingungen.

Neben der absoluten Expositionswahrscheinlichkeit können sich zusätzlich Abhängigkeiten der Parameter zueinander ergeben (bspw. „Bei Schnee ist die Fahrgeschwindigkeit geringer“<sup>120</sup>). Die dazugehörigen Hypothesen lassen sich beliebig miteinander verknüpfen, sodass die Vollständigkeit nur dann nachweisbar ist, wenn alle Verknüpfungen adressiert werden können. Aufgrund der hohen Anzahl von Einflussfaktoren einer Fahrsituation, die zudem noch jeweils weiter detaillierbar sind, kann Vollständig-

---

<sup>112</sup> Kessler et al.: EuroFOT, 2012

<sup>113</sup> in Kunert et al.: Personenverkehr Deutschland, 2012

<sup>114</sup> Stand 01. Januar 2012, Destatis: Verkehr, 2012

<sup>115</sup> Booß et al.: Klimastatusbericht, 2010, S. 18.

<sup>116</sup> BMVBS: Verkehrsinvestitionsbericht 2011, 2013

<sup>117</sup> Radke: Verkehr in Zahlen, 2012; BMVBS: Verkehrsinvestitionsbericht 2011, 2013

<sup>118</sup> Ellinghaus: Wetter und Autofahren, 1983, S. 36

<sup>119</sup> Follmer et al.: Mobilität in Deutschland 2008, 2008, S. 24, 148

<sup>120</sup> Kyte et al.: Effect Environmental Factors, 2001, S.110

keit vermutlich nicht erreicht werden. Ein objektives Verfahren muss daher in der Lage sein, Unsicherheiten in der Situationsabdeckung zu tolerieren.

Eine weitere Problematik ergibt sich sowohl für die Situationsidentifikation aufgrund von Feldstudien als auch für die Herleitung aus allgemeinen statistischen Daten. Für die Definition eines Situationskollektivs ist das Einsatzgebiet des Fahrzeugs zu berücksichtigen. Wird beispielsweise ein Fahrzeug in ganz Europa in Verkehr gebracht, muss sichergestellt werden, dass das Situationskollektiv alle potentiell kritischen Fälle abdeckt, ohne dass einzelne Regionen benachteiligt werden. Selbst wenn also für jeden Staat und jedes Fahrzeug ein als hinreichend geltendes Nutzungssituationskollektiv identifiziert werden kann, ist die Voraussetzung zu erfüllen, dass ein objektives Vorgehen zur Kombination der einzelnen Nutzungssituationskollektive verwendet wird. Dabei dürfen einzelne Nutzergruppen nicht benachteiligt werden. Bei der dafür notwendigen Definition von Nutzergruppen ist dafür wiederum die Frage der minimal notwendigen Detaillierung, analog zur Definition des Situationsparametersatzes, zu beantworten.

## 4.4 Probandentests gemäß ISO 26262

Für den Nachweis der Kontrollierbarkeit von Fahrerassistenzsystemen mit hoher Übertragbarkeit empfiehlt der „Code of Practice“ Probandenversuche. Dort wird angemerkt, dass mit Probandenversuchen unter vertretbarem Aufwand nur die Klasse C2 nachweisbar ist,<sup>121</sup> also weder C1 noch C0. In der Praxis wird die Abgrenzung von C2 zu C1 deswegen durch Experten vorgenommen.<sup>122</sup> Der Aufwand dieser Versuche, die resultierende Aussagegüte und die Erfolgswahrscheinlichkeit der Versuche werden daher im Folgenden analysiert.

Wird die Kontrollierbarkeit eines Eingriffs objektiv bewertet, ist zu Beginn für jede Gefährdung („hazardous event“) grundsätzlich von der Einstufung C3 auszugehen und basierend darauf der Nachweis auf C2 zu führen. Ist der Nachweis möglich, kann die Prüfung auf C1 erfolgen.

Zur Validierung der Kontrollierbarkeitsklasse C2 in Versuchen sind nach „Code of Practice“ mindestens 20 gültige Probandenversuche heranzuziehen. Nur wenn alle Probanden die Situation kontrollieren, kann damit abgesichert werden, dass für mindestens 85 % aller Fahrer die Situation kontrollierbar ist.<sup>123</sup>

---

<sup>121</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009, S. 15

<sup>122</sup> Fach et al.: Bewertung Beherrschbarkeit, 2010, S. 429

<sup>123</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009, S. 15 bei einem Konfidenzniveau von  $\gamma = 95\%$

Die notwendige Probandenanzahl  $n$ , abhängig von der nachzuweisenden Kontrollierbarkeitsklasse C0 bis C3 und dem dazugehörigen Kontrollierbarkeitsanteil  $p_{Cx}$  bei gegebenem Konfidenzniveau  $\gamma$ , wird ausgehend von einer Binomialverteilung vereinfachend anhand der unteren Schranke errechnet. Sie beschreibt, die Wahrscheinlichkeit, dass bei gegebener Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses kein unkontrollierbarer Versuch auftritt (s. Formel 4.1)<sup>124</sup>.

$$n = \frac{\log_{10}(1-\gamma)}{\log_{10} p_{Cx}} \quad (4.1)$$

Die im Code of Practice angesetzte 85 %-Grenze ist dabei bereits ein Zugeständnis an den Testaufwand. Für die Absicherung von C2 ( $p_{C2} \geq 90\%$ ) sind nach Formel 4.1 mindestens 29 Probanden und für C1 ( $p_{C1} \geq 99\%$ ) sogar mindestens 299 Probanden nötig. Auch hier gilt, dass keine unkontrollierbaren Ereignisse auftreten dürfen.

Treten unkontrollierbare Versuche ein, muss für die Berechnung ein anderer Ansatz gewählt werden. Ausgehend davon, dass es sich bei den Versuchen um einander ausschließende Ereignisse handelt, deren Einzelergebnisse rückwirkungsfrei zueinander sind, kann eine Binomialverteilung verwendet werden. Diese ist bei geringen Stichprobengrößen auch nicht durch eine Normalverteilung approximierbar.<sup>125</sup> Durch die große Schiefe der Binomialverteilung für seltene Ereignisse ist die Annahme einer Normalverteilung für  $p_{C2} \geq 90\%$  erst ab  $n \geq 100$  und für  $p_{C1} \geq 99\%$  erst ab  $n \geq 910$  möglich.

Für die statistische Betrachtung wird in der Folge statt des Kontrollierbarkeitsanteils  $p_{Cx}$  das seltenere Unkontrollierbarkeitsereignis und damit der Unkontrollierbarkeitsanteil  $p_{Ux}$  betrachtet, der sich nach Formel 4.2 definiert.

$$p_{Ux} = 1 - p_{Cx} \quad (4.2)$$

Treten unkontrollierbare Versuche auf, errechnet sich die notwendige Probandenanzahl anhand Formel 4.3<sup>126</sup>.

$$f(X = k | n) = \binom{n}{k} p_{Ux}^k p_{Cx}^{n-k} \quad (4.3)$$

Wobei  $k$  der Anzahl der Unkontrollierbarkeitsfälle entspricht. Die Absicherung ist dann zwar noch möglich, aber die erforderliche Probandenanzahl erhöht sich. In Tabelle 4-1 sind die notwendigen Kollektivumfänge abhängig von der Kontrollierbarkeit und den eintretenden unkontrollierbaren Versuchen dargestellt.

<sup>124</sup> Herleitung im Anhang A.1

<sup>125</sup> Bortz: Statistik, 2005, S. 78

<sup>126</sup> Bortz: Statistik, 2005, S. 67

Tabelle 4-1: Notwendige Kollektivgrößen abhängig von Unkontrollierbarkeitsergebnissen

	Abzusichernder Kontrollierbarkeitsanteil	
	$p_{C2} \geq 90 \%$	$p_{C1} \geq 99 \%$
Zulässige unkontrollierbare Ereignisse ( $k$ )	notwendige Probandenanzahl ( $n$ ) ( $\gamma = 95 \%$ , gerundet)	
0	29	299
1	46	473
2	61	628
3	76	773
4	89	913
5	103	1049

In umgekehrter Betrachtung lässt sich auch abhängig von der erwarteten Kontrollierbarkeit im Probandenkollektiv die Erfolgswahrscheinlichkeit  $p_{Erfolg}$  der Versuche nach Formel 4.4 ermitteln.

$$p_{Erfolg}(k, n) = \sum_{k=0}^{k=k_{max}} \binom{n}{k} p_{Ux}^k p_{Cx}^{n-k} \quad (4.4)$$

Tabelle 4-2 gibt Beispiele für die Erfolgswahrscheinlichkeit von Versuchen in Abhängigkeit des „tatsächlichen“ Kontrollierbarkeitsanteils im Probandenkollektiv für eine abzusichernde Kontrollierbarkeit von  $p_{C2} \geq 90 \%$ .

Tabelle 4-2: Erfolgswahrscheinlichkeiten der Versuche in Abhängigkeit des tatsächlichen Kontrollierbarkeitsanteils im Probandenkollektiv

Abzusichernde Kontrollierbarkeit $p_{C2} \geq 90 \%$		Erfolgswahrscheinlichkeit $p_{Erfolg}$			
Zulässige unkontrollierbare Ereignisse ( $k$ )	Probandenanzahl ( $n$ ) (analog zu Tabelle 4-1)	Tatsächlicher Kontrollierbarkeitsanteil im Probandenkollektiv			
		90 %	95 %	97 %	99 %
0	29	4,7 %	22,6 %	41,3 %	74,7 %
1	46	4,8 %	32,3 %	59,7 %	92,3 %
2	61	4,9 %	40,6 %	72,3 %	97,7 %
3	76	4,7 %	46,9 %	80,1 %	99,3 %
4	89	4,9 %	53,9 %	87,0 %	99,8 %
5	103	4,8 %	58,9 %	91,0 %	99,9 %

Mit steigender Probandenanzahl werden die Auswirkungen der Erhöhung der nicht kontrollierbaren Ereignisse geringer und die Anzahl zulässiger unkontrollierbarer Ereignisse konvergiert gegen den Kehrwert ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit.

Zusammenfassend ist der notwendige Aufwand für den Nachweis von Kontrollierbarkeit mit dieser Methode als sehr hoch einzuschätzen. Ebenso ist bei geringen Probandenanzahlen die Erfolgswahrscheinlichkeit der Versuche gering, wenn der tatsächliche Kontrollierbarkeitsanteil im Kollektiv nicht erheblich größer als die nachzuweisende Kontrollierbarkeitsgrenze ist. Daher ist anzustreben, dass Versuchsergebnisse auf möglichst viele Systeme, Systemausprägungen und Kontrollierbarkeitssituationen übertragbar sind.

---

## 5 Relevanzbewertung

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ist die Detaillierung von Situationen zur Bewertung von Kontrollierbarkeit beliebig fortführbar. Dadurch sinkt jedoch auch die Relevanz der Einzelsituation. Ansätze, die die Expositionsfaktoren von Situationsparametern miteinander verknüpfen, sind auf umfassendes statistisches Datenmaterial angewiesen, welches zu Beginn der Bewertung vorliegen muss. Dafür ist hoher Aufwand zu treiben, ohne dass im Vorhinein abgeschätzt werden kann, ob die ermittelten Daten überhaupt relevant für die Bewertung sind. Umgekehrt ist dies aber notwendig, um den damit verbundenen Aufwand zu rechtfertigen.

Aufgrund der theoretisch beliebig komplexen Abhängigkeit von Einzelfaktoren kann außerdem nicht gewährleistet werden, dass die Berechnung einer Verbundwahrscheinlichkeit als Multiplikation der Expositionswahrscheinlichkeiten zulässig ist. Werden zusätzliche Verknüpfungen eingefügt, steigt der Detaillierungsgrad wieder, sodass irgendwann nur extrem geringe Expositionswahrscheinlichkeiten der Einzelsituationen zu erwarten sind. Um dieser Problematik zu begegnen, wird ein Ansatz entwickelt, der eine Relevanzbewertung von Einzelfaktoren in verschiedenen Detaillierungsebenen erlaubt und dadurch auch ermöglicht, zu identifizieren, an welchen Stellen eine Detaillierung großen Einfluss auf die allgemeine Kontrollierbarkeitsbewertung hat. Dazu wird ein Top-Down-Ansatz gewählt, der die schrittweise Betrachtung „vom Groben zum Feinen“ zulässt. Im Gegensatz zu Ansätzen der Berechnung von Verbundwahrscheinlichkeiten aus der Verknüpfung von Auftretenswahrscheinlichkeiten von Situationsfaktoren, wird dabei keine Vollständigkeit angestrebt, sondern bewusst ein Vorgehen gewählt, welches in der Lage ist, auch mit unvollständigen Daten Ergebnisse zu liefern.

### 5.1 Ansatz zur Berechnung eines Relevanzfaktors

In Kapitel 4.2 wurde die Beschreibung der Fahrsituation durch Situationsparameter diskutiert und die häufig verwendete Gliederung in die Bereiche Fahrer, Fahrzeug und Umwelt dargestellt. Diese Einteilungen werden auch für den zu entwickelnden Ansatz verwendet. Sie werden in der Folge als Klassen bezeichnet, Unterteilungen innerhalb dieser Klassen als Subklassen. Innerhalb der Subklassen erfolgt eine weitere Unterteilung in Parameterkategorien und Parameter. Eine Parameterkategorie enthält dementsprechend die detaillierteren Parameter. In Abbildung 5-1 sind die Abhängigkeiten schematisch dargestellt.

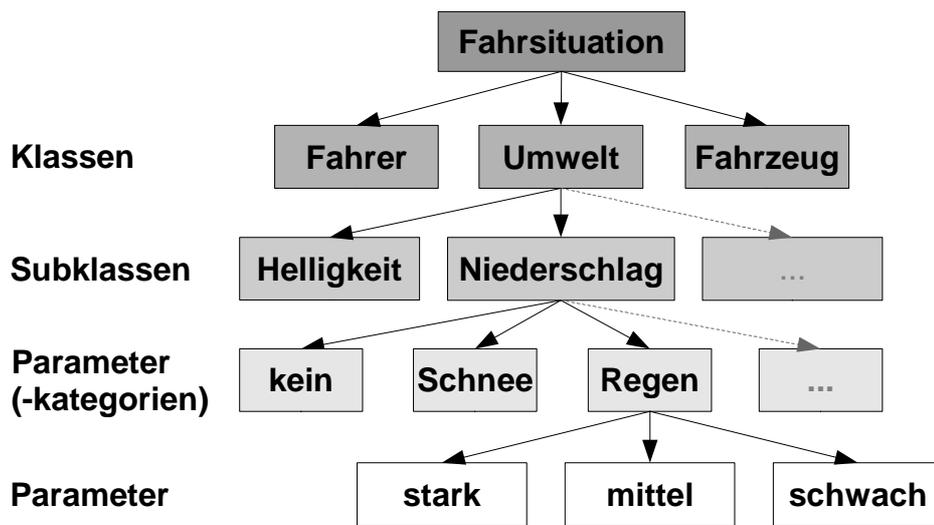


Abbildung 5-1: Abhängigkeiten der Gliederungsebenen von Situationsparametern

Eine vollständige Kombination aller Situationsparameter mit der Ermittlung der dazugehörigen Expositionswahrscheinlichkeit wird als nicht zielführend betrachtet, weil Abhängigkeiten der Expositionswahrscheinlichkeiten der Einzelfaktoren nicht auszuschließen sind. Daher wird in umgekehrter Vorgehensweise davon ausgegangen, dass die Situationsparameterklassen zueinander unabhängig und damit miteinander frei kombinierbar sind. Für die weitere Definition, Klassifizierung und Auswahl werden die folgenden Anforderungen definiert.

- die Subklassen müssen unabhängig zueinander sein. Die Kategorien sind dann miteinander frei miteinander kombinierbar.
- Parameter bzw. Parameterkategorien müssen einander ausschließen, die kumulierte Expositionswahrscheinlichkeit innerhalb der Kategorie ergibt sich zu 100 %.
- Innerhalb der Parameterkategorien ist dann der „Basisanteil“ zu identifizieren. Der Basisanteil ist eine Parameterausprägung, die die folgenden Anforderungen erfüllt:
  - Der Basisanteil deckt einen hohen Expositionswahrscheinlichkeitsanteil der jeweiligen Parameterkategorie ab (möglichst den höchsten innerhalb der Kategorie),
  - alle weiteren Parameteralternativen innerhalb derselben Kategorie führen zu Verschlechterungen der Situation hinsichtlich der zu messenden Eigenschaft

Zusätzlich zum Basisanteil kann auch ein unbekannter „Rest“ innerhalb der Kategorie hinzugefügt werden. Dadurch werden Unsicherheiten bezüglich der Vollständigkeit und für unvorhersehbare Zustände/Ausprägungen adressiert.

Um die Relevanz bewerten zu können, wird ein Bewertungsmaßstab benötigt, der als Gewichtungsfaktor dient. Dieser Bewertungsmaßstab muss Bewertung der Kontrollierbarkeit ermöglichen. Für einen belastbaren Nachweis mit vertretbarem Aufwand, ist die

Untersuchungshypothese zu dieser Eigenschaft so zu wählen, dass eine Falsifikation möglich ist und eindeutige Aussagen zulässt<sup>127</sup>.

Dem in Kapitel 4.4 verwendeten Ansatz der Betrachtung der selteneren Unkontrollierbarkeitsereignisse folgend, werden die Unkontrollierbarkeitsanteile  $p_U$  für den jeweiligen Situationsparameter nach Formel 5.1 angesetzt.

$$p_U = 1 - p_C \quad (5.1)$$

Die Bewertung kann relativ zu einer Bemessungsgröße erfolgen. Eine Option hierfür ist die Bildung eines Gewichtungsfaktors  $g$  anhand der Änderung im Vergleich zur abzuschließenden Referenz der Unkontrollierbarkeit  $p_{Ux}$  nach Formel 5.2.

$$g = \frac{p_U}{p_{Ux}} \quad (5.2)$$

Dadurch werden die Auswirkungen von Kontrollierbarkeitsänderungen auf das Referenzniveau im Gewichtungsfaktor abgebildet und können dadurch auf jeder Detaillierungsebene betrachtet werden. In jedem Fall muss der Unkontrollierbarkeitsanteil in der jeweiligen Parameterausprägung ermittelt werden. Durch Referenzbildung entsteht also eine zusätzliche Abhängigkeit, diese kann auch nachträglich noch eingeführt werden. Daher wird in der Folge kein Gewichtungsfaktor verwendet, sondern der Unkontrollierbarkeitsanteil für die Bewertung herangezogen.

Dieser Unkontrollierbarkeitsanteil in den Parameterausprägungen wird mit der Expositionswahrscheinlichkeit der Situation multipliziert. Anschließend werden die Produkte innerhalb der Kategorien aufsummiert, wodurch sich der Unkontrollierbarkeitsanteil auf der nächsthöheren Detaillierungsstufe ergibt. Auf der obersten Ebene errechnet sich dann aus den Expositionswahrscheinlichkeiten und Unkontrollierbarkeitsanteilen der Ausprägungen der Anteil an Unkontrollierbarkeit in der gesamten Kategorie. Dort ist dann der Vergleich mit der angestrebten abzuschließenden Kontrollierbarkeitsklasse, beispielsweise  $p_{C2} \geq 90\%$  möglich.

Für die Beschreibung wird die folgende Namenskonvention eingeführt:

- Die Expositionswahrscheinlichkeit eines Parameters wird durch die Variable  $\rho$  beschrieben.
- Der Unkontrollierbarkeitsanteil wird durch die Variable  $v$  beschrieben.
- Die Indizes werden wie folgt zugewiesen:
  - $K$  bezeichnet die Subklasse
  - $q$  ist der Index der ersten Parameterebene

---

<sup>127</sup> Popper: Logik der Forschung, 2005, S. 14 ff

- Wird ein Parameter zu einer Parameterkategorie erweitert und dann weiter detailliert, wird jeweils ein Index  $r, s, t, \dots$  fortlaufend hinzugefügt.
- Der Basisanteil wird mit dem hochgestellten Index  $B$  gekennzeichnet

Die Anzahl der Indizes gibt damit auch Aufschluss über die Detaillierungstiefe. Um die Anforderung zu erfüllen, dass sich die Parameter bzw. die Parameterausprägungen in den Kategorien ausschließen und sich die Wahrscheinlichkeiten zu 100 % addieren, wird ein Wahrscheinlichkeitsanteil  $w$  aus der Expositionsverbundwahrscheinlichkeit der Parameterausprägung und der Expositionswahrscheinlichkeit auf geringerer Detaillierungsstufe gemäß Formel 5.3 gebildet.

$$w_{K,q,r} = \frac{\rho_{K,q,r}}{\rho_{K,q}} \quad (5.3)$$

Da sich innerhalb einer Klasse die detaillierteren Parameter gegenseitig ausschließen, gilt dabei innerhalb einer Parameterkategorie die Bedingung nach Formel 5.4.

$$\sum_{r=1}^n w_{K,q,r} = 1 \quad (5.4)$$

Kann diese Bedingung nicht anhand der vorliegenden statistischen Daten erfüllt werden, muss ein „Rest“-Anteil einbezogen werden, der diese Unsicherheit adressiert.

Für die erste Detaillierungsebene ist dabei der Wahrscheinlichkeitsanteil  $w_{K,q}$  noch gleich der Expositionswahrscheinlichkeit (s. Formel 5.5).

$$w_{K,q} = \rho_{K,q} \quad (5.5)$$

Abbildung 5-2 zeigt die Vorgehensweise schematisch am Beispiel der Subklasse Niederschlag.

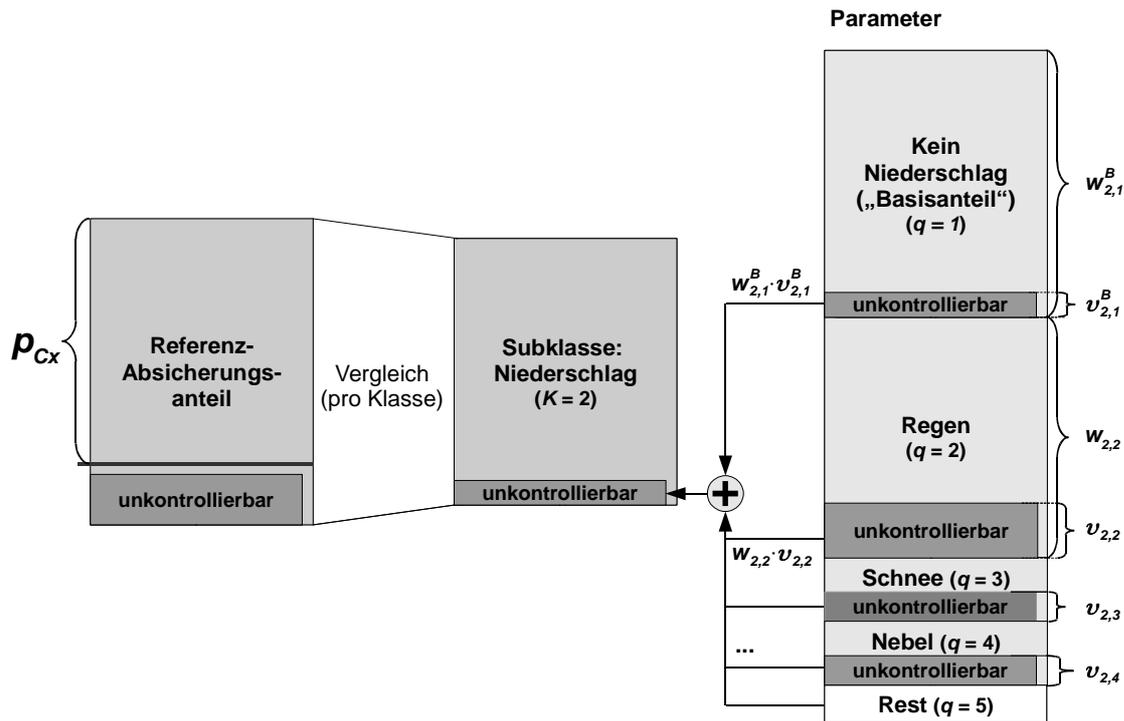


Abbildung 5-2: Vorgehen der Berechnung von Relevanzkennwerten in den Detaillierungsstufen

In analytischer Darstellung ergibt sich in der jeweiligen Subklasse bzw. Parameterkategorie auf der jeweiligen Detaillierungsebene der Wahrscheinlichkeitsvektor  $\overline{W}_{K,q}$  (s. Formel 5.6) aus den Expositionswahrscheinlichkeiten der Parameter.

$$\overline{W}_{K,q} = \begin{pmatrix} w_{K,q,1}^B \\ w_{K,q,2} \\ w_{K,q,3} \\ \cdot \\ \cdot \\ w_{K,q,i} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Der entsprechende Unkontrollierbarkeitsvektor  $\overline{U}_{K,q}$  wird aus den Unkontrollierbarkeitsanteilen der Situationen nach Formel 5.1 gebildet (s. Formel 5.7).

$$\overline{U}_{K,q} = \begin{pmatrix} v_{K,q,1}^B \\ v_{K,q,2} \\ v_{K,q,3} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{K,q,i} \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Das Skalarprodukt dieses Vektors gemäß Formel 5.8 ergibt den Bewertungsanteil, der als Unkontrollierbarkeitsanteil auf der nächsthöheren Ebene verwendet wird.

$$v_{K,q} = \overline{W_{K,q}} \cdot \overline{U_{K,q}} \quad (5.8)$$

Auf der höchsten Ebene sind in den Vektoren  $\overline{W_{K,q}}$  und  $\overline{U_{K,q}}$  jeweils auch die Basisanteile  $w_{K,q}^B$  und  $u_{K,q}^B$  enthalten.

Um den Aufwand der Detaillierung zu reduzieren, kann eine Vorauswahl von Detaillierungsfaktoren durch den Vergleich innerhalb einer Klasse auf der jeweiligen Detaillierungsebene getroffen werden. Dazu wird eine Relevanzschwelle benötigt. Liegt das Produkt aus Expositionswahrscheinlichkeit und Unkontrollierbarkeitsfaktor eines Parameters im Vergleich zum größten Produkt eines weiteren Parameters derselben Ebene (bspw. der Parameterkategorie oder der Subklasse) unterhalb dieser Relevanzschwelle, so ist eine Detaillierung nicht sinnvoll, weil die Auswirkungen auf den Unkontrollierbarkeitsanteil gering sind. Für die Priorisierung der Detaillierung der Situationsfaktoren wird das Abbruchkriterium für weitere Detaillierung eines beliebigen Parameters ( $q = i$ ) in Formel 5.9 definiert.

$$v_{K,i} w_{K,i} \cdot \frac{1}{RS} < \max(w_{K,q} v_{K,q}) \quad (5.9)$$

$$\text{mit } q = \{1, \dots, n \mid q \neq i\}$$

Die Zusammenhänge werden an folgendem Beispiel gezeigt. Es wird eine Kontrollierbarkeitsbewertung durchgeführt, bei der eine Gesamtkontrollierbarkeit von  $p_{C2} > 90\%$  erwartet wird. Als Unkontrollierbarkeitsfaktor dient der daraus resultierende maximal zulässige Unkontrollierbarkeitsanteil nach Formel 5.10 und 5.11.

$$v_{\max, \text{gesamt}} \leq 1 - p_{C2} \quad (5.10)$$

$$v_{\max, \text{gesamt}} \leq 10\% \quad (5.11)$$

Die Subklasse setzt sich dabei aus  $n$  Parametern zusammen. Die Relevanzschwelle ist von der erwarteten Schätzungsgenauigkeit des Unkontrollierbarkeitsanteils  $s$  abhängig. Die Schätzungsgenauigkeit ist die erwartete Abweichung zwischen dem beispielsweise für die einleitende „Hazard Classification“ geschätzten Unkontrollierbarkeitsanteil  $v_{K,q, \text{schätz}}$  gegenüber dem tatsächlichen Kontrollierbarkeitsanteil im Nutzerkollektiv  $v_{K,q, \text{schätz}, \text{real}}$  (s. Formel 5.12).

$$s_{K,q} = \frac{v_{K,q, \text{schätz}}}{v_{K,q, \text{Nutz}, \text{real}}} \quad (5.12)$$

Die Schätzungenauigkeit  $s_{K,q}$  wird beispielhaft mit 100 % angenommen. Der Unkontrollierbarkeitsanteil wird also maximal auf das Doppelte des realen Werts geschätzt. Die Relevanzschwelle ( $RS$ ) legt fest, welcher Fehleranteil als tolerierbar angesehen wird. Diese wird für das folgende Beispiel auf ein Zehntel des angestrebten Unkontrollierbarkeitsanteils nach Formel 5.13 festgelegt:

$$RS \leq 10 \% \quad (5.13)$$

Der maximal erlaubte relative Fehler ist dadurch mindestens um eine Potenz kleiner als die zu ermittelnde Größe (s. Formel 5.14).

$$F_{max} = RS \cdot s_{gesamt} \leq 1 \% \quad (5.14)$$

Mit der Schätzungenauigkeit  $s_{K,q}$  ergibt sich der resultierende Fehler des Unkontrollierbarkeitsanteils  $\Delta v$  nach Formel 5.15.

$$\Delta v = F_{max} \cdot s_{K,q} \leq 1 \% \quad (5.15)$$

Es handelt es sich um eine Betrachtung der Extremwerte. Abgesehen von der relativ hoch gewählten Schätzungenauigkeit, wird in den meisten Fällen die Anzahl der Parameter in der jeweiligen Kategorie mindestens zwei oder größer sein. Ebenso ist eine gleichmäßigere Verteilung der Unkontrollierbarkeitsanteile zu erwarten.

Das abzusichernde Niveau  $p_{Cx}$  (im Beispiel  $p_{C2} = 90 \%$ ) ist darin implizit enthalten, weil es den Erwartungswert definiert und damit die zulässige Relevanzschwelle im Abstand von einer Potenz.

Ist das Abbruchkriterium nach Formel 5.9 erfüllt, sind aus der Erhöhung des Detaillierungsgrades für diesen Faktor Änderungen der Kontrollierbarkeit nur unterhalb der Relevanzschwelle zu erwarten. Diese Parameter müssen dann nicht weiter detailliert werden.

### 5.1.1 Abbildung von abhängigen Wahrscheinlichkeiten

Dem Lösungsansatz folgend sind die jeweiligen Subklassen miteinander frei kombinierbar. Daher können die Verbundwahrscheinlichkeiten der Subklassen durch Multiplikation gebildet werden. Im Kapitel 4.2 wurde diskutiert, dass Abhängigkeiten zwischen den Situationsparametern grundsätzlich nicht auszuschließen sind. Sind die Expositionswahrscheinlichkeiten von Situationsparametern voneinander abhängig, ist diese Multiplikation der Einzelwahrscheinlichkeiten nicht mehr zulässig. Kritisch sind diese Abhängigkeiten dann, wenn sie in einer Situation resultieren, die die Unkontrollierbarkeit über- oder unterschätzt, weil die Kombination hinsichtlich der Kontrollierbarkeit von der getrennten Bewertung der Ausgangssituationen abweicht. Bei Einbeziehung aller denkbaren Situationsausprägungen sind Abhängigkeiten nicht vermeidbar, gleich-

zeitig ist aber ein eindeutiger Nachweis aufgrund der Vielzahl potentieller Wechselwirkungen kaum zu führen.

Um diese Problematik zu adressieren, muss bei vermuteter Abhängigkeit (diese muss nicht linear sein) zwischen Situationsparametern unterschiedlicher Klassen, eine gesonderte Expositionswahrscheinlichkeit der Kombination ermittelt und diese gemäß Formel 5.16 mit der kombinierten Wahrscheinlichkeit der Parameter verglichen werden.

$$r_{\text{Abhängig}} = \frac{\rho_{(K_i, q, r_i, \dots \cap K_j, q, r_j, \dots)}}{\rho_{K_i, q, r_i, \dots} \cdot \rho_{K_j, q, r_j, \dots}} \quad (5.16)$$

Ist  $r_{\text{Abhängig}} > 1$ , dann besteht eine erhöhte Expositionswahrscheinlichkeit der Kombination. Die Abhängigkeitssituation muss dann gesondert betrachtet werden. Da diese dann eine eigenständige Situation darstellt, muss sie auch dem Gesamtsituationskollektiv zugerechnet werden und damit auf höchster Detaillierungsebene, den Subklassen gleichgestellt, berücksichtigt werden.

Dadurch ergibt sich auf höchster Ebene die Notwendigkeit für die Einführung einer Subklasse „Sondersituationen“. Dort werden aus Korrelationen resultierende ungünstige Situationskonstellationen zusammengefasst. Dabei können auch Situationen inkludiert werden, die aufgrund besonderer Schadenshöhe trotz geringer Expositionswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen sind. Diese Konstellationen, im Sprachgebrauch der Systementwicklung teilweise als „pathologische Fälle“ bezeichnet, müssen im Vorhinein bekannt sein bzw. systematisch anhand der Systemspezifikationen hergeleitet werden. Ist dies nicht der Fall, helfen gegebenenfalls Langzeiterfahrungen und bekannt gewordene Fälle aus der Vergangenheit („kritisch aus Erfahrung“).

Da für diese Klasse kein Basisanteil gebildet werden kann, muss sie in der Summation als fester Anteil betrachtet. Damit sind sie Teil eines allgemeinen „Restes“ der Situationen, die die Bewertung im Allgemeinen beeinflussen, weil sie einen festen Anteil am Absicherungsniveau haben.

Die Menge nachweisbarer abhängiger Situationen hat dadurch große Auswirkungen auf den Nutzen des hier beschriebenen Ansatzes zur Identifikation von Testsituationen. Sind davon sehr viele identifizierbar oder notwendig, ist ein großer Anteil der Situationen fest definiert und der Nutzen der Aufteilung in Klassen wird geringer.

Ausgehend von der Annahme, dass die Situationsparameter grundsätzlich nicht voneinander abhängig sind und Korrelationen daher Sonderfälle darstellen sollten, kann diese Vorgehensweise zu einer Reduzierung des notwendigen zu betrachtenden Situationsumfangs führen. Wird jedoch die umgekehrte Annahme zugrunde gelegt, dass alle Faktoren stets untereinander in Wechselwirkung stehen, und eine Unabhängigkeit nicht nachzuweisen ist, so ergibt sich eine Vielzahl notwendiger Testsituationen, zu denen jeweils einzeln Expositionswahrscheinlichkeit und Bewertungsanteil zu ermitteln sind. Dies

führt zurück zur Ausgangslage, die zur Entwicklung des beschriebenen Ansatzes geführt hat.

Allerdings ist dies ist kein Widerspruch, sondern eine logische Konsequenz des Ansatzes. Wird die Betrachtung der beliebigen Kombination von Einzelfaktoren und deren Expositionswahrscheinlichkeiten als nicht praktikabel bewertet, da der Aufwand hierfür als sehr/zu hoch eingeschätzt wird, können Vereinfachungen einen Ausweg bieten. Durch diese Vereinfachungen kann keine absolute Vollständigkeit mehr erreicht werden, weil die unzähligen theoretisch möglichen Wechselwirkungen und Detailausprägungen der Einzelparameter nicht betrachtet werden. Dabei wird über Strukturierung und anhand von Vorwissen über das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt angestrebt, eine hohe Abdeckung des im realen Betrieb zu erwartenden Gesamtsituationskollektivs hinsichtlich einer bestimmten Systemeigenschaft zu erhalten. Kritisch kann dies hinsichtlich der absoluten Quantifizierung sein, da systembedingt die jeweiligen Anteile über- bzw. unterschätzt werden.

Im Umkehrschluss können die hier dargestellten Überlegungen für die Definition eines solchen Fahrsituationskollektivs herangezogen werden. Kombinierte Situationen sind nur dann im Gesamtkollektiv zu berücksichtigen, wenn sie hinsichtlich des Relevanzfaktors Änderungen oberhalb der Relevanzschwelle auf höchster Detaillierungsebene erwarten lassen.

## 5.2 Kontrollierbarkeitsanalogien

Neben der Bewertung anhand von Experten oder durch Probandenversuche kann die Kontrollierbarkeitsschätzung auch durch Analogien unterstützt werden.<sup>128</sup> Dazu sind geeignete Situationen heranzuziehen, die den Fahrern bereits aus anderen Zusammenhängen bekannt sind, die aber hinsichtlich der Wirkung auf das Fahrzeug aus Fahrersicht gleich sind. Für den Vergleich sind die Kriterien Vorhersehbarkeit des Eintritts des Ereignisses, dessen Intensität und die Wirkungsdauer zu berücksichtigen. Ebenso muss für eine zulässige Analogiebegründung das Ereignis auch so häufig eintreten, dass der Fahrer feste Reaktionshandlungsmuster zur Vermeidung anwenden kann.

Für die hier betrachteten längsdynamischen Systeme und die Betrachtung der Kontrollierbarkeit für das dem verzögernden Fahrzeug nachfolgenden Fahrers können Analogien aus erlebten Folgefahrtsituationen abgeleitet werden. Eine plötzliche Verzögerung des Vorfahrenden, welche nicht vorhersehbar ist und in der Dauer mit einer nicht situationsgerechten Auslösung übereinstimmt oder diese sogar übertrifft, tritt

---

<sup>128</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009, S. 14

vermutlich im täglichen Fahrgeschehen sehr häufig ein. Zu quantifizieren ist die damit die Intensität der Bremsung.

Studien zu häufig auftretenden Verzögerungen ergeben einen 95 %-Bereich von etwa  $D_{95\%} = 3 \text{ m/s}^2$  und einen Maximalwert bis  $D_{max} = 5 \text{ m/s}^2$ .<sup>129</sup> Die für ACC zulässige automatische maximale Verzögerung von  $D_{ACC} = 3,5 \text{ m/s}^2$  liegt auch in diesem Bereich.<sup>130</sup> Verzögerungen unterhalb dieser Grenze sind damit als kontrollierbar anzunehmen. Die in der Realität teilweise auch bei geringen Verzögerungen auftretenden Auffahrunfälle werden dabei schuldhaftem Verhalten des auffahrenden Fahrers zugeschrieben.

Weitere Analogien können aus Feldstudien des Fahrverhaltens<sup>131</sup> ermittelt werden, indem die durch den Fahrer erlebten Situationen mit verzögerndem Vorauszfahrzeug hinsichtlich der Kritikalität analysiert werden. Entsprechende ausreichend detaillierte Daten standen jedoch bis zur Veröffentlichung dieser Arbeit noch nicht zur Verfügung.

Ebenso ist ein Vergleich mit der Wirkung von Umgebungseinflüssen wie bspw. Windböen, Steigung oder Gefälle oder auch technische Effekte möglich. In einer ersten Analyse konnten hier jedoch keine Effekte identifiziert werden, die hinsichtlich der Vorhersehbarkeit des Eintritts des Ereignisses, dessen Intensität und dessen Wirkungsdauer als analog zu einer nicht situationsgerechten Auslösung eingestuft werden konnten.

---

<sup>129</sup> Hackenberg et al.: Fahrdynamische Leistungen, 1982, S. 345

<sup>130</sup> ISO 15622: ACC, 2010, S. 11

<sup>131</sup> bspw. Kessler et al.: EuroFOT, 2012 und Neale et al.: Naturalistic Driving Study, 2002

---

## 6 Definition von Situationsparametern

Nachdem die Anforderungen für die objektive Kontrollierbarkeitsbewertung definiert und ein Ansatz für die Relevanzbewertung entwickelt wurde, soll die Anwendbarkeit des Verfahrens für den Bereich von kollisionsvermeidenden/-lindernden Systemen mit Eingriff in die Längsdynamik untersucht werden. Dazu ist die Definition konkreter Situationsparameter notwendig, anhand derer Expositionswahrscheinlichkeiten ermittelt und Kontrollierbarkeitsschätzungen durchgeführt werden. Anschließend erfolgt die beispielhafte Prüfung im Versuch.

Dazu werden die in Kapitel 4.2 vorgestellten Klassen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt vor dem Hintergrund der in Kapitel 4.1 vorgestellten drei Ebenen „Ursachen“, „Gefährdung“ und „Reaktionen“ diskutiert und angepasst. Dabei wird berücksichtigt, dass die Situationsmerkmale für die Relevanzbewertung möglichst voneinander unabhängig zu wählen sind. Für eine hohe Übertragbarkeit von Erkenntnissen auf andere Situationen ist eine abstrakte Formulierung der Klassifikatoren zu wählen, die möglichst viele Einflüsse hinsichtlich ihrer Wirkung auf Fahrzeug und Fahrer und gegebenenfalls das zu untersuchende FAS für die Kontrollierbarkeitssituation zusammenfasst.

Hinsichtlich der hergeleiteten Variationsparameter einer Fahrsituation für die Beschreibung von Kontrollierbarkeitssituationen wird keine Vollständigkeit angestrebt. Vielmehr soll die Methodik dargestellt und exemplarisch geprüft werden. Bewährt sich das allgemeine Vorgehen, sind Erweiterungsvorschläge und Optimierungsansätze darzustellen.

### 6.1.1 Umgebungsbedingungen

Eine Vielzahl von Arbeiten zur generischen Definition von Fahrsituationen liegt bereits vor. So wurde beispielsweise der von von Benda<sup>132</sup> entwickelte Ansatz durch Fastenmeier<sup>133</sup> aufgegriffen und vereinfacht. Dieses Klassifikationssystem wurde dann später von Reichart<sup>134</sup> verwendet und hinsichtlich der Beschreibung von Straßenmerkmalen und Umgebungsbedingungen angepasst und wieder erweitert.

Reichart unterscheidet zwischen Merkmalen zur Beschreibung von Straßen und Merkmalen zur Beschreibung von Umgebungsbedingungen.<sup>135</sup>

---

<sup>132</sup> Benda, von: Klassifikation Verkehrssituationen, 1977

<sup>133</sup> Fastenmeier: Verkehrssituation Analyseeinheit, 1995, S. 47 ff

<sup>134</sup> Reichart: Menschliche Zuverlässigkeit, 2001, S. 109

<sup>135</sup> Reichart: Menschliche Zuverlässigkeit, 2001, S. 109

Für die Kontrollierbarkeitsbewertung sollten die verwendeten Klassifizierungskategorien möglichst unabhängig voneinander sein. Insbesondere die detaillierte Einteilung von Reichart zu Einzelmerkmalen von Straßen erfüllt diese Bedingung nicht. Daher wird stattdessen auf die Beschreibung nach Fastenmeier<sup>136</sup> zurückgegriffen und auf höchster Ebene die Parameterkategorie „Straßentyp“ eingeführt. Die Wahl des Straßentyps bedingt dann Parameter wie z.B. Anzahl und Breite der Fahrstreifen, Trennungsmaßnahmen oder maximale Krümmung.

Die Merkmalsausprägungen Sichtbeeinträchtigung und Straßengriffigkeit bzw. Reibwert wird auf deren Hauptursache zurückgeführt und unter Niederschlag zusammengefasst. Darin ist dann auch der Umweltzustand „kein Niederschlag“ enthalten.

Für die Beschreibung nicht infrastrukturbedingter Umgebungseinflüsse werden, basierend auf dem Ansatz von Reichart, die Parameterkategorien „Helligkeit“, „Niederschlag“ und „Verkehrsdichte“ ausgewählt. Die Faktoren Steigung/Gefälle und Zustand der Fahrbahn werden dem Straßentyp zugeordnet. Da ein Verlassen der Straße bei Kontrollierbarkeitsuntersuchungen generell als Unfall gewertet wird, wird die Randbebauung vernachlässigt.

## 6.1.2 Fahrzeug

Einige Einflüsse auf das Fahrzeug, die zu einer Verzögerung der Fahrerreaktion führen, wurden bei der Analyse nicht situationsgerechter Auslösungen bereits betrachtet (vgl. Kapitel 4.1.3). Im vorhergehenden Abschnitt wurde zudem definiert, dass der Reibwert  $\mu$  als Folge der Umgebungsbedingungen anzusehen ist. Damit ist auch das verfügbare Kraftschlussmaximum bereits vorgegeben.

Als weitere Größen zur Beschreibung der Fahrsituation verbleiben, bei Vernachlässigung des technischen Zustands des Fahrzeugs<sup>137</sup>, für die Beschreibung des Fahrzeugs die Geschwindigkeit zu Beginn der Fahrsituation und die wirkenden Beschleunigungen.

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu Beginn der Situation beeinflusst die Gefährdung der Situation. Untersuchungen bezüglich des Verhaltens im Längsverkehr zeigen, dass Fahrer außerorts den Abstand abhängig von der Geschwindigkeit wählen und beispielsweise zum Vordermann eine konstante Zeitlücke einstellen.<sup>138</sup> Daher werden die Zeitlücken als Bemessungsgrundlage herangezogen und die Geschwindigkeit innerhalb der vorgegebenen Richtgeschwindigkeit von 130 km/h so gewählt, dass tendenziell die für Kontrollierbarkeit kritischeren Situationen betrachtet werden.

---

<sup>136</sup> Fastenmeier: Verkehrssituation Analyseseinheit, 1995, S. 49

<sup>137</sup> s. hierzu Kapitel 4.1.3

<sup>138</sup> Fecher: Stationäres Folgeverhalten, 2005, S. 50

Die wirkenden Beschleunigungen und damit die aktuelle Ausnutzung des Kraftschlussmaximums ergeben sich aus den für die Erfüllung der aktuellen Fahraufgabe notwendigen Beschleunigungen. Diese sind von Fahrbahnverlauf und -trassierung, sowie vom aktuell ausgeführten Manöver abhängig.

Die Fahrbahntrassierung definiert Querkräfte, die zur Bewältigung von Längs- und Querneigung der Fahrbahn notwendig sind. Unter Annahme einer maximal zulässigen Längs- und Querneigung von Straßen  $q \leq 8\%$ <sup>139</sup>, ergibt sich die für die Beibehaltung des Kurses bzw. der Längsgeschwindigkeit notwendige Quer- bzw. Längskraft, vereinfachend für kleine Winkel und bezogen auf das Reibwertmaximum, nach Formel 6.1.

$$\mu_{\text{Steigung/Neigung}} = q \quad (6.1)$$

Damit wird der Einfluss von Längs- und Querneigung als vernachlässigbar angesehen.

Der Fahrbahnverlauf definiert in Kombination mit der Geschwindigkeit die Querkräfte zur Kurvenfahrt. Studien zeigen dabei, dass Normalfahrer jedoch die Geschwindigkeit jeweils so anpassen, dass Querbeschleunigungen von  $a_y \geq 4 \text{ m/s}^2$  selbst bei kurviger Landstraßenfahrt bei weniger als 5 % der Fahrdauer überschritten werden.<sup>140</sup>

Basierend darauf kann anhand der Modellvorstellung des „Kammischen Kreises“<sup>141</sup> vereinfachend die Änderung der verfügbaren maximalen Längskraft in Abhängigkeit von der benötigten Querkraft nach Formel 6.2 berechnet werden.

$$a_{x,max}^2 \leq (g \cdot \mu_{max})^2 - a_y^2 \quad (6.2)$$

Die genannten Werte und  $\mu_{max} = 1$  eingesetzt, ergibt sich eine Änderung des maximalen Längskraftpotentials von  $\Delta a_{x,max} \leq 10\%$ .

Damit wird es in Näherung ebenfalls vernachlässigt.

### 6.1.3 Fahrer

Grundsätzlich muss der Fahrer die entstehende Situation wahrnehmen und den weiteren Verlauf antizipieren, um darauf reagieren zu können. Für die Definition dieser Wahrnehmbarkeit zur Situationsschätzung wird in der Literatur die Größenänderung des jeweiligen Zielobjektes auf der Netzhaut herangezogen<sup>142</sup>. Die Erkennbarkeitsschwelle

---

<sup>139</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RAS-L, 1996, S. 14

<sup>140</sup> vgl. Hackenberg et al.: Fahrdynamische Leistungen, 1982, S. 345; weitere Quellen s. auch Donges: Fahrerhaltensmodelle, 2012, S. 20

<sup>141</sup> vgl. Mitschke et al.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 2003, S. 42

<sup>142</sup> Kiefer et al.: Surprise Braking Trials, 2005, S. 33

mit mindestens 50% Wahrscheinlichkeit der Gutschätzung liegt laut Olson<sup>143</sup> bei 0,17 °/s (bzw. 0.003 rad/s) Änderung der Objektgröße auf der Netzhaut. Daraus kann die Entfernung, ab der eine zuverlässige Schätzung erfolgen kann  $d_{\text{schätz } 50\%}$  in Abhängigkeit von der Objektbreite  $B_{\text{Ziel}}$  und der Relativgeschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  nach Formel 6.3 bestimmt werden.

$$d_{\text{schätz } 50\%} = \left( \frac{B_{\text{Ziel}} v_{\text{rel}}}{0,003/\text{s}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.3)$$

Bei der Betrachtung der Fahrerreaktion ist daher jeweils auch diese Erkennbarkeitsschwelle einzubeziehen. Sie ergibt sich aus der jeweiligen Situationsentwicklung, die durch die Verzögerungen und Ausgangsabstände der beteiligten Fahrzeuge bedingt ist und kann auch zeitbezogen als Dauer vom Situationsbeginn bis zum Erreichen des Abstandes  $d_{\text{schätz } 50\%}$  dargestellt werden ( $t_{\text{schätz } 50\%}$ ).

Darüber hinaus können weitere Variationsparameter bezüglich des Fahrers herangezogen werden. Im Kapitel 4.1.3 wurden die Faktoren der Fahrerleistungsfähigkeit diskutiert. Dabei wurde die Blickabwendung als Variationsparameter identifiziert. Diese kann sowohl durch die Vorbereitung eines Manövers als auch durch die Ausführung von Nebenaufgaben bedingt sein. Unterschiede zwischen den beiden Mechanismen ergeben sich vermutlich in der konkreten Blickführung.

Vereinfachend werden beide Auslöser als ähnlich genug zueinander angesehen, dass die Blickabwendung als Variationsparameter des Fahrerverhaltens zur Definition von Kontrollierbarkeitssituationen ausreicht. Bei der späteren Diskretisierung des Parameters hinsichtlich der Dauer und Frequenz, sind sowohl Blickabwendungen zur Manövvorbereitung als auch zur Bewältigung von Nebenaufgaben quantitativ zu berücksichtigen.

## 6.2 Situationsparameter im 3-Ebenen Modell

Die gewählten Variationsparameter der Situation wurden so gewählt, dass sie jeweils mindestens eine der drei Ebenen einer Kontrollierbarkeitssituation adressieren. Um die Auswahl zusammenzufassen und die einfachen Abhängigkeiten darzustellen, wird das 3-Ebenen-Modell der Kontrollierbarkeitssituation mit den gewählten Situationsparameter in Tabelle 6-1 kombiniert. Bezüglich der Ursachen sind beispielhaft Gründe für Wahrnehmungsdifferenzen dargestellt. Zusätzliche Abhängigkeiten von Parametern sind nicht abgebildet.<sup>144</sup>

<sup>143</sup> Hoffmann et al.: Scaling Relative Velocity, 1996 in Olson et al.: Driver Perception Response, 2003, S. 114

<sup>144</sup> s. Kapitel 5.1.1

Tabelle 6-1: Auswirkungen von Situationsparametern auf die Kontrollierbarkeitssituation

		Ursachen	Gefährdung		Reaktion	
					Fahrzeug	Fahrer
		Beispiele für Wahrnehmungsdifferenzen	befahrbarer Raum (statisch)	Objekte im Umfeld (dynamisch)	Kraftschlussmaximum	verzögerte Wahrnehmung
Situationsparameterkategorien	Helligkeit	unzureichende Beleuchtungreichweite				x
	Niederschlag	Sichtweite Fahrer/System unterschiedlich			x	x
	Verkehrsdichte	„Fahrende Gasse“ <sup>145</sup>		x		
	Straßenklasse		x			
	Blickabwendung					x

### 6.3 Detaillierung und Quantisierung der Situationsparameter

In Kapitel 4.1 wurden allgemeine Fahrsituationselemente zur Generierung von Kontrollierbarkeitssituationen definiert. Bevor eine Relevanzbewertung erfolgen kann, werden diese in Subklassen und Parameter bzw. Parameterkategorien detailliert. Dabei ist jeweils auch der Basisanteil zu bestimmen, und es muss berücksichtigt werden, in welchen Ebenen der Faktor Einfluss hat. So kann beispielsweise Regen sowohl zu einer Änderung der Sichtweite als auch zu einer Verringerung des Kraftschlussmaximums führen. Entsprechend ist dann für beide Fälle eine Diskretisierung der Einflüsse durchzuführen, welche aber auf denselben Parameterkategorien beruht. Ebenso werden für die jeweiligen identifizierten Parameter aus Literaturquellen Expositionswahrscheinlichkeiten abgeleitet.

<sup>145</sup> s. Maurer: Entwurf Test FAS, 2012, S. 48

### 6.3.1 Helligkeit

Der Begriff der Helligkeit ist nicht mit einer physikalisch messbaren Größe verknüpft. Für die physikalische Beschreibung der Lichtverhältnisse wird meist die Lichtstärke  $I$  mit der Einheit Candela (cd) herangezogen. Für die Wahrnehmung des menschlichen Auges ist dabei die wichtigste Bemessungsgröße die Leuchtdichte  $L$  mit der Einheit  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Allgemein wird mit absteigender Leuchtdichte zwischen den drei Sehbereichen skotopisch, mesopisch und photopisch differenziert. Selbst bei Fahrten in Dunkelheit liegen die Leuchtdichten durch künstliche Beleuchtung (Scheinwerfer, Straßenbeleuchtung) noch im mesopischen Bereich.<sup>146</sup> Daher werden für die Diskretisierung nur die Zustände photopisch und mesopisch unterschieden.

Bei Dunkelheit ist die Sichtweite niedriger. Sie ist für unbeleuchtete Objekte von der Reichweite des Abblendlichts abhängig und beträgt circa 60 – 120 m.<sup>147</sup>

Liegt der Initialabstand der jeweiligen Kontrollierbarkeitssituation innerhalb der Sichtweite, sind keine Auswirkungen auf die Wahrnehmung des Zielfahrzeugs zu erwarten, da die gleiche Anzahl an Merkmalen vom Fahrer wahrgenommen werden kann.

Für Kontrollierbarkeitsuntersuchungen sind zusätzlich insbesondere die verfügbaren Reaktionszeiten des Fahrers relevant. Verhält er sich regelkonform, müsste der Fahrer zudem bei verringerter Sichtweite die Geschwindigkeit verringern und dadurch die verfügbare Reaktionszeit konstant halten. Um für die mindestens abzubildenden Sichtweiten-Kategorien eine obere Abschätzung zu erhalten, wird die gesetzlich geforderte Mindestzeitlücke ( $\tau = 1,8 \text{ s}$ ), bezogen auf die Richtgeschwindigkeit ( $v_{\text{Richt}} = 130 \text{ km/h} \approx 36 \text{ m/s}$ ), verwendet. Er ergibt sich ein Mindestabstand von 65 m. Das Zielfahrzeug liegt dann also noch im Beleuchtungsbereich des Ego-Fahrzeugs. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten ist die Begrenzung der Sichtweite bei Nacht daher vernachlässigbar.

Hinsichtlich der Expositionswahrscheinlichkeit ergibt sich nach Jebas<sup>148</sup>, dass bei Dunkelheit nur 20 % der Fahrleistung erbracht werden.

Zusammenfassend ergibt sich für die Subklasse Umgebungshelligkeit die Diskretisierung und Expositionswahrscheinlichkeiten nach Tabelle 6-2.

---

<sup>146</sup> Eckert: Lichttechnik, 1993, S. 48

<sup>147</sup> Wördenweber et al.: Automotive Lighting, 2007, S. 99

<sup>148</sup> Jebas: Automobile Scheinwerfer, 2006 in Jebas: Beleuchtung Pkw, 2008, S. 1

Tabelle 6-2: Diskretisierung und Quantisierung der Subklasse Umgebungshelligkeit

Subklasse (K = 1)	Parameter	Definition			Exposition $\rho$	Bemerkung
		Allgemein	Leuchtdichte in cd/m <sup>2</sup>	Sichtweite in m		
Umgebungs- helligkeit	Hoch (q = 1)	photopisch (Tag)	$L > 3$	$\gg 120$	0,8	<b>Basisanteil</b>
	Niedrig (q = 2)	mesopisch (Nacht)	$0.001 \leq L \leq 3$	60 – 120	0,2	

### 6.3.2 Niederschlag

Meteorologische Unterscheidungsmerkmale für Niederschlag sind vielfältig. Der DWD unterscheidet beispielsweise zwischen zwölf Arten fallenden Niederschlags.<sup>149</sup> Nebel wird in drei verschiedene Arten unterteilt. Andere Quellen fassen die Niederschlagsarten unter Oberbegriffen zusammen und unterscheiden auf höchster Ebene nur zwischen Regen, Schnee und Hagel.<sup>150</sup>

Für die Kontrollierbarkeitsbewertung sind die Auswirkungen des Niederschlags auf das Kraftschlussmaximum und die Wahrnehmungsverzögerung durch Sichtbehinderungen und Verringerung der Sichtweiten relevant.

Das Kraftschlussmaximum wird zu großen Teilen durch das Zwischenmedium bedingt. Typische Streubreiten sind in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Kategorien des Kraftschlussmaximums<sup>151</sup>

Kraftschlussmaximum	Niedrig (Schnee und Eis)	$\mu_{max} = 0,1 - 0,2$
	Mittel (Nass)	$\mu_{max} = 0,7 - 0,9$
	Hoch	$\mu_{max} = 0,85 - 1,2$

Für die Auswahl von Kraftschlussmaxima sind entsprechend vereinfachend das Vorhandensein und der Aggregatzustand des Niederschlags ausreichend, Schnee und Hagel werden daher zusammengefasst.

Zur Beurteilung der Sichtbehinderung durch Niederschlag wird die Sichtweite herangezogen. Die Unterteilung nach Eckert<sup>152</sup> ist in Tabelle 6-4 dargestellt.

<sup>149</sup> Wetterlexikon: Niederschlag, 2013

<sup>150</sup> National Meteorological Library and Archive: Water in the Atmosphere, 2007, S. 4 ff

<sup>151</sup> in Anl. an Roth: Kraftübertragung Reifen Fahrbahn, 1993, S. 50

Tabelle 6-4: Kategorien für Sichtweite bei Nebel

Normsichtweite $S_N$	Bezeichnung
3250 – 2000 m	starker Dunst
2000 – 1000 m	sehr starker Dunst
1000 – 500 m	leichter Nebel
500 – 200 m	mäßig dichter Nebel
200 – 50 m	dichter Nebel
< 50 m	sehr dichter Nebel

Die Sichtweitenbeschränkung durch Niederschlag wird dabei von den Faktoren Streuung am Partikel als ungerichtete Ablenkung und Absorption als Schwächung des Lichts bedingt.<sup>153</sup> Dabei ist die Absorption bei Wasserpartikeln vernachlässigbar.<sup>154</sup> Die Streuung hängt maßgeblich von Tröpfchendurchmesser und -abstand ab.<sup>155</sup> Eine Betrachtung der Sichtweite bei Regen mit verschiedenen Regenarten führt Czerwinski durch.<sup>156</sup> Dort wird auch ein Berechnungsansatz für die Sichtweite in Abhängigkeit von der Tropfenanzahl vorgestellt. Die minimale Sichtweite liegt bei diesen Untersuchungen bei etwa 1 km. Die Sichtweite bei Regen wird daher auf  $\geq 200$  m<sup>157</sup> abgeschätzt.

Neben der Streuung des Lichts an den Regentropfen selbst, kann zudem zusätzlich eine Gischtbildung auftreten und dadurch eine Streuung an den dadurch entstehenden Tropfen. Die Intensität der Gischtbildung ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig.<sup>158</sup> Studien zu einer detaillierteren Definition von Sichtweiten bei Niederschlag mit Gischteinfluss konnten nicht gefunden werden.

Analog zur Beurteilung der Sichtweite für Nachtfahrten in Kapitel 6.3.1 sind, bezogen auf Tabelle 6-4, entsprechend nur die beiden Kategorien niedrigster Sichtweite für Kontrollierbarkeitsbewertungen relevant. Erst wenn der Niederschlag intensiv genug ist, um Sichtweiten unter 75 m zu erreichen, muss die resultierende Begrenzung der Sichtweite für Kontrollierbarkeitsuntersuchungen überhaupt berücksichtigt werden.

<sup>152</sup> Eckert: Lichttechnik, 1993, S. 141 dort in Anl. an DIN 5037

<sup>153</sup> Schlag et al.: Mehr Licht, 2009, S. 21

<sup>154</sup> Schlag et al.: Mehr Licht, 2009, S. 21

<sup>155</sup> Eckert: Lichttechnik, 1993, S. 140

<sup>156</sup> Czerwinski: Sichtweite Regen, 1971, S. 15 ff

<sup>157</sup> vgl. auch Ellinghaus: Wetter und Autofahren, 1983, S.57,

<sup>158</sup> vgl. Tromp: Splash Spray, 1985, S.9 ff

Um auch Sichtweitenbeschränkung durch Nebel betrachten zu können, wird dieser in der Subklasse Niederschlag als Parameter hinzugefügt. Der Basisanteil bezüglich der Subklasse Niederschlag wird als „kein Niederschlag“ integriert. Für die Abbildung potentiell besonders gefährlicher Mischformen von Niederschlagsereignissen, beispielsweise Schneeregen, wird zudem ein „Rest“ eingeführt, der mit einer Expositionswahrscheinlichkeit von  $\rho_{Rest} = 2\%$  angenommen wird.

Die Expositionshäufigkeiten werden aus statistischen Daten des DWD<sup>159</sup> anhand der Klimatologischen Kenntage<sup>160</sup> ermittelt.

In der Gruppe Regen sind in diesen statistischen Daten Regentage mit Regenmengen  $\geq 10$  mm ( $n_{\geq 10} = 24$  Tage) erfasst<sup>161</sup>, dabei handelt es sich um Tage mit größeren Regenmengen. Diese werden auf die Anzahl der Tage im Jahr  $n_{Jahr}$  bezogen. Die Expositionswahrscheinlichkeit ergibt sich damit nach Formel 6.4.

$$\rho_{Niederschlag} = \frac{n_{\geq 10}}{n_{Jahr}} = 0,066 \quad (6.4)$$

Da nur Niederschläge mit mehr als 10 mm berücksichtigt werden, ist dieser Wert sehr niedrig. Ellinghaus beispielsweise leitet aus statistischen Daten Werte von 15 – 20 %<sup>162</sup> ab.

Schnee (und Eisregen) in Form von Niederschlag ist in den Daten des DWD in der Niederschlagsmenge enthalten. Für die Ableitung von Glättebedingungen wird in Näherung die Anzahl der Frosttage ( $n_{Frost} = 113,8$  Tage) mit dem Anteil der Niederschlagstage multipliziert. Daraus ergibt sich eine Expositionswahrscheinlichkeit nach Formel 6.5.

$$\rho_{Schnee/Eis} = \rho_{Niederschlag} \cdot \frac{n_{Frost}}{n_{Jahr}} = 0,021 \quad (6.5)$$

Für die spätere Reibwertbetrachtung ist zu berücksichtigen, dass die tatsächliche Glättebildung nicht nur auf Schnee oder Eis bzw. Niederschlag (in den Bereichen  $> 10$ mm) zurückzuführen ist, sondern auch bspw. durch Taubildung an Frosttagen auftreten kann, zudem werden bei Glättegefahr häufig Streumittel eingesetzt, so dass diese Bedingungen nur für kurze Zeit eintreten oder nur sehr selten zustande kommen. Ellinghaus<sup>163</sup> ermittelt aus anderen Arbeiten eine Obergrenze für Glättebedingungen von  $\sim 10\%$ , die er jedoch als zu hoch einschätzt. Dies wird als konservativ (besonders im Vergleich zu

---

<sup>159</sup> Booß et al.: Klimastatusbericht, 2010, S. 18

<sup>160</sup> Wetterlexikon: Klimatologische Kenntage, 2013; s. Anhang A.1

<sup>161</sup> Wertetabellen hierzu im Anhang A.1

<sup>162</sup> Ellinghaus: Wetter und Autofahren, 1983, S.42

<sup>163</sup> Ellinghaus: Wetter und Autofahren, 1983, S. 72

Nässe) eingeschätzt. Der hier ermittelte Wert liegt deutlich darunter und deckt sich dabei eher mit beispielhaften Beschreibungen der ISO 26262 bei der Schnee und Eis der Klasse E2 ( $\rho \leq 1\%$ ) zugeordnet wird.<sup>164</sup> Insgesamt ist aufgrund fehlender Daten keine genauere Aussage zu treffen.

Die Expositionswahrscheinlichkeit für Regen kann aus der Differenz von  $\rho_{\text{Niederschlag}}$  und  $\rho_{\text{Schnee/Eis}}$  gemäß Formel 6.6 ermittelt werden.

$$\rho_{\text{Regen}} = \rho_{\text{Niederschlag}} - \rho_{\text{Schnee/Eis}} = 0,05 \quad (6.6)$$

Hinsichtlich Expositionswahrscheinlichkeit von Nebel basierend auf statistischen meteorologischen Daten wird eine Einschränkung vorgenommen. In der Meteorologie wird unter Nebel alles mit Sichtweite unter 1.000 m zusammengefasst.<sup>165</sup> Für den Straßenverkehr sind jedoch nur die Sichtweiten von  $\leq 200$  m und  $\leq 50$  m relevant.<sup>166</sup> Ellinghaus setzt als Expositionswahrscheinlichkeit für Nebel mit Sichtweiten unter 200 m mit 3 – 4 % an<sup>167</sup>. Die Expositionswahrscheinlichkeit von Nebel mit Sichtweiten unter 75 m wird entsprechend in konservativer Schätzung auf 2 % gesetzt. Für gute Sichtbedingungen kann die Sichtweite auf  $> 200$  m gesetzt werden.

Zusammenfassend ergeben sich die Diskretisierungen und Quantisierungen für die Subklasse Niederschlag nach Tabelle 6-5. Dabei wird der Basisanteil „kein Niederschlag“ aus der verbleibenden Wahrscheinlichkeit nach Formel 5.4 bestimmt.

Tabelle 6-5: Diskretisierung und Quantisierung der Subklasse Niederschlag

Subklasse ( $K = 2$ )	Parameter	Definition		Exposition $\rho$	Bemerkung
		$\mu_{max}$	Sichtweite		
Niederschlag	Kein ( $q = 1$ )	1	$> 200$ m	0,74	<b>Basisanteil</b>
	Regen ( $q = 2$ )	0,8	$> 200$ m	0,20	
	Schnee/Eis ( $q = 3$ )	0,15	$> 200$ m	0,03	
	Nebel ( $q = 4$ )	1	$< 75$ m	0,01	
	Rest ( $q = 5$ )	0,1	$< 75$ m	0,02	

<sup>164</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S.23

<sup>165</sup> Wetterlexikon: Nebeltag, 2013

<sup>166</sup> National Meteorological Library and Archive: Water in the Atmosphere, 2007, S. 10

<sup>167</sup> Ellinghaus: Wetter und Autofahren, 1983, S. 94

### 6.3.3 Verkehrsdichte

Ein Teil der Gefährdung durch oder von anderen Verkehrsteilnehmern entsteht erst ab einer bestimmten Verkehrsdichte. Dabei sind Längs- und Querrichtung zu unterscheiden. Untersuchungen zum Fahrerverhalten in Situationen mit verzögerndem Vorfahrer zeigen, dass nur ein geringer Teil der Fahrer ein Ausweichmanöver durchführt.<sup>168</sup> Daher wird die Möglichkeit des Querausweichens vernachlässigt.

In Längsrichtung hängt der Abstand zu Verkehrsobjekten vom durch den Fahrer eingestellten Abstand ( $d$ ) ab. Es ist nicht anzunehmen, dass sich die Fahrzeuge zueinander über einen Streckenabschnitt so verteilen, dass die Abstände gleichmäßig werden. Vielmehr ist eine Häufigkeitsverteilung der Abstände zu erwarten, die aufgrund von Randbedingungen variiert. Das Abstandsverhalten von Fahrern wird dabei häufig bezogen auf die gefahrene Geschwindigkeit ( $v$ ) betrachtet. Als Kennwert wird dabei die Zeitlücke  $\tau$  nach Formel 6.7 eingesetzt.

$$\tau = \frac{d}{v} \quad (6.7)$$

Fecher ermittelt beispielsweise in Feldversuchen real gefahrene durchschnittliche Zeitlücken von  $\tau = 0,7 - 2,5$  s.<sup>169</sup> Schmitt kommt unter ähnlichen Bedingungen auf  $\tau = 0,9 - 1,6$  s.<sup>170</sup> Der gesetzliche Mindestabstand ist in der StVO nicht explizit definiert.<sup>171</sup> Im Bundeseinheitlichen Tatbestandskatalog werden Abstandsverstöße auf den „halben Tachowert“<sup>172</sup> bezogen, dies entspricht einer Zeitlücke von  $\tau = 1,8$  s. Bei Abständen kleiner als  $\frac{1}{4}$  des Tachowertes erfolgt zusätzlich ein Eintrag ins Verkehrszentralregister (VZR).<sup>173</sup> Dies entspricht einer Zeitlücke von  $\tau \leq 0,9$  s.

Die basierend auf den Literaturquellen gewählte Diskretisierung und Quantisierung der Verkehrsdichte bzw. der Längsabstände ist in Tabelle 6-6 zusammengefasst.

---

<sup>168</sup> Wiacek et al.: Characteristics Rear-End, 1999, S. 2

<sup>169</sup> Fecher: Stationäres Folgeverhalten, 2005, S. 50 ff; Betrachtung je Proband auf einer Strecke mit BAB und Bundesstraße

<sup>170</sup> Schmitt et al.: Simulation Bremsverhalten, 2007, S. 84

<sup>171</sup> StVO, 2013, § 4

<sup>172</sup> KBA: Bundeseinheitlicher Tatbestandskatalog, 2013, S. 57

<sup>173</sup> KBA: Bundeseinheitlicher Tatbestandskatalog, 2013, S. 57

Tabelle 6-6: Diskretisierung und Quantisierung der Subklasse Verkehrsdichte

Subklasse ( $K = 3$ )	Parameter	Definition	Exposition	Bemerkung
		$\tau$ in s	$\rho$	
Längsabstand (Verkehrsdichte)	Niedrig ( $q = 1$ )	0,7 – 1,0	0,25	
	Mittel ( $q = 2$ )	1,0 – 1,8	0,5	<b>Basisanteil</b>
	Hoch ( $q = 3$ )	$\geq 1,8$	0,25	

Die Gefährdung der Situation wird zudem von der Verzögerungsstrategie des zu untersuchenden Notbremssystems bestimmt. Sie definiert, wie schnell die Situation kritisch wird und wie vorhersehbar die Entwicklung der Situation für den Fahrer ist. Die Verzögerungsstrategie wird durch die Auslegung des jeweiligen Systems bestimmt. Sie ist damit einerseits ein Parameter, der durch den Entwickler beeinflusst werden kann, andererseits darf ihr deswegen auch keine Häufigkeit zugewiesen werden.<sup>174</sup> Vielmehr muss sie bei der Definition der Situation als gegeben betrachtet werden. Daher wird die Verzögerungsstrategie erst bei der konkreten Anwendung im nachfolgenden Kapitel betrachtet.

### 6.3.4 Straßentyp

Fastenmeier unterscheidet zwischen den Straßentypen Autobahn, Landstraße und City/innerorts.<sup>175</sup> Der Straßentyp bedingt die Faktoren: Anzahl Fahrstreifen, Trennmaßnahmen der Richtungsfahrbahnen, Breite der Fahrstreifen und maximale Krümmung.

Die Anzahl und Breite der Fahrstreifen und die Trennungsmaßnahmen der Fahrbahnen bedingen den statisch befahrbaren Raum in Querrichtung. Für nicht situationsgerechte Auslösungen im Längsverkehr, unter Vernachlässigung einer Ausweichoption, ist der in Querrichtung vorhandene Raum aber nicht relevant. Eine Unterscheidung in Straßentypen ist entsprechend nicht notwendig. Die maximale Krümmung hat über die Querbeseleunigung Auswirkungen auf die Ausnutzung des Kraftschlussmaximums. Wie in Kapitel 6.1.2 ermittelt, ist der Einfluss auf das Längsverzögerungspotential unter normalen Fahrbedingungen gering.

<sup>174</sup> ISO 26262 - 3, 2009, S. 9

<sup>175</sup> Fastenmeier: Verkehrssituation Analyseseinheit, 1995, S. 49

### 6.3.5 Blickabwendung

Die Blickabwendung ist hinsichtlich der Dauer zu diskretisieren und zu quantisieren. Dabei werden sowohl manöverrelevante Blickabwendungen als auch Abwendungen aufgrund von Nebenaufgaben analysiert. Insofern die Blickrichtung in beiden Fällen ähnlich ist, wird erwartet, dass auch die Effekte auf die Reaktion des Fahrers ähnlich sind.

Manöverrelevante Blicke führt der Fahrer ständig durch, sowohl um Manöver vorzubereiten als auch um den Überblick über die Verkehrssituation zu erhalten. Blickabwendungen für Spiegelblicke und Radiobedienung dauern bspw. nach Bruckmayr und Reker etwa  $1 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$ <sup>176</sup>. Praxenthaler zeigt in seinen Untersuchungen, dass bei Vorbereitung eines Manövers die mittlere Blickdauer zu den Spiegeln zwischen 0,87 und 1,1 s schwankt.<sup>177</sup> Victor ermittelt für Spiegelblicke in für Baseline-Versuchen ohne Nebenaufgabe einen Blickanteil auf die vorausliegende Straße von ca. 80 %.<sup>178</sup>

Bei einfachen Fahraufgaben ohne Manövervorbereitung wird davon ausgegangen, dass Blickabwendungen von etwa  $t_{\text{Abwendung}} \leq 1 \text{ s}$  vom Fahrer grundsätzlich durchgeführt werden. Diese sind daher auch unter Versuchsbedingungen in entsprechender Frequenz zu erwarten. Dieses Blickführungsverhalten wird als normales Verhalten angesetzt und als Basisanteil verwendet.

Nebenaufgaben erhöhen den Anteil der Blickabwendung bzw. die Frequenz der Blickabwendung. Victor ermittelt beispielsweise einen Blickabwendungsanteil von der Fahrstreifenmittelachse von im Mittel 71 %.<sup>179</sup> Bei erhöhtem Blickbedarf werden zusätzliche Nebenaufgaben, die Blickabwendung erfordern, zurückgestellt.<sup>180</sup>

Weitere Studien aus Europa zeigen, dass die Dauer einzelner Blickabwendungen bei Nebenaufgaben zwar steigt, allerdings deutlich unter 2 s bleibt.<sup>181</sup> Studien aus den USA dagegen zeigen teilweise bei komplexen Nebenaufgaben höhere Ablenkungsdauern. Diese steigen auch über 2 s an<sup>182</sup>, insbesondere wenn die Gesamtdauer für die Bewältigung der Aufgabe hoch ist. Für die vorliegende Aufgabenstellung wird daraus geschlossen, dass zusätzlich eine komplexe Nebenaufgabe mit Blickabwendung als Situationsfaktor benötigt wird, die eine höhere Blickabwendungsdauer der Fahrer hervorruft.<sup>183</sup>

---

<sup>176</sup> Bruckmayr et al.: Informationstechniken Kfz, 1994 in Metz: Visuelle Nebenaufgaben, 2009, S. 20

<sup>177</sup> Praxenthaler: Sekundäraufgaben Fahrsituationen, 2003, S.78; Probandenversuche im statischen Fahrsimulator

<sup>178</sup> Victor: Keeping Eye and Mind on the Road, 2005, S.41

<sup>179</sup> Victor: Keeping Eye and Mind on the Road, 2005, S. 41

<sup>180</sup> Praxenthaler: Sekundäraufgaben Fahrsituationen, 2003, S. 129; Probandenversuche im statischen Fahrsimulator

<sup>181</sup> Zusammenstellung mehrerer Quellen in Metz: Visuelle Nebenaufgaben, 2009, S. 20

<sup>182</sup> Klauer et al.: Driver Inattention 100 Car Data, 2010, S. 55

<sup>183</sup> Klauer et al.: Driver Inattention 100 Car Data, 2010, S. 55

Für Deutschland liegen aktuell keine ausreichenden belastbaren statischen Daten vor.<sup>184</sup> An der Grenze zur noch manöverrelevanten Blickdauer, beispielsweise während des Fahrstreifenwechsels, wird hierfür eine Dauer von  $\geq 1,5$  s angesetzt.

Hinsichtlich der Expositionshäufigkeit von Ablenkung durch Nebenaufgaben im Realverkehr ist ebenfalls in Huemer und Vollrath<sup>185</sup> eine Zusammenstellung vorhandener Studien zu finden. Herangezogen werden Daten aus Studien mit Fahrerbeobachtung. Nach Stutts et al.<sup>186</sup> sind Fahrer in 16,1 % der Fahrzeit mit ablenkenden fahrfremden Tätigkeiten beschäftigt. Aus Sayer et al.<sup>187</sup> ergibt sich ein Anteil von etwa 18 % der Fahrzeit in der der Fahrer abgelenkt ist.

Auf Basis der beschriebenen Datenlage wird die Blickabwendung in die in Tabelle 6-7 dargestellten Kategorien aufgeteilt.

Tabelle 6-7: Diskretisierung und Quantisierung der Subklasse Blickabwendung

Subklasse (K = 4)	Parameter	Definition	Exposition	Bemerkung
		Blickdauer in s	$\rho$	
Blick- abwendung	Kurz (q = 1)	$\leq 1$	0,8	<b>Basisanteil;</b> Manöverrelevante Blicke, aber auch kurze Bedienvorgänge im Fahrzeug
	Lang (q = 2)	$\geq 1,5$	0,2	Durch externe Nebenaufgaben/ Ablenkung, Ausführung Fahrma- növer

<sup>184</sup> Huemer et al.: Ablenkung fahrfremde Tätigkeiten, 2012, S. 60

<sup>185</sup> Huemer et al.: Ablenkung fahrfremde Tätigkeiten, 2012, S. 35 ff

<sup>186</sup> Stutts et al.: Distractions, 2003, S. 42; aus Videobeobachtung der Fahrer, ohne Unterhaltungen mit Beifahrer

<sup>187</sup> Sayer et al.: Secondary Task Driver Performance, 2005, S. 16; ohne Unterhaltung mit Beifahrer

---

## 7 Prüfmethodik, Simulation und Versuch

Die entwickelte Methodik zur objektiven Kontrollierbarkeitsbewertung von nicht situationsgerechten Auslösungen wird am Anwendungsbeispiel von kollisionsvermeidenden/-lindernden Fahrerassistenzfunktionen auf die Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit geprüft. Dazu werden anhand der in Kapitel 6.3 ausgewählten und quantisierten Situationsparameter Testsituationen erzeugt. Eine Vorbewertung der Kontrollierbarkeit erfolgt durch Simulation. Anhand der Ergebnisse werden Situationskonstellationen ausgewählt, die eine besonders hohe Relevanzbewertung aufweisen und diese in realen Versuchen mit Probanden geprüft.

### 7.1 Auswahl der Verzögerungsstrategie des vorausfahrenden Fahrzeugs

Wie in Kapitel 4.1.3 diskutiert, bedingt die Verzögerungsstrategie des vorausfahrenden Fahrzeugs direkt die Gefährdung der Situation. Ebenso bedingt die Situationsentwicklung auch die Wahrnehmbarkeit der Kritikalität durch den Fahrer.<sup>188</sup> Um eine hohe Übertragbarkeit der hier durchgeführten Untersuchung zu erreichen, soll nicht nur eine spezifische Verzögerungsstrategie untersucht, sondern diese gezielt variiert werden.

In Serie verfügbare Systeme verfolgen unterschiedliche Strategien, um den Fahrer vor einer drohenden Kollision zu warnen und die Unfallfolgen zu lindern oder den Unfall zu vermeiden. Die Strategien unterscheiden sich in der Höhe der eingesetzten Verzögerung(en), welche teilweise auch in zeitlich folgenden Stufen eingesetzt werden.<sup>189</sup>

Die Bremsintensitäten beginnen bei ca. 30 – 40 % (ca. 3 – 4 m/s<sup>2</sup>) der maximalen Verzögerung bei schwachem Bremsengriff und steigern sich bei „Mitigation Braking“ bis auf etwa 6 m/s<sup>2</sup>.<sup>190</sup> Dadurch wird dem Fahrer noch die Möglichkeit gegeben, die Kollision durch Ausweichen zu verhindern. In der letzten Eskalationsstufe werden auch Vollverzögerungen mit 9 – 10 m/s<sup>2</sup> in Seriensystemen verwendet. Diese werden aber unter anderem auch vor dem Hintergrund nicht situationsgerechter Auslösungen nur

---

<sup>188</sup> vgl. Kapitel 6.1.3

<sup>189</sup> Bogenrieder et al.: Pre-Safe Rear-End, 2009, S. 3 und Maurer: Forward Collision Warning and Avoidance, 2012, S. 673

<sup>190</sup> Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 536 f

eingesetzt, wenn kurz vor der Kollision von einer hohen Eindeutigkeit der Situation ausgegangen werden kann.<sup>191</sup>

Verzögerungen des Vorausfahrenden von 3 – 4 m/s<sup>2</sup> werden anhand der Analogiebeurteilung in Kapitel 5.2 als allgemein kontrollierbar bewertet und nicht betrachtet.

Höhere Verzögerungen von 6 – 7 m/s<sup>2</sup> (Teilbremsung) und 9 – 10 m/s<sup>2</sup> (Vollbremsung) werden hinsichtlich ihrer Kontrollierbarkeit untersucht. Eine Betrachtung nur der größten Verzögerung mit der Schlussfolgerung, dass bei Nachweis der Kontrollierbarkeit in diesem Fall auch alle niedrigeren Verzögerungen kontrollierbar sind, ist vor dem Hintergrund der wahrnehmungsphysiologischen und -psychologischen Zusammenhänge nicht zwingend zulässig. Gerade bei Verzögerungen, die noch in der Nähe des Erfahrungsbereiches des Fahrers liegen, könnte die Situation nicht früh genug als kritisch oder bedrohlich erkannt werden.

Ähnliches kann bei den, in Seriensystemen häufig eingesetzten, gestuften Bremsstrategien vermutet werden. Aufgrund der schwachen Initialverzögerung mit darauffolgender Eskalation sind diese vom nachfolgenden Fahrer unter Umständen schwieriger zu erkennen beziehungsweise erfordern sie eine Nachreaktion. Erhöhte Anforderungen an den Fahrer werden dann erwartet, wenn die Bremsung im Komfortbereich des Fahrers beginnt ( $a_{x\ Ziel} \leq 4 \text{ m/s}^2$ ) und dann zu einer Vollverzögerung gesteigert wird.

Unter Berücksichtigung der von Winner als Richtwerte gegebenen Zeiten<sup>192</sup> werden auf Basis dieser Überlegungen die in Tabelle 7-1 dargestellten Bremsstrategien des Führungsfahrzeugs ausgewählt.

Tabelle 7-1: Verzögerungsstrategien des Führungsfahrzeugs

Bezeichnung	Verzögerung $D_{Ziel}$ in m/s <sup>2</sup>	Zeitliche Begrenzung
Teilbremsung	6.5	Keine → Bis Stillstand
Vollbremsung	9	Keine → Bis Stillstand
Gestufte Bremsung	3	Für 0,75 s
	9	Keine → Bis Stillstand

---

<sup>191</sup> Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 538 f

<sup>192</sup> Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 538

## 7.2 Simulation

Die Untersuchung von Folgefahrt-Bremssituationen erfolgt anhand eines Simulationsmodells, welches die Bewegungsgrößen der Fahrzeuge über analytische Zusammenhänge abbildet. Für die Kontrollierbarkeitsabschätzung wird ein Fahrermodell benötigt, welches anhand der entstehenden kritischen Situation Vorhersagen über Reaktionen ermöglicht. Auch wenn eine Vielzahl von Fahrermodellen bereits existiert, ist aktuell keines bekannt, welches komplexe zeitkritische sowohl sequentiell als auch parallel ablaufende Entscheidungsprozesse, wie sie bei unbekanntem, überraschenden Kontrollierbarkeitssituationen zu erwarten sind<sup>193</sup>, abbildet.

Für die allgemeine Betrachtung eines Bremsmanövers wird das Prozessmodell der Fahrerreaktion bei Bremsmanövern nach Burckhardt<sup>194</sup> nach Abbildung 7-1 herangezogen.

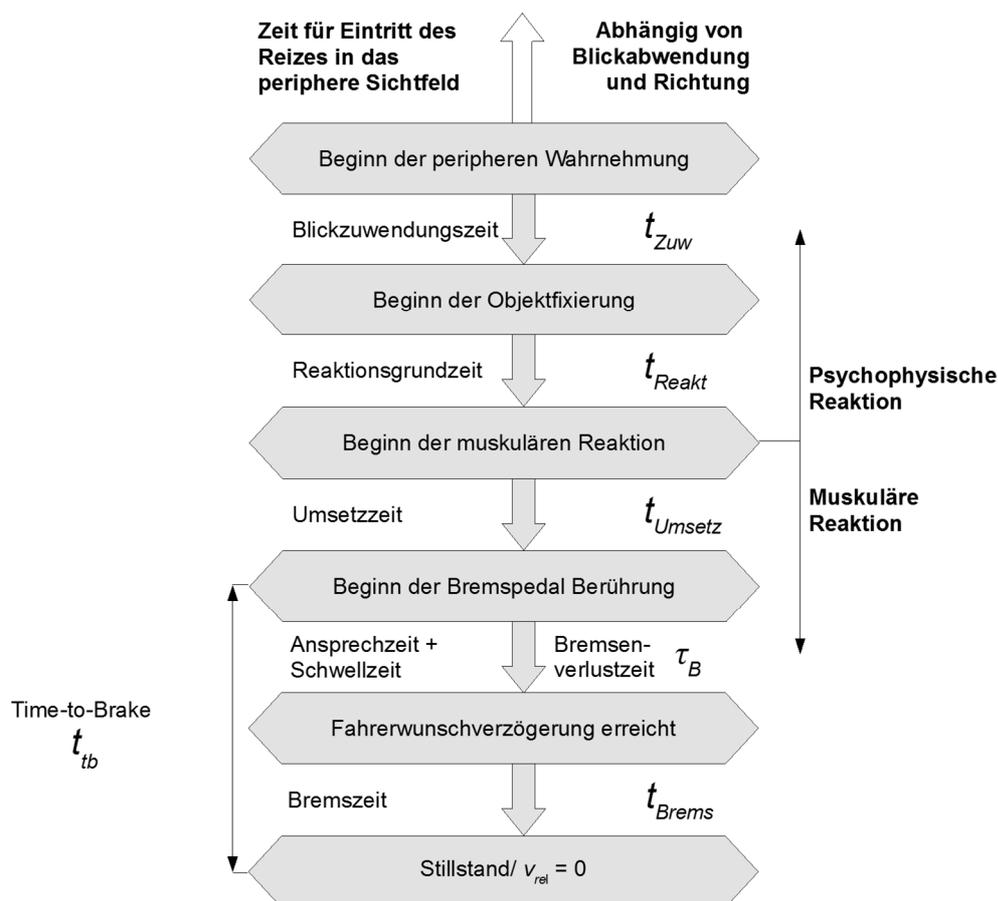


Abbildung 7-1: Prozessmodell einer Bremsreaktion<sup>195</sup>

<sup>193</sup> Olson et al.: Driver Perception Response, 2003, S. 321

<sup>194</sup> in Anl. an Burckhardt: Reaktionszeiten, 1985, S. 12

Für die vorliegende Aufgabenstellung ist sowohl die psychophysische Reaktion im Sinne einer Zeitspanne zwischen Beginn der Situation und Beginn des Bremsvorganges als auch die darauffolgende Bremsintensität bzw. deren Verlauf zu untersuchen.

Für den Bereich der psychophysischen Reaktion inklusive der Umsetzzeit existiert eine Vielzahl von Studien, die typische Werte ermitteln. Das nachfolgende Bremsmanöver erfordert nicht zwingend eine Vollverzögerung, sodass hier eine Regelungsaufgabe für den Fahrer entsteht. Dafür könnte ein regelungstechnisches Modell zu Fahrerverzögerungsstrategien, beispielsweise basierend auf der  $\dot{t}$ -Strategie<sup>196</sup>, an das Reaktionszeitmodell gekoppelt werden. Allerdings konnte nicht geklärt werden, inwiefern eine solche Verknüpfung von Teilmodellen gerade in zeitkritischen und unbekanntem Situationen zulässig ist. Daher müsste für die hier vorliegende Aufgabe die Validität eines gekoppelten Modells bei einer Vielzahl von Situationsparametern nachgewiesen werden. Dazu ist wiederum eine hohe Anzahl von Versuchen notwendig, deren Gestaltungsproblematik analog zur Kontrollierbarkeitsbewertung selbst ist. Hinzu kommt, dass mit der Komplexität von Modellen und Systemen auch der Informationsbedarf für die Parametrierung steigt. Ebenso steigen die potentiellen Unsicherheiten an.<sup>197</sup> Daher wird ein einfaches Bremsreaktionsmodell verwendet, welches in der Lage ist, die in anderen Studien ermittelten Reaktionszeiten darzustellen. Anhand dieser ersten Erkenntnisse werden dann Anforderungen an die Ausweitung von Fahrermodellen für zukünftige Untersuchungen abgeleitet.

Zu den Anteilen der Reaktionszeit realer Fahrer existieren bereits mehrere Studien auf Basis der von Burckhardt vorgeschlagenen Prozessabläufe. Dabei wurde die von Burckhardt ursprünglich vorgeschlagene Weibull-Verteilung verworfen und durch eine Gammaverteilung ersetzt.<sup>198</sup> Zusammenfassungen der Datenlage zu Bremsreaktionen finden sich bei Green<sup>199</sup> und Bäumler.<sup>200</sup> Weitere Einflussfaktoren auf die Bremsreaktionszeit von Fahrern mit der dazugehörigen Wirkrichtung stellt Kobiela zusammen.<sup>201</sup>

Da diese Versuche unter realen Bedingungen durchgeführt wurden, wird davon ausgegangen, dass diese Daten auch die Einflüsse „normaler“ bzw. leichter Blickabwendung bereits darstellen.

---

<sup>195</sup> in Anl. an Burckhardt: Reaktionszeiten, 1985, S. 12

<sup>196</sup> bspw. in Yilmaz et al.: Visual Control of Braking, 1995, S. 996

<sup>197</sup> vgl. Knetsch: Unsicherheiten, 2004, S. 31

<sup>198</sup> Hugemann: Driver Reaction Times, 2002, S.2 ff

<sup>199</sup> Green: Driver Perception Times, 2000, s.197 ff

<sup>200</sup> Bäumler: Reaktionszeiten, 2007/2008, S. 334 ff

<sup>201</sup> Kobiela: Fahrerintentionserkennung, 2011, S.55

Für die Untersuchung der Fahrerreaktionen wurden die in Tabelle 7-2 dargestellten Daten zur Parametrierung verwendet.

Tabelle 7-2: Reaktionszeitanteile

	<b>Grundreaktionszeit<sup>202</sup></b> <i>t<sub>Reakt</sub></i>	<b>Fußumsetzzeit<sup>203</sup></b> <i>t<sub>Umsetz</sub></i>	<b>Bremsenverlustzeit<sup>204</sup></b> <i>τ<sub>B</sub></i>
5 % Grenze	0,13 s	0,13 s	0,1 s
Median	0,41 s	0,18 s	
95 % Grenze	0,74 s	0,25 s	

In Anlehnung an die Vorgehensweise von Schmitt et al.<sup>205</sup> werden die Grenzen gemäß Tabelle 7-2 addiert und eine Approximation durch eine Gammaverteilung vorgenommen. Die Bremsenverlustzeit wird darin als festes Verzögerungsglied inkludiert.

Ausgehend von den Verteilungen werden vom Point-of-No-Return-Limit rückwärts die Reaktionszeitgrenzen ermittelt. Dabei werden neben der 50 %-Grenze in Anlehnung an die Kontrollierbarkeitsanteile nach ISO 26262 die 90 %- und 99 %-Grenzen betrachtet. Um die Wahrnehmbarkeit der Situation durch den Fahrer zu berücksichtigen, wird zusätzlich eine Erkennbarkeitsschwelle angesetzt, ab der der Fahrer mit 50 % Wahrscheinlichkeit in der Lage ist, die verbleibende Zeit bis zur Kollision ausreichend zu schätzen.<sup>206</sup> In Abbildung 7-2 ist die Reaktionswahrscheinlichkeit über dem Abstand mit den dazugehörigen Zeitanteilen, gemäß Tabelle 7-2, schematisch dargestellt. Die direkte Kopplung von Zeit- und Abstandsverlauf ist dabei nur für eine eindeutig definierte Situation möglich.

---

<sup>202</sup> Schmitt et al.: Simulation Bremsverhalten, 2007, S. 81 ff

<sup>203</sup> für Notbremsmanöver; Schmitt et al.: Simulation Bremsverhalten, 2007, S. 82

<sup>204</sup> Bäumler: Reaktionszeiten, 2007/2008, S. 306 und Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 529

<sup>205</sup> Schmitt et al.: Simulation Bremsverhalten, 2007, S. 81 ff

<sup>206</sup>s. Kapitel 6.1.3

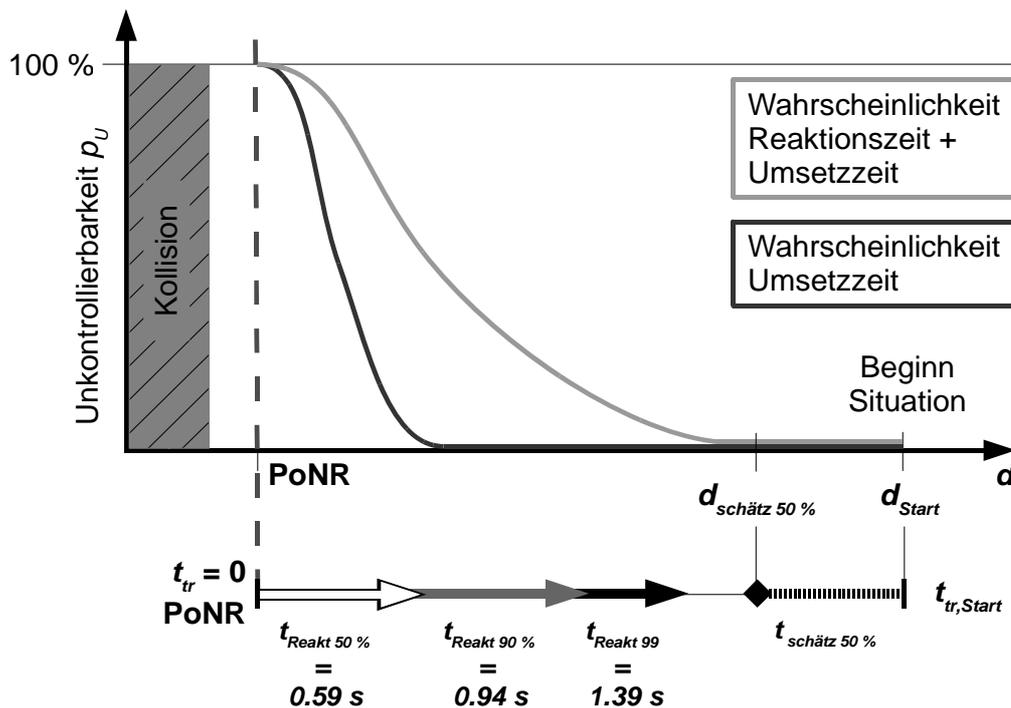


Abbildung 7-2: Schematische kumulative Verteilung der zeitbezogenen Reaktionswahrscheinlichkeiten über dem Abstand

Die allgemeine Gammaverteilungsfunktion der oberen Grenze<sup>207</sup> mit Zeitverzug  $t_0$  ist in Formel 7.1 dargestellt.

$$F(t) = \frac{\Gamma(a, b(t-t_0))}{\Gamma(a)} \quad (7.1)$$

Der Unkontrollierbarkeitsanteil  $v$  in der jeweiligen Situation ergibt sich anhand der verfügbaren Zeit vom Beginn der Situation bis zum Erreichen des PoNR-Limits, der Time-to-React ( $t_{tr}$ ) nach Formel 7.2.

$$v_{Sim} = F(t_{tr}) \quad (7.2)$$

Für die in Kapitel 6.3 festgelegten Situationsparameter werden basierend auf diesem Ansatz, anhand der Simulationsergebnisse die Unkontrollierbarkeitsanteile der geschätzt. Da für das eingesetzte Fahrerreaktionsmodell Schätzungenauigkeiten zu erwarten sind, wird dabei in konservativer Annahme der obere Unkontrollierbarkeitsanteil der jeweiligen Parameterausprägung nach Formel 7.3 bestimmt.

$$v_{K,q}(v_{Sim,K,q}) = \begin{cases} \left\lceil \frac{v_{Sim,K,q} \cdot 10}{10} \right\rceil, & v_{Sim,K,q} \geq 1\% \\ \left\lceil v_{Sim,K,q} \cdot 10 \right\rceil, & v_{Sim,K,q} < 1\% \end{cases} \quad (7.3)$$

<sup>207</sup> Müller: Wahrscheinlichkeitsrechnung, 1980, S. 83 f und Hugemann: Driver Reaction Times, 2002, S. 5

## 7.2.1 Simulationsergebnisse

Für die Simulationen muss eine Ausgangsgeschwindigkeit gewählt werden. Als Situationsparameter für den verfügbaren Raum in Längsrichtung wurde eine konstante Zeitlücke  $\tau$  ausgewählt. Mit steigender Geschwindigkeit vergrößert sich damit der Abstand. Für die Situation eines konstant mit  $D_{Ziel}$  verzögernden Zielfahrzeugs ergibt sich die resultierende Relativverzögerung, abhängig vom Kraftschlussmaximum bzw. der daraus resultierenden maximal möglichen Verzögerung ( $D_{max}$ ) gemäß Formel 7.4.

$$D_{max,rel} = D_{max} - D_{Ziel} \quad (7.4)$$

Der Abstand für rechtzeitiges Bremsen  $d_B$ , unter Berücksichtigung einer zeitlichen Verzögerungszeit der Bremsreaktion ( $\tau_{Verz}$ ), berechnet sich dann nach Formel 7.5.<sup>208</sup>

$$d_B(v_{rel}, D_{rel}) = \left( D_{rel} \frac{\tau_{Verz}}{2} - v_{rel} \right) \tau_{Verz} + \frac{(D_{rel} \tau_{Verz} - v_{rel})^2}{2D_{max,rel}} \quad (7.5)$$

Wobei bei konstanter Verzögerung aus einer stationären Folgefahrt  $v_{rel}$  nur von der Zeit seit Situationsbeginn abhängig ist. Bei gleichbleibender Verzögerungsstrategie des Zielfahrzeugs ist entsprechend  $d_B$  von der Ausgangsgeschwindigkeit unabhängig. Die zeitliche Verzögerungszeit  $\tau_{Verz}$  setzt sich zusammen aus der Bremsenverlustzeit  $\tau_B$  und der Gesamtreaktionszeit  $\tau_{Reakt, gesamt}$  (s. Formel 7.6).

$$\tau_{Verz} = \tau_B + \tau_{Reakt, gesamt} \quad (7.6)$$

Für die Ermittlung der verfügbaren Gesamtreaktionszeit in Abhängigkeit des Abstands wird  $d_B$  mit dem Ausgangsabstand der Situation  $d_{Start}$  gleichgesetzt und daraus  $\tau_{Verz}$  bestimmt.

Es ergibt sich die Abhängigkeit der verfügbaren Reaktionszeit vom Ausgangsabstand nach Formel 7.7.

$$\tau_{Verz} = \frac{v_{rel}}{D_{rel}} + \sqrt{\frac{v_{rel}^2}{D_{rel}^2} - \frac{v_{rel}^2 - 2D_{max}d_B}{(D_{max} + D_{rel})D_{rel}}} \quad (7.7)$$

Bei konstanter  $\tau_B$  vergrößert sich mit steigendem Abstand entsprechend die verfügbare Reaktionszeit. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten kommt das Zielfahrzeug aber nach kürzerer Verzögerungsdauer zum Stillstand. Dadurch verschiebt sich das PoNR-Limit auf den  $D_{max}$ -Wert (s. Kapitel 7.7) und es steht mehr Reaktionszeit zur Verfügung. Dadurch werden diese Situationen tendenziell kontrollierbarer. Ob es zu einem Stillstand kommt, ist jedoch vom Reaktionsverlauf des Fahrers abhängig. Auch bei höheren

<sup>208</sup> vgl. Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, S. 530

Geschwindigkeiten kann eine frühe schwache Reaktion des Fahrers zum Stillstand des Zielfahrzeuges führen.

Damit die Annahmen über das Folgeverhalten von Fahrern nach Kapitel 6.3.3 anwendbar sind, werden Situationen im Stadtverkehr nicht betrachtet. Als minimale Ausgangsgeschwindigkeit wird daher  $v_{Start} = 60$  km/h gewählt. Bei dieser Geschwindigkeit kommt das Zielfahrzeug jedoch im Basisfall bei der gestuften und bei der Vollverzögerung zum Stillstand, auch wenn kein Bremsmanöver des nachfolgenden Fahrzeugs erfolgt. Um die Auswirkungen auf die Kontrollierbarkeitsschätzung aufzuzeigen wird daher zusätzlich eine Startgeschwindigkeit  $v_{Start} = 80$  km/h betrachtet. In diesem Fall kommt das Zielfahrzeug bei keiner der Verzögerungsstrategien im Versuch zum Stehen.

In Tabelle 7-3 sind die in Kapitel 6.3 ausgewählten Umgebungsfaktoren zusammengefasst und in Tabelle 7-4 die dazugehörigen anhand der aus der Simulation für die Situationen ermittelten verfügbaren Reaktionszeiten und Formel 7.3 berechneten Relevanzfaktoren dargestellt. Die Ergebnisse der verbleibenden Reaktionszeiten und die detaillierten Bewertungen finden sich im Anhang A.3.

Tabelle 7-3: Subklassen und Parameter mit Indizes

Subklassen	Index $K$	Parameter	Index $q$
Niederschlag	2	kein	1
		Regen	2
		Schnee/Eis	3
		Nebel	4
		Rest	5
Längsabstand (Verkehrsdichte)	3	niedrig	1
		mittel	2
		hoch	3
Blickabwendung	4	kurz	1
		lang	2

Tabelle 7-4: Relevanzfaktoren für  $v_{Start} = 60$  km/h (Basisanteil grau hinterlegt)

$v_{Start} = 60$ km/h			Teilbremsung		Vollbremsung		Gestufte Bremsung	
$K$	$q$	$\rho$	$v$	$\rho \cdot v$	$v$	$\rho \cdot v$	$v$	$\rho \cdot v$
2	1	0,74	0,1	0,074	0,1	0,074	0,01	0,0074
	2	0,20	0,2	0,04	0,01	0,002	0,01	0,002
	3	0,03	0,01	0,0003	0,01	0,0003	0,01	0,0003
	4	0,01	0,1	0,001	0,1	0,001	0,01	0,0001
	5	0,02	0,9	0,018	0,018	0,9	0,018	0,9
3	1	0,25	0,1	0,025	1	0,25	0,2	0,05
	2	0,50	0,1	0,05	0,1	0,05	0,01	0,005
	3	0,25	0,1	0,0025	0,01	0,0025	0,01	0,0025
4	1	0,80	0,1	0,08	0,1	0,08	0,01	0,008
	2	0,20	0,5	0,1	0,4	0,08	0,1	0,02

Für die Teilbremsung sind beispielhaft die Vektoren für Niederschlag ( $K = 2$ ) bei Ausgangsgeschwindigkeit  $v_{Start} = 60$  km/h dargestellt. Der Expositionswahrscheinlichkeitsvektor  $\overline{W}_2$  ist in Formel 7.8 dargestellt.

$$\overline{W}_2 = \begin{pmatrix} \rho_{2,1}^B \\ \rho_{2,2} \\ \rho_{2,3} \\ \rho_{2,4} \\ \rho_{2,5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,74 \\ 0,2 \\ 0,03 \\ 0,01 \\ 0,02 \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

Der entsprechende Unkontrollierbarkeitsvektor  $\overline{U}_2$  wird durch Formel 7.9 beschrieben.

$$\overline{U}_2 = \begin{pmatrix} v_{2,1}^B \\ v_{2,2} \\ v_{2,3} \\ v_{2,4} \\ v_{2,5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1 \\ 0,2 \\ 0,01 \\ 0,1 \\ 0,9 \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

Daraus ergibt sich der Relevanzfaktor für Niederschlag bei Teilbremsung aus dem Skalarprodukt der Expositionswahrscheinlichkeit- und Unkontrollierbarkeitsvektoren nach Formel 7.10.

$$v_2 = \overline{W}_2 \cdot \overline{U}_2 = 0,133 \quad (7.10)$$

Durch die hohe geschätzte Unkontrollierbarkeit des „Restes“ ( $q = 5$ ), hat dieser nach dem Basisanteil ( $q = 1$ ) die höchste Relevanz.

Der Basisanteil hat erwartungsgemäß in vielen Situationen den höchsten Relevanzfaktor. Ausreißer sind bei geringen Abständen, bei starker Ablenkung und bei Annahme eines „Restes“ mit hoher Unkontrollierbarkeit zu finden. Wie beabsichtigt, zeigt der Relevanzfaktor Unterschiede innerhalb der Parameterkategorien auf. Der große Einfluss von starker Ablenkung und geringen Abständen wirkt trivial, allerdings zeigt dieses Ergebnis, dass eben gerade nicht in allen Fällen diese Faktoren auch die höchste Relevanz haben bzw. sie gleichwertig mit dem Basisanteil sind.

Die resultierenden Unkontrollierbarkeitsanteile der Subklassen anhand der Werte nach Tabelle 7-4 berechnet nach Formel 5.8, sind in Tabelle 7-5 dargestellt

Tabelle 7-5: Unkontrollierbarkeitsanteile der Subklassen aus Simulation  $v_{Start} = 60$  km/h

Subklassen	Index <i>K</i>	$v_{Sim}$ (gerundet)		
		Teilbremsung	Vollbremsung	Gestufte Bremsung
Niederschlag	2	0,133	0,095	0,028
Längsabstand (Verkehrsdichte)	3	0,077	0,303	0,058
Blickabwendung	4	0,180	0,160	0,028

Analog dazu ergeben sich die Unkontrollierbarkeitsanteile der Subklassen bei Ausgangsgeschwindigkeit  $v_{Start} = 80$  km/h aus Tabelle A-10<sup>209</sup> zu Tabelle 7-6.

Tabelle 7-6: Unkontrollierbarkeitsanteile der Subklassen aus Simulation  $v_{Start} = 80$  km/h

Subklassen	Index <i>K</i>	$v_{Sim}$ (gerundet)		
		Teilbremsung	Vollbremsung	Gestufte Bremsung
Niederschlag	2	0,046	0,395	0,173
Längsabstand (Verkehrsdichte)	3	0,033	0,478	0,103
Blickabwendung	4	0,108	0,6	0,28

Für den Fall der Teilbremsung, bei dem bereits bei  $v_{Start} = 60$  km/h das Zielobjekt zum Stillstand kommt, verringert sich der Unkontrollierbarkeitsanteil. Für die Gestufte und die Vollbremsung dagegen steigt er, weil das Zielfahrzeug bei  $v_{Start} = 80$  km/h nicht mehr zum Stillstand kommt.

<sup>209</sup> s. Anhang A.3.2

## 7.3 Prüfung der Abbruchkriterien

Gemäß den Überlegungen in Kapitel 5.1 kann anhand der Kontrollierbarkeitsschätzung ermittelt werden, für welche Umgebungsparameter eine weitergehende Detaillierung sinnvoll ist. Die Prüfung erfolgt anhand der Simulationsergebnisse nach Tabelle 7-4 gemäß Formel 5.9. In Tabelle 7-7 sind die Maximalwerte verzeichnet und die Situationsparameter markiert, für die eine Detaillierung nach dem Kriterium, bei einer Relevanzschwelle von  $RS = 10\%$ , erfolgen sollte.

Tabelle 7-7: Relevanzvergleich der Situationsparameter (Basisanteile grau hinterlegt)

<b>K</b>	<b>q</b>	<b>Teilbremsung</b>	<b>Vollbremsung</b>	<b>Gestufte Bremsung</b>
2	1	Max. Wert	Max. Wert	x
	2	x		
	3			
	4			
	5	x	x	Max. Wert
3	1	x	Max. Wert	Max. Wert
	2	Max. Wert	x	x
	3			
4	1	x	x	x
	2	Max. Wert	Max. Wert <sup>210</sup>	Max. Wert

Für die Teilbremsung kann demzufolge einer Detaillierung des Parameters „Regen“ ( $K = 2, q = 2$ ) einen relevanten Einfluss auf die Kontrollierbarkeitsschätzung haben. Für die Gestufte und die Vollbremsung ist dies nicht der Fall. Für diese beiden Verzögerungsstrategien ist nur die detailliertere Betrachtung des „Restes“ relevant.

Der Ansatz erfüllt damit die Anforderung, eine Priorisierung der Parameterbetrachtung anhand der Relevanz in Bezug auf das abzusichernde Kontrollierbarkeitsniveau zu ermöglichen. Keine Aussage wird dabei darüber getroffen, ob die Detaillierung des jeweiligen Faktors auch sachlich sinnvoll ist.

<sup>210</sup> nicht eindeutig, da beide Faktoren gleichwertig

## 7.4 Validierung der Kontrollierbarkeit

Um die in der Simulation getroffenen Annahmen zu prüfen und eine Verbindung zwischen der Risikoabschätzung der Produktkonzeptphase und der Validierung der Kontrollierbarkeit herzustellen, eignet sich als objektive Bewertungsmethode die Durchführung von Probandenversuchen.<sup>211</sup> Damit ergibt sich jedoch die Problematik, dass, wenn die getroffenen Annahmen zur Fahrerreaktion näherungsweise zutreffend sind, die Wahrscheinlichkeit, dass sich mit vertretbarem Versuchsaufwand die simulativ ermittelten Kontrollierbarkeitsanteile für den Basisanteil validieren lassen, gering ist. Da die ermittelten Schätzungen für viele der Situationsparameterausprägungen einen Unkontrollierbarkeitsanteil von  $v_{Sim} \leq 10\%$  aufweisen, ist zu erwarten, dass hierfür mindestens 29 Versuche pro Ausprägung notwendig sind. Selbst in diesem Fall ist die Erfolgswahrscheinlichkeit, dass der Nachweis mit der in der ISO 26262 beschriebenen Methode gelingt, gering.<sup>212</sup>

Unabhängig davon ist aber auch kein Testverfahren bekannt, welches die Kontrollierbarkeit in realen Fahrversuchen mit Probanden für die beschriebene Problematik objektiv abbildet. Dem Ansatz der vorliegenden Arbeit folgend, wird daher ein solches Verfahren entwickelt, um die notwendigen Schritte für eine objektive Kontrollierbarkeitsbewertung durch alle Produktentwicklungsphasen und die damit verbundenen Herausforderungen zu identifizieren und Lösungswege aufzuzeigen. Die Probandenversuche werden daher so ausgelegt, dass sie als Startpunkt für erweiternde Untersuchungen dienen. Erhebliche Abweichungen der Unkontrollierbarkeitsanteile gegenüber den Simulationsergebnissen können dabei bereits identifiziert werden. In den anderen Fällen kann analog zum Vorgehen nach Formel 4.1 zumindest eine untere Schranke der Kontrollierbarkeit bestimmt werden.

## 7.5 Untersuchungsziele

Für die Betrachtung im Versuch werden Untersuchungshypothesen definiert, die die beabsichtigten Erkenntnisse falsifizierbar beschreiben.

Unklar ist, ob die Teilbremsung deutlich oberhalb der den Fahrern aus alltäglichen Situationen bekannten Komfortverzögerungen oder auch eine gestufte Verzögerung, gleiche Reaktionszeiten der Fahrer hervorruft wie eine Vollbremsung des Vorausfahrenden. Ebenso ist zu prüfen, ob die resultierenden Reaktionszeiten jeweils durch das

---

<sup>211</sup> vgl. Kapitel 4.4

<sup>212</sup> vgl. Kapitel 4.4

Fahrermodell abgebildet werden. Daher wird untersucht, ob die Versuchsreihen jeweils eine unabhängige Stichprobe des Fahrermodells sind. Ebenso wird analysiert, ob die Versuchsreihen unterschiedlich zueinander sind und in eine Rangfolge gebracht werden können.

Neben der Reaktionszeit ist die Reaktionsintensität entscheidend für die Kontrollierbarkeit der Situation. Die Reaktionsintensität bestimmt die maximale Verzögerung des Ego-Fahrzeugs im Versuch. Daher werden die maximal erreichten Verzögerungen stellvertretend für die Reaktionsintensitäten der Fahrer in den Versuchsreihen auf Unterschiedlichkeit geprüft.

Ebenso soll die Umsetzung von Kontrollierbarkeitsbewertungen im realen Probandenversuchen dargestellt und dessen Anwendbarkeit gezeigt werden. Anhand der Versuche wird eine Auswertung durchgeführt und die damit nachweisbare untere Grenze der Kontrollierbarkeit ermittelt. Erkenntnisse und Erfahrungen werden dokumentiert, um Anforderungen für vertiefende Untersuchungen zu definieren.

Neben der objektiven Kontrollierbarkeit einer Situation wird zusätzlich die subjektive Wahrnehmung der Kontrollierbarkeit durch den Fahrer erfasst und diese im Vergleich mit den objektiven Kennwerten diskutiert.

## 7.6 Auswahl von Test-Fällen für den Probandenversuch

In der Simulation wurden die Randbedingungen variiert, um eine Kontrollierbarkeitschätzung durchzuführen und die Anwendbarkeit des Verfahrens zu demonstrieren. Sollen alle Varianten zueinander geprüft werden, ergeben sich 30 Testsituationen mit jeweils drei Verzögerungsstrategien und mit mindestens 20 Probanden bzw. 29 Probanden. Entsprechend müssten 180 bzw. 270 gültige Probandenversuche durchgeführt werden. Aus Aufwandsgründen ist daher eine nachvollziehbare Auswahl von Situationen für Probandenversuche vorzunehmen.

Als besonders relevant wurden geringen Abstände mit  $\tau = 0,7$  s identifiziert. In Vorversuchen konnten unvoreingenommene Probanden in einem unbekanntem Fahrzeug innerhalb einer vertretbaren Eingewöhnungszeit nicht dazu motiviert werden, die entsprechenden Abstände einzuhalten. Daher kann diese Bedingung im Rahmen der Probandenversuche nicht dargestellt werden.

Wie in der Simulation ermittelt, ist die Wahl der Geschwindigkeit entscheidend für die verfügbare Reaktionszeit. Insbesondere niedrigere Geschwindigkeiten sind als kritisch zu bewerten, wobei dies nach unten dadurch begrenzt wird, dass das Zielfahrzeug zum Stillstand kommt und sich die Reaktionszeit wieder verlängert. Bedingt durch die Länge

der verfügbaren Versuchsstrecke und der Fähigkeit der Probanden innerhalb dieser Strecke eine Folgefahrt mit konstanter Zeitlücke zu erreichen, wird eine Ausgangsgeschwindigkeit von  $v_{Start} = 60$  km/h gewählt.

Um eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wurden drei unterschiedliche Verzögerungsstrategien ausgewählt. Diese werden mit der Situation mit dem höchsten Relevanzfaktor in allen drei Fällen, dem Basisanteil, kombiniert.

Für den Nachweis der Anwendbarkeit der Methode werden nach Identifikation der Kontrollierbarkeit im Basisanteil gezielt Situationsparameter verändert, die erwartungsgemäß zu einer Verschlechterung der Kontrollierbarkeit führen. Dafür wird hier eine Stichprobe bei starker Ablenkung herangezogen. Als Versuch mit der größten erwarteten Kontrollierbarkeitsänderung wird dabei die Teilbremsung bei 60 km/h betrachtet.

Zusammenfassend ergeben sich die in Tabelle 7-8 dargestellten vier Versuchsreihen.

Tabelle 7-8: Zusammenfassung der Versuchsreihen

Bezeichnung	Verzögerungsstrategie	Ablenkung
VR 1	Teilbremsung	keine
VR 2	Vollbremsung	keine
VR 3	Gestufte Bremsung	keine
VR 4	Teilbremsung	Nebenaufgabe

## 7.7 Kontrollierbarkeitskriterien

Für die Relevanzbewertung wird außer der Einteilung in Situationsparameter auch ein Bewertungskriterium für die Kontrollierbarkeit benötigt. Gemäß dem Code of Practice ist hierfür ein binäres Kriterium heranzuziehen.<sup>213</sup> Für detailliertere Betrachtungen der Versuche, wird basierend darauf ein erweitertes Kriterium für die Untersuchung von Kontrollierbarkeit entwickelt.

In Kapitel 4.1 ist dargestellt, dass Kontrollierbarkeit einer Situation nur innerhalb eines bestimmten Bereiches überhaupt beobachtbar ist. Die untere Grenze dieses Bereiches wird dabei aus dem minimal zur Bewältigung der Situation notwendigen Abstand bzw. der dazugehörigen Zeit gebildet. Die minimale Reaktionsdistanz, der „Point-of-No-Return“, wird durch die Relativbeschleunigung der Kollisionsobjekte bestimmt und ist durch das Kraftschlussmaximum bzw. die daraus resultierenden maximalen Beschleunigungen limitiert. Bei zeitbasierter Betrachtung potentieller Unfallsituationen wird dieser

<sup>213</sup> PReVENT: Code of Practice, 2009, S. A50

minimale Abstand durch die Time-to-React (Abkürzung TTR mit der Variablen  $t_{tr}$ ) beschrieben.<sup>214</sup>

Für die hier untersuchten längsdynamischen Situationen greift der Fahrer über die Betätigung des Bremspedals in die kritische Situation ein. Dadurch wird eine Verzögerung des Fahrzeugs hervorgerufen und die Relativbeschleunigung zwischen den Fahrzeugen geändert.

### 7.7.1 Abstandsbasierte Betrachtungen

Bei abstandsbasierter Betrachtung und unter Vernachlässigung der Bremsschwellzeit ist der Point-of-No-Return nur von den Bewegungsgrößen zu Beginn der kritischen Situation  $D_{rel, Start}$  und  $v_{rel, Start}$ , der Verzögerung des Vorausfahrenden ( $D_{Ziel}$ ), sowie dem Kraftschlussmaximum bzw. der daraus resultierenden maximal möglichen Verzögerung ( $D_{max}$ ) abhängig.

Die maximale Relativverzögerung errechnet sich daraus nach Formel 7.11.

$$D_{max,rel} = D_{max} - D_{Ziel} \quad (7.11)$$

Für ein konstant verzögerndes vorausfahrendes Fahrzeug ergibt sich die Point-of-No-Return Schwelle nach Formel 7.12.<sup>215</sup>

$$d_{PoNR}(v_{rel}, D_{max,rel}) = \frac{v_{rel}^2}{2D_{max,rel}} \quad (7.12)$$

Wird die quadrierte Relativgeschwindigkeit über dem Abstand aufgetragen, ergeben sich lineare Zusammenhänge. Das Point-of-No-Return-Limit nach Formel 7.12 bildet darin eine Gerade aus dem Ursprung. Abbildung 7-3 zeigt einen solchen Graphen mit einer Eingriffsreaktion des Fahrers.

---

<sup>214</sup> für eine detaillierte Diskussion s. Hillenbrand: Fahrerassistenz Kollisionsvermeidung, 2008, S.112

<sup>215</sup> vgl. Winner, Frontalkollisionsschutzsysteme, S. 530

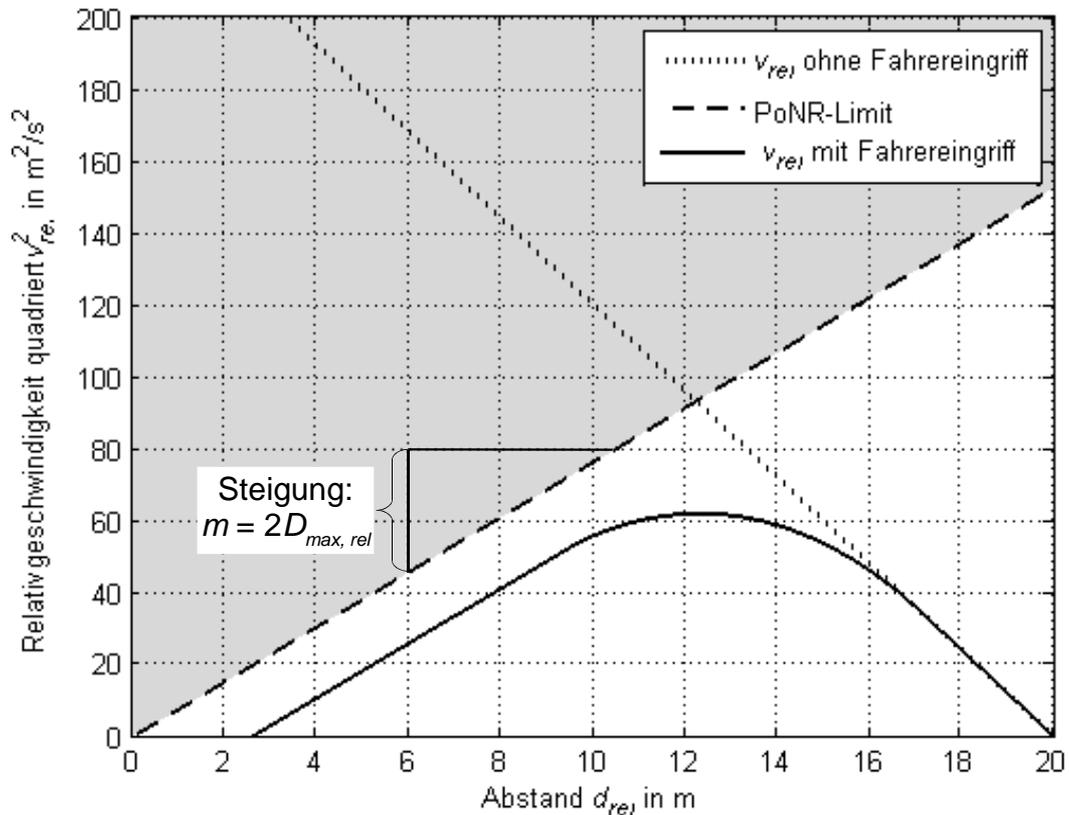


Abbildung 7-3: Point-of-No-Return Diagramm mit und ohne Fahrereingriff

Anhand des resultierenden Graphs kann die Kontrollierbarkeit einer Situation direkt abgelesen werden. Schneidet der Geschwindigkeitsverlauf das PoNR-Limit nicht, ist die Situation kontrollierbar. In Abbildung 7-3 ist der unkontrollierbare Bereich grau gekennzeichnet. Wird angenommen, dass der Fahrer den Bremsdruck nicht verringert, solange die Situation kritisch bleibt, kann der Situationsverlauf auch ab dem Zeitpunkt extrapoliert werden, ab dem der Fahrer eine konstante Verzögerung erreicht hat. In Abbildung 7-3 ist das beispielsweise bei einem Abstand von  $d_{rel} \approx 9$  m der Fall.

Änderungen im PoNR-Limit sowie im Relativgeschwindigkeitsverlauf ergeben sich, wenn das Zielfahrzeug während der Situation zum Stillstand kommt. Die maximale Relativbeschleunigung steigt dann auf  $D_{max}$ . Im PoNR-Diagramm kann dies nicht direkt dargestellt werden, da es sich um eine absolute Größe handelt, die von der Ausgangsgeschwindigkeit und der Dauer der Situation bis zum Erreichen von  $d_{rel} = 0$  und damit von der Fahrerreaktion abhängt. Daher muss für jeden Versuch geprüft werden, ob das Zielfahrzeug zum Stehen kommt. Notwendige, aber nicht hinreichende, Bedingung dafür ist, dass der Schnittpunkt der  $v_{rel}$ -Gerade ohne Fahrereingriff mit der y-Achse des PoNR-Diagramms oberhalb der quadrierten Ausgangsgeschwindigkeit des Versuchs  $v_{Start}^2$  liegt.

Ähnlich Effekte ergeben sich, wenn die Verzögerung des Zielfahrzeuges beispielsweise aufgrund einer Begrenzung des Arbeitsbereiches nach einer bestimmten Zeitspanne

deaktiviert wird<sup>216</sup> (vgl. Kapitel 2.7). Abbildung 7-4 zeigt die Auswirkungen von Stillstand und Abschaltung ohne Fahrereingriff im nachfolgenden Fahrzeug.

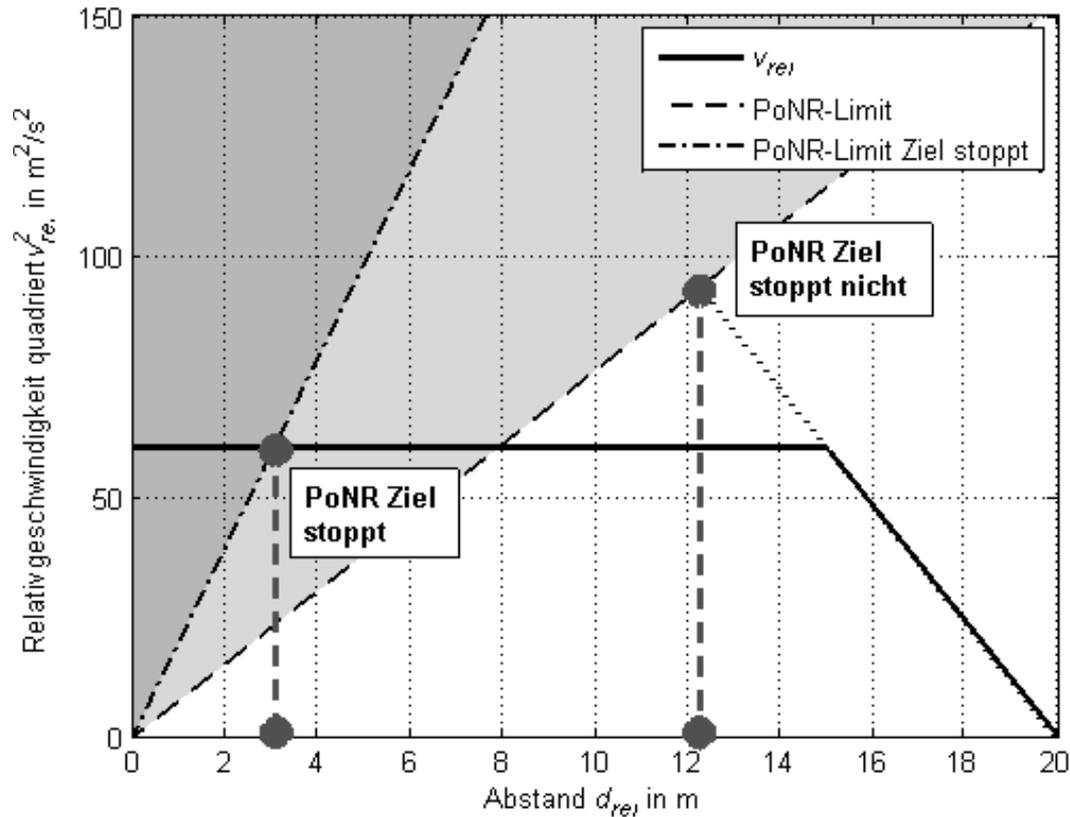


Abbildung 7-4: Auswirkungen von Stillstand des Targets auf den PoNR

Die relative abstands-basierte Betrachtung ergibt für konstant verzögerte Zielfahrzeuge in Situationen, bei denen das Zielfahrzeug nicht zum Stillstand kommt, lineare Zusammenhänge, an denen die Fahrerreaktion keine Änderung verursacht. Dadurch ermöglicht sie die vergleichende Betrachtung von Geschwindigkeitsverläufen und, bei Erreichen einer konstanten Verzögerung, eine Prädiktion. Vergleichbare Fahrer-Reaktionen vorausgesetzt, können damit auch nachträglich Situationsparameter wie Ausgangsgeschwindigkeiten, Änderungen des Kraftschlussmaximums oder die Auswirkungen einer Abschaltung analysiert werden.

Kommt das Zielfahrzeug zum Stillstand, kann die Situation bezogen auf die absoluten Größen analysiert werden. Dann ergibt sich eine Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit, der Relativgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und dem absolut zurückgelegten Weg, sodass keine Rückwärtsbetrachtung mehr möglich ist. Der Weg bis zum Stillstand des Zielfahrzeugs ergibt sich aus Formel 7.12 durch Einsetzen der Zielfahrzeugverzögerung ( $D_{Ziel}$ ) und der Startgeschwindigkeit  $v_{Start}$  zu Formel 7.13.

<sup>216</sup> s. Kapitel 2.7

$$d_{Ziel\ stoppt} = \frac{v_{Start}^2}{2D_{Ziel}} \quad (7.13)$$

In beiden Fällen kann der minimal erreichte Abstand als zusätzlicher Indikator für die Kontrollierbarkeit herangezogen werden. Zu erwarten ist, dass die Probanden eine Zielbremsung ausführen, die in einem Rest-Sicherheitsabstand mündet. Die Schlussfolgerung, dass mit steigenden ermittelten minimalen Abständen zum PoNR-Limit auch die Kontrollierbarkeit zunimmt, ist daher nicht zulässig.

## 7.7.2 Zeitbasierte Betrachtungen

Die Fahrerreaktionen können als eine Verknüpfung aus auslösenden Wahrnehmungen, im vorliegenden Fall die Abstandsänderungsrate und darauf folgenden zeitbasierten Verzögerungsgliedern bis zur Handlungsausführung, beispielsweise dem Betätigen des Bremspedals, betrachtet werden. Für Analysen der Fahrerreaktion werden daher oft zeitbasierte Kriterien, wie beispielsweise die TTR herangezogen. Anhand der bekannten Verzögerungsglieder, wie bspw. Umsetzzeit, Grundreaktionszeit usw. kann basierend darauf identifiziert werden, ob eine rechtzeitige Fahrerreaktion überhaupt noch möglich ist.

Für festgelegte Verzögerungszeiten der Reaktion ( $t_{Reakt}$ ) bestimmen sich diese indem Formel 7.12 zur Bestimmung des PoNR-Limit um den bis zur Reaktion zurückgelegten Weg ergänzt wird (s. Formel 7.14).

$$d_{TTR\ Grenze}(v_{rel}, D_{max,rel}) = \frac{v_{rel}^2}{2D_{max,rel}} + v_{rel}t_{Reakt} \quad (7.14)$$

Basierend auf aus der Literatur bekannten minimalen Reaktionszeiten von Fahrern<sup>217</sup> und abhängig vom in späteren Situationen beobachtbaren Fahrerverhalten können weitere Grenzen bestimmt werden:

- Gesamtreaktionsgrenze: Spätestens bei diesem Abstand muss der Fahrer eine Reaktion begonnen haben ( $t_{tr} = 0$ ). Basiert auf der minimalen Gesamtreaktionszeit.
- Fußumsetzgrenze: Spätestens bei diesem Abstand muss der Fahrer den Fuß auf dem Bremspedal haben.
- Schwellzeitgrenze: Spätestens bei diesem Abstand muss der Fahrer den benötigten Bremsdruck aufgebaut haben.

---

<sup>217</sup> s. auch Kapitel 7.2

## 7.8 Probandenversuche

Für die Auswertung wurden Daten aus mehreren Studien herangezogen. Bei der Prüfung der Versuchsdaten wurden Widersprüchlichkeiten in den Abstandsmessungen einzelner Versuche festgestellt. Daher konnten diese Versuche nicht für die Bestimmung des minimalen Abstands verwendet werden, und die Kollektivgrößen unterscheiden sich bei den unterschiedlichen Auswertungen.

### 7.8.1 Probandenkollektiv

Die Auswahl des Probandenkollektivs sollte den „Normalfahrer“ hinreichend abbilden. Wie in Kapitel 6.1.3 dargestellt, existieren eine Vielzahl von Fahrereigenschaften, von denen die mittel- und langfristigen Faktoren als durchschnittlich zum späteren Fahrerkollektiv abgebildet werden müssen. Nach Fastenmeier<sup>218</sup> kann die Vielzahl von Einzeleinflüssen so vereinfacht werden, dass nur das Alter des Probanden und die Fahrpraxis Einfluss haben. Vereinfachend wird von einer Korrelation des Alters mit der Fahrpraxis ausgegangen. Zusätzlich wird eine Gleichverteilung des Geschlechts der Probanden angestrebt.

In Summe wurden 96 gültige Probandenversuche aus drei Studien herangezogen und dabei 4 Versuchsreihen durchgeführt. Die Alters- und Geschlechtsverteilung des gültigen Probandenkollektivs ist in Abbildung 7-5 dargestellt.

---

<sup>218</sup> Fastenmeier: Situationsspezifisches Fahrerverhalten, 1995, S. 146

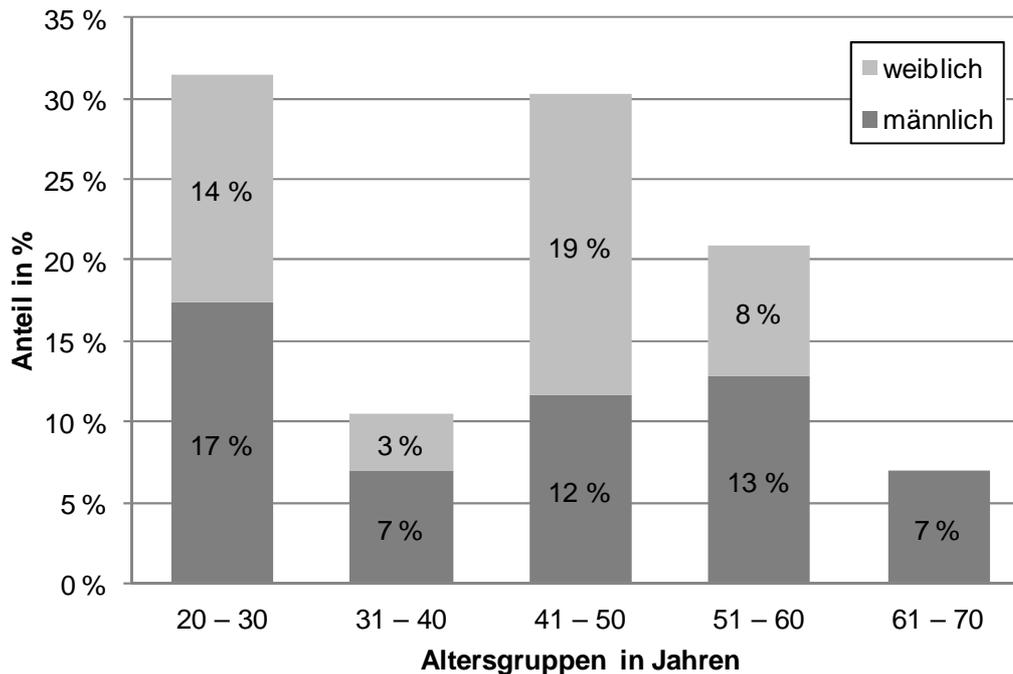


Abbildung 7-5: Alters- und Geschlechterverteilung im Probandenkollektiv

Eine gleichmäßige Verteilung über die Altersgruppen konnte nicht vollständig erreicht werden, unterrepräsentiert sind die Altersgruppe von 31 bis 40 Jahren und die Fahrerinnen in der Altersgruppe von 61 bis 70 Jahren.

## 7.8.2 Versuchswerkzeug

Für die Beobachtung einer realistischen Fahrerreaktion muss eine für die Fahrer realistisch und bedrohlich erscheinende Auffahrsituation erzeugt werden. Die Situationsentwicklung muss für die Probanden unerwartet sein und es darf keine reale Gefährdung entstehen. Eine deswegen häufig genutzte Methode sind Untersuchungen in dynamischen oder statischen Fahr simulatoren.<sup>219</sup> Die Übertragbarkeit von Reaktionsuntersuchungen aus Fahr simulatoren, insbesondere in Kollisionssituationen, für die eine Schätzung der Relativgeschwindigkeitsentwicklung notwendig ist, wird dabei teilweise angezweifelt.<sup>220</sup>

In realen Testumgebungen werden solche Unfallsituationen häufig durch deformierbare Zielobjekte dargestellt, die kollisionstolerant sind.<sup>221</sup> Diese unterliegen aber ebenso meist Beschränkungen hinsichtlich der realistischen Darstellung eines Pkws. Da für das vorliegende Kontrollierbarkeitskriterium die Betrachtung bis zum Erreichen eines kon-

<sup>219</sup> Fach et al.: Bewertung Beherrschbarkeit, 2010, S. 428

<sup>220</sup> Green: Driver Perception Times, 2000, S. 202 und Kiefer et al.: Surprise Braking Trials, 2005, S. 33

<sup>221</sup> bspw. Bertrand: b.rabbit, 2008; Nitz: Aktive Bremsung Gefahrensituationen, 2010, S. 97

stanten Verzögerungszustandes bzw. bis zum letztmöglichen Eingriffszeitpunkt ausreicht, ist das Darstellen einer tatsächlichen Kollision nicht notwendig, solange die vorliegende Situation bis zu diesem Punkt die gleiche Gefährdungsentwicklung für den Probanden abbildet.

Ein geeignetes Werkzeug für die Darstellung solcher hoch realistischer Auffahrunfallszenarien in Probandenversuchen ist das „Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach“, kurz EVITA.<sup>222</sup> Es besteht aus einem Anhänger mit einem realistischen Fahrzeugheck, der über eine Seilwinde an ein Zugfahrzeug gekoppelt ist. Aus einer Folgefahrtsituation heraus kann der Anhänger abgebremst werden, sodass das Seil sich abwickelt. Der Anhänger erkennt über einen Radarsensor selbsttätig eine drohende Kollision mit dem nachfolgenden Fahrzeug und schließt dann die Seilwindenbremse, sodass der Anhänger auf die Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt wird. Abbildung 7-6 zeigt den schematischen Ablauf eines EVITA Versuchs.

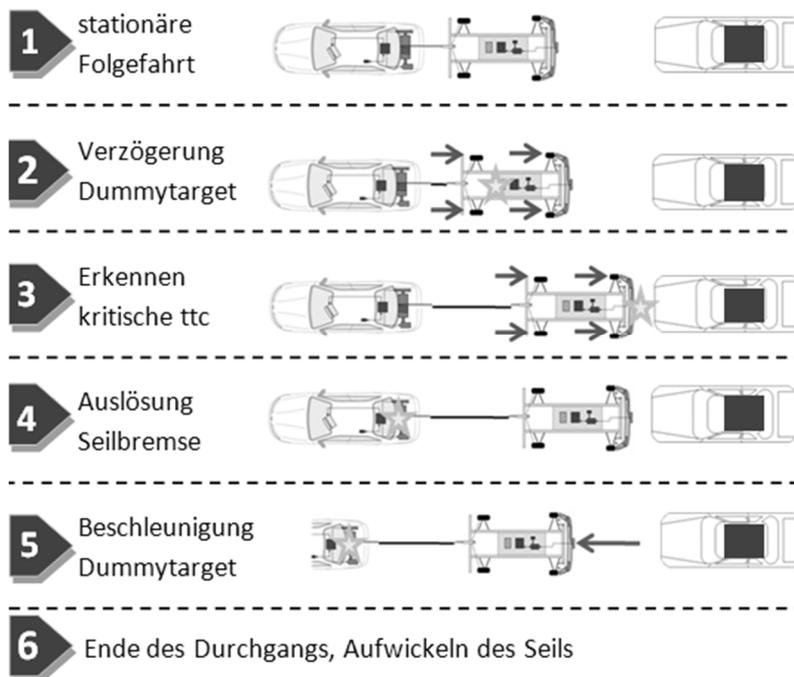


Abbildung 7-6: Schematischer Ablauf EVITA Auslösung<sup>223</sup>

Die minimal erreichbare Time-to-Collision (TTC) liegt dabei bei etwa 0,8 s. Die Verzögerungsstrategien können in der Bremssteuerung des EVITA Anhängers hinterlegt und vom Fahrer des Zugfahrzeugs bei Erreichen der Ausgangsbedingungen für den Probanden überraschend ausgelöst werden.

<sup>222</sup> weitere Details in Hoffmann: Darmstädter Verfahren, 2008, S. 21 ff

<sup>223</sup> Abbildung aus internen Unterlagen. Autor konnte nicht zurückverfolgt werden.

### 7.8.3 Versuchsträger

Für die Untersuchung der Fahrerreaktion werden als Ego-Fahrzeug drei verschiedene Pkw eingesetzt, die jeweils mit gleichartiger Messtechnik ausgestattet sind. Exemplarisch wird hier ein für Vergleichsmessungen eingesetzter Honda Accord, Baujahr 2003, beschrieben.

Die Abstands- und Relativgeschwindigkeitsdaten werden mittels eines Radarsensors an der Front des Fahrzeugs gemessen. Weitere Fahrzeuggrößen wie beispielsweise Bremsdruck oder Fahrzeuggeschwindigkeit werden über eine CAN-Schnittstelle ermittelt. Zur Beobachtung der Fahrerreaktion und zur Kontrolle der vorliegenden Situation sind drei Kameras im Fahrzeug verbaut, die das Fahrgesicht, das Fahrzeugvorfeld und den Fahrerfußraum aufzeichnen. Sowohl CAN als auch Kameradaten werden über einen Mess-PC im Kofferraum erfasst.

Die Ansteuerung erfolgt über eine Bedienschnittstelle auf der Rückbank des Fahrzeugs. Dort werden die relevanten Versuchsdaten sowie die Kamerabilder zusammengeführt, sodass der Versuchsleiter bereits während der Versuchsdurchführung Ausfälle und Unregelmäßigkeiten erkennen kann. Abbildung 7-7 zeigt eine solche Übersicht.

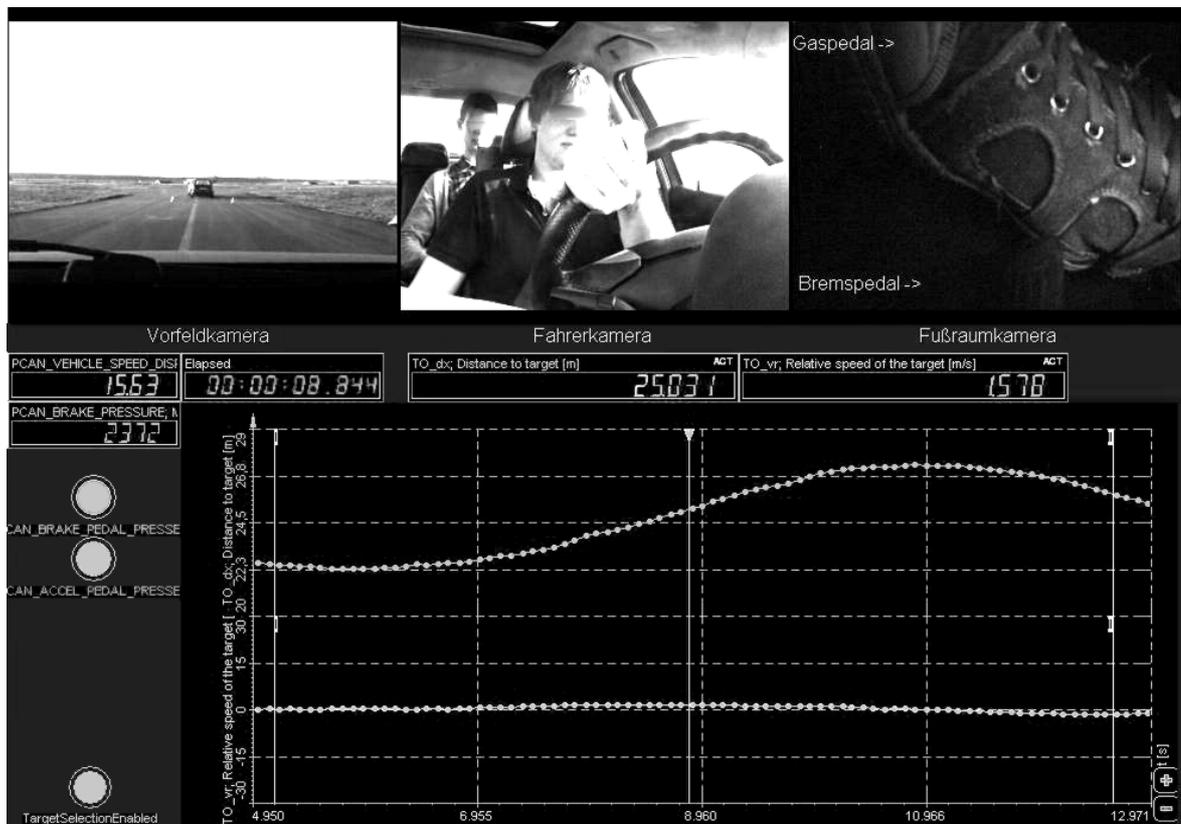


Abbildung 7-7: Übersicht der erfassten Versuchsdaten für den Versuchsleiter

Für die Kontrollierbarkeitsbewertung nach dem beschriebenen Kriterium werden die im Anhang A.4.1 dargestellten Messdaten erfasst.

Das Fahrzeug verfügt über einen mechanischen Bremsassistenten, der abhängig von der Betätigungscharakteristik den Fahrer bei der Durchführung eines Notbremsmanövers unterstützt. Die Funktion ist nur von der Fahrerreaktion abhängig.

Allgemein ist der Einsatz von Bremsassistenten für alle in der EU neu genehmigten Fahrzeugtypen der Pkw- und leichten Nutzfahrzeugklasse seit 2009 Pflicht. Dies gilt seit 2011 auch für alle zugelassenen Neufahrzeuge.<sup>224</sup> Für die Kontrollierbarkeitsuntersuchungen wird aufgrund der zu erwartenden hohen Ausrüstungsquote davon ausgegangen, dass alle Fahrer durch einen Bremsassistenten unterstützt werden.

### 7.8.4 Versuchsablauf

Die Versuche finden auf dem Testgelände der TU Darmstadt dem August-Euler-Flugplatz statt. Die Probanden kennen den Zweck des Versuchs nicht. Nachdem sie einen einleitenden Fragebogen zur Erfassung der statistischen Daten wie Alter und Fahrleistung ausgefüllt haben, werden sie in das Versuchsfahrzeug eingewiesen und instruiert dem EVITA Fahrzeug in einem festgelegten Abstand zu folgen. Zur Kontrolle des Abstandes ist am EVITA-Anhänger eine „Ampel“ angebracht, die bei geringen Abständen rot leuchtet, im Wunschabstandsbereich grün signalisiert und bei zu großem Abstand auf blau wechselt. Damit die Probanden ausreichend Zeit erhalten, eine stationäre Folgefahrt hinter dem Zielfahrzeug zu erreichen, wird eine Ausgangsgeschwindigkeit von 60 – 65 km/h durch das Zugfahrzeug des EVITA-Werkzeugs vorgegeben.<sup>225</sup>

Die Versuchsstrecke ist durch Fahrstreifenmarkierungen seitlich begrenzt. Der zu fahrende Rundkurs ist in Abbildung 7-8 dargestellt.

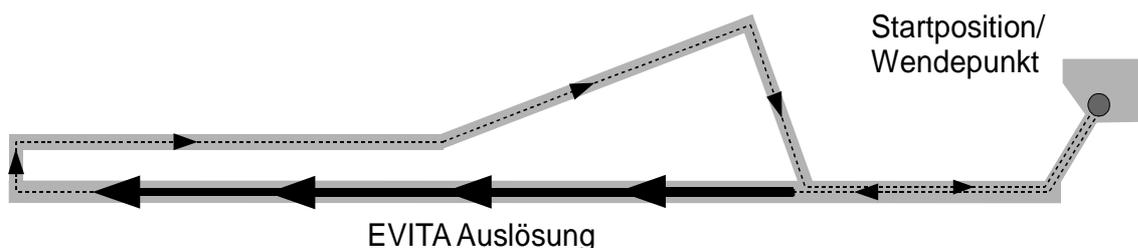


Abbildung 7-8: Rundkurs der Probandenversuche auf dem August-Euler-Flugplatz

Um eine möglichst große Anzahl von Probanden für die Versuche heranzuziehen, werden die Kontrollierbarkeitsuntersuchungen in weitere Versuche eingebettet. Im Rahmen dieser weiteren Versuche erlebten einige der Probanden bereits Situationen mit verzögerndem Vorfahrer. Um die Unvoreingenommenheit trotzdem zu gewährleisten, werden vor den Kontrollierbarkeitsversuchen jeweils Überführungsfahrten ohne Auslö-

---

<sup>224</sup> EG Nr. 78/2009, 2009

<sup>225</sup> vgl. Hoffmann: Darmstädter Verfahren, 2008, S. 65

sung durchgeführt und dem Probanden mitgeteilt, dass nun eine abschließende vergleichende Verhaltensbewertung ohne Gefährdungssituation stattfindet.

Für die Kontrollierbarkeitsbewertung mit Ablenkung wurden Daten aus früheren Versuchen herangezogen. Die dort eingesetzte Nebenaufgabe besteht aus dem Ablesen eines Navigationstextes im Beifahrerfußraum.<sup>226</sup>

Direkt nach dem Kontrollierbarkeitsversuch wird die Subjektivbeurteilung der Probanden anhand eines Fragebogens<sup>227</sup> zur erlebten Situation erfasst.

## 7.9 Auswertung

Für die Bewertung der Kontrollierbarkeit aus den Messdaten wird jeweils der Abstandsverlauf über der quadrierten Relativgeschwindigkeit gemäß des im vorigen Kapitel definierten Kriteriums ermittelt. Ab dem Zeitpunkt an dem EVITA den Versuch abbricht und dadurch die Situation beendet, wird die dann anliegende Längsbeschleunigung weiter extrapoliert und anhand dessen der minimale absolute Abstand bestimmt. Da die Fahrerreaktion die Situationsentwicklung beeinflusst, ist bei der Extrapolation zu berücksichtigen, ob das Zielfahrzeug zum Stillstand kommt und dadurch  $D_{rel}$  auf  $D_{Ego}$  ansteigt.

Aus dem gewählten Versuchsaufbau ergibt sich bei nicht abgelenkten Probanden durch die geringen Reaktionszeiten der Effekt, dass die Situation durch frühes leichtes Bremsen bereits soweit entschärft werden kann, dass das PoNR-Limit  $d_{PoNR}(v_{rel})$  zu einem geringen Abstand verschoben wird, weil keine hohe Relativgeschwindigkeit mehr entsteht. In diesen Fällen wird der Versuch begrenzt durch die maximal erlaubte Seillänge EVITA-Testwerkzeugs. Alle Versuche, bei denen der extrapolierte Endabstand kleiner 0 m ist, werden als unkontrollierbar gewertet.

Ebenso werden die maximal erreichte absolute Verzögerung des Ego-Fahrzeugs und die Reaktionszeit der Probanden ermittelt. Die Reaktionszeiten werden dabei von Beginn der kritischen Situation bis zum ersten Kontakt des Fußes mit dem Bremspedal gemessen. Dadurch sind die mentale Verarbeitungszeit und die Umsetzzeit enthalten.

---

<sup>226</sup> s. Hoffmann: Darmstädter Verfahren, 2008, S. 26 f

<sup>227</sup> s. Anhang A.4.2

## 7.10 Fehlerbetrachtungen

Die Messungen sind potentiell fehlerbehaftet. Die Auswirkungen von Fehlern auf die hier vorgestellte Methodik werden daher diskutiert.

Grundsätzlich schwanken bedingt durch die Versuchsdurchführung die Ausgangsbedingungen der Versuche. Für die hier vorgestellte Methodik sind die Größen Ausgangsgeschwindigkeit und Ausgangsabstand sowie die Relativgeschwindigkeit zu Beginn der Situation potentielle Fehlerquellen.

Die Ausgangsbedingungen Geschwindigkeit und Abstand werden durch den Fahrer des EVITA Zugfahrzeugs beeinflusst. Die Auslösung erfolgt erst, wenn der Proband eine stationäre Folgefahrt im gewünschten Abstandsbereich ausführt. Bei dieser Aufgabe wird er durch die Abstandsanzeige am Dummy-Target unterstützt. Der Fahrer des Zugfahrzeugs bekommt die Ausgangsgrößen angezeigt und entscheidet basierend darauf, wann der Versuch beginnt. Die Fahrer sind instruiert, sodass davon ausgegangen wird, dass die Ausgangsbedingungen näherungsweise konstant sind.

Um die Umgebungseinflüsse auf Fahrer und Fahrzeug gering zu halten, werden alle Versuche bei Tageslicht durchgeführt und Versuche bei Regen nicht ausgewertet.

Die Messung der Reaktionszeiten erfolgen anhand von Kamerabildern, unterstützt durch die Daten des Bremsdrucksensors am Tandemhauptbremszylinder. Die minimale Abtastrate liegt bei  $f_{Abtast} = 25$  Hz. Unter der Annahme, dass sowohl der Beginn der Situation als auch das Ende um einen Messzyklus verschoben erfasst wird, ergeben sich hieraus maximale Abweichungen der ermittelten Reaktionszeit von  $\Delta t_{Reakt, max} = 0,08$  s. Da die Größe in der Bewertung sonst nicht weiter herangezogen bzw. verrechnet wird, ergibt sich keine Fehlerfortpflanzung.

Die maximale Längsbeschleunigung wird anhand der Daten des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) ermittelt. Die Genauigkeit inklusive Quantisierung des Sensors wird nach Mörbe mit  $\Delta a_{x max} = 0,1$  m/s<sup>2</sup> abgeschätzt.<sup>228</sup> Für kleine Extrapolationszeitspannen wird dieser Fehler als vernachlässigbar angesehen.

Der minimale Abstand wird anhand der Bewegungsgrößen der Fahrzeuge zum Abbruchzeitpunkt extrapoliert. Hierfür werden die Absolutgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs  $v_{Ego}$ , die gemessene Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$ , der relative Abstand  $d_{rel}$  und die Längsverzögerungen  $D_{Ego}$  und  $D_{Ziel}$  verwendet. Für die Extrapolation wird aus dem verbleibenden Abstand am Versuchsende unter der Annahme konstanter Beschleunigungen der Fahrzeuge der minimale Abstand berechnet. Da in allen Versuchen der Proband innerhalb des Versuchszeitraums mit einer Bremsung reagiert, wird die Reaktionszeit

---

<sup>228</sup> Mörbe: Fahrdynamik-Sensoren für FAS, 2012, S. 106

und die Bremsverlustzeit nicht mehr berücksichtigt. Damit ergeben sich die Endabstände  $d_{min, end}$  nach Formel 7.15.<sup>229</sup>

$$d_{min, end} = d_{rel} - \frac{v_{Ego}^2}{2D_{Ego}} + \frac{v_{Ziel}^2}{2D_{Ziel}} \quad (7.15)$$

Die Geschwindigkeit des Zielfahrzeuges wird aus der Relativgeschwindigkeitsmessung des Radarsensors nach Formel 7.16 bestimmt.

$$v_{Ziel} = v_{Ego} + v_{rel} \quad (7.16)$$

Die Genauigkeit der durch den Radarsensor ermittelten Abstands- und Relativgeschwindigkeitsdaten ist begrenzt durch die jeweilige Zellengröße.<sup>230</sup> Konkrete Werte dazu liegen für die eingesetzten Versuchsträger nicht vor. Zu Vergleichszwecken wird die Genauigkeit des im Honda Accord eingesetzten Radarsensors herangezogen und die Auswirkungen der Messungenauigkeiten auf die ermittelten Endabstände bestimmt. Näherungsweise wird davon ausgegangen, dass die für kollisionsvermeidende/-lindernde Systeme notwendige Sensorik der anderen Versuchsträger ähnliche Abweichungen aufweist.

In Tabelle 7-9 sind die als fehlerbehaftet angenommenen Größen und deren Abweichungen dargestellt.

Tabelle 7-9: Messfehler der verwendeten Sensorik

Messgröße	Fehler	Begründung
$d_{rel}$	0,8 m	Größe der Abstandszelle <sup>231</sup> des Radarsensors
$v_{rel}$	0,3 m/s	Größe der Relativgeschwindigkeitszelle des Radarsensors
$D_{Ziel}$	0,5 m/s <sup>2</sup>	Annahme
$v_{Ego}$	5 %	des Geschwindigkeitswerts am Ende des Versuchs <sup>232</sup>

Aus der allgemeinen Fehlergleichung<sup>233</sup> angewendet auf Formel 7.15 ergibt sich Formel 7.17. Die einzelnen Fehlerterme sind in Anhang A.5 enthalten.

$$\Delta d_{min, end} = \left| \frac{\partial d_{min, end}}{\partial d_{rel}} \right| \cdot \Delta d_{rel} + \left| \frac{\partial d_{min, end}}{\partial v_{rel}} \right| \cdot \Delta v_{rel} + \left| \frac{\partial d_{min, end}}{\partial D_{Ziel}} \right| \cdot \Delta D_{Ziel} + \left| \frac{\partial d_{min, end}}{\partial v_{Ego}} \right| \cdot \Delta v_{Ego} \quad (7.17)$$

<sup>229</sup> basierend auf Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2012, S. 531

<sup>230</sup> Winner: Radarsensorik, 2012, S. 154

<sup>231</sup> Winner: Radarsensorik, 2012, S. 154

<sup>232</sup> in Anl. an Hoffmann: Darmstädter Verfahren, 2008, S. 96 und interne Messungen

<sup>233</sup> vgl. bspw. Bronstein et al.: Taschenbuch Mathematik, 1979, S. 100

Damit ist der Fehler von den Bewegungsgrößen zum Abbruchzeitpunkt abhängig. Der Fehler wird maximal für hohe Geschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs und geringe Relativgeschwindigkeiten, und bei geringen Verzögerungen des Zielfahrzeugs und des Ego-Fahrzeugs. Bei den beschriebenen Versuchen sind diese Größen jedoch bedingt durch die Fahrerreaktion unbekannt zueinander abhängig. Es konnten keine Abhängigkeiten der jeweiligen Streuungsursachen von den Versuchsreihen oder  $d_{min, end}$  ermittelt werden.

## 7.11 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden jeweils auf Normalverteilung geprüft und dann mit einem einseitigen t-Test auf Gleichheit untersucht. Muss die Hypothese der Normalverteilung abgewiesen werden, wird ein Rangsummentest herangezogen.

### 7.11.1 Reaktionszeiten

Gemäß der in Kapitel 7.5 definierten Untersuchungsziele wird betrachtet, ob die ermittelten Reaktionszeiten eine unabhängige Stichprobe des Fahrermodells sind und ob die Versuchsreihen sich voneinander unterscheiden.

Abbildung 7-9 zeigt die Reaktionszeiten aller Versuche in einer Darstellung der kumulativen Häufigkeit. Die zu den Verzögerungsstrategien gehörenden errechneten 50 %-zeitlichen Erkennungsschwellen  $t_{erkenn, 50\%}$ <sup>234</sup> sind dort als senkrechte Linien ebenfalls eingezeichnet.

---

<sup>234</sup> vgl. Kapitel 6.1.3

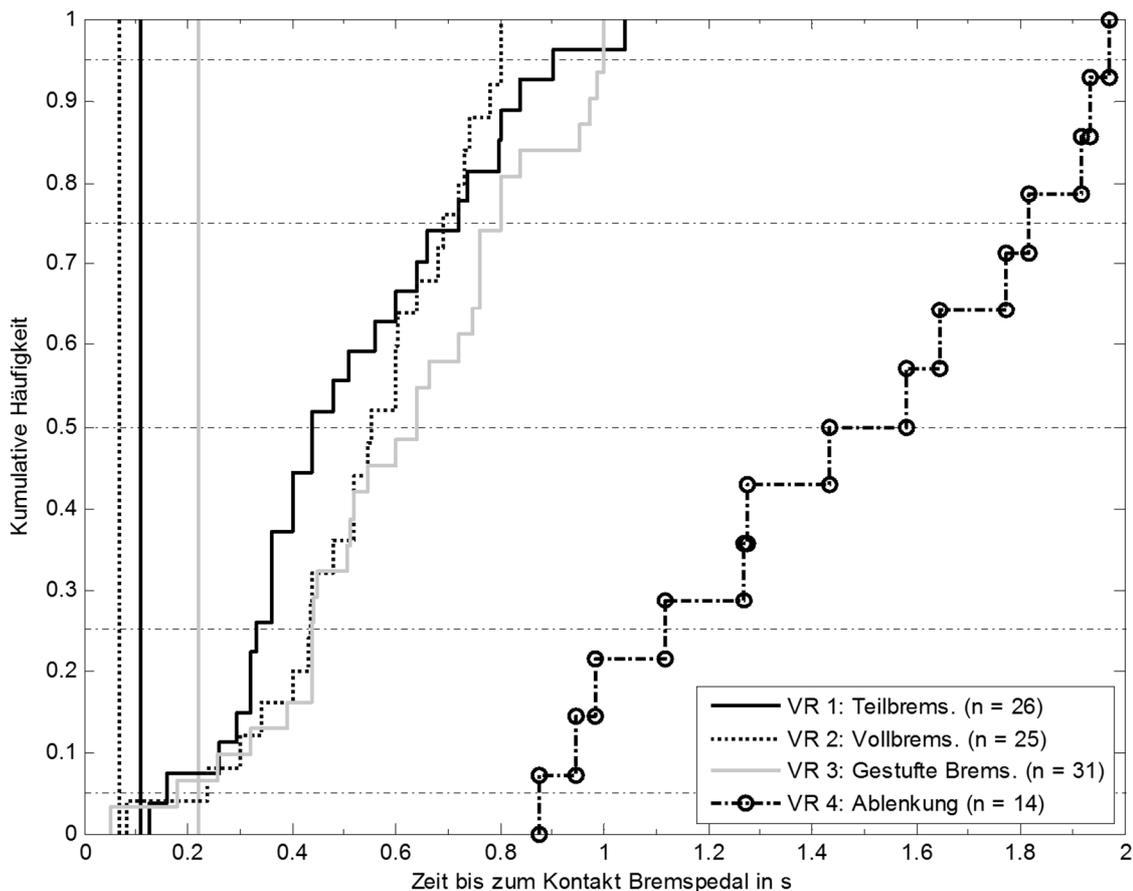


Abbildung 7-9: Kumulative Häufigkeitsdichte der Reaktionszeiten

Dabei reagieren nur bei gestufter Verzögerung zwei Probanden bereits vor Erreichen der 50 % sicheren Erkennungsschwelle.

Der Nachweis auf Gleichheit mit der im Fahrermodell verwendet Gammaverteilung kann für die VR 1 – 3 nicht erbracht werden. VR 4 kann aus der gleichen Grundgesamtheit stammen, wenn eine konstante Verschiebung um die Ablenkungsdauer  $t_{Ablenk} = 0,75$  s angenommen wird.

Anhand eines Lilliefors-Tests kann nachgewiesen werden, dass die Reaktionszeiten der Versuchsreihen einer Normalverteilung nicht widersprechen.<sup>235</sup> Daher werden die Verteilungen anhand des t-Tests auf Unterschiedlichkeit geprüft. Zwischen VR 1, VR 2 und VR 3 können keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Dabei liegt das Ergebnis für VR 1 und VR 3 dicht an der Signifikanzschwelle. VR 4 ist zu allen anderen Versuchsreihen höchstsignifikant unterschiedlich.

Damit können VR 1, VR 2 und VR 3 nicht eindeutig in eine Rangfolge gebracht werden. Die Abweichungen zwischen VR 2 und VR 3 im Bereich höherer Reaktionszeiten könnten ein Indikator sein, dass einige Fahrer die Situationsentwicklung bei geringerer

<sup>235</sup> Tabellarische Auflistung der Ergebnisse der statistischen Tests im Anhang A.6.1

Start-Verzögerung länger abwarten. Beweise hierfür können jedoch nicht identifiziert werden.

### 7.11.2 Reaktionsintensitäten

Untersucht wird die Abhängigkeit der Verzögerungsintensitäten des Ego-Fahrzeugs von der Verzögerungsstrategie des Zielfahrzeugs. Damit sollen Unterschiede bei den Reaktionsintensitäten der Probanden abhängig von der Situationsentwicklung untersucht werden.

In Abbildung 7-10 sind die maximal erreichten Verzögerungen der jeweiligen Versuchsreihen dargestellt. Der Maximalwert ist durch den Reibwert auf circa  $10 \text{ m/s}^2$  begrenzt.

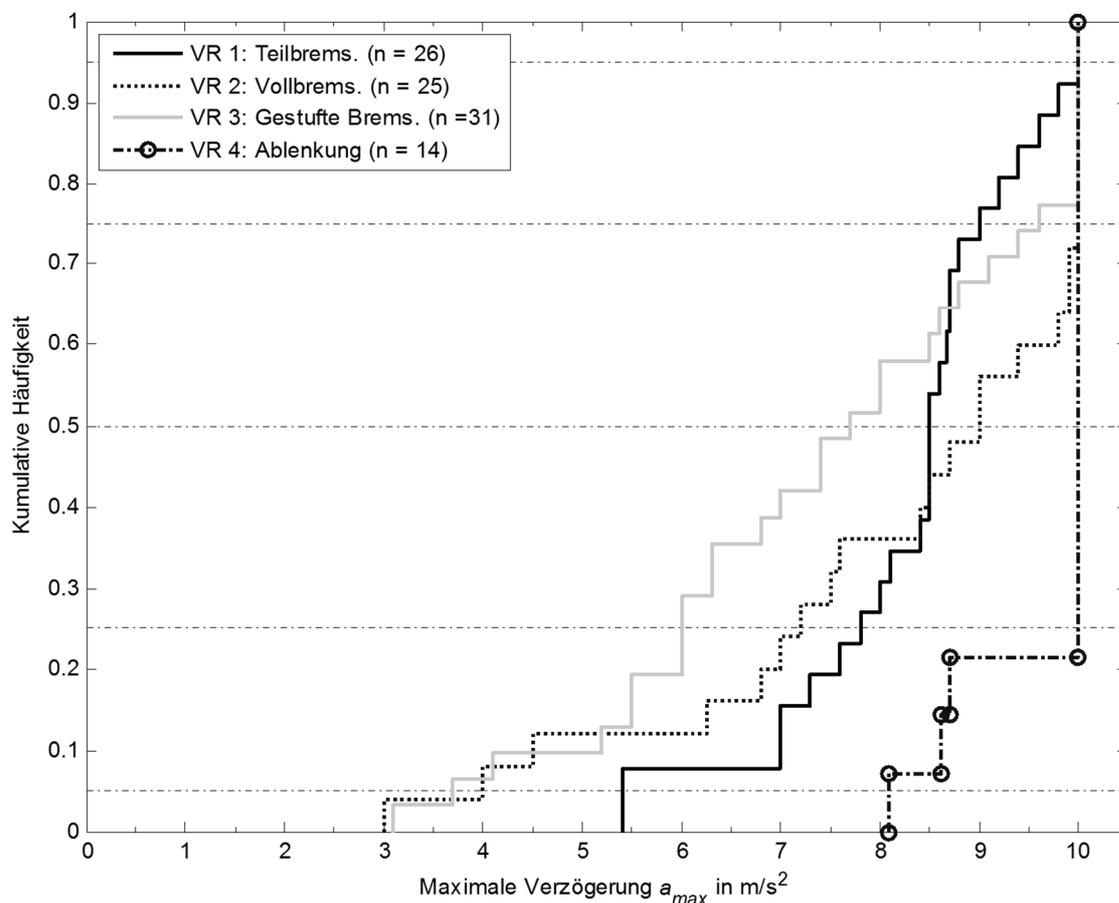


Abbildung 7-10: Kumulative Häufigkeiten der Maximalverzögerungen

Die statistische Analyse zeigt eine Normalverteilung für VR 3 eine Kompatibilität zur Normalverteilung und hoch- bzw. höchstsignifikante Unterschiede von VR 4 gegenüber den Versuchsreihen VR 1 – 3.<sup>236</sup>

<sup>236</sup> Tabellarische Auflistung der Ergebnisse der statistischen Tests im Anhang A.6.2

Unterschiede in den Reaktionsintensitäten können für die Versuchsreihen 1 bis 3 nicht nachgewiesen werden. Dies stützt die Vermutung, dass die Reaktionsintensität der Fahrer hauptsächlich von der Kritikalität zum Zeitpunkt der Wahrnehmung der Situation bedingt ist. Eine Abhängigkeit von der Verzögerungsstrategie kann nicht beobachtet werden.

### 7.11.3 Kontrollierbarkeitsbewertung

Gemäß dem Kontrollierbarkeitskriterium werden die minimal in den Versuchen erreichten extrapolierten Abstände ermittelt. Daraus werden die Unkontrollierbarkeitsanteile abgeleitet. Für alle Versuchsreihen kann Normalverteilung angenommen werden. Signifikante Unterschiede sind nur zwischen VR1 und VR 2 nicht nachweisbar, VR 4 ist zu VR1 und VR 3 höchstsignifikant.<sup>237</sup> In Abbildung 7-11 sind die extrapolierten minimalen Abstände dargestellt.

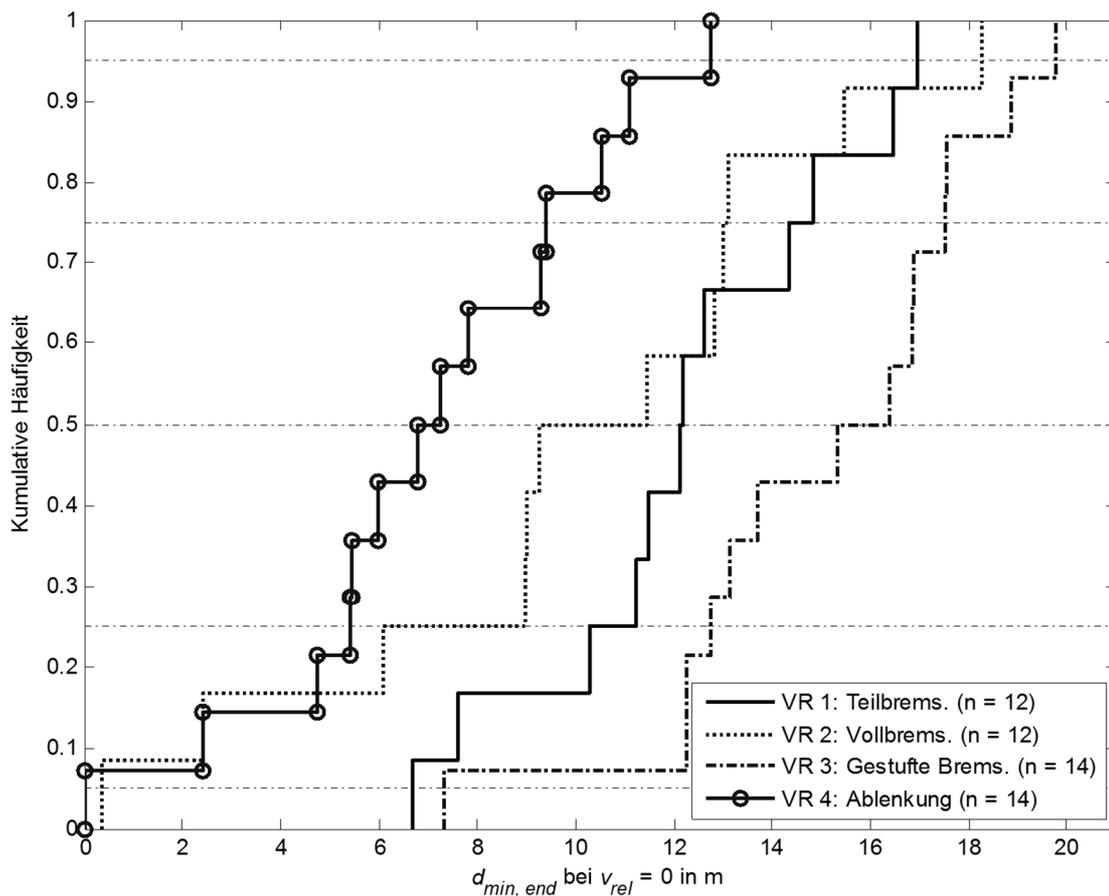


Abbildung 7-11:  $d_{min, end}$  extrapoliert

<sup>237</sup> Tabellarische Auflistung der Ergebnisse der statistischen Tests im Anhang A.6.3

Für die Kontrollierbarkeitsbewertung gemäß ISO 26262 ist die detaillierte Abstandsbe-  
trachtung nicht notwendig, hier reicht die Unterscheidung zwischen Unfall ( $d_{min, end} \leq 0$ )  
und keinem Unfall ( $d_{min, end} > 0$ ) aus.<sup>238</sup>

Anhand der hier verwendeten Betrachtung der minimal erreichten Abstände kann jedoch  
eine Abschätzung der Unkontrollierbarkeit, basierend auf der Annahme einer Verteilung  
der minimalen Abstände, in diesem Fall einer Normalverteilung, vorgenommen werden.  
Dazu werden die ermittelten  $d_{min, end}$ -Werte der Versuchsreihen über die Methode der  
kleinsten Quadrate unter Annahme einer Normalverteilung approximiert.<sup>239</sup>

In Abbildung 7-12 sind die ermittelten Werte und die geschätzten Normalverteilungs-  
verteilungsfunktionen mit einer für Normalverteilung verzerrten y-Achse dargestellt.

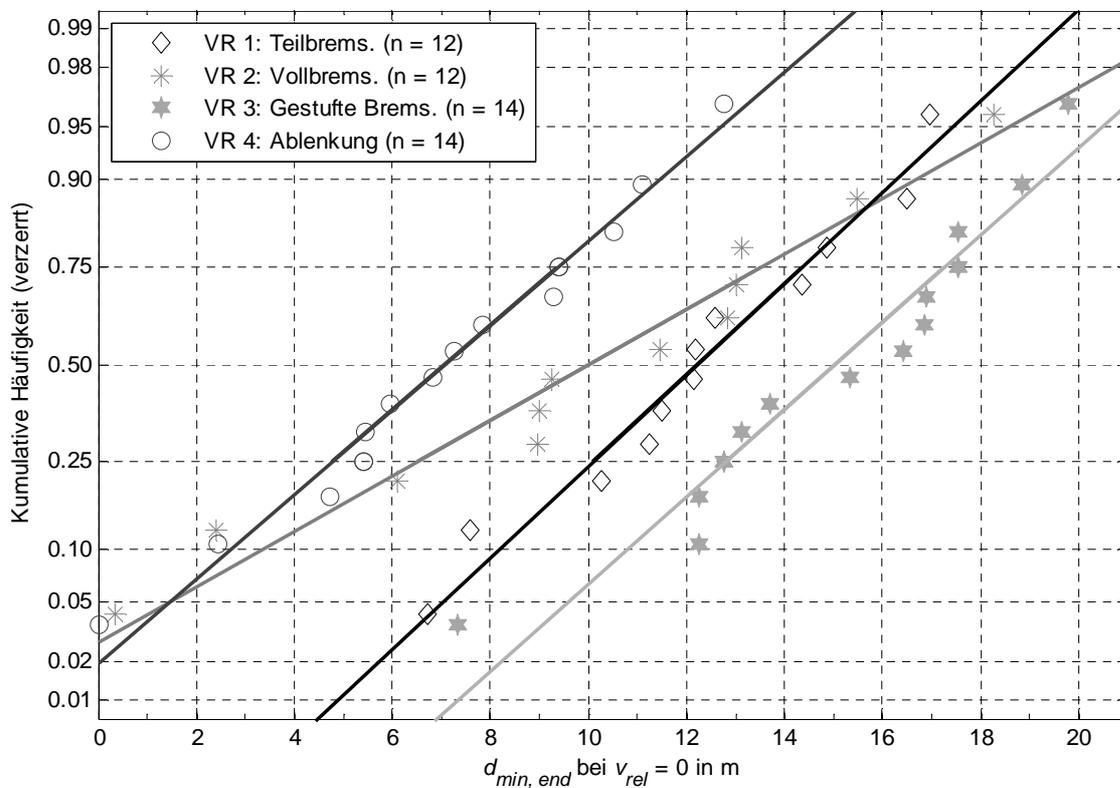


Abbildung 7-12:  $d_{min, end}$  extrapoliert mit approximierten Normalverteilungen<sup>240</sup>

Für die so geschätzten Parameter Mittelwert und Standardabweichung werden die 95 %-  
Vertrauensbereiche berechnet.<sup>241</sup> Gesucht wird die obere Grenze des Schnittpunktes mit  
der y-Achse ( $d_{min, end} = 0$ ), die durch die Normalverteilung mit der unteren Vertrauens-

<sup>238</sup> vgl. Kapitel 7.7.1

<sup>239</sup> Beucher et al.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, 2005, S. 196

<sup>240</sup> y-Achse für Normalverteilung verzerrt

<sup>241</sup> Beucher et al.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, 2005, S. 196

grenze des geschätzten Mittelwertes der Verteilung  $\hat{\mu}_{min}$  und der oberen Vertrauensgrenze der geschätzten Standardabweichung  $\hat{\sigma}_{max}$  nach Formel 7.18<sup>242</sup> bedingt ist.

$$F_{max}(d_{min,end}) = \frac{1}{\hat{\sigma}_{max} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{d_{min,end}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - \hat{\mu}_{min}}{\hat{\sigma}_{max}} \right)^2} dt \quad (7.18)$$

Die anhand der Versuchsergebnisse geschätzten resultierenden maximalen Unkontrollierbarkeitsanteile ( $v_{max}$ ) ergeben sich daraus nach Formel 7.19.

$$v_{max} = F_{max}(d_{min,end} = 0) \quad (7.19)$$

Die Unkontrollierbarkeitsanteile sind damit direkt abhängig von der Streuung der Versuchsergebnisse. Diese ist einerseits abhängig von der Streuung der Probandenreaktion und andererseits von der Genauigkeit der verwendeten Sensoren (vgl. Kapitel 7.10). In Abbildung 7-13 sind die kumulierten Häufigkeiten der absoluten Messfehler, aufgrund der Sensorgenauigkeiten aus allen Versuchen, bestimmt nach den Fehlertermen in Anhang A.5, dargestellt.

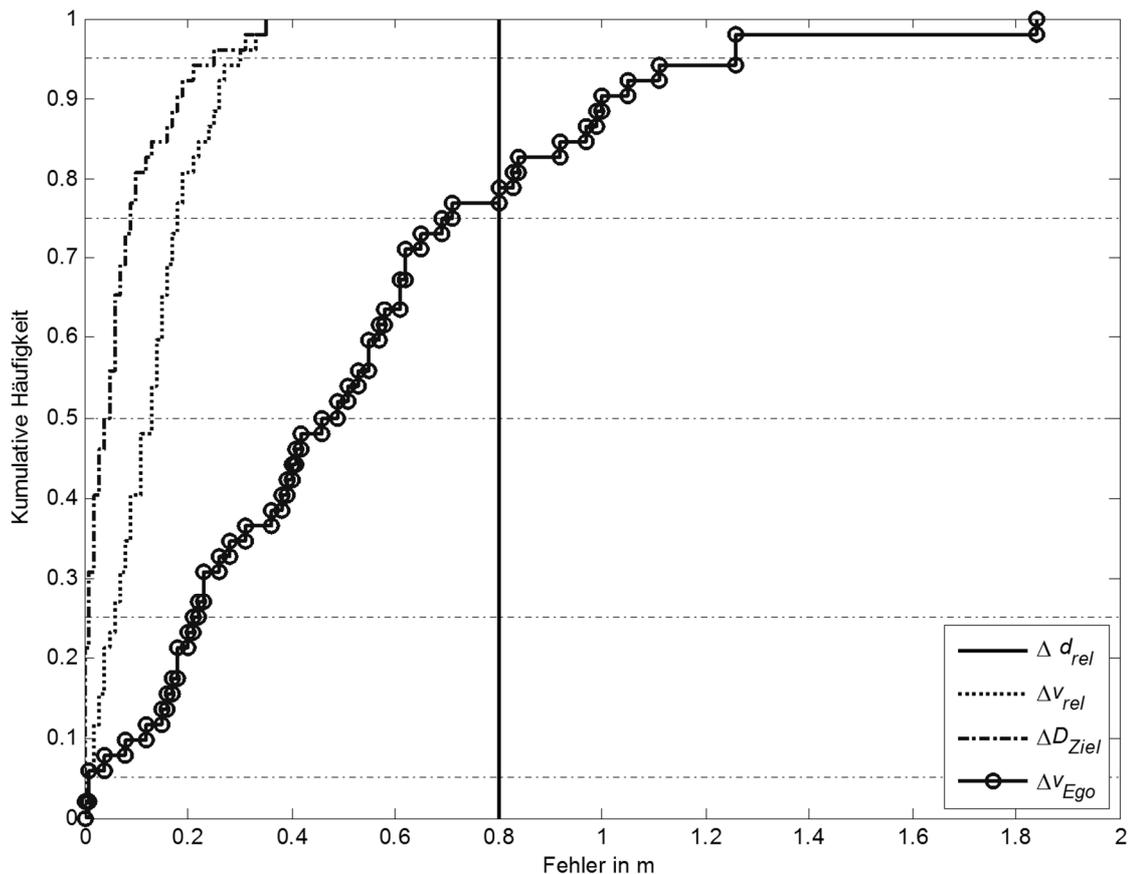


Abbildung 7-13: Häufigkeitsverteilung der absoluten Messfehler<sup>243</sup>

<sup>242</sup> Bronstein et al.: Taschenbuch Mathematik, 1979, S. 664

Für die Verringerung der Streuung ist dementsprechend eine höhere Genauigkeit der Relativgeschwindigkeits- und Abstandsmessung anzustreben.

In Tabelle 7-10 sind die, nach Formel 7.18 und 7.19 ermittelten, oberen Grenzen der Unkontrollierbarkeitsanteile den in der Simulation ermittelten Werten gegenübergestellt.

Tabelle 7-10: Gegenüberstellung der Unkontrollierbarkeitsanteile

Versuchsreihe	Unkontrollierbarkeitsanteil	
	Obere Grenze aus Versuchen	Abschätzung aus Simulation
VR 1: Teilbremsung	$v_{max} = 3 \%$	$v_{max, Sim} = 10 \%$
VR 2: Vollbremsung	$v_{max} = 23 \%$	$v_{max, Sim} = 10 \%$
VR 3: Gestufte Bremsung	$v_{max} = 1 \%$	$v_{max, Sim} = 1 \%$
VR 4: Ablenkung	$v_{max} = 18 \%$	$v_{max, Sim} = 50 \%$

Der Nachweis, der aus der Simulation ermittelten Kontrollierbarkeitsanteile, kann für die VR 2 also nicht geführt werden. Allerdings handelt es sich bei den Ergebnissen aus dem Probandenversuch um den empirisch nachweisbaren minimalen Unkontrollierbarkeitsanteil im 95 % Vertrauensbereich. Die Ergebnisse aus der Simulation können niedrigere Unkontrollierbarkeitsanteile aufweisen, da dem Reaktionsmodell auch eine höhere Anzahl von Probanden zugrunde liegt.

Bezüglich der VR 1, 3 und 4 kann trotz der geringen Anzahl von Probanden der Nachweis geführt werden, dass die Unkontrollierbarkeit unter den aus der Simulation geschätzten Anteilen liegt. Da die Reaktionszeiten mit dem zugrundeliegenden Fahrermodell übereinstimmen, scheint dies ein Widerspruch zu sein. Allerdings wird in der Simulation davon ausgegangen, dass die Fahrerreaktion keine Verzögerung des Ego-Fahrzeugs hervorruft. In der Realität kann aber bereits eine leichte Verzögerung des Ego-Fahrzeugs dazu führen, dass das Zielfahrzeug in der Situation noch zum Stehen kommt. Dadurch wird der PoNR erst bei kleineren Abständen erreicht und ein größerer Anteil der Situationen ist kontrollierbar. Dies zeigt sich insbesondere in den unterschiedlichen Unkontrollierbarkeitsanteilen von VR 1 und VR 4, diese kommen in der Simulation nicht zum Stillstand.

VR 2 zeigt über alle Versuchsreihen den höchsten Unkontrollierbarkeitsanteil. Da diese obere Grenze der Unkontrollierbarkeit aufgrund der verwendeten statistischen Bewertung von der Streuung der Versuchsergebnisse abhängt, kann in diesem Fall eine Vergrößerung des Probandenkollektivs die Aussagegüte erhöhen.

<sup>243</sup> Die Tabellen der absoluten Fehler befinden sich in Anhang A.6.4

Für die Variation des Parameters Ablenkung kann eine Verschlechterung der Kontrollierbarkeitswerte nachgewiesen werden. Die realen Unkontrollierbarkeitsanteile liegen jedoch deutlich unter der Abschätzung aus der Simulation. Für die Subklasse Blickabwendung ( $K = 4$ ) ergeben sich beispielhaft anhand der nachweisbaren Unkontrollierbarkeitsanteile die in Tabelle 7-11 dargestellten Änderungen des Relevanzfaktors.

Tabelle 7-11: Auswirkungen der Änderungen des Unkontrollierbarkeitsanteils für Teilbremsung

		Subklasse: Blickabwendung ( $K = 4$ )			
		Simulation		Versuch	
Parameter		Kurz	Lang	Kurz	Lang
$q$		1	2	1	2
$\rho_{4,q}$		0,8	0,2	0,8	0,2
Teilbremsung mit Ablenkung	$v_{4,q}$	0,1	0,5	0,03	0,18
	$v_{4,q} \rho_{4,q}$	0,08	0,1	0,024	0,036
	$v_4$	0,18		0,06	

Trotz der geringen Anzahl von Probanden, kann anhand der Versuchsergebnisse der nachweisbare Unkontrollierbarkeitsanteil  $v_4$  um  $\approx 67\%$  reduziert werden. Bezogen auf die Kontrollierbarkeitsklassen nach ISO 26262 kann daher der Subklasse Niederschlag anhand der Versuchsergebnisse die Stufe C2 statt C3 zugewiesen werden. Aufgrund der Erweiterung des Kontrollierbarkeitskriteriums kann entsprechend bereits bei kleineren Probandenumfängen eine Abschätzung der Kontrollierbarkeit durchgeführt werden, weil eine Verteilungsfunktion herangezogen werden kann.

#### 7.11.4 Subjektive Kontrollierbarkeitsbewertung

In VR 1 bis 3 wurden die Probanden jeweils nach dem Versuch zu der erlebten Situation befragt und darum gebeten, eine Einschätzung zu geben. Der dazugehörige Fragebogen findet sich im Anhang A.4.2.

In Abbildung 7-14 ist die subjektive Kontrollierbarkeit mit der subjektiven Bremsstärke für die unterschiedlichen Verzögerungsstrategien dargestellt. Kein Proband bewertete die Aussage „Ich hatte die Situation jederzeit unter Kontrolle.“ mit „trifft nicht zu“.

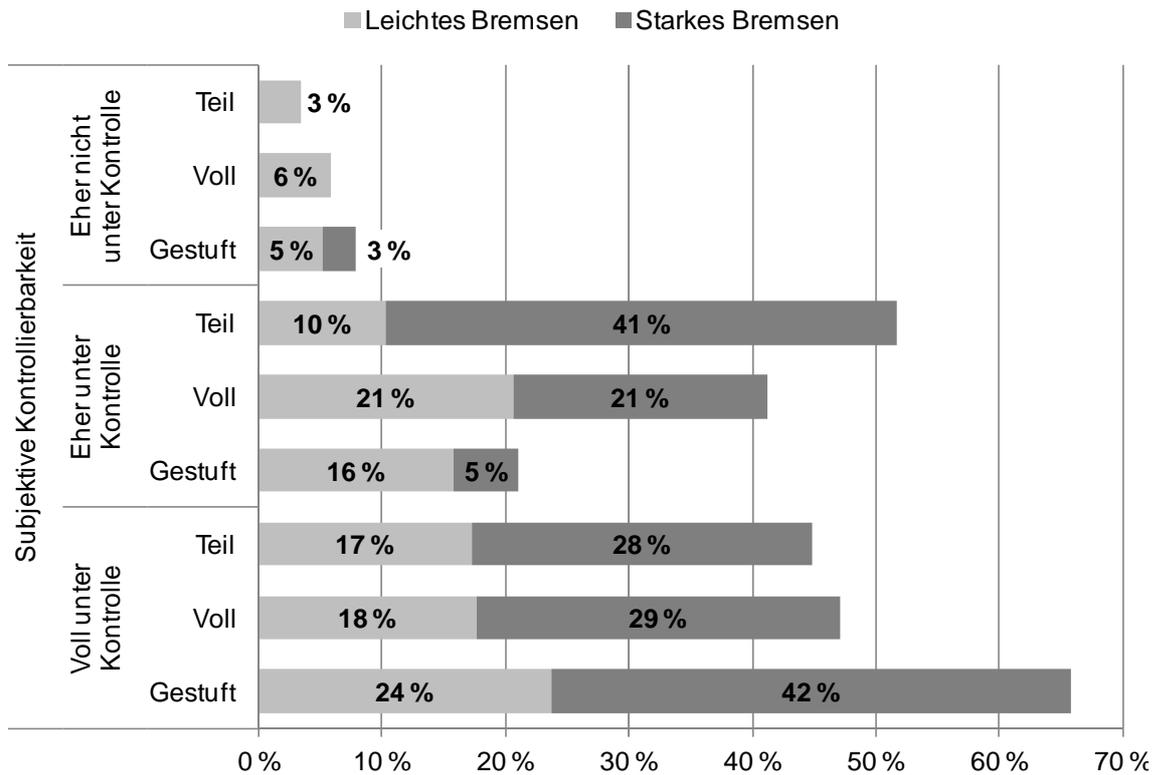


Abbildung 7-14: Kombinierte Ergebnisse der subjektiven Kontrollierbarkeitsbewertung und der subjektiven Bremsintensitätsbewertung

In allen Versuchen sind die Probanden mehrheitlich subjektiv der Ansicht, sie hätten die Situation voll oder eher unter Kontrolle gehabt. Unabhängig von der Verzögerungsstrategie bewerten weniger als 10 % der Probanden die Situation als eher nicht kontrollierbar. Dabei reagiert ein Großteil der Probanden auf die Situation subjektiv mit leichtem Bremsen. Im Vergleich mit den Ergebnissen der maximalen Verzögerung nach Abbildung 7-10 sind insbesondere für die Teilbremsung (VR 1) nur Verzögerungen über  $5 \text{ m/s}^2$  beobachtbar. Ein Erklärungsmodell hierfür ist neben der falschen Einschätzung durch die Probanden auch die Unterstützung durch den Bremsassistenten.

Hinsichtlich der allgemeinen Kontrollierbarkeitsbewertung ist die Probandeneinschätzung jedoch korrekt. Die Tendenz zu höherer subjektiver Kontrollierbarkeit für gestufte Verzögerungen (VR 3) zeigt sich auch in der Verteilung der minimalen Abstände. In der subjektiven wie in der objektiven Bewertung sind dagegen keine eindeutigen Unterschiede zwischen Teil- und Vollverzögerung nachzuweisen.

## 7.12 Erkenntnisse der Probandenversuche

Zusammenfassend konnte mit den durchgeführten Probandenversuchen die Anwendbarkeit des Verfahrens und die Bewertung von Kontrollierbarkeit mit objektiven Kriterien gezeigt werden. Dabei wurden weitere Anforderungen an die Untersuchung von Kontrollierbarkeit in realen Versuchen identifiziert.

Damit die Probandenversuche dargestellt werden können, wird ein geeignetes Verfahren zur realistischen Darstellung von kritischen Fahrsituationen benötigt, das eine Betrachtung der Situation bis zum letztmöglichen Reaktionszeitpunkt des Fahrers zulässt. Dabei darf keine Gefährdung der Probanden entstehen. Das hier verwendete Werkzeug EVITA ist für späte und unzureichende Fahrerreaktion dazu grundsätzlich in der Lage, Versuche mit aufmerksamen Fahrern werden aber dadurch begrenzt, dass das verwendete Werkzeug den Versuch abbricht, bevor der Point-of-No-Return erreicht wird.

Die verwendete Methodik der Extrapolation der Bewegungsgrößen ab dem Zeitpunkt des Versuchsabbruchs kann diese Problematik teilweise bewältigen. Belastbare Aussagen sind aber nur möglich, wenn entweder zum Zeitpunkt des Versuchsabbruchs die maximale Verzögerung des Ego-Fahrzeugs bereits erreicht ist, oder die dann vorliegende Verzögerung zur Vermeidung der Kollision ausreicht. Nicht berücksichtigt werden können daher Fälle, in denen der Fahrer nach Versuchsabbruch, aber vor Erreichen des Reaktionslimits, den Bremsdruck noch erhöht und dadurch die Kollision doch noch verhindert. Dadurch wird die Kontrollierbarkeit durch die getroffenen Annahmen in der verwendeten Auswertemethodik eher zu konservativ bewertet. Je weiter ein entsprechendes Testwerkzeug die maximale Beobachtungsdauer ausdehnt, desto genauere Aussagen sind hier zu erwarten. Allerdings konnte gezeigt werden, dass auch mit dem hier verwendeten Verfahren bereits Erkenntnisse zur Kontrollierbarkeit bei Ablenkung des Fahrers gewonnen werden können. Alternative Verfahren mit ähnlich hohem Realitätsgrad, bei denen die Situation für die Probanden nicht vorhersehbar ist, sind zudem aktuell nicht bekannt.

Die Anforderungen an die verwendete Messtechnik sind hinsichtlich der Erfassung und Messung des Zielfahrzeugs vergleichsweise hoch. Bei den hier beschriebenen Versuchen zeigte sich, dass gerade die Erfassung höherer Relativgeschwindigkeiten bei geringen Abständen in manchen Versuchen widersprüchliche Daten lieferte, sodass eine größere Anzahl von Versuchen nicht ausgewertet werden konnte. Gründe hierfür können neben den sich schnell ändernden Bewegungsgrößen, auch Effekte aus dem Nicken des Folgefahrzeugs aufgrund einer intensiven Fahrerreaktion sein. Zusätzlich erzeugen die Ungenauigkeiten der Sensorik bei der Relativgeschwindigkeits- und Abstandsmessung eine Streuung der ermittelten minimalen Abstände. Je geringer diese Streuung ist, desto genauer kann eine Abschätzung der oberen Grenze des Unkontrollierbarkeitsanteils erfolgen.

Es wurde gezeigt, dass durch die Erweiterung des Kontrollierbarkeitskriteriums auf Basis statistischer Analysen Aussagen zu maximalen Unkontrollierbarkeitsanteilen getroffen werden können. Im Vergleich zu der Bewertung nach den Anforderungen der ISO 26262, können bei diesem Vorgehen bereits mit vergleichsweise kleinen Probandenkollektiven auch Aussagen für geringe Unkontrollierbarkeitsanteile getroffen werden. Die aus den Probandenversuchen ermittelten Unkontrollierbarkeitsanteile wurden den Ergebnissen der Unkontrollierbarkeitsschätzung anhand des Simulationsmodells gegenübergestellt. Sich daraus ergebende Änderungen der Kontrollierbarkeitsbewertung der Verzögerungsstrategie „Teilbremsung“ in der Subklasse „Blickabwendung“ konnten gezeigt werden.

Für den Basisanteil sind Unterschiede in der Kontrollierbarkeit bei unterschiedlichen Verzögerungsstrategien des Zielfahrzeugs nachweisbar. Auftretende Abweichungen zwischen den Abschätzungen in der Simulation und den Ergebnissen der Probandenversuche entstehen vermutlich aufgrund der geringen Anzahl gültiger Versuche. Ebenso wird im verwendeten Fahrerreaktionsmodell davon ausgegangen, dass die Probanden jeweils mit einer Vollverzögerung reagieren, dadurch kann die Kontrollierbarkeit in der Simulation tendenziell überschätzt werden. Dies gilt jedoch nur für Fälle, in denen die Reaktion der Probanden nicht geeignet ist, den Bremsassistenten des Versuchsfahrzeugs auszulösen.

Bei der Auswertung der Reaktionszeiten fällt auf, dass die im Versuch ermittelten Zeiten tendenziell niedriger liegen als die in der Simulation für die Abschätzung verwendeten. Ein Erklärungsmodell hierfür kann die erhöhte Aufmerksamkeit aufgrund der ungewohnten Fahrsituation auf dem Testgelände, teilweise überlagert durch die Vorerfahrungen der Probanden, sein.

---

## 8 Fazit und Ausblick

Für die Freigabe von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung ist die Bewertung der Kontrollierbarkeit im Fall von funktionalen Unzulänglichkeiten der Systeme notwendig. Die vorliegende Arbeit identifiziert und definiert die hierfür notwendigen Schritte und die dabei zu erfüllenden Anforderungen.

Die einleitende Analyse nicht situationsgerechter Auslösungen von Fahrerassistenzsystemen führt zu einer Differenzierung von Fällen funktionaler Unzulänglichkeiten und funktionaler Sicherheit. Dadurch ist die Unterscheidung hinsichtlich der Anforderungen an die Auswahl von Prüfsituationen für die Bewertung von Risikofaktoren von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung möglich. Aufgrund der Erfassung und Interpretation des Umfeldes durch Sensoren muss eine Absicherungsmethodik alle möglichen Situationen einer nicht situationsgerechten Auslösung in Betracht ziehen, wodurch die für eine Bewertung in Frage kommende Situationsmenge größer als bei herkömmlichen Assistenzsystemen ist.

Anhand der Anforderungen der bestehenden Norm zur funktionalen Sicherheit im Automobil, der ISO 26262, konnte gezeigt werden, dass der Aufwand für die objektive Prüfung so hoch ist, dass vor dem Hintergrund immer umfassenderer Eingriffsmöglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung der Vollständigkeitsnachweis der Bewertung kaum noch möglich ist. Vielmehr müssen Wege gefunden werden, die Bewertung als hinreichend umfangreich nachzuweisen und dabei gegebenenfalls Unsicherheiten in Kauf zu nehmen, insofern diese quantifizierbar sind. Dafür ist eine nachvollziehbare Priorisierung und Auswahl von Prüfsituationen notwendig. Dabei ist eine hohe Übertragbarkeit anzustreben sodass diese auf unterschiedliche Systemausprägungen anwendbar sind und Erkenntnisse auch bei der Kontrollierbarkeitsabschätzung in der Entwicklung neuer Systeme verwendet werden können.

Um geeignete Lösungsansätze zu untersuchen, beschreibt diese Arbeit die Schritte einer Kontrollierbarkeitsbewertung und noch existierende Lücken, beispielsweise hinsichtlich der Definition von Fahrsituationen und der vorliegenden statistischen Daten. Zusätzlich wird ein dafür geeigneter Relevanzbewertungsansatz entwickelt.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse nicht situationsgerechter Auslösungen von Fahrerassistenzsystemen zeigt, welche Auslösungen als nicht situationsgerecht einzustufen sind, und wie daraus für die Bewertung geeignete Fälle ausgewählt werden können. Am Beispiel von kollisionsvermeidenden und -lindernden Systemen mit Eingriff in die Längsdynamik ist dargestellt, wie geeignete Situationsparameter für die Klassifikation abgeleitet werden können. In der Anwendung für die hier vorgenommene Bewertung

zeigt der gewählte Parametersatz keine Widersprüche. Da die zur Beschreibung verwendeten Parameter jedoch beliebig detailliert werden können, kann vermutlich keine Vollständigkeit der Situationsbeschreibung erreicht werden. Ebenso ist dadurch der Nachweis, dass der gewählte Parametersatz für die Beschreibung als hinreichend zu bewerten ist, nicht zu führen. In Zukunft ist die Identifikation von Ansätzen erforderlich, mit denen die aus der Unvollständigkeit resultierenden verbleibenden Unsicherheiten quantifiziert werden können. Die Analyse der Anwendbarkeit von Unsicherheitsbewertungsansätzen, beispielsweise aus den Bereichen Betriebsfestigkeit oder Risiko- und Qualitätsmanagement, könnte hierfür weitere Erkenntnisse liefern.

Neben der Definition von Situationsparametern ist auch die Ermittlung dazugehöriger Expositionswahrscheinlichkeiten eine notwendige Voraussetzung für eine objektive Betrachtung. Wie im Kapitel 4.3 diskutiert, sind statistische Erhebungen zur Verbesserung der aktuellen Datenlage zwar einerseits notwendig, andererseits ist zuvor zu bewerten, wie daraus belastbare Fahrsituationskollektive abzuleiten sind, die auch bezüglich eines heterogenen Nutzerkreises für alle Beteiligten ein ausreichend sicheres Verhalten gewährleisten. Hierzu konnten keine bereits existierenden Methoden gefunden werden.

Mit der in dieser Arbeit entwickelten Relevanzbewertungsmethodik kann eine nachvollziehbare Auswahl bzw. Priorisierung von Prüfsituationen getroffen werden. Durch die Bildung des Skalarproduktes der Expositions- und Unkontrollierbarkeitsvektoren wird basierend darauf der Unkontrollierbarkeitsanteil der nächsten Bewertungsebene mit geringerer Detaillierung des Parameters gebildet.

Das Vorgehen ermöglicht einen Vergleich der Relevanz von Situationsparametern auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen, auch auf Basis unvollständiger Daten, nach objektiven Kriterien. Die Abbildung von Anteilen unbekannter Parameterausprägung und dadurch nicht bewertbarer Kontrollierbarkeit ist möglich, sodass anfänglich große Unsicherheiten tolerierbar sind, weil diese sukzessive verringert werden können. Die Diskussion des Einflusses von Abhängigkeiten der Expositionswahrscheinlichkeiten von Situationsparametern zeigt die Grenzen des Verfahrens. Eine Verringerung des für die Situationsdefinition und Prüfung notwendigen Aufwandes ist deswegen nur dann zu realisieren, wenn diese Abhängigkeiten auf Sonderfälle begrenzt sind. Sofern geeignete statistische Daten vorliegen, muss daher eine Analyse der Abhängigkeiten von Situationsparametern erfolgen.

Anhand der Kontrollierbarkeitsbewertung von kollisionsvermeidenden und -lindernden Systemen mit Eingriff in die Längsdynamik, bei Betrachtung des nachfolgenden Fahrzeugs, ist die Anwendbarkeit des Relevanzbewertungsverfahrens in der Arbeit dargestellt. Dabei zeigt sich, dass insbesondere hinsichtlich der Parameterwahl und der statistischen Daten zahlreiche Annahmen notwendig sind, da die bestehende Datenlage als unzureichend zu bewerten ist. Diese Annahmen sind dokumentiert und können zukünftig

---

tig für die Anwendung auf ähnliche Systeme geprüft, durch weiterführende Studien ersetzt und gegebenenfalls erweitert werden.

Die ausgewählten Parameter sind auf der ersten Detaillierungsstufe quantifiziert und auf Basis existierender Studien und weiterer statistischer Daten mit Expositionswahrscheinlichkeiten versehen. Um die Auswirkung von „Restanteilen“, bedingt durch Unsicherheiten zu betrachten, wurde in der Subklasse „Niederschlag“ ein Restanteil hinzugefügt, der eine sehr niedrige Kontrollierbarkeit aufweist. Die Relevanzbewertungsmethodik zeigt, dass dessen Einfluss, trotz geringer Expositionswahrscheinlichkeit, aufgrund eines hohen angenommenen Unkontrollierbarkeitsanteils groß ist. Die weitere Untersuchung der hinreichenden Modellierung solcher Betrachtungslücken wird daher für die zukünftige Verwendung des Ansatzes als unbedingt notwendig gesehen. Da sich die Problematik in ähnlicher Weise wie hinsichtlich der Wahl eines geeigneten Parameterkollektivs darstellt, könnten die dort analysierten Ansätze der Unsicherheitsmodellierung vermutlich auch hier herangezogen werden.

Neben den Expositionswahrscheinlichkeiten wird für die Relevanzbewertung, gemäß dem beschriebenen Ansatz, ein Unkontrollierbarkeitsanteil für die jeweiligen Situationsparameterausprägungen benötigt. Da hierfür keine bereits existierenden Daten gefunden werden konnten und in Probandenversuchen nur als besonders relevant bewertete Situationen betrachtet werden sollten, erfolgte in der vorliegenden Arbeit eine Kontrollierbarkeitsschätzung auf Basis einer Fahrerreaktionssimulation. Da kein für die gestellte Aufgabe als valide geltendes Fahrerreaktionsmodell vorlag, wurde in einem einfachen Ansatz die Fahrerreaktion bis zum Kontakt mit dem Bremspedal abgebildet. Um eine möglichst hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse für unterschiedliche Ausprägungen von kollisionsvermeidenden und -lindernden Systemen zu erreichen, erfolgte die Betrachtung von drei Verzögerungsstrategien des Führungsfahrzeugs bei zwei Ausgangsgeschwindigkeiten. Anhand der daraus geschätzten Unkontrollierbarkeitsanteile in Kombination mit den Expositionswahrscheinlichkeiten kann mit der entwickelten Relevanzbewertungsmethode eine Priorisierung der Situationen erfolgen, sodass nach objektiven Kriterien Situationen für die Untersuchung im Probandenversuch ausgewählt werden können.

Bei der Umsetzung in Probandenversuchen zeigt sich, dass hinsichtlich der Möglichkeiten zur Variation der Situationsparameter Einschränkungen hingenommen werden müssen. Diese sind begrenzt, einerseits durch die technischen Gegebenheiten der verfügbaren realen Testwerkzeuge für Kollisionssituationen und andererseits hinsichtlich der im Versuch konstant darstellbaren Fahrsituations- und Umgebungsparameter. Einige der notwendigen Versuche sind nach aktuellem Kenntnisstand vermutlich nur in Fahrsimulatoren darstellbar. Zusätzliche Erkenntnisse aus realen Situationen könnten hier Analogien anhand von Studien zum Fahr- und Fahrerverhalten (bspw. die Naturalistic Driving

Study<sup>244</sup> oder das EuroFOT-Projekt<sup>245</sup>) liefern. Mit solchen Daten könnte der Nachweis geführt werden, welche Situationen mit analogem Eindruck für den Fahrer in Alltagssituationen häufig auftreten und daher allgemein als kontrollierbar einzustufen sind.

Für die Bewertung der Fahrerreaktionen in Probandenversuchen wurde ein erweitertes Kontrollierbarkeitskriterium für längsdynamische Situationen abgeleitet, das den minimal in der Situation erreichten Abstand betrachtet. Die Auswertung zeigt, dass im Gegensatz zu dem, in der ISO 26262 beschriebenen, binären Unfallkriterium, durch diese detailliertere Betrachtung mit statistischen Methoden eine Vorhersage der Unkontrollierbarkeitsanteile auch mit vergleichsweise kleinen Probandenkollektiven ermöglicht wird. Ebenso kann identifiziert werden, in welchen Fällen eine Vergrößerung des betrachteten Probandenkollektivs den größten Einfluss auf die Kontrollierbarkeitsbewertung hat.

Die Abweichungen zwischen den Unkontrollierbarkeitsanteilen aus der Simulation, zu den im Versuch ermittelten, können in mehreren Ursachen begründet sein. Durch die Annahme der Vollverzögerung nach Verstreichen der Fahrerreaktionszeit im Simulationsmodell wird dort die Kontrollierbarkeit tendenziell überschätzt bzw. der ermittelte Wert stellt gegebenenfalls die obere Grenze der Kontrollierbarkeit dar. Dagegen wird bei der Auswertung der Probandenversuche in konservativer Annahme die untere Grenze der Kontrollierbarkeit ermittelt, dabei ist der 95 %-Vertrauensbereich aufgrund der geringen Anzahl gültiger Versuche groß.

Einen Fortschritt könnte folgende Erweiterung der Simulation bringen: Die untere Grenze der gemessenen Bremsreaktionsintensitäten der Fahrer bzw. die daraus resultierende Verzögerung des Folgefahrzeugs wird statt der Vollverzögerung als „Basisverzögerung“ in das Fahrerreaktionsmodell übernommen. Nach Ablauf der Reaktionszeit wird diese Basisverzögerung angesetzt, und der weitere Situationsverlauf betrachtet. Da es sich um eine Sicherheitsbewertung handelt, wird die daraus vermutlich resultierende konservative Kontrollierbarkeitsbewertung als vertretbar angenommen.

Für zukünftige Probandenversuche sind die identifizierten Anforderungen an die Messtechnik zu berücksichtigen. Diese muss eine zuverlässige Erfassung und Messung, auch in Situationen mit großen Relativgeschwindigkeiten, kleinen Endabständen und hohen Verzögerungen der beteiligten Fahrzeuge, gewährleisten. Ebenso ist die Streuung der Messergebnisse von Relativgeschwindigkeit und -abstand möglichst gering zu halten.

Die Anwendung der aus dem Probandenversuch ermittelten Unkontrollierbarkeitsanteile auf die Relevanzbewertungsmethodik zeigt, im Vergleich zu den aus der Simulation geschätzten Anteilen, die Auswirkungen auf die Kontrollierbarkeitsschätzung für unter-

---

<sup>244</sup> Neale et al.: 100 Car Naturalistic Driving Study, 2002

<sup>245</sup> Kessler et al.: EuroFOT, 2012

---

schiedliche Verzögerungsstrategien und für die Subklasse „Blickabwendung“. Die Versuchsergebnisse können für eine Kontrollierbarkeitsschätzung in der frühen Entwicklungsphase herangezogen werden. Im nächsten Schritt ist die Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere Fahrerassistenzsysteme mit Umfelderkennung und Eingriff in die Längs- und Querdynamik zu untersuchen.

Zusammenfassend konnten die notwendigen Schritte für eine objektive Kontrollierbarkeitsbewertung nicht situationsgerechter Auslösungen von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung gezeigt werden. Herausforderungen wurden identifiziert und Lösungsansätze entwickelt. Anhand des Anwendungsbeispiels eines kollisionsvermeidenden bzw. -lindernden Systems wurde die objektive Kontrollierbarkeitsbewertung durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen die Verwendbarkeit des Ansatzes.

---

## 9 Zusammenfassung

Moderne Fahrerassistenzsysteme erfassen die Verkehrssituation mit Umfeldsensoren und leiten daraus in potentiell kritischen Fällen Eingriffe auf die Fahrdynamik eines Fahrzeuges ab, die den Unfall vermeiden oder dessen Folgen lindern. Die Situation kann jedoch unvollständig erfasst bzw. nicht ausreichend detailliert beschrieben werden, sodass es zu einer nicht situationsgerechten Auslösung eines Eingriffs (bspw. einer Teilbremsung) kommen kann. Vor der Markteinführung solcher Systeme ist deswegen der Nachweis der Sicherheit dieser Produkte zu führen. Das durch ein System entstehende Risiko ist daher bereits zu Beginn der Entwicklung zu analysieren und zu quantifizieren. Risiko wird in den Ingenieurwissenschaften als das Produkt aus Eintretenshäufigkeit und Schadensschwere definiert. Sind Menschen eingebunden, sind auch deren Möglichkeiten zur Schadensabwendung durch einen korrigierenden Eingriff, als Kontrollierbarkeit bezeichnet, zu berücksichtigen.

Für die Absicherung von Fahrerassistenzsystemen ist daher eine objektive Kontrollierbarkeitsbewertung notwendig. Neben funktionalen Fehlern, deren Bewertung in der Norm ISO 26262 beschrieben ist, sind auch die funktionalen Unzulänglichkeiten zu betrachten. Funktionale Unzulänglichkeiten sind dabei Fälle, in denen das Fahrerassistenzsystem zwar innerhalb der Spezifikation arbeitet, die Systemreaktion aber trotzdem nicht der Situation angemessen ist.

Diese Fälle nicht situationsgerechter Auslösungen werden daher analysiert und in 3 Ebenen gegliedert. Die Einflussfaktoren bezogen auf diese Ebenen sind festgelegt und Herausforderungen bei der Definition von geeigneten Prüfsituationen für Kontrollierbarkeitsbewertung identifiziert worden. Anforderungen an die dafür notwendigen Daten, sowie der mindestens zu treibende Aufwand für die objektive Validierung sind ermittelt.

Um der resultierenden hohen Anzahl theoretisch notwendiger Prüfsituationen zu begegnen, wurde ein Ansatz zur objektiven Relevanzbewertung entwickelt, der es ermöglicht, durch Systematisierung und vereinfachende Annahmen den Mindestumfang der notwendigen Testsituationen schrittweise zu ermitteln. Das Vorgehen erlaubt dabei sowohl die Abbildung von zu Beginn der Entwicklung möglicherweise noch vorliegenden Unsicherheiten, als auch die sukzessive Erweiterung der statistischen Datenlage und die Einbindung von Ergebnissen aus Probandentests. Einhergehend ist gleichzeitig auch eine Priorisierung von Situationsfaktoren möglich, sodass im Vorfeld bewertet werden kann, für welche Parameterausprägungen Detaillierungen oder umfangreiche Probandentests auch eine Erhöhung des nachweisbaren Kontrollierbarkeitsanteils bringen.

---

Für die Anwendung des Ansatzes auf kollisionsvermeidende/-lindernde Systeme und um die grundsätzliche Anwendbarkeit zu zeigen, wurden in einem ersten Ansatz Situationsparameter für die Beschreibung von Fahrsituationen ausgewählt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Kontrollierbarkeit längsdynamischer Systeme bewertet. Daran anschließend wurden die Parameter diskretisiert, quantifiziert und anhand von Literaturquellen mit Expositionswahrscheinlichkeiten belegt.

Im nächsten Schritt erfolgte die Umsetzung in die Kontrollierbarkeitsbewertung. Dabei wurde die einleitende Kontrollierbarkeitssschätzung für die frühe Produktentwicklungsphase anhand einer Simulation durchgeführt. Dabei kam ein einfaches Fahrerreaktionsmodell zur Anwendung. Die daraus ermittelten Kontrollierbarkeitskennwerte wurden zusammen mit den zuvor festgelegten Expositionswahrscheinlichkeiten der Relevanzquantifizierungsmethodik zugeführt. Anhand dieser Ergebnisse erfolgte die Auswahl von Situationen für die Untersuchung im Probandenversuch.

Nach Definition eines Versuchslayouts für die Bewertung der Kontrollierbarkeit, wurden Probandenversuche mit insgesamt 86 Probanden durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Daran wurde einerseits die Gültigkeit der in der Simulation ermittelten Abschätzungen geprüft und andererseits auch Herausforderungen bei der Kontrollierbarkeitsbewertung in Probandenversuchen mit hoher Übertragbarkeit identifiziert.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der entwickelten Vorgehensweise eine objektive Kontrollierbarkeitsbewertung durchgeführt werden kann. Durch die Erweiterung des Kontrollierbarkeitskriteriums sind auch mit vergleichsweise kleinen Probandenkollektiven Aussagen auch für geringere Unkontrollierbarkeitsanteile möglich. Anhand der Erfahrungen aus dem Probandenversuch sind Anforderungen an Versuchsdesign und Versuchsdurchführung von Kontrollierbarkeitsuntersuchungen abgeleitet worden. Damit bieten die Ergebnisse eine gute Grundlage zur Erweiterung in zukünftigen Versuchen.

Damit weisen die Ergebnisse einen Weg aus dem beschriebenen Detaillierungsdilemma. Inwiefern die Methodik jedoch auf ähnliche Problemstellungen, insbesondere ähnliche Systeme anwendbar ist, konnte nicht untersucht werden, Hinweise, dass dies nicht möglich ist, wurden nicht gefunden.

---

# A Anhang

## A.1 Herleitung Anzahl Probandenversuche ISO 26262

Bei einer Kontrollierbarkeit von  $< 90\%$ , muss die Wahrscheinlichkeit, dass in einer Stichprobe das Gegenereignis „nicht beherrschbar“ nicht auftritt, kleiner als die zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit sein. Die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  ist die Gegenwahrscheinlichkeit zum geforderten Signifikanzniveau  $\gamma$  nach Formel A.1.

$$\alpha = 1 - \gamma \quad (\text{A.1})$$

Die allgemeine Form der Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable  $X$  den Wert  $k$ , als der Anzahl unkontrollierbarer Ereignisse in Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeit der Unkontrollierbarkeit  $p$ , mit der Gegenwahrscheinlichkeit der Kontrollierbarkeit  $q$ , und der Anzahl der Versuche  $n$  bei Annahme einer Binomialverteilung ist in Formel A.2<sup>246</sup> dargestellt.

$$f(X = k | n) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot q^{n-k} \quad (\text{A.2})$$

Für  $k = 0$ , es tritt kein unkontrollierbares Ereignis auf verkürzt sich Formel A.2 zu Formel A.3.

$$f(X = 0 | n) = q^n \quad (\text{A.3})$$

Diese muss kleiner gleich der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  sein, es gilt also Formel A.4.

$$q^n = \alpha \quad (\text{A.4})$$

Formel A.4 aufgelöst nach  $n$  ergibt Formel A.5.

$$n \leq \frac{\log_{10}(1 - \gamma)}{\log_{10} p_C} \quad (\text{A.5})$$

---

<sup>246</sup> s. Bortz: Statistik, 2005, S. 67

## A.2 Klimatologische Kenntage

Tabelle A-1: Zusammenfassung Klimatologische Kenntage<sup>247</sup>

	Eis- tage	Frost- tage	Sommer- tage (Max. ≥ 25°C)	Heiße Tage (Max. ≥ 30°C)	Tage mit				
					Niederschlag in mm			Hagel (Mai- September)	Schnee decke
					≥ 10	≥ 20	≥ 30		
Tage Gesamt 2010	56,7	113,8	35,2	10,6	24	5,7	1,9	0,9	90,8

<sup>247</sup> Booß et al.: Klimastatusbericht, 2010, S.18

## A.3 Simulation

### A.3.1 Simulationsergebnisse detailliert $v_{Start} = 60$ km/h

#### Basisanteil

Tabelle A-2: Basisanteil  $v_{Start} = 60$  km/h

Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50 \%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$	Stillstand
Teil	1,34 s	0,10 s	$\leq 10 \%$	Nein
Voll	1,42 s	0,07 s	$\leq 10 \%$	Ja
Gestuft	1,90 s	0,22 s	$\leq 1 \%$	Ja

#### Umgebungshelligkeit ( $K = 1$ )

Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von  $v_{Start} = 60$  km/h und einer Zeitlücke von  $\tau = 1,8$  s ergibt sich ein Abstand zum Zielfahrzeug von  $d_{Start} = 30$  m. Dies liegt noch innerhalb der Scheinwerferreichweite (vgl. Kapitel 6.3.1). Daher wird keine Unterscheidung hinsichtlich der Umgebungshelligkeit angenommen.

#### Niederschlag ( $K = 2$ )

Tabelle A-3: Niederschlag  $v_{Start} = 60$  km/h

	Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50 \%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$	Stillstand
Regen ( $q = 2$ )	Teil	0,93 s	0,10 s	$\leq 20 \%$	Nein
	Voll	1,50 s	0,09 s	$\leq 1 \%$	Nein
	Gestuft	1,94 s	0,22 s	$\leq 1 \%$	Nein
Schnee/Eis ( $q = 3$ )	Teil	3,59 s	0,45 s	$\leq 1 \%$	Ja
	Voll				
	Gestuft				
Nebel ( $q = 4$ )	Unter Annahme einer Sichtweite von 75 m werden hier die Werte des Basisanteils eingesetzt				

\* weil an Kraftschlussgrenze

**Verkehrsdichte/ Längsabstand ( $K = 3$ )**Tabelle A-4: Verkehrsdichte/Längsabstand  $v_{Start} = 60$  km/h

	Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50 \%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$	Stillstand
Niedrig ( $q = 1$ )	Teil	1,00 s	0,04 s	$\leq 10 \%$	Nein
	Voll	0,36 s	0,03 s	$\geq 90 \%$	Nein
	Gestuft	0,85 s	0,07 s	$\leq 20 \%$	Nein
Hoch ( $q = 3$ )	Teil	2,26 s	0,23 s	$\leq 1 \%$	Ja
	Voll	1,78 s	0,17 s	$\leq 1 \%$	Ja
	Gestuft	2,25 s	0,49 s	$\leq 1 \%$	Ja

**Blickabwendung ( $K = 4$ )**

Unter der Annahme, dass kurze Blickabwendungen von ca. 0,5 – 1 s in den Reaktionszeiten bereits enthalten sind, wird für lange Blickabwendungen ( $q = 2$ ) zusätzlich 0,75 s Reaktionszeit angesetzt.

Tabelle A-5: Blickabwendung  $v_{Start} = 60$  km/h

Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50 \%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$	Stillstand
Teil	0,59 s	0,10 s	$\leq 50 \%$	Nein
Voll	0,67 s	0,07 s	$\leq 40 \%$	Ja
Gestuft	1,15 s	0,22 s	$\leq 10 \%$	Ja

**A.3.2 Simulationsergebnisse detailliert  $v_{Start} = 80$  km/h****Basisanteil**Tabelle A-6: Basisanteil  $v_{Start} = 80$  km/h

Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50 \%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$	Stillstand
Teil	1,57	0,18	$\leq 1 \%$	Nein
Voll	0,60	0,13	$\leq 50 \%$	Nein
Gestuft	1,09	0,39	$\leq 10 \%$	Nein

**Umgebungshelligkeit ( $K = 1$ )**

Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von  $v_{Start} = 80$  km/h und einer Zeitlücke von  $\tau = 1,8$  s ergibt sich ein Abstand zum Zielfahrzeug von  $d_{Start} = 40$  m. Dies liegt noch innerhalb der Scheinwerferreichweite (vgl. Kapitel 6.3.1). Daher wird keine Unterscheidung hinsichtlich der Umgebungshelligkeit angenommen.

**Niederschlag ( $K = 2$ )**Tabelle A-7: Niederschlag  $v_{Start} = 80$  km/h

	Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50\%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$	Stillstand	$t_{tr, Start}$ ohne Stillstand	$v$ Ohne Stillstand
Regen ( $q = 2$ )	Teil	1,09	0,18	$\leq 10\%$	Nein		
	Voll	0	0,13	$\leq 10\%$	Nein		
	Gestuft	0,65	0,39	$\leq 40\%$	Nein		
Schnee/Eis ( $q = 3$ )	Teil	4,16	0,78	$\leq 1\%$	Ja	0*	$\leq 10\%$
	Voll	4,16	0,78	$\leq 1\%$			
	Gestuft	4,16	0,78	$\leq 1\%$			
Nebel ( $q = 4$ )	Unter Annahme einer Sichtweite von 75 m werden hier die Werte Basisfalls eingesetzt						

\* weil an Kraftschlussgrenze

**Verkehrsdichte/Längsabstand ( $K = 3$ )**Tabelle A-8: Verkehrsdichte/Längsabstand  $v_{Start} = 80$  km/h

	Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50\%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$	Stillstand	$t_{tr, Start}$ ohne Stillstand	$v$ Ohne Stillstand
Niedrig ( $q = 1$ )	Teil	1,17	0,06	$\leq 10\%$	Nein	--	
	Voll	0,43	0,05	$\geq 90\%$	Nein	--	
	Gestuft	0,92	0,13	$\leq 20\%$	Nein	--	
Hoch ( $q = 3$ )	Teil	2,62	0,4	$\leq 1\%$	Ja	1,94	$\leq 1\%$
	Voll	2,05	0,29	$\leq 1\%$	Ja	0,76	$\leq 30\%$
	Gestuft	2,54	0,78	$\leq 1\%$	Ja	1,25	$\leq 10\%$

**Blickabwendung ( $K = 4$ )**

Unter der Annahme, dass kurze Blickabwendungen von ca. 0,5 – 1 s in den Reaktionszeiten bereits enthalten sind, wird für lange Blickabwendungen ( $q = 2$ ) zusätzlich 0,75 s Reaktionszeit angesetzt.

Tabelle A-9: Blickabwendung  $v_{Start} = 80$  km/h

Bremmung	$t_{tr, Start}$	$t_{erkenn 50\%}$	Schätzung Unkontrollierbarkeit $v$
Teil	0,59	0,10	$\geq 50\%$
Voll	-0,15	0,07	$\geq 90\%$
Gestuft	0,34	0,22	$\geq 90\%$

**A.3.3 Verbleibende Reaktionszeiten Simulation**Tabelle A-10: Relevanzfaktoren für  $v_{Start} = 80$  km/h (Basis Fall grau hinterlegt)

$v_{Start} = 80$ km/h			Teilbremsung		Vollbremsung		Gestufte Bremsung	
$K$	$q$	$\rho$	$v$	$\rho \cdot v$	$v$	$\rho \cdot v$	$v$	$\rho \cdot v$
2	1	0,74	0,01	0,0074	0,5	0,37	0,1	0,074
	2	0,20	0,1	0,02	0,01	0,002	0,4	0,08
	3	0,03	0,01	0,0003	0,01	0,0003	0,01	0,0003
	4	0,01	0,01	0,0001	0,5	0,005	0,1	0,001
	5	0,02	0,9	0,018	0,018	0,9	0,018	0,9
3	1	0,25	0,01	0,025	0,9	0,225	0,2	0,05
	2	0,50	0,01	0,005	0,5	0,25	0,1	0,05
	3	0,25	0,1	0,0025	0,01	0,0025	0,01	0,0025
4	1	0,80	0,01	0,008	0,5	0,4	0,1	0,08
	2	0,20	0,5	0,1	1	0,2	1	0,2

## A.4 Probandenversuche

### A.4.1 Messgrößen im Versuchsträger

Tabelle A-11: Zusammenstellung der erfassten Messgrößen im Versuchsträger

Messgröße	Quelle	Bezeichnung
Absolutzeit	Quarzuhr Messrechner	$t$
Abstand	Radarsensor	$d$
Relativgeschwindigkeit	Radarsensor	$v_{rel}$
Beginn kritische Situation	Umfeldkamera, Radarsensor	$t_{Start}$
Abbruch durch Target	Umfeldkamera, Radarsensor	$t_{Abbruch}$
Geschwindigkeit Ego-Fahrzeug	ESP-Steuergerät (CAN-Daten)	$v_{Ego}$
Druck Hauptbremszylinder	Drucksensor (CAN-Daten)	$p_{HBZ}$
Längsbeschleunigung	Längsbeschleunigungssensor (CAN-Daten)	$a_x$
ESP/ABS-Status	ESP-Steuergerät (CAN-Daten)	-
Blickabwendung	Gesichtskamera	-
Fußumsetzzeit	Fußraumkamera, Bremspedalkontakt (CAN-Daten)	-

## A.4.2 Probandenfragebogen Kontrollierbarkeit

### Fragebogen Teil B3

Probandennummer: _____
B12: Wie schätzen Sie die soeben erlebte Fahrsituation ein? Wie haben Sie reagiert?  <input type="checkbox"/> Die Situation hat keine Reaktion meinerseits erfordert. <input type="checkbox"/> Die Situation habe ich durch leichtes Bremsen entschärfen können. <input type="checkbox"/> Die Situation habe ich durch starkes Bremsen entschärfen können.
B13: Wie haben Sie die Unfallgefahr während des Manövers eingeschätzt  <input type="checkbox"/> sehr hoch <input type="checkbox"/> erhöht <input type="checkbox"/> gering <input type="checkbox"/> keine Gefahr
B14: Ich hatte die Situation jederzeit unter Kontrolle.  <input type="checkbox"/> trifft zu <input type="checkbox"/> trifft eher zu <input type="checkbox"/> trifft eher nicht zu <input type="checkbox"/> trifft nicht zu

## A.5 Einzelterme der Fehlerbetrachtung

$$\frac{\partial d_{min,end}}{\partial d_{rel}} = 1 \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial d_{min,end}}{\partial v_{rel}} = \frac{v_{Ego} + v_{rel}}{D_{Ziel}} \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial d_{min,end}}{\partial D_{Ziel}} = \frac{(v_{Ego} + v_{rel})^2}{2D_{Ziel}^2} \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{\partial d_{min,end}}{\partial v_{Ego}} = \frac{v_{Ego}}{D_{Ego}} + \frac{(v_{Ego} + v_{rel})}{D_{Ziel}} \quad (\text{A.9})$$

## A.6 Auswertung

Die Signifikanzniveaus sind  $\alpha = 0,05$  (gekennzeichnet mit \*) für signifikant,  $\alpha = 0,01$  (gekennzeichnet mit \*\*) für hochsignifikant und  $\alpha = 0,001$  (gekennzeichnet mit \*\*\*) für höchstsignifikant.

### A.6.1 Tabellen der statistischen Tests der Reaktionszeiten

Tabelle A-12 zeigt die Ergebnisse des Wilcoxon Rangsummentests auf Zugehörigkeit der Versuchsreihen zur gleichen Grundgesamtheit wie das Fahrermodell. Für die Versuche mit Ablenkung wurde eine konstante Verschiebung um  $\Delta t = 0,75$  s angenommen.

Tabelle A-12: Ergebnisse Wilcoxon Rangsummentests der Reaktionszeiten zur Gammaverteilung des Fahrermodells

Versuchsreihe	p-Wert
VR 1	0,004**
VR 2	0,018*
VR 3	0,038*
VR 4	0,515

Tabelle A-13: Ergebnisse der Lilliefors Tests der Reaktionszeiten

Versuchsreihe	p-Wert
VR 1	0,148
VR 2	0,827
VR 3	0,784
VR 4	0,633

Tabelle A-14: Ergebnisse der zweiseitigen t-Tests der Reaktionszeiten

	VR 1	VR 2	VR 3	VR4
VR1		0,611	0,124	$1,22 \cdot 10^{-11}^{**}$
VR 2			0,242	$4,59 \cdot 10^{-13}^{**}$
VR 3				$3,31 \cdot 10^{-11}^{**}$
VR 4				

Tabelle A-15: Ergebnisse der einseitigen t-Tests der Reaktionszeiten

	VR 1	VR 2	VR 3
VR 1		0,286	0,054
VR 2	0,714		0,121
VR 3	0,946	0,879	

## A.6.2 Tabellen der statistischen Tests der Maximalverzögerungen

Tabelle A-16: Ergebnisse der Lilliefors Tests der maximalen Verzögerungen

Versuchsreihe	p-Wert
VR 1	0,032*
VR 2	0,012*
VR 3	0,328
VR 4	0,001**

Tabelle A-17: Ergebnisse der Wilcoxon Rangsummentests der maximalen Verzögerungen

	<b>VR 1</b>	<b>VR 2</b>	<b>VR 3</b>	<b>VR4</b>
<b>VR1</b>		0,432	0,271	$1,30 \cdot 10^{-4**}$
<b>VR 2</b>			0,192	0,004*
<b>VR 3</b>				$1,29 \cdot 10^{-5**}$
<b>VR 4</b>				

### A.6.3 Tabellen der statistischen Tests der minimalen Abstände

Tabelle A-18: Ergebnisse der Lilliefors Tests der minimalen Abstände

<b>Versuchsreihe</b>	<b>p-Wert</b>
VR 1	0,871
VR 2	0,435
VR 3	0,426
VR 4	0,934

Tabelle A-19: Ergebnisse der zweiseitigen t-Tests der minimalen Abstände

	<b>VR 1</b>	<b>VR 2</b>	<b>VR 3</b>	<b>VR4</b>
<b>VR1</b>		0,219	0,038*	$7,89 \cdot 10^{-4**}$
<b>VR 2</b>			0,006**	0,092
<b>VR 3</b>				$2,32 \cdot 10^{-6**}$
<b>VR 4</b>				

Tabelle A-20: Ergebnisse der einseitigen t-Tests der minimalen Abstände

	<b>VR 1</b>	<b>VR 2</b>	<b>VR 3</b>	<b>VR4</b>
<b>VR1</b>		0,110	0,019*	$3,94 \cdot 10^{-4**}$
<b>VR 2</b>	0,890		0,003**	0,046*
<b>VR 3</b>	0,981	0,997		$1,16 \cdot 10^{-6**}$
<b>VR 4</b>	0,999	0,953	1,00	

### A.6.4 Tabellen der Absolutfehler der Versuche

Tabelle A-21: Absolutfehler der extrapolierten Endabstände bei VR 1 und VR 2

Versuchsreihe	Versuch	$d_{min, end}$ in m	$\Delta d_{min, end}$ in m	Einzelne Fehlerterme in m			
				$\Delta d_{rel}$	$\Delta v_{rel}$	$\Delta D_{Ziel}$	$\Delta v_{Ego}$
VR 1	A52	6,70	1,00	0,80	0,14	0,06	0,00
	A61	10,28	1,52		0,11	0,03	0,58
	A71	11,23	1,22		0,04	0,00	0,38
	A73	16,95	0,97		0,13	0,04	0,01
	A87	14,34	1,04		0,02	0,00	0,22
	A122	12,13	0,99		0,11	0,04	0,04
	A150	14,85	1,97		0,13	0,05	1,00
	A158	16,48	0,98		0,03	0,00	0,15
	A179	7,59	1,53		0,09	0,02	0,62
	A181	12,18	1,51		0,05	0,01	0,65
	A189	12,60	1,35		0,11	0,03	0,40
	A207	11,50	1,49		0,07	0,01	0,61
VR2	A38	15,48	0,99	0,80	0,01	0,00	0,18
	A64	13,00	0,92		0,01	0,00	0,12
	A72	9,01	1,46		0,04	0,00	0,62
	A82	18,26	1,09		0,02	0,00	0,26
	A88	8,97	1,99		0,27	0,21	0,71
	A98	6,10	1,36		0,17	0,08	0,31
	A138	12,84	0,91		0,03	0,00	0,08
	A162	11,46	0,90		0,08	0,02	0,01
	A169	13,12	1,04		0,01	0,00	0,23
	A176	0,36	2,26		0,15	0,06	1,26
	A217	2,40	1,94		0,07	0,01	1,05
	A236	9,26	1,11		0,02	0,00	0,28

Tabelle A-22: Absolutfehler der extrapolierten Endabstände bei VR 3 und VR4

Versuchsreihe	Versuch	$d_{min, end}$ in m	$\Delta d_{min, end}$ in m	Einzelne Fehlerterme in m			
				$\Delta d_{rel}$	$\Delta v_{rel}$	$\Delta D_{Ziel}$	$\Delta v_{Ego}$
VR 3	A58	15,33	1,93	0,80	0,15	0,06	0,92
	A59	13,71	1,97		0,13	0,05	0,99
	A60	16,88	2,13		0,16	0,07	1,11
	A70	17,53	1,12		0,11	0,03	0,17
	A81	18,86	1,57		0,14	0,05	0,57
	A92	16,84	1,68		0,24	0,16	0,49
	A163	17,55	2,42		0,22	0,13	1,26
	A165	7,34	1,84		0,06	0,01	0,97
	A168	16,41	1,80		0,15	0,06	0,80
	A178	12,75	1,61		0,18	0,09	0,55
	A225	12,26	1,89		0,17	0,08	0,83
	A243	19,78	1,38		0,25	0,17	0,16
	A252	12,26	3,34		0,35	0,35	1,84
	A253	13,13	1,91		0,18	0,09	0,84
VR 4	p01-6	11,11	1,90	0,80	0,33	0,31	0,46
	p02-1	5,45	1,44		0,09	0,02	0,53
	p03-6	12,75	1,05		0,04	0,00	0,21
	p04-1	-2,00	1,86		0,30	0,25	0,51
	p06-1	9,30	1,74		0,21	0,12	0,61
	p07-6	9,39	1,13		0,08	0,02	0,23
	p08-6	7,27	1,21		0,16	0,07	0,18
	p10-1	5,97	1,50		0,19	0,10	0,42
	p11-6	10,52	1,23		0,06	0,01	0,36
	p12-1	5,43	1,41		0,14	0,06	0,41
	p17-1	4,74	1,93		0,26	0,18	0,69
	p20-1	2,43	1,48		0,19	0,10	0,39
	p57-6	7,83	1,46		0,09	0,02	0,55
	p67-1	6,81	1,45		0,26	0,19	0,20

---

## Literaturverzeichnis

**Bachmann, V.; Zauchner, H.:** Erste Erfahrungen mit dem Automotive-Standard ISO 26262 und Ausblick auf die Adaptierung für Motorräder; Vortrag TU Darmstadt, 23.05.2013

**Bäumler, H.:** Reaktionszeiten im Straßenverkehr Teil 1-3; in: VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2007/2008, Bände 45/46, Ausgaben 11,12 und 1, S. 300 – 340 und S. 22 – 27

**BGH VI ZR 107/08:** BGH Urteil vom 16.06. 2009 - VI ZR 107/08; OLG Jena, Verfügbar unter: [lexetius.com/2009,1744](http://lexetius.com/2009,1744), Abruf am 05.12.2012

**Benda, H. v.:** Die Häufigkeit von Verkehrssituationen; FP 7320 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Technische Universität München, Lehrstuhl für Psychologie, 1977

**Benda, H. v.; Hoyos, C.; Schaible-Rapp, A.:** Klassifikation und Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen aus Fahrersicht; Forschungsbericht Nr. 89 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Köln, 1983

**Bertrandt Ingenieurbüro:** b.rabbit – das Bertrandt Targetsystem; Verfügbar unter: <http://www.bertrandt.de/Sicherheit.html>, Abruf am 12.12.2008

**Beuchert, O.:** Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB, Anwendungsorientierte Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005

**Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS):** Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2011, 2013

**Börzsök, J.:** Funktionale Sicherheit; 3. Auflage, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 2011

**Bogenrieder, R.; Fehring, M.; Bachmann, R.:** Pre-Safe in Rear-End Collision Situations; in: 21nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 15. – 18. Juni, Stuttgart, 2009

**Booß, A.; Lefebvre, C.; Löpmeier, F.; et al.:** Klimastatusbericht 2010 DWD; Verfügbar unter: <http://www.dwd.de>, Abruf am 12.02.2013, 2010

**Bortz, J.:** Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler; 6. Auflage, Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2005

**Braun, H.; Ihme, J.:** Definition kritischer Fahrsituationen im Kraftfahrzeugverkehr – Eine Pilotstudie; in: Automobilindustrie, Nr. 3, 1982

- Breuer, J.:** Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 55 – 68
- Bronstein, I.; Semendjajew, K.:** Taschenbuch der Mathematik, Hrsg.: Grosche, G. Ziegler, V.; Ziegler, D., 24. Auflage, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, Verlag Nauka, Moskau, 1989
- Bruckmayr, E.; Reker, K.:** Neue Informationstechniken im Kraftfahrzeug; in: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Band 40, Ausgabe 1, 1994, S. 12 – 22
- Burckhardt, M.:** Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen; TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1985
- Czerwinski, N.:** Sichtweite in Regen; Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe, 1971
- Darms, M.:** Eine Basis-Systemarchitektur zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme; Dissertation, TU Darmstadt, 2007
- Dardar, R.; Gallina, B.; Johnsen, A.; et al.:** Industrial Experiences of Building a Safety Case in Compliance with ISO 26262; in: IEEE 23rd International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW), 27. – 30. November 2012, Dallas, USA, 2012, S. 349 – 354
- Statistisches Bundesamt (Destatis):** Verkehr aktuell; Fachserie 8, Reihe 1.1, 10/2012, 2012
- Domsch, C.; Negele, H.:** Einsatz von Referenzfahrsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen; in: 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 7. – 8. April, Garching bei München, 2008
- Donges, E.:** Fahrerhaltensmodelle; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 15 – 23
- Donges, E.:** Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen; in: Automobil-Industrie, Band 27, Ausgabe 2, 1982, S. 183 – 190
- Dosch, B.; David, A.:** Fahrerassistenzsysteme: Was brauchen und was wünschen Autofahrer; in: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme 22. VDI/VW-Gemeinschaftstagung, 12. – 13. Oktober 2006, Wolfsburg, 2006
- Duden:** Verfügbar unter: <http://www.duden.de>, Abruf am 27.04.2013
- DWD Wetterlexikon:** Verfügbar unter: <http://www.dwd.de/lexikon>, Abruf am 03.05.2013
- Ebel, S.; Wilhelm, U.; Grimm, A.; et al.:** Ganzheitliche Absicherung von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an ISO 26262; in: Integrierte Sicherheit und Fahrerassis-

tenzsysteme 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung, 06. – 07.10.2010, Wolfsburg, 2010, S. 393 – 405

**Eckert, M.:** Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr; 1. Auflage, Verlag Technik, Berlin, München, 1993

**EG 78/2009:** Verordnung (EG) Nr. 78/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Januar 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen im Hinblick auf den Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern; 2009

**Ellinghaus, D.:** Wetter und Autofahren, Eine Untersuchung über den Einfluß des Wetters auf das Unfallgeschehen und die Verkehrssicherheit; Uniroyal Verkehrsuntersuchung, 1983

**EuroNCAP:** (Pre-)Crash; Verfügbar unter: <http://de.euroncap.com/de/results/aeb/survey.aspx>, Abruf am 02.06.2013

**EuroNCAP:** Rewards; Verfügbar unter: <http://www.euroncap.com/rewards.aspx>, Abruf am 02.06.2013

**Fach, M.; Baumann, F.; Breuer, J.; et al.:** Bewertung der Beherrschbarkeit von Aktiven Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen an den Funktionsgrenzen; in: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme 26.VDI/VW-Gemeinschaftstagung, 06. – 07.10.2010, Wolfsburg, 2010, S. 425 – 435

**Fastenmeier, W.:** Situationsspezifisches Fahrerverhalten und Informationsbedarf verschiedener Fahrergruppen; in: Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation – Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme, Verlag TÜV Rheinland, Köln, Deutscher Psychologen Verlag, Bonn, 1995, S. 141 – 179

**Fastenmeier, W.:** Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem; in: Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation – Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme, Verlag TÜV Rheinland, Köln, Deutscher Psychologen Verlag, Bonn, 1995, S. 27 – 78

**Fastenmeier, W.; Gstalter, H.:** Driving Task Analysis as a Tool in Traffic Safety Research and Practice, in: Safety Science, Band 45, Ausgabe 9, November 2007, S. 952 – 979

**Fecher, N.:** Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung; Dissertation, TU Darmstadt, 2005

**Fecher, N.; Fuchs, K.; Hoffmann, J.; et al.:** Aktive Gefahrenbremsungen - Wie reagiert das Fahrer-Fahrzeug-System?; in: ATZ, Band 111, Ausgabe 2, 2009, S. 144 – 151

**Felix, D.:** Einheit der Rechtsordnung – zur verfassungsrechtlichen Relevanz einer juristischen Argumentationsfigur; Mohr-Siebeck Verlag, Tübingen, 1998

**Follmer, R.; Gruschwitz, D.; Jesske, B.; et al.:** Mobilität in Deutschland 2008, Ergebnisbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends; Verfügbar unter: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008\\_Abschlussbericht\\_I.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf), Abruf am 11.09.2012, 2008

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen:** Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung; 1996

**Gasser, T. M.; Arzt, C.; Ayoubi, M.; et al.:** Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung; Forschungsbericht Nr. F83 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Fahrzeugtechnik, Köln, 2012

**Geyer, S.; Baltzer, M.; Franz, B.; et al.:** Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance; in: IET Intelligent Transport Systems, Zur Veröffentlichung angenommen, 2013

**Green, M.:** 'How Long Does It Take to Stop?' Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times; in: Transportation Human Factors, Band 2, Ausgabe 3, 2000, S. 195 – 216

**Hackenberg, U.; Heißing, B.:** Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr; in: ATZ, Band 84, Ausgabe 7/8, 1982, S. 341 – 345

**Hesse, S.:** Grundlagen der Handhabungstechnik; 1. Auflage, Carl Hanser Fachbuchverlag, Leipzig, 2006

**Hillenbrand, J.:** Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung; VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008

**Hoffmann, E.; Mortimer, R.:** Scaling of Relative Velocity between Vehicles; in: Accident Analysis and Prevention, Band 28, Ausgabe 4, 1996

**Hoffmann, J.:** Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen; Dissertation, TU Darmstadt, 2008

**Hollnagel, E., Woods, D.:** Joint Cognitive System; Taylor & Francis Group, Boca Raton, London New York Singapore, 2005

**Huemer, A.; Vollrath, M.:** Ablenkung durch fahrfremde Tätigkeiten – Machbarkeitsstudie; Forschungsbericht Nr. 225 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Mensch und Sicherheit, Köln, 2012

**Hugemann, W.:** Driver Reaction Times in Road Traffic; in: 11th Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis, 06. – 07. September 2002, Portoroz, Slovenia, 2002

- Hummel, T.; Kühn, M.; Bende, J.; et al.:** Advanced Driver Assistance Systems, An investigation of their potential safety benefits based on an analysis of insurance claims in Germany; Unfallforschung der Versicherer (UdV) Research Report FS 03, 2011
- IEC DIN EN 61508:** Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems; International Electrotechnical Commission; 2010
- ISO 31000:** Richtlinien und Prinzipien zur Implementierung des Risikomanagements; 2009
- ISO 15622:** Adaptive Cruise Control Systems; 2010
- ISO 26262 – 1:** Road vehicles – Functional safety – Part 1: Vocabulary; 2009
- ISO 26262 – 3:** Road vehicles – Functional safety – Part 3: Concept phase; 2009
- Jebas, C.:** Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten; Diplomarbeit, Fachhochschule Jena, 2006
- Jebas, C.:** Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen; Forschungsbericht Nr. 66 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Fahrzeugtechnik, Köln, 2008
- Kemmann, S.; Trapp, M.:** SAHARA -A Systematic Approach for Hazard Analysis and Risk Assessment; in: SAE 2011 World Congress & Exhibition, 12. – 14. April 2011, Detroit, USA, 2011
- Kempen, B.:** Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen; in 3. Sachverständigentag 25. – 26. Februar 2008, Berlin, 2008
- Kessler, C.; Etemad, A.; Alessandretti, G.; et al.:** EuroFOT – Final Report, Deliverable D11.3; 2012
- Kiefer, R.; Cassar, M.; Flannagan, C.; et al.:** Surprise Braking Trials, Time-to-Collision Judgments, and “First Look” Maneuvers Under Realistic Rear-End Crash Scenarios; NHTSA Report DOT HS 809 902, 2005
- Klauer, S; Guo, F.; Sudweeks, J.; et al.:** An Analysis of Driver Inattention Using a Case-Crossover Approach 100-Car Data: Final Report; NHTSA Report DOT HS 811 334, 2010
- Knetsch, T.:** Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen; Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2004
- Kobiela, F.:** Fahrerintentionserkennung für autonome Notbremssysteme; 1. Auflage, VS-Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2011

**König, W.:** Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 33 – 42

**Kopf, M.:** Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen?; in: Maurer, M.; Stiller, C.: Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005, S. 117 – 140

**Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** Bundeseinheitlicher Tatbestandskatalog, Straßenverkehrsordnungswidrigkeiten; Stand: 01.04.2013, 9. Auflage, Verfügbar unter: [http://www.kba.de/cln\\_031/nn\\_190298/DE/ZentraleRegister/VZR/BT\\_\\_KAT\\_\\_OWI/bkat\\_owi\\_01042013\\_\\_pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/bkat\\_owi\\_01042013\\_\\_pdf.pdf](http://www.kba.de/cln_031/nn_190298/DE/ZentraleRegister/VZR/BT__KAT__OWI/bkat_owi_01042013__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/bkat_owi_01042013__pdf.pdf)

**Kunert, U.; Radke, S.:** Personenverkehr in Deutschland – mobil bei hohen Kosten; DIW-Wochenbericht, Band 79, Ausgabe 24, 2012, S. 3 – 12

**Kyte, M.; Khatib, Z.; Shannon, P.; et al.:** Effect of Environmental Factors on Free-Flow Speed; in: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Band 1776, 2001, S. 60 – 68

**Losano, M. G.:** Turbulenzen im Rechtssystem der modernen Gesellschaft: Pyramide, Stufenbau und Netzwerkcharakter der Rechtsordnung als ordnungsstiftende Modelle; in: Rechtstheorie, Band 38, Ausgabe 1, 2007, S. 9 – 32

**Mages, M.; Winner, H.; Hopstock, M.:** Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistenz - Erkennung von Gefahrensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen; in: VDI-Tagung Fahrer im 21. Jahrhundert, 14. – 15. November 2007, Braunschweig, 2007

**Maurer, M.:** Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 43 – 54.

**Maurer, M.:** Forward Collision Warning and Avoidance; in: Eskandarian, A.: Handbook of Intelligent Vehicles, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2012, S. 657 – 687.

**Metz, B.:** Worauf achtet der Fahrer?; Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2009

**Mitschke, M.; Wallentowitz, H.:** Dynamik der Kraftfahrzeuge; 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003

- Mörbe, M.:** Fahrdynamik-Sensoren für FAS; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 94 – 109
- Müller, P.:** Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik; Lexikon der Stochastik, 3. Auflage, Akademie-Verlag, Berlin, 1980
- Muttart, J.:** Factors that Influence Driver's Response Choice Decisions in Video Recorded Crashes; in: 2005 SAE World Congress & Exhibition, 11. – 14. April 2005, Warrendale, USA, 2005
- National Meteorological Library and Archive:** Fact sheet No. 3 – Water in the atmosphere; Verfügbar unter: [http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/4/1/No.\\_03\\_-\\_Water\\_in\\_the\\_Atmosphere.pdf](http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/4/1/No._03_-_Water_in_the_Atmosphere.pdf), Abruf am 03.05.2013
- Neale, V., Klauer, S., Knipling, R., et al.:** The 100 Car Naturalistic Driving Study, Phase 1 – Experimental Design; NHTSA Report DOT HS809 536, 2002
- Neukum, A.; Lübbecke, T.; Krüger, H.-P.; et al.:** ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen; in: 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme, 2. – 4. April 2008, Walting im Altmühltal, 2008, S. 141 – 150
- Nitz, G.:** Entwicklung eines Systems zur aktiven Bremsung eines Fahrzeugs in Gefahrensituationen; Shaker-Verlag, Aachen, 2010
- Olson, P.; Farber, E.:** Forensic Aspects of Driver Perception and Response; 2. Auflage, Lawyers & Judges Publishing Company Inc., Tucson, 2003
- Pankalla, H.; Salzberger, R.; Hänsel, E.:** Fahrerassistenz und integrale Sicherheit; in: ATZExtra, Ausgabe 11, 2010, S. 204 – 207
- Popper, K.:** Logik der Forschung; Mohr Siebeck-Verlag, Tübingen, 2005
- Praxenthaler, M.:** Experimentelle Untersuchung zur Ablenkungswirkung von Sekundäraufgaben während zeitkritischer Fahrsituationen; Dissertation, Universität Regensburg, 2003
- PReVENT:** Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS; 13.08.2009, 2009
- ProdHaftG:** Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte; Ausfertigungsdatum: 15.12.1989, Zuletzt geändert durch Art. 9 Abs. 3 G v. 19.7.2002 I 2674, Verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/prodhaftg/gesamt.pdf>, Abruf am 03.01.2013
- Radke, S.:** Verkehr in Zahlen; Jahrgang 40, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2012
- Reichart, G.:** Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen; VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001

- Roth, J.:** Untersuchungen zur Kraftübertragung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn unter besonderer Berücksichtigung der Kraftschlußerkennung am rotierenden Rad; Dissertation, TU Darmstadt, 1993
- Sayer, J.; Devonshire, J.; Flannagan, C.:** The Effects of Secondary Tasks on Naturalistic Driving Performance; Transportation Research Institute (UMTRI), 2005
- Schlag, B.; Petermann, I., Weller, G.; et al.:** Mehr Licht – mehr Sicht – mehr Sicherheit?, Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten; VS-Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2009
- Schmidt, R.; Thews, G.:** Physiologie des Menschen; 22. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1985
- Schmitt, J.; Breu, A.; Maurer, M.; et al.:** Simulation des Bremsverhaltens in Gefahrensituationen mittels experimentell validiertem Fahrermodell; in: 4. VDI-Fachtagung Fahrer im 21. Jahrhundert, 14. – 15. November, Braunschweig, 2007, S. 75 – 88
- Stählin, U.:** Eingriffsentscheidung für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung; Dissertation, TU Darmstadt, 2008
- Ständer, T.; Becker, U.; Schnieder, E.:** Branchenspezifische Normen und Standards Aufwand, Nutzen und Herausforderungen; in: Tagung Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 13. – 14. Februar 2008, Braunschweig, 2008
- Ständer, T.:** Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262; Dissertation, TU Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 2011
- Stiller, C.:** Fahrerassistenzsysteme; in: Maurer, M.; Stiller, C.: Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005, S. 1 – 20
- Strasser, B.; Siegel, A.; Siedersberger, K.-H.; et al.:** Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen; 4. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 15. – 16. April 2010, München, 2010
- Stutts, J.; Feaganes, J.; Rodgman, E.; et al.:** Distractions in Everyday Driving; Report University of North Carolina at Chapel Hill, 2003
- StVO:** Straßenverkehrs-Ordnung vom 6. März 2013 (BGBl. I S. 367); in Kraft getreten am 1.4. 2013, Verfügbar unter: [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/stvo\\_2013/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/stvo_2013/gesamt.pdf), Abruf am 12.04.2013
- Teuchert, S.:** ISO 26262 – Fluch oder Segen?; in: ATZelektronik, Band 7, Ausgabe 6, 2012, S. 410 – 415
- Tromp, J.:** Splash and Spray by Lorries, Band 85, Ausgabe 5, Institute for Road Safety Research SWOV, The Netherlands, 1985

**United Nations:** Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr; Verfügbar unter: [http://www.admin.ch/ch/d/sr/0\\_741\\_10/index.html](http://www.admin.ch/ch/d/sr/0_741_10/index.html), Abruf am 15.01.2012

**Unsel, T.; Mayer, C.; Chin, E.; et al.:** Assessment of behavioral aspects in integrated safety systems; in: 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 13. – 16. Juni, Washington, USA, 2011

**Victor, T.:** Keeping Eye and Mind on the Road; Dissertation Acta Universitatis Upsalensis, 2005

**V-Modell:** Verfügbar unter: [http://www.cio.bund.de/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell\\_xt\\_node.html](http://www.cio.bund.de/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell_xt_node.html), Abruf am 16.06.2013

**Werkmeister, K.; Englisch, H.:** Die ISO 26262 für Motorrad Erfahrungen bei der Umsetzung bei BMW Motorrad; in: 9. Internationale Motorradkonferenz Institut für Zweiradsicherheit e.V., 1. – 2. Oktober 2012, Köln, 2012

**WYHLIDAL, F.:** Technical Dictionary of Automotive Engineering; Online-Ausgabe, 2012

**Winner, H.:** Frontalkollisionsschutzsysteme; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 522 – 542

**Winner, H.:** Radarsensorik; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 123 – 171

**Winner, H.; Hakuli, S.; Bruder, R.; et al.:** Conduct-by-Wire – ein neues Paradigma für die Weiterentwicklung der Fahrerassistenz; in: 4. Workshop Fahrerassistenzsysteme, 4. – 6. Oktober 2006, Löwenstein/Höblinsülz, 2006

**Wördenweber, B.; Boyce, P.; Hoffman, D.; et al.:** Automotive Lighting and Human Vision; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007

**Yilmaz, E.; Warren, W.:** Visual Control of Braking: A Test of the  $\tau$ -Hypothesis; in: Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Band 21, Ausgabe 5, 1995, S. 996 – 1014

---

## Eigene Veröffentlichungen

**Rodemerck, C.; Habenicht, S.; Weitzel, A.; Winner, H.; Schmitt, T.:** Development of a general criticality criterion for the risk estimation of driving situations and its application to a maneuver-based lane change assistance system; in: 2012 International IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops, 3. – 7. Juni 2012, Alcalá de Henares, Spanien, 2012

**Weitzel, A.; Winner, H.:** Ansatz zur Kontrollierbarkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund der ISO 26262; in: 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme 26. – 28. September 2012, Walting im Altmühltal, 2012, S. 15 – 25

**Weitzel, A.:** Objective Controllability Assessment for Unintended ADAS Reactions; in: Maurer, M.; Winner, H.: Automotive Systems Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2013

**Weitzel, A.; Winner, H.; Cao, P.; Geyer, S.; Lotz, F.; Sefati, M.:** Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung; Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Fahrzeugtechnik, Köln, in Druck

**Weitzel, A.; Winner, H.:** Controllability Assessment for Unintended Reactions of Active Safety Systems; in: 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 27. – 30. Mai 2013, Seoul, 2013

**Winner, H.; Wolf, G.; Weitzel, A.:** Freigabefälle des Autonomen Fahrens; in: 15. VDI-Tagung Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, 16. – 17. November 2010, Baden-Baden, 2010

**Winner, H.; Weitzel, A.:** Quo vadis, FAS?; in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 658 – 667.

---

## Betreute studentische Arbeiten

**Ackermann, T.:** Visual Distraction of Drivers. NSF Research Experience for Undergraduates (REU) Abschlussbericht, 2012

**Allig, J.:** Entwicklung einer Methodik für die Ableitung von Szenarien für die Bewertung von Fehl-/Falschaulösungen. Diplomarbeit Nr. 492/11, 2011

**Bergmann, A.:** Konzeption einer fahrzeugunabhängigen Messeinrichtung zur Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Bachelor-Thesis Nr. 994/09, 2009

**Buzolin, R.; Gerl, F.; Hassis, A.; Kasabov, S.; Koev, S.:** Entwicklung einer austauschbaren Seilwinde für das EVITA-Zugfahrzeug. Advanced Design Project Nr. 26/09, 2009

**Cai, L.:** Assistenz-, Infotainment- und Kommunikationssysteme für urbane Fahrzeug. Forschungsseminar Nr. 057/12, 2012

**Chen, F.; Grotenhöfer, C.; Morhart, J.; Roßmann, P.; Schraft, B.; Siegl, B.; Yu, L.:** Entwicklung von Rahmenkonzepten für das Dummy Target von EVITA. Advanced Design Project Nr. 28/10, 2010

**Hartwig, M.:** Untersuchung der Auswirkungen von Fahrerablenkung in Notbremsituationen bei unterschiedlichen Warnstrategien. Master-Thesis Nr. 510/12, 2013

**Hauschildt, B.:** Literaturrecherche Testverfahren und -werkzeuge für Frontalkollisionschutzsysteme. Bachelor-Thesis Nr. 1052/10, 2011

**Hofmann, R.:** Verifikation von Radarreflexionen über Fahrzeugkarosserien mit unterschiedlichen Radarsensoren/-verfahren. Diplomarbeit Nr. 496/11, 2012

**Khan, R.:** Objektive Bewertungsmethoden der funktionalen Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen. Forschungsseminar Nr. 070/12, 2013

**Knobloch, D.:** Entwicklung einer Bremsanlage für das Testwerkzeug EVITA. Bachelor-Thesis Nr. 1012/09, 2010

**Krasni, A.; Güth, S.; Riffel, V.; Rot, I.:** Entwicklung eines kollisionstoleranten Targechecks für die Prüfung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Advanced Design Project Nr. 32/10, 2010

**Kunz, P.:** Entwicklung einer Messdatenerfassung und Auswertung für Kontrollierbarkeitsbewertung. Bachelor-Thesis Nr. 1124/12, 2012

**Lesouef, J.:** Potentialanalyse eines leichten Personenkraftwagens (600kg Auto gestern und heute). Diplomarbeit Nr. 469/09, 2010

**Rodemerck, C.:** Analyse und Entwicklung von Bewertungsmaßstäben für die Kritikalität von Fahrsituationen. Master-Thesis Nr. 490/11, 2011

**Schilling, B.:** Auslösealgorithmen für Testwerkzeuge von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Bachelor-Thesis Nr. 1072/11, 2011

**Schröder, T.:** Entwicklung eines Zughängers für das Testwerkzeug EVITA. Bachelor-Thesis Nr. 1023/10, 2010

**Specht, A.:** Analyse des Einflusses von Umweltbedingungen auf fahrdynamisch relevante Fahrerassistenzfunktionen. Bachelor-Thesis Nr. 1089/11, 2011

**Teufel, A.:** Identifikation Situationsanalogien zu nicht situationsgerechten Auslösungen von Fahrerassistenzfunktionen. Bachelor-Thesis Nr. 1100/12, 2012

**Tsubakitani, Y.:** Entwicklung eines Versuchsdesigns zur Kontrollierbarkeitsbewertung von aktiven Sicherheitssystemen. Bachelor-Thesis Nr. 1119/12, 2012

**Wagner, S.:** Analyse des Forschungsfahrzeugs uni-car 2000 vor dem Hintergrund heutiger technischer Entwicklungen und aktueller Forschungsaktivitäten Potentialanalyse eines leichten Personenkraftwagens (600kg Auto gestern und heute). Diplomarbeit Nr. 473/10, 2010

---

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Dirk Alexander Weitzel  
Geburtsdatum: 14.04.1983  
Geburtsort: Friedberg (Hessen)

## Schulzeit

1989 – 1993 Adolf-Reichwein-Schule Friedberg (Hessen)  
1993 – 2002 Augustiner-Schule Friedberg (Hessen)

## Studium

2002 – 2008 Studium Allgemeiner Maschinenbau  
Technische Universität Darmstadt

## Berufstätigkeit

2008 – 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeug-  
technik der Technischen Universität Darmstadt