

Systematische Auswertung von Testfällen für Fahrfunktionen im modularen virtuellen Testbaukasten

Fabian Schuldt*, Bernd Lichte†, Markus Maurer‡ und Stephan Scholz§

Zusammenfassung: In modernen Kraftfahrzeugen findet eine immer stärkere Demokratisierung der Fahrerassistenzsysteme in der mittleren und unteren Fahrzeugklasse statt. Für einen geeigneten Serieneinsatz benötigen die Systeme eine hohe Testabdeckung und einen hohen Reifegrad. Eine Möglichkeit diese hohe Testabdeckung zu generieren, stellt der in diesem Beitrag vorgestellte modulare virtuelle Testbaukasten dar. Dieser verfolgt das Ziel, die Anzahl der benötigten Testfälle für eine gleichbleibende Testabdeckung durch geeignete Variationen von Szenarien zu minimieren. Im Beitrag werden der modulare virtuelle Testbaukasten und verschiedene Auswertungsverfahren für kombinatorische Testfälle vorgestellt. Des Weiteren werden die Anwendung des Testbaukastens sowie die Testfallauswertung anhand der Fallstudie eines Baustellenassistenten skizziert.

Schlüsselwörter: modularer virtueller Testbaukasten, kombinatorisches Testen, Design of Experiments, Testauswertung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Viele Fahrerassistenzsysteme haben in den letzten Jahren Serienreife erlangt und sind mittlerweile fester Bestandteil der oberen und mittleren Fahrzeugklasse [20]. Als Beispielsystem ist das ACC (Adaptive Cruise Control) zu nennen, welches seit der Einführung einige Entwicklungsstufen durchlaufen hat (Full Speed Range ACC). Ein weiteres, in der Serie etabliertes, System ist der sogenannte Spurhalteassistent (lane keeping assist system), der den Fahrer bei der Querführung unterstützt. Insgesamt ist zu beobachten, dass die entwickelten Fahrfunktionen in steigendem Umfang in die Längs- und Querführung des Fahrzeugs eingreifen. Aktuelle Forschungsprojekte wie UR:BAN [15] zeigen, dass die Fahrerassistenzsysteme in Zukunft nicht nur auf Autobahnen und Schnellstraßen, sondern auch gezielt für städtische Szenarien entwickelt werden. Diese Szenarien stellen erhöhte Anforderungen an die Fahrfunktion, welche sich durch dichten Verkehr, unstrukturierte

*Fabian Schuldt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig, Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig (e-mail: schuldt@ifr.ing.tu-bs.de).

†Bernd Lichte ist Akademischer Rat am Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig, Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig (e-mail: lichte@ifr.ing.tu-bs.de).

‡Markus Maurer ist Professor am Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig, Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig (e-mail: maurer@ifr.ing.tu-bs.de).

§Stephan Scholz ist Projektleiter im Unternehmen Volkswagen AG, Berliner Ring 2, 38440 Wolfsburg (e-mail: stephan.scholz1@volkswagen.de).

Randbebauungen sowie komplexe Verkehrssituationen insbesondere in Kreuzungsbereichen auszeichnen.

Ein sicherer Einsatz solcher Systeme im öffentlichen Straßenverkehr kann nur gewährleistet werden, wenn vor einer Serieneinführung ein technisch erforderlicher Reifegrad und eine ausreichende Testtiefe nachgewiesen wurde. Die Testtiefe ist hierbei üblicherweise direkt mit einer entsprechend hohen Anzahl von Einzeltests verbunden. Die Anzahl der nötigen Einzeltests steigt wiederum mit der Komplexität der Anwendungsszenarien. Welchen Umfang eine Absicherung eines auf der Autobahn automatisiert fahrenden Fahrzeugs annehmen kann, hat H.Winner skizziert [20]. Dieser schätzt den Testaufwand für die Absicherung einer Funktionsversion auf ca. 50 Millionen Testkilometer, was Kosten in Höhe von 50 Millionen Euro verursachen würde. Bei jeder Änderung der Funktionsversion (Softwarestand) müssten diese Tests für eine Absicherung zumindest teilweise wiederholt werden. Die Abschätzung zeigt, wie aufwändig die Generierung einer ausreichenden Testtiefe für die funktionale Absicherung ist. Für Systeme, die auf innerstädtische Szenarien fokussieren, wird die Absicherung wesentlich aufwendiger, da die Zahl der Einflussparameter sowie deren Variationen im Vergleich zu Autobahnen oder Schnellstraßen und der damit verbundene Testaufwand immens ansteigt. Abbildung 1 stellt gemäß der nach Gasser [4] eingeführten Stufen der automatisierten Fahrfunktionen eine vereinfachte Abschätzung des damit verbundenen Testaufwands dar.

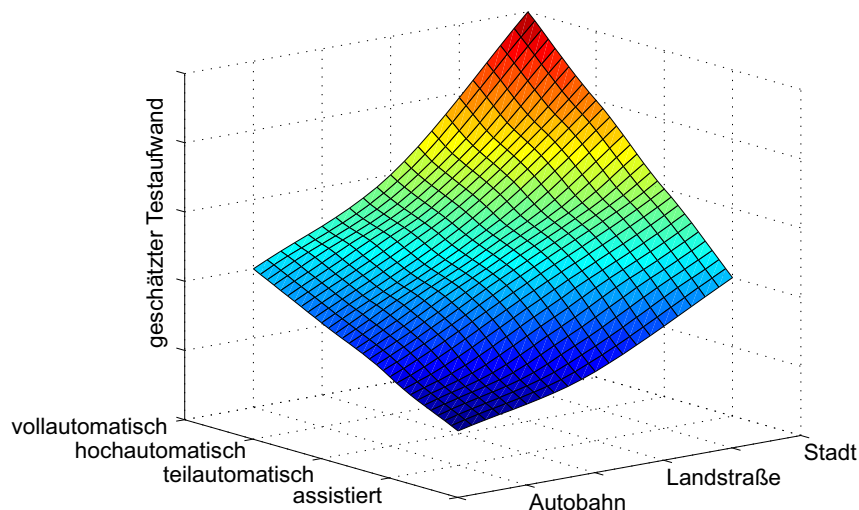


Abbildung 1: Vereinfachte Schätzung des Testaufwands auf verschiedenen Automatisierungsstufen

1.2 Bisherige Arbeiten

Die Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen stellt eine große Herausforderung dar. Aktuelle Systeme werden über eine fehlerfreie Funktion über eine bestimmte Anzahl von Testkilometern abgesichert [20]. Ein Beispiel für den Umfang der Testkilometer wurde in der Einleitung gezeigt. Es müssen somit geeignete Methoden gefunden werden, um die Systeme nachhaltig mit einem umsetzbaren und vertretbaren Umfang abzusichern.

Alternative Ansätze zeigen, dass die Simulation einen entscheidenden Teil zur Optimierung der Absicherung beitragen kann. Der Beitrag von ERTICO-ITS Europe [14] stellt dar, in welchen Phasen der Entwicklung einer Funktion die Simulation als Testwerkzeug

verwendet werden kann. Nentwig et. al. [10, 11, 12] zeigen, dass die Ergebnisse von Tests in einer Software-in-the-Loop Simulation und Realtests vergleichbar sind und die Simulation für den Test von Fahrfunktionen verwendet werden kann. Im Beitrag von Tideman [19] wird der Test eines automatisch abblendenden Lichtsystems in der Simulation gezeigt.

Der Beitrag [13] skizziert, wie die Simulation bei dem Test von kamerabasierten Fahrfunktionen unterstützen kann. Dies wird anhand eines Spurhalteassistenten demonstriert. Es werden einige exemplarische Tests mit fünf Einflussparametern durchgeführt. Jedoch werden keine kombinatorischen Verfahren zur Generierung einer definierten Testabdeckung verwendet. Des Weiteren wird keine systematische Testauswertung durchgeführt.

Ein alternativer Ansatz für die Verwendung der Simulation beim Test von Fahrfunktionen wird in den Beiträgen [2, 5] beschrieben. Beim Vehicle-Hardware-in-the-Loop (V-E-H-I-L) befindet sich das zu testende Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand. Die Zustandsdaten, wie zum Beispiel der Lenkwinkel und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, werden der Simulation übergeben. Die anderen Verkehrsteilnehmer der Simulation werden durch fahrende Plattformen realisiert, die sich relativ zum Fahrzeug auf dem Prüfstand bewegen. Beim Vehicle-in-the-Loop (V-I-L) bewegt sich das Fahrzeug auf einem Prüfgelände. Die Bewegungen werden simultan in die Simulation übergeben. Die anderen Verkehrsteilnehmer werden dem Fahrer durch eine Visualisierungsbrille dargestellt. Die beiden Ansätzen zeigen, wie die Simulation für realitätsnähere Tests verwendet werden kann. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag ein V-I-L ähnlicher Ansatz für die Testdurchführung verwendet.

Die Methoden des „Design of Experiments“ und der Taguchis Qualitätsverlustfunktionen werden in vielen Bereichen zur Optimierung von Prozessen verwendet. Der Beitrag von Khorramshahgol [6] zeigt, wie sich die Qualitätsverlustfunktionen im Bereich der Qualitätssicherung anwenden lassen. Es werden Experimente auf verschiedenen Faktorstufen durchgeführt und optimale Faktorstufen durch Qualitätsverlustfunktionen identifiziert. Bei den Tests von Fahrfunktionen sind ähnliche Problemstellungen vorhanden. Es müssen ebenfalls die Einflüsse von verschiedenen Parametern bestimmt werden. Aus diesem Grund wurden das Vorgehen und die Bewertungsmethoden in diesem Beitrag durch die Qualitätsverlustfunktionen und das Design of Experiments motiviert.

1.3 Aufbau des Beitrags

Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau des modularen virtuellen Testbaukastens skizziert. Dabei werden die Funktionen der einzelnen Ebenen vorgestellt. Im dritten Abschnitt dieses Beitrags wird speziell auf die Testfallauswertung im modularen virtuellen Testbaukasten eingegangen. Es werden verschiedene Bewertungsverfahren aufgezeigt. Im vierten Abschnitt wird die Fallstudie eines Baustellenassistenten vorgestellt und erste Ergebnisse der Testauswertung skizziert. Bei dem System handelt es sich um ein Assistenzsystem, welches dem Fahrer bei der Durchfahrt von Baustellen assistiert. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über weitere Forschungsarbeiten gegeben.

2 Modularer Testbaukasten

In diesem Abschnitt wird der Ansatz des modularen virtuellen Testbaukastens vorgestellt. Der Testbaukasten verfolgt das Ziel, die nötigen Tests für die Absicherung von

Fahrerassistenzsystemen bei einer gleichbleibenden Testabdeckung in Grenzen zu halten. Das Konzept, welches im Beitrag [16] vorgestellt wurde, zeigt einen Ansatz zur effizienten systematischen Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen. Dieser Ansatz wird aufgegriffen und zu einem modularen Testbaukasten für das Testen von Fahrfunktionen in Simulationen weiterentwickelt. In welchem Rahmen die Tests in der Simulation für eine Absicherung von Fahrfunktionen eingesetzt werden können, zeigt der Beitrag [1]. Der Testbaukasten realisiert den Anspruch, die Absicherung einer Vielzahl von Fahrfunktionen, d.h. vom assistierten bis zum vollautomatisierten Fahren, abzudecken. Abbildung 2 zeigt das Konzept des modularen Testbaukastens.

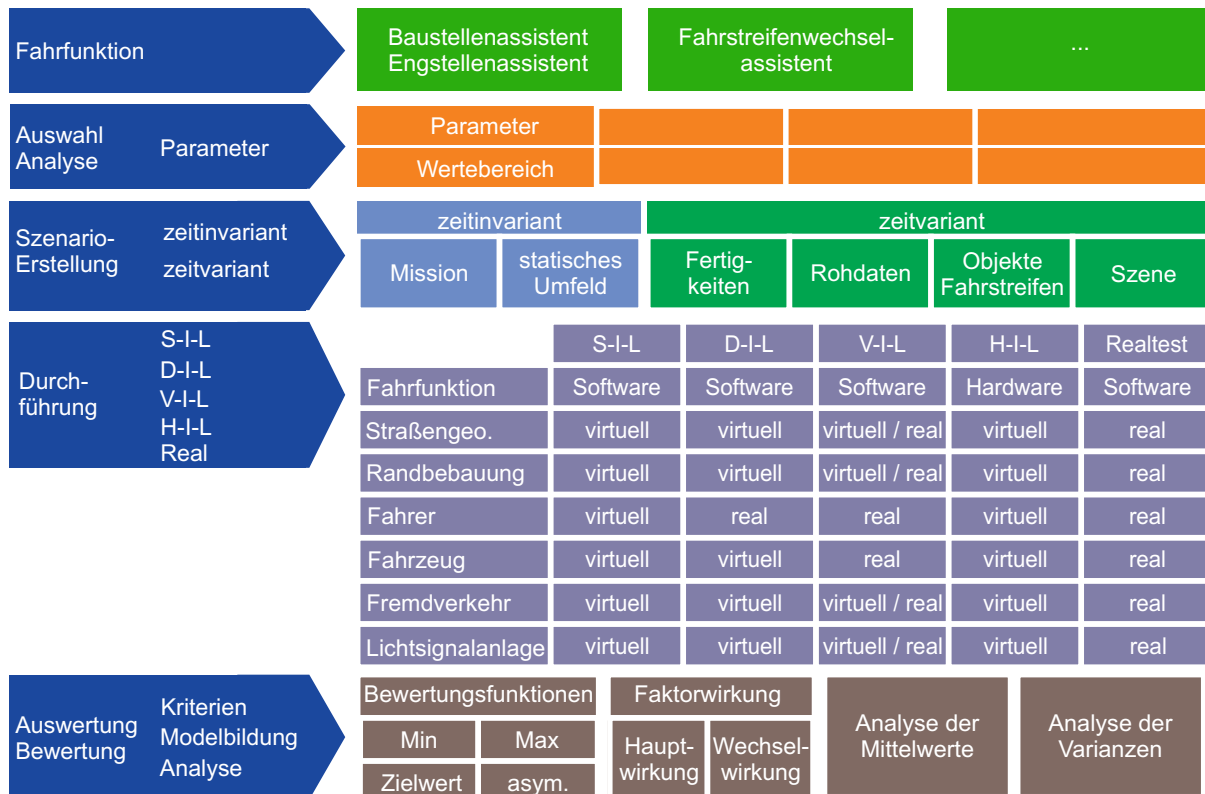


Abbildung 2: Konzept des modularer Testbaukastens. Abkürzungen: S-I-L: Software in the loop, D-I-L: Driver in the loop, V-I-L: Vehicle in the Loop, H-I-L: Hardware in the loop

Auf der ersten Ebene wird die zu testende Fahrfunktion festgelegt. Darauf folgt eine Auswahl und Analyse von relevanten Einflussparametern, die für die Fahrfunktion von Bedeutung sind. Es werden geeignete Wertebereiche der Parameter identifiziert und Diskretisierungsstufen für stetige Größen festgelegt. Auf der dritten Ebene werden die Szenarien für den Test der Fahrfunktion generiert. Dabei werden sowohl zeitinvariante als auch zeitvariante Größen definiert. Bei den zeitinvarianten Größen handelt es sich beispielsweise um das statische Umfeld und die Mission der Fahrfunktion. Die zeitvarianten Größen können Fertigkeiten, Sensorrohdaten, Objekt- und Fahrstreifenhypothesen oder aber komplette Szenen sein. Eine Szene wird hierbei als eine räumliche und zeitliche Anordnung von statischen und dynamischen Objekten aus der Sicht eines Betrachters interpretiert [9]. Abbildung 3 zeigt einige statische und dynamische Bestandteile einer Szene. Das Szenario wird durch kombinatorische Verfahren parametrisiert. Dabei werden

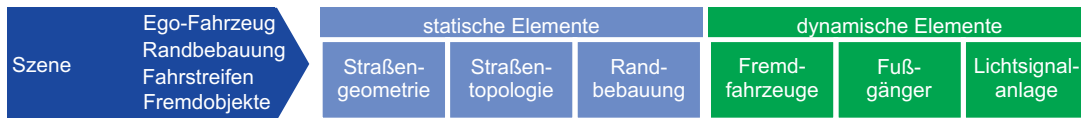


Abbildung 3: Bestandteile einer Szene nach Maurer [9]

die Stufen der einzelnen Einflussparameter so variiert, dass beispielsweise jedes Paar von Stufen der Einflussparameter in mindestens einem Testfall vorhanden ist [8]. Der modulare Testbaukasten sieht eine Durchführung der Testfälle auf verschiedenen Testebenen vor. Es wird unterschieden zwischen Tests auf den Ebenen Software-in-the-Loop (S-I-L), Driver-in-the-Loop (D-I-L), Vehicle-in-the-Loop (V-I-L), Hardware-in-the-Loop (H-I-L) und Realtests. Auf jeder Testebene werden verschiedene Simulationen durchgeführt. Eine Übersicht, welche Elemente auf den verschiedenen Ebenen simuliert werden, ist in Abbildung 2 dargestellt. Je nach Fahrfunktion und Test ist eine geeignete Testebene für die Testdurchführung auszuwählen. Abschließend werden die Testfälle anhand von eindeutigen Bewertungskriterien systematisch ausgewertet. Ziel ist die Analyse und Bewertung der Ergebnisse in Bezug zu der Parametrisierung der verschiedenen Testfälle. Dabei werden Haupt- und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren identifiziert und verschiedene Funktionen zur Bewertung verwendet. Eine Beschreibung einiger Elemente der systematischen Testauswertung des modularen virtuellen Testbaukastens wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

3 Systematische Testfallauswertung

Die systematische Testauswertung wird anhand von verschiedenen Bewertungskriterien für die Fahrfunktionen durchgeführt. Ziel der Auswertung ist es, die Effekte, d.h. die mittlere Veränderung der Qualitätsmerkmale in Folge von gezielten Stufenvariationen, zu bestimmen. Dabei wird zwischen Haupt- und Wechseleffekten unterschieden. Um die Wirkungen der einzelnen Stufen der Einflussparameter zu identifizieren, kann eine Analyse der Mittelwerte (ANOM) durchgeführt werden [7, 17]. Zur besseren Vergleichbarkeit wird eine Normierung der unterschiedlichen Kriterien mit Hilfe von sogenannten Qualitätsverlustfunktionen durchgeführt. Die für die Fallstudie verwendeten Verfahren Qualitätsverlustfunktion und ANOM werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

3.1 Qualitätsverlustfunktionen

Die Qualitätsverlustfunktionen haben das Ziel, die unterschiedlichen Bewertungskriterien zur besseren Vergleichbarkeit zu normieren. Die Funktion beschreibt den Qualitätsverlust, welchen die Fahrfunktion verzeichnet, sobald der gemessene Wert y vom Sollwert m abweicht. Der maximal erlaubte Qualitätsverlust wird als A_0 bezeichnet und wird bei $m \pm \Delta_0$ erreicht. Sobald der Wert A_0 überschritten ist, wird der Test als nicht bestanden bewertet. Es wird zwischen Zielwert-, Maximierungs- und Minimierungsfunktion sowie asymmetrischer Verlustfunktion unterschieden [18]. Für jedes Kriterium wird eine geeignete Verlustfunktion, die maximal erlaubte Abweichung vom Sollwert und deren maximaler Qualitätsverlust gewählt.

Tabelle 1: Qualitätsverlustfunktionen

	Zielwert-Qualitätsmerkmal	Minimierungsmerkmal
Formel	$L(y) = k(y - m)^2$ $= \frac{A_0}{\Delta_0^2}(y - m)^2$	$L(y) = ky^2$ $= \frac{A_0}{\Delta_0^2}y^2$
	Asymmetrische Verlustfunktion	Maximierungsmerkmal
Formel	$L(y) = \begin{cases} \frac{A_0}{\Delta_0^2}(y - m)^2, & \text{für } y > m \\ \frac{A_1}{\Delta_1^2}(y - m)^2, & \text{für } y \leq m \end{cases}$	$L(y) = \frac{k}{y^2}$ $= \frac{A_0 \Delta_0^2}{y^2}$

3.2 Mittelwertanalyse (ANOM)

Die Analyse der Mittelwerte dient zur qualitativen Abschätzung der Haupteffekte von den unterschiedlichen Faktorstufen der Einflussparameter auf die verschiedenen Bewertungskriterien. Zur Bestimmung der Haupteffekte wird zunächst für jedes Bewertungskriterium der Mittelwert \bar{Y}_{ij} für jede Stufe j eines Faktors i über die Messwerte y_{ijk} gebildet [7]. Weiterhin wird der Mittelwert des Bewertungskriteriums über alle Testfälle gebildet:

$$\bar{Y}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} y_{ijk}}{n_j} \quad \forall \quad j = 1 \dots J \quad \bar{\bar{Y}}_i = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{Y}_{ij}}{J}.$$

Die Hauptwirkung einer Faktorstufe \bar{Y}_{ij} wird durch die Abweichung vom Gesamtmittelwert $\bar{\bar{Y}}_i$ geschätzt.

4 Fallstudie eines Baustellenassistenten

Die Anwendung des Testbaukastens und speziell die Testfallauswertung wird im Folgenden anhand der Fahrfunktion eines prototypisch umgesetzten Forschungsstand eines Baustellenassistenten in einer statischen Fallstudie exemplarisch mit einer Auswahl von Einflussparametern demonstriert. Statisch bedeutet in diesem Fall, dass keine Fremdfahrzeuge in den Szenarien auftreten. Das System hat die Aufgabe, dem Fahrer bei der Querführung während der Durchfahrt von Baustellen zu assistieren. Es müssen verschiedene Fahrstreifenverschwenkungen durchfahren werden, die durch eine definierte Länge und Fahrstreifenablage beschrieben werden und durch eine Randbebauung begrenzt sind. Das Verschwenkungsmaß ergibt sich aus dem Verhältnis von Verschwenkungsablage zu Verschwenkungslänge. Tabelle 2 fasst die Einflussparameter zusammen, die während der Analyse identifiziert wurden. Als Stufen wurden geeignete Werte aus den geltenden Normen gewählt [3]. Für eine vollständige Testabdeckung müssten sämtliche Kombinationen der einzelnen Stufen der verschiedenen Einflussparameter getestet werden, was zu 2160 Testfällen führen würde. Zur Reduzierung der Testfälle und für die Erstellung des Testplans wurde in dieser Fallstudie der kombinatorische Ansatz IPO-G aus dem Beitrag von Lei et. al. [8] verwendet. Da nur noch Paarkombinationen der Parameterstufen getestet werden, konnte die Anzahl der Tests auf 36 Fälle reduziert werden. Tabelle 3 zeigt einen Ausschnitt des reduzierten Testplans mit Paarkombinationen der Faktorstufen. Für die

Tabelle 2: Übersicht der Einflussparameter eines statischen Baustellenszenarios

Einflussparameter	Stufen					
Verschwenkungsablage [m]	3.5	7.0	10.5	14.0		
Verschwenkungsmaß	1 : 5	1 : 7	1 : 10	1 : 15	1 : 20	1 : 25
Randbebauung	Leitbake	Leitkegel	Leitwand			
Abstand der Randbebauung [m]	5.0	7.0	9.0	11.0	13.0	
Behelfsfahrstreifenbreite [m]	2.5	2.75	3.0	3.25	3.5	3.75

Durchführung der Tests wurde ein V-I-L ähnlicher Ansatz gewählt [2]. Es wurde mit einem realen Fahrzeug durch virtuelle Baustellen gefahren. Die Elemente der Baustelle wurden dem Fahrer auf einem Bildschirm angezeigt. Die Informationen über die virtuelle Randbebauung wurden durch Sensormodelle an die Fahrfunktion übergeben. Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Testfälle wurden die Baustellen mit einer konstanten Geschwindigkeit von $60 \frac{km}{h}$ durchfahren. Der Fahrer hatte während der Durchfahrt die Hände nicht am Lenkrad, sodass nur die Fahrfunktion einen Einfluss auf die Querregelung des Fahrzeugs hatte. Tabelle 4 zeigt die gewählten Bewertungskriterien und deren Qualitätsverlustfunktion für die Fallstudie. Ziel der Auswertung ist es, die Faktorstufen zu identifizieren, die einen signifikanten Einfluss auf die Qualitätsmerkmale haben.

Tabelle 3: Reduzierter Testplan, *-don't care Werte

Testfall	Verschwenkungsmaß	Verschwenkungsablage	Art der Randbebauung	Abstand der Randbebauung	Fahrstreifenbreite
1	1:5	3.5	Leitbake	5	2.5
2	1:5	7	Leitwand	7	2.75
3	1:5	10.5	Leitkegel	9	3.0
...
36	*	1:25	*	*	3.75

Tabelle 4: Bewertungskriterien für die Auswertung der Tests. Abkürzungen: B: Breite, Fs: Fahrstreifen, Fzg: Fahrzeug

Bewertungskriterium	Zielwert m	erlaubte Abweichung Δ_0	Qualitätsverlust A_0	Qualitätsverlustfunktion
Randbebauung min. Abstand [m]	—	0.03	100	max
Fahrstreifen max. Ablage [m]	0	$(B_{Fs} - B_{Fz})/2$	100	Zielwert
Varianz der Ablage [m ²]	0	1.0	100	min
Querb beschleunigung maximal [m/s ²]	0	3	50	Zielwert

Mit Hilfe der Qualitätsverlustfunktionen wird der jeweilige Qualitätsverlust für die einzelnen Bewertungskriterien berechnet. Die Ergebnisse für das Bewertungskriterium minimaler Abstand ist in Abbildung 4 dargestellt. Es wurde der mittlere Qualitätsverlust der einzelnen Stufen der Einflussfaktoren Verschwenkungsmaß und Fahrstreifenbreite aufgetragen. Abbildung 5 zeigt die Qualitätsverluste, welche durch die maximale Ablage im eigenen Fahrstreifen hervorgerufen wird. Diese wurden ebenfalls mit dem mittleren Qualitätsverlust auf den Stufen der Bewertungskriterien Verschwenkungsablage und Abstand der Randbebauung bewertet. Abbildung 4 zeigt, dass es eine hohe negative Korrelati-

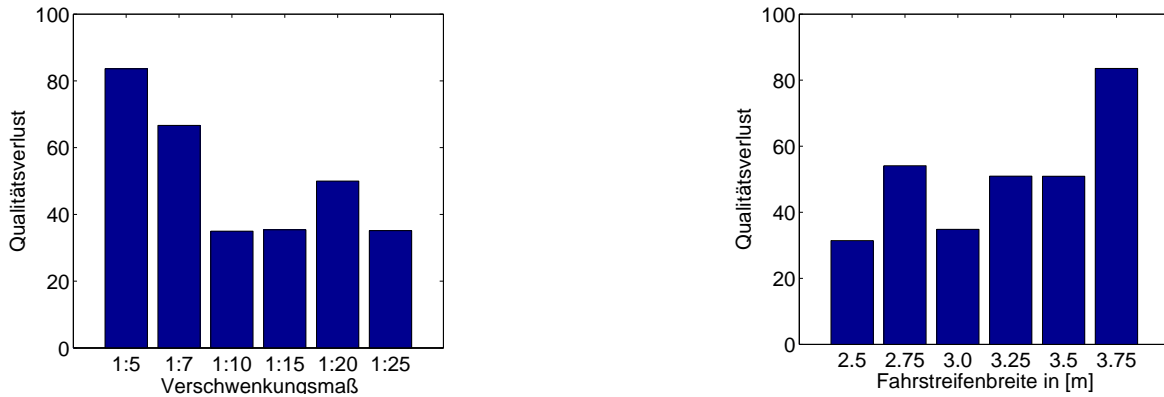


Abbildung 4: Qualitätsverluste durch den minimalen Abstand zur Randbebauung

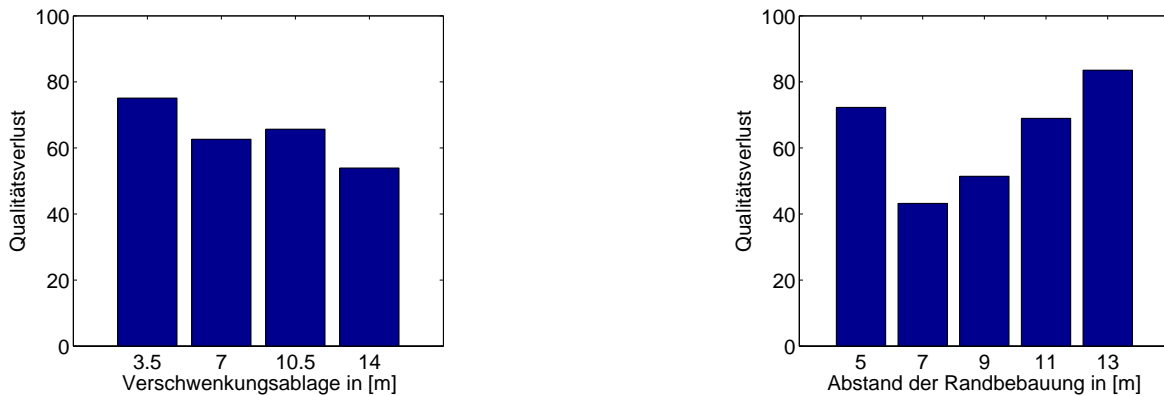


Abbildung 5: Qualitätsverluste durch die maximale Fahrstreifenablage

on zwischen dem Verschwenkungsmaß und dem Qualitätsverlust durch den minimalen Abstand zur Randbebauung gibt. Mit einem fallenden Verschwenkungsmaß steigt der Qualitätsverlust und somit fällt die Performance der Fahrfunktion. Des Weiteren zeigt Abbildung 4, dass mit einer steigenden Fahrstreifenbreite der Qualitätsverlust ebenfalls steigt und somit eine positive Korrelation vorhanden ist, die allerdings nicht so stark ausgeprägt ist, wie die Korrelation des Verschwenkungsmaß. Abbildung 5 zeigt, dass die Verschwenkungsablage und der Qualitätsverlust durch die maximale Ablage im eigenen Fahrstreifen ebenfalls korrelieren. Eine steigende Verschwenkungsablage führt zu einem fallenden Qualitätsverlust. Somit hat die Fahrfunktion bei der Faktorstufe 3.5m den größten Qualitätsverlust. Weiterhin zeigt sich eine positive Korrelation zwischen dem Abstand der Randbebauung und dem Qualitätsverlust durch die maximale Fahrstreifenablage. Auffällig ist die Stufe 5m mit einem hohen Qualitätsverlust, die nicht zur Korrelation passt. Bei der Analyse der Testfälle zeigt sich, dass von den 7 Versuchen, die auf dieser

Stufe durchgeführt wurden, 3 Versuche mit einer Verschwenkungsablage von 3.5m durchgeführten wurden und somit der hohe Qualitätsverlust auf diesen Faktor zurückzuführen ist.

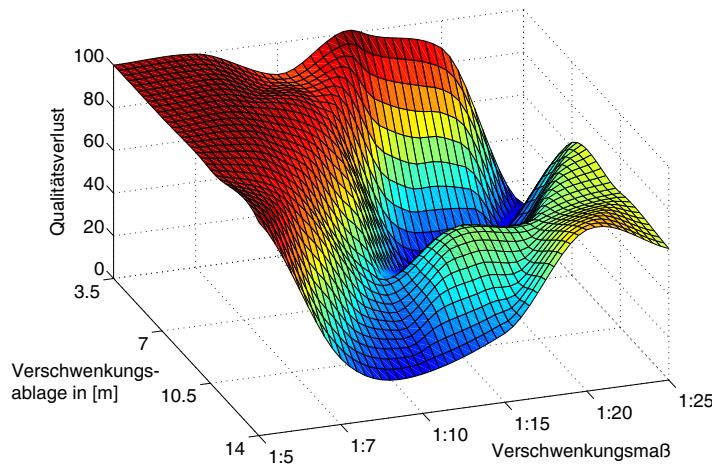


Abbildung 6: maximaler Qualitätsverlust durch den minimalen Abstand zur Randbebauung und der Ablage im eigenen Fahrstreifen anhand der Einflussfaktoren Verschwenkungsablage und Verschwenkungsmaß

Abbildung 6 zeigt den maximalen Qualitätsverlust der Bewertungskriterien minimaler Abstand zur Randbebauung und Verschwenkungsmaß. Dieser wird anhand der Einflussfaktoren Verschwenkungsablage und Verschwenkungsmaß aufgetragen. Das Ergebnis der Auswertung zeigt, dass ein geringes Verschwenkungsmaß und eine geringe Verschwenkungsablage zu einem maximalen Qualitätsverlust führen. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die beiden Einflussfaktoren einen verstärkenden Einfluss haben, da der Qualitätsverlust nicht linear ansteigt über die verschiedenen Faktorstufen. Abbildungen 7 und 8

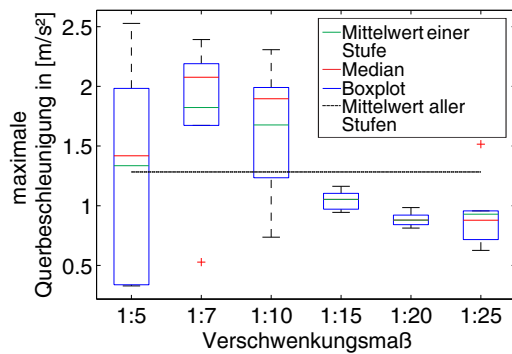


Abbildung 7: Maximale Querbeschleunigungen aufgetragen auf das Verschwenkungsmaß

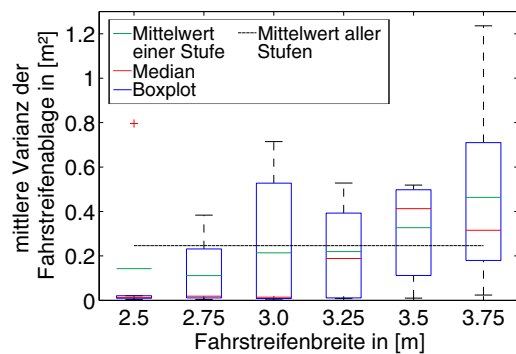


Abbildung 8: Mittlere Varianz der Ablage aufgetragen auf die Fahrstreifenbreite

zeigen die Ergebnisse der Analyse der Mittelwerte. Es werden die Effekte des Verschwenkungsmaß auf die maximal gemessene Querbeschleunigung bewertet. Die Messwerte zeigen, dass mit steigendem Verschwenkungsmaß die maximale Querbeschleunigung sinkt. Auffällig ist, dass der Wert bei der 1 : 5 Verschwenkungen zunächst gering ist. Dies ist

darin begründet, dass in den Testfällen auf dieser Faktorstufe die Fahrfunktion nicht in die Verschwenkung eingelenkt hat und somit keine Querbeschleunigung aufgebaut wurde. Weiterhin wird die mittlere Varianz der Ablage im eigenen Fahrstreifen anhand der Fahrstreifenbreite bewertet. Es zeigt sich, dass die Varianz der Ablage über die steigende Fahrstreifenbreite stetig zunimmt, was an einer nicht realisierten Fahrstreifenmittelführung liegt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde das Konzept eines modularen virtuellen Testbaukastens vorgestellt. Ziel des Baukastens ist die systematische Szenarioerstellung, Testung und Bewertung von Fahrfunktionen. Bei der Szenarioerstellung wurden kombinatorische Verfahren verwendet, um die Anzahl der Testfälle gezielt zu reduzieren. Weiterhin wurden Ansätze zur systematischen Testfallauswertung vorgestellt. Dabei wurde das Konzept der Analyse der Mittelwerte sowie der Qualitätsverlustfunktionen vorgestellt. Die Anwendung des modularen Testbaukastens und der systematischen Testfallauswertung wurde anhand der Fallstudie eines Baustellenassistenten erläutert. Trotz der reduzierten Anzahl von Testfällen konnten durch die Qualitätsverlustfunktionen Systemgrenzen identifiziert werden. Durch die Analyse der Mittelwerte wurden die Effekte der Faktorstufen für einige Bewertungskriterien gezeigt. Für zukünftige Forschungsarbeiten werden weitere Fallstudien mit Variationen der Parameterstufen durchgeführt. Dabei werden auch dynamische Objekte in die Szenarien integriert. Es soll unter anderem evaluiert werden, wie das Verhalten der dynamischen Objekte mit Hilfe des modularen Testbaukastens bewertet werden kann.

Literatur

- [1] A. Bartels, *High Automated Driving Functions: Future challenges and research needs from the perspective of Volkswagen group research*, TRB workshop on road vehicle automation, Stanford, Juli 2013
- [2] T. Bock, *Vehicle in the loop : Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme*, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2008
- [3] Bundesministerium für Verkehr, *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA)*, Kirschbaum, Bonn, 2009
- [4] T. M. Gasser, *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe* in Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Fahrzeugtechnik, 2012, Wirtschaftsverlag NW
- [5] F. Hendriks, R. Pelders, M. Tideman, *Future Testing of Active Safety Systems* in SAE International Journal of Passenger Cars- Electronic and Electrical Systems, 3(2), 170-175, 2010
- [6] R. Khorramshahgol, G. R. Djavanshir, *The Application of Analytic Hierarchy Process to Determine Proportionality Constant of the Taguchi Quality Loss Function* in Transactions on Engineering Management, 55(2), 340-348, 2008

- [7] B. Klein, *Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*, Oldenbourg, München, 2007
- [8] Y. Lei, R. Kacker, D. R. Kuhn, V. Okun, J. Lawrence, *IPOG/IPOG-D: efficient test generation for multi-way combinatorial testing* in *Journal of Software Testing, Verification and Reliability*, 18(3), 125-148, 2008
- [9] M. Maurer, *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, München, 2000.
- [10] M. Nentwig, M. Stamminger, *A Method for the Reproduction of Vehicle Test Drives for the Simulation Based Evaluation of Image Processing Algorithms* in *Proceedings of International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1307-1312, Madeira Island, Portugal, 2010
- [11] M. Nentwig, M. Stamminger, *Hardware-in-the-loop testing of computer vision based driver assistance systems* in *Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 339-344, Baden-Baden, 2011
- [12] M. Nentwig, M. Maximilian, M. Stamminger, *Concerning the Applicability of Computer Graphics for the Evaluation of Image Processing Algorithms* in *Proceedings of International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 205-210, Istanbul, Türkei, 2012
- [13] K.v. Neumann-Cosel, E. Roth, D. Lehmann, J. Speth, A. Knoll, *Testing of Image Processing Algorithms on Synthetic Data* in *Proceedings of International Conference on Software Engineering Advances (ICSEA)*, 169-172, Porto, Portugal, 2009
- [14] ERTICO-ITS Europe, *Response 3: code of practice for design and evaluation of adas*, Information Society, V5.0, 2009
- [15] W. Scholl, *UR:BAN - Homepage*, abgerufen 05.10.2013
- [16] F. Schuldt, F. Saust, B. Lichte, M. Maurer, S. Scholz, *Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen*, in *AAET 2013 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig, 2013
- [17] K. Siebertz, D.v. Bebber, T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung*, Springer Verlag, Heidelberg, 2010
- [18] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, *Taguchi's quality engineering handbook, Chapter 7: Introduction to the Quality Loss Function*, John Wiley, Michigan, 2005
- [19] M. Tideman, S. J. Janssen, *A Simulation Environment for Developing Intelligent Headlight Systems* in *Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 225-231, San Diego, CA, USA, 2010
- [20] H. Winner, S. Hakuli, G. Wolf, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, Kapitel 44: Quo vadis, FAS?*, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2009