

Andreas Erking, BSc

## Entwicklung einer Methode zur Freigabe eines Fahrstreifenwechselassistenten im öffentlichen Verkehr

Masterarbeit  
Diplomingenieur

Maschinenbau-Wirtschaftsingenieur

Technische Universität Graz

Fachrichtung: Maschinenbau

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of Frank Stronach Institute

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Fischer

Betreuer: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Arno Eichberger

DI Demin Nalic

Graz, 03.01.2019

Beschränkter Zugriff: 11.6.2023

# Danksagung

Einen großen Dank möchte ich meinen Betreuern auf der TU Graz, Hr. Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Arno Eichberger sowie Hr. Dipl.-Ing. BSc Demin Nalic während meiner Diplomarbeit aussprechen.

Auf Seiten der Firma Magna geht ein großer Dank an Fr. Dipl.-Ing. Birgit Hütter für die fachlichen Anregungen während der regelmäßigen Meetings sowie den vielen Kontakten innerhalb der Firma (Hr. Bernhard Angrosch, Hr. Bernhard Putsche sowie Hr. Karner David).

Zuletzt bedanke ich mich noch bei meiner Familie und Freundin, für die Unterstützung während meines Studium und der Diplomarbeit.

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am .....

(Unterschrift)

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

.....

(Date)

(Signature)

# Abstract

New challenges are facing the automotive industry because of increasing automation. Therefore new test and release standards have to be implemented. In the past more and more driver assistance systems are developed but the testing and validation conditions are neglected. The common used test run isn't applicable for SAE Level 3 and higher. This thesis contains a methodology to virtual release a lane change model with reduced scenarios.

First a scenario based catalog was created for different driving situation and afterwards automatically varied via computer, following the current trend of the automotive industry. This variation process is controlled by Matlab, which manipulated the input parameters for IPG Carmaker simulation. Afterwards the huge amount of data is clearly presented as Excel document and is the basis for the decision making process to release or do some rework at the model. During this work two different lane change models are tested and the weaknesses are presented.

The most time consuming activity in this work, is handling the huge amount of simulation variants. To avoid this problem and implement this methodology to an industry driven company like MAGNA, time and also safety is very important. One possible solution is cloud computing with its high computing power, but prior to this, an intelligent simulation method have to be implemented. The biggest challenge is, not overlook some critical situation and forget it to test. Some forecast methods are studied (Matlab, DOE) to enlarge the step size of the full factorial test matrix and calculate the behavior in-between.

# Kurzfassung

Durch die steigende Automatisierung des Fahrzeuges werden zunehmend Aufgaben an den Fahrer übergeben und stellt somit die Test- und Freigabemechanismen vor neue Herausforderungen. Die übliche, auf Testfahrten basierte Vorgehensweise, wie sie bis SAE Level 3 verwendet wurde, kann aus ökonomischen und zeitlichen Gründen in Zukunft nicht mehr so stark experimentell betrieben und eingesetzt werden. Die vorliegende Masterarbeit entwickelt eine Methode wie simulationsgestützt eine reduzierte Anzahl von Fahrscenarien den Freigabeprozess unterstützen kann.

Aus einem erstellten Szenarienkatalog, der verschiedene Möglichkeiten der Geschwindigkeits-Beschleunigungsvariation zulässt, soll wie in der Literatur beschrieben über einen szenarienbasierte Ansatz erfolgen. Der Variationsablauf wird zentral über das SW Paket Matlab gesteuert und manipuliert automatisch die Eingangsdaten für die Fahrzeugsimulation unter Verwendung des IPG Carmaker. Nach Sicherung und anschließendem Auswerten der Daten erfolgt die kompakte tabellarische Darstellung. Anhand diesem kann eine Aussage über die Freigabe gemacht werden. Zudem befinden sich in der Arbeit Grenzwerte, die als Mindestanforderung für die Freigabe gesehen und als Leitlinien für die Freigabe herangezogen werden. In Kombination mit bereits zwei bestehenden Fahrstreifenwechselmodellen wird die Methode getestet und soll die Schwäche der beiden Modelle aufzeigen. Durch systematisches Testen innerhalb des Arbeitsbereiches können Fehler der Funktion sicher aufgedeckt werden.

Im Zuge der Arbeit und anhand der vielen Simulationsmöglichkeiten widmet sich noch ein großer Teil dem Thema Simulationsbeschleunigung. Grundsätzlich wird mit den Szenarienkatalog nur ein kleiner Teil an möglichen Szenarien getestet und schon bei diesen, stößt man schnell an die Grenzen. Deshalb müssen neue Wege gefunden werden, um mit kleineren Simulationsumfänge trotzdem eine sichere Aussage über kritische Ereignisse machen zu können. Über bekannte Methoden, wie DOE oder Interpolation, sind erste Ansätze erarbeitet worden, jedoch muss für eine sichere Aussage noch mehr Daten gesammelt werden um diese zu validieren.

# Inhalt

Danksagung .....	i
Eidesstattliche Erklärung .....	ii
Abstract .....	iii
Kurzfassung .....	iv
Inhalt.....	v
Abkürzungen .....	viii
Symbole .....	ix
1 Einführung .....	1
1.1 Entwicklungsziele in Automobilindustrie .....	1
1.2 Klassifizierung der Fahrzeugautomation nach SAE J3016 .....	1
1.3 Entwicklungsmethodik in der Automobilindustrie.....	3
1.3.1 Funktionale Sicherheit ISO 26262 .....	3
1.3.2 ISO 15504 Automotive SPICE (ASPICE) .....	4
1.3.3 V-Modell als Grundlage für zielgerichtete Entwicklung .....	7
1.4 Rechtliche Vorschriften ab SAE Level 3 .....	8
1.5 Freigabedilemma.....	9
1.6 Forschungsfragen .....	10
1.7 Aktueller Stand internationaler Forschungsprojekte .....	10
1.7.1 PEGASUS.....	10
1.7.2 Forschungsmaterial PEGASUS .....	11
1.7.3 ENABLE S3.....	21
1.7.4 Forschungsmaterial ENABLE S3 .....	21
1.8 Stand der Technik.....	22
1.9 Entwicklungsmethodik Magna .....	24
2 Methodikentwicklung.....	26
2.1 Entwicklungsansatz .....	27
2.2 Szenariengenerierung .....	30
2.2.1 Szenario Eins.....	32
2.2.2 Szenario Zwei.....	35
2.2.3 Szenario Drei.....	37

2.2.4	Szenario Vier .....	40
2.2.5	Szenario Fünf .....	43
2.2.6	Szenario sechs .....	46
2.2.7	Szenario sieben.....	48
2.2.8	Szenario acht .....	51
2.3	Parametervariationsprozess.....	54
2.3.1	Ablauf einer Variation .....	55
2.3.2	Simulationsmodell Lane Change .....	57
2.3.3	Parametereinschränkung .....	58
2.4	Einstellungen in der Fahrzeugsimulation .....	60
2.4.1	Output Quantities - Simulationsdatenspeicherung.....	61
2.5	Auswerteverfahren in Excel .....	63
2.6	Metrik .....	63
2.7	Kriterienkatalog für Freigabe eines Fahrstreifenassistenten .....	65
2.7.1	Grundvoraussetzung für das Fahren auf öffentlichen Straßen in Österreich .....	65
2.7.2	Zweistufige Simulation und anschließende Freigabe.....	66
3	Resultate.....	67
3.1	Rechenzeitproblem .....	67
3.2	Methode kleine Schrittweite.....	68
3.3	Methode: große Schrittweite .....	68
3.4	Methode: große/kleine Schrittweite.....	69
3.5	Design of Experiment (DOE).....	72
3.6	Interpolation.....	76
3.6.1	Schrittweitenuntersuchung.....	79
3.7	Ergebnisse Funktionstest 1.....	80
3.8	Ergebnisse Funktionstest 2.....	84
3.9	Nächste Schritte .....	85
3.9.1	Kritische Szenarien (Corner Cases).....	85
4	Diskussion.....	87
	Zusammenfassung.....	89
4.1	Fazit .....	89
4.2	Ausblick.....	89
	Abbildungsverzeichnis.....	I
	Tabellenverzeichnis .....	III
	Literaturverzeichnis.....	V

A. Anhang..... IX

# Abkürzungen

ACC	Adaptive Cruise Control (Abstandskontrolle)
ADAS	Advanced Driving Assistant Systems (Fahrerassistenzsysteme)
AEB	Notbremsassistent
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ASPICE	Automotive Software Process Improvement and Capability Determination
CMMI	Capability Maturity Model Integration
DOE	Design of Experiment
EBA	Emergency Brake Assist (Notfall-Bremsassistent)
ECE	Economic Commission for Europe
ESC	Electronic Stability Control (Elektronisches Stabilitätsprogramm)
EU	Europäische Union
EURO NCAP	European New Car Assessment Programme
FMEA	Fehler - Möglichkeiten und Einflussanalyse
FPR	Falsch-positiv Rate
HARA	Hazard Analysis and Risk Assessment
HiL	Hardware in the Loop
KfV	Kuratorium für Verkehrssicherheit
LCA	Lane Change Assist (Fahrspurwechselassistent)
LKA	Lane Keeping Assist (Fahrspurassistent)
MiL	Model in the Loop
NDA	Naturalistic Driving Studies
N-FOT	Naturalistic Field Operational Tests
QM	Qualitätsmanagement
SAE	Society of Automotive Engineers
SiL	Software in the Loop
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehr Zulassungsbestimmung
TSC	Traffic Sequence Charts
TTB	Time to Brake
TTC	Time to Collision
VDI	Verein deutscher Ingenieure
ViL	Vehicle In the Loop

# Symbole

## Variablen

$\Delta p$	Differenz der beiden Fahrzeugpositionen
$v_{\text{ego}}$	Ego Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{\text{obj}}$	Objektgeschwindigkeit
$v_{\text{rel}}$	Relativgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge
$a_{\text{ego,max}}$	maximal mögliche Verzögerung des Ego-Fahrzeuges
$a_{\text{obj}}$	Beschleunigung des Objektes
$\mathbf{v}_q$	Vorhersagevektor
$x_n$	Eingangsgröße (Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Abstand)
$\mathbf{v}$	Ausgangsgröße
$x_{qn}$	Interpolationsvektor (Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Abstand)
$\mathbf{F}$	Interpolationsvektor
$x_{\text{krit}}$	kritischer Abstand

# 1 Einführung

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Entwicklung und rechtlichen Schritte innerhalb des autonomen Fahrens geben. Dabei soll der Fokus der Arbeit auf SAE L3+ Systeme und höher liegen. Ein großes Thema in diesem Abschnitt stellt die aktuelle Literatur zur Forschung dar. Die Literatur teilt sich in bedeutende Forschungsprojekte ENABLE S3 sowie PEGASUS und weiteren Publikationen, die ergänzend zu den beiden Forschungsthemen aufgelistet werden. Ein zusätzlicher Abschnitt, der auch in der Einführung zu finden ist, beschäftigt sich mit der Fahrzeugentwicklung und den anzuwendenden Entwicklungsmethodiken (z.B.: V-Modell).

## 1.1 Entwicklungsziele in Automobilindustrie

Autonomes Fahren ist ein aktueller Mega Trend in der Automobilindustrie. Wie in [1] beschrieben arbeitet derzeit die gesamte Automobilindustrie an der Automatisierung des Fahrzeuges. Aufgrund des technologischen Fortschritts ist es der Industrie möglich, sich in diesem Bereich vorzutasten, dass anhand der drei nachfolgenden Beispiele klar aufgezeigt werden kann.

Die Fa. Bosch, als erstes Beispiel, hat vier große Entwicklungsziele bereits definiert:

- Erhöhung der Sicherheit: Maschinen ermüden nicht und können auch viel schneller erkennen als der Mensch.
- Erhöhung der Effizienz des Fahrens: autonome Fahrzeuge können die Strecke ökonomischer befahren und damit CO2 sparen.
- Entspannter Fahren: durch das Wegfallen der Fahrfunktion kann der Fahrer die gewonnene Zeit anders nutzen.
- Effizienterer Verkehrsfluss: durch den geringen Abstand zum Vordermann können stark befahrene Straßen besser genutzt werden. [2]

Man orientiert sich bei den Entwicklungszielen an den menschlichen Fähigkeiten: Sense (Umfeldererkennung), Think (Fahrstrategie ableiten) und Act (Umsetzen der Strategie).

Das zweite Beispiel ist der Zulieferer Continental. Hier steht auf der Agenda: eine höhere Sicherheit, mehr Komfort und mehr Effizienz. Dabei soll die Zeit wieder sinnvoll genutzt werden, denn durch die steigende Verkehrsbelastung können Fahraufgaben wie Einparken oder Stop and Go ganz einfach an das Fahrzeug weiter gegeben werden. [3]

Bei der Personenbeförderung sieht Daimler, als drittes Beispiel als technologischen Fortschritt, folgende Vorteile: mehr Sicherheit, mehr Komfort und mehr Mobilität. Dabei sieht die Firma Daimler für das Fahrzeug der Zukunft ein breites privates Nutzungsfeld, denn es wird wieder Zeit für den Fahrer frei, die er intelligent nutzen kann. Bei der Güterbeförderung sieht Daimler eine große Kraftstoffeffizienzsteigerung sowie logistische Vorteile. [4]

## 1.2 Klassifizierung der Fahrzeugautomation nach SAE J3016

Grundsätzlich kann man die Automatisierung in verschiedene Grade einteilen. Innerhalb der SAE J3016 [5] werden sechs Level der Automatisierung des Fahrzeuges beschrieben, beginnend bei Level 0 (keine Automatisierung) bis Level 5 (autonomes Fahren), dass dann auch erlaubt, dass Fahrzeuge ohne

## Einführung

Lenkrad ausgestattet sind. Ein weiterer Punkt in der SAE J3016 sind die drei verschiedenen Akteure: den Benutzer (Mensch), das Automatisierungssystem und andere Fahrzeugsysteme und Komponenten. In Tabelle 1 werden die verschiedenen Levels genau beschrieben und auch die Abgrenzungen zwischen Mensch und System dargestellt. Die in Rot markierte Linie zeigt die stufenweise Abgrenzung der Automatisierung. Für diese Arbeit wird der Schwerpunkt auf Level drei und höher gelegt. Dabei erfolgt teilweise noch das Eingreifen des Fahrers, soll dann aber ab Level vier schrittweise wegfallen. Durch die Rückfallebene des Fahrers, der dann mit höherer Automatisierung wegfällt, müssen komplett neue Testmöglichkeiten gefunden werden, denn die bis dato basierenden Testverfahren setzen einen Testfahrer voraus.

**Tabelle 1: Level der Automatisierung laut SAE J3016 [5]**

Level	Bezeichnung	Definition	Dynamische Fahraufgabe		Rückfallebene der Fahraufgabe	Systemfähigkeit	Beispiel
			Laterale und longitudinale Fahrzeugbewegung	Erkennungs- und Handlungsebene			
Fahrer führt einen Teil oder die gesamte Fahraufgabe aus							
0	Keine Automatisierung	Die Fahraufgabe obliegt dem Fahrer, kann aber von aktiven Fahrerassistenzsystemen unterstützt werden	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Keine Angabe	warnende Systeme
1	Fahrerassistenz	Der Fahrer fährt das Auto, das System kann die laterale oder longitudinale (nicht gleichzeitig) Fahrzeugführung übernehmen (jedoch Szenarien begrenzt), jedoch überwacht vom Fahrer	Fahrer und System	Fahrer	Driver	limitiert	Notbremsassistent
2	Teilautomatisierung	Das System (jedoch Szenarien begrenzt) kann laterale und longitudinale Fahraufgaben gleichzeitig übernehmen, jedoch unter Beobachtung/Unterstützung des Fahrers	System	Fahrer	Fahrer	limitiert	Stauassistent
ADS („System“) übernimmt die gesamte Fahrfunktion			System	System	Abruffähigkeit des Fahrers	limitiert	Staupilot
3	Hochautomatisiertes Fahren	Das System übernimmt die komplette Fahraufgabe (jedoch Szenarien begrenzt), jedoch mit der Möglichkeit der Intervention des Fahrers,					

		sollten Probleme bei der Fahrzeugführung auftreten					
4	Vollständig automatisiertes Fahren	Komplette Fahrzeugführung des Systems (jedoch Szenarien begrenzt) solange bis der Fahrer aufgefordert wird zu übernehmen	System	System	System	limitiert	automatisiertes Autobahn fahren
5	Autonomes Fahren	Komplette Fahrzeugführung ohne Szenarien Begrenzung und Beherrschung der Situationen ohne eingreifen des Fahrers	System	System	System	unlimitiert	Fahren im Verkehr

### 1.3 Entwicklungsmethodik in der Automobilindustrie

Innerhalb der Automobilindustrie bestehen verschiedene Entwicklungsprozesse und Richtlinien. Durch die überschneidenden Disziplinen von Mechanik, Elektrik und Informatik ist es schwierig, eine einheitliche Vorgehensweise zu finden. Für die Mechanikentwicklung ist es z.B. wichtig Crash und Sicherheitsstandards einzuhalten, die bei der Elektrik nicht so entscheidend sind. Durch den rasanten Anstieg von E/E Funktionen im Automobil ist es aber wichtig diese Disziplinen zu bündeln und anhand gemeinsamer Richtlinien vorzugehen. Um die hohe Qualität zu liefern, müssen nicht nur die Anforderungen an das Qualitätsmanagement, sondern auch der Entwicklungsprozess laufend verbessert werden. Grundlage für einen solchen Prozess gibt das V-Modell vor, wobei die drei Standards: Funktionale Sicherheit, ASPICE und CMMI inbegriffen sind. [6]

#### 1.3.1 Funktionale Sicherheit ISO 26262

Das oberste Ziel für den Hersteller ist die Sicherheit seines Produktes, denn nicht nur sein Ruf steht auf dem Spiel, sondern dieser muss auch dafür haften, sollte er nicht nach dem Stand der Technik gearbeitet haben. Grundlagen für den Stand der Technik stellen häufig Normen dar. Der Vertreter der funktionalen Sicherheit ist die Norm ISO 26262. Diese ist die Basis für die Entwicklung von elektrischen und elektronischen Komponenten. Ziel der Norm ist es, sicherheitskritische Komponenten durch sicherheitsrelevanten Anforderungen abzusichern, welches den gesamten Lebenszyklus abdeckt [7], [6]. Entlang des Entwicklungsprozesses verlaufen unterschiedliche Phasen, beginnend von der Konzeptphase und endet mit der Freigabe für die Produktion, die gekennzeichnet durch unterschiedliche Tätigkeiten sind. In der Konzeptphase werden Items definiert die dann in einer Risikobewertung beurteilt werden und darauf aufbauend ein Funktionales Konzept erstellt wird. Anschließend erfolgt die Hardware und Software Entwicklung wobei am Ende dieser die Freigabe für die Produktion zu erfolgen hat (siehe Abbildung 1). Eine Besonderheit der ISO 26262 sind die Automotive Safety Integrity Level (ASIL), die das Risiko beschreiben, wobei die Abstufung von ASIL A (niedriges Risiko) bis ASIL D (hohes Risiko) reicht sowie das Qualitätsmanagement (QM), dass unterhalb von ASIL A angesiedelt ist. Dabei wird innerhalb der verschiedenen Entwicklungsphasen immer wieder das mögliche Risiko untersucht und gegebenenfalls durch gezielte Maßnahmen gegengelenkt.

Abbildung 1 stellt die verschiedenen Phasen der Produktentwicklung dar, beginnend bei der Konzeptphase weiter über die Produktentwicklung und schließt mit der Produktion ab. In den

einzelnen Phasen werden unterschiedliche Aktivitäten durchgeführt, die für ein sicheres Produkt erforderlich sind. Zu Beginn der Entwicklungsphase müssen sogenannte Items definiert werden, die eine Funktion beschreiben und mittels Gefahren- und Risikoanalyse (HARA) bewertet werden. Ausgehend von einer möglichen Gefahr, müssen verschiedene Maßnahmen getroffen werden, die eine Gefährdung ausschließen (z.B.: durch Redundanzen) und zu einem funktionalen Konzept führen. In der folgenden Phase, der Produktentwicklung, werden die Produkte auf Systemebene entwickelt und auf ihre Sicherheit überprüft und am Ende freigegeben, wenn sie den Anforderungen entsprechen. Neben der Produktentwicklung gibt es parallele Prozesse, die als Unterstützung für den Entwicklungsprozess dienen, wie z.B. die Produktionsplanung.

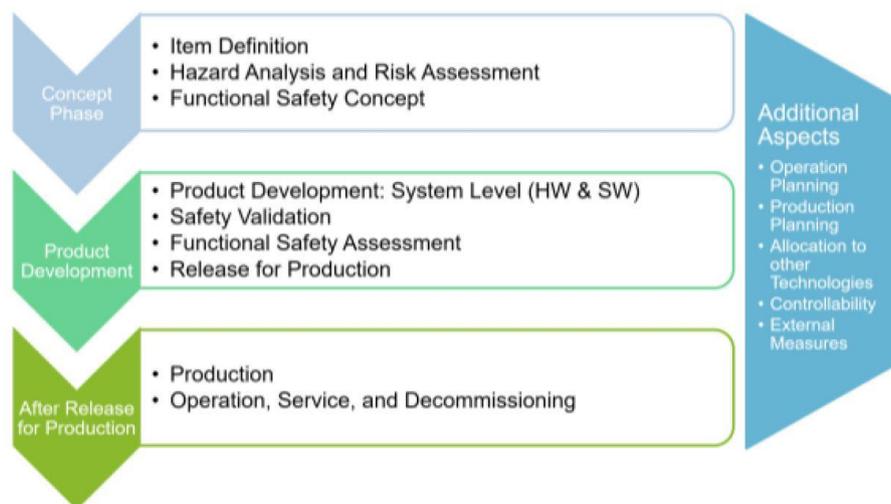


Abbildung 1: Übersicht des Lebenszyklus von ISO 26262 [6]

### 1.3.2 ISO 15504 Automotive SPICE (ASPICE)

ASPICE ist eine spezielle Abwandlung von ISO 15504 SPICE (Software Process Improvement and Capability Determination). ASPICE wird weltweit innerhalb der Hersteller (OEM) verwendet, um den Softwareprozess abzuwickeln. ASPICE bietet die Möglichkeit, den Prozess auf seine Performance hin zu untersuchen. Das Modell kann für die Überprüfung zwischen OEM und Zuliefererprozesse hinsichtlich Methode, Arbeitsfluss und Resultate genutzt werden. Obwohl sich der Prozess auf Systemengineering spezialisiert hat, besteht die Eventualität diesen auch für die Mechanikentwicklung im Automobilbereich anzuwenden und bietet einen Rahmen für Projektmanagement, Anforderungsmanagement, Risikomanagement und ein paar Andere. [6]

Das Prozessmodell (siehe Abbildung 2) gliedert sich in drei verschiedene Prozesskategorien, Lebenszyklusprozess, Organisationslebenszyklusprozess und den Unterstützungsprozess, abhängig von den durchzuführenden Aktivitäten. Der Lebenszyklusprozess beschreibt die Zusammenarbeit zwischen EntwicklerInnen und KundInnen/Zulieferer im gesamten Entwicklungsprozess. Der Unterstützungsprozess ist für Nebentätigkeiten zuständig, agiert im Hintergrund und sichert so ein gutes Produkt ab. Der Organisationslebenszyklusprozess entwickelt Prozesse, Produkte und hilft der Organisation Ziele zu erreichen. Die Engineering Prozesse sind nach dem bekannten V-Modell aufgebaut. Dabei werden die Prozesse in sehr viele Unterprozesse unterschieden, sodass für weitere Informationen auf die Norm ISO 15504 verwiesen wird.

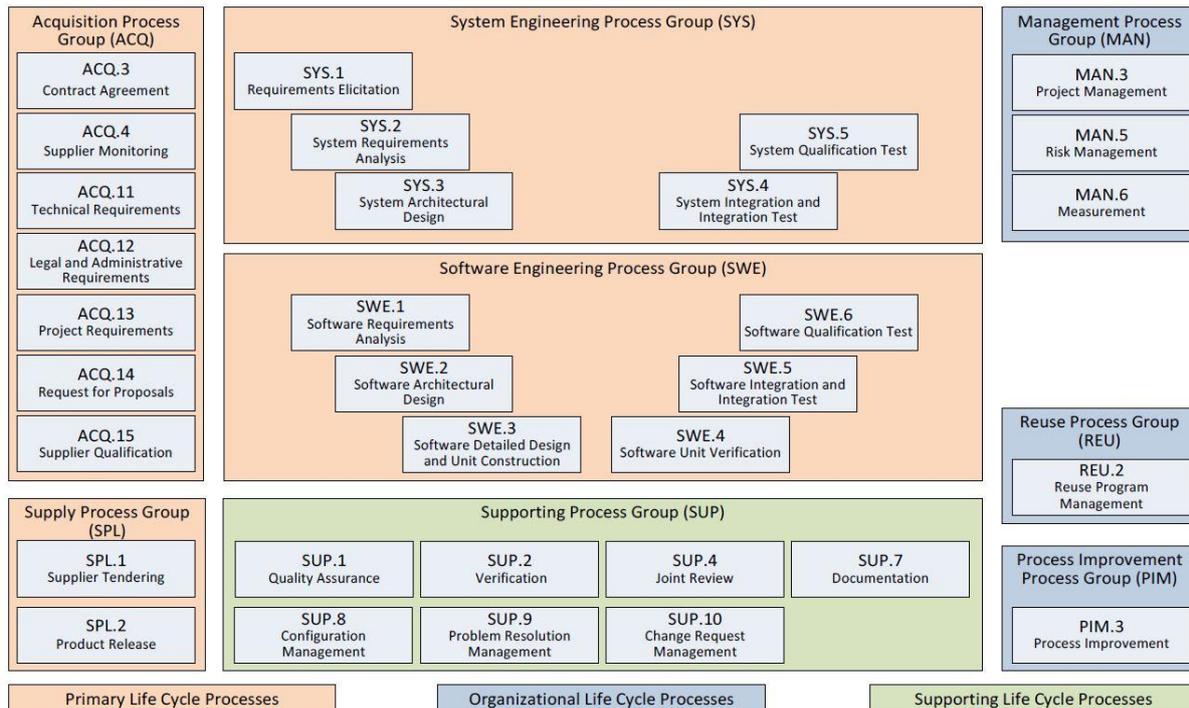


Abbildung 2: ASPICE Prozess [6]

Der dritte Standard, Capability Maturity Model Integration (CMMI) wird hauptsächlich für die Weiterentwicklung und Optimierung von Prozessen verwendet und hier nicht weiter behandelt, es kann aber auf weiterführende Literatur verwiesen werden [6].

Nach den allgemeinen Prozessen, die angewendet werden, um ein Produkt rechtzeitig und auch domänenübergreifend freigeben zu können, wird noch auf die verschiedenen Freigabekonzepte eingegangen. Der Freigabeprozess stellt den letzten Schritt im V-Modell dar und befindet sich am rechten oberen Ast des V-Modells. Für den Freigabeprozess innerhalb des V-Modells gibt es derzeit vier verschiedenen Abstufungen der Automatisierung, die auf einen einheitlichen Standard zurückgreifen.

Das SAE L0 System beinhaltet noch keine Automatisierung und dabei gilt es nachzuweisen, ob das System eine gewissen Ausfallswahrscheinlichkeit (Failure Rates) nicht überschreitet und ob der Fahrer in der Lage ist, das Fahrzeug zu beherrschen. Dabei wird von ausgewählten TestfahrerInnen auf andere FahrerInnen geschlossen, um die Sicherheit des Systems nachzuweisen, was sich in der Vergangenheit als gute Praxis herausgestellt hat. Trotz des gestiegenen Verkehrs sind die Unfälle bzw. tödlichen Verletzungen nicht gestiegen. Anforderungen an die/den FahrerIn sind unter anderem eine gültige Fahrprüfung.

Bei der nächsthöheren Automatisierung, dem assistierten Fahren wie z.B. Adaptive Cruise Control (ACC) oder Lane Keep Assist (LKA), wird nicht nur der gerade oben beschriebene Fall überprüft, sondern es kommt noch der ADAS Code of Practice hinzu. Dabei muss vor allem bei diesen Systemen, deren Aufgabe es ist, den/die FahrerIn zu unterstützen und das Übernehmen der Fahraufgabe bzw. die Kontrollierbarkeit, eine wichtige Überprüfungsaufgabe. Dabei geht der Code of Practice immer davon aus, dass der/die FahrerIn die Verantwortung für sein Handeln übernimmt.

Ebenfalls in Serie befindet sich die dritte Stufe (SAE L3) der Automatisierung, nämlich die Verbindung von ACC mit LKA, die eine Längs- und Querverführung des Fahrzeuges ermöglicht. Wichtig dabei ist wieder die Rückfalleben des/der Fahrers/Fahrerin. Hier ist eine Besonderheit für die Freigabe, denn die Automatisierungsstufe steht im Konflikt zwischen Komfortfunktion (Entlastung des/der Fahrers/Fahrerin durch das Übernehmen von monotonen Aufgaben) und Überwachungsfunktion (Erhöhung der Sicherheit, sollte der/die FahrerIn unaufmerksam sein) wobei sich der/die FahrerIn dafür verantworten muss.

Eine Sonderstellung in der Freigabe nehmen Notfallassistenten ein, die automatisiert in die Fahrdynamik eingreifen und den/die FahrerIn bei kritischen Situationen unterstützen (z.B. Electronic Stability Control (ESC) oder Emergency Brake Assist (EBA)). ESC wird dann aktiv, wenn der/die FahrerIn das Fahrzeug nicht mehr unter Kontrolle hat (Über- oder Untersteuern) und das EBA baut Bremsdruck auf, wenn die Reaktionszeit und der Bremsweg nicht mehr ausreichen, um einen Unfall/Aufprall zu verhindern. Wichtigstes Ziel ist es, nur sogenannte True-positive Auflösungen zu erzielen, also dann, wenn ein offensichtlicher Kontrollverlust vorherrscht. Dabei muss nachgewiesen werden, dass die false-positive Auslösungen möglichst gering sind und/oder der/die FahrerIn die Situation kontrollieren kann. Da es sich aber um Notfunktionen handelt und kein Funktionsversprechen abgegeben wird, nehmen sie eine Sonderstellung ein.

Innerhalb dieser vier Systeme spielt der/die FahrerIn immer die Hauptrolle und übernimmt auch immer die Verantwortung. Die Systeme haben nur die Aufgabe, die Kontrollierbarkeit für den/die FahrerIn herzustellen. Für diese zielgerichtete Entwicklung orientiert man sich am Vorgehensmodell (V-Modell) (siehe Abbildung 3), das auf der linken Seite die Entwicklung behandelt und auf der rechten Seite die Validierung und Verifikation (V&V). [8]

Das V-Modell (siehe Abbildung 3) stellt den gesamten Entwicklungsprozess dar. Merkmal des V-Modells ist, die ganzheitliche Betrachtung des Entwicklungsprozesses. Auf der linken Seite wird die Produktentwicklung dargestellt und auf der rechten Seite die Validierung. Dabei soll das Modell die verschiedenen domänenübergreifenden Fachgebiete vereinigen und so ein Gesamtoptimum garantieren. In der Entwicklungsphase werden neben der Entwicklungstätigkeit unterschiedliche Supportprozesse angewendet, wie z.B.: Fehlerbaumanalyse oder Fehler-Möglichkeiten und Einflussanalyse (FMEA), um das Risiko von spät erkannten Fehlern zum Umgehen. Zudem werden in dieser Phase die Testanforderungen für die anschließende Validierung festgelegt. Nach erfolgreicher Produktentwicklung müssen diese getestet werden. Dies erfolgt beginnend von der Komponentenebene bis zur Systemebene. Die verschiedenen X-in the Loop Test unterscheiden sich durch das Testobjekt und durch die Produktreife. In der Entwicklung sind unterschiedliche Reifegrade vorhanden. So wird beispielsweise bei Software in den Loop, eine vorhandene Software geprüft, wobei die Interaktionen mit dieser virtuell erstellt werden. Somit wird gewährleistet, dass in einem frühen Stadium der Entwicklung die Anforderungen geprüft und somit die Fehlerkosten gering gehalten werden.

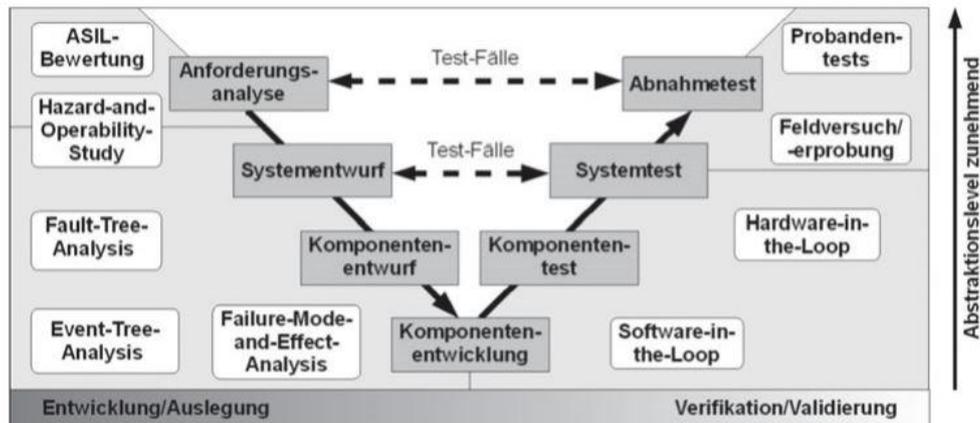


Abbildung 3: V-Modell als Grundlage für die Entwicklung [8]

Die assistierten Fahrfunktionen wurden für spezielle Situationen hin entwickelt und finden sich dann auch in den Funktionsspezifikationen wieder. Das ist bei hochautomatisierten Fahrfunktionen nicht mehr der Fall, den das Spektrum ist nicht begrenzt. Deshalb können die statischen Methoden eines Lastenheftes, das zu Beginn des V-Modelles festgelegt wird, nicht verwendet werden. Speziell die Ausprägung von falsch-positiven Auslösungen (Notbremsung aufgrund von fehlerhafter Interpretation) stellt derzeit große Probleme dar. [9]

### 1.3.3 V-Modell als Grundlage für zielgerichtete Entwicklung

Um innerhalb der verschiedenen Disziplinen (Maschinenbau, Elektrotechnik, uvm.) eine geordnete und zielgerichtete Entwicklung von innovativen Produkten zu gewährleisten, wurde die Richtlinie VDI 2206 eingeführt. Durch die Globalisierung und getrieben von Produktinnovationen sowie verkürzten Entwicklungszyklen, wird ein schnelles und geordnetes Vorgehen gefordert, um am harten Wettbewerbsmarkt zu bestehen. Dabei werden hauptsächlich mechatronische Systeme betrachtet, die in der Entwicklung schwieriger zu händeln sind. Vor allem durch die Vielzahl an mechatronischen Systemen (Abbildung 4) muss ein strukturiertes Vorgehen angewendet werden.

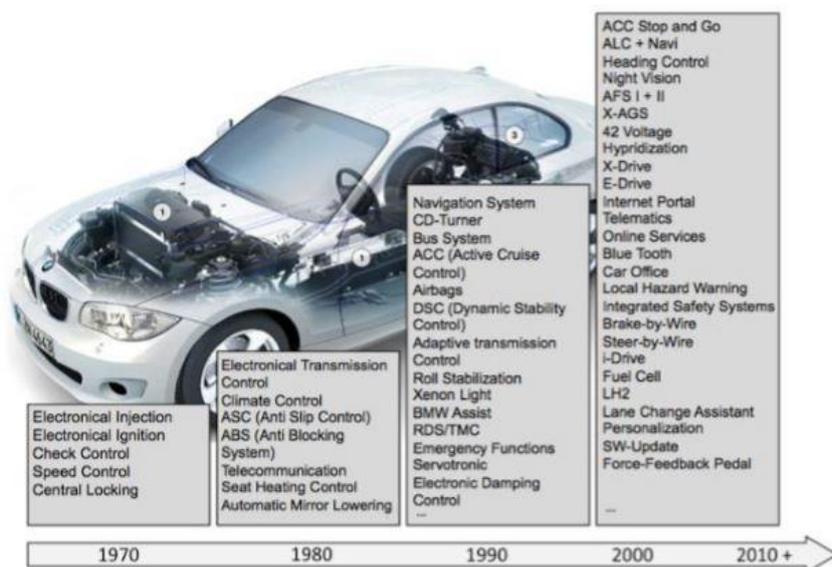


Abbildung 4: Zunahme der E/E Funktionen im Fahrzeug über die Jahre [6]

Die Zielsetzung ist es, ein Werkzeug bzw. Methode zu entwickeln, um frühzeitig im Entwicklungsprozess ein abgesichertes Konzept zu erhalten, das aus dem Systementwurf abgeleitet wird. Die Herausforderung ist es, dass mechatronische System zu einem Gesamtoptimum im Konglomerat aus den unterschiedlichen Wissensdomänen zu bringen und nicht ein Teiloptimum innerhalb einer Fachdisziplin. Daher führt der Ansatz „bottom-up-design“ nicht mehr zu einer Lösung, sondern es muss vom Groben ins Feine entwickelt werden (top-down-design).

Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist die Eigenschaftsabsicherung. Bei einigen Phasen, wie z.B. Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf und Systemintegration muss immer innerhalb verschiedener Varianten ausgewählt und bewertet werden. Dabei tauchen die beiden Begriffe Verifikation und Validierung auf.

***Verifikation** meint allgemein den Nachweis der Wahrheit von Aussagen. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z.B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall mit der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt. Bei der Überprüfung der Gültigkeit eines Programms wird auch von der Programmverifikation gesprochen. Die Verifikation wird im Allgemeinen formal realisiert.*

***Validierung** meint ursprünglich die Gültigkeitsprüfung einer Messmethode in der empirischen Sozialforschung, das heißt inwieweit die Testresultate tatsächlich das Erfassen, was durch den Test bestimmt werden soll. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier geht die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein. Die Validierung beinhaltet z.B. die Prüfung, ob die Beschreibung eines Algorithmus mit dem zu lösenden Problem übereinstimmt. Sie ist im Allgemeinen nicht formal durchzuführen.*

Weiters lassen sich die beiden Begriffe mit folgenden Fragengestellungen leicht umschreiben:

**Verifikation:** Ob das Produkt **korrekt** entwickelt wird?

**Validierung:** Ob das Produkt **richtig** entwickelt wird? [10]

### 1.4 Rechtliche Vorschriften ab SAE Level 3

Wie in [11] beschrieben, sieht man in punkto rechtliche Grundlagen und politische Statements größere Hürden als in Bezug auf fehlende Technologie. Derzeit hinkt die Entwicklung von Rechtsgrundlagen noch etwas hinterher. Auch die Rechtsforschung gewinnt immer mehr an Bedeutung. Es wird betont, wie wichtig eine Rechtssicherheit ist, um die Technik sicher voranzutreiben. Vor allem die Frage, was passiert, wenn der/die FahrerIn nicht mehr für die Fahrzeugführung verantwortlich ist, beschäftigt derzeit nicht nur nationale sondern auch internationale ExpertInnen.

Abbildung 5 zeigt den grundlegenden Aufbau des Rechtssystems. An der Spitze steht das Europäische Recht, gefolgt vom Wiener Abkommen, das ein Straßenverkehrsabkommen darstellt und schlussendlich durch das jeweilige staatliche Rechtssystem. In diesem speziellen Fall bezieht es sich auf Deutschland.

Eine wesentliche Hürde stellt die Economic Commission for Europe (ECE) mit ihrer Bestimmung für „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage“ UN/ECE R79, wobei derzeit nur automatisiertes Fahren bis 10km/h erlaubt ist. Lenkeingriffe unter bestimmten Voraussetzungen sind erlaubt, jedoch muss der/die FahrerIn als Rückfallebene verfügbar sein und

diese auch übersteuern können. Auch in Österreich existiert neben den Gesetzen [12] und des Wiener Abkommens ein Code of Practice, der vorschreibt, dass es für Tests auf der Straße einen/eine FahrerIn als Rückfallebene geben muss [13]. Weitere Anknüpfungspunkte für Probleme sind die Straßenverkehrsordnung (StVO) und die Straßenverkehr Zulassungsbestimmung (StVZO) in der der/die FahrerIn nicht durch Nebentätigkeiten abgelenkt werden darf. Ein großes Problem stellt das Wiener Abkommen von 1968 dar, denn autonome Fahrzeuge würden gegen diesen völkerrechtlichen Vertrag verstoßen. Bezüglich eines teilautomatisierten Fahrens wurde im März 2014 ein Zusatz hinzugefügt, dass der/die FahrerIn das Fahrzeug übersteuern oder abstellen können muss, was natürlich einen/eine FahrerIn voraussetzt. Was noch weniger diskutiert wurde, ist die Frage der Datensicherheit und die Haftung der Provider.

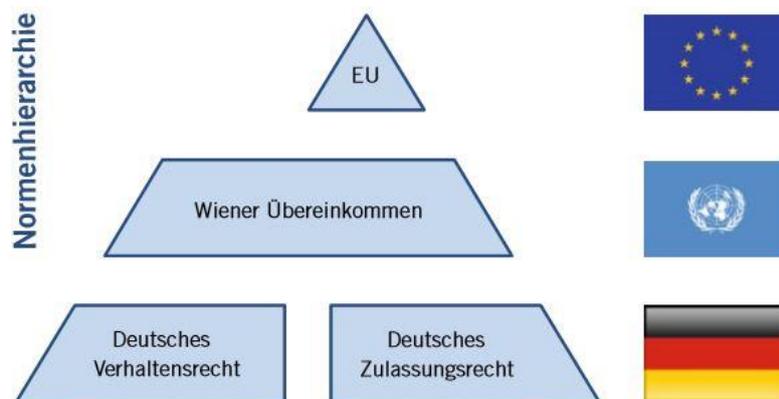


Abbildung 5: Gesetzliche Pyramide beim autonomen Fahren [11]

Ein wichtiger Punkt, vor allem für die Automobilindustrie, ist die Produkthaftung bzw. ProduzentInnenhaftung wie in [14] beschrieben. Dabei haftet der/die ProduzentInnen für sein/ihr Produkt, sollte sich ein Schaden durch einen Fehler des Produktes ergeben. Wichtig dabei ist, dass durch das fehlerhafte Produkt Folgeschäden entstehen. Unterschieden wird jedoch zwischen den jeweiligen Unterkomponenten innerhalb eines Fahrzeuges (z.B. Bremsen, Software), sodass der Hersteller eines Fahrzeuges die Forderung an den Subhersteller weiterleiten kann.

Bei der ProduzentInnenhaftung wird die Verletzung der Verkehrssicherungspflicht beurteilt und es muss nicht ein Schaden entstanden sein, denn der Hersteller muss im Rahmen seiner technischen/wirtschaftlichen Möglichkeiten die Gefahr gering halten. In Zukunft von besonderer Bedeutung werden die sogenannten deliktischen Produktbeobachtungspflichten sein. Dabei müssen Mängeln, die erst nach der Auslieferung des Produktes entstehen, beobachtet werden.

### 1.5 Freigabedilemma

Durch den Wegfall des/der Fahrers/Fahrerin und damit auch einer gültigen Metrik ist eine Raffung von Tests nicht mehr möglich. Für die Testdurchführung und für die Freigabe müssen andere Wege gefunden werden, denn die aktuellen Methoden sind nicht mehr gültig. Momentan kommen für die Freigabe unterschiedlichste Methoden zur Anwendung: Hil (Hardware-in the Loop), Sil (Software in the Loop) ViL (Vehicle in the Loop) und zum Schluss die Realfahrt als finale Validierung. Dabei ist die Realfahrt noch die valideste Methode für die Freigabe von Assistenzsystemen (bis incl. Level 2), jedoch muss ab dann eine neue Methode gefunden werden, um das Problem noch

ökonomisch überprüfen und freigeben zu können. Aktuell befinden sich noch TestfahrerInnen im Auto, welche das System im öffentlichen Verkehr überwachen und gegebenenfalls eingreifen können. Sobald aber das Fahrzeug mit seinen Fahrfunktionen in höhere Automatisierungsstufen gelangt, wird es nicht mehr gelingen, eine Absicherung nur mehr mit Realtests zu vollziehen. Dazu gibt es auch statistische Berechnungen, die aufzeigen, wie groß die Anzahl an gefahrenen Kilometern sein müssten, um mit Sicherheit eine Freigabe zu erzielen. Für eine Freigabe eines Autobahnpiloten müssten z.B. 6,62 Milliarden Testkilometer gefahren werden, um statistisch besser zu sein, als ein/eine TestfahrerIn und nachträgliche Änderungen sind auf Grund des enormen Aufwandes und des Zeitdrucks in der Entwicklung sehr schwierig. Dies ist innerhalb der kurzen Entwicklungszeiten und auch aufgrund der enormen Kosten einfach nicht durchführbar. [8]

### 1.6 Forschungsfragen

Um das Thema etwas einzugrenzen, werden folgende zwei zentrale Forschungsfragen behandelt:

1. Welche relevanten Szenarien müssen für die Freigabe berücksichtigt/getestet werden (Corner Cases)?
2. Wie sehen die Freigabekriterien für eine Zulassung für die öffentliche Straße aus? (Was muss das System erfüllen)

Anhand der ersten Frage sollen die verschiedenen Szenarien anhand einer Parametervariation aufgezeigt und dann die kritischen Szenarien (Corner Case) bestimmt werden. Der Variationsprozess soll mittels Computer durchgeführt werden. Durch die Vielzahl an möglichen Variationen müssen neue Wege gefunden werden, sich auf die kritischen Szenarien zu konzentrieren. Da hier von statistischen Methoden Abstand genommen wird, ist die Parametergröße und Schrittweite eine entscheidende. Im Zuge der Arbeit und in Zusammenarbeit mit Magna Steyr, die sich die Fragestellung für eine simulative Freigabe stellen, werden zahlreiche Verfahren, die derzeit in der Forschung diskutiert werden, aufgelistet, jedoch für einen ersten Schritt einmal eine konkrete Methode ausgearbeitet und diese auf ihre Vor- und Nachteile hin untersucht.

Aus der zweiten Frage resultiert ein Katalog, der die verschiedenen kritischen Situation aufzeigt und Testmöglichkeiten sowie Gegenmaßnahmen definiert, um das System sicher für den öffentlichen Straßeneinsatz zu gestalten. Dazu muss in erster Linie sichergestellt werden, dass eine möglichst vollständige Abdeckung der Szenarien gefunden wird, um anschließend korrekte Maßnahmen treffen zu können.

### 1.7 Aktueller Stand internationaler Forschungsprojekte

Grundlage und wichtige Forschungsschwerpunkte für das autonome Fahren und insbesondere für die Validierung/Testung von autonomen Fahren, bilden die beiden internationalen Projekte ENABLE S3 und PEGASUS. Hieraus sollen die wichtigsten veröffentlichten Forschungsschwerpunkte für die vorliegende Arbeit herangezogen werden.

#### 1.7.1 PEGASUS

Das Forschungsprojekt PEGASUS (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen) ist ein Zusammenschluss von 17 ProjektpartnerInnen aus Wissenschaft und Wirtschaft mit dem Hauptziel eines einheitlichen Testens und Erprobens von automatisierten Funktionen innerhalb eines Entwicklungsprozesses, sowie den dahinter stehenden Werkzeugketten.

Diese Methoden sollen dann herstellerübergreifend eingesetzt werden und den Entwicklungsprozess schon frühzeitig unterstützen.[15]

### 1.7.2 Forschungsmaterial PEGASUS

Grundsätzlich orientiert man sich hinsichtlich der Sicherheit immer am Menschen und möchte das autonome System verbessern. Dazu muss man die Grenzen des Menschen bzw. auch des Systems kennen, um kritische Szenarien abgrenzen zu können, dies zeigt Abbildung 6. Vor allem die Übergabe bei der Überschreitung der funktionale Grenze wird wichtig sein ab SAE Level 3.

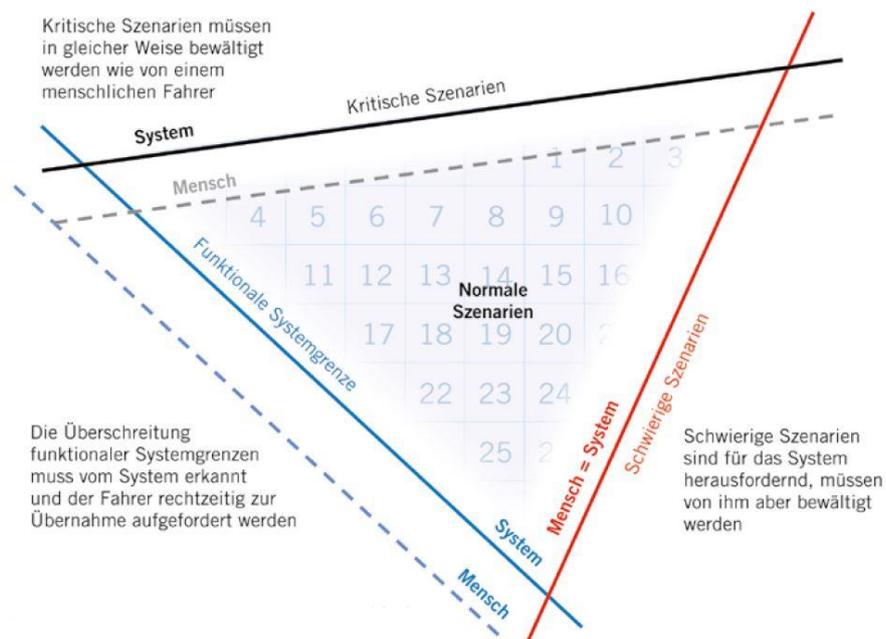


Abbildung 6: Grenzen von Mensch und Maschine in Bezug auf Szenariendefinition [16]

Ein Artikel [17], der die Sichtweise von Continental als Zulieferer beschreibt, stellt sich folgende Fragestellungen, um SAE L3+ und höhere Systeme sicher zu bearbeiten: Wie gut muss das System sein, was kann als Referenz herangezogen werden, welches Restrisiko wird zugelassen, wie kann ich das nachweisen, wie hoch ist der Testumfang und wann ist der Testumfang abgeschlossen?

Continental stellt dabei den/die FahrerIn in den Mittelpunkt ihrer Betrachtungen und beurteilt dabei das Versagen bei Unfällen. Dabei entstehen Unfälle nach einem gewissen Schema, dem sogenannten Schweizer Käse Modell siehe Abbildung 7.

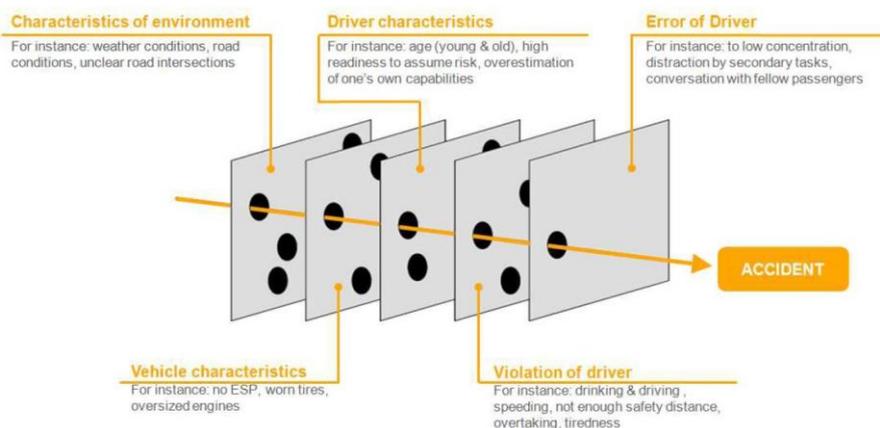


Abbildung 7: Schweizer Käse Modell [17]

Continental geht dabei von einer möglichen Auftretenswahrscheinlichkeit von  $1 \times 10^{-8}$  Unfällen/h auf deutschen Autobahnen aus, bei der es zu einem Unfall kommt (Unfallstatistik). Nun gilt es das System mit einer ähnlichen oder höheren Zuverlässigkeit auszustatten. Das vorgeschlagene Konzept von Continental ist folgendes: Dabei darf das gesamte System, wie die oben beschriebene Referenzwahrscheinlichkeit nicht übertreffen und mithilfe einer Fehlerbaumanalyse wird auf die jeweilige Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Subsysteme geschlossen (z.B. Anforderung für den Objekterkennungsalgorithmus). Somit ist sichergestellt, dass das System nur mehr mit gesicherten Inputgrößen versorgt wird (zuvor berechnet), und dadurch der Testaufwand deutlich verringert werden kann. Somit können innerhalb der Simulation die Bereiche Plan und Act ab der Fusion überprüft werden siehe Abbildung 8. Das System geht dabei nicht von Szenarien aus, sondern versucht das System, über einen statistischen Wert, wobei die menschlichen Fähigkeiten dabei quantifiziert werden, festzulegen.

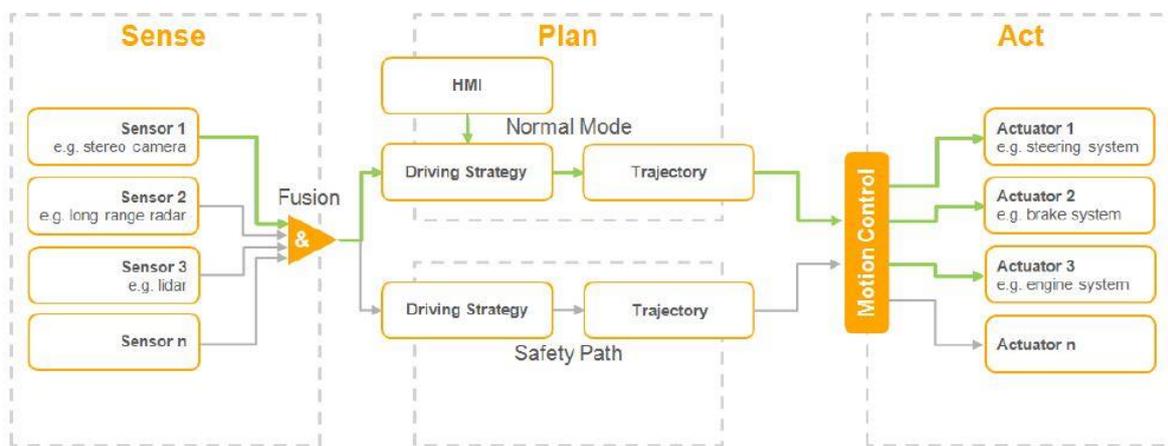
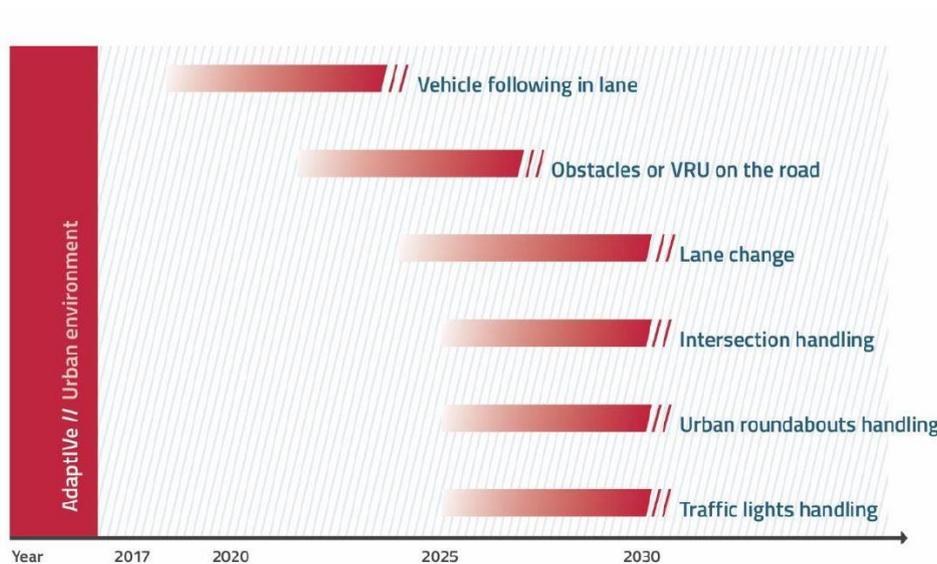


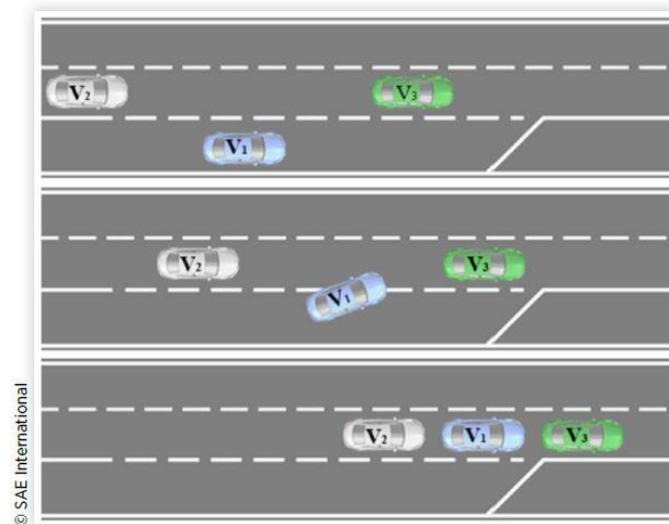
Abbildung 8: Architektur einer autonomen Fahrfunktion [17]

Vor allem in der Übergangszeit, zwischen autonomen Fahrzeugen und nicht autonomen Fahrzeugen, muss das autonome Fahrzeug alle möglichen Situationen beherrschen können. Eine mögliche Roadmap für den urbanen Raum zeigt Abbildung 9. Schwierigkeiten entstehen vor allem bei der Interaktion zwischen automatisierten und nicht automatisierten Fahrzeugen, denn das Fahrverhalten spielt dabei eine entscheidende Rolle. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, fährt V3 defensiver und V2 aggressiver, sodass es nach dem Einfädeln zu einem zu geringen Sicherheitsabstand kommt, was eine potentielle kritische Situation kennzeichnen könnte und im Zusammenspiel zwischen autonomes und personengelenkten Fahrzeugen immer kommen kann. [18]



**Abbildung 9: Roadmap für technische Funktionen innerhalb des urbanen Raumes**

Ab diesem Zeitpunkt findet auch erstmals die Beschreibung des Verhaltens von autonomen Fahrzeugen über Szenarien statt. Dabei wird von der Statistik weggegangen und versucht, über reale Szenarien, welche vordefinierte Startbedingungen aufweisen, dem Problem der vollständigen Abdeckung aller Möglichkeiten Herr zu werden.



**Abbildung 10: Kritische Situation: Fahrstreifenwechsel auf Autobahn [18]**

Grundsätzlich ist es nicht von Bedeutung, wer diese kritische Situation verursacht hat, sondern wie das autonome Fahrzeug sicher mit dieser Situation umgehen kann. Wichtige Fragestellungen für die Freigabe sind:

- Welche Szenarien müssen innerhalb des Fahrzeugentwicklungsprozesses getestet werden?
- Was sind die funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen für die Evaluierung?
- Welcher Test muss in welcher Testumgebung getestet werden?
- Welche Vorteile besteht in verschiedenen Testumgebungen?

Diese Fragestellungen können mit einer simulations-basierten Toolchain behandelt werden, siehe Abbildung 11. Die Abbildung 11 wird in einem automatischen Pfad (durchgezogene Linie) und in einem Pfad in dem manuelle Tätigkeiten durchgeführt werden müssen (strichpunktierte Linie) unterteilt.

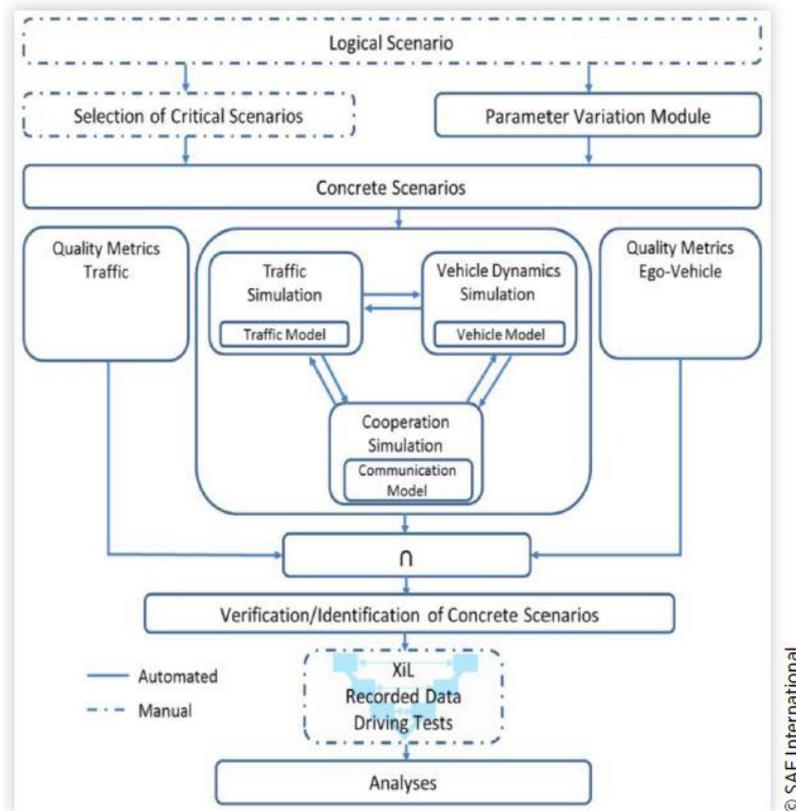


Abbildung 11: Toolchain für die Verifikation und Identifikation von kritischen Szenarien für autonome Fahrzeuge [18]

Tabelle 2 beschreibt eine Möglichkeit eines logischen Szenarios und stellt den Einstieg in die Toolchain dar. Die Selektion von kritischen Szenarien kann durch: ExpertInnenmeinungen, Peer-review Prozessen, aufgezeichneten Daten oder Szenarienkataloge erfolgen. Problem dabei ist, dass nicht alle kritischen Szenarien bestimmt werden können. Das macht den rechten Ast notwendig, auf dem auch der Fokus liegt. [18]

Der Großteil der Forschung verfolgt den szenarienbasierten Ansatz. Dieser umfasst den Hauptteil dieser Masterarbeit und distanziert sich vom statistischen Ansatz von Continental [17].

Tabelle 2: Beispielhaftes logisches Szenario mit den dazu passenden Parameterraum [18]

Attribute	Parameter Space	Unit
Entrance Ramp Length	$l_{\min} - l_{\max}$	m
Number of Lanes	$N_{\min} - N_{\max}$	n.a.
Speed Limit Highway	$v_{\min} - v_{\max}$	m/s
Traffic Flow	$Q_{\min} - Q_{\max}$	veh/s
Driver Behavior	Defensive - Aggressive	n.a.
Curve Radius	$r_{\min} - r_{\max}$	m
Coefficient of Friction	$\mu_{\min} - \mu_{\max}$	n.a.

© SAE International

Bei der Parametervariation werden aus den logischen Grundszenarien durch Variation weitere Szenarien generiert, wobei es entscheidend ist, gewisse Parametervariationen genauer zu beobachten/testen und andere weniger genau. Der nächste Schritt ist diese Szenarien in eine Simulation überzuführen. Die automatische Klassifizierung, ob das Verhalten kritisch ist oder nicht, wird mit einer angepassten Metrik gemacht. Eine Metrik wird dazu verwendet, um verschiedenen Aspekte zu qualifizieren.

Innerhalb der simulationsbasierten Toolchain ist es wichtig den Begriff „Kritikalität“ weiter zu definieren. Einer der bekanntesten Vertreter ist die Time to collision (TTC) wobei TTC wie folgt definiert wird:

$$TTC = \frac{\Delta p}{v_{ego} - v_{obj}} = \frac{\Delta p}{v_{rel}} \quad 1.1$$

wobei  $\Delta p$  die Differenz der beiden Fahrzeugpositionen in [m],  $v_{ego}$  die Ego Fahrzeuggeschwindigkeit in [m/s],  $v_{obj}$  die Objektgeschwindigkeit in [m/s] und  $v_{rel}$  die Relativgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge in [m/s].

Eine weitere Kenngröße ist Time to brake (TTB) mit folgender Formulierung:

$$TTB = \frac{\Delta p + \frac{v_{rel}^2}{2 * a_{ego,max}}}{v_{rel}} = TTC + \frac{v_{rel}}{2 * a_{ego,max}} \quad 1.2$$

wobei  $a_{ego,max}$  die maximal mögliche Verzögerung die das Ego-Fahrzeug ausführen kann in [m/s<sup>2</sup>]. Diese sicherheitsrelevante Metrik ist die Zeitspanne bei der eine Kollision mit 0 m/s nicht mehr verhindert werden kann, abhängig von der maximalen Verzögerung des Ego-Fahrzeuges. Die letzte Kennzahl stellt die benötigte Verzögerung dar.

$$a_{req} = a_{obj} - \frac{v_{rel}^2}{2 * \Delta p} \quad 1.3$$

wobei  $a_{obj}$  die Beschleunigung des Objektes in [m/s<sup>2</sup>] darstellt. Um die Robustheit und die Performance der Szenarien zu verbessern, wird vorgeschlagen, mehrere Metriken gleichzeitig zu verwenden um mehr Informationen zu sammeln. Der große Nachteil dieser vorgestellten Metriken (Formel 1.1-1.3) ist, dass es nur das Ego Fahrzeug beurteilt, also spurbezogen ist. Um die Verkehrsqualität zu untersuchen, muss eine Kombination der Metriken angewandt werden, wobei diese Methode bereits Stand der Technik ist, jedoch in einem andern Technologiegebiet und für diese Anwendung angepasst wurde. Die grundsätzlichen Anforderungen sind folgende:

- Jedes kritische Szenario muss identifiziert werden
- Die Falsch-positiv Rate (FPR) sollte gering sein
- Für die Bewertung sollte ein Notensystem herangezogen werden
- Es sollte einen Schwellwert geben, der eine binäre Klassifizierung der kombinierten Metriken erlaubt

Scenario Characteristics	Results	Scenario Characteristics	Results
Disturbance	None	Disturbance	Map Errors
Safety Metrics	$TTC_{crit} = \emptyset, TTB_{crit} = \emptyset, a_{req, crit} = \emptyset$	Safety Metrics	$TTC_{crit} = \emptyset, TTB_{crit} = \emptyset, a_{req, crit} = \emptyset$
Traffic Metrics	$G_{final} = 0.15$	Traffic Metrics	$G_{final} = 0.46$
Criticality	Not Critical	Criticality	Critical

Scenario Characteristics	Results	Scenario Characteristics	Results
Disturbance	Sensor Errors	Disturbance	Aggressive Traffic Participants
Safety Metrics	$TTC_{crit} = 2.9 \text{ s}, TTB_{crit} = 1.2 \text{ s}, a_{req, crit} = -6 \text{ m/s}^2$	Safety Metrics	$TTC_{crit} = 1.9 \text{ s}, TTB_{crit} = 1.2 \text{ s}, a_{req, crit} = -5.7 \text{ m/s}^2$
Traffic Metrics	$G_{final} = 0.29$	Traffic Metrics	$G_{final} = 0.19$
Criticality	Critical	Criticality	Critical

Abbildung 12: Unterschiedliche Szenarien und ihren Einteilung ob kritisch oder nicht [18]

Wie in Abbildung 12 ersichtlich, werden jeweils die Zahlenwerte berechnet und individuell entschieden, ob der Wert kritisch ist oder nicht. Dabei unterscheiden sich die Szenarien hier in ihrer Möglichkeit der Störung (Sensorfehler, aggressives Fahrverhalten).

Um noch einen Schritt weiter zu gehen, wird vorgeschlagen in [19], die funktionale Dekomposition (siehe Abbildung 13) in Kombination mit kritischen Szenarien anzuwenden, was zu Folge hat, dass der Testaufwand noch einmal verringert werden kann. Dabei werden die autonomen Funktionen in sechs Schichten zerlegt:

1. Informationszugang: Wird hauptsächlich durch die Infrastruktur, das Wetter und Objekte beeinflusst. Es kann auf alle Level und Fahrfunktionen angewendet werden. Es beschreibt welche Information zur Verfügung steht. Beispielproblem: verdecktes Verkehrszeichen durch parkende Autos, fehlende oder defekte Informationen.
2. Informationsempfang: Der Informationsempfang beinhaltet umweltwahrnehmende Sensoren und Car-to-Car Kommunikation. Beispielproblem: Verschmutzte Kamera, die nicht alle Informationen aufnehmen kann.
3. Informationsverarbeitung: Objektklassifizierung, Sensorfusion und das generieren eines Umweltmodells sind typisch für diese Schicht. Beispielproblem: Falsche Objektklassifizierung.
4. Situationsverständnis: In dieser Ebene wird, die aus Ebene 3 mit ziel- und wertspezifischen Informationen erweitert. Beispielproblem: Fehlerhafte Trajektorienvorhersage.
5. Verhaltensentscheidung: Besteht aus dem Algorithmus, der über das Verhalten der autonomen Fahrfunktion entscheidet. Beispielproblem: Fehler in der Manöverplanung das zu einer Kollision führt.
6. Ausführung: Die schlussendliche Durchführung basiert auf Level 6. Es beinhaltet die Fahrzeugführungsalgorithmus sowie die nötigen Aktuatoren. Beispielfehler: nicht stabiler Fahrzeugführungsalgorithmus.

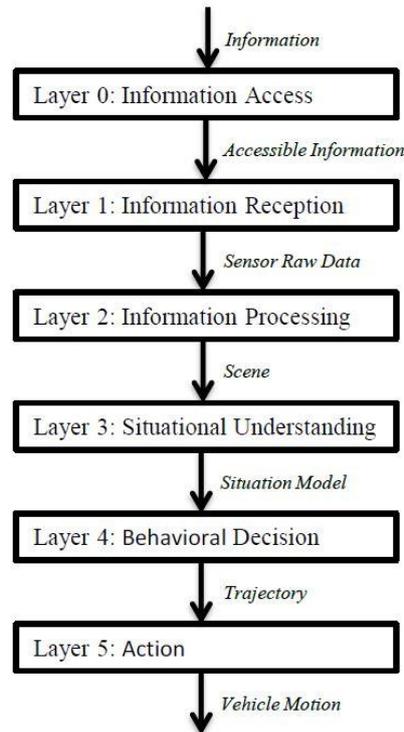


Abbildung 13: verschiedenen Dekompositionsschichten [19]

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Möglichkeiten einer statistischen sowie der simulationsgestützten Methode auf mögliche kritische Szenarien zu stoßen, gibt es die Möglichkeit aus der Vergangenheit zu lernen, nämlich über Unfallszenarien. Dabei werden Unfälle analysiert und ein Fehlerbaum eines realen Unfallgeschehens herangezogen. Dabei wechseln zum Beispiel alle Fahrzeuge in die rechte Spur und das OUT Fahrzeug fährt auf Obstacle auf (siehe Abbildung 14-Tesla Unfall in der Schweiz). Der Fehlerbaum und die Ursache für den Unfall werde in Abbildung 15 dargestellt. Das Resultat wäre dann eine Szenarienableitung.

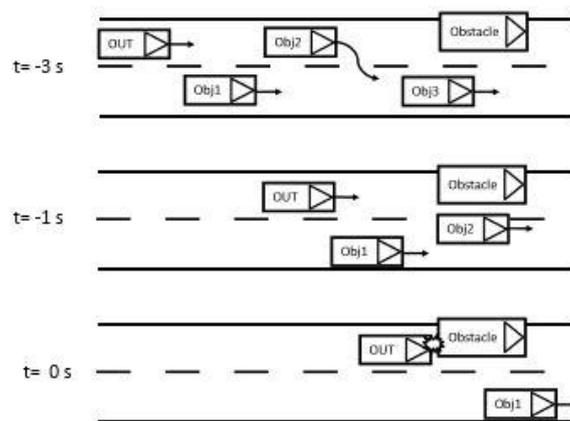


Abbildung 14: Anhand eines exemplarischen Unfalls wird ein Szenario abgeleitet [19]

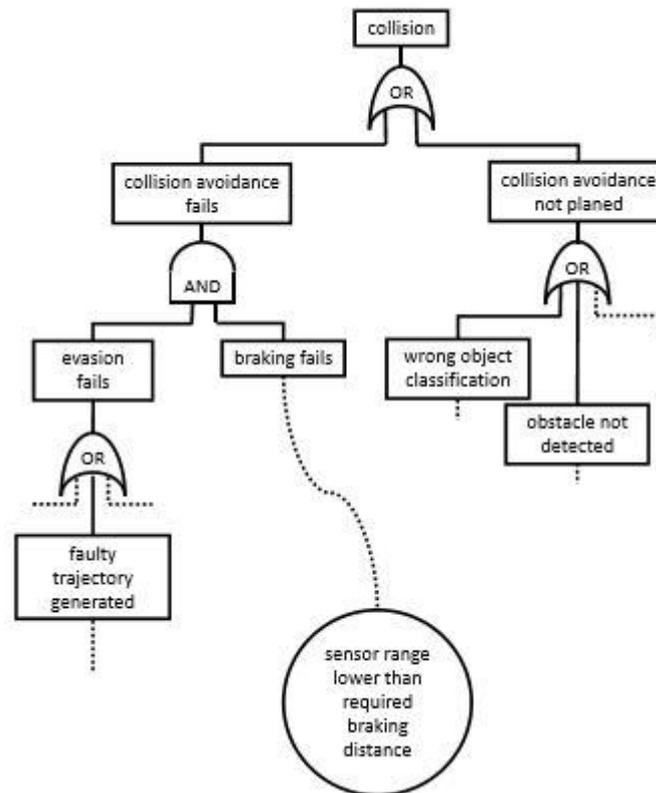


Abbildung 15: Fehlerbaumanalyse [19]

Die oben beschriebenen Vorgänge umfassen nur die Methoden für die Szenariengenerierung, jedoch wird in [20] vorgeschlagen, alle Szenarien in einer zentralen Datenbank abzulegen und diese laufend zu bedaten, sowie auch wieder aus den gesammelten Daten zu profitieren, in dem ein ständiger up- und download erfolgt.

Um die Sicherheit von autonomen Fahrzeugen zu kontrollieren/testen, wird versucht, schon möglichst früh im Entwicklungsprozess einen großen Testumfang zu überprüfen. Dabei wird eine Datenbank mit verschiedensten Quellen konfiguriert, (alte Projekt, kritische Szenarien als vorangegangenen Simulationen, Unfalldatenbanken) die dann anschließend für die Überprüfung des Modells herangezogen werden können (SiL, MiL, HiL usw.) siehe Abbildung 16. Dabei erfolgt die Entwicklung entlang des V-Modells.

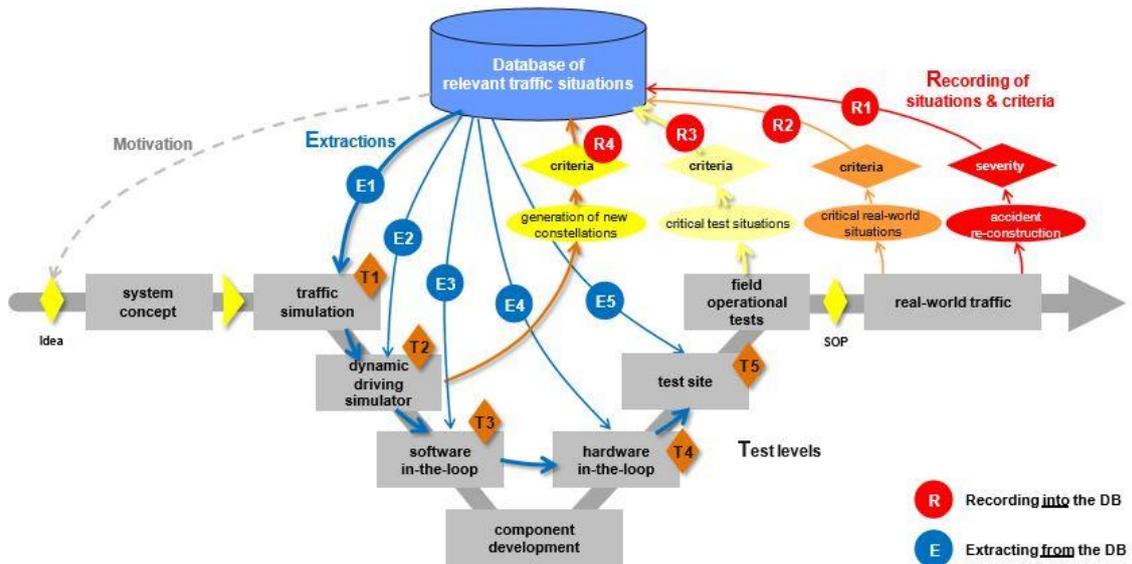


Abbildung 16: Datenbank für verschiedene Testwerkzeuge [20]

Es gibt unterschiedliche Quellen die interessant für die Datenbank sind, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Unterschiedliche Quelle der Datenbank [20]

virtuell	Verkehrssimulationsdaten	
real	Fahrsimulatorendaten	
	Felddaten	Reale Felddaten
		Field operational Test (FOD)
		Fahrstudien (NDS)
	Teststreckentest	
Unfalldatenbank		
verbal	Expertenwissen	

Prinzipiell ist der Großteil der Fahrsituationen nicht kritisch und es wird davon ausgegangen, dass bei Testung in kritischen Situationen, grundsätzlich von einem sicheren Verhalten des Systems ausgegangen werden kann. Dabei müssen einige Begriffe zuvor definiert werden. [21]

**Situation:** stellt eine Momentaufnahme dar.

**Szenario:** ein Zusammenhang von mehreren Situationen über einen längeren Zeitraum.

Für genauere Details der beiden Begriffsdefinitionen siehe [22]. Die aktuelle Methode für die Auswahl von Metriken geht über kinematische Grenzwerte wie z.B.: Beschleunigung, Gierrate, Lenkwinkel, Ruck und Parameter wie Time-to-Collision (TTC) hinaus und beinhaltet zusätzlich, wie schon zuvor einmal beschrieben auch Verkehrsmetriken. Kritische Situationen bzw. Grenzwerte für Quer-/Längsbeschleunigung für die Bewertung der kinematischen Grenzwerte finden sich in Abbildung 17 bis Abbildung 19 [23], [24].

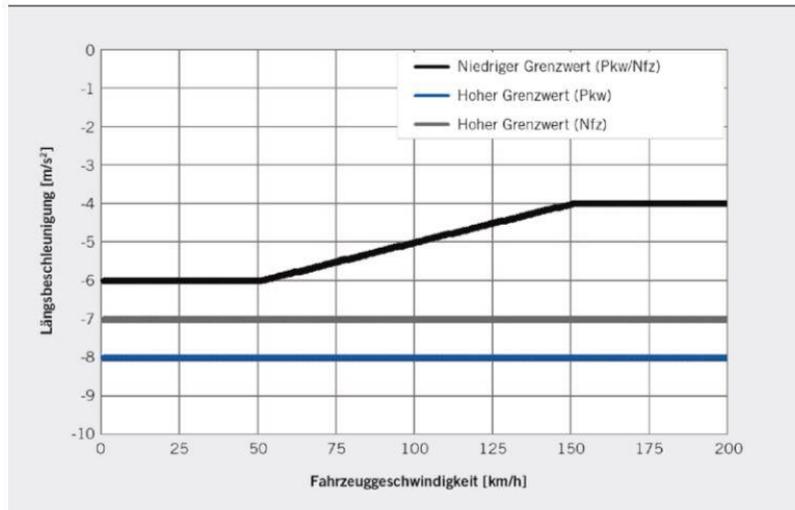


Abbildung 17: Übersicht der Längsbeschleunigung abhängig vom Fahrzeugtyp [23]

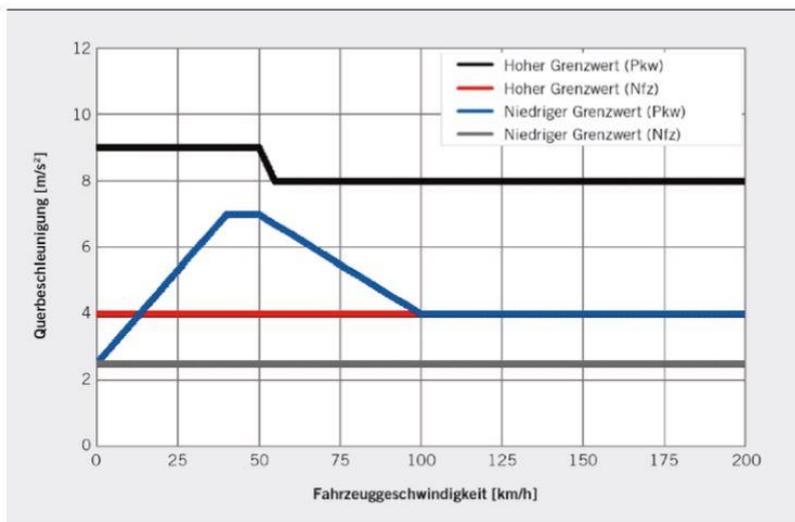


Abbildung 18: Übersicht der Querbeschleunigung abhängig vom Fahrzeugtyp [23]

GEFAHRENSTUFE	GRENZWERTE AUFGRUND ZEITLÜCKE THW		ODER	GRENZWERTE AUFGRUND KOLLISIONSZEIT TTC		Fahrerreaktion
	THW [s]	RELATIVGESCHWINDIGKEIT [km/h]		TTC [s]	BREMSLICHTSTATUS [-]	
Stufe 1	0,5	>20		1,75	aus	
	0,35	>10		-	-	
Stufe 2	0,35	>20		<1	an	
Stufe 3	-	-		<1	aus	

Abbildung 19: Übersicht der Gefahrenstufen und TTC Grenzwerte [23]

Schwierig ist die komplette Abdeckung des Zustandsraumes innerhalb der möglichen Szenarien siehe Abbildung 20. Der nicht abgedeckte Raum ergibt sich aus der mathematischen Modellierung und der Tatsache, dass es zwischen Realität und Modell einen Unterschied gibt. [25]

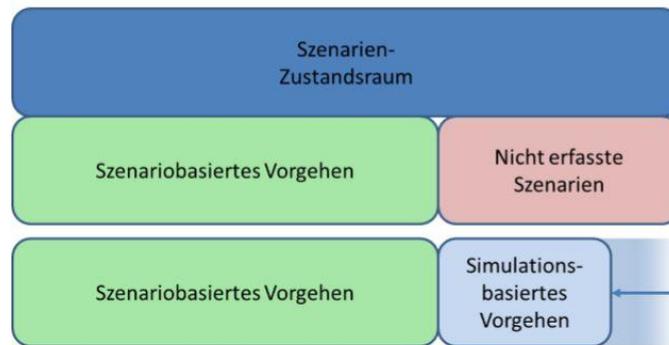


Abbildung 20: Gesamtdeckung der möglichen Szenarien [25]

### 1.7.3 *ENABLE S3*

Das industriegetriebene Projekt zielt darauf ab, die teure und kostenintensive Verifikation und Validierung durch effizientere Methoden zu ersetzen. Dabei soll der Spagat zwischen der physikalisch, nicht ganz korrekten, jedoch schnellen Simulation und dem teuren realen Testen geschlossen werden, um neue innovative Lösungen zu ermöglichen (siehe Abbildung 21). Das Projekt besteht aus 68 ProjektpartnerInnen aus 16 verschiedenen Ländern innerhalb der Europäischen Union.[26]

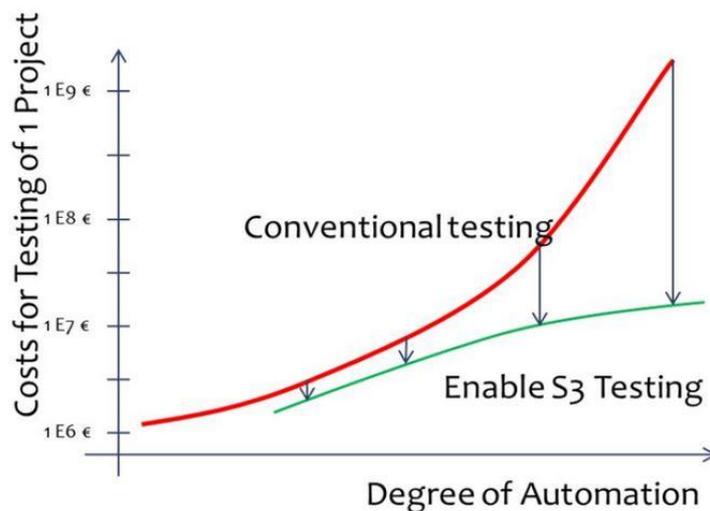


Abbildung 21: Ziele von ENABLE S3 [26]

### 1.7.4 *Forschungsmaterial ENABLE S3*

Die gesamte deutsche Autoindustrie orientiert sich, wie schon oben beschrieben, am Szenarien katalog. Um den Szenarien katalog bildlich zu beschreiben, werden Verkehrssequenzbilder (Traffic Sequence Charts TSC) generiert, die sowohl zu Beginn der Entwicklung, um kritische Szenarien und Use-Cases zu definieren, als auch am Schluss die Testkriterien abzuleiten zu können, verwendet. Inhalt dieses Abschnittes ist es, szenariogetriebene Spezifikation sowie szenariogetriebene Akzeptanztests durchzuführen. Dabei geht die TSC Methode noch einen Schritt weiter. Es finden sich dort Abfolgen von Bildern, die genau mit ihren dynamischen Parameter (Geschwindigkeit, Abstand zu Objekten und Entscheidungsregeln) hinterlegt werden, die weiteren Informationsgehalt beinhalten [27], [28].

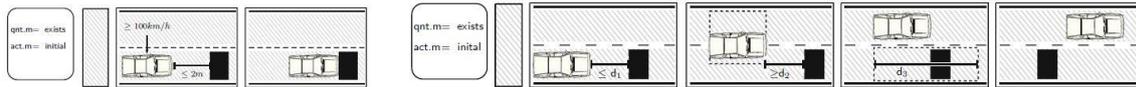


Abbildung 22: Aufbau von Traffic Sequence Charts (TSC), links zu sehen eine Kollision, rechts ein Fahrstreifenwechsel [28]

Bis jetzt wurde immer nur auf die verkehrsbezogene Metrik geachtet (Abstand, TTC usw.), jedoch spielen auch die Umgebungsbedingungen einen großen Einfluss. So kann zum Beispiel durch eine Steigung oder eine Kurve ein Fahrzeug erst später oder gar nicht erkannt werden. [29]

### 1.8 Stand der Technik

Ziel dieses Abschnittes ist es, noch nicht aufgelistete Publikationen zu diesem Forschungsgebiet darzustellen. Grundsätzlich liegt aber der Fokus auf den beiden internationalen Forschungsprojekten (ENABLE S3; PEGASUS), die gemeinsam auch eine Leaderposition einnehmen.

In [30] wird ein Vorschlag der Szenarienselektion vorgeschlagen. Dabei kann man einerseits die Szenarien nach Kategorien einteilen wie z.B.: Autobahn, links Kurve, rechts Kurve, Landstraße zusammen mit verschiedenem Verkehrsverhalten. So ist es möglich sich auf spezielle Testläufe zu konzentrieren. Eine weitere Möglichkeit ist, die bereits vorgestellte Methode nach kritischen Szenarien zu suchen. Zusätzlich könnte man sich auf spezielle Szenarien konzentrieren, die länderspezifisch ausfallen.

Ein Vorschlag, der auch in der Mechanikentwicklung bereits Einzug gehalten hat, wird in [31] beschrieben. Denn, wie beim Rosten von Metallen, wird auch nicht Jahre lang gewartet, bis ein Ereignis eintritt, sondern es werden die Tests soweit gerafft, dass die Zeit vorausberechnet werden kann. Ähnlich sollte dieser Ansatz beim autonomen Fahrzeug geschehen, denn die Unfallereignisse bzw. kritischen Situationen sind im Vergleich zu den gefahrenen Kilometer und der Auftretenshäufigkeit eher gering. Grundsätzlich beruht die Beschleunigung auf folgenden Überlegungen: Naturalistic Field Operational Tests (N-FOT), Test Matrix, Worst-Case Szenario und Monte Carlo Simulation. Dabei wird eine sechs Stufenmethode vorgeschlagen um den Freigabeprozess zu beschleunigen:

- Sammeln von großen Datenmengen innerhalb des realen Verkehrs.
- Extrahieren von Daten, die auf Wechselwirkungen zwischen autonomen Fahrzeugen und personengelenkten Fahrzeugen beruhen.
- Statistische Modellierung von personengelenkten Fahrzeugen, stellen die größte Bedrohung für autonome Fahrzeuge dar.
- Reduzieren von nicht kritischen Situationen, durch welche die kritisch sind.
- Durchlaufen der Monte Carlo Methode mit der beschleunigten Variante.
- Verwenden von statistischen Methoden um die mathematische Beschleunigung wieder herauszurechnen.

Eine sehr klare aber in diesem Bereich nicht zielführende Aussage, wird in [32] vorgeschlagen. Sollte ein Fahrzeug alle Sicherheitsabstände einhalten und sich damit rechtskonform verhalten, dann kann er nicht der Auslöser für einen Unfall sein, so die Argumentation. Diese Aussage verfolgen alle diese beschriebenen Ansätze, nur muss eine Lösung gefunden werden, wie man diese effizient überprüfen kann.

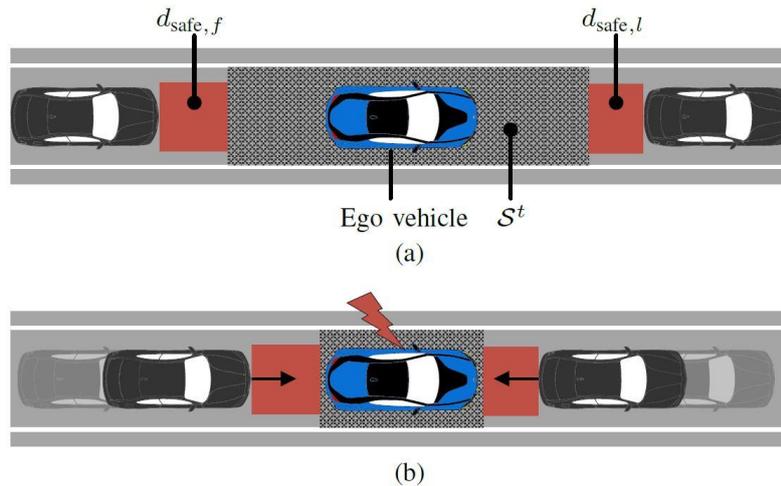


Abbildung 23: Beschreibung des sicheren Bereiches zwischen den beiden Fahrzeugen [32]

Wie in Abbildung 23 a) gezeigt beschreibt  $S^t$  den sicheren Bereich zwischen den beiden Fahrzeugen (auch grau hinterlegt) und die Sicherheitsabstände (rot hinterlegt) des voraus- und des folgenden Fahrzeuges. In Abbildung 23 b) ist ein Unfall vorprogrammiert, sollte das vorausfahrende Fahrzeug bremsen und das folgende Fahrzeug beschleunigen.

Um einen sicheren Abstand einzuhalten, wird folgender Abstand berechnet:

$$S^t = \{d \in \mathbb{R} \mid d_f(t) + d_{safe,f}(t) < d < d_l(t) - d_{safe,l}(t)\} \quad 1.4$$

Diese Bedingung muss natürlich auch innerhalb eines Fahrstreifenwechsels eingehalten werden, wie in Abbildung 24 gezeigt. Der Sicherheitsabstand ist wieder in Rot hinterlegt und Sicherheitsbereich in grau.

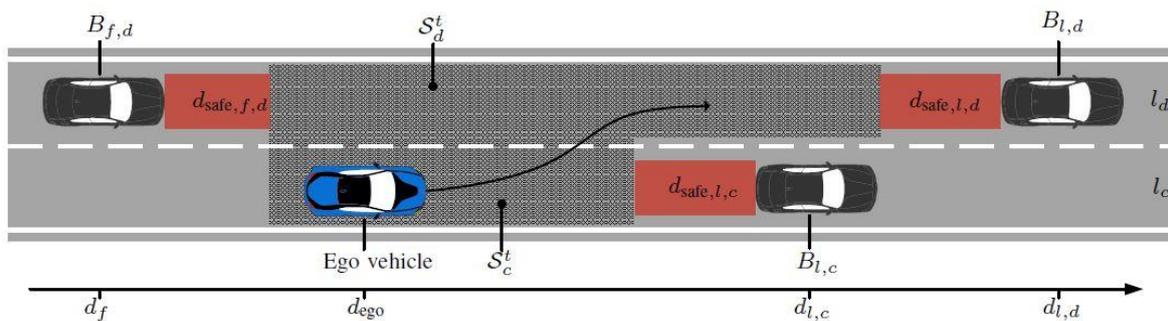


Abbildung 24: Sicherheitsabstand innerhalb eines Fahrstreifenwechsels [32]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass dieses Thema derzeit sehr stark polarisiert und gleichzeitig in immer noch unentdeckte Gebiete vorstößt. Das bedeutet einerseits, dass es noch wenig Knowhow gibt und dieses vorhandene Knowhow, wenn es nicht innerhalb von öffentlichen Forschungsprojekten abläuft, sehr stark geheim gehalten wird. Das erklärt auch die teilweise sehr abstrakten Beschreibungen der Methoden sowie noch keine klare Richtung, welche Methode schlussendlich zielführend sein wird.

Genau diese Überlegung verfolgt auch Magna Steyr und in Zusammenarbeit mit dieser Diplomarbeit soll eine Methode entwickelt werden, wie man einen virtuellen Freigabeprozess entwickeln kann. Ziel

ist es, in weiterer Zukunft die teuren und zeitintensiven Mule Cars teilweise zu umgehen und so einen Zeitvorteil zu generieren.

### 1.9 Entwicklungsmethodik Magna

Auch bei Magna wurde schon vor einigen Jahren das einheitliche V-Modell etabliert. Bis jetzt konnten die Fahrfunktionen noch gut abgedeckt werden, denn der Testaufwand bewegt sich noch im ökonomischen Bereich und verfügt außerdem über eine valide Methode. Doch mit der Entwicklung und geplanten Einführung von Level 3+ Systeme müssen neue Wege gefunden werden. Dabei sieht Magna folgende fünf Bereiche als entscheidend, an denen noch gearbeitet werden muss, um 2020 ein Level 3+ System freigeben zu können (siehe auch Abbildung 25):

- Simulation (MIL)
- Hardware in the Loop (HIL)
- Proving Ground
- Public Road
- Scenarios Generation & Fusa

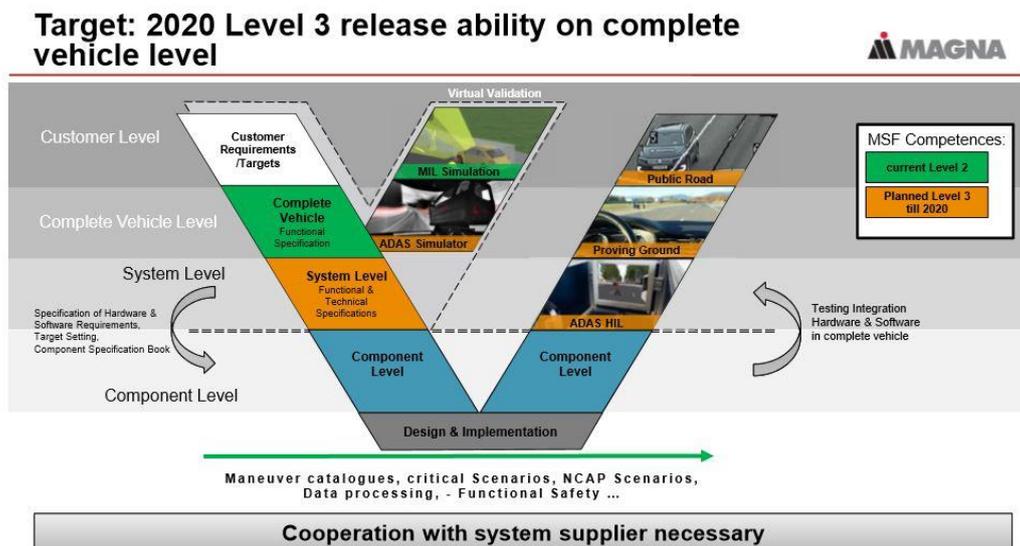


Abbildung 25: V-Modell aus Sicht von Magna

Magna hat sich schon sehr intensiv mit der Methodik beschäftigt und ist sich auch schon bewusst, wohin der Prozess sich entwickeln wird, um Level 3+ System für die öffentliche Straße freigeben zu können. Wobei ein allgemeines Vorgehen bzw. konkrete „Rezepte“ derzeit im gesamten OEM Bereich nicht vorhanden sind. Ein Meilenstein und wichtiger Bestandteil sind bei Magna Verkehrsdaten, die in Kooperation mit Alplab, gesammelt und ausgewertet werden. Dabei befindet sich eine öffentliche Teststrecke auf der Autobahn in der Steiermark, die für diese Zwecke genutzt werden kann und auch durch öffentliche Hand gefördert wird siehe Abbildung 26.



### Öffentliche Teststrecken

- A2 zwischen Graz-West und Laßnitzhöhe (Teststrecke ASFINAG)
- A2/A9 St. Michael – Slowenien in Vorbereitung
- Streckenabschnitte Stadtverkehr Graz ab 2018
- Kooperation mit Testregion Lungau für Tests im Winter

### Private Teststrecken

- Private Teststrecke von Magna und AVL in Gratkorn
- Test-Autobahntunnel im Leobener „Zentrum am Berg“
- „Red Bull Ring“ als Teststrecke in den Wintermonaten

Abbildung 26: Alplab Teststrecke auf der Autobahn

## 2 Methodikentwicklung

Ziel der Methode ist es, durch Nutzung der virtuellen Umgebung, jene Situationen herauszufiltern, die kritische Szenarien darstellen. Die Realisierung sollt mit Hilfe von Variationen der Verkehrssituationen mit einer hinterlegten Bewertungsmetrik gelingen.

Dabei stellt Abbildung 27 einen möglichen Rahmen für das Vorgehen dar. Aus einer Modelldatenbank soll aufbauend auf einem Szenarienkatalog zuerst in die virtuelle Welt übergegangen werden und jene kritischen Szenarien herausgefunden werden, die schließlich übergeführt werden können in verschiedenen X in the Loop Test. Ziel dieser Methode ist es, das teure und zeitintensive reale Testen anhand der wenigen kritischen Szenarien virtuell freizugeben bzw. dort eine Entscheidungshilfe zu geben. Dabei beschränkt sich die Arbeit nur auf das Identifizieren von kritischen Szenarien für ein Fahrstreifenwechselmodell und das anschließende Ableiten eines Freigabekatalogs. Ein reines virtuelles Freigeben wird aufgrund der begrenzten Aussagekraft der virtuellen Abbildung nicht möglich sein.

Damit wird sichergestellt, dass einerseits die Entwicklung beschleunigt und effizient gestaltet werden kann, jedoch mit dem Hintergrund die Sicherheit zu erhöhen. Abbildung 27 verdeutlicht, dass durch Anwendung der verschiedenen Simulations – und Testumgebungen die Szenarien soweit eingegrenzt werden können, dass schlussendlich der Testaufwand auf der Teststrecke sich in einem durchführbaren und kostensparenden Rahmen bewegt. Natürlich kommt es bei diesem Ablauf zu einem ständig Up- und Download von Daten zwischen der Bewertung und der Modelldatenbank, was sich positiv auswirkt, um später auch Erkenntnisse ableiten zu können. Der Ablauf in Abbildung 27 verfolgt das Ziel, die real zu überprüfenden Szenarien zu reduzieren. Ausgehend von einer Modelldatenbank, die ihrerseits wieder in verschiedene Datenbanken gegliedert ist, werden Szenarien generiert, die einer virtuellen Bewertung zugeführt und anschließend bewertet werden. Aus der virtuellen Bewertung erfolgt die Ableitung von Testfälle für sogenannte X-in the Loop Test, die schlussendlich auf Fahrzeugebene final getestet werden. Um die Entwicklung zielorientiert zu gestalten, erfolgt eine Validierung der Modelldatenbank anhand der Fahrzeugtests. Durch diesen simulationsbasierten Ansatz werden die unzähligen Möglichkeiten, die besonders effizient in der virtuellen Welt getestet werden können, jene herausgefiltert, die auch für die Fahrzeugentwicklung entscheidend sind. Dabei sollen vor allem jene gefunden werden, die zu kritischen Situationen führen. In Abbildung 27 wird gezeigt, wie durch die jeweiligen Entwicklungsschritte die Szenarien schrittweise reduziert werden, sodass auf Gesamtfahrzeugebene nur mehr die kritischen Fälle getestet werden müssen.

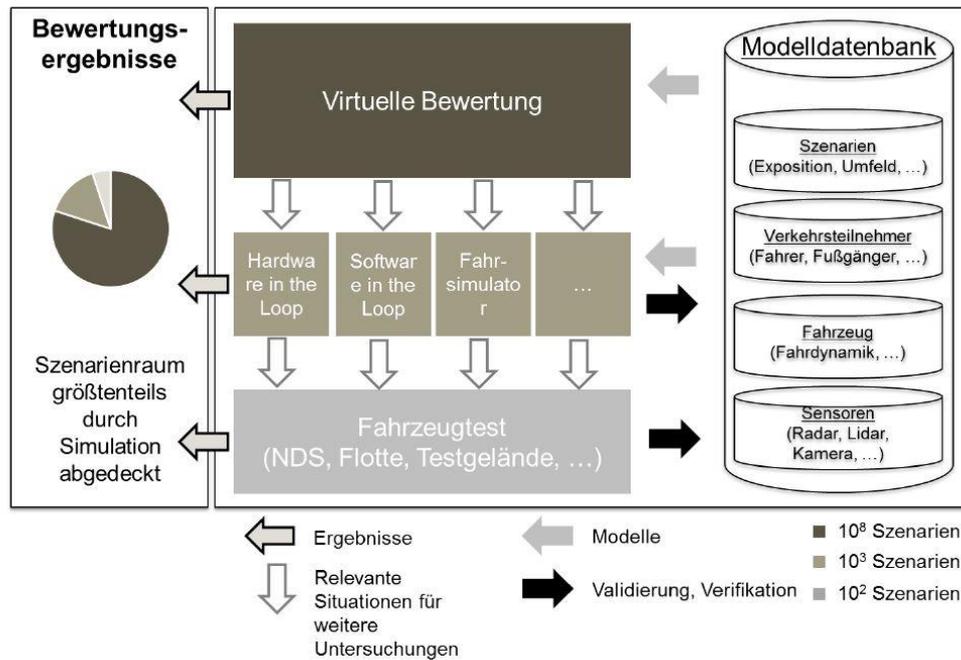


Abbildung 27: Systematisches Vorgehen bei der Entwicklung durch Filterung [9]

## 2.1 Entwicklungsansatz

Aufbauend auf dem publizierten Vorgehen im Rahmen des Pegasus Projektes wurde im Zuge der Abschlussarbeit ein ganzheitlicher Rahmen für die Freigabe eines Fahrstreifenwechselsassistenten (LCA) abgeleitet (siehe Abbildung 28). Die Ebene Null gibt den Aufgabentitel wieder und verdeutlicht, um welche Art von Freigabe es sich im Prozess handelt. Bis Ebene Eins werden logische Szenarien innerhalb des LCA beschrieben. Ein logisches Szenario beinhaltet laut [25] folgende Aspekte:

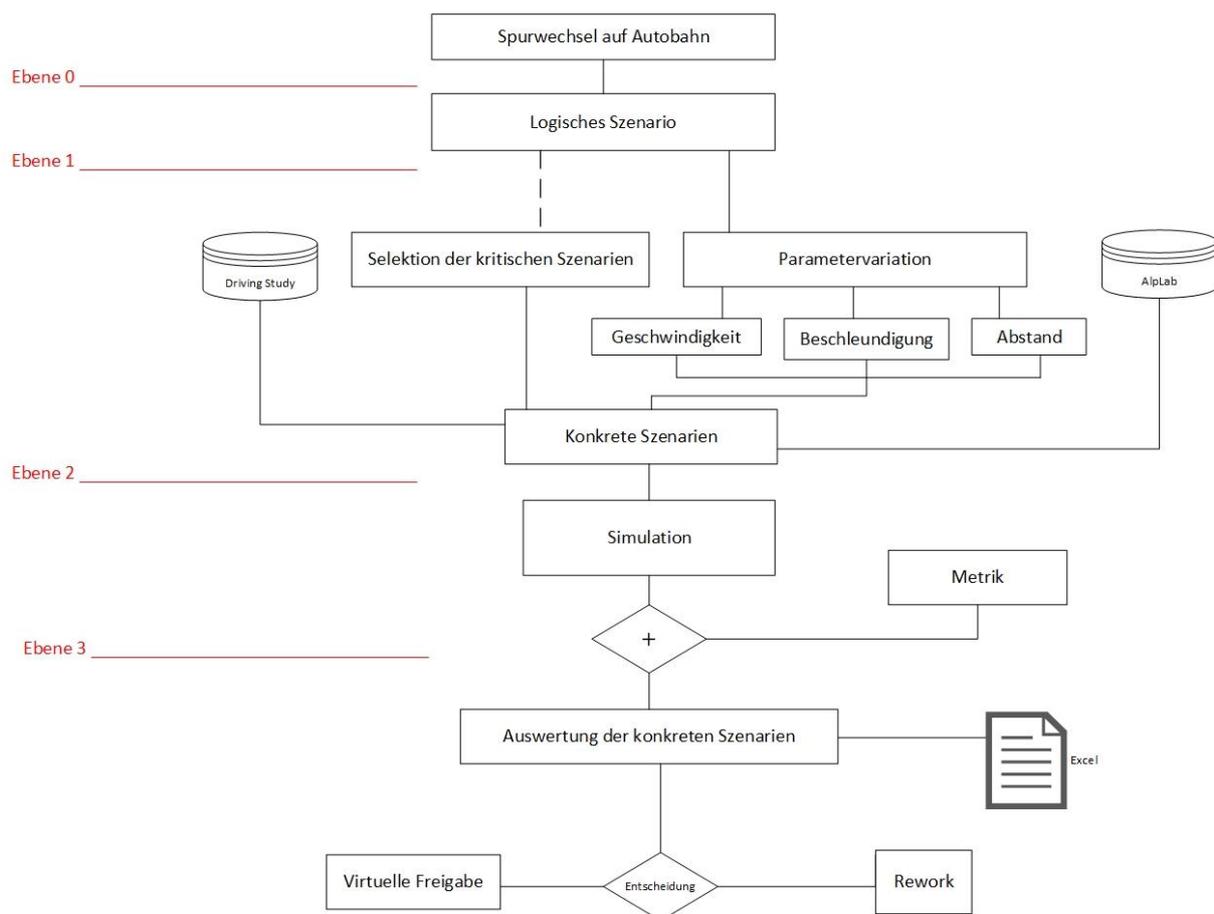
- Infrastruktur: Anzahl der Fahrstreifen, Geschwindigkeitsbegrenzung
- Versuchsträgerfunktionen: Physikalische Grenzen, Sensor und Aktuatorgrenzen
- Verkehr: Anzahl und Arten von Verkehrsteilnehmer, Anfangspositionen
- Umwelteinflüsse: Nebel, Temperatur, Regen
- Fahrer: Zustand des Fahrers, Fahrverhalten, Belastung des Fahrers

Aufbauend auf diesen Definitionen ergibt sich ein Szenarienkatalog, der anschließend in 2.2 Szenariengenerierung aufgelistet ist. Erstmals beinhaltet dieser Katalog neun logische Fahrstreifenwechselszenarien, die sich dann in Ebene Eins (Abbildung 28) wiederfinden. Dieser Katalog kann ständig erweitert werden, was auch der Aufbau der Simulationsmethode zulässt. Zwischen Ebene Eins und Zwei in Abbildung 28 gibt es eine Unterscheidung zwischen einem manuellen (ExpertInnenwissen) und einem automatischen Pfad (Computervariation). Das ExpertInnenwissen soll eine Unterstützung hinsichtlich der vollständigen Abdeckung geben und Szenarien adressieren, die sicher zu kritischen Situationen führen. Das Wissen kann aus verschiedenen Quellen herrühren (Unfalldatenbank, Erfahrung, Einschätzung der Situation), dies wird jedoch in der vorliegenden Diplomarbeit nicht berücksichtigt. Die Parametervariation wird über Matlab gesteuert und später genauer beschrieben. Jedenfalls bestehen die Variationsparameter aus folgenden Größen: Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstand zwischen den Fahrzeugen, wobei diese Parameter jeweils für EGO (=untersuchendes Fahrzeug) und Target Fahrzeugen (=Verkehr) gültig sind. Die beiden Datenbanken in Ebene Zwei in Abbildung 28 stellen zwei zusätzliche Informationen bereit, die

zusätzlich miteinbezogen werden können. Dieser Pfad wird jedoch in der Arbeit nicht behandelt, soll aber trotzdem dokumentiert werden, um aufzuzeigen, welche Möglichkeiten bestehen, die LCA Freigabe möglichst vollständig abzudecken. Sobald konkrete Szenarien vorliegen (Manipulation der Parameter über Matlab) wird über IPG Carmaker ein Simulationsdurchlauf gestartet und abgespeichert.

In Ebene Drei in Abbildung 28 erfolgt die Bewertung des Simulationslaufs. Als Grundlage soll ein Ampelsystem dienen, welches die konkreten Szenarien in verschiedene Kritikalitäten ordnet, wie in Abbildung 29 dargestellt. Mit Hilfe dieses Ampelsystems können objektive Zahlen aus dem Verhalten des EGO Fahrzeuges abgeleitet werden und sollten diese Zahlen einen gewissen Prozentsatz überschreiben (siehe Freigabeprozess) dann muss eine Modellüberarbeitung durchgeführt werden. Erfüllt das Modell die Anforderungen kann auf Grund der Daten eine virtuelle Freigabe erzielt werden. Der nächste Schritt wären verschiedene X-in the Loop Tests, um schlussendlich auf die Teststrecke gehen zu können.

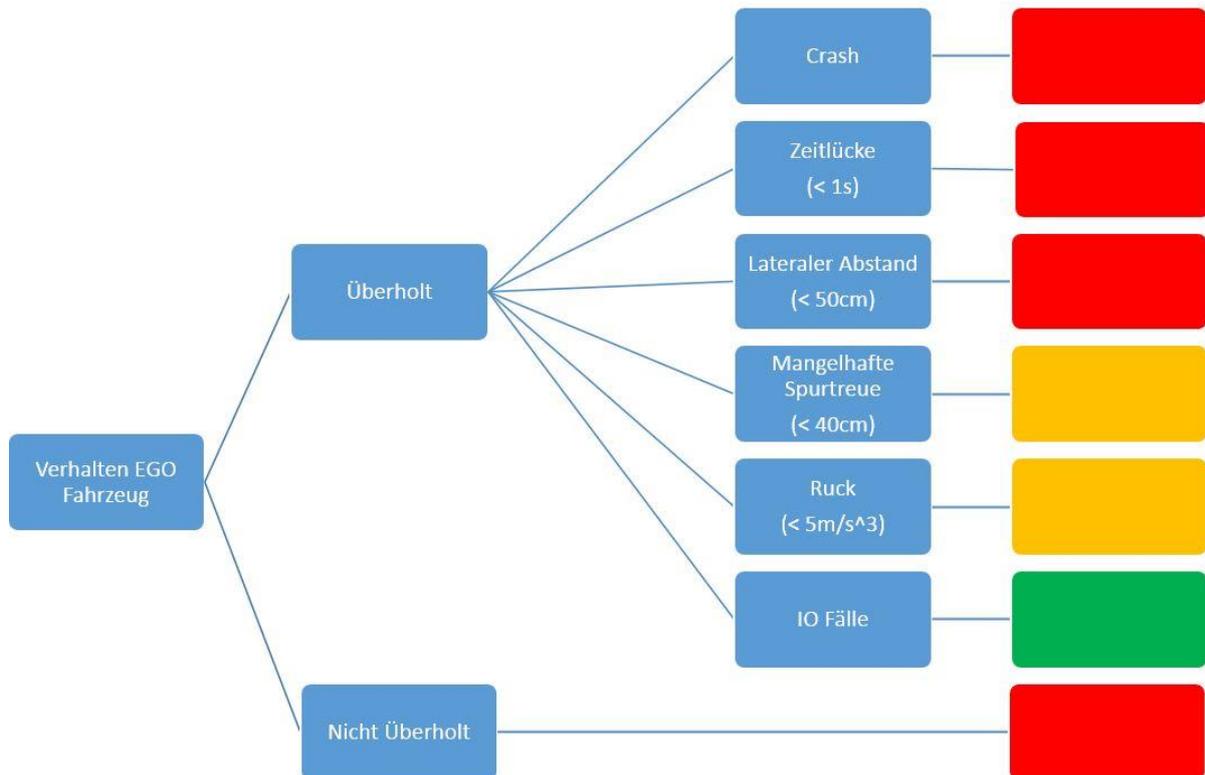
Die Daten werden kompakt in einem Excel Dokument gespeichert und stellen so die unübersichtlichen Simulationsergebnisse sehr anschaulich dar.



**Abbildung 28: ganzheitlicher Denkansatz bei der Freigabe**

Da die Methode nur Szenarien überprüft, in denen auch wirklich Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden, werden jene als nicht bestanden deklariert, in denen das gewünschte Verhalten nicht gesetzt wurde. Auf dieser Aussage beruht auch das Ampelsystem. Sollte ein Fahrstreifenwechsel erfolgen, gibt

es verschiedene Bewertungskriterien, die das Verhalten des EGO Fahrzeuges beschreiben. Auf jeden Fall zu verhindern, ist der Crash (siehe Abbildung 29). Ähnlich kritisch wird ein zu geringer Abstand zwischen den Fahrzeugen bewertet und führt zu einer negativen Bewertung (Zeitlücke). Sobald diese rote Bewertung auftaucht und eine gewisse Prozentzahl überschreitet, bezogen auf die Gesamtvariationszahl, muss das Modell automatisch einer Optimierung zugeführt werden. Innerhalb der freigaberelevanten Szenarien darf es zu keinem Crash kommen bzw. müssen diese Crasheszenarien herausgefunden werden, auf die dann speziell innerhalb eines Optimierungsprozesses (Rework) eingegangen wird.



**Abbildung 29: Bewertung der Szenarien anhand einer Ampeldarstellung**

Zusätzlich zum Crash wird eine Zeitlücke, wenn diese geringer als eine Sekunde ist, als kritisch eingestuft, denn aus [33] folgt, dass das ACC System nicht geringer als eine Sekunde eingestellt werden sollte. Ähnliche Überlegungen gibt es in [23], wobei hier eine Zeitlücke von 0,5s als kritisch angegeben wird. Auch ein lokaler Abstand, kleiner als 50cm, innerhalb eines Fahrstreifenwechsels führt zu einem kritischen Verhalten, wobei dieser Wert aus einer subjektiven Überlegung kommt. Der gelbe Bereich in Abbildung 29 stellt einen Übergangsbereich dar, dieser kann nicht klar als kritisch eingestuft werden, jedoch aber zu einem problematischen Verhalten führen (mangelhafte Spurtreue). Im europäischen Neuwagenbewertungsprogramm (EURO NCAP Test) wird für den Spurhalteassistenten eine seitliche Distanz von 30cm zur Straßenmarkierung vorgeschrieben. In diesem Fall wird noch eine Spanne von 10cm dazu addiert um sicherzustellen, dass der Spurhalteassistenten auch den geforderten Test besteht [34]. Der zweite Aspekt im gelben Bereich (Ruck) ist ein Komfortthema und kommt ebenfalls aus den Normen für ACC [33].

Wie in der Literatur vorgeschlagen, müsste man zwischen einer EGO Metrik und Verkehrsmetrik unterscheiden, was in Abbildung 28 nicht gemacht wurde. Dabei bezieht sich die Egometrik

ausschließlich auf die Spur des EGO Fahrzeuges und betrachtet den fließenden Verkehr nicht. Deshalb muss auch eine Verkehrsmetrik entwickelt werden, um eine vollständige Bewertung vornehmen zu können. Im Rahmen einer ersten Bewertung der Methode wurde nur eine Egometrik eingeführt und auf eine Verkehrsmetrik verzichtet.

## 2.2 Szenariengenerierung

Der Aufbau des Szenarienkataloges erfolgt ganz chronologisch anhand von systematisch erstellten Verkehrsflussbildern und wird ergänzt durch Recherchen wie [35] oder [36].

Ziel der Simulation ist es, schnell und effizient kritische Situationen zu identifizieren. Eine Vorreiterrolle hinsichtlich des autonomen Fahrens zeigt die Firma Waymo, die bereits selbstfahrende Autos auf der öffentlichen Straße testet. Deren Zugang ist es, eine Verbindung zwischen Simulation und realem Testen herzustellen, wobei der Fokus auf dem realen Test liegt. Die Datenmenge, die bis dato anhand von Simulationen gesammelt wurde, ist erstaunlich (8 Milliarden Kilometer) [37]. Diese Kennzahl erscheint enorm, wird aber relativiert, wenn man sich vor Augen führt, dass alleine durch das Szenario 2 durch Geschwindigkeitsvariation bereits knapp 340000km gesammelt wurden.

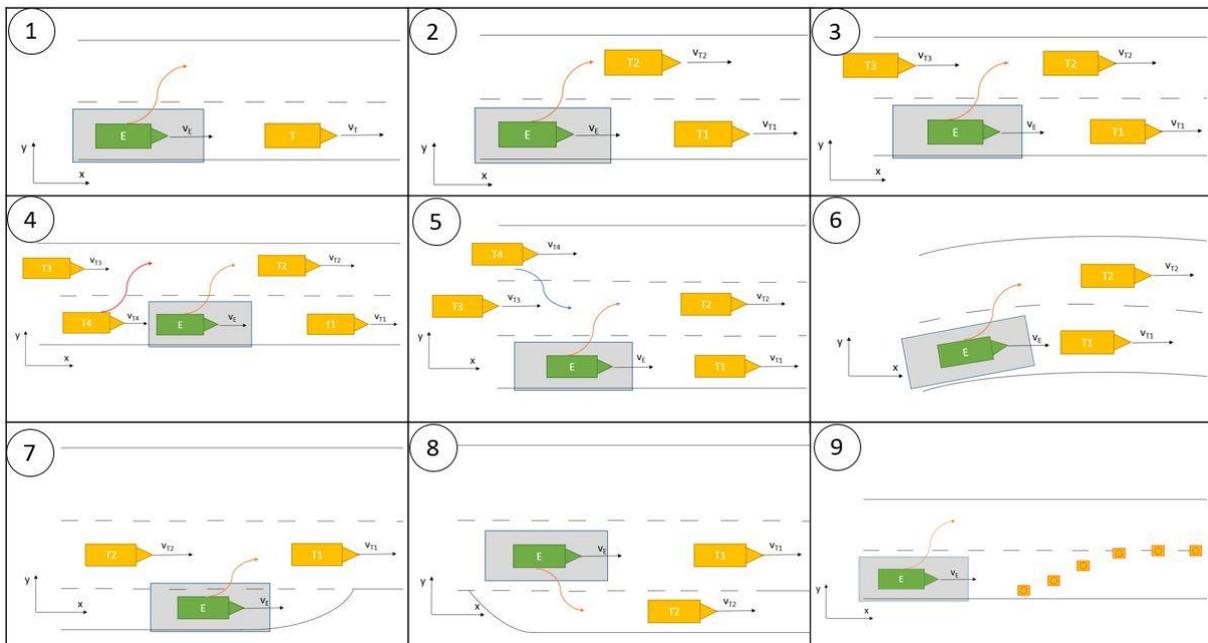


Abbildung 30: Szenarienkategorisierung

Um die Fahrstreifenwechsel nach ihrer Charakteristik zu unterteilen, folgte eine systematische Aufgliederung, wie in Abbildung 30 dargestellt. Der einfachste Fahrstreifenwechsel ist jener, der nur ein vorausfahrendes Fahrzeug (hier Target Fahrzeug) überholt. Anschließend wird die Komplexität schrittweise erhöht, in dem zusätzlicher Verkehr hinzugefügt wird. Zur Vervollständigung der Szenarien können sich auch die Straßenbedingungen ändern (siehe Abbildung 30 Bild 6), wobei es sich dabei nur um eine Streckenänderung handelt und die Verkehrsparameter gleich bleiben. Den Abschluss bilden zwei Sonderfälle, die Autobahnauffahrten und Autobahnabfahrten sowie eine Baustellensituation.

Neben den Fahrzeugparametern (Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstand) besteht die Möglichkeit noch weitere Parameter zu verändern, dies wird im nächsten Bild angedeutet (Abbildung 31). In Abbildung 31 links oben befinden sich die Umweltbedingungen wie Wetter, Tageszeitpunkt und Temperatur. Rechts oben spielen die fahrzeugseitigen Systeme eine Rolle, denn es stellt sich die Frage,

wie sich das Fahrzeug bei einem Fahrstreifenwechsel verhält, bei dem Systeme verdreht sind oder sogar einen Ausfall haben. Links unten (Abbildung 31) betrifft verschiedene Straßenbedingungen, wie z.B. Tunnel, Baustellen und Tempolimits. Schlussendlich spielen noch die unterschiedlichen StraßenverkehrsteilnehmerInnen eine wichtige Rolle innerhalb eines Fahrstreifenwechsels, betreffend ihrer Größe und auch Geschwindigkeit. Somit kann für eine möglichst vollständige Abdeckung die verschiedenen Grundszenarien aus Abbildung 30, mit den Bedingungen aus Abbildung 31 kombiniert werden und es entstehen wieder neue Szenarien. Diese Überlegung ist in der Arbeit noch nicht implementiert, kann aber im Variationsprozess einfach hinzugefügt werden.

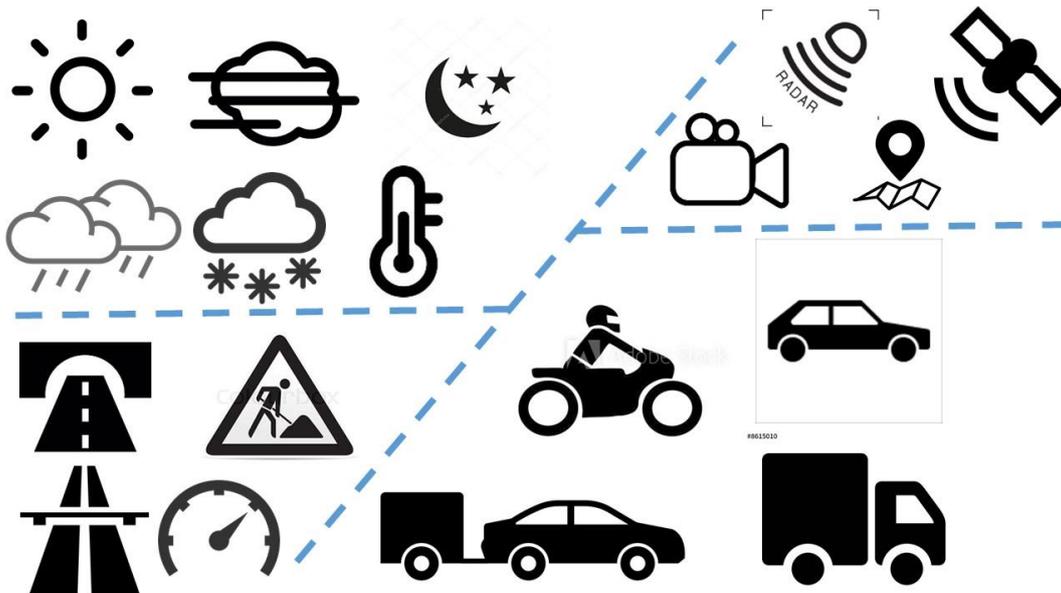


Abbildung 31: Variation der Rahmenbedingungen

Um die oben beschriebenen Grundszenarien (Abbildung 30) in ihre möglichen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbereiche einzugrenzen, werden diese weiter unterteilt. Gleichzeitig erfolgt so eine manuelle Plausibilisierung, um die Variationsvielfalt einzugrenzen (siehe ab Kapitel 2.2.1)

Die Entscheidung ob ein Verhalten kritisch ist oder nicht, wird anhand der geltenden Normen und Richtlinien sowie Publikationen gesammelt und eine Metrik daraus abgeleitet [33,38-40]. Grundsätzlich wird der Fahrstreifenwechsellistent für die Autobahn entwickelt. In Österreich ist dort unter normalen Bedingungen ein Geschwindigkeitsniveau zwischen 80 und 130km/h vorgesehen. Der Fall einer Baustelle wird im Szenario 9 separat behandelt und reduziert die Geschwindigkeiten auf bis zu 60km/h. Die Beschleunigungswerte für das EGO Fahrzeug kommen aus den oben beschriebenen Normen und sind in Tabelle 4 zusammengefasst sowie in IPG Carmaker hinterlegt. Dabei muss zwischen dem EGO Fahrzeug und einem Target Fahrzeug unterschieden werden. Für das EGO Fahrzeug sind die Systemwerte, die in Tabelle 4 vorliegen, gültig und die Target Fahrzeuge werden in der Regel von Personen gelenkt und können natürlich von diesen Systemwerten abweichen.

Tabelle 4: Parameter EGO Fahrzeug

Clearance		Curve capability		Operating speed			Deceleration		Jerk		Acceleration	
$\tau_{min}$	1s	$R_{min}$	125m	$v_{max}$	13,9m/s	~50km/h	$v < 5m/s$	5m/s <sup>2</sup>	$v < 5m/s$	5m/s <sup>3</sup>	$v < 5m/s$	4m/s <sup>2</sup>
$c_{min}$	2m			$v_{min}$	1,39m/s	~5km/h	$v > 20m/s$	3,5 m/s <sup>2</sup>	$v > 20m/s$	2,5m/s <sup>3</sup>	$v > 20m/s$	2m/s <sup>2</sup>

2.2.1 *Szenario Eins*

Szenario Eins beinhaltet das mitunter Einfachste. Dabei befinden sich nur zwei Fahrzeuge auf der Straße, wobei das vorausfahrende gelbe Fahrzeug (Target Fahrzeug) sowie das grüne Fahrzeug (EGO Fahrzeuge) verschiedene Fahrzustände einnehmen (Variation der Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstand zueinander). Die Entscheidung für einen Fahrstreifenwechsel wird automatisch durch das LCA Modell vollzogen. Die Unterscheidung zwischen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvariation ist entscheidend und wird an dieser Stelle beschrieben und eine einheitliche Nomenklatur festgelegt. In IPG sind diese Szenarien extra aufgebaut und bei einer Geschwindigkeitsvariation (Index: v) wie der Name schon sagt, werden dort ausschließlich die Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge variiert, neben einer Positionsvariation, siehe Abbildung 32 Bild 1, 2 und 4. Das andere Szenario wird als Beschleunigungsvariation (Index: acc) bezeichnet, das den Target Fahrzeugen unterschiedliche Verzögerungen bzw. Beschleunigungen zuweist, siehe Abbildung 32 Bild 3. In der Arbeit werden ausschließlich Verzögerungen ausgewertet und so der Freigabeprozess mit objektiven Zahlen befüllt.

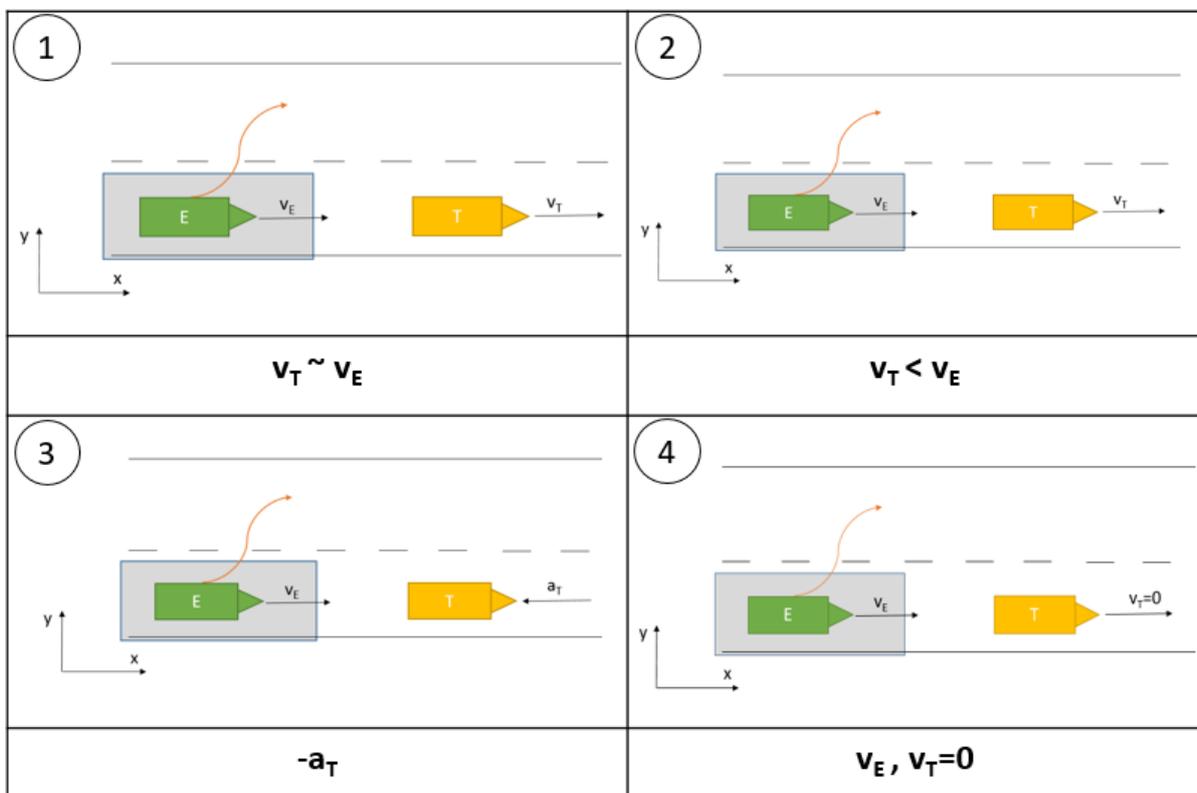


Abbildung 32: Variationsparameter: Szenario eins - Fahrstreifenwechsel mit einem Fahrzeug in front

Neben den Verkehrsflussbildern in Abbildung 32, wo eine grobe Unterscheidung hinsichtlich Beschleunigung oder Geschwindigkeit durchgeführt wurde, finden sich im nächsten Schritt (Tabelle 6 und Tabelle 7) exakte Werte, die sich aus den österreichischen Rahmenbedingungen ableiten lassen (siehe Tabelle 5). Da das EGO Fahrzeug ein systemgelenktes Fahrzeug darstellt und sich natürlich an die Vorschriften halten muss, bewegt es sich auch in einem Bereich zwischen 80-130 km/h (gültig für die gesamten Szenarien). Ausgenommen sind die Szenarien der Auf- und Abfahrten von der Autobahn.

Beim Target Fahrzeug kann man nicht mehr davon ausgehen, dass sich das Fahrzeug bzw. der Lenker an die vorgeschriebenen Geschwindigkeiten hält, deshalb müssen hier die Mittelwerte klar abgedeckt werden und zusätzlich noch überhöhte Geschwindigkeiten berücksichtigt werden. Grundlage hierfür ist eine Studie des Kuratoriums für Verkehrssicherheit (KFV) in Österreich [41], siehe Tabelle 5. Wenn man

also diese Daten in einem Bereich zwischen 90 und 130km/h analysiert und die Maxima betrachtet, kommt man laut Studien auf einen Bereich von 62 bis 135km/h. Nun werden jedoch, aufgrund des vollfaktoriellen Aufbaus der Variation, die Parameter etwas eingeschränkt und dies führt in diesem Fall auf einen Bereich von 80-130km/h für die Szenariensimulation.

Der Abstand beruht auf folgender Überlegung: Da eine maximale Reichweite der Objekterkennung in IPG Carmaker von 200m bzw. sich die Long Range Radar Werte in einem Bereich bis ca. 200m bewegen, soll genau am Übergang des Erfassungsbereichs eine Fahrzeugpositionierung erfolgen. Der untere Grenzwert von 60m kommt aus dem vorgeschriebenen Sicherheitsabstand von 2s zustande, wobei dieser bei der Höchstgeschwindigkeit von 130km/h sogar leicht unterschritten wird. Jedoch gibt es auch Untersuchungen des KfV, dass der durchschnittliche Abstand im Bereich von 1,33s liegt [42]. Daten aus Studien für Auf- und Abfahrten auf Autobahnen in Österreich waren auf Anfrage bei der Asfinag nicht vorhanden.

**Tabelle 5: Durchschnittliche Geschwindigkeit laut KfV in Österreich [41]**

Tempolimit [km/h]	N	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl der Fahrer
30	103.438	36,2	9,3	146
50	457.546	49,4	11,2	149
70	83.155	68,1	12,9	145
90	329.934	83,4	21,6	147
100	437.869	97,5	18,3	143
130	706.804	116,4	17,8	136

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 3 innerhalb Abbildung 32)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,2,4 innerhalb Abbildung 32)

Die Positionierung der Target Fahrzeuge erfolgt immer in Bezug auf das EGO Fahrzeug. Das globale Koordinatensystem (Index g) besteht aus der x-Richtung in Fahrtrichtung und y-Richtung in Richtung des Fahrstreifenwechsels und zusätzlich ist es der Nullpunkt der Simulationsstrecke in IPG. Ein lokales Koordinatensystem (Index l), dass die Startposition des Target Fahrzeuges vorgibt, befindet sich im Schwerpunkt des EGO Fahrzeuges. Ab Szenario 3 hat das EGO Fahrzeug-Koordinatensystem einen x-Versatz in Bezug zum globalen Koordinatensystem. Grund ist die rückwärtige Positionierung eines der Target Fahrzeuge. Ansonsten sind die beiden Koordinatensysteme kongruent und starten beim Streckenursprung. Das beschriebene Koordinatensystem bezieht sich auf den *Funktionstest 1* und muss grundsätzlich an die Modellierung des LCA Modells angepasst werden. Das globale Koordinatensystem befindet sich in der y-Position genau Fahrbahnmittig und variiert wird ausschließlich die x-Position, sodass 100% überdeckend gefahren sind.

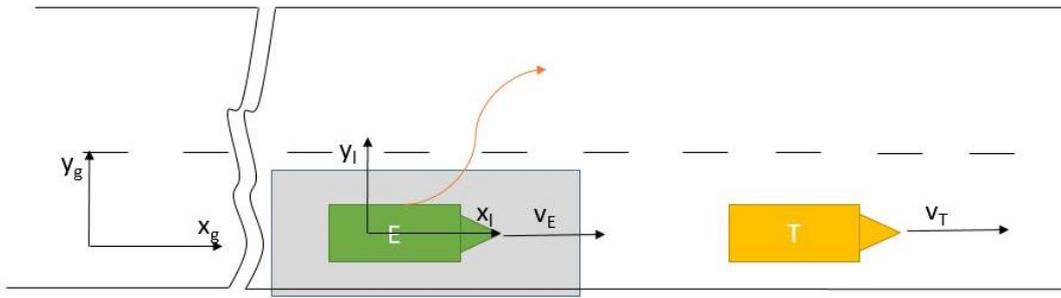


Abbildung 33: Koordinatensystem für die Positionierung des EGO Fahrzeuges

Tabelle 6: Parameterbereich für Szenario Eins (Geschwindigkeit)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target</b> [km/h]	<b>target_distance</b> [m]
80-130	80-130	60-200
80-130	0	60-200

Tabelle 7: Parameterbereich für Szenario Eins (Beschleunigung)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>target_distance</b> [m]
80-130	-1-10	60-200

Die Schrittweiteinteilung wird in einem der nachfolgenden Abschnitte beschrieben und hängt stark von der gewählten Methode ab. Wenn man sehr fein Auslösen möchte, dann bewegt man sich in einem Bereich für die Geschwindigkeit von 5km/h, für den Abstand in 10m und für die Beschleunigung in 1m/s<sup>2</sup> Schritten. Folglich wird noch eine Methode vorgestellt, die diese Schrittweite vergrößert und anschließend wieder verkleinert, deshalb ist eine generelle Aussage zur Schrittweite schwierig. Die Tabelle 6 und Tabelle 7 sollen jedenfalls auflisten, welcher Parameterbereich damit abgedeckt werden kann. Hier muss angemerkt werden, dass die feine Schrittweite, aufgrund der geringen Inputparameter in Bezug auf die Simulationszeit, noch keine so große Auswirkung hat. Will man aber diese feine Auslösung beibehalten und verfügt man nicht über spezielle, rechenleistungsstarke Computer, müssen neue Ansätze gefunden werden. Tabelle 6 ist ein Sonderfall bei der vollfaktoriellen Gestaltung der Testmatrix. Prinzipiell werden die vollfaktoriellen Werte immer durch einen Startwert und einen Endwert sowie einer Schrittweite bestimmt und die Matlabfunktion übernimmt sodann die Aufteilung. Bei der Geschwindigkeitsvariation ist es aber anders, denn in diesem Fall soll ausschließlich der Stillstand des Target Fahrzeuges untersucht werden und die kleinen Geschwindigkeiten (z.B.: 15km/h) sollen entfernt werden. Deshalb beginnt die Untersuchung mit dem stehenden Target und macht anschließend einen Sprung auf 80km/h und setzt mit der gewählten Schrittweite fort. Die

Matlabfunktion wurde dahingehend erweitert, dass diese Testbedingung automatisch hinzugefügt wird.

2.2.2 Szenario Zwei

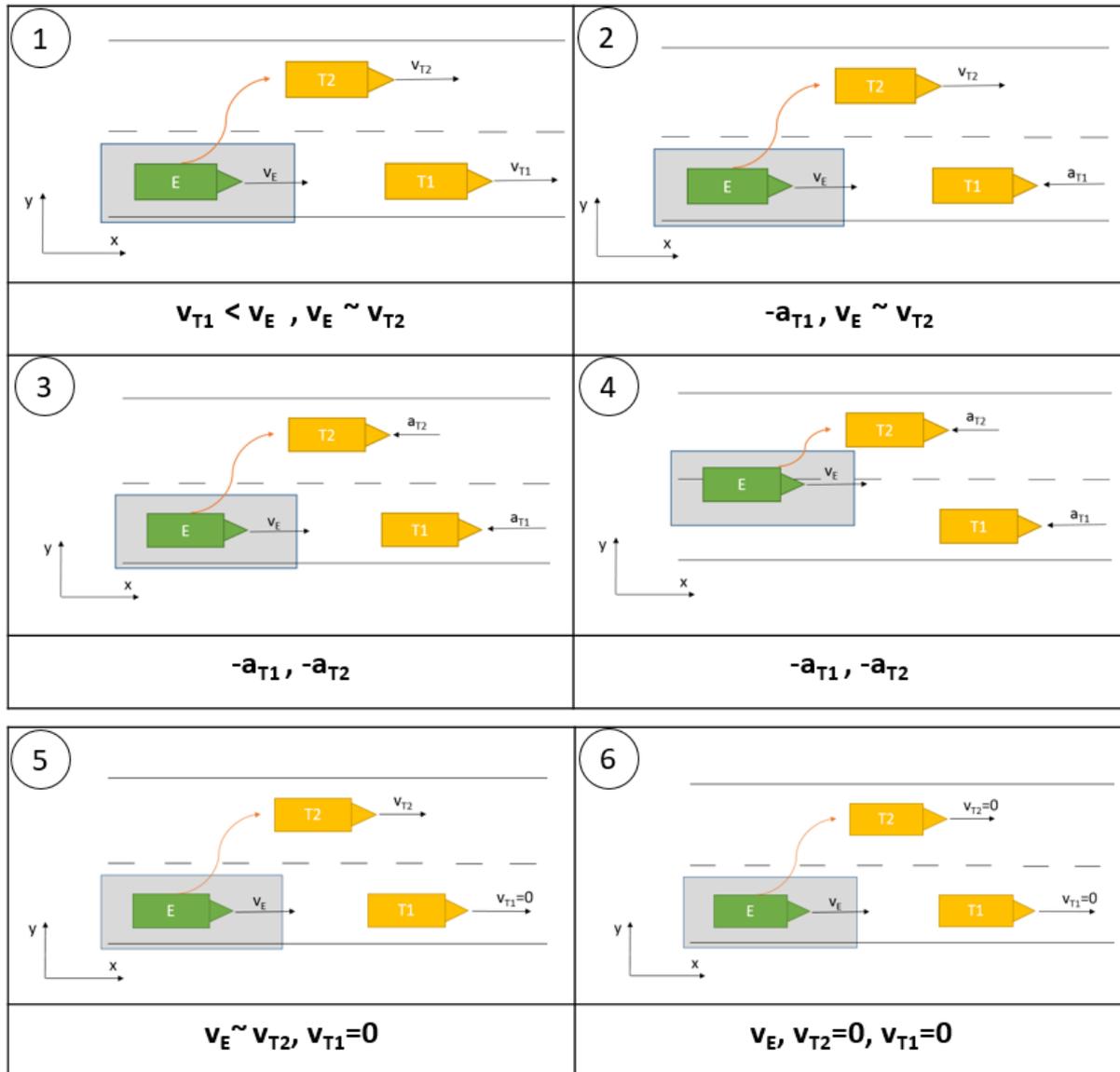


Abbildung 34: Variationsparameter: Szenario zwei –Fahrstreifenwechsel mit zwei Target Fahrzeuge

Nun steigt laufend die Komplexität der Verkehrsflussbilder. Szenario Zwei beinhaltet wie in Abbildung 34 gezeigt, zwei Target Fahrzeuge, die sich auf unterschiedlichen Fahrstreifen befinden. Besonders erwähnenswert ist der Unterschied zwischen Bild 3 und Bild 4 in Abbildung 34. In Bild 3 bremsen beide Fahrzeuge gleichzeitig, unabhängig vom Fahrstreifenwechselzeitpunkt. Bei Bild 4 wechselt das EGO Fahrzeug die Spur und ab der Mittellinie beginnt das Target Fahrzeug 2 zu bremsen. Innerhalb der Simulation wurden alle Verkehrsflussbilder simuliert, nur Bild 4 aus Abbildung 34 nicht. Im Laufe dieser Arbeit wird es noch mehrere solcher Fälle geben, die zwar dokumentiert sind, jedoch in der Simulation nicht extra betrachtet werden (Problematik: extreme Rechendauer). Außerdem müsste das LCA Modell während des Fahrstreifenwechsels die Umgebungsbedingungen überprüfen und das machen beide Modelle nicht. Abbildung 34 zeigt das Target Fahrzeug 2, immer versetzt auf der linken Spur und vor dem EGO Fahrzeug. Eine zusätzliche Möglichkeit wäre die Positionierung hinter dem EGO Fahrzeug,

jedoch ist damit eine realitätsnahe Verkehrssteuerung sehr schwierig. Im Laufe der Arbeit wird noch auf das Problem der Verkehrssteuerung eingegangen, was in diesem Fall nicht gemacht und die Position des Target Fahrzeuges vor dem EGO Fahrzeug beibehalten wurde. Dies war der einfacheren Gestaltung in IPG geschuldet.

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 2-4 innerhalb Abbildung 34)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,5,6 innerhalb Abbildung 34)

**Tabelle 8: Parameterbereich Szenario zwei (Geschwindigkeit)**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	80-130	80-130	60-200	40-120
80-130	0	80-130	60-200	40-120
80-130	0	0	60-200	40-120

**Tabelle 9: Parameterbereich Szenario zwei (Beschleunigung Teil 1)**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	-1-10	80-130	60-200	40-120

**Tabelle 10: Parameterbereich Szenario zwei (Beschleunigung Teil 2)**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>a_target_2</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	-1-10	-1-10	60-200	40-120

Die beiden Tabellen (Tabelle 9 und Tabelle 10) zeigen den Unterschied zwischen dem Verzögerungsverhalten der Target Fahrzeuge. In Tabelle 9 verzögert nur das Target Fahrzeug eins, während in Tabelle 10 beiden Target Fahrzeuge eine Verzögerung einleiten. Tabelle 8 zeigt den Parameterraum für die Geschwindigkeitsvariation. Verglichen zum zuvor beschriebenen Szenario Eins fällt auf, dass durch das Hinzufügen eines Fahrzeuges, der Parameterraum deutlich gestiegen ist. Wenn

man das zusätzlich durch eine vollfaktorielle Variation ausführt, steigt der Raum dementsprechend rasant an.

Tabelle 8 zeigt wieder das Phänomen der vollfaktoriellen Testmatrix mit Stillstand der Target Fahrzeuge. In der Realität soll dies ein Stauende darstellen. Der Übersicht geschuldet, werden die Stillstandsbedingungen immer in einer extra Zeile dokumentiert. Außerdem könnte es zur Verwirrung führen, wenn der Parameterbereich von 0-130km/h geht. Die Stillstandsbedingungen unterscheiden sich, dass zuerst Target Fahrzeuge 1 ein Stauende simuliert und Target Fahrzeug 2 fährt und in der letzten Zeile in Tabelle 8 ein totaler Stau herrscht.

2.2.3 Szenario Drei

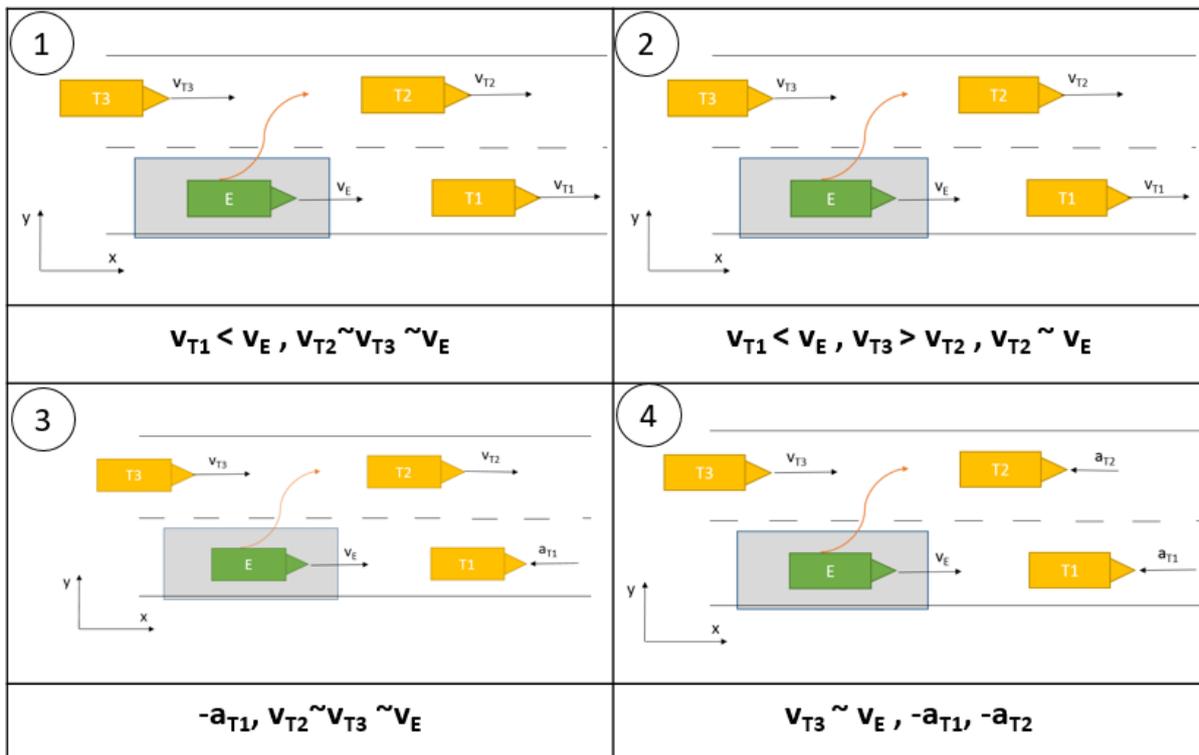


Abbildung 35: Variationsparameter: Szenario drei - Fahrstreifenwechsel mit Folgefahrzeug und zwei Fahrzeugen in front

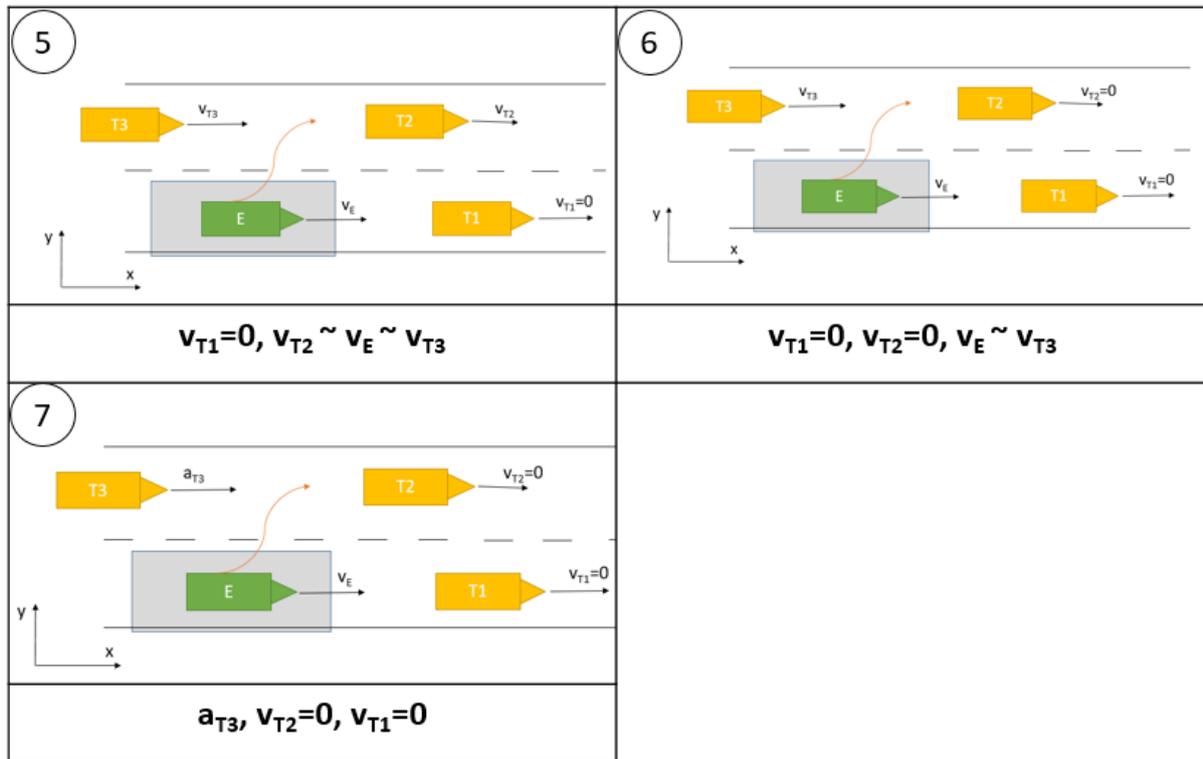


Abbildung 36: Variationsparameter: Szenario drei - Fahrstreifenwechsel mit Folgefahrzeug und zwei Fahrzeugen in front

Abbildung 35 und Abbildung 36 beinhalten drei Target Fahrzeuge sowie das EGO Fahrzeug auf einer zweispurigen Fahrbahn. Ziel des Fahrstreifenwechsels soll es sein, das EGO Fahrzeug zwischen den beiden Target Fahrzeugen zu positionieren. Für die Auswertung muss aber eine Abfrage gemacht werden, ob dieses Verhalten auch tatsächlich stattgefunden hat. Alternativ kann es zu einem Fahrstreifenwechsel führen, der erst durchgeführt wird, wenn die beiden Target Fahrzeuge (T2 und T3) das EGO Fahrzeug überholt haben. Primär entscheidend ist aber, während der Simulation keinen Crash zu verursachen sowie einen Überholvorgang auszulösen. Ein zusätzlicher Testfall ist die schnelle Annäherung des Target Fahrzeuges drei von hinten außerhalb des Gesetzesbereichs. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben in Österreich und der Einschränkung der Target Fahrzeuge auf einen Bereich zwischen 80 und 130 km/h ist dieser Fall grundsätzlich ausgeschlossen, kann aber durch ein personengesteuertes Fahrzeug trotzdem erfolgen. Dieser letztgenannte Testfall wurde nicht in der Simulation berücksichtigt, denn die Target Fahrzeuge in Carmaker verfügen über keine Sensoren und machen deshalb eine Verkehrsteuerung für solche Fälle schwierig. Dafür müsste man händisch das Verhalten so programmieren, dass das Target Fahrzeug eine schnelle Annäherung macht, jedoch mit der Einschränkung, dass keine Kollision dabei mit den anderen Target Fahrzeugen verursacht bzw. dynamisch auf das Verkehrsverhalten reagiert wird.

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 3,4,7 innerhalb Abbildung 35 und Abbildung 36)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,2,5,6 innerhalb Abbildung 35 und Abbildung 36)

Tabelle 11: Parametereinschränkung Szenario drei (Geschwindigkeit)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>v_target_3</b> [km/h]	<b>target_</b> <b>distance_1</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_2</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_3</b> [m]
80-130	80-130	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120
80-130	0	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120
80-130	0	0	80-130	60-200	40-120	-40-120
80-130	80-130	80-130	160	60-200	40-120	-40-120

Tabelle 12: Parametereinschränkung Szenario drei (Beschleunigung Teil 1)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>v_target_3</b> [km/h]	<b>target_</b> <b>distance_1</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_2</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_3</b> [m]
80-130	-1-10	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120

Tabelle 13: Parametereinschränkung Szenario drei (Beschleunigung Teil 2)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>a_target_2</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_target_3</b> [km/h]	<b>target_</b> <b>distance_1</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_2</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_3</b> [m]
80-130	-1-10	-1-10	80-130	60-200	40-120	-40-120

In Tabelle 11 befinden sich die gewählten Parameterbereiche für die Geschwindigkeitsvariation. Dazu zählen auch die Zeilen 2 und 3 in Tabelle 11, wo versucht wird, über den Stillstand eines oder beider Target Fahrzeuge einen Stau zu simulieren sowie auch die schon genannte schnelle Annäherung von hinten (Zeile 4). Bezugspunkt für die Positionierung der Target Fahrzeuge ist immer das EGO Fahrzeug. In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind die Beschleunigungsbereiche definiert mit einer konstanten Verzögerung bis zum Stillstand.

Das Szenario drei ist das letzte, welches für die Bewertung der beiden LCA Funktionstests herangezogen wird. Grund für die Einschränkung der getesteten Szenarien ist, einerseits der enorme

Zeitaufwand, der sich innerhalb des Zeitplans nicht erfüllen lässt und andererseits kann das LCA Modell für den *Funktionstest 1* nur bis zu diesem Szenario das Verkehrsaufkommen händeln. Ansonsten müsste das Modell erweitert und zusätzliche Target Fahrzeuge einprogrammiert werden. Trotzdem bieten diese drei Szenarien eine breite Abdeckung und anhand dieser können verschiedene Auswertungen sowie Beurteilungen hinsichtlich des Entwicklungsstands gemacht werden. Außerdem verfügt auch das zweite Modell nicht über alle Funktionalitäten, um den gesamten Testkatalog zu simulieren (z.B.: Auf-/Abfahrten).

2.2.4 *Szenario Vier*

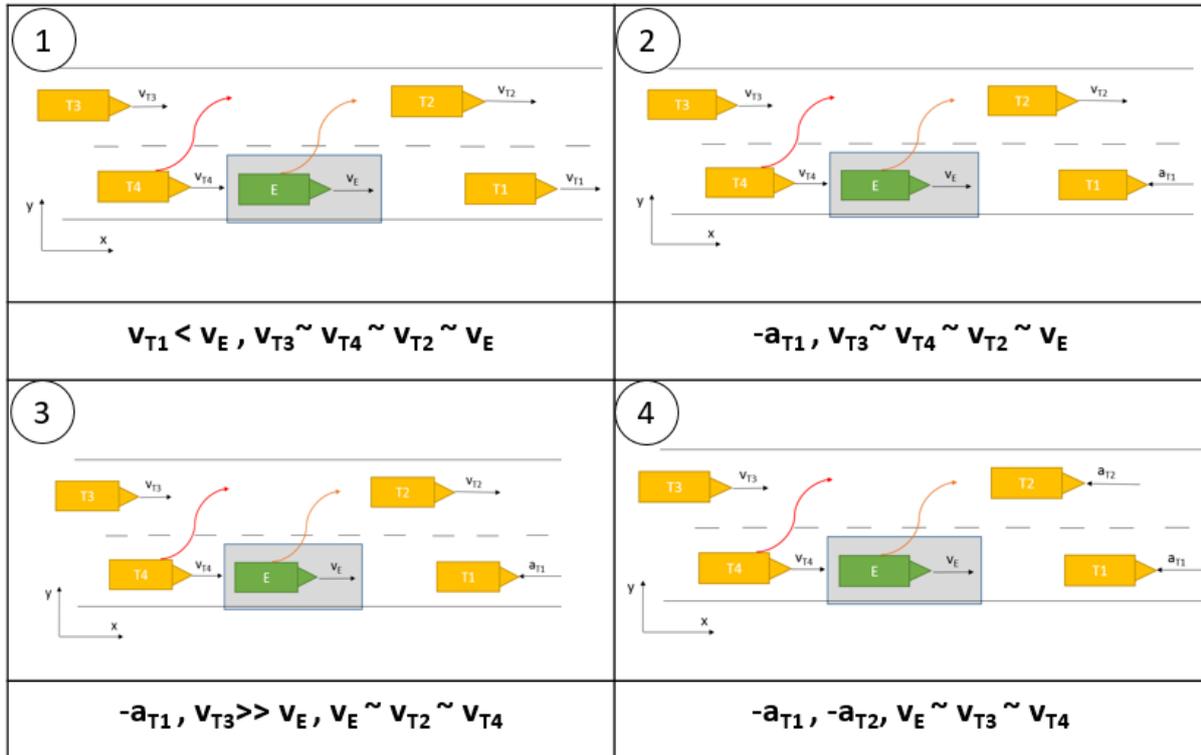


Abbildung 37: Variationsparameter: Szenario vier - gleichzeitiger Fahrstreifenwechsel von zwei Fahrzeugen

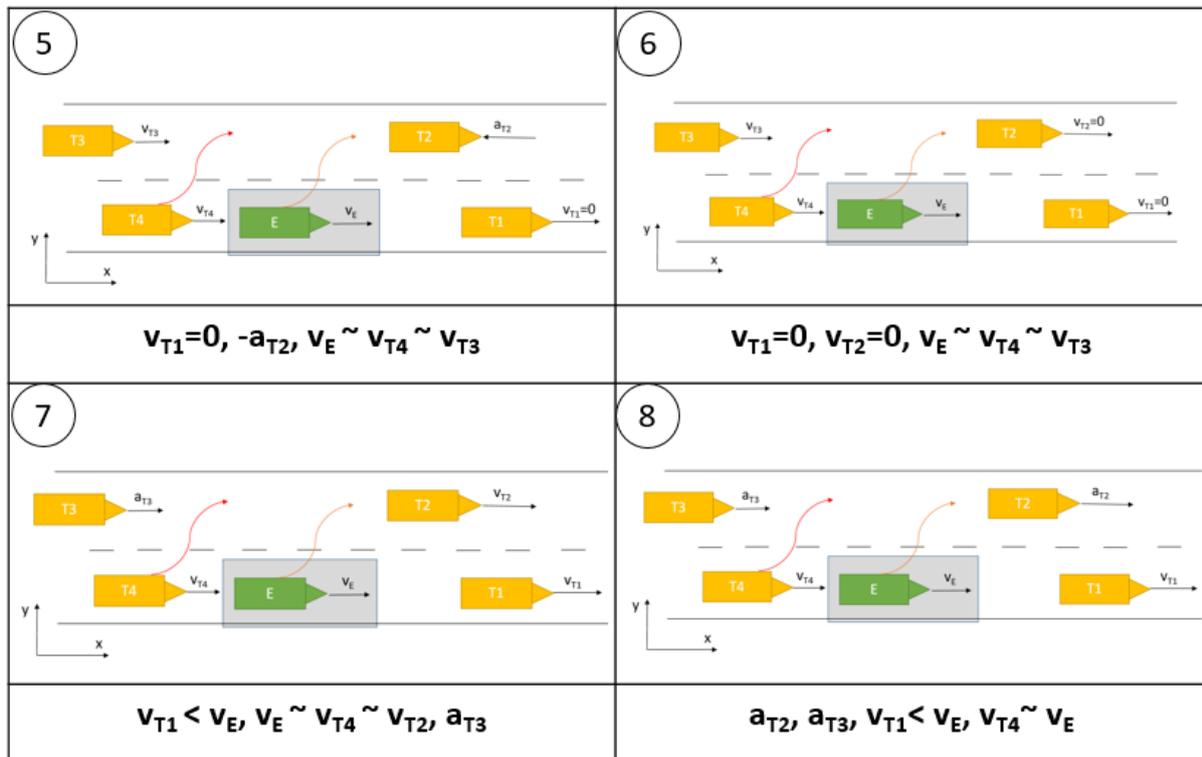


Abbildung 38: Variationsparameter: Szenario vier - gleichzeitiger Fahrstreifenwechsel von zwei Fahrzeugen

Szenario vier soll einen gleichzeitigen Fahrstreifenwechsel der beiden Fahrzeuge EGO und Target vier simulieren (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Wichtig für die Auswertung ist die korrekte Positionierung nach dem Fahrstreifenwechsel sowie das Verhalten, wenn es nicht so gesetzt wurde, wie im Bild gefordert. Gefordert wird jedenfalls ein sicherer Überholvorgang, der vom gewünschten Verhalten natürlich abweichen kann. Die anderen Target Fahrzeuge führen unterschiedliche Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmanöver durch, bleiben aber auf ihrer vorgesehenen Spur. Dabei werden besondere Modellanforderungen gestellt, denn während des Fahrstreifenwechsels müssen die Bedingungen laufend überprüfen können, ansonsten hat dieses Szenario keine Aussagekraft.

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 2-5,7,8 innerhalb Abbildung 37 und Abbildung 38)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,6 innerhalb Abbildung 37 und Abbildung 38)

In den szenariospezifischen Parameteraufzeichnungen (Tabelle 14 bis Tabelle 16) sieht man den enorm anwachsenden Parameterraum. Es beinhaltet wieder eine schnelle Annäherung von hinten sowie die Simulation eines Stauendes. Die Referenz für die Positionierung der Target Fahrzeuge bezieht sich auf die Position des EGO Fahrzeuges. Vor allem durch die vollfaktorielle Variation kann sein, dass vor allem durch die Parameteranzahl, die kritische Grenze für die Erstellung der Testmatrix erreicht ist. Deshalb muss für die Bearbeitung solcher Problemstellungen auf speziell leistungsstarke Rechner zurückgegriffen werden.

Tabelle 14: Parametereinschränkung Szenario vier (Geschwindigkeit)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>v_target_3</b> [km/h]	<b>v_target_4</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]	<b>target_distance_3</b> [m]	<b>target_distance_4</b> [m]
80-130	80-130	80-130	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-40-120
80-130	0	80-130	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-40-120
80-130	0	0	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-40-120

Tabelle 15: Parametereinschränkung Szenario vier (Beschleunigung Teil 1)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>v_target_3</b> [km/h]	<b>v_target_4</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]	<b>target_distance_3</b> [m]	<b>target_distance_4</b> [m]
80-130	-1-10	80-130	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-40-120

Tabelle 16: Parametereinschränkung Szenario vier (Beschleunigung Teil 2)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>a_target_2</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_target_3</b> [km/h]	<b>v_target_4</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]	<b>target_distance_3</b> [m]	<b>target_distance_4</b> [m]
80-130	-1-10	-1-10	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-40-120

2.2.5 Szenario Fünf

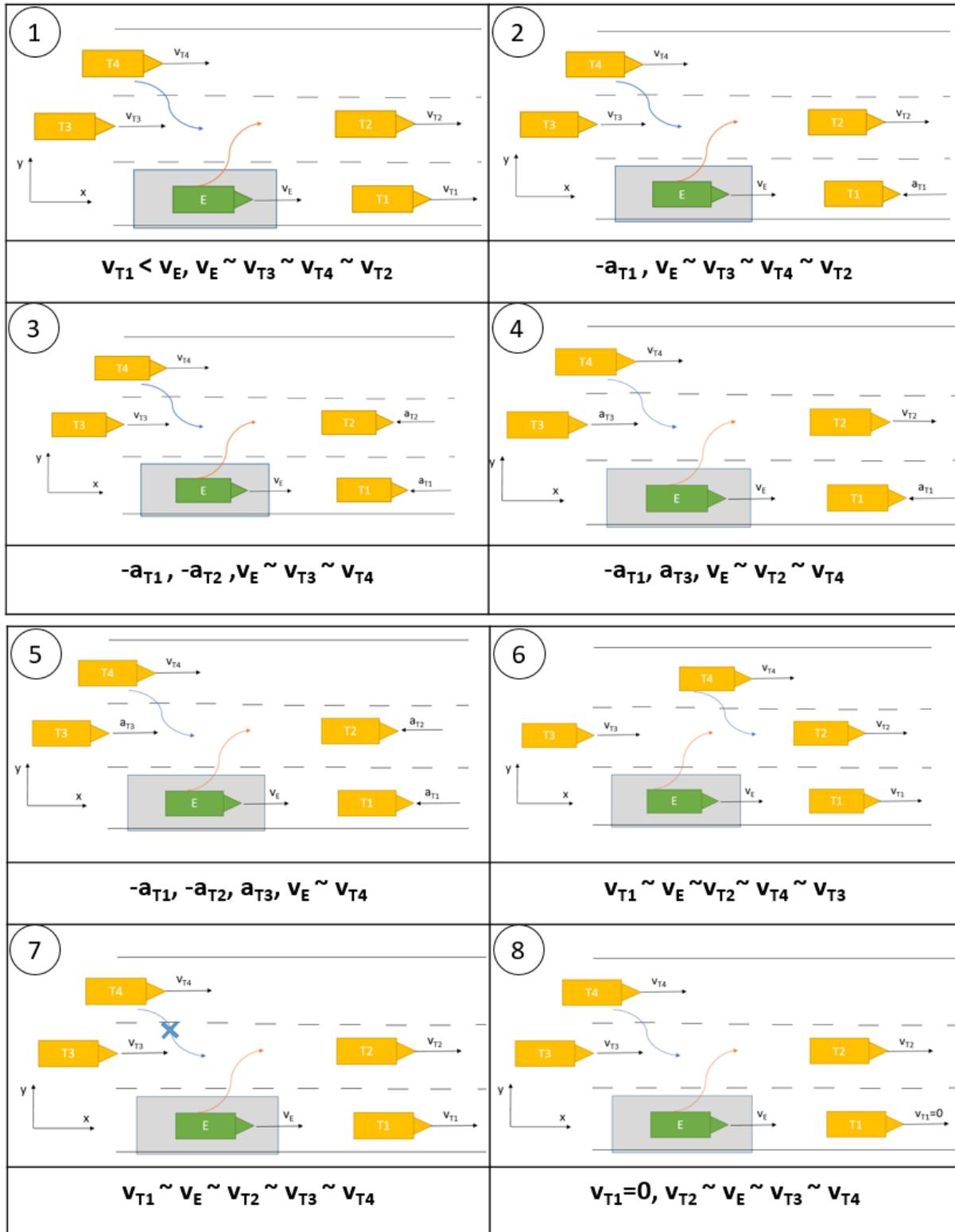


Abbildung 39: Dreispurige Fahrbahn mit gleichzeitigem Fahrstreifenwechsel von EGO Fahrzeug und Target Fahrzeug vier auf mittlere Spur

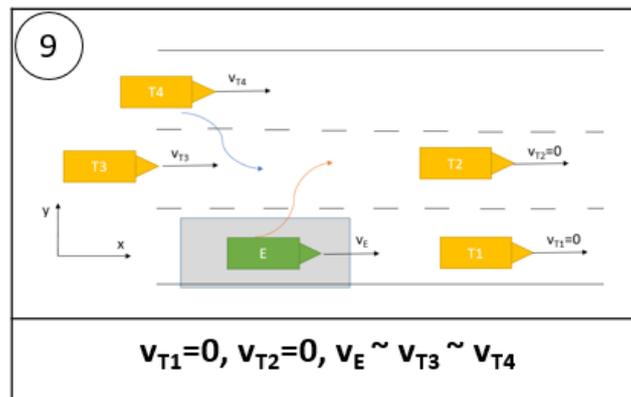


Abbildung 40: Dreispurige Fahrbahn mit gleichzeitigem Fahrstreifenwechsel von EGO Fahrzeug und Target Fahrzeug vier auf mittlere Spur

Bei Szenario fünf handelt es sich um eine dreispurige Autobahn mit vier Target Fahrzeugen. Die Darstellung der Verkehrsflussbilder zeigt, dass das EGO Fahrzeug synchron mit dem Target Fahrzeug vier auf die mittlere Fahrspur wechselt. Bezüglich des Zeitpunktes für den Fahrstreifenwechsel können auch unterschiedliche Strategien gewählt werden. Dabei muss in der anschließenden Auswertung wieder abgefragt werden, ob der Fahrstreifenwechsel wie gefordert durchgeführt wurde oder zu einem späteren Zeitpunkt. Besonderheit im Fahrstreifenwechsel ist in Bild 7 in Abbildung 39 zu erkennen. Dabei bricht das Target Fahrzeug vier den  $v$  ab, sobald die Mitte des Fahrzeuges über die Fahrspur gelangt ist. Auch nennenswert ist das Verhalten in Bild 6 in Abbildung 39. Dabei schert das Target Fahrzeug vier vor dem EGO Fahrzeug auf der mittleren Spur ein. Ansonsten gibt es abermals die Aufteilung in Geschwindigkeitsmanöver und Beschleunigungsmanöver.

Wie bereits beschrieben, ist die Verkehrsmodellierung in IPG schwierig, wenn es von den normalen Bedingungen, wie reines konstant Fahren sowie Verzögern abweicht, vor allem, wenn auf vorausfahrende Fahrzeuge reagiert werden muss und es sich dabei um Target Fahrzeuge handelt. Voraussetzung für ein sinnvolles Testen ist, dass diese Bedingungen auch Berücksichtigung in der Programmierung finden. Außerdem muss das Modell dynamisch während des Fahrstreifenwechsels reagieren können und diese auch im Notfall abbrechen. Über den Reifegrad gibt dann die Testmethode Auskunft. Derzeit verfügen beide Testmodelle nicht über die passenden Funktionalitäten dieses Szenario sinnvoll zu testen.

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 2-5 innerhalb Abbildung 39 und Abbildung 40)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,6-9 innerhalb Abbildung 39 und Abbildung 40)

Tabelle 17: Parametereinschränkung Szenario fünf (Geschwindigkeit)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_</b> <b>target_1</b> [km/h]	<b>v_</b> <b>target_2</b> [km/h]	<b>v_</b> <b>target_3</b> [km/h]	<b>v_</b> <b>target_4</b> [km/h]	<b>target_</b> <b>distance_1</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_2</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_3</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_4</b> [m]
80-130	80-130	80-130	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-20-80
80-130	0	80-130	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-20-80
80-130	0	0	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-20-80

Tabelle 18: Parametereinschränkung Szenario fünf (Beschleunigung Teil 1)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_</b> <b>target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_</b> <b>target_2</b> [km/h]	<b>v_</b> <b>target_3</b> [km/h]	<b>v_</b> <b>target_4</b> [km/h]	<b>target_</b> <b>distance_1</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_2</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_3</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_4</b> [m]
80-130	-1-10	80-130	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-20-80

Tabelle 19: Parametereinschränkung Szenario fünf (Beschleunigung Teil 2)

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_</b> <b>target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>a_</b> <b>target_2</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_</b> <b>target_3</b> [km/h]	<b>v_</b> <b>target_4</b> [km/h]	<b>target_</b> <b>distance_1</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_2</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_3</b> [m]	<b>target_</b> <b>distance_4</b> [m]
80-130	-1-10	-1-10	80-130	80-130	60-200	40-120	-40-120	-20-80

Es finden sich die beiden Stauverhalten in der Geschwindigkeitsvariation in Tabelle 17 wieder. Zudem zeigt Tabelle 18 und Tabelle 19 die Parameter für die Beschleunigungsvariation für das Szenario fünf.

2.2.6 Szenario sechs

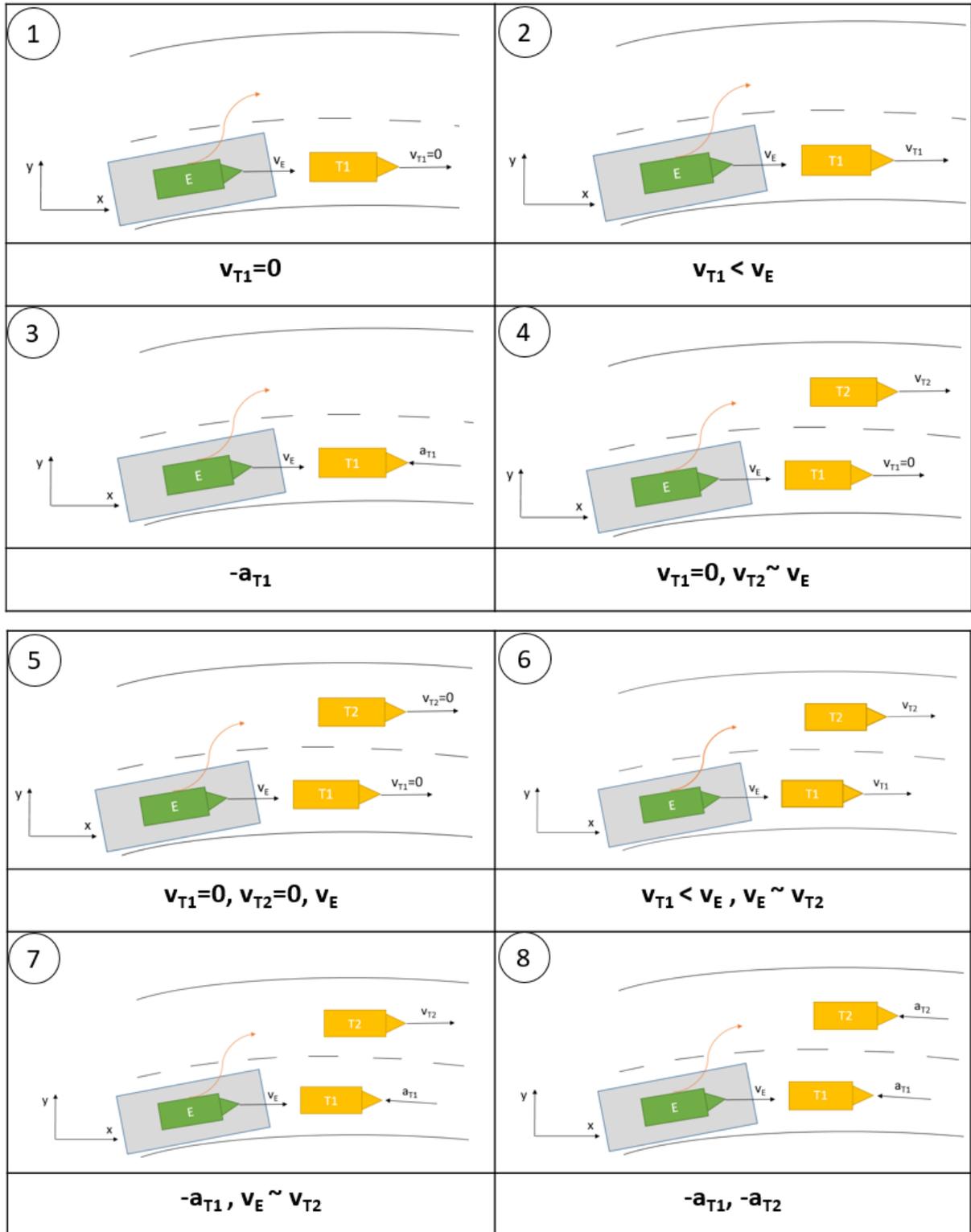


Abbildung 41: Gekrümmt Fahrbahn mit zwei Fahrspuren und mehreren Target Fahrzeuge

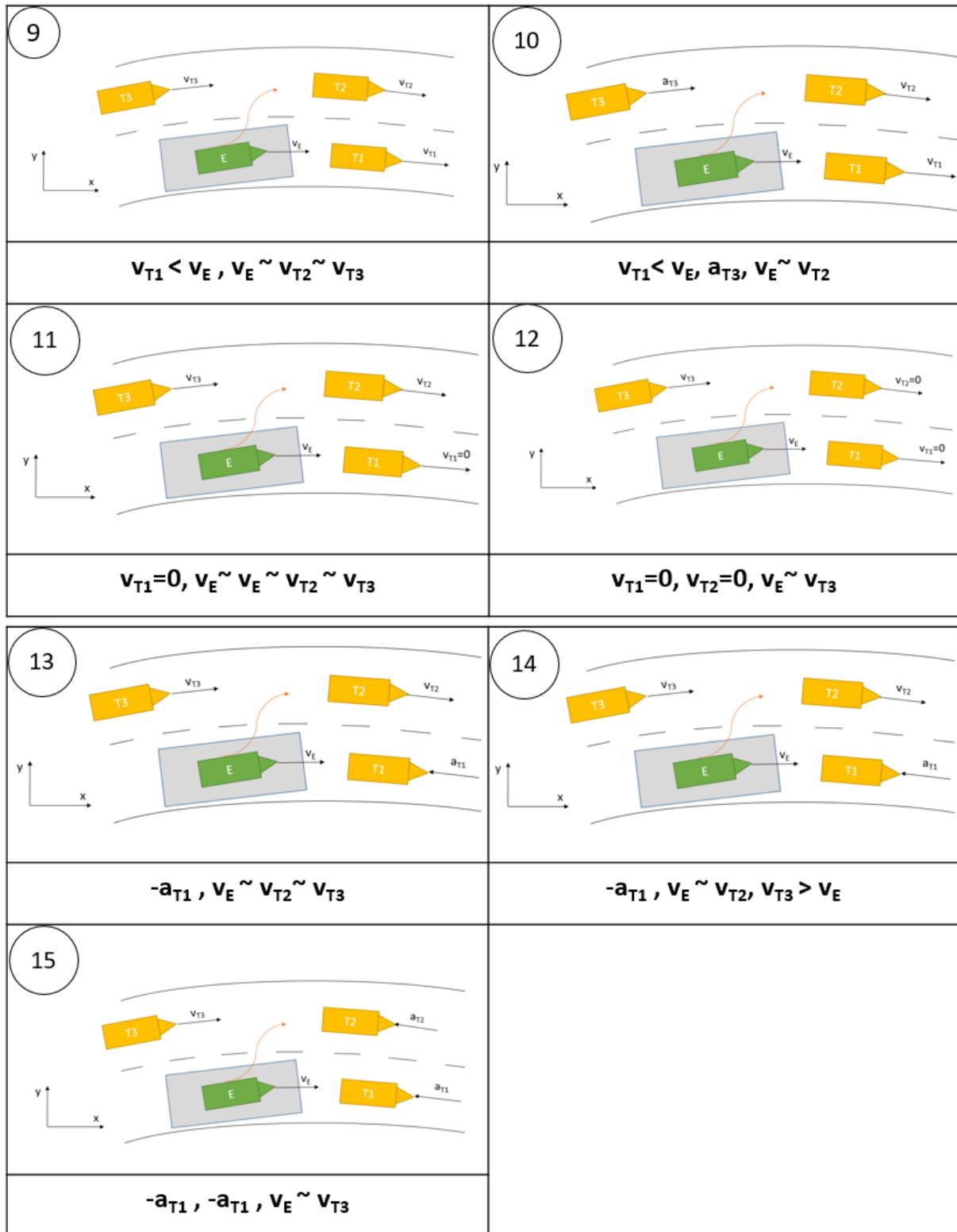


Abbildung 42: Gekrümmt Fahrbahn mit zwei Fahrspuren und mehreren Target Fahrzeuge

Wie in Abbildung 41 und Abbildung 42 zu erkennen ist, handelt es sich dabei um eine gekrümmte zweispurige Fahrbahn, die alle bis jetzt behandelten Szenarien beinhaltet. Deshalb wird hier auch davon abgesehen, eine genauere Beschreibung durchzuführen, da es sich nur um einen Untergrundwechsel handelt. Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Abstandswerte sind ident zu den Bedingungen auf der geraden Straße (siehe Szenario 1-3). Ein solches Verhalten würde man auch

erhalten, wenn man die Szenarien 1 bis 3 mit den Umweltbedingungen (Abbildung 31) verknüpft. Entscheidende Variationsgröße ist, neben den fahrzeugspezifischen Werten und Anzahl von Target Fahrzeuge, der Kurvenradius. Wie in [43] dargestellt, gibt es eine Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit und Kurvenradius im internationalen Straßenvergleich. Für das Einsatzgebiet Autobahn bewegt sich der Kurvenradius zwischen 500 und 800m.

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 3,7-9,10,13-15 innerhalb Abbildung 41 und Abbildung 42)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,2,4-6,9, 11,12 innerhalb Abbildung 41 und Abbildung 42)

### 2.2.7 Szenario sieben

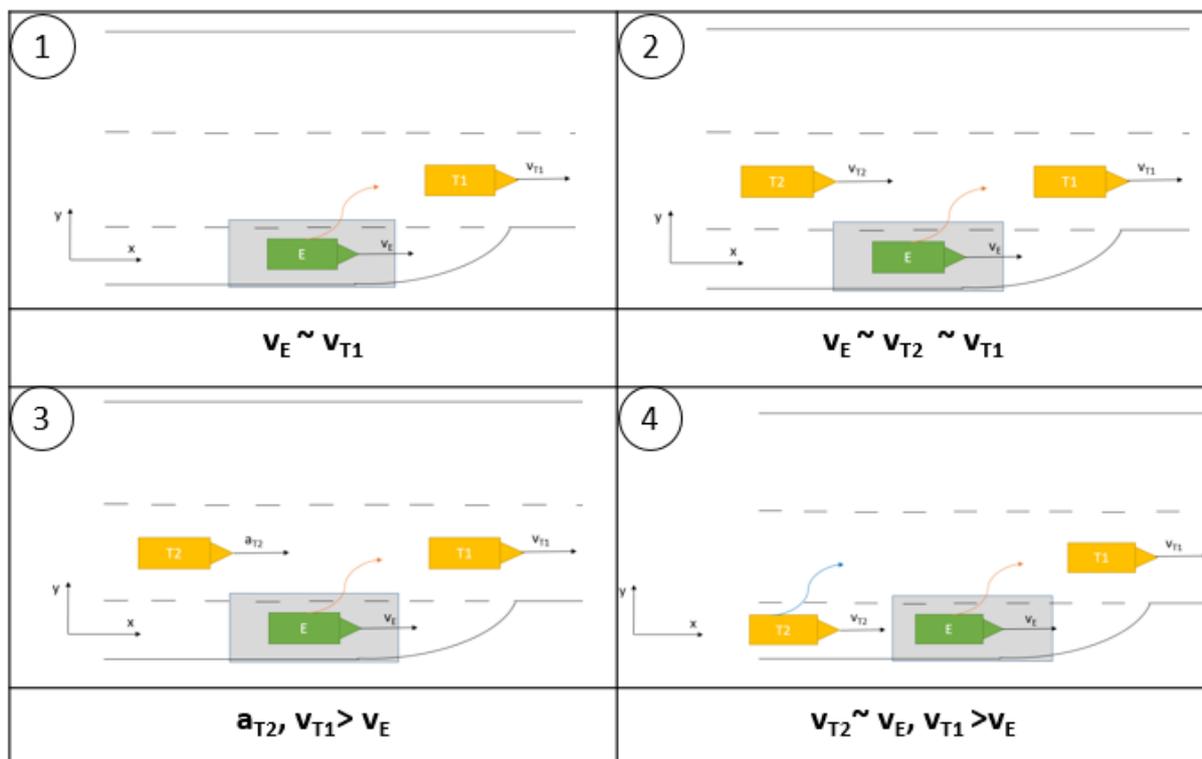


Abbildung 43: Szenario sieben: Autobahnauffahrt

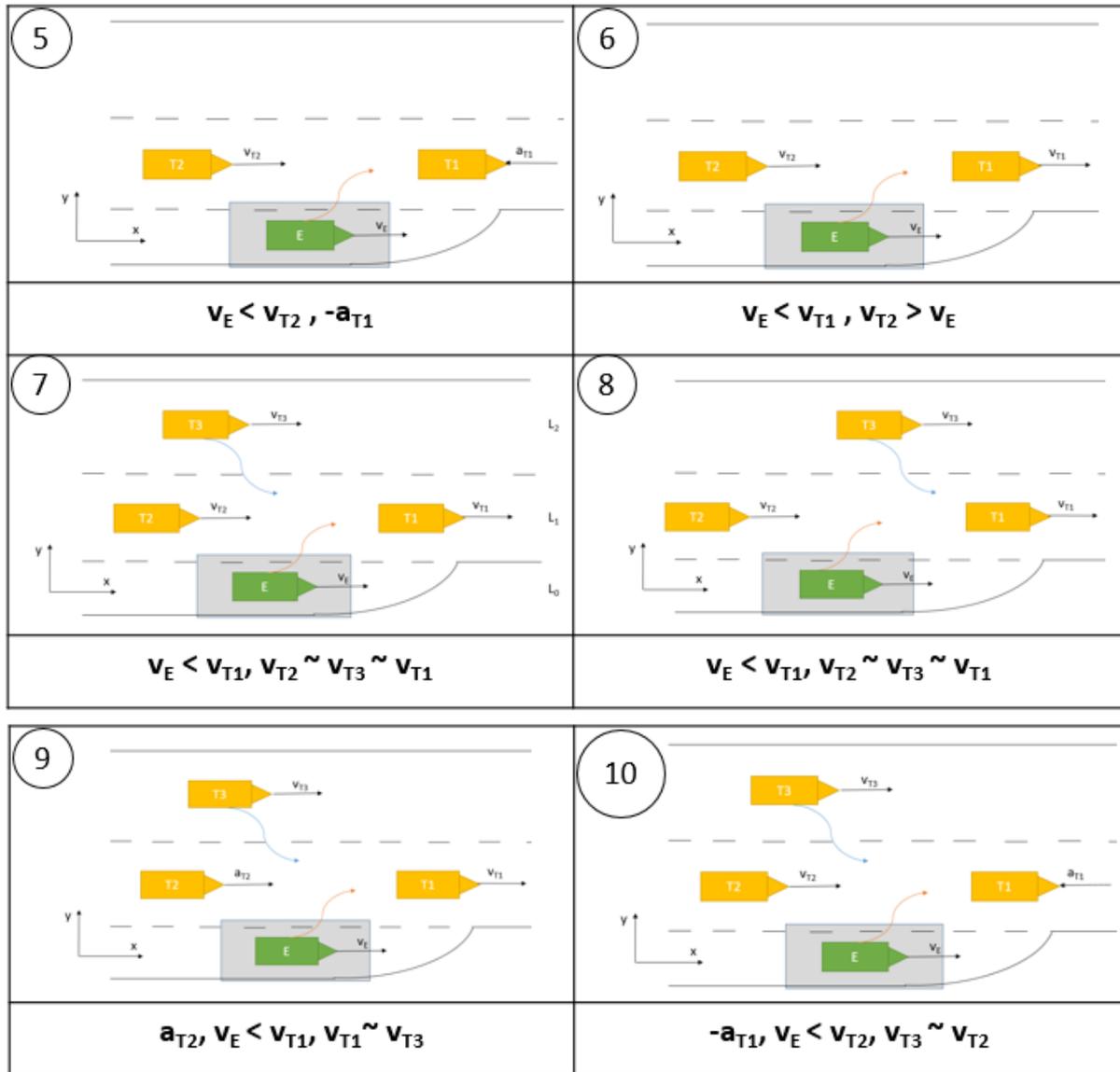


Abbildung 44: Szenario sieben: Autobahnauffahrt

Ein Szenario, das auch mit dem Fahrstreifenwechsellassistent abgedeckt werden soll, sind die Auf- und Abfahrten von Autobahnen. In Abbildung 43 und Abbildung 44 befinden sich die verschiedenen Möglichkeiten einer Autobahnauffahrt und Abbildung 45 sowie Abbildung 46 stellen die Verkehrsflussbilder einer Autobahnabfahrt dar. Dabei unterscheiden sie sich grundsätzlich von den bisher beschriebenen Szenarien im Geschwindigkeits- und Abstandsbereich. Für die Simulation und Auswertung der beiden Modelle spielen die Auf- und Abfahrtsszenarien keine Rolle, da die LCA Modelle keine Implementierung von solchen Szenarien vorgesehen haben. Deshalb nur die Dokumentation, mit den unterschiedlichen Möglichkeiten der Parameter Vielfalt und der Verweis der Möglichkeit, dieses einer Simulation zuzuführen. Eine Referenz für die Geschwindigkeits- und Abstandsverteilung in einem solchen, speziellen Anwendungsfall zu finden, ist schwierig. Auch der Autobahnbetreiber in Österreich (Asfinag) verfügt über keine Studie für diesen Spezialfall. Die Parameterbereiche finden sich in Tabelle 20 bis Tabelle 25 wieder. Die Bereiche setzen sich aus den zuvor bekannten Fahrmanövern zusammen. Tabelle 20 zeigt die Parameter für den einfachsten Fall mit nur einem Fahrzeug und einer Geschwindigkeitsvariation. Ab zwei Target Fahrzeuge finden sich die Werte in Tabelle 21 bis Tabelle 23 wieder und in Tabelle 24 und Tabelle 25 sind die Parameter für drei Fahrspuren dargestellt.

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 3,5,9-10 innerhalb Abbildung 43 und Abbildung 44)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,2,4, 6-8 innerhalb Abbildung 43 und Abbildung 44)

**Tabelle 20: Parametereinschränkung Szenario sieben (Geschwindigkeit) für Bild 1**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]
80-130	80-130	50-160
80-130	0	80-160

**Tabelle 21: Parametereinschränkung Szenario sieben (Geschwindigkeit) für Bild 2**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	80-130	80-130	50-160	-20-120

**Tabelle 22: Parametereinschränkung Szenario sieben (Beschleunigung) für Bild 3**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>a_target_2</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	80-130	0-3,5	50-160	-40-100

**Tabelle 23: Parametereinschränkung Szenario sieben (Beschleunigung Teil 2) für Bild 5**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	-1-10	80-130	50-160	-40-100

Tabelle 24: Parametereinschränkung Szenario sieben (Geschwindigkeit) für Bild 7

$v_{ego}$ [km/h]	$v_{target\_1}$ [km/h]	$v_{target\_2}$ [km/h]	$v_{target\_3}$ [km/h]	target_ distance_1 [m]	target_ distance_2 [m]	target_ distance_3 [m]
80-130	80-130	80-130	80-130	50-160	-40-100	-40-100

Tabelle 25: Parametereinschränkung Szenario sieben (Beschleunigung) für Bild 10

$v_{ego}$ [km/h]	$a_{target\_1}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v_{target\_2}$ [km/h]	$v_{target\_3}$ [km/h]	target_ distance_1 [m]	target_ distance_2 [m]	target_ distance_3 [m]
80-130	-1-10	80-130	80-130	50-160	-40-100	-40-100

2.2.8 Szenario acht

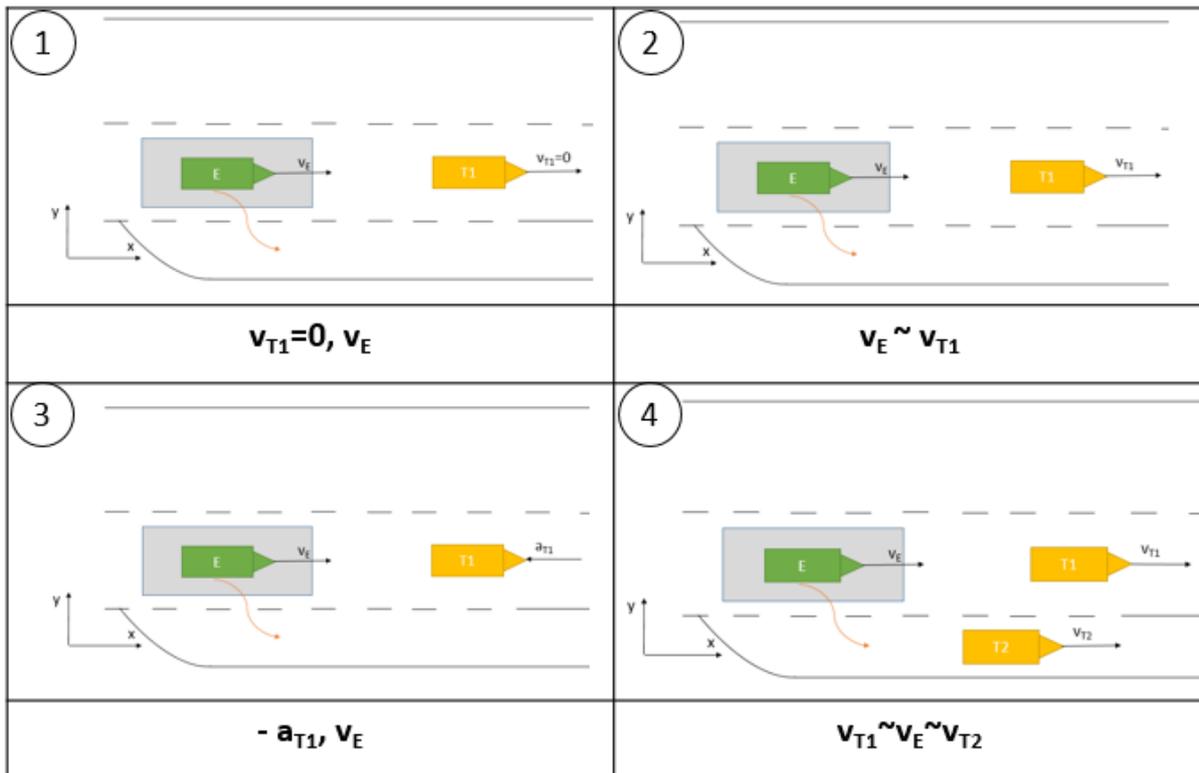


Abbildung 45: Szenario acht: Autobahnabfahrt

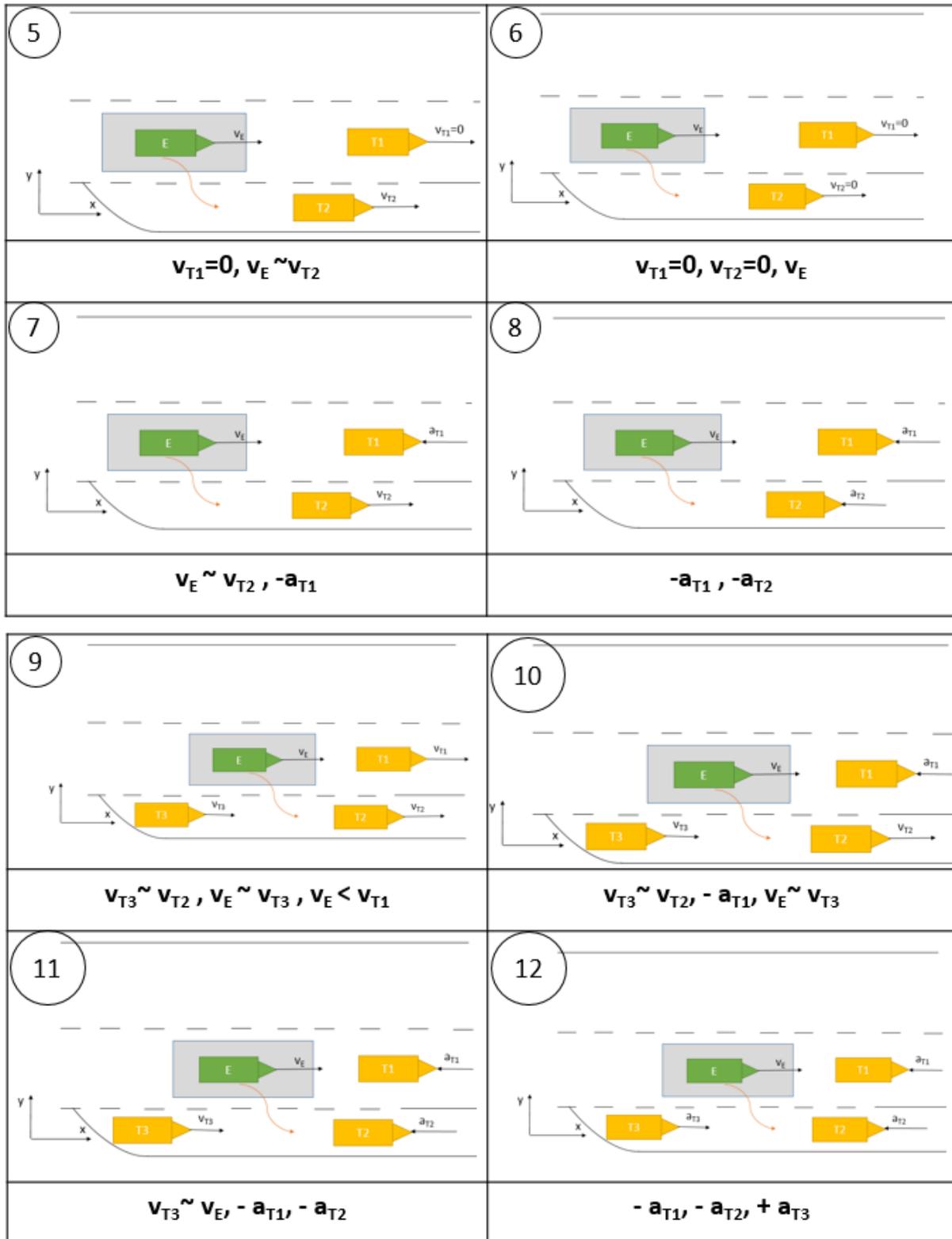


Abbildung 46: Szenario acht: Autobahnabfahrt

Wie schon im vorigen Szenario beschrieben, gehören die Abfahrten auch zum Fahrstreifenwechsellastenden dazu. In Abbildung 45 und Abbildung 46 befinden sich die Verkehrsflussbilder für eine Autobahnabfahrt. Dabei sollte das EGO Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel nach rechts durchführen. Der LCA Algorithmus für *Funktionstest 1* ist nur auf einen Fahrstreifenwechsel nach links ausgelegt und kann deshalb nicht simulativ erfasst werden.

Gleiches gilt für den *Funktionstest 2*, der zwar einen Fahrstreifenwechsel in beide Richtungen ausführen kann, aber die Auf und Abfahrten nicht in die Strategie implementiert hat. Für die Auswertung muss überprüft werden, ob der Fahrstreifenwechsel, so wie in Bild 10 in Abbildung 46 gefordert, genau zwischen den beiden Target Fahrzeugen zwei und drei, stattgefunden hat oder nicht. Sollte dies nicht der Fall sein und der Fahrstreifenwechsel erst später erfolgen, kann dies, als in Ordnung aufgefasst werden, sofern keine kritische Situation dabei auftritt.

Gliederung der Verkehrsflussbilder:

- Beschleunigungsvariation (Bild 3,7-8,10-12 innerhalb Abbildung 45 und Abbildung 46)
- Geschwindigkeitsvariation (Bild 1,2,4-6,9 innerhalb Abbildung 45 und Abbildung 46)

Wie auch schon im Szenario sieben beschrieben, sind die Parameterbereiche abhängig von Anzahl der Target Fahrzeuge. Tabelle 26 zeigt die Daten für ein Target Fahrzeug. Tabelle 27 und Tabelle 28 beinhalten die Parameter für zwei Target Fahrzeuge für eine Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvariation. Zuletzt die

Tabelle 29 und Tabelle 30 mit den Daten für zwei Fahrstreifen und drei Target Fahrzeuge.

**Tabelle 26: Parametereinschränkung Szenario acht (Geschwindigkeit) für Bild 1**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]
80-130	80-130	50-160
80-130	0	50-120

**Tabelle 27: Parametereinschränkung Szenario acht (Geschwindigkeit) für Bild 4**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>v_target_1</b> [km/h]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	80-130	60-110	50-160	40-120

**Tabelle 28: Parametereinschränkung Szenario acht (Beschleunigung) für Bild 7**

<b>v_ego</b> [km/h]	<b>a_target_1</b> [m/s <sup>2</sup> ]	<b>v_target_2</b> [km/h]	<b>target_distance_1</b> [m]	<b>target_distance_2</b> [m]
80-130	-1-10	60-110	60-160	40-120

Tabelle 29: Parametereinschränkung Szenario acht (Geschwindigkeit) für Bild 9

v_ego [km/h]	v_target_1 [km/h]	v_target_2 [km/h]	v_target_3 [km/h]	target_ distance_1 [m]	target_ distance_2 [m]	target_ distance_3 [m]
80-130	80-110	60-110	60-110	50-160	50-160	-20-100

Tabelle 30: Parametereinschränkung Szenario acht (Beschleunigung) für Bild 11

v_ego [km/h]	a_target_1 [m/s <sup>2</sup> ]	a_target_2 [m/s <sup>2</sup> ]	v_target_3 [km/h]	target_ distance_1 [m]	target_ distance_2 [m]	target_ distance_3 [m]
80-130	-1-10	-1-10	60-110	50-160	50-160	-20-120

### 2.3 Parametervariationsprozess

Grundsätzlich bietet IPG Carmaker eine Variationsmaske, die genutzt werden kann, um große Simulationsumfänge, speziell Variationen, zu testen. Dabei erfolgt zuerst die Eingabe der Variationsmatrix (jeden Wert händisch oder über Schrittweitendefinition mit Unterstützung) und anschließend kann die Matrix über einen Filter wieder reduziert werden. Dieser Filter muss angewendet werden, da es Situation gibt, die zu keinem richtigen Fahrstreifenwechselszenario führen würden (z.B. EGO schneller als Target). Außerdem kann man die Parameter in Vorherein nicht soweit eingrenzen und anschließend vollfaktoriell simulieren. Dieser Filterprozess kann erst nach der Erstellung der Testmatrix erfolgen, jedoch mit einem gravierenden Nachteil: Die Filtermaske in IPG ist zeichenbegrenzt. Das würde dazu führen, sollten zu viele Filterkriterien notwendig sein, dass diese nicht entfernt werden können und unnötige Zeit für die Simulation verloren geht. Nach der Simulation kann sehr anschaulich über ein Ampelsystem die Kritikalität definiert werden. Prinzipiell könnte der Variationsdurchlauf auch mit diesem System gelöst werden. Ein großer Nachteil befindet sich im gesamten Postprocessing. Will man später wieder auf einzelne Simulationen zugreifen, wird dies durch die starre Maske erschwert. Abhilfe könnte man sich über eine Script Programmierung schaffen, wobei hier die Programmiersprache nicht mehr dem heutigen Standard gerecht wird bzw. in der Lehre selten Anwendung findet. Eine andere Möglichkeit wäre das Einlesen über Matlab, wie es dann zu einem späteren Zeitpunkt auch angewendet wird. Abbildung 47 zeigt die Carmaker Variationsmaske mit dem Ampelsystem (rechts, jedoch in grau gehalten, weil noch nicht simuliert). Inwiefern die Maske mit sehr großen Variationen umgehen kann, ist nicht bekannt.

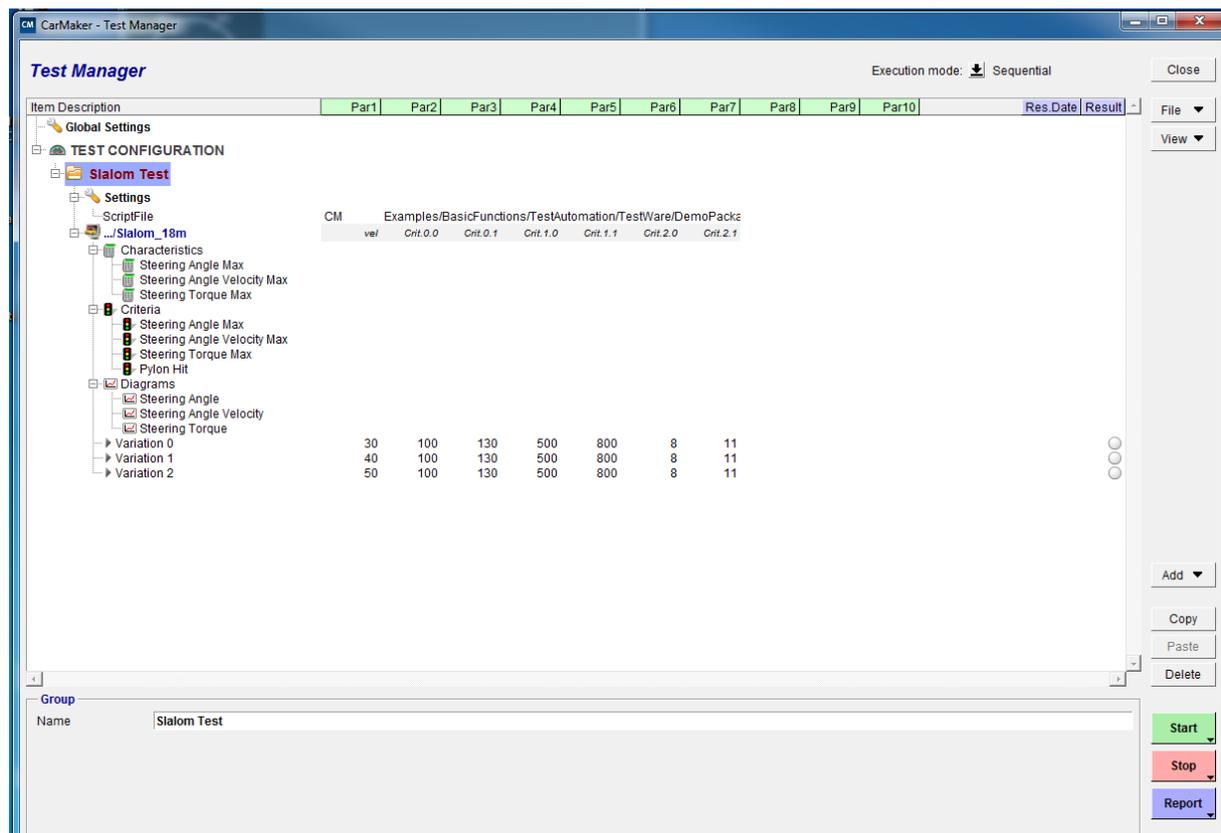


Abbildung 47: Grafisches Interface bei einer Carmaker gesteuerten Variation

Mit diesen oben aufgezählten Nachteilen wurde nicht das IPG interne System gewählt, sondern die verfügbare Schnittstelle zu Matlab genutzt und alles zentral über ein Matlab Script gesteuert. Hinzu kommt, das Magna bereits über einen passenden Code verfügt, IPG Carmaker Inputdaten zu manipulieren. Mit der Anpassung des Codes an den speziellen Anwendungsfall kann über eine zentrale Stelle der gesamte Prozess sicher gesteuert werden. Großer Vorteil ist, dass Matlab mit Matrizen sehr gut umgehen kann und dementsprechend schnell arbeitet.

### 2.3.1 Ablauf einer Variation

Die jeweiligen Szenarien unterscheiden sich grundsätzlich in Geschwindigkeitsvariation und Beschleunigungsvariation. Dabei bedeutet der Begriff Geschwindigkeitsvariation, dass in diesem Verkehrsflussbild lediglich Geschwindigkeitsanpassungen vorgenommen werden und im Laufe der Simulation keine Verzögerungen oder Beschleunigungen stattfinden. Dasselbe Prinzip steckt hinter dem Begriff der Beschleunigungsvariation. Die Beschleunigungsvariation unterscheidet sich zusätzlich durch die Verzögerung der Target Fahrzeuge. Um eine einheitliche Nomenklatur zwischen den gespeicherten IPG Szenarien und den Verkehrsflussbildern herzustellen, unterscheiden sich die Beschleunigungsvariationen durch die Anzahl der verzögernden Fahrzeugen (Abkürzung: „acc1“ bzw. „acc2“). Bei der Beschleunigung „acc 1“ befindet sich ein vorausfahrendes Target Fahrzeug auf gleicher Spur wie das EGO Fahrzeug und beginnt zu verzögern. Bei „acc 2“ wird dasselbe Verhalten durch ein zweites Target Fahrzeug auf der benachbarten Spur ergänzt.

Genau so findet auch der Aufbau und die Benennung in IPG Carmaker statt und so werden die Simulationsfiles abgespeichert. Wird ein neues Szenario angelegt, muss als erstes das Szenario mit entsprechendem Namen in IPG (ist wichtig für die spätere Parametervariation) mit den verschiedenen VerkehrsteilnehmerInnen erstellt werden. Korrekte Parameter müssen in diesem Schritt noch nicht

vergeben sein, denn dass erfolgt erst später über Matlab, jedoch müssen Dummywerte eingetragen werden. In Matlab wird eine Testmatrize erstellt, die zu Beginn immer vollfaktoriell aufgebaut (über den Funktionsaufruf `fullfact`) und dann über Filterkriterien sukzessive verkleinert wird (näheres in Kapitel Parametereinschränkung). Damit entstehen die IPG Carmaker Startwerte, die über Matlabbefehle manipuliert und anschließend zeilenweise automatisch simuliert werden. Am Ende der Simulation werden die Werte abgespeichert und final in einem Excel Dokument gesammelt. Das Dokument verfügt über alle simulationsbezogenen Daten, (z.B.: Startwerte) aber auch Metrikdaten, die das Verhalten des EGO Fahrzeuges innerhalb des Fahrstreifenwechsels beschreiben (z.B.: Crash).

Abbildung 48 soll den genauen Ablauf der Simulation und der Variation verdeutlichen. Die Filterkriterien haben die Aufgabe, sicherzustellen, dass es sich bei der Testmatrix um eine Matrix handelt, die immer zu einem Fahrstreifenwechsel führt. Später wird dann auch noch über die Reife des LCA Modells gesprochen und zwei verschiedene Modell auf deren Reife hin geprüft. Dabei spielt auch der Überholvorgang bzw. deren Häufigkeit eine Rolle. Denn das LCA Modell hat sicherzustellen, dass dieser wie der Mensch, einen flüssigen Verkehrsfluss garantiert. Eine dynamische Anpassung an die Situation ist dabei gefragt.

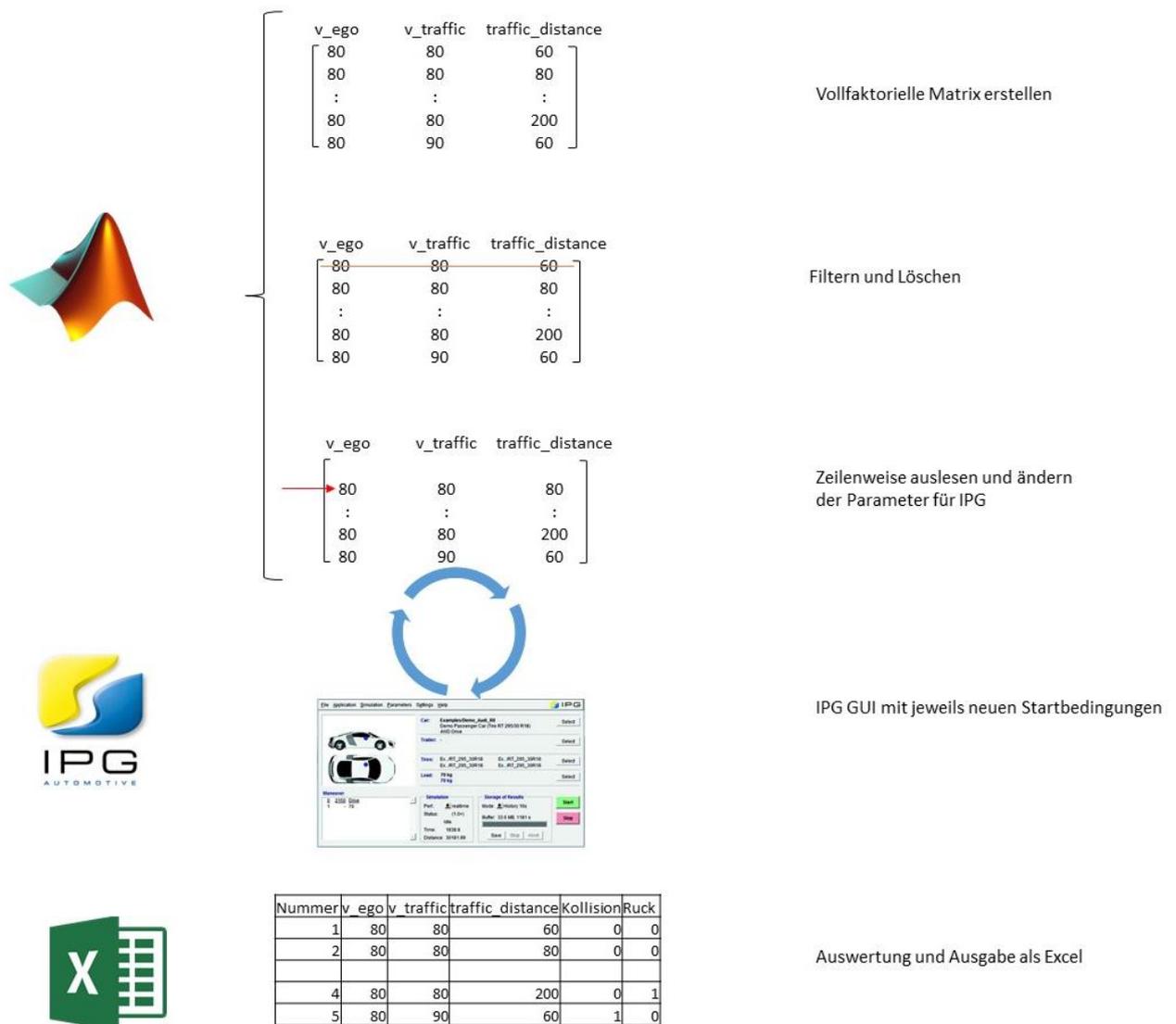


Abbildung 48: Ablauf der Variation

### 2.3.2 Simulationsmodell Lane Change

Für die Überprüfung der Freigabemethode wird auf zwei verschiedenen LCA Modelle zurückgegriffen und deren Reifegrad bestimmt. Dabei kommt als erste Funktionsüberprüfung, ein LCA Modell zur Anwendung, das mittels TTC Zeitbestimmung arbeitet. Dabei greift das Modell nicht auf Sensordaten zurück, um die Position der anderen Target Fahrzeuge zu bestimmen, sondern nimmt diese aus den aktuellen Berechnungsdaten (ideales Modell). Zusätzliche Einschränkung gibt es bei den VerkehrsteilnehmerInnen, denn diese sind auf drei Target Fahrzeuge beschränkt und müssen exakt in einer gewissen Reihenfolge positioniert bzw. auch danach benannt werden. Sollten diese Einschränkungen alle zutreffen, entscheidet der Algorithmus, reiht die Fahrzeuge nach ihren TTC Zeiten und versucht einen Fahrstreifenwechsel auszuführen. Für weitere Details wird auf [44] verwiesen.

Für die Auswertung wird das bestehende Modell als ein momentaner Entwicklungsstand behandelt und auch so an die Testmethode übergeben. Dabei spielen Fehler keine Rolle, denn diese werden in der Auswertung anhand objektiver Daten sichtbar.

Für eine Gegenüberstellung zum bestehenden LCA Modell wird ein anderer Algorithmus gerade am Institut für Fahrzeugtechnik an der TU Graz aufgebaut. Dieses stellt eine Überarbeitung des bereits verfügbaren Modells dar und arbeitet vor allem über Sensoren und einem erweiterten TTC Zeitansatz. Dieses Modell wird ebenfalls untersucht und ausgewertet und kann als *Funktionstest 2* in einem anderen Stadium der Reife angesehen werden.

Um eine genaue Bezeichnung sowie Unterscheidung zu gewährleisten, wird hier eine Bezeichnung festgelegt, die die weiteren Schritte vereinfachen soll. Dabei wird das LCA Modell mit TTC Zeit als *Funktionstest 1* und das Modell mit Sensoren und erweitertem TTC Ansatz als *Funktionstest 2* bezeichnet.

### 2.3.3 *Parametereinschränkung*

Der Prozess der Parametereinschränkung ist ein entscheidender für den korrekten Ablauf der Simulation. Einerseits muss er sicherstellen, dass nicht zu viele, unnötige Simulationen durchlaufen werden, aber andererseits muss garantiert werden, dass die Simulation schnell und zuverlässig arbeitet.

Garant für eine effiziente und zielgerichtete Simulation sind die Filterkriterien, die auf die Testmatrix angewendet werden. Das ist jene Matrix, die für die Manipulation der IPG Carmaker Daten verwendet wird. Dabei unterscheiden sich die Filter bezüglich der Szenarien und hängen von Geschwindigkeit und Abständen ab. Nachfolgend sind diese Kriterien aufgelistet. Wie schon einmal angesprochen, werden in dieser Methode nur Szenarien getestet, die auch sicher zu einem Fahrstreifenwechsel im Laufe der Simulation führen. Ein typischer Vertreter, für einen solchen Fall der gelöscht werden muss, ist, wenn das EGO Fahrzeug langsamer fährt, als das vorausfahrende Target Fahrzeug. Mit diesen Startbedingungen ist ausgeschlossen, dass es zu einem Fahrstreifenwechsel kommt und außerdem wird damit die Aussagekraft und die Simulationszeit unnötig verschleppt.

#### **Szenario eins:**

- 1)  $v_{\text{target}} > v_{\text{ego}}$ :  
Dabei fährt das vorausfahrende Target Fahrzeug dem EGO Fahrzeug davon und das EGO Fahrzeug hat keine Möglichkeit mehr zum Überholen.
- 2)  $v_{\text{ego}} = v_{\text{target}}$   
Sollten die Geschwindigkeiten gleich groß sein, kann diese Zeile gelöscht werden.

Bei der Beschleunigung wurde kein Filter angewendet, wobei dies auf die geringen Testfälle zurückzuführen ist. Außerdem ist die Startgeschwindigkeit von EGO und Target bei allen „acc“-Fällen gleich („acc1“ und „acc2“).

#### **Szenario zwei:**

- 1)  $v_{\text{target}_1} > v_{\text{ego}}$

siehe Szenario Null Punkt 1.

2)  $v_{\text{target}_1} > v_{\text{ego}}$  ( $x = 120-200\text{m}$ )

siehe Szenario Null Punkt 2.

3)  $v_{\text{ego}} > v_{\text{target}_2}$

Dabei handelt es sich um eine verkehrsregelrelevante Bedingung, nämlich das rechts Überholen. In Österreich ist das rechts Überholen verboten und müsste eigentlich ausgeschlossen werden. Jedoch muss das LCA Modell auf diese Bedingung reagieren können und wird deshalb nicht gelöscht, sondern in der Excel Auswertung integriert (gültig auch für Bild 2 in Abbildung 34)

### Szenario drei:

1)  $v_{\text{target}_1} > v_{\text{ego}}$

siehe Szenario Null Punkt 1.

2)  $v_{\text{ego}} > v_{\text{target}_2}$

siehe Szenario Eins Punkt 3.

3)  $v_{\text{target}_3} > v_{\text{target}_2}$

Hier soll ausgeschlossen werden, dass eine Kollision zwischen den beiden Target Fahrzeugen 3 und 2 stattfinden kann. Diese verfügen über keinen Abstandregeltempomaten oder Sensoren und müssen auf diese Weise eingegrenzt werden (gültig auch für Bild 3 in Abbildung 36).

4)  $v_{\text{target}_3} > v_{\text{ego}}$

Die Bedingung sagt aus, dass es zu keiner Kollision zwischen den Target Fahrzeug 3 und EGO Fahrzeug nach einem Fahrstreifenwechsel kommen darf.

### Szenario vier:

1)  $v_{\text{ego}} > v_{\text{target}_2}$

siehe Szenario zwei Punkt 3 (gültig auch für Bild 2 in Abbildung 38)

2)  $v_{\text{target}_1} > v_{\text{ego}}$

siehe Szenario eins Punkt 1

3)  $v_{\text{target}_4} > v_{\text{ego}}$

Wie im vorigen Szenario bereits beschrieben, verfügen die Target Fahrzeuge über keinen Abstandsregeltempomaten und sollte man die Geschwindigkeit nicht eingrenzen, kommt es zu einer Kollisionen zwischen, in diesem Fall, Target Fahrzeug 4 und EGO Fahrzeug (gültig auch für Bild 2+4 in Abbildung 38)

4)  $v_{\text{target}_3} > v_{\text{target}_2}$

siehe Szenario drei Punkt 3 (gültig auch für Bild 2 in Abbildung 38)

5)  $v_{\text{target}_3} > v_{\text{target}_4}$

Diese Bedingung stellt sicher, dass das Target Fahrzeug 4 einen sicheren Fahrstreifenwechsel synchron mit dem EGO Fahrzeug durchführen kann (gültig auch für Bild 2+4 in Abbildung 38)

**Szenario fünf:**

1)  $v_{\text{target}_1} > v_{\text{ego}}$

siehe Szenario eins Punkt 1.

2)  $v_{\text{target}_3} > v_{\text{target}_2}$

siehe Szenario drei Punkt 3 (gültig auch für Bild 2 in Abbildung 40)

3)  $v_{\text{target}_3} > v_{\text{target}_4}$

siehe Szenario vier Punkt 5 (gültig auch für Bild 2+3 in Abbildung 40)

4)  $v_{\text{ego}} > v_{\text{target}_2}$

siehe Szenario zwei Punkt 3 (gültig auch für Bild 2 in Abbildung 40)

5)  $v_{\text{target}_3} > v_{\text{ego}}$

siehe Szenario drei Punkt 4

## 2.4 Einstellungen in der Fahrzeugsimulation

Dieses Kapitel soll die Arbeiten und Einstellungen in IPG Carmaker dokumentieren. Bevor mit dem Variationsprozess begonnen werden kann, müssen einmal die verschiedenen Szenarien im IPG Carmaker aufgebaut werden. Dazu bedarf es, die verschiedenen Target Fahrzeuge hinzuzufügen und eine Simulationsumgebung (Straße, Wetter usw.) zu definieren. Dies kann als Datenbank gesehen werden und kann laufend angepasst und verbessert werden, womit das Testrepertoire eine ständige Erweiterung erfährt. Wichtig für einen sicheren und korrekten Variationsprozess ist, dass man Defaultwerte vergibt, die dann anschließend durch korrekte Werte ausgetauscht werden.

Um eine zeitoptimierte Simulation zu gewährleisten, besteht in IPG Carmaker die Möglichkeit, sogenannte Endbedingungen zu definieren. Sobald diese Bedingungen erreicht sind, wird die Simulation beendet. Ein mögliches Beispiel für eine Abbruchbedingung wäre, wenn das EGO Fahrzeug eine kleinere Geschwindigkeit als 0,1km/h einnimmt, sprich wenn es annähernd zum Stillstand kommt und nicht mehr überholt. Sollte ein Überholvorgang oder Crash stattgefunden haben, dann legt das EGO Fahrzeug gegenüber dem überholten Target Fahrzeug einen zusätzlichen Weg von 400m zurück, bevor die Simulation beendet wird. Sinn dieser zusätzlichen Distanz von 400 m ist, dass wenn sich ein weiteres Fahrzeug auf der linken Spur befindet, dass sich das EGO Fahrzeug auf die neue Bedingung einstellen muss/soll und dieses Verhalten zusätzlich in die Bewertung einbezogen wird. Unabhängig von diesen oben genannten Bedingungen wird eine maximale Simulationsdauer von 150s vorgegeben.

Entscheidend für den Variationsprozess ist die richtige und übereinstimmende Bezeichnung der Szenarien. Denn die Szenarien unterscheiden sich in Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsszenarien, je nachdem werden auch die Matrizen dafür aufgebaut und bereitgestellt. Ein Beispiel soll das verdeutlichen: `szenario_1_v`. Dabei handelt es sich um das erste Szenario mit einer

Geschwindigkeitsvariation. Die Begrifflichkeiten werden über den Unterstrich getrennt und grundsätzlich klein geschrieben. Für die Veranschaulichung, um welche konkrete Szenario es sich dabei handelt siehe Abbildung 32 (Bild 1, 2, 4).

### EGO Fahrzeug

Im Grund werden die Einstellungen, die für das LCA Modell notwendig sind, übernommen. Beim *Funktionstest 1* wird ein Radarsensor hinzugefügt, der für die exakte Funktionsweise des ACC's vorhanden sein muss. Verwendung findet ein Standard ACC Objektsensor mit den vordefinierten Werten von IPG. *Funktionstest 2* greift nicht mehr auf Simulationsdaten für die Positionsbestimmung zurück, sondern auf Sensordaten und dazu sind mehrere Sensoren vorhanden, welche schon im Model implementiert sind.

Entscheidend für die Abfrage und Auswertung ist der laterale Versatz des EGO Fahrzeuges. Beim *Funktionstest 1* befindet sich eine Ausgangsgröße (DM.LaneOffset), auf die in Matlab zugegriffen werden kann. Diese Größe gibt einerseits Auskunft über den Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels und ob ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wurde und zeigt zudem andererseits den lateralen Versatz an. Die Implementierung erfolgt über die Schnittstelle zwischen Matlab und IPG (Variablendefinition). Darauf aufbauend, bezieht sich die Abfrage auf verschiedene Kenngrößen. Sollte diese Kenngröße fehlen, dann muss eine solche Schnittstelle wieder hergestellt oder der Code angepasst werden.

### Ordnerstruktur

Um einen sicheren Lauf der Simulation mit geringem Änderungsaufwand zu gewährleisten, erfordert es eine gewisse Ordnerstruktur. Bevor IPG gestartet werden kann, bedarf es einer Definition des Workspace, was folglich zu einem automatischen Ordnerverzeichnis führt. Zusätzlich zu diesen Standardordnern gibt es einen selbsterstellten Ordner „Matlab“, von dem aus die Variationsprozesse gestartet werden und die Manipulationen stattfinden. Neben den bereits erstellten Ordner gibt es während der Simulation Tätigkeiten, die dynamisch zu einer Erweiterung der Ordnerstruktur führen. Ein solcher dynamisch erstellter Ordner wäre z.B. die Unterscheidung zwischen der groben und anschließend feinen, erneuten Simulation. Im Ordner „Auswertung“ befinden sich Excel Tabellen mit einer einheitlichen Auswertung aller durchgeführten Simulationen und bietet die Entscheidungsgrundlage für eine Freigabe (genauere Informationen befinden sich im Anhang A).

#### 2.4.1 *Output Quantities - Simulationsdatenspeicherung*

Entscheidend für den Auswerteprozess sind die gespeicherten Daten, die für die spätere Auswertung herangezogen werden. Diese müssen zuvor bestimmt werden und haben einen entscheidenden Einfluss auf die Performance der Simulation.

Um auch sicherzustellen, dass die richtigen Startbedingungen aus der Manipulation verwendet wurden, werden diese aus den Ergebnisfiles (.erg files) ausgelesen und nicht direkt von der erstellten Testmatrix übernommen. Dies bietet die Möglichkeit, später in der Auswertung noch einmal manuell eine Kontrolle durchzuführen, ob die richtigen Startbedingungen verwendet wurden. Zusätzlich zu diesen Daten werden noch weitere verwendet, um das Ampelsystem mit aussagekräftigen Zahlen zu hinterlegen.

Ein essentieller Performanceunterschied kann durch die richtige Wahl der Output Quantities erreicht werden. Durch die gezielte Eingrenzung und schlussendliche Auswahl der benötigten Daten kann die

Geschwindigkeit der Simulation deutlich gesteigert werden. Die Simulationsergebnisse haben in erster Linie kritische von nicht kritischen Szenarien zu unterscheiden und diese auszuwerten. Sollte in einem zweiten Schritt, fahrzeugspezifische Daten, wie Radaufstandskräfte oder Beschleunigungen oder Ähnliches benötigt werden, um das Verhalten während einer Variationen zu untersuchen, kann dies natürlich geändert werden. Der Auswerteprozess greift softwaregestützt auf die gespeicherten Simulationsergebnisse zurück und hängt laufzeitmäßig sehr stark von der Anzahl an gespeicherten Daten ab.

In Tabelle 31 befindet sich eine Zusammenfassung der Daten, die anschließend für die Auswertung benötigt werden. Diese Daten sind auch unabhängig vom gewählten Funktionstest und müssen immer vorliegen, um das Verhalten des EGO Fahrzeuges bewerten zu können. Die Daten sind in Matlab Strukturen gruppiert

**Tabelle 31: Zusammenfassung der Speicher- und Auswertedaten**

<b>Gruppe (Matlab Struktur)</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Beschreibung</b>
Car	Car.ax	EGO Fahrzeugbeschleunigung in x-Richtung
	Car.ay	EGO Fahrzeugbeschleunigung in y-Richtung
	Car.tx	Translatorische x-Position EGO
	Car.ty	Translatorische y-Position EGO
	Car.v	EGO Fahrzeuggeschwindigkeit
DM	DM.LaneOffset	Lateraler Offset (kommt aus dem LCA Modell)
Sensor	Sensor.Collision.Vhcl.Fr1.Count	Kollisionszähler des EGO Fahrzeugs
	Sensor.Collision.Vhcl.Fr1.ObjId	Detektiert Kollisionen mit einem globalen Objekt
Steer	Steer.WhlAng	Lenkradwinkel
Time	Time	Zeit
	Time.Global	Globale Zeit
	Time.WC	Wall Clock Time
Traffic	Traffic.T01.a_0	Beschleunigung des Target Fahrzeuges
	Traffic.T01.a_1	Beschleunigung des Target Fahrzeuges
	Traffic.T01.DetectLevel	Erkennung eines Fahrzeuges für IPG Movie
	Traffic.T01.Distance	Gefahrenere Distanz
	Traffic.T01.JuncObjId	Aktuelle oder nächste Kreuzungs-ID
	Traffic.T01.Lane	Spurinformation
	Traffic.T01.sRoad	Longitudinale Position des Target Fahrzeuges
	Traffic.T01.tRoad	Laterale Position des Target Fahrzeuges
	Traffic.T01.tx	Globale Position in x-Richtung
	Traffic.T01.ty	Globale Position in y-Richtung
	Traffic.T01.tz	Globale Position in z-Richtung
	Traffic.T01.v_0	Geschwindigkeit

	Traffic.T01.v_1	Geschwindigkeit
Vhcl	Vhcl.Distance	Zurückgelegte Distanz
	Vhcl.sRoad	Longitudinale Position des EGO Fahrzeuges
	Vhcl.tRoad	Laterale Position des EGO Fahrzeuges

Sobald die Simulation abgeschlossen ist, wird ein Script in Matlab gestartet, das die Auswertung und anschließend eine Ausgabe als Excel Dokument vornimmt. In diesem Excel File werden die Aufzeichnungsdaten von Carmaker zusammengefasst und kompakt wiedergegeben, sodass folglich erkannt werden kann, welcher Testfall zu einem kritischen Szenario führt (siehe Abbildung 29).

### 2.5 Auswerteverfahren in Excel

Aufgrund seiner Verbreitung wird MS Excel für die Darstellung der Ergebnisse verwendet. Dazu kommt, dass die Weitergabe und die Präsentationsfähigkeit innerhalb einer Firma, wie es Magna Steyr ist, einfach über Excel gemacht werden kann, als via Matlab. Ziel der Auswertung ist es einerseits, eine Kontrolle der richtig eingelesenen Daten sowie schlussendlich die Kritikalität zu bewerten. Das Excel File soll Aufschluss darüber geben, ob das Verhalten des EGO Fahrzeuges richtig gesetzt wurde, denn ein visuelles Überwachen der Simulation ist auf Grund der Datenmenge und der langen Laufzeit nicht möglich.

Die grundsätzliche Gliederung des Excel Dokumentes ist wie folgt aufgebaut. Zu Beginn erfolgt eine Nummerierung der Variationsdurchläufe. Anschließend werden die allgemeinen Daten, wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstände der verschiedenen Fahrzeuge aufgelistet. So kann schnell erkannt werden, ob die richtigen Daten von IPG verwendet wurden. Danach kommen die eigentlichen Metrikdaten, die beschreiben, ob das Verhalten des EGO Fahrzeuges kritisch ist oder nicht. Dazu wird, wie oben eingeführt, das Ampelsystem mit konkreten Zahlen angewendet.

Zusätzlich zur Abfrage der Startwerte wird auf der zweiten Seite des Excel Files eine Zusammenfassung erstellt. Diese Zusammenfassung beinhaltet die gefahrenen Kilometer sowie eine prozentuelle Auswertung der gesetzten Aktionen. Somit fällt es ganz einfach, aus diesen Daten den richtigen Schluss zu ziehen, ob ein LCA Modell bereits die geforderte Reife erfüllt, oder ob an einer Optimierung gearbeitet werden muss.

Neben den einzelnen Szenarioauswertungen, die wie oben beschrieben, die genauen Daten sowie in einer zweiten Tabelle die Statistik enthält, finden sich diese Daten in einer Gesamtauswertung wieder. Das Dokument soll einen Überblick über die gesamte Simulation geben und bekräftigt dies mit einem Diagramm. Somit erkennt man auf einen Blick, ob die gewünschte Reife der gesamten Testmethode über alle Variationen erreicht wurde bzw. auch in welchen Szenarien noch etwas nachgeschärft werden muss.

### 2.6 Metrik

Für die Bewertung des EGO Fahrzeuges wurde im Zuge der Arbeit eine fahrstreifenbezogene Metrik entwickelt, die das Verhalten bewertet. Dabei kommt das oben eingeführte Ampelsystem zur Anwendung (siehe Abbildung 29), welches in diesem Abschnitt noch genauer beschrieben wird.

**Crash**

Für den Fall, dass ein Kontakt mit einem/einer anderen VerkehrsteilnehmerIn oder einem anderen Gegenstand auftritt, wird im Vektor Sensor.Collision.Vhcl.Fr1.Count der Wert Eins ausgegeben. Das wird für die Auswertung genutzt und gibt per Definition ein absolut kritisches Verhalten wieder.

**Zeitlücke**

Wie in [23] vorgeschlagen, gibt es drei Gefahrenstufen durch die man ein Fahrverhalten objektiv beurteilen kann. Das führt dann zu einem Grenzwert für die Zeitlücke von 0,5s bzw. 0,35s laut [23]. Dabei wird laut [23] keine Unterscheidung zwischen TTC und Zeitlücke gemacht, sondern nur andere Grenzwerte herangezogen. Als Grenzwert für die Arbeit wird der ACC Grenzwert von 1s eingestellt. Dies ist immer eine Ermessensentscheidung und kann geändert werden.

GEFAHRENSTUFE	BEDEUTUNG
Stufe 1	Kritisches Ereignis, bei dem die Grenzen des „normalen“ Fahrens überschritten werden
Stufe 2	Erhöhtes Unfallrisiko
Stufe 3	Akute Kollisionsgefahr

Abbildung 49: Gliederung der Gefahrenstufen laut [23]

GEFAHRENSTUFE	GRENZWERTE AUFGRUND ZEITLÜCKE THW		ODER	GRENZWERTE AUFGRUND KOLLISIONSZEIT TTC		Fahrerreaktion
	THW [s]	RELATIVGESCHWINDIGKEIT [km/h]		TTC [s]	BREMSLICHTSTATUS [-]	
Stufe 1	0,5	>20		1,75	aus	
	0,35	>10		-	-	
Stufe 2	0,35	>20		<1	an	
Stufe 3	-	-		<1	aus	

Abbildung 50: TTC Zeit bzw. Zeitlücke für die kritische Beurteilung einer Situation laut [23]

**Lateraler Abstand < 50cm**

Um eine Unterschreitung des Sicherheitsabstandes von 50cm zu detektieren, wird eine Kontur um das EGO Fahrzeug mit einem einheitlichen Offset von 50cm gezogen. Sollte es zu einer Unterschreitung des Sicherheitsabstandes kommen, wird dies mit einer Kollision gleichgesetzt und im Vektor Sensor.Collision.Vhcl.Fr1.Count erscheint der Wert eins.

**Mangelhafte Spurtreue**

Die mangelhafte Spurtreue (siehe Abbildung 51) wird in zwei Bereiche unterschieden, nämlich in einen vor dem Fahrstreifenwechsel und in einem nach dem Fahrstreifenwechsel. Sollte in einem dieser beiden Bereiche eine seitliche Abweichung von größer als 40 cm zur äußeren Fahrspurbegrenzung auftreten, wird dieses Szenario für weitere Untersuchungen markiert. Indikator für diese laterale Drift im Spurverhalten ist der Wert Vhcl.tRoad. Testanforderungen bezüglich der Spurtreue gibt es bezüglich des EURO NCAP [34]. Dabei spielt das laterale Offset der Fahrstreifenwechseldurchführung eine entscheidende Rolle.

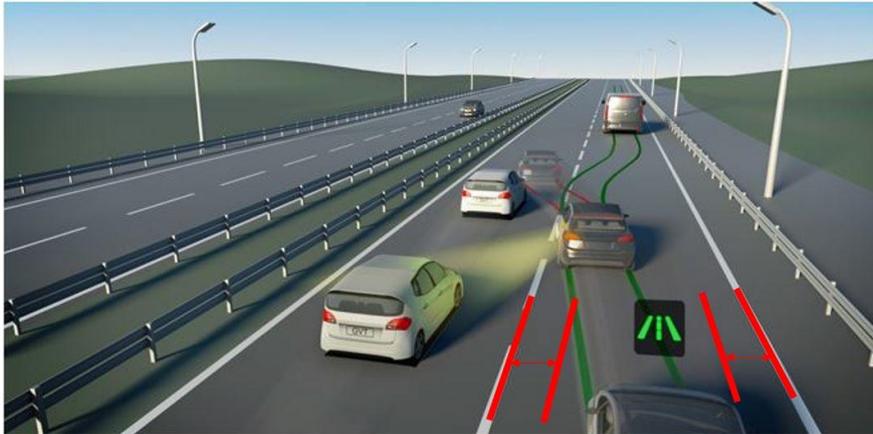


Abbildung 51: Spurtreue [45]

### Ruck

Der Ruck ist die Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit und wird über

$$\frac{\Delta Car a_x}{\Delta t} \quad (2.1)$$

berechnet und als Grenzwert wird ein Ruck von  $5\text{m/s}^3$  angenommen (Referenz: ACC Norm [33]).

Entscheidend für eine aussagekräftige Ruckbewertung ist, dass die ersten Simulationssekunden nicht für eine Bewertung herangezogen werden, denn dabei stellen sich die Bedingungen erst ein (Einschwingvorgang).

Sollte ein Szenario alle diese eingeführten Grenzwerte nicht überschreiten und zusätzlich einen Fahrstreifenwechsel durchführen, dann kann es als nicht kritisch betrachtet werden (grün).

## 2.7 Kriterienkatalog für Freigabe eines Fahrstreifenassistenten

Der Kriterienkatalog richtet sich in erster Linie an den simulativen Ablauf und soll anhand objektiver Kriterien eine Aussage treffen können. Grund für den Ansatz einer Simulation ist, das teure und zeitintensive Testen etwas einzugrenzen und eine Beschleunigung hinsichtlich des Entwicklungszyklus zu erzielen. Außerdem soll von teuren Prototyp Fahrzeugen in der frühen Entwicklung abgesehen werden. Trotzdem müssen nach der Simulation, Testkriterien für die öffentliche Straße aus der Vielzahl an möglichen Szenarien abgeleitet werden und ein Testkatalog definiert werden. Bevor aber auf die öffentliche Straße gegangen werden kann, müssen die gesetzlichen Anforderungen für das jeweilige Land erfüllt werden. In diesem Fall finden sich die Anforderungen für Österreich im anschließenden Kapitel.

### 2.7.1 Grundvoraussetzung für das Fahren auf öffentlichen Straßen in Österreich

Bevor man sich Gedanken über das Testen auf der öffentlichen Straße macht, müssen erstmals die gesetzlichen Mindestanforderungen erfüllt werden. Da sich die Arbeit auf den österreichischen Raum bezieht, kommen deshalb auch die gültigen, nationalen Gesetze zur Anwendung.

Wie in [12] in §8 beschrieben, gilt für das in der Arbeit behandelte System, folgende Grundvoraussetzungen, um auf der öffentliche Straße testen zu dürfen:

- Vorab müssen mindestens 10 000 Testkilometer gefahren werden
- Das Auf- und Abfahren erfolgt manuell und sobald der Testfahrer sich eingeordnet hat, kann er das System aktivieren
- Der Fahrer muss die Fahrt überwachen
- Kritische Situationen müssen vom Fahrer übernommen werden und es muss eine Notfallvorrichtung geben

### 2.7.2 Zweistufige Simulation und anschließende Freigabe

Um ein gezieltes und rasches Vorankommen bei der Beurteilung eines LCA Modells sicherzustellen, werden folgende Prozesse vorgeschlagen:

- feine Simulation oder Interpolationsmethode bzw. DOE
- grobe/feine Methode

Diese vorgeschlagenen Methoden werden im Kapitel Resultate noch genauer beschrieben. Nichts desto trotz muss am Ende ein Grenzwert erfüllt werden, um das Modell aus simulativer Sicht sicher freigeben zu können. Entscheidend ist eine Methode zu besitzen, die alle kritischen Szenarien für den Entwickler herausfinden kann. Das wird zum Teil in späteren Kapiteln versucht noch zu beschreiben, bedarf aber weiterer Untersuchungen.

In Abbildung 52 sind diese Grenzwerte genauer dargestellt. Entscheidend ist aber, dass vor der Freigabe keine simulativen Crashfälle mehr auftreten sowie auch das rechts Überholen komplett ausgeschlossen ist. Ein gewisser Prozentsatz an Folgefahrrten kann noch toleriert werden sowie auch das Komfortthema Ruck und Spurtreue ist noch nicht so stark reglementiert.

Unterschieden wird zwischen einer groben und anschließend feinen Simulation, die links in Abbildung 52 dargestellt wird. Werden in der ersten Simulationsschleife die Grenzwerte nicht erreicht, ist es sinnvoll, das Modell noch einmal zu überarbeiten. Wenn mit der Methode fein gerechnet wird, dann befindet man sich auf der rechten Seite in Abbildung 52. Dazu sollte das Modell jedoch einen guten Reifegrad besitzen, denn diese Methode ist sehr zeitaufwendig.

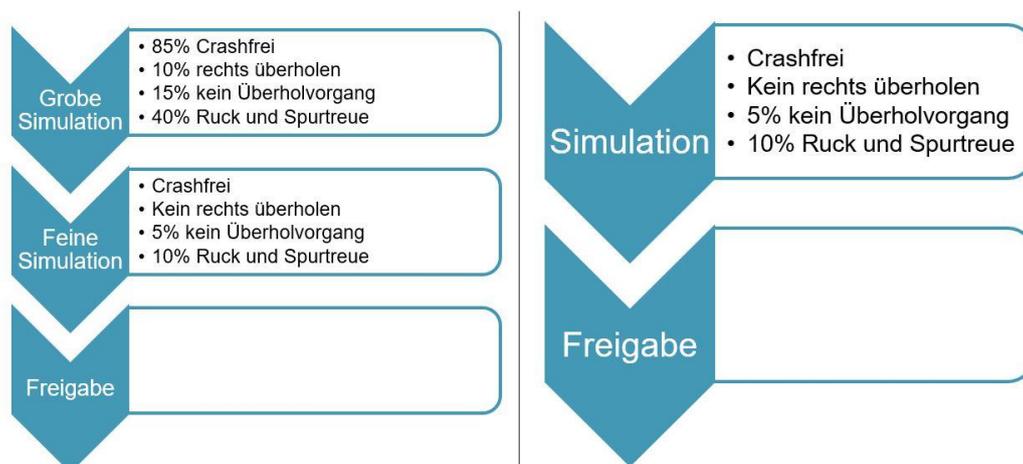


Abbildung 52: Zweistufiger Simulationsansatz für die Freigabe

## 3 Resultate

Ziel dieses Kapitels ist es, die beiden Funktionstestresultate gegenüberzustellen und die verschiedenen Schwächen der einzelnen Modelle zu beschreiben, sowie mögliche Lösungswege zu demonstrieren. Ein zweiter großer Teil in diesem Kapitel wird der Optimierung der Simulationszeit zugesprochen. Dabei werden unterschiedliche Methoden dargestellt und die jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet. Grund für diesen Abschnitt ist, dass die vorgestellte Freigabemethode nur sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn ein effizienter Ablauf vorhanden ist. Deshalb ist es das oberste Ziel, die Simulationszeit deutlich zu reduzieren und von der Simulation mit geringer Schrittweite wegzukommen.

### 3.1 Rechenzeitproblem

Das Thema Rechendauer ist analog dem Thema Kilometersammeln im Freigabeprozess. Durch die vielen Möglichkeiten bei der diskreten Simulation ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, die bei der vollfaktoriellen Simulation und geringen Schrittweiten zu einem enormen Problem führen.

Im Zuge der Diplomarbeit gibt es aus simulativer Sicht verschiedene Methoden das Problem der Freigabe mit effizientem Zeitmanagement zu lösen. Dabei zeigt Abbildung 53 klar die verschiedenen Methoden auf, die zur Anwendung kommen können und anschließend beschrieben werden. Die Konzentration ausschließlich auf kritische Szenarien wurde so nicht durchgeführt, denn man kann nicht mit Sicherheit sagen, dass das Modell die vermeintlich „leichten“ Situationen sicher bewältigt und nur an den „kritischen“ scheitert. Außerdem können nun anhand der breiten Datenbasis weitere Untersuchungen gemacht werden, vor allem, wenn man sich wie in der Literatur vorgeschlagen, auf kritische Metrikdaten beschränkt. Das Hinzuziehen von kritischen Situationen auf Basis der gewählten Szenarien erhöht natürlich die Freigabesicherheit.

Wenn in späterem Zusammenhang von feiner Simulation gesprochen wird, dann bedeutet das eine Schrittweite von 2-5km/h, 5-8m, und 0,5-1m/s<sup>2</sup>. Teilweise führen diese Angaben dazu, dass für das Ausführen der Testmatrix bereits leistungsstarke Computer verwendet werden müssen, da der Arbeitsspeicher nicht ausreicht (Grund: Vollfaktorielle Testmatrix). Für große Schrittweiten bedeutet das: 10-20km/h, 20-40m und 1-3m/s<sup>2</sup>.

Besser für die Freigabeentscheidung sind die Methoden große/kleine Schrittweite bzw. DOE und Interpolation. Für diese drei Methoden befinden sich im Anschluss eigene Kapitel, die genauer auf dieses Thema eingehen und gleichzeitig einen Vorschlag im Zuge der Arbeit bieten sollen.

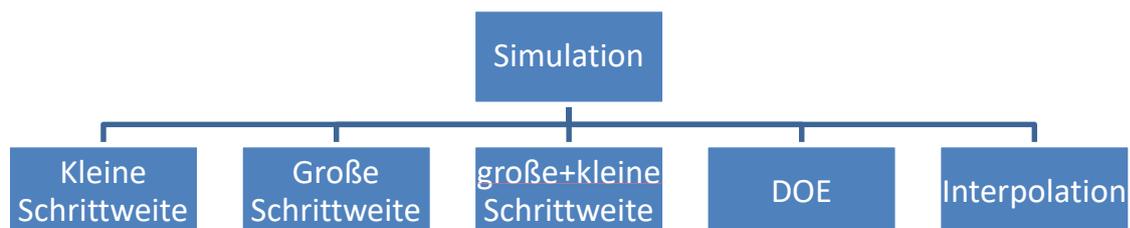


Abbildung 53: Simulationsmethode und ihre Vor- und Nachteile

### 3.2 Methode kleine Schrittweite

Diese Methode muss angewendet werden, wenn keine Alternative vorhanden ist, die besser und schneller arbeitet. Sie bietet zwar den großen Vorteil, dass man durch ihre kleine Schrittweite keine Fälle übersieht (sofern im Untersuchungsbereich), jedoch mit dem gravierenden Nachteil, dass enorme Datenmengen entstehen. Außerdem ist bei einem gut programmierten Modell das Verhältnis zwischen gefundenen kritischen Werten und Simulationsaufwand so gering, dass eine alternative gefunden werden muss und wird durch Tabelle 32 belegt. Außerdem entstehen kritische Situationen meist durch einen zu geringen Abstand mit einer zu großen Ausgangsgeschwindigkeit. Das bedeutet, wenn der Abstand noch kleiner wird, dann ist davon auszugehen, dass es das EGO Fahrzeug ganz sicher nicht schaffen wird. Genau auf solche Situationen wird in der Methode gar nicht eingegangen.

Tabelle 32: Daten/Zeitvergleich bei feiner Methode *Funktionstest 1*

Simulation	Datenmenge	Zeitaufwand	Kollisionen	Varianten
Szenario 1v	21GB	4 Tage	124	9047
Szenario 2v	286 GB	40 Tage	3452	99494
Szenario 3v	7 TB	2,5 Jahre	Nicht bekannt	11 Mio.

Die Daten für Szenario 3v sind Hochrechnungen auf Basis der Szenario 2v Daten, zeigen aber das Problem recht deutlich. Der Zeitaufwand in Tabelle 32 bezieht sich immer auf die Rechendauer eines Computers, kann also durch parallelisieren deutlich reduziert werden. Eine andere Möglichkeit bietet das Cloud Computing durch Hinzukaufen von virtuellen Ressourcen. Zeittreibend sind die Geschwindigkeitsvariationen, weil sich beide Fahrzeuge in die gleiche Richtung bewegen und mit keiner Verzögerung zu rechnen ist. Deshalb dauern diese auch deutlich länger und benötigen deutlich mehr Speicherbedarf als vergleichsweise Verzögerungsvarianten.

### 3.3 Methode: große Schrittweite

Diese Methode kann dazu verwendet werden wenn es darum geht, das Modell auf seine Schwächen hin zu untersuchen, jedoch noch keine Freigabe zu erwirken. Genau diese Methode wird auch in der Arbeit auf die beiden *Funktionstest 1* und *2* angewendet, um die Methode erstmals zu überprüfen und andererseits einige Schwächen der beiden LCA Modell aufzuzeigen. Dabei können auch schon erste Muster bzw. Fehler der Modelle sehr gut erkannt werden und durch das systematische Testen werden erste Schwächen deutlich. Ein gutes Einsatzgebiet für ein solches Vorgehen könnte die Entwicklung solcher LCA Modelle sein, um dem/der EntwicklerIn schnell ein Feedback über die Qualität des Algorithmuses zu liefern. Außerdem deckt dies schon einen sehr großen Testbereich ab.

Tabelle 33 zeigt die erzeugten Daten während der Simulation sowie die Zeitdauer. Somit kann diese Methode sehr einfach in einen Entwicklungsprozess integriert werden. Natürlich kann die Schrittweite noch etwas verändert werden, was bei einer Vergrößerung schnell zu einem Zeitvorteil wird.

Tabelle 33: Daten/Zeitvergleich bei grober Methode *Funktionstest 1*

Szenario	Datenmengen	Varianten	Zeit
Szenario 1-3	4,2 GB	5004	44 h

Wie schon genannt reicht diese Methode aber nicht aus, um sicher eine Freigabe zu erzielen, da das Risiko besteht, dass kritische Fälle nicht berücksichtigt werden.

### 3.4 Methode: große/kleine Schrittweite

Folgender Ansatz sollte dabei helfen, die Laufzeit auf einem Niveau zu halten, dass es auch ermöglicht, weitere Kombinationen (z.B. Verkehrsteilnehmern, Wetterbedingungen) mit in die Simulation einzubeziehen. Der erste Schritt ist, die Parameterschrittweite zu vergrößern und eine erste Simulation bzw. anschließende Auswertung durchzuführen, mit der Abfrage, ob ein Crash oder ein zu geringer (vorher definierter Grenzwert) lateraler Abstand zu anderen Target Fahrzeugen zu einer erneuten Simulation führt. Charakteristik dieser erneuten Simulation ist, dass rund um diesen kritischen Bereich noch einmal gerechnet wird, jedoch mit feinerer Auflösung. Entscheidend für den Erfolg von möglichst vielen kritischen Ereignissen ist die richtige Parametervergrößerung.

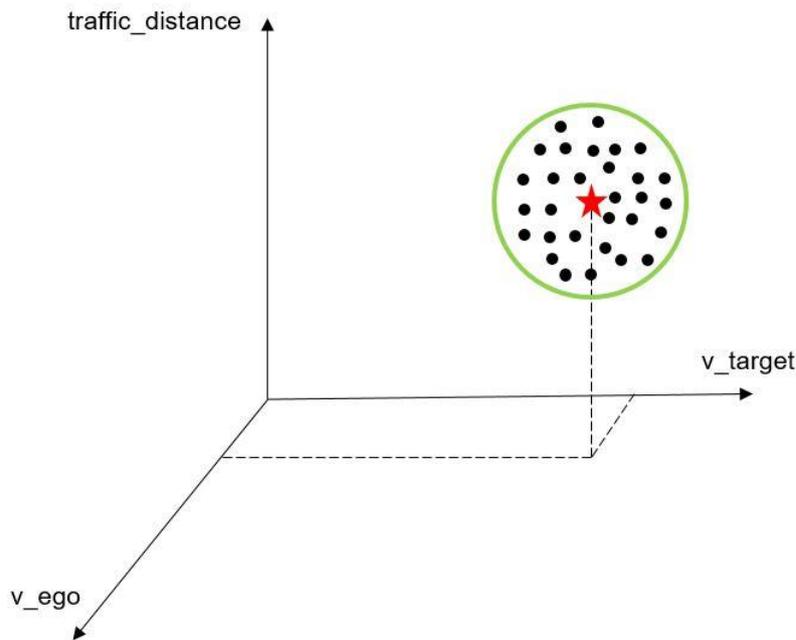


Abbildung 54: Methode grob/fein im Parameterraum

Abbildung 54 verdeutlicht genau dieses Vorgehen und beschreibt es anhand eines Symbolbildes. Der rote Stern markiert einen kritischen Fall, gefunden durch die grobe Simulation. Durch das Ausweiten des Untersuchungsbereiches (grüner Kreis) wird versucht die kritischen Fälle, die mit hoher Wahrscheinlichkeit sich rund um diesen kritischen Punkt ansiedeln, aufgedeckt werden. In dem neu generierten Bereich wird mit einer feineren Auflösung gerechnet, um auch alle kritischen Fälle finden zu können. Somit kann das Verhältnis zwischen kritischen Fällen und Output deutlich gesteigert werden.

Mit diesem Ansatz wird ein effizienter Entwicklungs- und Entscheidungsprozess gewährleistet. Genau diese Methode wird später auch weiter verfolgt, denn es bietet mehrere Vorteile. Einerseits kann man schon sehr früh im Berechnungsprozess die Güte des Modells vorhersagen. Mit der nachgeschalteten Verfeinerung im Bereich der kritischen Fälle können so nahezu alle Fälle erkannt werden und bieten einen deutlichen Performancevorteil.

Um diesen Vorteil auch sichtbar zu machen, geht es in erster Linie darum eine Referenzsimulation zu erzeugen, die möglichst alle Variationen fein simuliert. Anschließend können die beiden Methoden gegenübergestellt werden. Sicher ein Vorteil ist die benötigte Zeit bei der Methode grob/fein.

## Resultate

Für die Referenzsimulation wurde auf 12 Computer gleichzeitig gerechnet und somit eine Datenmenge von ca. 290GB für ca. 100.000 Variationen (Szenario 2v) erzeugt. Für eine erste Abschätzung der Methode wurde im ersten Versuch knapp 18000 Referenz herangezogen (siehe Tabelle 37).

Ein wichtiger Faktor, der die Simulationszeit auch bedeutend beeinflusst, ist der Reifegrad des LCA Modells. Teilweise kann die enorme Rechenzeit auch auf einen Funktionsfehler innerhalb des LCA Modells zurückgeführt werden (Folgefahrtmodus). Denn in der Simulation ist ein Abbruchkriterium festgelegt, dass nach einem Fahrstreifenwechsel oder, wenn die Geschwindigkeit annähernd null ist, die Simulation automatisch abbricht. Wenn also das Modell nicht richtig für einen Fahrstreifenwechsel ausgelegt ist oder einen Fehler hat und im Fall, wie bei *Funktionstest 1* hinterherfährt, dann muss bis zum Ende der Simulationsdauer (in diesem Fall 150s) gewartet werden. Das verschleppt den Prozess und steigert den Speicherbedarf.

Großen Unterschied bei der Simulationszeit machen einfach gestaltete LCA Simulink Modelle. Einfach bedeutet in diesem Fall, dass alle nicht benötigten Funktionen gelöscht werden. Außerdem kann durch einfache Funktionsblöcke anstatt Stateflow Funktionen noch einmal die Rechenzeit optimiert werden. Das ist jedoch nur möglich, wenn die Funktionen gleichwertig durch andere ersetzt werden können. Natürlich kann man auch den anderen Weg gehen und sich die Geschwindigkeit durch Rechenleistung erkaufen, kann aber durch einfache Maßnahmen umgangen werden bzw. reduziert werden.

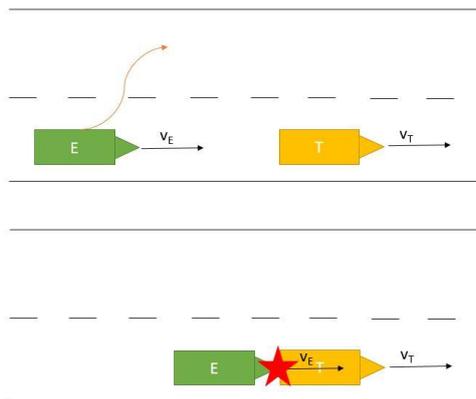


Abbildung 55: grob/fein Methode: (Crashverhalten)

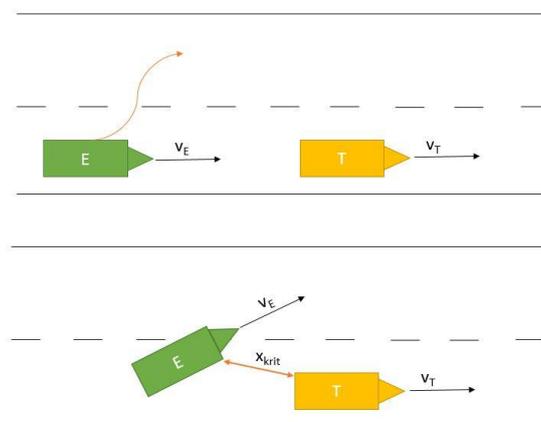


Abbildung 56: grob/fein Methode: kritischer Abstand

## Resultate

Die beiden Abbildungen (Abbildung 55 und Abbildung 56) sollen das Verhalten für die Abfrage nach der groben Simulation demonstrieren. Durch die vorab berechneten Variationen, jedoch mit größerer Schrittweite, kommt es immer wieder zu kritischen Situationen innerhalb eines Fahrstreifenwechsels. Entweder führt es zu einer Kollision (siehe Abbildung 55) oder das EGO Fahrzeug entscheidet sich für einen sehr späten Überholvorgang, der kritischer einzustufen ist, als jener mit größerem Überholabstand (siehe Abbildung 56). Über diese beiden Abfragekriterien und einem  $x_{krit}$  von 20m (Wert wurde experimentell bestimmt) kann der Variationsprozess auf ein vertretbares Maß reduziert werden. Anschließend erfolgen, mit den gesammelten Daten, ein vollfaktorieller Testmatrixaufbau und eine feine Simulation.

Tabelle 34 zeigt die Überlegung hinter dieser Methode und wird in den anschließenden Tabellen verifiziert. Betrachtet man die ersten Ergebnisse in Tabelle 35 sieht man in erster Linie einen deutlichen Zeitunterschied jedoch mit dem Vorteil keine relevanten Crashesituationen zu verlieren. Zweiter Vorteil ist der geringere Speicherbedarf durch die geringeren Simulationswiederholungen. In Tabelle 36 sind die konkreten Parameterwerte für das Szenario 1 für Geschwindigkeitsvariation aufgelistet. Dabei wird vorher die Vorsimulation mit großer Schrittweite gestartet und anschließend die Folgesimulation mit der geringen Schrittweite.

Tabelle 37 stellt den zweiten Vergleich dar und soll Aufschluss über die Qualität der Methode geben. Dabei gibt es einen extremen Ausreißer innerhalb des Parameterraumes, der durch diese Methode nicht gefunden werden kann. Denn die Überlegung ist, den Raum nur so gering wie nötig auszuweiten. Sollte jedoch dieser eine Fall auch gefunden werden müssen, dann müsste man den Raum deutlich vergrößern, was zu einer großen Variantenzahl führen würde und damit den Zeitvorteil ad acta legt.

**Tabelle 34: Unterschied zwischen feiner und grob/feiner Methode**

	<b>Methode Fein</b>	<b>Methode grob/fein</b>
<b>Rasterung</b>	feiner	mittel
<b>Variationsvielfalt</b>	Höher	geringer
<b>Rechenzeit</b>	länger	kürzer
<b>Aufdeckungshäufigkeit</b>	hoch	hoch

**Tabelle 35: Zeit und Variationsunterschied innerhalb Szenario 1**

<b>Szenario 1 v-Variation</b>			
<b>Grob/fein</b>	0,5h	116 Varianten	29 Crashes
<b>Fein</b>	5,75h	855 Varianten	29 Crashes

**Tabelle 36: Schrittweitereinstellung bei Szenario 1**

<b>Szenario 1 v-Variation</b>			
<b>Methode grob/fein</b>	<b>Geschwindigkeit v</b>	<b>Abstand x</b>	<b>Beschleunigung a</b>
<b>Vorsimulation</b>	20 km/h	40m	3m/s <sup>2</sup>
<b>Folgesimulation</b>	5km/h	10m	1m/s <sup>2</sup>

Tabelle 37: Zeit und Variationsunterschied innerhalb Szenario 2v

Szenario 2 v-Variation			
Grob/fein	17 h	9456 Varianten	1198 Crashes
Fein	117,7h (ca. 5 Tage)	17819 Varianten	1199 Crashes

Tabelle 38: Schrittweitereinstellung bei Szenario 2

Szenario 2 v-Variation			
Methode grob/fein	Geschwindigkeit v	Abstand x	Beschleunigung a
Vorsimulation	20 km/h	40m	3m/s <sup>2</sup>
Folgesimulation	5 km/h	10m	1m/s <sup>2</sup>

In Tabelle 37 bei Methode fein wurde die Schrittweite etwas höher gewählt (Grund: Rechendauer) als bei der Methode grob/fein im Abschnitt fein. Somit sind beide nicht vollständig und eine Vergleichbarkeit schwierig. Es zeigt aber, dass auch diese Methode nicht mit Sicherheit alle kritischen Fälle aufzeigt, jedoch schon sehr viele Kollisionen aufdecken kann. Um die Methode sicher anwenden zu können, müssen aber noch weitere Untersuchungen angestellt werden, die dann ein generelles Prozedere vorgibt.

### 3.5 Design of Experiment (DOE)

Ein sehr entscheidendes Tool innerhalb der Optimierung von mehrdimensionalen Problemen nimmt die DOE ein. Anwendung findet es vermehrt im realen Bereich (z.B.: Prozessoptimierung), wo einzelne Ausgangsgrößen gemessen werden und durch das Verändern der Eingangsgrößen so eine Beziehung hergestellt wird. Ein bekannter Vertreter dieses Problems ist der mehrdimensionale Parameterraum der Verbrauchsoptimierung einer Verbrennungskraftmaschine (VKM). Dabei werden am Prüfstand verschiedene Eingangsgrößen verändert und die Ausgangsgröße (Kraftstoffverbrauch) gemessen und so ein Optimum erreicht, ohne dabei das gesamte Parameterfeld zu vermessen.

Genau ein solches Vorhaben wird auch auf das Problem der Variationen in dieser Arbeit angewendet. Entscheidend für ein gutes Ergebnis ist eine absolut, messbare Ausgangsgröße. Dabei kann die Software bzw. die Methode mit subjektiven Einschätzungen wie „gut“ oder „nicht gut“ nicht umgehen und braucht eine Messgröße. Für die DOE wird dann der geringste Abstand innerhalb der einzelnen Szenarien herangezogen und als Ausgangsgröße definiert. Wie in Abbildung 57 gezeigt, wird die DOE anhand eines solchen Würfels aufgebaut und mit der Software Minitab [46] simuliert. Die Eckpunkte des Würfels repräsentieren die Parametergrenzen für das erste Szenario, mit den Eingangsgrößen Geschwindigkeit von EGO und Target Fahrzeug sowie den Abstand zwischen den Fahrzeugen, dass für einen ersten Test herangezogen wird. Als Ausgangsgröße soll der kritische Abstand dienen, der aus der Simulation und dem Verhalten des EGO Fahrzeuges bestimmt wird. Die Software versucht anhand der gesammelten Daten einen Zusammenhang zwischen den Eingangs – und der Ausgangsgröße herzustellen und gibt diese durch eine sogenannte Regressionsgerade wieder. Die Regressionsgerade kann dann für den gesamten Parameterraum angewendet werden. Ziel ist es, durch eine große Schrittweite die Variationsanzahl soweit zu reduzieren, dass die Simulation schnell abläuft und das Verhalten des EGO Fahrzeuges durch eine einzige Formel beschrieben werden kann. Dabei soll die Regressionsgleichung das fehlerhafte Verhalten des LCA Modells widerspiegeln.

## Resultate

Durch Einsetzen der Variationsparameter wird der kritische Abstand berechnet (siehe Formel 3.1). Sobald die Regressionsgleichung vorhanden ist, kann der gesamte Parameterraum auf kritische Abstände untersucht werden. Startkonfigurationen, die eventuell zu Distanzunterschreitungen und in weiterer Folge zu einem Crash führen könnten, können durch die anschließende Simulation verifiziert werden.

$$x_{krit} = f(v_{ego}, v_{target}, distance) \quad 3.1$$

Tabelle 39 zeigt einen Versuchsplan für das Szenario 1. In den ersten drei Spalten befinden sich die Eingangsgrößen und in der letzten Spalte der simulierte kritische Abstand. Verdeutlicht wird dies durch den Würfel in Abbildung 57.

Es hat sich gezeigt, dass diese Datenmenge, wie in Tabelle 39 aufgelistet, für eine exakte Vorhersage nicht ausreicht. Neben Minitab gibt es bei MAGNA noch eine zweite Software, die für selbiges Anwendungsgebiet verwendet wird und in der Arbeit untersucht wurde.

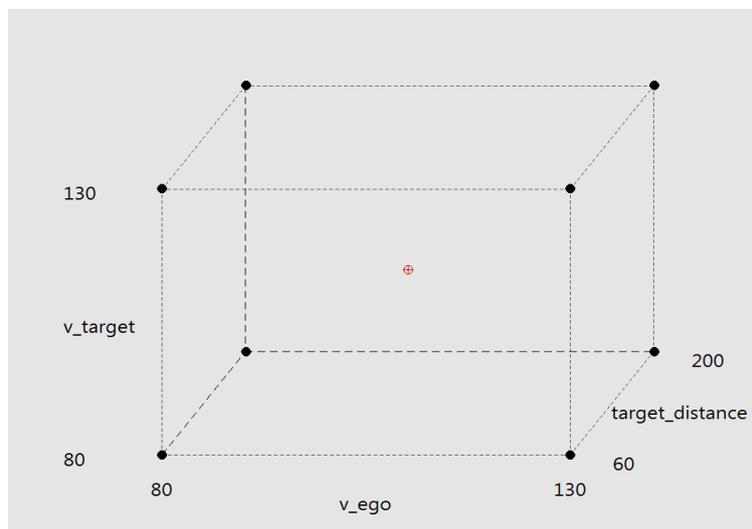


Abbildung 57: DOE Würfel für Szenario 1 (Geschwindigkeitsvariation)

Tabelle 39: DOE Versuchsplan für Szenario 1 (Geschwindigkeitsvariation)

v_ego	v_target	target_distance	Ergebnis als kritischer Abstand in (m)
80	80	60	58
130	80	60	36
80	130	60	58
130	130	60	58
80	80	200	198
130	80	200	43
80	130	200	198
130	130	200	198
105	105	130	128

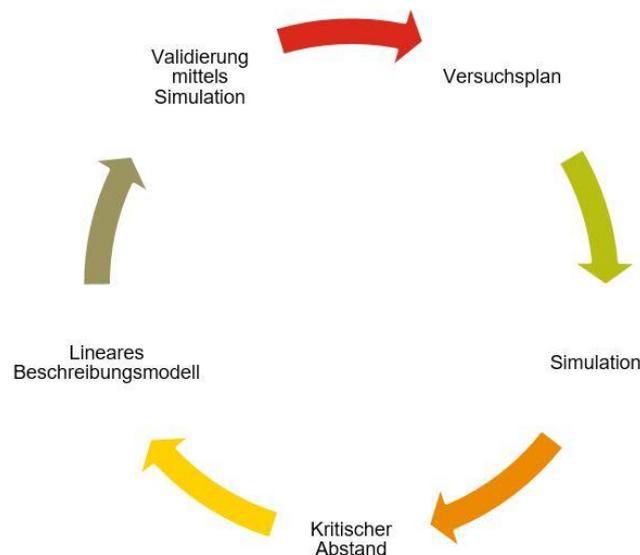


Abbildung 58: DOE Ansatz

Im Rahmen der Arbeit wurde mit sehr einfachen Versuchsplänen begonnen, die jedoch nicht die gewünschte Qualität der Regressionsgleichung geliefert haben. Einfach bedeutet in diesem Zusammenhang mit wenigen Messpunkten, die an den Ecken des Würfels liegen. Mit mehr Messdaten konnte die Qualität der Regressionsgerade deutlich gesteigert werden. Tabelle 39 zeigt in den ersten drei Spalten die Eingangsdaten, die die Minitab Software gefordert hat und in der letzten Zeile dann die simulierte Ausgangsgröße.

Eine zweite DOE Untersuchung mit einem anderen Programm (Altair Hyperworks [47]) und mehr Daten (1000 Varianten bei Szenario 1v und 10000 Varianten bei Szenario 2v) hat zwar das Verhalten recht gut abgebildet, doch die Frage des Grenzwertes konnte nicht zufriedenstellend beantwortet werden. Dieser Grenzwert ist entscheidend für die Interpolation zwischen den Punkten. Der bedeutet, ab welchem vorausgeberechneten Wert das interpolierte Ergebnis als kritisch zu bewerten ist. Dieser Grenzwert müsste aber für verschiedene Szenarien und verschiedene Modelle untersucht werden, um mit Sicherheit sagen zu können, dass diese Methode auch alle kritischen Fälle innerhalb des Untersuchungsbereiches aufzeigen kann. Außerdem muss es sich dabei um einen fixen,

## Resultate

---

allgemeingültigen Grenzwert handeln, der dann für weitere Untersuchungen herangezogen werden kann.

Für die Auswertung der Regression kann über die Software Altair die Ordnung der Regression eingestellt werden und dabei konnte das Grenzwertproblem bis 4. Ordnung nicht zufriedenstellend gelöst werden. Eine Regression 2. Ordnung für das Szenario 1v würde folgende Gleichung ausgeben:

$$\begin{aligned} x_{krit} = & 62.093833 + (-1.3526516 * v_{ego}^1) + (0.2752601 * v_{target\_1}^1) + & 3.2 \\ & 0.5110789 * distance^1 + (-0.0019617 * v_{ego}^2) + (0.0051569 * v_{target\_1}^2) + (- \\ & 0.0011070 * distance^2) + (0.0064487 * v_{ego}^1 * v_{target\_1}^1) + ( \\ & 0.0072177 * distance^1 * v_{ego}^1) + (-0.0102261 * distance^1 * v_{target\_1}^1) \end{aligned}$$

Wobei  $v_{ego}$  die Geschwindigkeit des EGO Fahrzeuges in km/h,  $distance$  der Abstand zwischen EGO und Target Fahrzeug in m und  $v_{target\_1}$  die Geschwindigkeit des Target Fahrzeuges in km/h ist. Mit dieser Formel können dann die verschiedensten Bedingungen durch Einsetzen der gewünschten Werte das Verhalten des EGO Fahrzeuges untersucht werden. Als Ergebnis erhält man den kritischen Wert (entspricht: Crash oder IO Verhalten).

Ein Auszug aus der DOE Interpolation für das Szenario 2v soll das Verhalten besser verdeutlichen (siehe Tabelle 40). In der ersten Spalte befinden sich die Werte, die direkt aus der Simulation kommen und als Referenz für die Erstellung der DOE herangezogen wurden. Meistens sind diese Werte negativ (siehe Tabelle 40 Zeile 3). Doch es gibt auch Fälle in denen sich ein Crash bei rund 4m eingestellt hat (siehe Tabelle 40 Zeile 1). Entscheidend ist aber die rechte Seite der Tabelle 40, denn dort befinden sich die vorhergesagten Werte. Außerdem können noch innerhalb der DOE Software verschiedene Arten der Simulation (z.B.: Hypercube) sowie auch eine Gestaltung der Grenzfläche (Curve Fitting oder anderes Polynom) bestimmt werden, wird aber in dieser Arbeit nicht mehr bearbeitet, was die Vorhersagequalität eventuell beeinflussen und Grundlage für weitere Arbeiten sein kann.

Tabelle 40: Auszug aus Interpolation mit DOE Software Hyperworks

kritischer Abstand (aus Simulation)	Abstand Interpoliert
4	-10
-6	-10
-16	-10
4	-137
4	-137
-6	-137
4	-192
4	-192
4	-192
4	-85
4	-85
4	-85
4	<b>4</b>
4	<b>4</b>
4	<b>4</b>
4	<b>18</b>
4	<b>18</b>
4	<b>18</b>
4	-18
4	-18

Besonders die Werte, die fett hervorgehoben, stellen das Grenzwertproblem dar. Es konnte auf Grund der geringen Daten bzw. auch durch die vielen Simulationsarten und Grenzkurvenanpassung noch keine optimale Methode gefunden werden, die den Grenzwert sicher bestimmt. Wenn z.B. der Grenzwert auf 15m gesetzt wird, dann werden die Fälle mit 18m nicht mehr als kritisch angesehen und dementsprechend übersehen. Auch ein zu groß gewählter Grenzwert ist nicht optimal und führt zu großen Rechenzeiten, was verhindert werden soll. Das Thema bietet darüber hinaus noch weiteres Untersuchungspotential.

### 3.6 Interpolation

Sehr ähnlich dem DOE Ansatz wird in diesem Abschnitt die Interpolation zwischen Datenpunkten beschrieben. Um den Weg der feinen Methode zu umgehen, aber trotzdem die kritischen Fälle nicht zu übersehen, muss man das Verhalten des LCA Algorithmus in einem gewissen Bereich vorhersagen (siehe Abbildung 59).

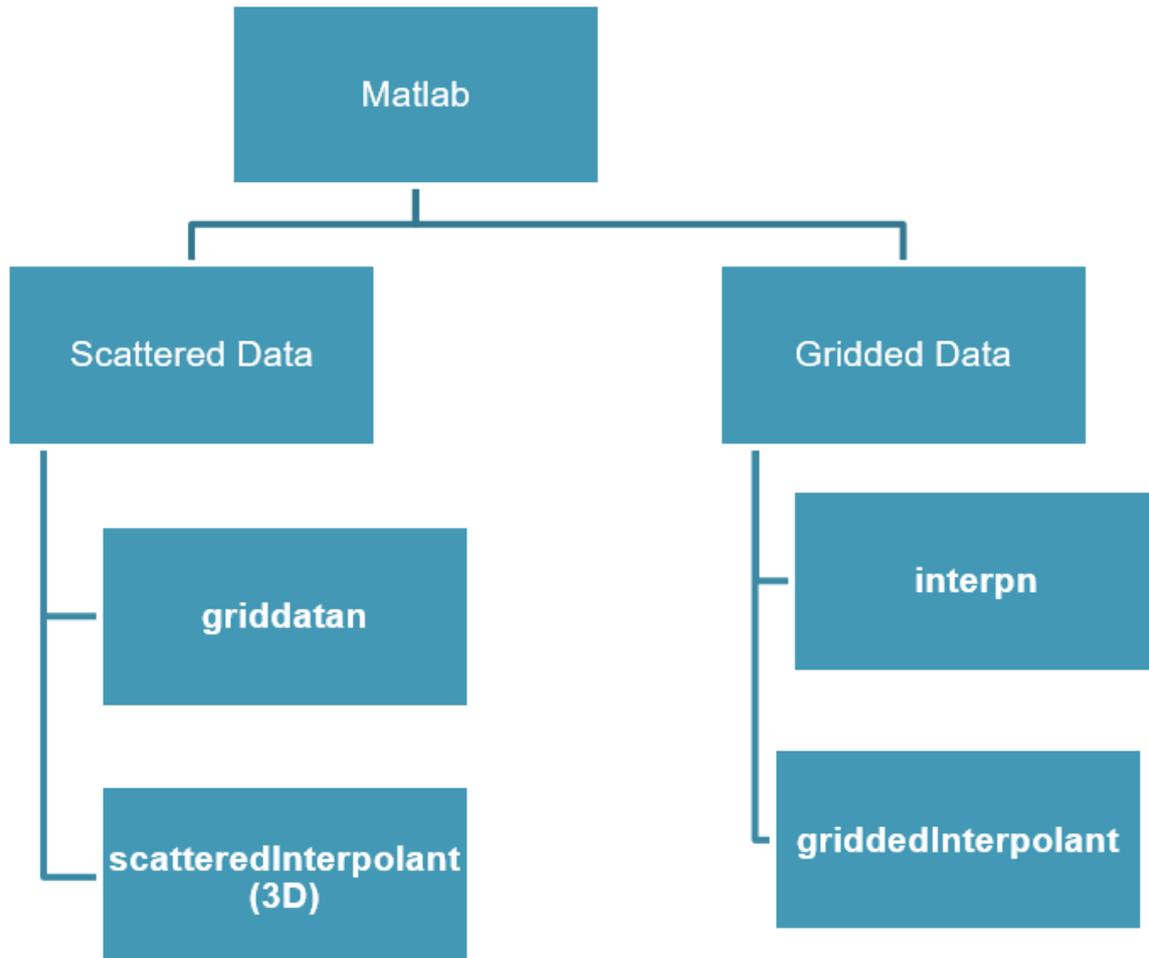


Abbildung 59: Interpolationsmethode über Matlab

Der Prozess gliedert sich in vier wesentliche Schritte. Zuerst wird über eine grobe Simulation versucht, das Verhalten des „falschen/fehlerhaften“ LCA Modell in den Simulationsergebnissen widerzuspiegeln. Entscheidend für die Funktionsfähigkeit der Methode ist die richtige Anzahl an Simulationen. Wenn man die Anzahl zu gering wählt (Schrittweite zu groß), kann die Interpolation nicht funktionieren bzw. gibt es zu große Abweichungen. Bei zu vielen Simulationen kann kein Performancevorteil generiert werden. Diese Methode funktioniert im Gegensatz zur DOE Methode vollständig in Matlab und IPG und muss nicht auf ein externes Programm zurückgreifen. Sobald die Simulationsdaten vorhanden sind, wird über die Eingangs- bzw. Variationsparameter ein Raum aufgespannt und anschließend mit der Ausgangsgröße (geringster Abstand während des Überholvorganges) eine „Fläche“ generiert. Mit Hilfe dieser Fläche soll es dann gelingen, das Verhalten vorherzusagen und den gesamten Parameterbereich zu bestimmen. Sobald die Vorhersagen abgeschlossen sind, werden die kritischen, vorhergesagten Variationen in IPG Carmaker simuliert, um eine Validierung der Vorhersagen zu ermöglichen.

Matlab verfügt für n dimensionale Räume und über verschiedene Methoden sich diesem Thema zu nähern. Die Dimensionen hängen sehr stark von den Szenarien ab und den dabei mitwirkenden Target Fahrzeugen. Denn jedes Fahrzeug verfügt über verschiedene Startgrößen und diese stellen einen Eingang in die Interpolation dar. Außerdem kann man sogenannten „gridded Space“ erzeugen, dass den Raum in gleich große Teilstücke abhängig von der Eingangsgröße aufteilt. Aufgrund des

vollfaktoriellen Aufbaus und dem anschließenden Löschen verschiedener Zeilen, kann dieses Verhalten nur bedingt angewendet werden. Besser eignet sich die Methode „scattered data“, was genau dem Verhalten eines vollfaktoriellen Aufbaus mit anschließendem Löschen besser gerecht wird.

### Scattered Data

Der Datentyp Scattered Data besteht aus einer Datenmenge von x-Werten mit den dazu passenden y-Werten, die in keinem Zusammenhang stehen und nicht geordnet sind. Es gibt verschiedene Methoden diesen Typ zu interpolieren, wobei der bekannteste die Delaunay Triangulation darstellt. [48]

Dieser Datentyp eignet sich gut für die angewandte Methode, denn der vorher eingeführte Filter, der jene Varianten löscht, die zu keinem Überholvorgang führen, hinterlässt Leerstellen. Wichtig ist, dass über die Ränder des Parameterraumes Datenpunkte vorhanden sind, da die Interpolationsmethode bessere Ergebnisse als die Extrapolation liefert. Zudem finden sich vermehrt kritische Szenarien an den Rändern des Parameterraumes (z.B. hohe EGO Startgeschwindigkeit mit kleiner Target Geschwindigkeit und geringen Abstand).

### Gridded Data

Der zweite Datentyp stellt das geordnet, regelmäßige Netz dar. Dabei gibt es eine Unterscheidung in der Netzdimensionalität. Beginnend bei einem 2d Netz (meshgrid) beschreibt die Methode ndgrid ein n-dimensionales Gitter, das auch bevorzugt verwendet wird, denn die Dimensionen steigen mit den Szenarien. [49] Großer Nachteil dieses Datentyps ist, dass ein geordnetes Netz aufgebaut wird, das keine Lücken zulässt. Somit macht es den selbstentwickelten Filter, der garantiert, dass immer ein Fahrstreifenwechsel ausgeführt wird, nutzlos. Trotzdem ist das Vorhersageverhalten dieser Methode exakter, mit dem Nachteil, dass deutlich mehr Varianten gerechnet werden, die zu keinem Fahrstreifenwechsel führen.

### Griddatan

Diese Interpolationsmethode griddatan [50] erfordert folgende Eingangsgrößen und interpoliert alle Datenstrukturen (geordnet und nicht geordnet) (siehe Formel 3.2)

$$\mathbf{v}_q = \text{griddatan}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{x}_q, \text{method}, \text{options}) \quad 3.3$$

$\mathbf{v}_q$  stellt den Interpolationsvektor dar, im Umfang des gesamten Parameterraumes mit der gewünschten Schrittweite.  $\mathbf{x}$  ist die Eingangsmatrix, mit den jeweiligen Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Abständen.  $\mathbf{y}$  wird als Ausgangsgröße verwendet und gibt den kritischen Abstand an, der aus der Simulation bestimmt wurde. Zudem kann  $\mathbf{x}_q$  für den Parameterraum eingelesen werden, sodass  $\mathbf{v}_q$  die dazu passenden Interpolationswerte ausgibt. Neben den Eingangs- und Ausgangsgrößen, kann noch die Interpolationsmethode (nearest oder linear) als Option verändert werden, wobei beide nicht die geforderte Vorhersagequalität geliefert haben. Die Methode scatteredInterpolant wird hier nicht weiter beschrieben, denn diese ist durch die Dimensionalität (3D) beschränkt.

**interp**

Interpoliert 1-d bis n-dimensionale Daten in einem ndgrid Format [51]

$$v_q = \text{interp}(x1, x2, \dots, xn, v, xq1, xq2, \dots, xqn) \quad 3.4$$

$$F = \text{griddedInterpolant}(x1, x2, \dots, xn, v) \quad 3.5$$

$$v_q = F(xq1, xq2, \dots, xqn) \quad 3.6$$

$v_q$  stellt den Vorhersagevektor dar,  $x1$  bis  $xn$  die Eingangsgröße, in diesem Fall die Geschwindigkeit und Abstand sowie die Beschleunigung.  $v$  beschreibt den kritischen Abstand, der aus der Simulation bestimmt wird. Als Interpolationswerte werden die Eingangsgröße mit kleiner Schrittweite herangezogen ( $xq1$  bis  $xqn$ ). Die Methode `interp` und `griddedInterpolant` haben ähnliche Eingangsgrößen sowie Interpolationsmethoden und liefern im Vergleich zum Datentyp `scattered Data` deutlich bessere Vorhersagen. Für die Methode `griddedInterpolant` müssen die Interpolationswerte extra eingelesen werden, wie in Formel 3.6 dargestellt.

**3.6.1 Schrittweitenuntersuchung**

Interpolation funktioniert nur ausreichend gut, wenn genügend Daten vorhanden sind und gleichzeitig muss ein Optimum zwischen Datenanzahl und Rechendauer gefunden werden. Um eine erste Aussage treffen zu können, werden verschiedene Schrittweiten ( $n$ =Anzahl der Varianten) gewählt und anschließend miteinander verglichen. Entscheidendes Kriterium ist, keine kritischen Varianten zu übersehen. Bei der Interpolation gilt das gleiche bezüglich des Grenzwertes, wie bei der DOE Methode. Eine exakte Vorhersage wird nicht gelingen, deshalb ist ein zuverlässiger Grenzwert entscheidend. Dieser Wert muss aber erst durch experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Modellen und Szenarien gefunden werden.

**Tabelle 41: Übersehene kritische Szenarien mit Grenzwert 15m bei Szenario 1v**

	Gleichverteilt Methode <code>scatteredinterpolant</code> , Methode: nearest ( $n=500$ )	Gleichverteilt <code>scatteredinterpolant</code> , Methode: nearest ( $n=700$ )	Gleichverteilt <code>scatteredinterpolant</code> , Methode: nearest ( $n=1000$ )	<code>Griddedinterpolant</code> methode <code>cubic</code> ( $n=440$ )
Kritische Szenarien übersehen [#]	4	3	2	0

**Tabelle 42: Übersehene kritische Szenarien mit Grenzwert 15m bei Szenario 2v**

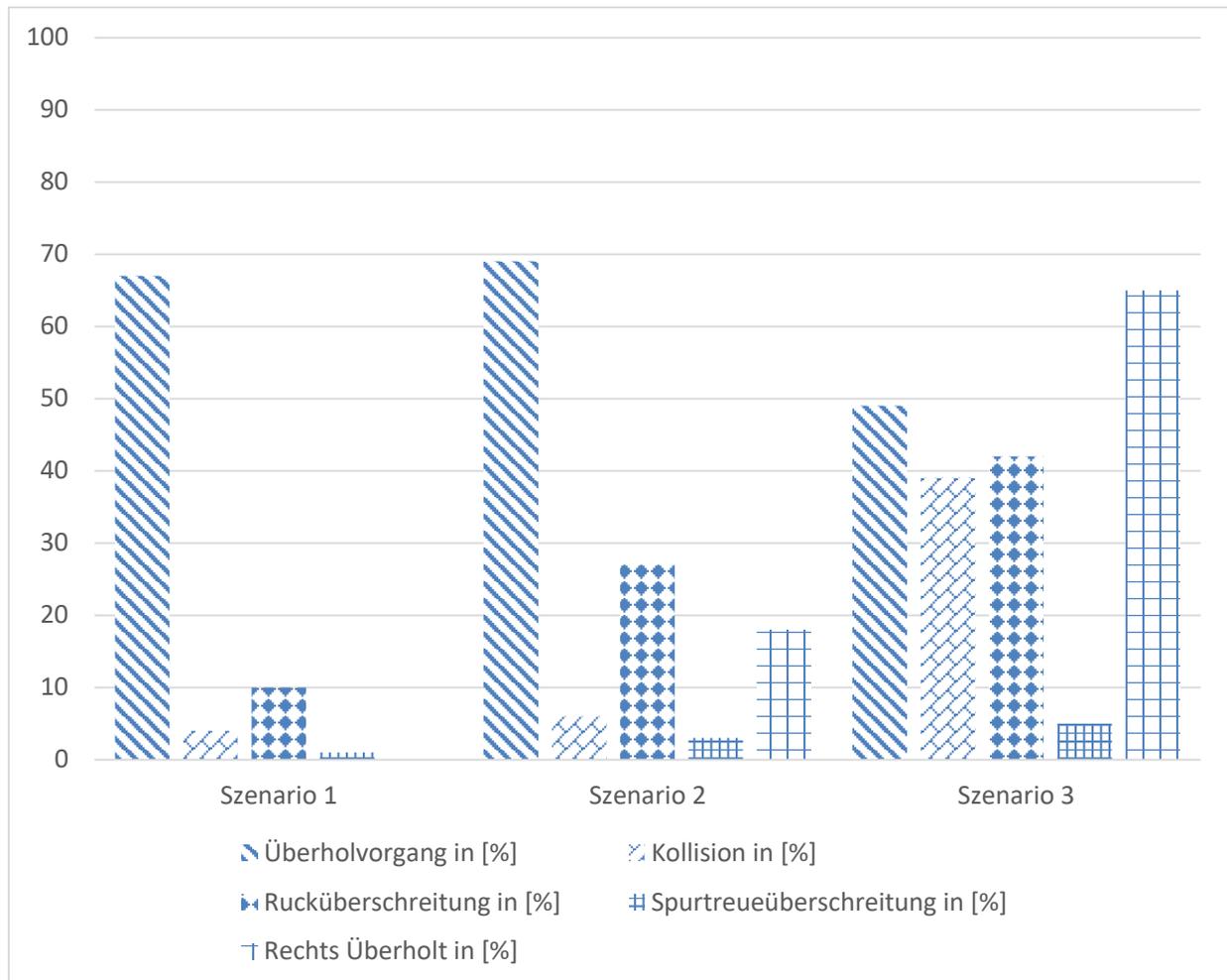
	<code>Griddedinterpolant</code> methode <code>cubic</code> ( $n=10000$ )
Kritische Szenarien übersehen [#]	2032

Die Überlegung für Anzahl an Varianten ist, ca. 1/10 zu rechnen, die benötigt werden für die feine Referenzsimulation und im Anschluss das Ergebnis mittels Interpolation zu bestimmen. Wie in Tabelle 41 gezeigt, funktioniert der Interpolationstyp scattered data nicht genau genug und deshalb wurde auf die Methode gridded data umgestellt. Problem jedoch ist, das gridded data mehr Varianten ausführt als eigentlich benötigt. Außerdem darf der eigens entwickelte Filter nicht verwendet werden, denn die Methode baut ein n-dimensionales Gitter auf, das keine Lücken haben darf. Bei den ca. 10000 Varianten für Szenario 2\_v führen ca. 3000 Varianten zu keinem Fahrstreifenwechsel. Aufgrund der Tatsache, dass die Methode gridded data besser abgeschnitten hat bei Szenario 1-v, liegt die Übertragung auf das Szenario 2-v sehr nahe. Doch dabei versagt die Methode, wenn man bedenkt, dass ca. 3450 Kollisionen bei knapp 100000 Varianten in der Referenzsimulation aufgetreten sind und mit der Interpolation bei 10000 Varianten ca. 2000 davon nicht gefunden wurden (siehe Tabelle 42).

### **3.7 Ergebnisse Funktionstest 1**

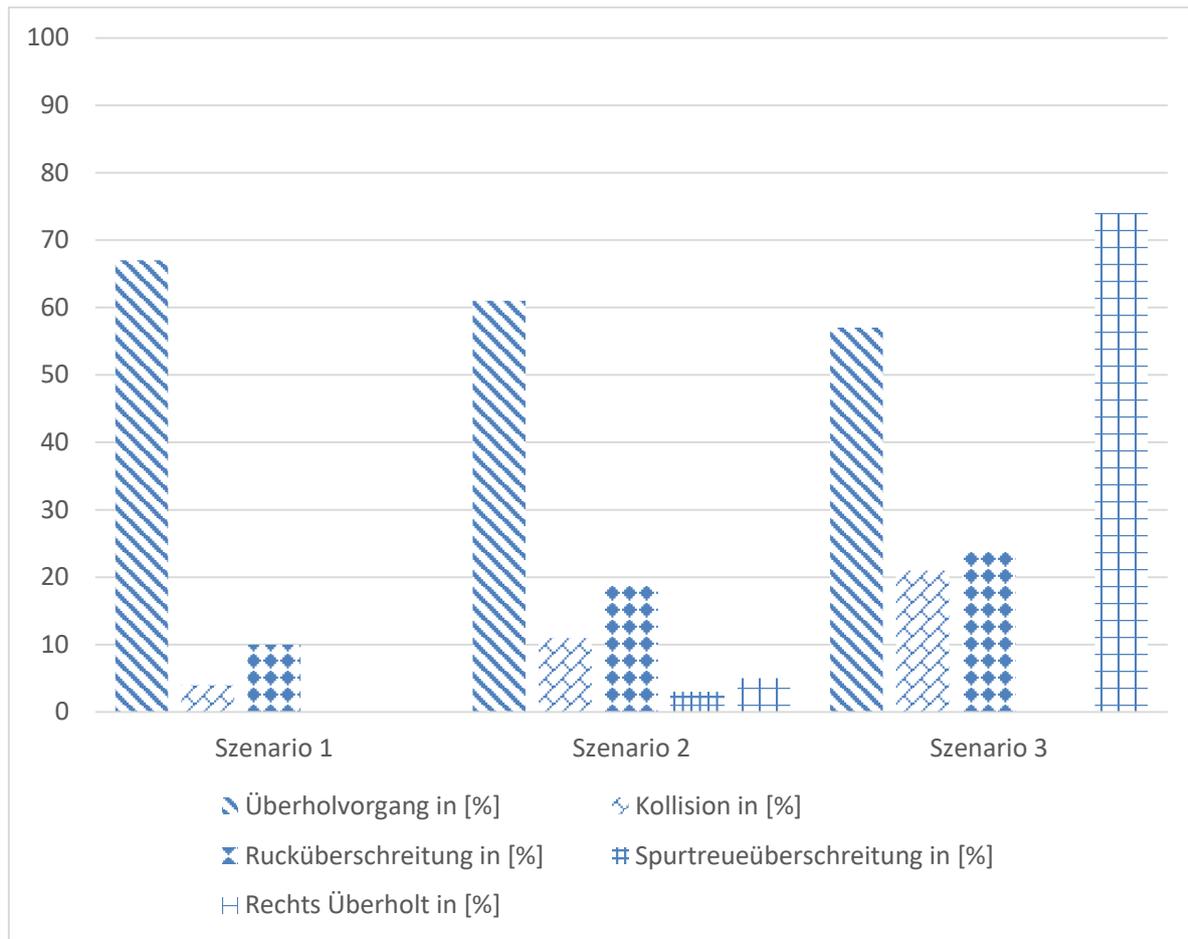
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse in absoluten Zahlen dargestellt. Dabei wird vor allem der Reifegrad bewertet und auf die Schwächen des Modells hingewiesen. Diese Grafik wird automatisch, nach erfolgreicher Beendigung der gesamten Methode, in einem Excel Dokument angegeben. Neben der Grafik gibt es auch eine Tabelle mit Zahlenwerten.

Basis für diese Grafik bildet die Methode grob/fein wobei im ersten Schritt nur einmal grob gerechnet wurde und dann das Verhalten beurteilt wird. Dies ist auch die Grundlage für die zweistufige Freigabe, wie in Abbildung 52 gezeigt.



**Abbildung 60: Ergebnisse *Funktionstest 1*: ohne Verkehrssteuerung**

Bei den in der Arbeit untersuchten LCA Modellen handelt es sich um unterschiedliche Reifegrade bzw. Entwicklungsstände. *Funktionstest 1* ist schon ein älteres Modell und ist in seiner Weise auch auf drei Target Fahrzeuge beschränkt. Deshalb hat eine Ausdehnung der Szenarien keine Aussagekraft und beschränkt sich auf die vorgesehenen Testszenarien. Beim *Funktionstest 2* handelt es sich um eine Weiterentwicklung und dementsprechend führt dies zu anderen Ergebnissen (Überholhäufigkeit). *Funktionstest 1* enthält deutlich weniger Überholvorgänge und begibt sich in einen Folgemodus. In Kombination mit einem funktionsfähigen AEB (Notbremsassistent) führt dies zu einem sehr sicheren Verhalten, dass aber so nicht gewünscht ist. Im Gegensatz führt das Modell beim *Funktionstest 2* immer 100% den geforderten Fahrstreifenwechsel aus, jedoch bedarf es dabei noch einiger Verbesserung (angepasste Fahrstreifenwechseldauer), welche anschließend noch genauer besprochen werden.



**Abbildung 61: Ergebnisse Funktionstest 1: mit optimierter Verkehrssteuerung**

Aus Abbildung 61 kommt man auf folgenden Schluss: Das LCA Modell hat noch nicht die gewünschte Reife erlangt. Einerseits gibt es noch zu viele Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern und zum anderen finden noch zu viele rechtswidrige Handlungen statt (rechts Überholen). Die Tatsache, dass noch zu viele Kollisionen vorhanden sind, kann mit der Implementierung in IPG zusammenhängen. Die Verkehrsmodellierung ist für diesen Anwendungsfall in Carmaker nicht gut gelöst. Die VerkehrsteilnehmerInnen nehmen keine Rücksicht und beharren auf den eingestellten Werten. Das macht sich besonders bei den Beschleunigungsvariationen bemerkbar (Szenario 3), denn dort müsste sich der Verkehr besser anpassen. Dabei beginnt das Target Fahrzeug 2 zu verzögern und gleichzeitig vollzieht das EGO Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel und das Target Fahrzeug 3 fährt dann auf das EGO Fahrzeug auf, weil es keine Sensoren besitzt, die auf die Situation zu reagieren und erzeugt so einen vermeintlichen Crash (Verhalten in Abbildung 60). Auch die Tatsache, dass es noch zu wenige Fahrstreifenwechsel gibt, macht einen kundenorientierten Fahrstreifenwechselassistenten im derzeitigen Stadium unmöglich. Vergleiche dazu Abbildung 60, das gekennzeichnet durch die schlechte Verkehrssteuerung ist und Abbildung 61, bei dem versucht wird, durch Abfragen, das Verhalten der Target Fahrzeuge auf dynamische Änderungen des Verkehrs besser einzustellen. Das macht sich deutlich in den auftretenden Kollisionen bemerkbar.

Das geringe Fahrstreifenwechselverhalten ist auf das Verhalten des ACC zurückzuführen. Wenn das EGO Fahrzeug beginnt, über die ACC Funktion zu verzögern und im Verzögerungsverhalten ist, ist für die TTC Zeitbestimmung keine ausreichende Beschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsdifferenz mehr vorhanden. Das führt zu einer fehlerhaften Folgefahrt, aus der das EGO Fahrzeug auch nicht mehr

## Resultate

abweicht. Eine mögliche Lösung wäre ein erneuter Beschleunigungsimpuls, sobald die passenden Bedingungen wieder vorliegen, um einen Fahrstreifenwechsel zu vollziehen.

### Maßnahme:

Um eine gute Aussage über das richtige Verhalten des EGO Fahrzeuges zu erhalten und auch zu unterscheiden, woher der Crash gekommen ist, muss der Verkehr besser gesteuert werden. Dabei wird eine Art „ACC“ Funktion für das folgende Target Fahrzeug (T3) implementiert.

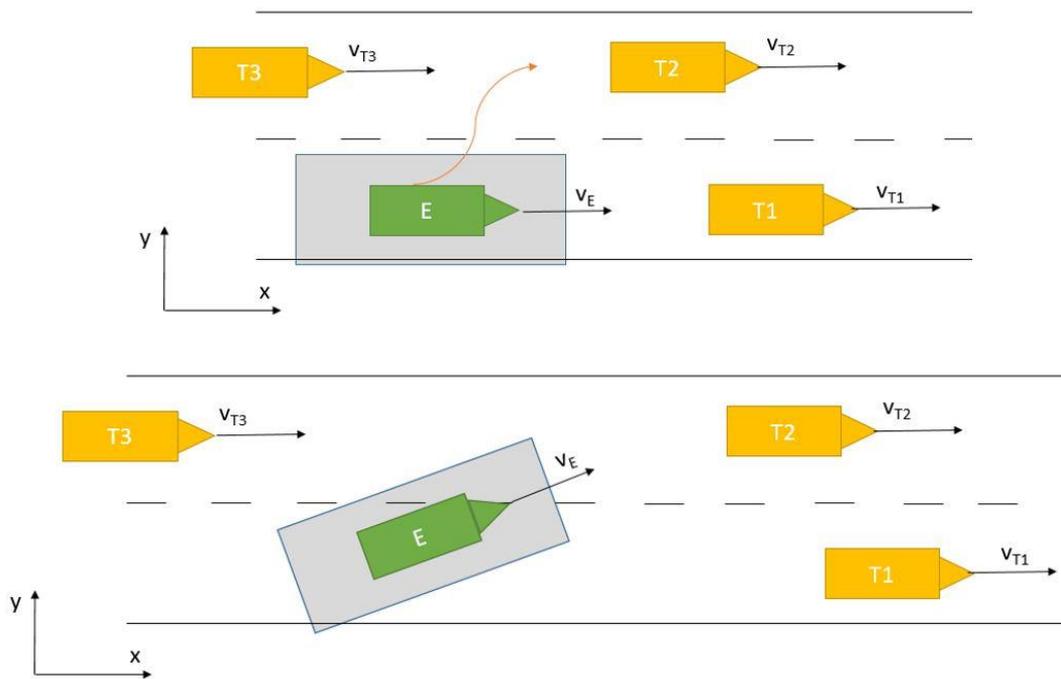


Abbildung 62: ACC Funktion Target Fahrzeug

Fahrdynamische Werte werden direkt aus der Norm bezogen [33]. So wird zum Beispiel die maximale Verzögerung des Target Fahrzeuges 3 auf  $2,5\text{m/s}^2$  begrenzt, sobald das EGO Fahrzeug die linke Spur befährt (Szenario 3v). Die aufgezwungene Verzögerung ist sehr moderat, sodass davon auszugehen ist, dass ein/eine normaler/normale FahrerIn die Situation noch händeln kann. Mit diesem Verhalten soll sichergestellt werden, dass das EGO Fahrzeug aufgrund der momentan herrschenden Gegebenheiten richtig reagiert und das Target Fahrzeug konstant verzögert, sobald das EGO Fahrzeug die linke Spur befährt. Wenn es trotzdem zu einem Crash kommt, dann wird ein falsches Verhalten des EGO Fahrzeuges angezeigt und der Algorithmus muss angepasst werden. Durch diese Gegenmaßnahme soll auch das Crashverhalten deutlich reduziert werden und die Methode an Aussagekraft gewinnen. Dieses beschriebene Verhalten wird für das Szenario 3v appliziert, denn dort ist mit keiner Verzögerung des Target Fahrzeuges (T2) zu rechnen. Anders gestaltet sich das Verhalten bei den beiden Verzögerungsvariationen (3acc1 und 3acc2). Dort befindet sich ein Art „AEB“ für das Target Fahrzeug (T3) mit einer erhöhten Verzögerung von  $6\text{m/s}^2$ . Entscheidend ist, dass keine Kollision durch das EGO Fahrzeug ausgelöst wurde bzw. kein Crash aufgrund einer schlechten Verkehrssteuerung zu Stande kommt.

### 3.8 Ergebnisse Funktionstest 2

Der deutlichste Unterschied zwischen *Funktionstest 1* und 2 ist die Fahrstreifenwechselhäufigkeit. Diese kommt dem Untersuchungsgegenstand der Methode von 100% Fahrstreifenwechsel nach. Allerdings ist im *Funktionstest 2* noch kein AEB implementiert, was die Anzahl der Kollisionen teilweise begründet. Ein anderer Grund für die Anzahl an Kollisionen ist die konstante Fahrstreifenwechselzeit von 4s. In manchen Situationen würde es Sinn machen, diese etwas zu verkleinern um eine Kollision zu verhindern. Aufgrund dieser Maßnahme wird es aber zu einer erhöhten Querbeschleunigung kommen, was für den/die FahrerIn und dem Passagier unangenehm wird. Hierbei gibt es einen Zielkonflikt zwischen Komfort und Sicherheit.

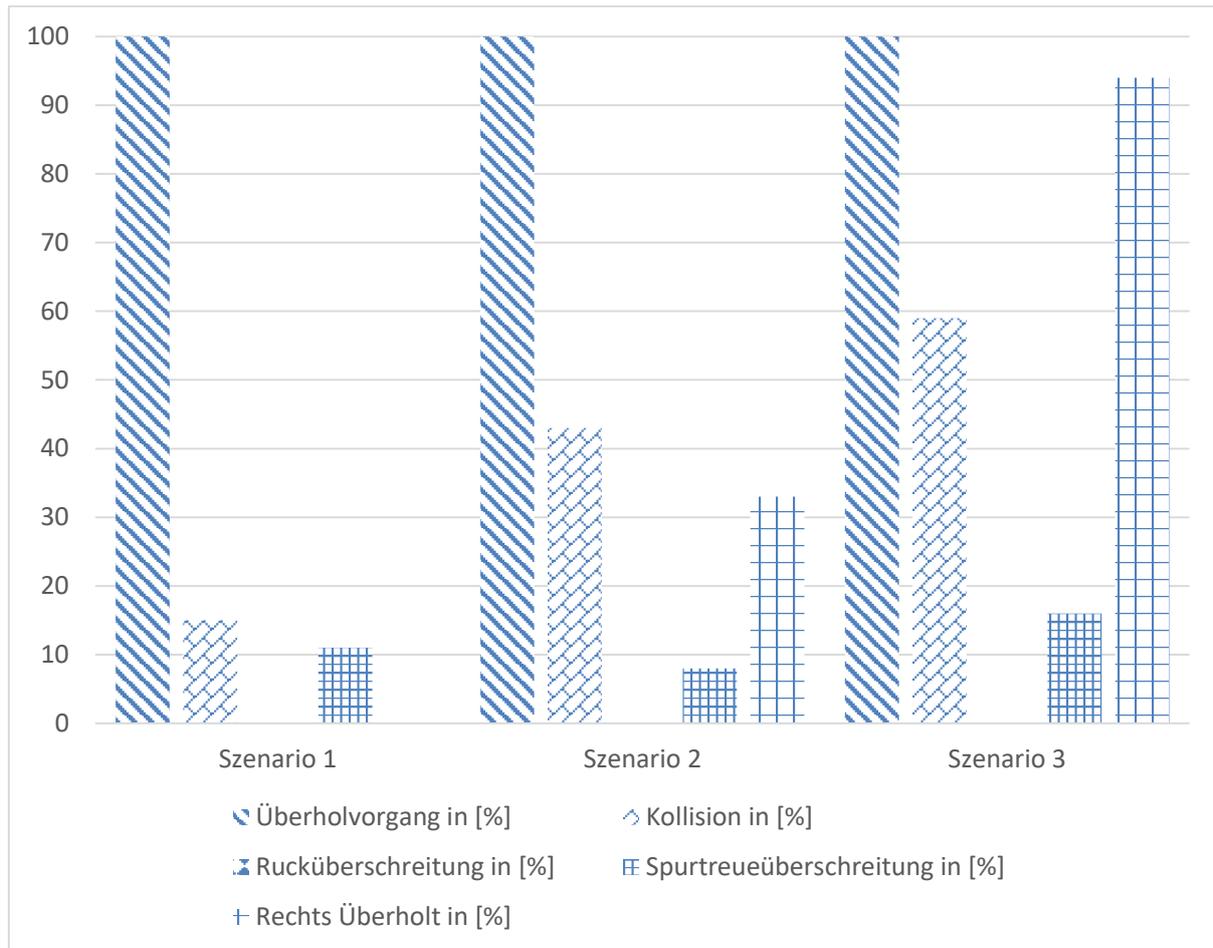


Abbildung 63: Gesamtergebnis Funktionstest 2 mit optimiertem Verkehr

Markant sind die rechts Überholvorgänge, wobei diese auf Grund des fehlenden AEB zurückzuführen sind. Vor allem bei den Verzögerungsvarianten reicht die ACC Verzögerung einfach nicht aus, um nicht an einem Target Fahrzeug rechts vorbei zu fahren.

Grundsätzlich gibt es ein Muster bei Fehlern, die während des Fahrstreifenwechsels auftreten. Für genauere Details wird auf den Anhang verwiesen, der für beide Funktionstests alle Kollisionsfälle auflistet. Hauptkollisionsgrund sind Stauende, die zu spät erkannt werden bzw. die Verzögerung einfach nicht ausreicht. Diese werden in der Simulation etwas anders bestimmt, als ein wirkliches Stauende, nämlich durch ein stehendes Fahrzeug mit geringem longitudinalen Startabstand. Ein mögliches Realszenario wäre, wie in Abbildung 64 beschrieben. Entscheidende Größe für das richtige Verhalten ist der Radarsensor und die Signalverarbeitung bzw. schlußendlich die Entscheidungslogik.

Es gibt Forschungen [52], die zeigen, dass der Radarsensor durch Reflexionen am Unterboden, wenn diese nicht exakt überdeckt sind, sprich einen lateralen Versatz aufweisen, mehrere Fahrzeuge in front detektieren kann. Anhand einer Simulation wurde dieses Verhalten getestet und kann so nicht bestätigt werden, wenn genau das beschriebene Verhalten vorliegt. Dies müsste auf einer Teststrecke unter realen Bedingungen mit Ballon Cars validiert werden. Ballon Cars stellen aufblasbare Fahrzeughüllen dar, die auf der Teststrecke meistens von einem Fahrzeug gezogen werden bzw. sich auf automatischen Vorrichtungen befinden und für crashrelevante Manöver verwendet werden. Der große Vorteil von solchen Fahrzeugen ist, dass wenn die Crashgeschwindigkeit nicht größer als 50km/h ist, sich keine nennenswerten Schäden am Versuchsfahrzeug sowie am Ballon Cars ergeben. [53] Neben diesem Phänom tritt auch ein zweites Szenario sehr häufig auf, was auf ein plötzliches Reagieren des Vorfahrenden Fahrzeuges zurückzuführen ist. Wenn der Abstand zwischen den Fahrzeugen gering ist und der vorfahrende Fahrer ein plötzliches starkes Bremsmanöver ausführt, kann dies zu einer Kollision führen. Dieses Verhalten kann auf eine Reaktion des Vorfahrenden auf ein Stauende sein, wobei das EGO Fahrzeug das Verhalten nicht richtig beurteilt. Die realen Bedingungen können vielfältig sein und teilweise wird es auch Fälle geben, die im ersten Moment unrealistisch sind. Jedoch zeigen sie auf, wo die Schwächen des Modells liegen. Mit Sicherheit gibt es beim *Funktionstest 2* viele Fälle, die auf die fehlende AEB Funktion zurückzuführen sind. Bei *Funktionstest 1* gibt es wieder andere Schwächen, jedoch kann das nur durch eine genaue Simulation und Aufzeichnung der verschiedenen Signale mit Sicherheit identifiziert werden. Dies ist dann Aufgabe des Entwicklungsingeneurs, der für die Funktionsentwicklung des Modells verantwortlich ist. Durch die Sammlung von Daten und Szenarien kann jedoch eine wesentliche Verbesserung erzielt werden.

### 3.9 Nächste Schritte

Wie schon einmal in dieser Arbeit angesprochen, wurden die verschiedenen theoretischen Möglichkeiten aufgezeigt, die Szenarien noch breiter aufzustellen und damit ein höheres Maß an Zuverlässigkeit zu erreichen. Bis dato wurden nur einfache Szenarien behandelt, die frei von Umwelt und anderen VerkehrsteilnehmerInnen sind. Diese Variationsparameter könnten für weitere Untersuchungen mit in die Methode eingebaut werden, was noch einmal die Variantenzahl erhöht, aber die Zuverlässigkeit steigert.

Eine solche Überlegung wird durch die Verknüpfungen demonstriert, siehe Tabelle 43. So könnte man das Szenario 1 mit den bestehenden Daten durch eine andere Sonneneinstrahlung und einem Tunnel testen. Um auch einen Mehrwert für den entstehenden Aufwand zu erhalten, ist es entscheidend, realitätsnahe Sensormodelle zu erhalten. Nur dann kann der Validierungsaufwand auf der Teststrecke deutlich reduziert werden und die gesammelten Daten erhalten eine deutliche Aufwertung.

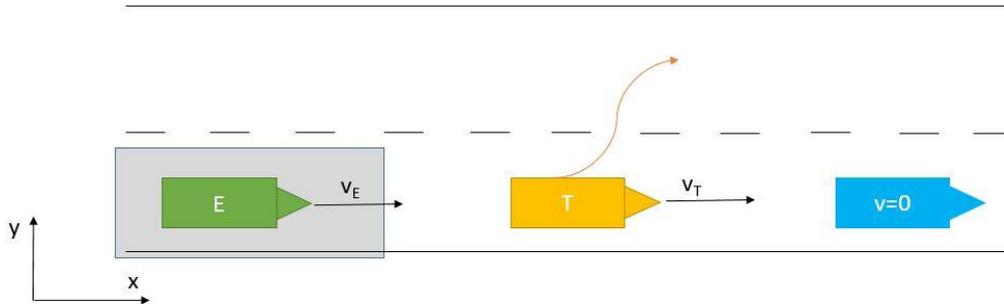
Tabelle 43: Kombinationsmöglichkeiten der Szenarien durch äußere Einflussgrößen

Szenario	Wetter	Verkehrsteilnehmer	Straßenbedingungen
Szenario 1	Sonne	PKW	Tunnel
	Regen	LKW	Baustelle
	Schnee	Motorrad	Autobahn
	Nacht	PKW mit Anhänger	Geschwindigkeitsbeschränkung

#### 3.9.1 Kritische Szenarien (Corner Cases)

Neben den absoluten Zahlen, die aus der Simulation kommen, können sogenannte Corner Cases abgeleitet werden, die dann in einem späteren Zeitpunkt wieder ihre Verwendung finden (z.B.

Teststrecke). Corner Cases sind Fälle, die kritisches Verhalten der Verkehrssituation widerspiegeln und deshalb besonderer Testbestimmungen bedürfen. Dabei müssen Corner Case nicht immer Unfallszenarien darstellen, sondern können auch beinahe Unfälle beinhalten. Das führt zu einem Katalog, der systematisch abgearbeitet werden kann und mittels Verkehrsflussbilder sehr einfach zu analysieren bzw. aufzubauen ist.



**Abbildung 64: Corner Case 1: Später Fahrstreifenwechsel des Target Fahrzeuges (T) infolge eines Staus**

Aufgrund der Häufungen von Kollisionen innerhalb der Simulation könnte sich ein solches Szenario ergeben (siehe Abbildung 64). In der Simulation wird immer wieder das Szenario berechnet, in dem das EGO Fahrzeug eine große Relativgeschwindigkeit gegenüber dem Target Fahrzeug besitzt. Dieses Verhalten führt in der gesamten Simulation zu einem Crash. Eine Möglichkeit wäre ein Stauende bzw. ein langsam fahrendes Target Fahrzeug, das durch die Überdeckung erst zu spät erkannt wird. Laufend scheren andere Fahrzeuge aus (gelbes Fahrzeug) und überholen das stehende Target Fahrzeug (blau) bis schlussendlich das EGO Fahrzeug sich als letztes vor dem langsamen Target Fahrzeug befindet. Entscheidend dabei ist die Funktionalität des Radarsensormodells bzw. in Realität das Erkennungsfeld des Radars. Wenn der Radarsensor mehrere Fahrzeuge erkennen kann und diese auch in die Betrachtung miteinbezieht, dann könnte dieses Verhalten richtig interpretiert werden und es würde zu keinem Unfall kommen. Ein solches Verhalten ist ein typisches Anwendungsgebiet für die Teststrecke. Mit den implementierten Sensormodellen in IPG ist ein Vorausschauen bzw. ein Erkennen mehrerer Fahrzeuge in Front nicht möglich.

## 4 Diskussion

Dieses Kapitel der Diplomarbeit wird sich mit den Einschränkungen und Vereinfachungen beschäftigen, die während der Arbeit aus verschiedenen Gründen gemacht wurden.

MAGNA möchte sich im Bereich der virtuellen Freigabe stark positionieren und mit dieser Methode das teure reale Testen gezielt beschränken. Mit höherer Automatisierung und der Tatsache, dass die Szenarien ab SAE L4 nicht mehr begrenzt sind, muss die Produktentwicklung verstärkt in die virtuelle Welt verschoben werden. Diese Diplomarbeit stellt die Freigabemethode zur Verfügung und die Freigabesicherheit kann durch Hinzufügen von weiteren Szenarien aus verschiedenen Quellen gesteigert werden. Die Szenariengenerierung basiert auf ExpertInnenwissen und die Parametervariation wurde computerbasiert ausgeführt. Für eine sichere Freigabe eines LCA Modells müssen noch weitere Quellen herangezogen werden, wie z.B.: Fahrstudien, Unfalldatenbanken oder die Variation der Verkehrsbedingungen anhand kritischer Metrikdaten.

Große Schwierigkeiten bereitet die realitätsnahe Verkehrssteuerung in IPG Carmaker. Derzeit besteht nur händisch die Möglichkeit, diese über verschiedene Bedingungen gezielt auf das Verhalten zu trimmen. Das treibt aber den Modellierungsaufwand deutlich in die Höhe und muss zudem auch so ausgelegt sein, dass innerhalb des Variationsbereiches, diese Bedingungen auch sicher zutreffen. In der Arbeit befinden sich diesbezüglich einfache Abhilfen, um Kollisionen durch eine falsche Verkehrssteuerung zu umgehen. Das Verhalten über den Einbremsengriff zu steuern, stellt wahrscheinlich nicht den realen Verkehr dar, bietet aber im Moment die einzige Möglichkeit keinen falschen Crash zu detektieren. Eventuell muss die Verkehrssteuerung über eine andere Software gesteuert werden. [54]

Kern der Arbeit ist natürlich die Methode zu entwickeln um einen LCA zu testen und anschließend zu bewerten. Ein wesentlicher Punkt für ein erfolgreiches Testen ist ein guter und zuverlässiger LCA Algorithmus. Dieser kann sich natürlich in seiner Reife unterscheiden, erfordert aber eine gute Szenarienrepertoireabdeckung. Vor allem muss es die verschiedenen Fahrmanöver beherrschen, was in der vorgestellten Arbeit nur durch Funktionsmodell 2 der Fall war. Jedoch gibt es auch dort noch Implementierungsbedarf, vor allem was die Auf- und Abfahrten von Autobahnen betrifft. Die fehlende AEB Funktion ist eine Erkenntnis aus der Simulation und könnte leicht implementiert werden. Eine dynamische, dauerhafte Überwachung während des Fahrstreifenwechsels sowie Abbruchbedingungen könnten das Modell 2 zu einem sehr guten LCA Modell führen und würden es auch zulassen, den gesamten Szenarienkatalog sinnvoll zu testen.

Um die Methode noch zu komplettieren kann über verschiedene externe Quellen nachgedacht werden. Wichtig wären zum Beispiel die Unfalldatenbanken. Diese geben einen Aufschluss über sichere Unfallgeschehnisse und bieten die Möglichkeiten, diese in der Simulation nachzubilden und den LCA zu testen. Über Rechercharbeiten sowie auch stark in den Medien vertreten, war der Unfall eines Tesla Model S, welcher auf ein ähnliches Szenario gestoßen ist, wie in Abbildung 64. Dabei handelt es sich um ein zu spät erkanntes Stauende, das durch das vorausfahrende Fahrzeug verdeckt wurde, wobei das vordere Target Fahrzeug noch im letzten Moment die Spur wechselte und es dann zu einer Kollision zwischen dem EGO Fahrzeug und dem Stauende gekommen ist. Das konnte sowohl aus den berechneten Szenarien herausgefunden werden, aber auch aus einer externen Datenquelle

(z.B.: Unfalldatenbank). MAGNA verfügt, wie schon einmal kurz beschrieben, über eine enge Kooperation mit AlpLab, sodass gemeinsame Synergien und eine starke Vernetzung genutzt werden kann. Derzeit werden Daten im Bereich der öffentlichen Teststrecke im Bereich von Graz gesammelt, die für genau solche Zwecke genutzt werden können, um die Methode noch stärker auszubauen. Ein weiterer Punkt für externe Quellen in Verbindung mit AlpLab sind sogenannte Naturalistic Driving Studies (NDA). Entweder greift man auf internationale Forschungsarbeiten zurück, die Daten von Fahrzeugen sammeln oder man bezieht die Daten aus der Teststrecke und leitet so wieder Szenarien für die Freigabemethode ab. Neben dem szenariobasierten Ansatz mit konkreten Parameter besteht die Möglichkeit den Verkehr stochastisch zu erzeugen. Dazu bieten sich unterschiedliche Verkehrsplanungssoftwarepakete an. [55,56]

Ein, in weiten Schritten noch nicht gelöstes Problem ist die Parameterauswahl und Parametereinschränkung. Ausschlaggebender Punkt ist in diesem Fall die Rechenperformance des Computers bzw. die Anzahl. Über eine Splittung des Variationsraumes und Aufteilung auf mehrere Computer lässt sich die Rechendauer deutlich reduzieren. Im Laufe der Untersuchung haben sich die zwei Methoden Interpolation und DOE, als die zuverlässigsten herausgestellt. Das Problem des Grenzwertes konnte noch nicht gelöst werden.

Neben einem realitätsnahen Verkehr sind auch reale Sensormodelle entscheidend, denn es gibt große Diskrepanzen zwischen virtueller und realer Welt. Im realen Betrieb gibt der Hersteller von Sensoren optimale Sensorpositionen an, die, wenn möglich, auch eingehalten werden sollten, da sonst Störungen auf den Sensor wirken und innerhalb der Simulation nicht berücksichtigt werden. Ein möglicher Zwischenschritt und bessere Lösung wäre die Verwendung von Sensormodellen des jeweiligen Herstellers und nicht die bis dato verwendeten, idealen Sensoren von IPG mit realen Abbildungsverhalten.

Eine Grundsatzentscheidung ist die Herangehensweise an dieses Problem. Es gibt verschiedene Wege, dieses Problem zu lösen, eine Standardlösung hat sich in der Literatur bzw. bei den Herstellern bis dato noch nicht herausgestellt. Die vorliegende Arbeit beruht auf dem Prinzip, konkrete Verkehrsflussbilder über eine Parametervariation zu lösen und damit die kritischen Szenarien zu finden. Diese Methode kann aber nicht sicherstellen, dass auch alle möglichen Szenarien entdeckt werden. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, dieses Problem auch über einen statistischen Ansatz zu lösen und den Verkehr so zu steuern. Vergleichsergebnisse gibt es derzeit noch nicht, da an einer konkreten Umsetzung erst gearbeitet wird.

Die Herangehensweise, wie teilweise in der Literatur beschrieben, dass man sich auf kritische Szenarien konzentriert wurde nicht umgesetzt. Durch die geschaffene Datenbasis, kann die beschriebene Methode nun validiert werden und eventuell zu einer Beschleunigung führen. Dieser Prozess kann natürlich auch automatisches Ablaufen um Zeit zu sparen. Die vorhandenen Szenarien bieten dazu schon einen Variationsrahmen und erleichtern das Vorgehen.

# Zusammenfassung

## 4.1 Fazit

Ziel der Diplomarbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, um einen Fahrstreifenwechselassistenten virtuell freigegeben zu können. In Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedenen Szenarien aufgebaut und dann vollfaktoriell simuliert, sowie eine passende Metrik entwickelt, um das Verhalten des EGO Fahrzeuges zu bewerten. Die Methode beschränkt sich im Moment auf drei aufgebaute Szenarien, jedoch mit der Option diese zu erweitern. Am Ende der Simulation gibt es je eine kompakte Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse, die als Entscheidungsgrundlage dient. Durch Heranziehen der Simulationsdaten kann auf Grund der objektiven Grenzwerte eine Freigabe zuverlässige erzielt werden. Dennoch reichen die dargestellten Szenarien in der Arbeit nicht aus, um mit Sicherheit eine verantwortungsvolle Freigabe zu bewirken. Dazu müssen noch andere Methoden wie z.B.: statistische Verfahren zur Simulation des Verkehrs oder auch Szenarien über kritische Metrikdaten erzeugt werden. Durch den vorhandenen Testrahmen ist der zusätzliche Implementierungsaufwand gering und somit besteht die Möglichkeit sich auf die Szenarienerzeugung zu fokussieren.

Im Laufe der Arbeit ist das Problem der enormen Datenmengen sowie Rechenzeiten aufgekommen. Dazu findet sich auch verschiedenen Untersuchungen in der Arbeit, wie man dieses Thema eventuell lösen kann. Da es nicht der Schwerpunkt der Arbeit war, wird dieses Thema als Ausblick behandelt und nicht mehr im Detail betrachtet. Trotzdem finden sich verschiedene Methoden (Interpolation, DOE) wieder, die genau für solche Themen ausgerichtet sind. Am besten für diesen Anwendungsfall könnte sich die Methoden DOE und Interpolation eignen, doch fehlt für eine präzise Vorausberechnung noch ein gültiger Grenzwert, der für die Feststellung zwischen kritisch und nicht kritisch verantwortlich ist.

## 4.2 Ausblick

Für weitere Forschungsarbeiten können verschiedene Ansätze weiter verfolgt werden. Es besteht die Möglichkeit, den bestehenden Katalog weiter auszubauen und damit die Absicherung besser und sicherer zu gestalten. Das setzt jedoch voraus, dass es ein virtuelles Funktionsmodell gibt, welches auch für diese Szenarien ausgelegt ist, ansonsten haben die objektiven Zahlen keine Aussagekraft. Ein großer Schritt, der mit großer Genauigkeit behandelt werden muss, ist das Vorhersagen oder Vorausberechnen von kritischen Szenarien. Im Zuge der Arbeit ist das Problem aufgetaucht, dass durch das Verfahren bzw. durch den Wegfall des Menschen ein sehr großer Parameterraum auftritt, der auch getestet werden muss. Für einen Entwicklungszyklus verfügt diese Methode nicht über die nötige Effizienz, um ohne Vorhersage sicher und effizient einen Fahrstreifenwechselfunktion freigegeben zu können. Eventuell bedarf es auch verschiedener LCA Modell um eine generelle Aussage treffen zu können, denn die Methode beruht auf der Überlegung, mit einem fehlerhaften oder nicht vollständigen Modell, Teile innerhalb des Parameterraumes zu rechnen und den Rest des vollfaktoriellen Raumes durch Interpolation vorherzusagen.

Eine große Unterstützung ist dabei die Rechenleistung und der Speicher. Es gibt die Möglichkeit, dass selbst Inhouse zu machen oder dies extern zu vergeben und über sogenannte Cloud Lösungen zu erarbeiten, jedenfalls müssen ausreichend Ressourcen vorhanden sein.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des Lebenszyklus von ISO 26262 [6].....	4
Abbildung 2: ASPICE Prozess [6].....	5
Abbildung 3: V-Modell als Grundlage für die Entwicklung [8] .....	7
Abbildung 4: Zunahme der E/E Funktionen im Fahrzeug über die Jahre [6] .....	7
Abbildung 5: Gesetzliche Pyramide beim autonomen Fahren [11] .....	9
Abbildung 6: Grenzen von Mensch und Maschine in Bezug auf Szenariendefinition [16] .....	11
Abbildung 7: Schweizer Käse Modell [17] .....	11
Abbildung 8: Architektur einer autonomen Fahrfunktion [17].....	12
Abbildung 9: Roadmap für technische Funktionen innerhalb des urbanen Raumes.....	13
Abbildung 10: Kritische Situation: Fahrstreifenwechsel auf Autobahn [18] .....	13
Abbildung 11: Toolchain für die Verifikation und Identifikation von kritischen Szenarien für autonome Fahrzeuge [18].....	14
Abbildung 12: Unterschiedliche Szenarien und ihren Einteilung ob kritisch oder nicht [18] .....	16
Abbildung 13: verschiedenen Dekompositionsschichten [19].....	17
Abbildung 14: Anhand eines exemplarischen Unfalls wird ein Szenario abgeleitet [19].....	17
Abbildung 15: Fehlerbaumanalyse [19] .....	18
Abbildung 16: Datenbank für verschiedene Testwerkzeuge [20] .....	19
Abbildung 17: Übersicht der Längsbeschleunigung abhängig vom Fahrzeugtyp [23] .....	20
Abbildung 18: Übersicht der Querschleunigung abhängig vom Fahrzeugtyp [23] .....	20
Abbildung 19: Übersicht der Gefahrenstufen und TTC Grenzwerte [23].....	20
Abbildung 20: Gesamtabdeckung der möglichen Szenarien [25] .....	21
Abbildung 21: Ziele von ENABLE S3 [26] .....	21
Abbildung 22: Aufbau von Traffic Sequence Charts (TSC), links zu sehen eine Kollision, rechts ein Fahrstreifenwechsel [28].....	22
Abbildung 23: Beschreibung des sicheren Bereiches zwischen den beiden Fahrzeugen [32].....	23
Abbildung 24: Sicherheitsabstand innerhalb eines Fahrstreifenwechsels [32] .....	23
Abbildung 25: V-Modell aus Sicht von Magna .....	24
Abbildung 26: AlpLab Teststrecke auf der Autobahn.....	25
Abbildung 27: Systematisches Vorgehen bei der Entwicklung durch Filterung [9] .....	27
Abbildung 28: ganzheitlicher Denkansatz bei der Freigabe .....	28
Abbildung 29: Bewertung der Szenarien anhand einer Ampeldarstellung .....	29
Abbildung 30: Szenarienkategorisierung .....	30
Abbildung 31: Variation der Rahmenbedingungen.....	31
Abbildung 32: Variationsparameter: Szenario eins - Fahrstreifenwechsel mit einem Fahrzeug in front .....	32
Abbildung 33: Koordinatensystem für die Positionierung des EGO Fahrzeuges .....	34
Abbildung 34: Variationsparameter: Szenario zwei –Fahrstreifenwechsel mit zwei Target Fahrzeuge35	
Abbildung 35: Variationsparameter: Szenario drei - Fahrstreifenwechsel mit Folgefahrzeug und zwei Fahrzeugen in front .....	37
Abbildung 36: Variationsparameter: Szenario drei - Fahrstreifenwechsel mit Folgefahrzeug und zwei Fahrzeugen in front .....	38

Abbildung 37: Variationsparameter: Szenario vier - gleichzeitiger Fahrstreifenwechsel von zwei Fahrzeugen .....	40
Abbildung 38: Variationsparameter: Szenario vier - gleichzeitiger Fahrstreifenwechsel von zwei Fahrzeugen .....	41
Abbildung 39: Dreispurige Fahrbahn mit gleichzeitigem Fahrstreifenwechsel von EGO Fahrzeug und Target Fahrzeug vier auf mittlere Spur .....	43
Abbildung 40: Dreispurige Fahrbahn mit gleichzeitigem Fahrstreifenwechsel von EGO Fahrzeug und Target Fahrzeug vier auf mittlere Spur .....	44
Abbildung 41: Gekrümmt Fahrbahn mit zwei Fahrspuren und mehreren Target Fahrzeuge.....	46
Abbildung 42: Gekrümmt Fahrbahn mit zwei Fahrspuren und mehreren Target Fahrzeuge.....	47
Abbildung 43: Szenario sieben: Autobahnauffahrt .....	48
Abbildung 44: Szenario sieben: Autobahnauffahrt .....	49
Abbildung 45: Szenario acht: Autobahnabfahrt.....	51
Abbildung 46: Szenario acht: Autobahnabfahrt.....	52
Abbildung 47: Grafisches Interface bei einer Carmaker gesteuerten Variation .....	55
Abbildung 48: Ablauf der Variation.....	57
Abbildung 49: Gliederung der Gefahrenstufen laut [23] .....	64
Abbildung 50: TTC Zeit bzw. Zeitlücke für die kritische Beurteilung einer Situation laut [23] .....	64
Abbildung 51: Spurtreue [45].....	65
Abbildung 52: Zweistufiger Simulationsansatz für die Freigabe .....	66
Abbildung 53: Simulationsmethode und ihre Vor- und Nachteile .....	67
Abbildung 54: Methode grob/fein im Parameterraum.....	69
Abbildung 55: grob/fein Methode: (Crashverhalten) .....	70
Abbildung 56: grob/fein Methode: kritischer Abstand .....	70
Abbildung 57: DOE Würfel für Szenario 1 (Geschwindigkeitsvariation) .....	73
Abbildung 58: DOE Ansatz.....	74
Abbildung 59: Interpolationsmethode über Matlab.....	77
Abbildung 60: Ergebnisse <i>Funktionstest 1</i> : ohne Verkehrssteuerung .....	81
Abbildung 61: Ergebnisse <i>Funktionstest 1</i> : mit optimierter Verkehrssteuerung.....	82
Abbildung 62: ACC Funktion Target Fahrzeug.....	83
Abbildung 63: Gesamtergebnis Funktionstest 2 mit optimiertem Verkehr .....	84
Abbildung 64: Corner Case 1: Später Fahrstreifenwechsel des Target Fahrzeuges (T) infolge eines Staus .....	86
Abbildung 65: Standard Ordner Struktur von IPG mit manuell erstelltem Matlab Ordner .....	IX
Abbildung 66: IPG Testfälle .....	IX
Abbildung 67: Ergebnisdaten .....	X

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Level der Automatisierung laut SAE J3016 [5] .....	2
Tabelle 2: Beispielhaftes logisches Szenario mit den dazu passenden Parameterraum [18] .....	14
Tabelle 3: Unterschiedliche Quelle der Datenbank [20] .....	19
Tabelle 4: Parameter EGO Fahrzeug .....	31
Tabelle 5: Durchschnittliche Geschwindigkeit laut KfV in Österreich [41] .....	33
Tabelle 6: Parameterbereich für Szenario Eins (Geschwindigkeit) .....	34
Tabelle 7: Parameterbereich für Szenario Eins (Beschleunigung) .....	34
Tabelle 8: Parameterbereich Szenario zwei (Geschwindigkeit) .....	36
Tabelle 9: Parameterbereich Szenario zwei (Beschleunigung Teil 1).....	36
Tabelle 10: Parameterbereich Szenario zwei (Beschleunigung Teil 2).....	36
Tabelle 11: Parametereinschränkung Szenario drei (Geschwindigkeit).....	39
Tabelle 12: Parametereinschränkung Szenario drei (Beschleunigung Teil 1) .....	39
Tabelle 13: Parametereinschränkung Szenario drei (Beschleunigung Teil 2) .....	39
Tabelle 14: Parametereinschränkung Szenario vier (Geschwindigkeit).....	42
Tabelle 15: Parametereinschränkung Szenario vier (Beschleunigung Teil 1) .....	42
Tabelle 16: Parametereinschränkung Szenario vier (Beschleunigung Teil 2) .....	42
Tabelle 17: Parametereinschränkung Szenario fünf (Geschwindigkeit) .....	45
Tabelle 18: Parametereinschränkung Szenario fünf (Beschleunigung Teil 1).....	45
Tabelle 19: Parametereinschränkung Szenario fünf (Beschleunigung Teil 2).....	45
Tabelle 20: Parametereinschränkung Szenario sieben (Geschwindigkeit) für Bild 1.....	50
Tabelle 21: Parametereinschränkung Szenario sieben (Geschwindigkeit) für Bild 2.....	50
Tabelle 22: Parametereinschränkung Szenario sieben (Beschleunigung) für Bild 3 .....	50
Tabelle 23: Parametereinschränkung Szenario sieben (Beschleunigung Teil 2) für Bild 5 .....	50
Tabelle 24: Parametereinschränkung Szenario sieben (Geschwindigkeit) für Bild 7.....	51
Tabelle 25: Parametereinschränkung Szenario sieben (Beschleunigung) für Bild 10.....	51
Tabelle 26: Parametereinschränkung Szenario acht (Geschwindigkeit) für Bild 1 .....	53
Tabelle 27: Parametereinschränkung Szenario acht (Geschwindigkeit) für Bild 4 .....	53
Tabelle 28: Parametereinschränkung Szenario acht (Beschleunigung) für Bild 7.....	53
Tabelle 29: Parametereinschränkung Szenario acht (Geschwindigkeit) für Bild 9 .....	54
Tabelle 30: Parametereinschränkung Szenario acht (Beschleunigung) für Bild 11.....	54
Tabelle 31: Zusammenfassung der Speicher- und Auswertedaten.....	62
Tabelle 32: Daten/Zeitvergleich bei feiner Methode <i>Funktionstest 1</i> .....	68
Tabelle 33: Daten/Zeitvergleich bei grober Methode <i>Funktionstest 1</i> .....	68
Tabelle 34: Unterschied zwischen feiner und grob/feiner Methode.....	71
Tabelle 35: Zeit und Variationsunterschied innerhalb Szenario 1 .....	71
Tabelle 36: Schrittweitereinstellung bei Szenario 1 .....	71
Tabelle 37: Zeit und Variationsunterschied innerhalb Szenario 2v.....	72
Tabelle 38: Schrittweitereinstellung bei Szenario 2 .....	72
Tabelle 39: DOE Versuchsplan für Szenario 1 (Geschwindigkeitsvariation).....	74
Tabelle 40: Auszug aus Interpolation mit DOE Software Hyperworks.....	76
Tabelle 41: Übersehende kritische Szenarien mit Grenzwert 15m bei Szenario 1v .....	79

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 42: Übersehende kritische Szenarien mit Grenzwert 15m bei Szenario 2v .....	79
Tabelle 43: Kombinationsmöglichkeiten der Szenarien durch äußere Einflussgrößen.....	85

# Literaturverzeichnis

- [1] Dornier Consulting International, "Autonomes Fahren; Erwartungen an die Mobilität der Zukunft;" [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=2ahUKEwj7moKSoPHcAhXIKewKHZd2Dd0QFjAHegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.dornier-consulting.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F11%2FAutonomes-Fahren\\_Report\\_ger\\_final\\_web\\_112017.pdf&usg=AOvVaw0Bq\\_KH7ZgZ0IrA8j5M0GYW](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=2ahUKEwj7moKSoPHcAhXIKewKHZd2Dd0QFjAHegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.dornier-consulting.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F11%2FAutonomes-Fahren_Report_ger_final_web_112017.pdf&usg=AOvVaw0Bq_KH7ZgZ0IrA8j5M0GYW), 08 2018.
- [2] Bosch Mobility Solutions, "Mit innovativer Technik und umfassendem Know-how: Bosch ebnet den Weg zum automatisierten Fahren;" <https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/highlights/automatisierte-mobilit%C3%A4t/automatisiertes-fahren/>, 08 2018.
- [3] Continental, "Automatisiertes Fahren;" <https://www.continental-corporation.com/de/produkte-und-innovationen/innovationen/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren-11958>, 08 2018.
- [4] Daimler AG, "Autonom unterwegs; Ein Mehr an Komfort, Sicherheit und Effizienz;" <https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/special/veraenderungen.html>, 08 2018.
- [5] SAE International J3016, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, Society of Automotive Engineers (SAE)", Juni 2018.
- [6] Mario Hirz, "An approach supporting integrated modeling and design of complex mechatronics products by the example of automotive applications,"(22nd Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics - WMSCI 2018), Juli 2018.
- [7] Ulf Wilhelm, Susanne Ebel, Alexander Weitzel, "Funktionale Sicherheit und ISO 26262;" In: Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz, Christina Singer, editor. Handbuch Fahrerassistenzsysteme, - Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, 85-103.
- [8] Wachenfeld Walther and Winner Hermann, "Die Freigabe des autonomen Fahrens," In: Maurer Markus, Gerdes J.Christian, Lenz Barbara, Winner Hermann, editor. Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015, 439-464.
- [9] SafeTRANS e.V, "Hochautomatisierte Systeme: Testen, Safety und Entwicklungsprozesse Roadmap Forschungsfelder und Handlungsempfehlungen," [http://www.safetrans.de/de/Uploads/Aktuelle\\_Meldungen/SafeTRANS\\_AK\\_HS\\_Roadmap\\_v0.6.pdf?m=1520507227](http://www.safetrans.de/de/Uploads/Aktuelle_Meldungen/SafeTRANS_AK_HS_Roadmap_v0.6.pdf?m=1520507227), 08 2018.
- [10] Verein deutscher Ingenieure (VDI), "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme," VDI 2206, Juni 2004.
- [11] Christiane Brünglinghaus, "Wie das Recht automatisiertes Fahren hemmt," ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift(Ausgabe 4):10-11, 2015.
- [12] Verordnung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie, "Verordnung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie über Rahmenbedingungen für automatisiertes Fahren (Automatisiertes Fahren Verordnung – AutomatFahrV)," StF: BGBl. II Nr. 402/2016, 2016.

[13] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, "Code of Practice Automatisiert – Vernetzt – Mobil, November 2018 (Version 3)", Juni 2016.

[14] Maracke Catharina, "Autonomes Fahren-ein Einblick in die rechtlichen Rahmenbedingungen," *Wirtschaftsinformatik & Management* 9(3):62-68, 2017.

[15] PEGASUS, "Forschungsprojekt PEGASUS AUTOMATISIERTES FAHREN EFFEKTIV ABSICHERN," <https://www.pegasusprojekt.de/de/about-PEGASUS>, 08 2018.

[16] Dipl.-Ing. Jens Mazzega, Dr.-Ing. Hans-Peter Schöner, "Wie PEGASUS die Lücke im Bereich Testen und Freigabe von automatisierten Fahrzeugen schließt," [https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/pdf/PEGASUS\\_Tagung\\_Methodenentwicklung%20Abstract.pdf](https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/pdf/PEGASUS_Tagung_Methodenentwicklung%20Abstract.pdf), 08 2018.

[17] Matthias Stiller, "Absicherung von Systemen für das (hoch)automatisierte Fahren," 6. AutoTest Fachkonferenz (26.-27.10.2016), Stuttgart.

[18] Sven Hallerbach, Yiqun Xia, Ulrich Eberle, and Frank Koester, "Simulation-based Identification of Critical Scenarios for Cooperative and Automated Vehicles," WCX World Congress Experience, April 3, 2018 in United States.

[19] Amersbach Christian H.W., "Functional Decomposition: An Approach to Reduce the Approval Effort for Highly Automated Driving," 8. Tagung Fahrerassistenz, München Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik mit TÜV SÜD Akademie, 2017.

[20] Andreas Pütz, Adrian Zlocki, Julian Bock, Lutz Eckstein, "System validation of highly automated vehicles with a database of relevant traffic scenarios," 12th ITS European Congress, 19-22 June 2017.

[21] Philipp Junietz, Jan Schneider und Hermann Winner, "Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien," 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren (29.-31.03.2017), 31.03.2017.

[22] Ulbrich,S, Menzel T, Reschka A et al, "Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving," 982-988, 2015.

[23] Benmimoun M., Fahrenkrog F., Zlocki A., and Eckstein L., "Erkennung und Klassifizierung Kritischer Fahrsituationen Mittels Fahrzeugdaten," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 114(10):820-826, 2012.

[24] Norbert Fecher, Jens Hoffmann, Hermann Winner, Klaus Fuchs Bettina Abendroth, Ralph Bruder, "Aktive Gefahrenbremsungen: Wie reagiert das Fahrer-Fahrzeug-System?" *ATZ*:140-146, 02/2009.

[25] Hallerbach Sven, Eberle Ulrich, Köster Frank, "Absicherungs- und Bewertungsmethoden für kooperative hochautomatisierte Fahrzeuge," *AAET* 2017, 08.-09.02.2017, Braunschweig, 09.02.2017.

[26] ENABLE S3, "About the project," <https://www.enable-s3.eu/about-project/>, 08 2018.

[27] W. Damm, S. Kemper, E. Möhlmann, T. Peikenkamp, A. Rakow, "Using Traffic Sequence Charts at the Development of HAVs," *Embedded Real Time Software and Systems - ERTS2018*, 2018.

[28] Werner Damm, Eike Möhlmann, Thomas Peikenkamp, Astrid Rakow, "A Formal Semantics for Traffic Sequence Charts," In: Lohstroh Marten, Derler Patricia, Sirjani Marjan, editor. *Principles of*

Modeling: Essays Dedicated to Edward A. Lee on the Occasion of His 60th Birthday, Springer International Publishing, Cham, 2018, 182-205.

[29] Andreas Eggers, Matthias Stasch, Tino Teige, Tom Bienmüller, et al., "Constraint Systems from Traffic Scenarios for the Validation of Autonomous Driving (Extended Abstract)," EasyChair Preprint no. 162, May 24, 2018.

[30] Halil Beglerovic, Steffen Metzner, Martin Horn, "Challenges for the Validation and Testing of Automated Driving Functions," In: Carolin Zachäus, Beate Müller, Gereon Meyer, editor. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2017, September 2017, 179-187.

[31] DING ZHAO H.P., "From the Lab to the Street: Solving the Challenge of Accelerating Automated Vehicle Testing," [https://mcity.umich.edu/wp-content/uploads/2017/05/Mcity-White-Paper\\_Accelerated-AV-Testing.pdf](https://mcity.umich.edu/wp-content/uploads/2017/05/Mcity-White-Paper_Accelerated-AV-Testing.pdf), 08 2018.

[32] Christian Pek, Peter Zahn, Matthias Althoff, "Verifying the safety of lane change maneuvers of self-driving vehicles based on formalized traffic rules," IEEE Los Angeles, CA, USA, Intelligent Vehicles Symposium (IV), 1477-1483, 2017.

[33] International Standard ISO 15622, "Intelligent transport systems — Adaptive Cruise Control systems — Performance requirements and test procedures," 2010-04-15.

[34] Aled Williams, "Euro NCAP 2018 5-Star Requirements," [https://www.testsitesweden.com/sites/default/files/content/euro\\_ncap\\_asta\\_zerotesters\\_day\\_2017-04-25.pdf](https://www.testsitesweden.com/sites/default/files/content/euro_ncap_asta_zerotesters_day_2017-04-25.pdf), 14.11.2018.

[35] Zhou J. and del Re L., "Identification of critical cases of ADAS safety by FOT based parameterization of a catalogue," 2017 11th Asian Control Conference (ASCC): 453-458, 17-20 Dec. 2017.

[36] Zhou J. and Re L.d., "Reduced Complexity Safety Testing for ADAS & ADF," IFAC-PapersOnLine 50(1):5985-5990, 2017, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1261>.

[37] Waymo, "Waymo Safety Report: On the Road to Fully Self-Driving," <https://waymo.com/safety/>, 2018 11.

[38] SAE International J2802, "Blind Spot Monitoring System (BSMS): Operating Characteristics and User Interface, Society of Automotive Engineers (SAE)," SAE J2802, Juni 2015.

[39] International Standard ISO 22178, "Intelligent transport systems — Low speed following (LSF) systems — Performance requirements and test procedures," 2009-04-01.

[40] SAE International J2399, "Adaptive Cruise Control (ACC) Operating Characteristics and User Interface, Society of Automotive Engineers (SAE)," September 2014.

[41] Dipl.-Ing. Alexander Pommer, Dipl.-Ing. Martin Donabauer, Dipl.-Ing. Martin Winkelbauer, Dipl.-Ing. Florian Schneider, Dipl.-Ing. Klaus Robatsch, "KFV - Sicher Leben. Band #1. 100-Car Study Österreich. Wien, 2016," 2016.

[42] Der Standard, "Oft zu wenig Abstand auf Österreichs Autobahnen," <https://derstandard.at/2618207/Oft-zu-wenig-Abstand-auf-Oesterreichs-Autobahnen>, 10.10.2018.

- [43] Werner Brilon R.K., "Die neuen Entwurfsstandards für Außerortsstraßen im internationalen Vergleich," [https://www.ruhr-uni-bochum.de/verkehrswesen/download/literatur/Bri\\_KRAM97\\_\\_cit.pdf](https://www.ruhr-uni-bochum.de/verkehrswesen/download/literatur/Bri_KRAM97__cit.pdf), 01 2019.
- [44] Samiee Sajjad, Azadi Shahram, Kazemi Reza, Eichberger Arno, "Towards a Decision-Making Algorithm for Automatic Lane Change Manoeuvre Considering Traffic Dynamics," *Promet – Traffic&Transportation* Vol. 28(2):91-103, 2016.
- [45] EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, "Spurtreue," <https://www.euroncap.com/de,12/2018>.
- [46] "Minitab," <http://www.minitab.com/de-de/>, 01 2019.
- [47] "Altair Hyperstudy," <https://altairhyperworks.com/product/HyperStudy>, 01 2019.
- [48] "Matlab Scattered Data," <https://de.mathworks.com/help/matlab/math/interpolating-scattered-data.html>, 01 2019.
- [49] "Matlab Gridded Data," [https://de.mathworks.com/help/matlab/math/interpolating-gridded-data.html?searchHighlight=gridded%20data&s\\_tid=doc\\_srchttitle#bs5vmq1,](https://de.mathworks.com/help/matlab/math/interpolating-gridded-data.html?searchHighlight=gridded%20data&s_tid=doc_srchttitle#bs5vmq1,)
- [50] "Matlab griddatan," [https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/griddatan.html?searchHighlight=griddatan&s\\_tid=doc\\_srchttitle](https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/griddatan.html?searchHighlight=griddatan&s_tid=doc_srchttitle), 01 2019.
- [51] "Matlab interpn," [https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/interpn.html?searchHighlight=interpn&s\\_tid=doc\\_srchttitle](https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/interpn.html?searchHighlight=interpn&s_tid=doc_srchttitle), 01 2019.
- [52] Gabriel Herz, Prof. Bernhard Schick, Rolf Hettel, Holger Meinel, "Sophisticated Sensor Model Framework Providing Realistic Radar Sensor Behavior in Virtual Environments," 8. Tagung Fahrerassistenz, München:01.2019, 2017.
- [53] Volker Sandner, "Development of a test target for AEB systems," <file:///C:/Users/Andi/Downloads/development-of-a-test-target-for-aeb-systems-esv-2013-0-4e8e68e0-7487-4b23-a3d6-aac700080661.pdf>, 01 2019.
- [54] "SceneGen - Intelligente Scenariogenerierung für Tests und Validierung von hochautomatisierten Fahrfunktionen," <https://www.tugraz.at/institute/isv/forschung/laufende-projekte/scenegen/>, 01 2019.
- [55] "PTV Vissim," <https://www.ptvgroup.com/de/loesungen/produkte/ptv-vissim/>, 01 2019.
- [56] Christopher Kober, "Stochastische Verkehrsflusssimulation auf Basis von Fahrerhaltensmodellen zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen," *Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, Springer Fachmedien Wiesbaden*, 2019, 162.

## A. Anhang

Um die Methode anwenden zu können, muss eine passende Ordnerstruktur aufgebaut werden. Zuerst wird über IPG Carmaker ein Projektlaufwerk definiert, das standardmäßig die vordefinierten Ordner anlegt. Zusätzlich zu diesem Standardordner muss ein Matlab Ordner manuell erstellt werden, in dem sich die gesamte Methode befindet. Darin ist ein main-File, das für den zentralen Ablauf verantwortlich ist.

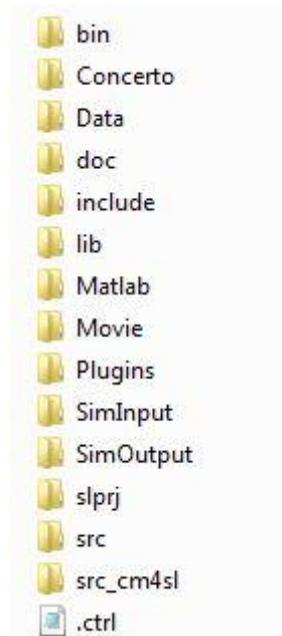


Abbildung 65: Standard Ordner Struktur von IPG mit manuell erstelltem Matlab Ordner

Für die Variation müssen definierte Szenarien erstellt werden, die mit einem vorgegebenen Namen versehen werden. In der Arbeit hat sich folgende Benennung etabliert (siehe Abbildung 66). Diese befinden sich in: Ordnerstruktur\Data\TestRun. Entscheidend ist, dass Platzhalterwerte definiert werden bevor die automatische Variation beginnt, da ansonsten diese Zeile nicht im File angelegt werden.

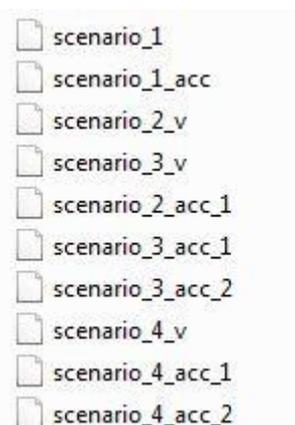
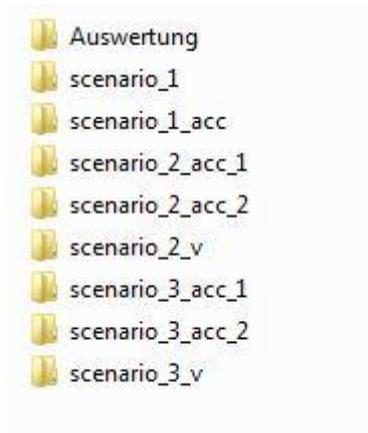


Abbildung 66: IPG Testfälle

Die Ergebnisdaten werden dann in einem separaten Ordner ausgegeben. Die IPG Carmaker Daten befinden sich z.B.: für das Szenario 1\_v in scenario\_1. Für einen Gesamtüberblick gibt es den Ordner Auswertung, mit den Zusammenfassungen aller durchgeführten Simulationen. Die gesamte Ordnerstruktur wird automatisch erstellt, sobald die Simulation beendet ist und über das main File gesteuert. Gefunden werden kann das Verzeichnis über:  
Verzeichnis\SimOutput\scenario\_1\_v\Demo\_BMW\_5



**Abbildung 67: Ergebnisdaten**