

Funktionale Dekomposition - Ein Beitrag zur Überwindung der Parameterraumexplosion bei der Validation von höher automatisiertem Fahren

Christian Amersbach* und Hermann Winner†

Zusammenfassung: Ein statistischer Sicherheitsnachweis für hochautomatisiertes Fahren ist mit aktuellen Methoden, wie der Felderprobung, nicht möglich. Neuartige Methoden, bspw. szenario-basiertes Testen, könnten helfen dieses Dilemma zu lösen. Trotzdem führen die Vielzahl an Einflussparametern und deren Wertebereich zu einer riesigen Menge an möglichen Kombinationen innerhalb des Parameterraums. Da es aktuell noch zu wenig Erfahrung mit automatisierten Fahrfunktionen gibt, kann der benötigte Testraum nicht durch wissensbasierte Testfallerstellung reduziert werden. Partikuläres Testen mittels Funktionaler Dekomposition der Fahrfunktion kann potentiell dazu beitragen, diese Parameterraumexplosion zu überwinden. Basierend auf Beispielszenarien und Annahmen für die benötigte Testraumabdeckung und Diskretisierungsstufen der Einflussparameter scheint damit eine Reduktion des Testumfangs um bis zu zwei Größenordnungen möglich.

Schlüsselwörter: Automatisiertes Fahren, Funktionale Dekomposition, Parameterraum, PEGASUS

1 Einleitung

Die technische Entwicklung automatisierter Fahrzeuge hat ein Niveau erreicht, das eine baldige Markteinführung erlauben würde. Der Markteintritt höher automatisierter Fahrzeuge (d. h. SAE-Level 3 und höher [1], HAF) wird von verschiedenen Herstellern angekündigt (z.B. [2]). Dafür sind aber noch die hohen Sicherheitsanforderungen an automatisierte Fahrzeuge und die Herausforderung, dass ein solches System als sicher genug nachzuweisen ist.

1.1 Milliarden von Testkilometern bis zur Einführung von höher automatisiertem Fahren

Wenn die aktuellen Test Konzepte für HAF beibehalten werden, würden die benötigten Testdistanzen dramatisch ansteigen. Unter der Annahme, dass die automatisierte Fahrfunktion doppelt so sicher - bezogen auf die Anzahl tödlicher Unfälle - wie ein

* Christian Amersbach ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt (e-mail:amersbach@fzd.tu-darmstadt.de).

† Hermann Winner ist Leiter des Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt (e-mail:winner@fzd.tu-darmstadt.de).

menschlicher Fahrer ist, müssten laut Wachenfeld und Winner [3] ca. 6,6 Milliarden Testkilometer unter repräsentativen Bedingungen im Realverkehr für den Sicherheitsnachweis des sog. „Autobahn Chauffeur“ [4], ein SAE Level 3 [1] System, zurückgelegt werden. Dieses Beispiel zeigt, dass ein streckenbasierter, statistischer Sicherheitsnachweis für HAF in der Praxis vor Markteinführung nicht durchführbar ist; insbesondere, da die Tests wiederholt werden müssten, wenn Änderungen am System vorgenommen werden. Deshalb werden alternative Methoden für den Sicherheitsnachweis benötigt.

1.2 Das Forschungsprojekt PEGASUS

Um neue Standards und Methoden zur Absicherung von HAF zu entwickeln, wurde das *Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen (PEGASUS)* 2016 ins Leben gerufen. Im Projekt, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird, definieren 17 Partner aus Wissenschaft und Industrie einen Stand der Technik zur Absicherung von HAF [5]. Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen von PEGASUS entstanden.

1.3 Szenariobasierter Ansatz

Im Projekt PEGASUS wird ein sog. szenariobasierter Ansatz verfolgt. Es wird angenommen, dass der Großteil der Fahrstrecken auf Autobahnen ohne Probleme oder kritische Situationen zurückgelegt werden kann, während kritische Szenarien im Realverkehr selten auftreten und zufällig verteilt sind. Testen der an erster Stelle genannten gewöhnlichen Szenarien liefert keinen relevanten Erkenntnisgewinn für den Absicherungsprozess. Deshalb sollte es möglich sein, durch Identifikation kritischer Szenarien - die in der Simulation oder auf dem Prüfgelände reproduziert werden können - den nötigen Testumfang signifikant zu reduzieren. In PEGASUS werden relevante Szenarien mit Metriken identifiziert [6] oder, basierend auf Ontologien [7], synthetisch erzeugt und in einer zentralen Szenariodatenbank [8] abgelegt.

2 Parameterraumexplosion

Der in 1.3 eingeführte szenariobasierte Ansatz kann zwar den Absicherungsaufwand für HAF potentiell reduzieren, führt aber immer noch zu einer riesigen Anzahl konkreter Testfälle, die für ein logisches Szenario evaluiert werden müssen. Beispielsweise behauptet Waymo in seinem Safety Report, „tausende Variationen“ eines einzelnen Szenarios zu erzeugen [9]. Diese sog. Parameterraumexplosion wird maßgeblich von drei entscheidenden Faktoren verursacht, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden:

2.1 Einflussparameter

Bereits einfache logische Szenarien werden von einer Vielzahl an Parametern beschrieben, die das Testobjekt beeinflussen. Bagschik et al. definieren ein Fünf-Ebenen-Modell, um diese Parameter zu strukturieren [7]. Schuldt, der das Modell ursprünglich definiert hat, beschreibt auch, wie diese Einflussparameter ermittelt und analysiert werden können und

nennt verschiedene Informationsquellen, bspw. Normen und Richtlinien zur Anlage von Straßen, Fahrzeugkataloge oder Expertenwissen [10, S. 85 ff.]. Jedem Parameter p_i können v_i verschiedene Werte zugewiesen werden. Da die Mehrheit der Parameter einen kontinuierlichen Wertebereich hat (z.B. Geschwindigkeit), hängt v_i von der gewählten Diskretisierung ab. Die Wahl der richtigen Diskretisierung ist eine Herausforderung, die es noch zu lösen gilt, da eine zu grobe Diskretisierung zu Lücken im Parameterraum und damit zu unentdeckten Problemen führen kann, während eine zu feine Diskretisierung den Testumfang unnötig in die Höhe treiben würde (siehe 2.4). Die Herausforderung der Diskretisierung soll hier nicht gelöst werden, stattdessen werden für die vorliegende Studie Werte für v_i angenommen, die bspw. aufgrund von Expertenwissen als geeignet gelten sollen.

2.2 Systematische Testfallerzeugung

Eine Szenario, das von N Parametern ($p_1, \dots, p_i, \dots, p_N$) mit jeweils v_i Instanzen definiert wird, führt zu

$$S_N = \prod_{i=1}^N v_i \quad (1)$$

möglichen Testfällen [11, S. 169]. Deshalb wächst S_N mit jedem zusätzlichen Parameter oder Diskretisierungsschritt stark progressiv an. Aus Zeit- und Kostengründen ist es einerseits nicht möglich, alle theoretisch möglichen Testfälle zu testen [12, S. 539]. Andererseits gibt es aber zu wenig Erfahrung mit HAF, um mit wissensbasierter Testfallerzeugung eine vollständige Testabdeckung zu erreichen. Deshalb ist eine systematische Testfallerzeugung unumgänglich. Grindal et al. [11] geben eine Übersicht über Kombinationsstrategien, die für eine Testfallerzeugung genutzt werden können. Um die Anforderung der Reproduzierbarkeit, die von Wachenfeld und Winner [13, S. 433] gefordert wird, zu erfüllen, reduziert sich hier der Lösungsraum auf deterministische Verfahren. Die wichtigste Randbedingung bei der Wahl einer Kombinationsstrategie zur systematischen Testfallerzeugung ist die erforderliche Testabdeckung, die im nächsten Abschnitt behandelt wird.

2.3 Testabdeckung

In diesem Paper wird die sog. t -weise Abdeckung als Metrik zur Beschreibung der Abdeckung einer bestimmten Testsuite, d.h. einer Menge von Testfällen genutzt. Grindal et al. [11, S. 171 f.] definieren eine t -weise Abdeckung wie folgt:

Für eine t -weise Abdeckung muss jede mögliche Kombination aus allen Werten von jeweils t Parametern in (mind.) einem Testfall der Testsuite enthalten sein.

Die Menge aller möglichen Kombinationen aus allen Parametern, wie in (1) berechnet, entspricht dem Sonderfall der N -weisen Abdeckung.

Die Frage, welche Testabdeckung für die Sicherheitsbewertung von HAF nötig ist, muss jedoch noch geklärt werden. Gründel [14, S. 19 ff.] legt dar, dass Verkehrsunfälle typischerweise durch eine Kombination verschiedener Faktoren verursacht werden und somit dem sog. *Schweizer-Käse-Modell* nach Reason [15] folgen. Unter der Annahme, dass Fehler in HAF ebenfalls multikausal sind, ist eine einfache (1-weise) Abdeckung also nicht ausreichend. Kuhn et al. [16] haben empirische Daten aus Fehlerberichten verschiedener

Domänen untersucht und führen die *failure-triggering fault interaction* (FTFI) Zahl ein, die der Anzahl von Bedingungen entspricht, die nötig sind, um einen bestimmten Fehler auszulösen. Das bedeutet, dass alle Fehler, deren FTFI Zahl kleiner oder gleich t ist, bei einem Test mit t -weiser Abdeckung entdeckt werden. In den von Kuhn et al. [16] analysierten Daten ist die größte FTFI Zahl sechs (siehe Abb. 1). Da für HAF aber nicht ausreichend empirische Daten existieren, sind die FTFI Zahlen solcher Systeme unbekannt. Deshalb wird in der vorliegenden Untersuchung angenommen, dass die Erkenntnisse aus anderen Domänen zumindest teilweise übertragbar sind und die FTFI Zahlen in der gleichen Größenordnung liegen und somit im besten Fall eine 3-weise und im schlechtesten Fall eine 10-weise Abdeckung nötig ist, um einen hinreichend großen Anteil aller Fehler zu finden. Kuhn et al. [16] leiten ebenfalls her, dass die Größe einer Testsuite für t -weise Abdeckung unter den Annahmen, dass jeder Parameter p_i die gleiche Anzahl diskreter Werte $v_i = v$ annehmen kann und die Testfallableitung „perfekt effizient“ ist (d.h. keine Duplikate in der Testsuite enthalten sind), wie folgt abgeschätzt werden kann:

$$S_t = v^t \quad (2)$$

2.4 Resultierende Parameterraumexplosion

Nachdem die Einflussfaktoren der Parameterraumexplosion bekannt sind, kann die Größe der benötigten Testsuite in Abhängigkeit der geforderten Abdeckung und der Wertebereiche der N Einflussparameter abgeschätzt werden. Da in einer realen Anwendung die vereinfachende Annahme, dass jeder Einflussparameter p_i gleich viele diskrete Werte annehmen kann, nicht gegeben ist (bspw. hat die Fahrstreifenbreite weniger Diskretisierungsstufen als die Sonnenposition), muss (2) für den allgemeinen Fall angepasst werden:

$$S_t = \prod_{i=1}^t \max_i(v_1, \dots, v_N) \quad (3)$$

wobei $\max_i(V)$ als das i -größte Element der Menge V definiert ist.

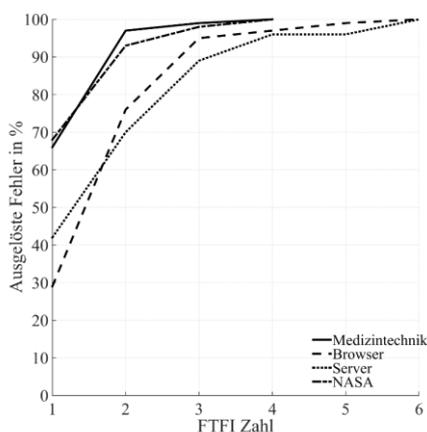


Abbildung 1: FTFI, kumulierte Verteilung nach [16]

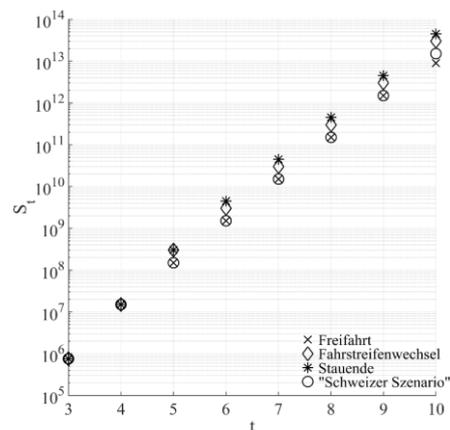


Abbildung 2: S_t für einige Beispielszenarien

Das heißt, dass für einen gegebenen Wert t für die Testabdeckung nur die t Parameter mit den größten Wertebereichen einen Einfluss auf die Größe der Testsuite haben und diese durch Elimination der Parameter mit der feinsten Diskretisierung oder durch Reduktion der Diskretisierungsschritte reduziert werden kann. Abbildung 2 zeigt die Werte von S_t für einige Beispielszenarien (siehe 3.3) in Abhängigkeit der geforderten Testabdeckung.

3 Funktionale Dekomposition zum Überwinden der Parameterraumexplosion

Ein möglicher Ansatz zum Überwinden der skizzierten Parameterraumexplosion ist die Funktionale Dekomposition der Fahraufgabe zum Ableiten partikulärer Testfälle, der von den Autoren in [17] vorgestellt wird.

3.1 Methodik

Die Methode der Funktionalen Dekomposition wird in verschiedenen Bereichen (z.B. Mathematik, Informatik) bereits ausgiebig genutzt, um komplexe Problem, Funktionen oder Systeme in weniger komplexe Teilprobleme, -funktionen oder -systeme zu zerlegen. Die Autoren schlagen vor, diese Methode auf das Testen von HAF zu übertragen und dabei partikulärer Testfälle für die einzelnen funktionalen Ebenen (d. h. Teilfunktionen) der Fahrfunktion zu erstellen. Hierzu wird die Fahrfunktion zunächst in voneinander unabhängige Ebenen (siehe Abb. 3) zerlegt. Die genutzten funktionalen Ebenen und deren Schnittstellen basieren auf der Dekomposition der menschlichen Fahraufgabe nach Graab et al. [18] und werden in [17] ausführlich vorgestellt.

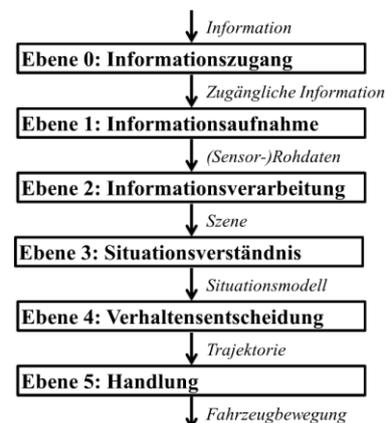


Abbildung 3:
Dekompositionsebenen

3.2 Effekte zur Reduktion des Parameterraumes durch partikuläres Testen

Neben anderen in [17] skizzierten Vorteilen gegenüber dem Gesamtfahrzeugtest, kann partikuläres Testen den Parameterraum signifikant schrumpfen. Dies basiert maßgeblich auf drei Effekten:

3.2.1 Der Parameterraum einer einzelnen funktionalen Ebene ist kleiner als der Parameterraum der gesamten HAF-Funktion

Die Einflussparameter beeinflussen nur einige der funktionalen Ebenen. Beispielsweise beeinflusst die Mehrheit der Parameter, die die Umwelt repräsentieren, nur die funktionalen Ebenen 1 und 2. Deshalb sind die Parameterräume der einzelnen funktionalen Ebenen jeweils Teilmengen des Gesamtparameterraumes. Dies hat jedoch nur einen Einfluss auf die

Größe der Testsuite, wenn Parameter mit einer großen Anzahl möglicher Werte für einzelne Ebenen nicht relevant sind (vgl. 2.4). Dieser Effekt führt für die in dieser Studie untersuchten Beispielszenarien (siehe 3.3) zu einer Reduktion des Umfangs der Testsuite um ca. 50% bei großen Testabdeckungen (d. h. $t \geq 6$); für kleine Testabdeckungen ($t \leq 3$) wird der Umfang jedoch erhöht. Dennoch kann unter der Annahme, dass partikuläre Tests im Vergleich zu Gesamtsystemtests einen geringeren Aufwand erfordern, der Gesamttestaufwand auch für kleine Abdeckungen reduziert werden.

3.2.2 Systeme mit geringerer Komplexität erfordern eine kleinere Testabdeckung

Die maximale FTFI Zahl eines Systems hängt von dessen Komplexität ab. Da für HAF (noch) keine empirischen Daten existieren, mit denen die FTFI Zahlen für das Komplettsystem und die einzelnen funktionalen Ebenen bestimmt werden könnten, wird hier angenommen, dass die FTFI Zahl für die einzelnen Ebenen im Vergleich zum Komplettsystem um mindestens eins reduziert wird ($t_{\text{part.}} \leq t_{\text{system}} - 1$). Dies würde zu einer Reduktion des Parameterraumes um ca. eine Größenordnung führen.

3.2.3 Der Test der Wahrnehmungsebenen kann für Mengen ähnlicher Szenarien zusammengefasst werden.

Bei der Analyse der Einflussparameter einer HAF-Funktion wird klar, dass die Mehrheit der Parameter mit einem großen Wertebereich ausschließlich die Wahrnehmung, die in den funktionalen Ebenen 0-2 repräsentiert wird, beeinflusst. Ein offensichtliches Beispiel hierfür ist die Sonnenposition, die ausschließlich Einfluss auf die Ebenen eins und zwei hat. Zusätzlich ist hier der Wertebereich sehr groß, wenn man berücksichtigt, dass der Azimuthwinkel (relativ zum Testobjekt, OUT) Werte zwischen 0° und 360° annehmen kann und der Elevationswinkel ja nach Topologie und Position zwischen ungefähr -10° und 90° liegt. An dieser Stelle könnte man argumentieren, dass lediglich Sonnenpositionen im Sichtbereich von Kamera und LIDAR relevant sind. Dies gilt aber nur für direkte Blendeffekte. Um Wahrnehmungsfehler, die durch indirekte Blendung, d.h. Reflektionen an statischen oder dynamischen Objekten in der Szene, hervorgerufen werden auszuschließen, müssen alle möglichen Sonnenpositionen in Kombination mit Objektattributen und -positionen in der Testsuite enthalten sein. Das Zusammenfassen der Parameter mit Einfluss auf die Wahrnehmung in Äquivalenzklassenszenarien für Gruppen ähnlicher Szenarien (bspw. Szenarien auf Autobahnen mit zwei Fahrstreifen pro Richtungsfahrbahn) könnte somit den Umfang der Testsuite noch weiter reduzieren. Die Wahrnehmungsebenen würden lediglich in den Äquivalenzklassenszenarien getestet, die den gesamten Parameterraum der Szenariengruppe abdecken.

In der beispielhaften Szenariengruppe, die in dieser Studie analysiert wurde, konnte so die Testsuite für Testabdeckungen mit $t \leq 7$ um über 50 % reduziert werden. Bei großen Abdeckungen mit $t \geq 9$ würde das Zusammenfassen der mit Einfluss auf die Wahrnehmung in Äquivalenzklassenszenarien die Anzahl der Testfälle jedoch erhöhen, da die Äquivalenzklassenszenarien eine höhere Komplexität besitzen als die einzelnen Szenarien und deshalb mehr Einflussparameter mit großen Wertebereichen haben.

3.3 Untersuchte Beispielszenarien

In dieser Studie wurde die Methode der Funktionalen Dekomposition exemplarisch auf eine Gruppe von 9 Szenarien angewandt, um deren Potential zur Überwindung der skizzierten Parameterraumexplosion zu evaluieren. Hierfür wurden die Umfänge der jeweils benötigten Testsuites sowohl für den Gesamtsystemtest als auch für das partikuläre Testen mit Formel (3) abgeschätzt und verglichen.

Vier der genutzten Szenarien sind in Abbildung 4 illustriert, einige der zugeordneten Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Zusätzlich wurden die logischen Szenarien „Folgefahrt“, „Einscherer“, „Ausscherer“, „Durchscherer“ und „Hindernis“ analysiert. Das „Schweizer Szenario“ ist die Repräsentation eines realen Unfalls mit einem Tesla Model S im Mai 2016 in der Schweiz [19], alle anderen Szenarien sind Teil des Szenarienkatalogs im Projekt PEGASUS. Die Wahl der Parameter und deren zugeordneten Wertebereichen und Diskretisierungsschritten bleibt grundsätzlich willkürlich, da sie aufgrund fehlender empirischer Daten auf Annahmen und Expertenwissen beruht. Die Wahl anderer Parameterräume würde zwar die Absolutwerte beeinflussen, aber nicht den relativen Vergleich zwischen partikulärem Testen und dem Gesamtsystemtest.

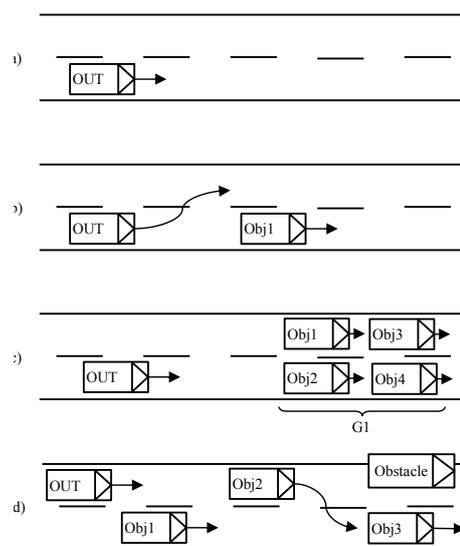


Abbildung 4: Beispielszenarien:
a) Freifahrt, b) Fahrstreifenwechsel,
c) Stauende, d) „Schweizer Szenario“

Tabelle 1: Exemplarischer Parameterraum (Auszug)

| | Parameter p_i | Scenario | | | | Influence on functional layer | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|----------------|-------------------------------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------|
| | | free driving | lane change | traffic jam | Swiss scenario | 0 Inf. Access | 1 Inf. Reception | 2 Inf. Processing | 3 Sit. Understanding | 4 Behavior. Decision | 5 Action |
| | | number of discretization steps v_i | | | | | | | | | |
| 1 Road Level | width lane 1 | | 2 | | | x | x | | | | |
| | width lane 2 | | 3 | | | x | x | | | x | |
| 2 Traffic Infrastructure | type of boundaries/barriers | | 10 | | | x | x | x | | | |
| | speed limit | | 5 | | | | | | x | x | |
| 4 Objects | type of object 1 | - | 5 | 5 | 5 | x | x | x | x | | |
| | position of obstacle (x,y) | - | - | - | 50 | x | x | | x | x | |
| | manoeuvre of object 1 | - | 1 | 1 | 5 | x | x | | x | x | |
| 5 Environment | sun position | 250 | 250 | 250 | 250 | | x | x | | | |
| | precipitation (rain, snow, etc.) | 10 | 10 | 10 | 10 | x | x | x | | | x |

3.4 Potential zur Reduktion des Parameterraumes mittels Funktionaler Dekomposition

Die in 3.2 beschriebenen Effekte führen in Summe zu einer Reduktion des Umfangs der Testsuite um einen Faktor zwischen 130 für 3-weise Abdeckung und 20 für 10-weise Abdeckung, was einer Elimination von 99 % - 95 % der Testfälle im Vergleich zum Gesamtsystemtest entspricht (siehe Abbildung 5). Das Reduktionspotential ist insbesondere bei kleinen Testabdeckungen sehr groß, da hier der in 3.2.3 beschriebene Effekt besonders stark ausgeprägt ist, während er bei großen Abdeckungen keinen ($t \geq 8$) keine Auswirkungen mehr hat.

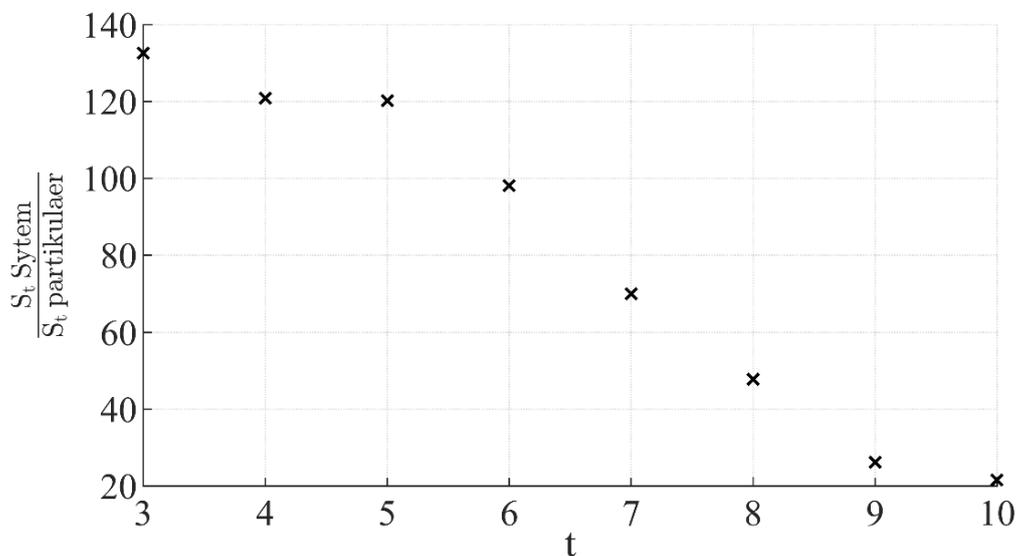


Abbildung 5: Reduktion des Testumfangs durch partikuläres Testen

4 Fazit

In diesem Artikel wurde die benötigte Größe von Testsuiten für die szenariobasierte Absicherung von HAF für Beispielszenarien sowohl für das Testen des Gesamtsystems als auch für partikuläres Testen analysiert und verglichen.

Die Diskretisierungsschritte der Einflussparameter und die erforderliche Testabdeckung haben weiterhin den größten Einfluss auf den Umfang der Testsuiten. Dies führt einerseits zur Herausforderung der Diskretisierung, die in dieser Arbeit nicht gelöst wird. Andererseits kann die erforderliche Testabdeckung nur durch Analyse empirischer Daten, die für HAF noch nicht in hinreichendem Umfang existieren, ermittelt werden. Jedoch konnte, basierend auf Studien mit Daten aus anderen Domänen, der mögliche Bereich für die erforderliche Testabdeckung eingeschränkt werden. Zusätzlich wurden Wertebereiche und Diskretisierungsschritte für die einzelnen Einflussparameter angenommen. Mit diesen Annahmen konnte das Potential den Parameterraum mit der Methode der funktionalen Dekomposition

und partikulärem Testen von HAF-Funktionen zu schrumpfen, abgeschätzt werden. Während hierbei die Absolutwerte sehr stark von den getroffenen Annahmen abhängen, werden die relativen Vergleichswerte nur wenig beeinflusst, da die gleichen Beispieldaten für den Vergleich beider Methoden, partikuläres Testen und Gesamtsystemtest herangezogen wurden.

Durch partikuläres Testen, kann die Anzahl der Testfälle potentiell um einen Faktor von 20 ... 130 (abhängig von der geforderten Testabdeckung) reduziert werden und somit ein wertvoller Beitrag zur Überwindung der Parameterraumexplosion erreicht werden. Diese Studie basiert jedoch nur auf einer kleinen Anzahl von Beispielszenarien und auf vielen Annahmen, weshalb die gewonnenen Erkenntnisse zukünftig durch eine praktische Implementierung der Methode und einen repräsentativen Vergleich validiert werden müssen.

Literatur

- [1] *SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*, 2014.
- [2] Audi MediaInfo, *Automated driving at a new level: the Audi AI traffic jam pilot*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/automated-driving-at-a-new-level-the-audi-ai-traffic-jam-pilot-9300>. Zugriff am: Mrz. 13 2018.
- [3] W. Wachenfeld und H. Winner, „Die Freigabe des Autonomen Fahrens“ in *Autonomes Fahren*, Springer, 2015, S. 439–464.
- [4] F. Köster, T. Form, K. Lemmer und J. Plättner, „Wie gut müssen automatisierte Fahrzeuge fahren-PEGASUS“, *Tagungsband: AAET 2016*, S. 292–300, 2016.
- [5] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., *Forschungsprojekt PEGASUS*. [Online] Verfügbar unter: <http://pegasus-projekt.info/de/home>. Zugriff am: Apr. 25 2018.
- [6] P. Junietz, J. Schneider und H. Winner, „Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien“ in *Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren*, Walting, 2017.
- [7] G. Bagschik, T. Menzel und M. Maurer, „Ontology Based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles“ in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Changshu, Suzhou, China.
- [8] A. Pütz, A. Zlocki, J. Bock und L. Eckstein, „System validation of highly automated vehicles with a database of relevant traffic scenarios“ in *12th ITS European Congress*, Strasbourg, 2017.
- [9] WAYMO, *On the Road to Fully Self-Driving: Waymo Safety Report*, 2017.
- [10] F. Schuldt, „Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen-English title: Towards testing of automated driving functions in virtual driving environments“, Ph. D. dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2017.
- [11] M. Grindal, J. Offutt und S. F. Andler, „Combination testing strategies: a survey“, *Software Testing, Verification and Reliability*, Jg. 15, Nr. 3, S. 167–199, 2005.
- [12] I. Sommerville, *Software engineering*, 8. Aufl. New York: Addison-Wesley, 2006.

- [13] W. Wachenfeld und H. Winner, „The Release of Autonomous Vehicles“ in *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*, H. Winner, M. Maurer, J. C. Gerdes und B. Lenz, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2016, S. 425–449.
- [14] M. Gründl, „Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen“, 2005.
- [15] J. Reason, „The Contribution of Latent Human Failures to the Breakdown of Complex Systems“, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Jg. 327, Nr. 1241, S. 475–484, 1990.
- [16] D. R. Kuhn, D. R. Wallace und A. M. Gallo, „Software fault interactions and implications for software testing“, *IEEE transactions on software engineering*, Jg. 30, Nr. 6, S. 418–421, 2004.
- [17] C. Amersbach und H. Winner, „Functional Decomposition: An Approach to Reduce the Approval Effort for Highly Automated Driving“ in *8. Tagung Fahrerassistenz*, 2017.
- [18] B. Graab, E. Donner, U. Chiellino und M. Hoppe, „Analyse von Verkehrsunfällen hinsichtlich unterschiedlicher Fahrerpopulationen und daraus ableitbarer Ergebnisse für die Entwicklung adaptiver Fahrerassistenzsysteme“ in *TU München & TÜV Süd Akademie GmbH (Eds.), Conference: Active Safety Through Driver Assistance. München*, 2008.
- [19] F. Lambert, *Tesla Model S driver crashes into a van while on Autopilot [Video]*. [Online] Verfügbar unter: <https://electrek.co/2016/05/26/tesla-model-s-crash-autopilot-video/>. Zugriff am: Aug. 31 2017.