

---

**Technische Hochschule Ingolstadt**

**Fakultät: IAW**

**Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen-Management**

**Bachelorarbeit**

---

**Thema:**

**Entwicklung und Vergleich von Metriken zur Performancebewertung von Verkehrszeichenerkennungssystemen in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage**

von **Thomas Fehringer**

Matrikelnummer: 00113551

In Zusammenarbeit mit:

**CARISSMA Institute of Electric, Connected and Secure Mobility (C-ECOS)**

Erstprüfer: Prof. Dr. Hans-Georg Schweiger

Zweitprüfer: Prof. Dr. Werner Huber



# Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ingolstadt, 15.03.2024

---

Thomas Fehringer

## Danksagung

Die Fertigstellung dieser Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung und den Rückhalt vieler Menschen in meinem Leben. Diesen Menschen möchte ich hiermit Danke sagen.

Zunächst möchte ich mich bei meinem Erstprüfer Herrn „Prof. Dr. Hans-Georg Schweiger“ bedanken. Durch Ihre wöchentlichen Seminare zum Thema Bachelorarbeit sowie Ihrer fachlichen Expertise konnte ich viele hilfreiche Anregungen sammeln und in meiner Bachelorarbeit verwirklichen. Ich wusste Ihr offenes Ohr, Ihr Feedback sowie Ihre Motivation zu schätzen und bedanke mich für Ihre Betreuung.

Des Weiteren möchte ich meinem Betreuer Maximilian Bauder meinen Dank aussprechen. Unsere langen und lebhaften Diskussionen haben mich letztendlich davon überzeugt, mich diesem Thema zu widmen.

Danke Dir, für dein stets offenes Ohr, den regen Austausch bei Problemen und Anliegen sowie deiner tatkräftigen Unterstützung bei meiner Arbeit.

Hierbei geht mein Dank auch an Daniel Paula und Maximilian Bauder für ihre Teilnahme an den Versuchsfahrten der drei Testfahrzeuge, welche den Grundstein meiner Arbeit legten. Euer Engagement hat maßgeblich dazu beigetragen, dass meine Arbeit in dieser Form vorliegt.

Ein weiterer großer Dank gilt meiner Tante Margot Mittermeier für das ausführliche Korrekturlesen und Kommentieren. Danke Dir, für deine große und wertvolle Unterstützung sowie deinen motivierenden Beistand während der gesamten Zeit.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Jessica Andris, die mich zu jeder Zeit unterstützt und bestärkt hat. Danke, dass du unerträgliche Momente und anstrengende Phasen wieder erträglich und überwindbar gemacht hast.

Mein größter Dank gilt jedoch meinen Eltern, welche es mir durch ihren stetigen Rückhalt und ihr Vertrauen ermöglichten, diese Arbeit schreiben zu dürfen und in allen Phasen meiner Bachelorarbeit stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Vielen herzlichen Dank!

## Abstract

Am 6. Juli 2022 trat die EU-Verordnung in Kraft, welche besagt, dass ab dem Jahr 2024 alle neu zugelassenen Fahrzeuge mit bestimmten Fahrerassistenzsystemen verpflichtend ausgestattet sein müssen. Hierzu zählt unter anderem die Verkehrszeichenerkennung, die zuverlässig agieren sollte, um die Sicherheit des Fahrers zu gewährleisten und den Fahrkomfort zu erhöhen. Da jedoch die Zuverlässigkeit dieser Systeme schwer messbar ist, ist das Ziel in der vorliegenden Arbeit, geeignete Metriken zu entwickeln und miteinander zu vergleichen, die die Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage berücksichtigen und die Performance dieser Systeme bewerten. Am Ende dieser Arbeit wird die geeignetste Metrik ausgewählt, die diese Systeme am besten bewertet. Um das Thema zielgerichtet beantworten zu können, wurden drei Versuchsfahrzeuge von verschiedenen Automobilherstellern ausgewählt und jeweils drei Tag- und Nachtfahrten durchgeführt, die mittels einer mobilen Kamera (GoPro) aufgezeichnet worden sind. Da die Performance aus einem zeitlich und örtlich beobachteten Systemverhalten resultiert, wurden anschließend drei Metriken entwickelt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Die erste Metrik ist eine qualitative Metrik, welche eine Kategorisierung von 0 bis 7 beinhaltet. Die zweite Metrik ist quantitativ, bei der die beiden Systeme zuerst einzeln bewertet und anschließend zusammengeführt werden. Die dritte Metrik ist eine True-False-Formel, bei der das Ergebnis durch einen KPI dargestellt wird. Diese Metriken sind im nächsten Schritt auf das Videomaterial angewendet worden, um anschließend einen Vergleich zu schaffen. Nachdem die Metriken hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Kriterien bewertet wurden, wurde die geeignetste Metrik ausgewählt. Der Vergleich und die anschließende Bewertung der verschiedenen Metriken zeigen, dass die Metrik 1, welche eine Kategorisierung ist, die Performance hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage am besten bewerten lässt. Mit Hilfe der zum Schluss ausgewählten Metrik können weitere Untersuchungen für Forschungszwecke durchgeführt werden, um in Zukunft das automatisierte Fahren sicherer zu gestalten und die Anzahl der bisher stetig steigenden Verkehrsunfälle auf ein Minimum zu reduzieren.

# Inhaltsverzeichnis

<i>Danksagung</i> .....	<i>II</i>
<i>Inhaltsverzeichnis</i> .....	<i>IV</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	<i>V</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i> .....	<i>VI</i>
<i>Abkürzungsverzeichnis</i> .....	<i>VII</i>
<i>1 Einleitung</i> .....	<i>1</i>
<i>2 Problemstellung und Zielsetzung</i> .....	<i>3</i>
<i>3 Theoretische Grundlagen</i> .....	<i>5</i>
<i>3.1 Funktionsweise Verkehrszeichenerkennung</i> .....	<i>5</i>
<i>3.2 Funktionsweise Intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelung</i> .....	<i>15</i>
<i>3.3 Metrik – Definition und Metriken in der Literatur</i> .....	<i>16</i>
<i>3.4 Methodische Vorgehensweise</i> .....	<i>22</i>
<i>4 Versuchsbeschreibung und -durchführung</i> .....	<i>23</i>
<i>5 Ergebnisse</i> .....	<i>27</i>
<i>5.1 Ergebnis Metrik 1</i> .....	<i>27</i>
<i>5.2 Ergebnis Metrik 2</i> .....	<i>31</i>
<i>5.3 Ergebnis Metrik 3</i> .....	<i>34</i>
<i>6 Diskussion der Ergebnisse</i> .....	<i>37</i>
<i>7 Zusammenfassung</i> .....	<i>43</i>
<i>8 Ausblick</i> .....	<i>45</i>
<i>9 Literatur</i> .....	<i>46</i>

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Darstellung der Straßenverkehrsunfälle in Deutschland von 1950 bis 2022</i> .....	2
<i>Abbildung 2: Übersicht der Klassifizierungsstufen des autonomen Fahrens [7]</i> .....	6
<i>Abbildung 3: Unterschiede der erlaubten Tätigkeiten des Fahrers je nach Automatisierungsstufe nach [8]</i> .....	8
<i>Abbildung 4: Die Bestandteile einer Künstlichen Intelligenz (KI) [11]</i> .....	9
<i>Abbildung 5: Künstliches Neuronales Netzwerk mit einzelnen Schichten [11]</i> .....	9
<i>Abbildung 6: Vorgehensweise farbbasierte Verkehrszeichenerkennung (VZE) [16]</i> .....	10
<i>Abbildung 7: Verschiedene Formen von Verkehrszeichen der Straßenverkehrsordnung (StVO) [16]</i> .....	11
<i>Abbildung 8: Darstellung der Vorgehensweise einer genauen Positionsbestimmung mittels GPS nach [21]</i> .....	14
<i>Abbildung 9: Darstellung von Methoden der Verkehrszeichenerkennung mittels Kamerabildern, Navigationsdaten und Fahrzeugdaten [21]</i> .....	14
<i>Abbildung 10: Funktionsweise einer adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage (ACC) nach [23]</i> .....	15
<i>Abbildung 11: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise der Arbeit</i> .....	22
<i>Abbildung 12: Definierte Teststrecke zwischen Ingolstadt und Neuburg für die Untersuchung der Fahrzeugperformance</i> .....	24
<i>Abbildung 13: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum des Mercedes E 300 de</i> .....	25
<i>Abbildung 14: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum in der Vorderansicht des Tesla Model 3</i> .....	25
<i>Abbildung 15: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum des Volkswagen ID.4</i> .....	26
<i>Abbildung 16: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum in der Seitenansicht des Tesla Model 3</i> .....	26
<i>Abbildung 17: VZE-Performance und iACC-Performance der Testfahrzeuge gesamt und individuell über alle Testfahrten (Tag und Nacht) nach [5]</i> .....	28
<i>Abbildung 18: VZE-Performance und iACC-Performance der Testfahrzeuge gesamt und individuell am Tag nach [5]</i> .....	29
<i>Abbildung 19: VZE-Performance und iACC-Performance der Testfahrzeuge gesamt und individuell bei Nacht nach [5]</i> .....	30
<i>Abbildung 20: Darstellung der Leistung aller Testfahrzeuge gesamt und individuell über alle Testfahrten (Tag und Nacht) unter Anwendung der Metrik 2</i> .....	31
<i>Abbildung 21: VZE-Performance, iACC-Performance und Gesamtperformance der Testfahrzeuge gesamt und individuell am Tag unter Anwendung der Metrik 2</i> .....	32
<i>Abbildung 22: VZE-Performance, iACC-Performance und Gesamtperformance der Testfahrzeuge gesamt und individuell bei Nacht unter Anwendung der Metrik 2</i> .....	33
<i>Abbildung 23: Darstellung der Gesamtperformance aller Testfahrzeuge gesamt und individuell über alle Testfahrten (Tag und Nacht) mit der Metrik 3</i> .....	34
<i>Abbildung 24: Darstellung der Gesamtperformance aller Testfahrzeuge gesamt und individuell am Tag unter Anwendung der Metrik 3</i> .....	35
<i>Abbildung 25: Darstellung der Gesamtperformance aller Testfahrzeuge gesamt und individuell bei Nacht unter Anwendung der Metrik 3</i> .....	36
<i>Abbildung 26: Darstellung der VZE-Performance und der iACC-Performance aller Fahrzeuge gesamt in drei verschiedenen Diagrammen unter Anwendung der Metrik 1</i> .....	39
<i>Abbildung 27: Darstellung der VZE-Performance und der iACC-Performance aller Fahrzeuge gesamt in drei verschiedenen Diagrammen unter Anwendung der Metrik 2</i> .....	40
<i>Abbildung 28: Darstellung der VZE-Performance und der iACC-Performance aller Fahrzeuge gesamt in drei verschiedenen Diagrammen unter Anwendung der Metrik 3</i> .....	41

# Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Die Erkennungsmethoden des maschinellen Lernens [14].....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 2: Kriterien und Bedeutung für Metriken nach [26] .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabelle 3: Metrik 1 zur Bewertung der Fahrzeugperformance hinsichtlich Verkehrszeichenerkennung und des iACC nach den Tests [5] .....</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 4: Beschreibung einer Metrik bezüglich VZE-Eigenschaften zur Bewertung der VZE-Performance .....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 5: Metrik 3 zur Bewertung der Fahrzeugperformance hinsichtlich Verkehrszeichenerkennung und des iACC nach den Tests .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 6: Technische Daten und Informationen der untersuchten Testfahrzeuge nach [5].....</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 7: Bewertungstabelle der drei Metriken hinsichtlich ihrer Kriterien .....</i>	<i>42</i>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ABS</b>	Antiblockiersystem
<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control
<b>CNN</b>	Convolutional Neural Network
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>FAS</b>	Fahrerassistenzsystem
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HD</b>	High Definition
<b>iACC</b>	intelligent Adaptive Cruise Control
<b>KPI</b>	Key Performance Indicator (Leistungsindikator, Leistungskennzahl)
<b>LKAS</b>	Lane Keeping Assistent System
<b>P<sub>G</sub></b>	Gesamtperformance
<b>P<sub>iACC</sub></b>	Performance des iACC
<b>PKW</b>	Personen-Kraft-Wagen
<b>P<sub>VZE</sub></b>	Performance der Verkehrszeichenerkennung
<b>ROI</b>	Region of Interest
<b>StVO</b>	Straßenverkehrsordnung
<b>V<sub>akt</sub></b>	aktuelle Geschwindigkeit bei dem Verkehrszeichen
<b>VZ</b>	Verkehrszeichen
<b>V<sub>Z</sub></b>	Zielgeschwindigkeit beide Zonen
<b>VZE</b>	Verkehrszeichenerkennung
<b>V<sub>Za</sub></b>	Geschwindigkeit der vorherigen Zone, aus der herausgefahren wird
<b>V<sub>Zk</sub></b>	Geschwindigkeit der kommenden Zone



# 1 Einleitung

Seit den Anfängen des Autofahrens träumen die Menschen von selbständig fahrenden Automobilen. Bereits in den 1960er Jahren begann der Wettbewerb mit dem Stanford Cart – ein fahrerloses, kamerabasiertes Fahrzeug, welches aus der Ferne gesteuert wurde und bereits in der Lage war, an weißen Linien entlangzufahren. In den späten 70er Jahren entwickelten bereits Forscher aus Japan ein Auto, welches mit Hilfe zweier Kameras die Bilder der Fahrbahn in Echtzeit auswerten konnte und bereits eine Geschwindigkeit von bis zu 30 km/h erreichte. In Deutschland trat als erstes in den 1980er Jahren Mercedes-Benz mit Prof. Dickmann in den Wettbewerb des autonomen Fahrens ein. Bereits Mitte der 90er Jahre war der Stand des autonomen Fahrens so weit, dass ein Fahrzeug, ausgestattet mit Sensoren und Kameras bereits eine Strecke von 1760 km mit einer Maximalgeschwindigkeit von 175 km/h selbständig fahren konnte. Seither schreiten Forschung und Entwicklung autonom fahrender Fahrzeuge sehr schnell voran. [1]

Das autonome Fahren wird inzwischen in fünf Ausbaustufen eingeteilt. Im Moment ist auf allen deutschen Straßen das teilautomatisierte Fahren Level 2 und das hochautomatisierte Fahren Level 3 nur auf deutschen Autobahnen erlaubt. Im Laufe der Zeit wird sicherlich Level 5 erreicht werden können, sodass ein Auto in absehbarer Zukunft komplett autonom, nur noch mit Passagieren, fahren kann. Dies ist jedoch noch eine rechtlich ungeklärte Angelegenheit. Bereits im teilautomatisierten Fahren, Level 2, ist die Verkehrszeichenerkennung Standard. Hierzu ist es jedoch erforderlich, viele Bereiche der künstlichen Intelligenz anzupassen und zu perfektionieren. Ein Teil hiervon ist das Erkennen von Verkehrsschildern mittels Kameras und digitalen Karten sowie die adaptive Regelung der Geschwindigkeit, welche immer mehr an Bedeutung gewinnt. [2]

Die Hoffnung und das Ziel vieler Forscher ist es, dass die Verkehrssicherheit und der Fahrkomfort durch eine höhere Zuverlässigkeit von Fahrerassistenzsystemen, wie z.B. der adaptiven Geschwindigkeitsregelung oder des Spurhalteassistenten erhöht und zugleich die Unfallrate gesenkt wird.

Die nachfolgende Statistik zeigt die Straßenverkehrsunfälle in Deutschland von 1950 bis 2022. [3]

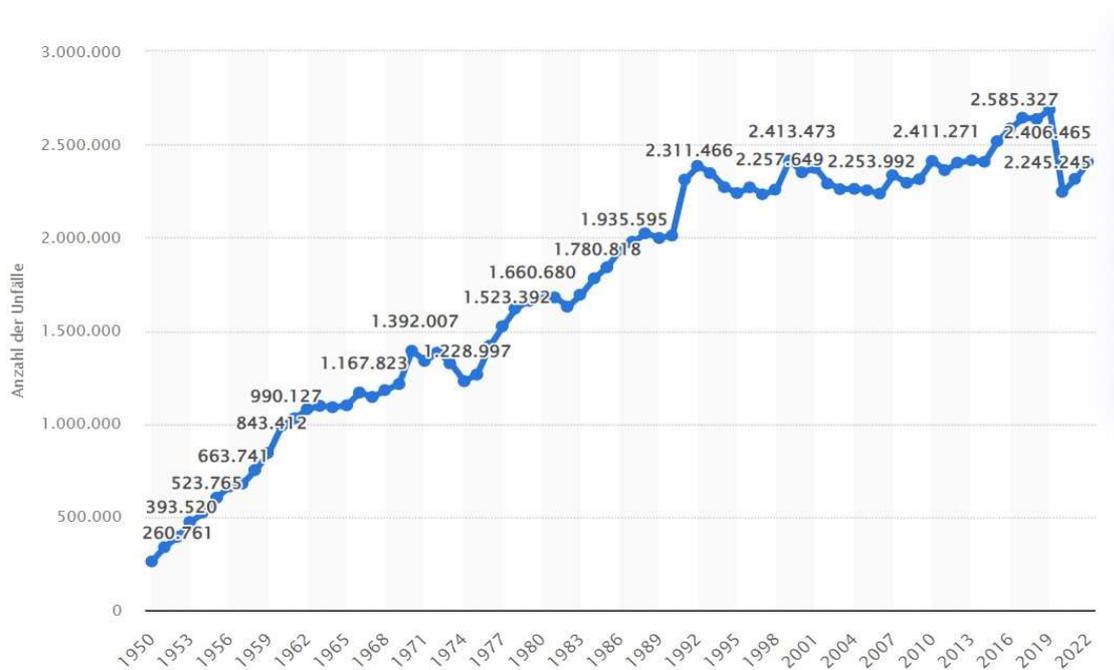


Abbildung 1: Darstellung der Straßenverkehrsunfälle in Deutschland von 1950 bis 2022

Im Jahr 2022 gab es in Deutschland rund 2,4 Millionen Verkehrsunfälle – Tendenz steigend. Die Unfallstatistik zeigt, dass im Jahr 2020 durch die Ausgangsbeschränkungen während der Corona-Pandemie die Unfallrate zurückging, was auf die eingeschränkte Mobilität zurückzuführen ist. Die Hauptursache für die Straßenverkehrsunfälle ist eine nicht angepasste Geschwindigkeit sowie ungenügender Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. [3]

Um die hohe Anzahl von Verkehrsunfällen in Zukunft auf ein Minimum zu reduzieren, muss die Performance der Verkehrszeichenerkennung und der adaptiven Geschwindigkeitsregelung (IACC = Intelligence adaptiv Cruise Control) untersucht und beurteilt werden. Wichtig hierbei ist es, eine Metrik zu verwenden, die die Performance der Fahrzeuge bestmöglich bewerten lässt.

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Auf den Straßen finden sich zunehmend mehr Verkehrszeichen, welche oft vom Fahrer nicht mehr exakt wahrgenommen werden. Zudem wird oft der Überblick verloren, welches Verkehrszeichen gerade gilt, sei es in Städten oder auch auf längeren Autobahnfahrten. Um den Überblick zu behalten, kann hier der Fahrassistent zur Verkehrszeichenerkennung von großem Nutzen sein. Im Juli 2022 trat die EU-Verordnung in Kraft, welche besagt, dass alle neu zugelassenen Fahrzeuge ab 2024 mit bestimmten Fahrerassistenzsystemen verpflichtend ausgestattet sein müssen, welches unter anderem die Verkehrszeichenerkennung beinhaltet. Die Politik zielt damit darauf ab, die stetig steigenden Unfallzahlen zu reduzieren. Jedoch ist die Entwicklung des Verkehrszeichenerkennungssystems nicht vollständig ausgereift, sodass es immer wieder zu Fehlern, wie das Nicht-, Spät-, Früh- und Falscherkennen von Verkehrszeichen kommt. Dies kann unter Nutzung einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage (iACC) zu einer zu niedrigen oder gar überhöhten Fahrgeschwindigkeit führen. [4]

Für die Robustheit vieler Assistenzsysteme, wie den iACC, ist somit eine zuverlässige Verkehrszeichenerkennung notwendig. Wie in [5] gezeigt, kann die Performance der Verkehrszeichenerkennung jedoch nicht durch klassische quantitative physikalische Größen (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung, etc.) ermittelt werden, da die Performance aus einem zeitlich und örtlich beobachteten Systemverhalten resultiert. Hierfür muss eine Metrik geschaffen werden, die die Zuverlässigkeit dieser Systeme messbar macht. Das Problem ist jedoch, eine geeignete Metrik zu finden, um das zeitliche und örtliche Systemverhalten unter allen möglichen Verhaltensweisen bewerten zu können, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, für die Verkehrszeichenerkennung geeignete Metriken zu entwickeln und miteinander zu vergleichen. Die Metrik soll dabei neben der Verkehrszeichenerkennung auch die darauf aufbauende intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelanlage berücksichtigen. Hierdurch soll ein Instrument geschaffen werden, welches die Untersuchung der Performance dieser Systeme im Verbund ermöglicht.

Es wurde eine Versuchsstrecke definiert und ausgewählt, die mehrere Verkehrsschilder mit den verschiedensten Geschwindigkeitszonen enthält. Zudem sind mehrere Stellen in dieser Versuchsstrecke enthalten, die zu Beginn der Untersuchung als kritisch gekennzeichnet worden sind. Die Versuchsfahrzeuge Mercedes E 300 de, der Volkswagen ID.4 und der Tesla Model 3 wurden jeweils dreimal am Tag und dreimal in der Nacht getestet.

Die Auswertung der Versuchsreihen erfolgte unter Annahme folgender Hypothesen:

- Können zeitlich begrenzte Verkehrszeichen der Verkehrszeichenerkennung Probleme bereiten?
- Können Verkehrszeichen auf der anderen Straßenseite bei 3-spuriger Fahrbahn der Verkehrszeichenerkennung Probleme bereiten?
- Können Verkehrszeichen für andere Spuren, die für die eigene Fahrbahn sichtbar sind, der Verkehrszeichenerkennung Probleme bereiten?
- Können temporäre Verkehrszeichen (z.B. Baustellenschilder) der Verkehrszeichenerkennung Probleme bereiten?
- Kann die Fahrt bei Nacht der Verkehrszeichenerkennung Probleme bereiten?

Bei Verwendung digitaler Karten können folgende Szenarien zur Nicht-, Spät-/ Früh- und Falscherkennung der Verkehrszeichen führen:

- Die zulässige Geschwindigkeit der Verkehrszone in der Nähe der Fahrbahn wird erkannt.
- Die Fahrspuren einer Fahrbahn haben verschiedene Geschwindigkeitsbegrenzungen und die Geschwindigkeit der anderen Fahrspur wird erkannt.
- Die Verkehrszeichen haben ihre Position geändert und die digitale Karte ist nicht auf dem neusten Stand.
- Die digitale Karte stimmt nicht mit der tatsächlichen Position des Verkehrszeichens überein.

Im Zuge dieser Arbeit werden aufbauend auf den Fahrversuchen verschiedene Metriken angewendet, um abschließend überprüfen bzw. vergleichen zu können, welche der eingesetzten Metriken die Fahrzeugperformance hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung und der intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelung am besten bewerten lässt.

## 3 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird der theoretische Rahmen der Arbeit erläutert. Hierbei werden zuerst die Begriffe „Verkehrszeichenerkennung“, „intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelung“ sowie „Metrik“ definiert und danach die Funktionsweise der einzelnen Gebiete erklärt. Anschließend wird die methodische Vorgehensweise der Arbeit aufgezeigt.

### 3.1 Funktionsweise Verkehrszeichenerkennung

Eine Verkehrszeichenerkennung (VZE) in Fahrzeugen erfasst automatisch Verkehrszeichen und macht den Fahrer auf die jeweils geltenden Verkehrsschilder, Tempolimits und Überholverbote aufmerksam. Die Warnung wird zumeist im Armaturenbrett frühzeitig angezeigt und gibt ein optisches, akustisches oder haptisches Signal von sich. In den Neuwägen ist dieses System bereits integriert und erkennt aufgrund des eingebauten Navigationssystems und der Uhrzeit nur die relevanten Schilder. Dazu gehören unter anderem Tempolimits in Baustellenbereichen, als auch die zeitgebundenen Geschwindigkeitsbegrenzungen in bestimmten Streckenabschnitten. Die modernste Variante der Verkehrszeichenerkennung ist die Anzeige im Head-up Display. Hier wird das geltende Verkehrszeichen in der Frontscheibe des Fahrzeugs angezeigt. Durch diese Art von Anzeige hat der Fahrer seinen Blick stets auf die Straße gerichtet und weniger auf das Cockpitdisplay oder der Armaturenanzeige, was zu einer höheren Unaufmerksamkeit führen kann. Eine Nachrüstung des Verkehrszeichenassistenten ist bei älteren Fahrzeugen möglich, jedoch ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht rentabel, da mit erhöhten Kosten zu rechnen ist. [6]

Angefangen mit den Fahrerassistenzsystemen (FAS) sind die meisten neueren Fahrzeuge in der heutigen Zeit in vielen Bereichen schon automatisiert. Trotzdem soll in Zukunft der Fahrer durch komplett selbstfahrende Autos auf den Straßen von seinen Aufgaben immer mehr entlastet werden. Neben der fortschreitenden Technologie bleiben jedoch die Haftungsfragen weiterhin offen und äußerst strittig. Zur Klassifizierung wird deshalb die Einteilung in fünf Autonomiestufen verwendet. Das System übernimmt mit steigendem Level verschiedene Elemente des Fahrzeugs, bis es in der letzten Stufe autonom fährt und mit zunehmendem Automatisierungsgrad mehr Aufgaben übernimmt. [7]

Folgende Abbildung zeigt die einzelnen Stufen dieser Klassifizierung:



Abbildung 2: Übersicht der Klassifizierungsstufen des autonomen Fahrens [7]

#### Level 0: Keine Fahrautomatisierung

Level 0 zählt nicht zum autonomen Fahren und wird deshalb oft in der Klassifizierung nicht berücksichtigt. Der Fahrer beherrscht das Fahrzeug eigenständig, während ein paar grundlegende Systeme, wie zum Beispiel das Antiblockiersystem (ABS), unterstützende Funktionen einnehmen. Eine rechtliche Regelung ist hier nicht notwendig, da der Fahrer zu einhundert Prozent verantwortlich ist. [8]

#### Level 1: Assistiertes Fahren

In der ersten Stufe des autonomen Fahrens beherrscht der Fahrer zu jeder Zeit sein Fahrzeug und muss den Verkehr immer im Blick behalten, sodass er stets die Kontrolle übernehmen kann. Einzelne Assistenzsysteme wie zum Beispiel der Tempomat, der dafür sorgt, dass stets die gewünschte Geschwindigkeit gehalten wird oder der Abstandsregeltempomat (ACC, Adaptive Cruise Control) unterstützen bei bestimmten Fahrsituationen. Letzterer bremst oder beschleunigt das Fahrzeug je nach Entfernung zum vorausfahrenden Wagen automatisch und sorgt dafür, dass stets der Sicherheitsabstand eingehalten wird. Immer häufiger werden in Neuwagen auch der automatische Spurhalteassistent eingebaut (LKAS, Lane Keeping Assistent System), sodass schon im Level 1 System Wert darauf gelegt wird, den Fahrer zu entlasten und das Unfallrisiko zu minimieren. Falls es zu Verkehrsverstößen und Schäden kommen sollte, ist der Fahrer rechtlich zur Verantwortung zu ziehen. [8]

## Level 2: Teilautomatisiertes Fahren

Fahrzeuge der Stufe 2 können alle Aspekte des Autofahrens, wie zum Beispiel Lenken, Beschleunigen und Bremsen für einen gewissen Zeitraum übernehmen, ohne dass der Mensch eingreifen muss. Die Fahrer müssen dabei weiterhin stets den Straßenverkehr im Blick behalten und in der Lage sein, zu jeder Zeit in das Fahrgeschehen eingreifen zu können. Der große Unterschied zur Stufe 1 ist, dass die Hände für eine kurze Zeit vom Lenkrad entfernt werden können. Allerdings sollten die Hände des Fahrers aus rechtlichen Gründen trotzdem immer am Lenkrad sein, auch wenn es technisch gesehen nicht mehr notwendig wäre. Um teilautomatisiert Fahren zu können, werden mehrere Fahrassistenzsysteme miteinander kombiniert. Dazu gehört der automatische Spurhalteassistent (LKAS), eine automatische Abstandshaltung und eine automatische Überholfunktion. Zum Level 2 System gehört auch das selbstständige Einparken, bei dem das Fahrzeug die Fahreraufgabe ausführt, ohne dass die Fahrer das Steuer übernehmen müssen. [8]

## Level 3: Hochautomatisiertes Fahren

In diesem Level ist es dem Fahrer erlaubt, sich vom Verkehr abzuwenden und sich anderen Tätigkeiten zuzuwenden. Auf Anforderung müssen sie trotzdem das Fahren mit ausreichender Zeitreserve wieder übernehmen können, deshalb ist es nicht erlaubt, sich vom Fahrersitz zu entfernen. Das Level 3 System ermöglicht ihnen zum Beispiel das Lesen von Zeitungen, E-Mails oder Nachrichten. Seit 2022 ist diese Technik auch bei deutschen Automobilherstellern integriert und auf Autobahnen bereits anwendbar, da weder Gegenverkehr, Kreuzungen oder Fußgänger zur Gefahr werden können. [9]

Zudem sind alle Autobahnen als digitale Karten erfasst und die Fahrbahnmarkierungen durchgehend vorhanden. Bisher ist der Staupilot auf eine Geschwindigkeit bis maximal 60 km/h begrenzt. Der rechtliche Rahmen ist in diesem Level noch sehr umstritten und nicht final geklärt, aber er sieht vor, dass der Fahrer bei Unfällen nur haftet, wenn er der erfolgten Aufforderung des Fahrzeugs nicht Folge leistet. [8]

## Level 4: Hochautomatisiertes Fahren

Ein Level 4-fähiges Fahrzeug kann auf fest definierten Strecken und auf genehmigten Betriebsbereichen alle Fahraufgaben autonom ohne Eingreifen des Fahrers durchführen. Der Fahrer muss nicht mehr auf den Verkehr und die Umgebung achten und wird somit zum Passagier. Es ermöglicht ihm, während der Fahrt beispielsweise zu schlafen, sein Smartphone zu verwenden oder Zeitung zu lesen. Das System ist so ausgelegt, dass unter realen Bedingungen Ampeln und Fahrzeuge ohne Fehler erkannt und ein sicherer Zustand bei nicht Beachtung einer Aufforderung des Systems erreicht werden kann. In der Theorie könnte das Fahrzeug auch ohne Personen unterwegs sein, allerdings muss dieses System so programmiert sein, dass bei unvorhergesehenen Ereignissen der Passagier wieder die Kontrolle des Fahrzeugs übernehmen und rechtzeitig reagieren kann. Es gibt bereits erste rechtliche Rahmenbedingungen, die besagen, dass Passagiere während einer vollautomatisierten Fahrt nicht für Verkehrsverstöße oder Schäden haftbar gemacht werden, sondern bei Klärung der Fehlerursache helfen sollen. [8]

## Level 5: Autonomes Fahren

In der fünften und letzten Stufe ist das autonome Fahren ausgereift und vollendet. Hier gibt es keinen Fahrer mehr und alle Personen, die sich in dem Fahrzeug befinden, gelten als Passagiere. Ein Level 5-fähiges Fahrzeug fährt komplett autonom und kann auch schwierige Situation, wie das Fahren über Kreuzungen und durch Kreisverkehre selbstständig bewältigen. [8]

In dieser Stufe gibt es kein Lenkrad mehr und der Passagier benötigt weder eine Fahrerlaubnis, noch die Fahrtüchtigkeit, da sie keine Möglichkeit mehr haben, eingreifen zu können. Bis die ersten autonomen Busse und Autos im Level 5 System unterwegs sind, werden noch mehrere Jahre vergehen, da noch lange nicht geklärt ist, ob der Hersteller, Halter oder die KFZ-Versicherung für Verkehrsverstöße oder für Schäden haften und zahlen müssen. [10]

Um einen umfassenden Überblick der einzelnen Klassifizierungsstufen zu erhalten, zeigt folgende Abbildung eine graphische Zusammenfassung der fünf Stufen.



Abbildung 3: Unterschiede der erlaubten Tätigkeiten des Fahrers je nach Automatisierungsstufe nach [8]

Es gibt drei verschiedene Arten der Verkehrszeichenerkennung (VZE). Eine Möglichkeit, Verkehrszeichen zu erkennen, ist das Einsetzen von Frontkameras. Die zweite Möglichkeit bietet die Erkennung der Verkehrszeichen durch digitale Karten. Die dritte Variante ist die Kombination aus Kameras und digitalen Karten. [11] Kamerabasierte Verkehrszeichenerkennung sind KI-basiert und werden in drei Erkennungsmethoden unterschieden: farbbasiert, formbasiert und lernbasiert. Um zu verstehen, wie eine Verkehrszeichenerkennung mittels Kamerasystemen funktioniert, muss zuerst der theoretische Hintergrund der künstlichen Intelligenz näher erläutert werden.

Künstliche Intelligenz (KI) ist ein Teilgebiet der Informatik und ist in der Lage, menschliche Fähigkeiten wie Denken, Lernen, Planen und Kreativität zu imitieren. Es ermöglicht technischen Systemen, ihre Umwelt wahrzunehmen, damit umzugehen und Probleme zu lösen, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen, indem sie Informationen aus Eingabedaten erkennen und verarbeiten. Die künstliche Intelligenz kann auf Basis von programmierten Abläufen oder durch maschinelles Lernen erzeugt werden. Beim maschinellen Lernen erlernen spezielle Algorithmen durch mehrfache Wiederholung selbstständig eine Aufgabe zu erfüllen. Dabei entfernt sie sich vom ursprünglichen Wissen und lernt durch Feedback oder erfolgreichen Versuchen die Struktur der Daten zu erkennen. [12]

Ein Untergebiet und ein wichtiges Element des maschinellen Lernens sind neuronale Netzwerke. Der Aufbau ähnelt dem menschlichen Gehirn und besteht aus mehreren Reihen von Datenknotenpunkten, die mit verschiedenen Gewichtungen miteinander verbunden sind. Durch Wiederholung der Aufgabe erlernt das neuronale Netz die Daten genauer einzuordnen, bei dem es die Gewichtungen der einzelnen Neuronenschichten stetig anpasst. Wenn Neuronenschichten nicht direkt an die Ein- und Ausgabeschicht gebunden sind, werden sie „Deep Neural Networks“ genannt. Deep Neural Networks bestehen aus mindestens zwei Schichten und können Millionen von Neuronenschichten annehmen. Somit können auch beim sogenannten „Deep Learning“ schwierige Probleme oder Situationen gelöst werden. [12]

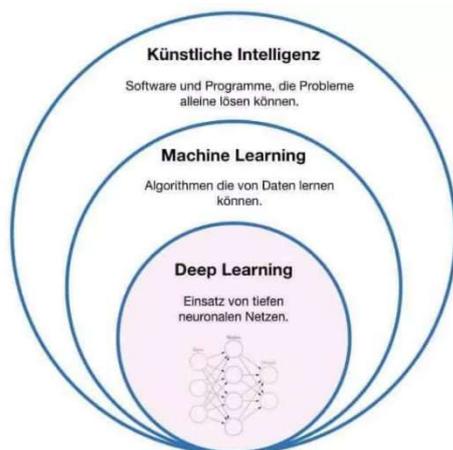


Abbildung 4: Die Bestandteile einer Künstlichen Intelligenz (KI) [11]

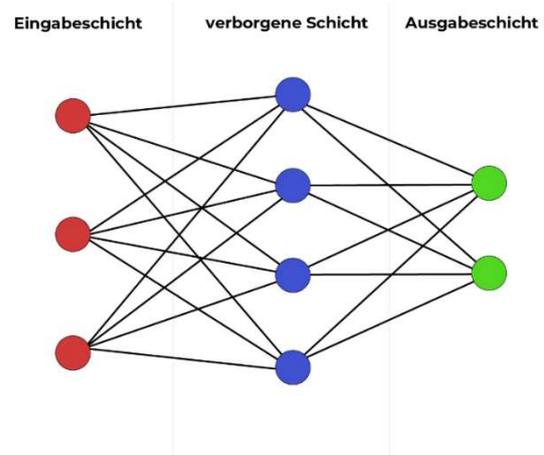


Abbildung 5: Künstliches Neuronales Netzwerk mit einzelnen Schichten [11]

Eines von vielen Anwendungsgebieten der künstlichen Intelligenz findet sich in der Bilderkennung wieder. Mit Machine-Vision-Algorithmen ist es möglich, Bilder zu erkennen und zu klassifizieren. Mit Hilfe solcher Algorithmen wird beim autonomen Fahren versucht, unter anderem die Verkehrszeichenerkennung zu verbessern und weiter voranzutreiben. [13]

Die Verkehrszeichenerkennung bedient sich verschiedener Methoden, welche farb-, form- und lernbasiert arbeiten.

Bei der farbbasierten Methode ist vor allem hilfreich, dass es nur standardisierte Farben gibt (Rot, Blau und Gelb). Dabei wird das Bild nach zusammenhängenden Regionen bestimmt und nach relevanten Farben segmentiert. Diese Farben helfen bei der Entwicklung eines Detektionsalgorithmus (=Erkennungsalgorithmus). [14]

Bei der Farberkennungsmethode wird ROI angewendet, welches sich nur auf die relevanten Bereiche eines Bildes erstreckt. Durch die Anwendung von ROI werden unnötige Daten herausgefiltert und wichtige Informationen gezielt verarbeitet, welches die Effizienz der Bildverarbeitung verbessert. Probleme hierbei sind der unterschiedliche Lichteinfall, verblasste Farben durch Witterungseinflüsse sowie Wetterbedingungen wie z.B. Nebel, Schneefall oder auch Sonneneinstrahlung. Diese lassen die Farbwerte stark variieren, was die Klassifizierung schwieriger gestaltet. [15]

Die Kamera nimmt die Farben des Verkehrszeichens auf und wechselt von RGB in den HSV-Farbraum, der sich besser für die Farbsegmentierung eignet. Anschließend werden die relevanten Farben des Verkehrsschildes herausgefiltert und klassifiziert sowie mit Hilfe von ROI extrahiert.

In der folgenden Abbildung wird die Vorgehensweise der farbbasierten Methode dargestellt.

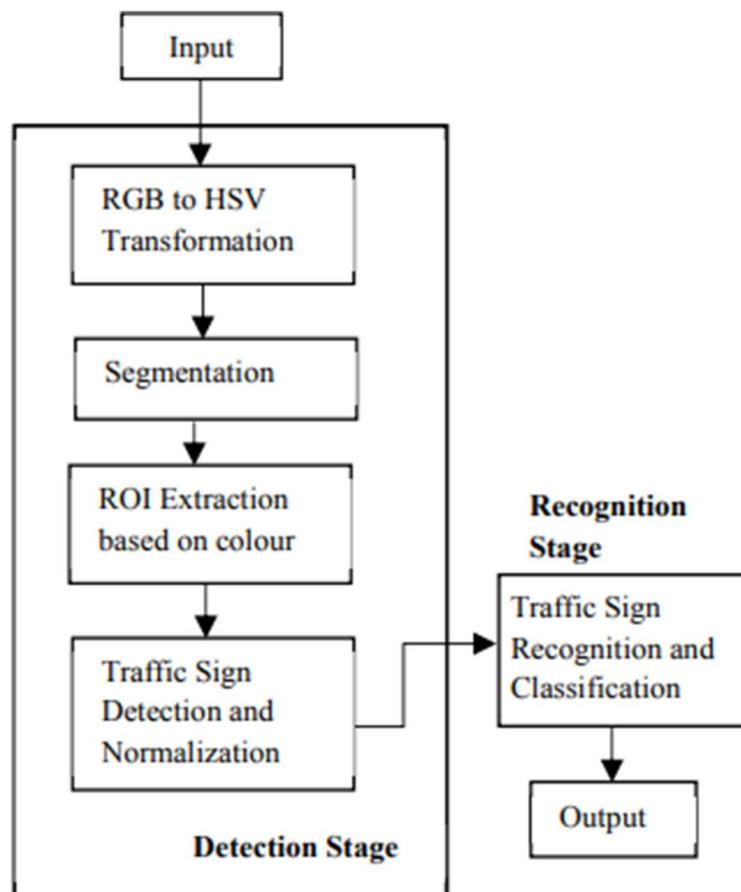


Abbildung 6: Vorgehensweise farbbasierte Verkehrszeichenerkennung (VZE) [16]

Analog der Farberkennung bedient sich die formbasierte Verkehrszeichenerkennung vor allem der charakteristischen Formen wie z.B. Dreieck, Viereck, Kreis und Achteck, welche in der folgenden Abbildung dargestellt sind.



Abbildung 7: Verschiedene Formen von Verkehrszeichen der Straßenverkehrsordnung (StVO) [16]

Die formbasierte Erkennung hat den Vorteil, dass die Farberkennung hier keine Rolle spielt, da die Bilder meist in Graustufen umgewandelt werden. Allerdings ergibt sich hier das Problem, dass die Formen durch Verdecken z.B. durch einen Ast nicht exakt erkannt werden können, die Schilder verformt oder verzehrt sind und es somit zu Fehlentscheidungen kommt. Hier ist der Rechenaufwand höher, da das Gesamtbild des Verkehrszeichens auf eine kleine Anzahl von Pixel reduziert wird. Die gebräuchlichste Methode ist die Hough Transformation. Dies ist ein Verfahren, welches nach einer Kantenerkennung für Gerade, Kreise und sonstige geometrische Figuren verwendet wird. Diese Technik weist eine Erkennungsquote von ca. 90 % auf und ist gegenüber Lücken in den Merkmalsgrenzen tolerant. Neben der Hough Transformation ist die Formerkennung mit Hilfe von „template matching“ (Deutsch: Vorlagenabgleich) eine weitere Methode. Template matching ist eine Bildverarbeitungstechnik mit vordefinierten Vorlagen, auf denen bestimmte Teile eines Bildes identifiziert werden. Es ermöglicht die Verkehrszeichenerkennung unabhängig von der Ausrichtung und Beleuchtung des Schildes. [17]

Die dritte Erkennungsmethode ist die Methode des maschinellen Lernens, die die Eigenschaften der farb- und formbasierten Methode verbindet. Obwohl diese Methode hohe Datenmengen benötigt, ist sie den beiden anderen Methoden überlegen. Wie oben bereits erwähnt, wird bei den Methoden des maschinellen Lernens durch Wiederholung der Trainingseinheiten basierend auf der Erfahrung neues Wissen generiert. Die meisten auf Convolutional Neural Network (CNN) basierenden Erkennungsmethoden arbeiten mit Faltungsnetzwerken, in denen ein anspruchsvolles mathematisches Modell zur Anwendung kommt und in nachfolgende Schichten weitergegeben wird. Die Deep-CNN-Methode kann im Vergleich zu den anderen Methoden eine größere Menge an Trainingsbeispielen verarbeiten und erzielt erhebliche Verbesserungen in der Verkehrszeichenerkennung. [14]

In der folgenden Tabelle sind die basierenden Erkennungsmethoden des maschinellen Lernens zusammengefasst.

Tabelle 1: Die Erkennungsmethoden des maschinellen Lernens [14]

	Category	Paper	Year	Features	Training method and detection structure	
Machine Learning Based Methods	AdaBoost based methods	[6]	2012	Haar-like	Cascade	
		[53]	2009	Dissociated dipoles	Parallel cascade	
		[88]	2014	MN-LBP	Split-flow cascade tree	
		[57]	2017	ACF	Cascade of ACF	
		[58]	2016	ACF, LBP, Spatially Pooled LBP	Cascade	
		[25]	2013	ICF (or ChnFtrs)	Cascade of ICF	
		[11]	2015	ICF (or ChnFtrs)	Cascade of ICF	
		[11]	2015	ACF	Cascade of ACF	
		[59]	2016	Decision tree on image pyramid	Boosted decision trees	
	SVM based methods	[48]	2012	HOG	Linear SVM	
		[89]	2013	Color HOG	IK-SVM, LDA	
		[67]	2013	HOG	SVM with RBF kernel	
		[68]	2013	HOG	Liblinear SVM	
		[62]	2015	PHOG	SVM	
		[63]	2016	HSI-HOG, LSS features	SVM with RBF kernel	
		[52]	2017	Integral, compressed, color HOG	Linear SVM	
		[64]	2014	Color global LOEMP	Linear SVM	
		[65]	2013	Gabor	SVM with polynomial kernel	
	[66]	2016	HOG, LBP and Gabor	SVM		
	CNN based methods	[69]	2013	SVM+CNN		
		[70]	2015	RGB thresholding+RCNN		
		[76]	2018	Convolutional neural network (CNN)		
		[71]	2016	fully convolutional network (FCN) and deep CNN		
		[72]	2018	AN (Attention Network) and Faster-RCNN		
		[10]	2016	Convolutional neural network (CNN)		
[74]		2018	Cascaded segmentation detection networks			
[73]		2016	Cascaded convolutional neural networks			
[75]		2017	YOLOv2			

Eine weitere Möglichkeit, neben der kamerabasierten Verkehrszeichenerkennung, bietet der Einsatz von digitalem Kartenmaterial. Für das autonome Fahren und der Gewährleistung für sicheres Fahren, sind neben der genauen Standortbestimmung noch weitere Anforderungen zu erfüllen. Das System muss in der Lage sein, sich in der Umgebung zu orientieren und neben der Einhaltung der Spur, auch Hindernissen ausweichen können. Diese speziellen Anforderungen sind durch die Auswertung einfacher Sensordaten nicht mehr zu erfüllen. Für Sensoren müssen beispielsweise Verkehrszeichen und Geschwindigkeitsbegrenzungen für die Frontkamera sichtbar und eindeutig identifizierbar sein. Zu große Entfernungen oder verdeckte Verkehrsschilder lassen den Sensor die Merkmale nicht mehr erkennen und brauchbar auswerten.

Deshalb ist der Einsatz von digitalem Kartenmaterial unausweichlich, welches die Merkmale in Echtzeit kontinuierlich aktualisiert. Ein digitales Kartenmaterial wie beispielsweise die HD Live Map bringt einige Vorteile mit sich. Dieses Kartenmaterial liefert dem Fahrer zusätzliche Informationen hinsichtlich bestimmter Straßentypen, die nicht ausreichend klassifiziert werden können. Zudem enthalten digitale Karten bestimmte Informationen zu Verkehrsregeln und Vorschriften, die in den einzelnen Ländern zum Einsatz kommen. Des Weiteren werden Geschwindigkeitsbeschränkungen, die nicht eindeutig von Verkehrsschildern angezeigt werden, durch das Kartenmaterial erfasst und geben dem Fahrer die maximal zulässige Geschwindigkeit an. [18]

Navigationssysteme bestehen und funktionieren im Wesentlichen aus der Positionsbestimmung durch Global Positioning System (GPS), bereits gespeicherten digitalen Straßeninformationen und aus einer Routenplanungs- und Zielsoftware. Durch ein erfolgreiches Zusammenspiel dieser drei Systeme kann eine digitale Karte in Echtzeit entstehen, da Informationen wie zum Beispiel der Fahrbahnverlauf, Markierungen, Verkehrsregeln und die Charakteristiken der Fahrbahn usw. optimal kombiniert werden können. [19]

Das GPS besteht aus insgesamt 32 Satelliten, die den Planeten Erde auf festen Bahnen umkreisen. [19] Für die genaue Positionsbestimmung werden mindestens vier Satelliten (Sender) benötigt. Diese Sender übermitteln durchgehend ihre genaue Position und die aktuelle Zeit dem GPS-Empfänger. Die ersten beiden Satelliten begrenzen anfangs die Position des Empfängers auf einen Kreis. Mit dem Einsatz des dritten Satelliten wird die Position des GPS-Empfängers auf zwei mögliche Orte begrenzt. Der vierte Satellit macht es anschließend möglich, die exakte Position zu bestimmen. Je mehr Signale die GPS-Empfänger erhalten, umso einfacher ist es ihre genaue Position zu ermitteln. [20]

Die exakte Position des Fahrzeugs wird also durch die an den GPS-Empfänger übertragenen Satellitenpositionen und den Unterschieden der jeweils empfangenen Uhrzeiten errechnet. Mit Hilfe des Doppler-Effekts ist es daher zusätzlich möglich, die Geschwindigkeit und die jeweilige Fahrtrichtung zu ermitteln. [19]

In folgender Abbildung werden die einzelnen Schritte der genauen Positionsbestimmung mittels GPS visualisiert dargestellt.

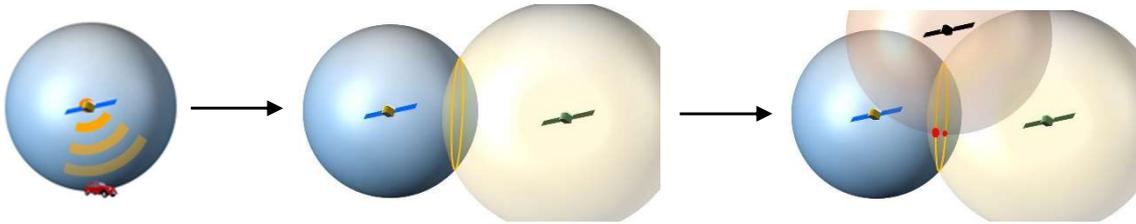


Abbildung 8: Darstellung der Vorgehensweise einer genauen Positionsbestimmung mittels GPS nach [21]

Neben der kamerabasierten Verkehrszeichenerkennung und der Erkennung der Verkehrszeichen mit digitalem Kartenmaterial, ermöglicht die Kombination beider Erkennungsmethoden eine dritte Methode. In der Realität werden die beiden einzelnen Systeme für die Verkehrszeichenerkennung miteinander fusioniert, um die Zuverlässigkeit dieses Fahrerassistenzsystems zu erhöhen. Während die im Fahrzeug integrierte Kamera Videobilder erkennt, werden zur Stabilisierung vorrausschauende straßenbezogene oder routenbezogene Streckendaten mittels digitalem Kartenmaterial hinzugeführt und berücksichtigt. Durch die Anwendung der VZE-Methoden im Verbund wird die Funktionalität des Fahrerassistenzsystems erheblich verbessert und ein Rückgang der Unfallzahlen erhofft. [21]

Folgende Abbildung veranschaulicht die Datenfusion zwischen Bildern einer kamerabasierten Verkehrszeichenerkennung und einer Erkennung mittels Navigationsdaten.

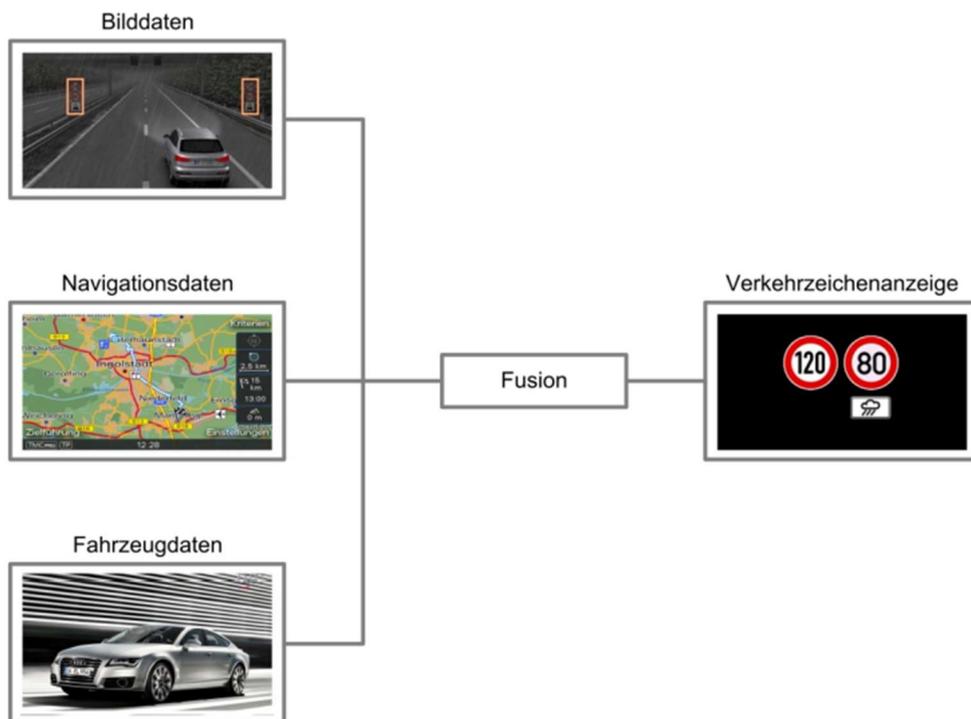


Abbildung 9: Darstellung von Methoden der Verkehrszeichenerkennung mittels Kamerabildern, Navigationsdaten und Fahrzeugdaten [21]

## 3.2 Funktionsweise Intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelung

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des autonomen Fahrens ist die intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelung (engl.: intelligent Adaptive Cruise Control; iACC). Der Vorreiter des iACC ist der Tempomat, oder auch adaptive Geschwindigkeitsregelung (eng.: Adaptive Cruise Control; ACC) genannt. Bei diesem Fahrerassistenzsystem für Kraftfahrzeuge handelt es sich um ein System, das die vom Fahrer eingestellte Geschwindigkeit des Fahrzeugs automatisch anpasst, sodass der Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu jeder Zeit eingehalten wird. Dabei wird kontinuierlich der Abstand zum Vorausfahrenden mittels verbauter Sensoren gemessen. Wird der geltende Sicherheitsabstand zu gering, reguliert der ACC die Geschwindigkeit und das Fahrzeug bremst automatisch ab. [22]

In folgender Abbildung wird die Funktionsweise einer adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage dargestellt. [23]

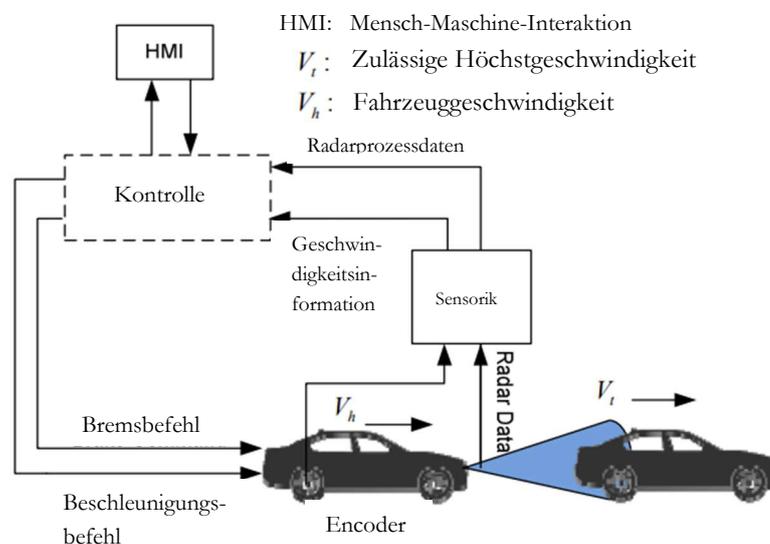


Abbildung 10: Funktionsweise einer adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage (ACC) nach [23]

Der intelligent Adaptive Cruise Control passt die Geschwindigkeit hingegen intelligent an. Aktuelle und fehlerfreie Kartendaten, sowie eine zuverlässige kamerabasierte Verkehrszeichenerkennung, spielen bei der Verwendung eines iACCs eine wichtige Rolle, da zusätzlich die Verkehrszeichenerkennung mit diesem System zusammenarbeitet. [24] Durch die Verkehrszeichenerkennung erkennt das Fahrzeug das Verkehrszeichen mit der nächsten Geschwindigkeitszone und passt die Geschwindigkeit automatisch an. Dabei wird analog zum ACC der Sicherheitsabstand zum Vordermann zu jeder Zeit eingehalten. [24] Ein weiterer Entwicklungsschritt des iACCs ist, dass ein Spurwechsel und ein einscherendes Fahrzeug frühzeitig erkannt werden. [25] Der Fahrer wird durch ein selbständiges und leichtes Abbremsen des Fahrzeugs auf die Gefahrensituation aufmerksam gemacht. Reagiert der Fahrer in solch einer Situation nicht adäquat, wird der automatische Bremsvorgang verstärkt, um den Sicherheitsabstand weiterhin zu gewährleisten. [25] Da ungefähr 25% aller PKW-Verkehrsunfälle auf eine nicht angepasste Geschwindigkeit und einem zu geringen Abstand zurückzuführen sind, erhofft sich die EU-Kommission mit Hilfe des iACCs einen Rückgang der Unfallzahlen. Das Fahrerassistenzsystem soll den Fahrer beim Einhalten der Geschwindigkeit und des Abstandes unterstützen und somit die Sicherheit, als auch den Komfort des Fahrers erhöhen. [24]

### 3.3 Metrik – Definition und Metriken in der Literatur

Eine Metrik ist ein Verfahren zur Quantifizierung von Eigenschaften eines Untersuchungsgegenstandes und dient zur Beschreibung dessen Eigenschaften, um den Untersuchungsgegenstand beschreiben, analysieren, bewerten und mit anderen Untersuchungsgegenständen vergleichen zu können. Sie ermöglichen Objektivität durch Berechnung von Beobachtungen. [26] Dies kann zum Beispiel eine Untersuchung der Komplexität oder der Qualität von Systemen in verschiedenen Testfällen darstellen. Der Zweck einer Metrik ist in der Regel eine Grundlage für Entscheidungsfindungen auf strategischen, taktischen oder technischen Gebieten. Ziele der Erstellung von Metriken ist es, objektive und messbare Informationen zur Verfügung zu stellen, Fehler aufzudecken sowie fehlerhafte Prozesse zu reduzieren. Metriken unterliegen Normen und Standards und müssen grundlegende Voraussetzungen erfüllen, um angewendet werden zu können. [26]

Folgende Tabelle zeigt die Kriterien, die eine Metrik aufweisen und erfüllen sollte.

*Tabelle 2: Kriterien und Bedeutung für Metriken nach [26]*

<b>Kriterien</b>	<b>Bedeutung</b>
Objektivität	Kein subjektiver Einfluss durch Prüfenden möglich
Reliabilität	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unter gleichen Bedingungen
Validität	die Metrik misst das, was sie vorgibt zu messen
Eindeutigkeit	Viele Abbildungen sind möglich
Einfachheit der Erhebung	Grad der Leichtigkeit oder Schwierigkeit
Repräsentanz	Rückschlüsse einer Stichprobe auf die Gesamtheit
Granularität	Detailierungsgrad eines Systems

Das erste Kriterium ist die Objektivität und bedeutet, dass das Ergebnis unabhängig von subjektiven Einflüssen, persönlichen Gefühlen und Vorurteilen erhalten werden soll. Objektiv ist, wenn etwas auf Fakten bzw. Beweisen beruht und nicht auf individuelle Interpretationen und Rahmenbedingungen zurückzuführen ist. [27] Ein weiteres Kriterium ist die Reliabilität. Eine Metrik ist reliabel, wenn unter ähnlichen Bedingungen die Ergebnisse reproduzierbar sind. Das bedeutet, dass die Zuverlässigkeit eines Tests hoch ist, wenn die Ergebnisse ähnlich sind. [28] Neben der Reliabilität spielt die Validität eine wichtige Rolle. Validität bedeutet Gültigkeit und ist ein weiteres wichtiges Kriterium. Die Validität soll sicherstellen, dass eine Messung zielgerichtet das zu untersuchende Merkmal misst und erfasst. Ebenso soll herausgefunden werden, ob das Ergebnis der Untersuchung der Wirklichkeit entspricht und wiedergibt. [29] Als nächstes Kriterium wird die Eindeutigkeit definiert. Die Eindeutigkeit einer Metrik bedeutet, dass die erzielten Ergebnisse in mehreren Abbildungen dargestellt werden können, eine klare und aussagekräftige Bedeutung haben und genau eine Interpretation zulassen. Wenn etwas eindeutig ist, besteht keine Gefahr der Verwirrung und Unsicherheit darüber, was es zu bedeuten hat oder wie zu interpretieren ist. [26]

Die Einfachheit der Erhebung zeichnet sich dadurch aus, dass wenige Faktoren oder Elemente in die Metrik einfließen und somit potenzielle Fehlerquellen vermieden werden können, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. [30] Einfach deklarierte Metriken sind für jede Untersuchung leichter anzuwenden und zu verstehen. Als vorletztes Kriterium wird die Repräsentanz einer Metrik beschrieben und zählt als eines der wichtigsten Kriterien. Allgemein bedeutet Repräsentanz, dass ausgehend von einer kleinen Stichprobe Rückschlüsse auf die Gesamtheit gezogen werden kann. Ist eine Stichprobe repräsentativ, können die Merkmale, Faktoren und Eigenschaften die Gesamtheit widerspiegeln. [31] Als letztes Kriterium ist die Granularität einer Metrik entscheidend. Die Granularität bezieht sich auf die Detailstufe eines Systems. Je höher die Granularität, desto höher ist der Detaillierungsgrad einer Untersuchung. Sie definiert die Detailtiefe und bestimmt, wie fein oder grob die Daten für eine Analyse verwendet werden können. [32]

Metriken sind grundlegend unterteilt in qualitative und quantitative Metriken. Quantitative Metriken basieren auf Standards mit einer definierten Einheit (Meter, Sekunde, usw.). Qualitative Metriken, welche subjektiv sind, unterliegen Kriterien, die von einem Einzelnen festgelegt werden, wie zum Beispiel gut, schlecht, usw. Der Unterschied der beiden Metrik Arten ist, dass sich bei den qualitativen Metriken die Standards je nach Situation schnell ändern können. Metriken finden in der Literatur viele verschiedene Ein- beziehungsweise Unterteilungen, aber nach [33], wird tiefergehend nach vier verschiedenen Arten von Metriken differenziert. Neben der „normativen“ Metrik gibt es die „qualitative“, die „linear quantitative“ und die „mehrdimensional quantitative“ Metrik. Die am häufigsten eingesetzten Metriken sind linear, da sie sich sehr leicht berechnen und veranschaulichen lassen. [33]

Während Metriken die Zustände oder Eigenschaften eines Untersuchungsgegenstandes beschreiben, bewerten Key Performance Indikatoren (KPI; zu Deutsch: Leistungsindikator, Leistungskennzahl) diese quantifizierbaren Metriken. Mit Hilfe dieser Leistungskennzahl, lässt sich die Leistung von verschiedenen Eigenschaften eines Untersuchungsgegenstandes als messbaren Wert darstellen und bewerten. Ein KPI besteht also aus einer oder mehreren Metriken und bildet die Leistung des Untersuchungsgegenstandes ab. [34]

In dieser Arbeit werden drei verschiedene Metriken angewendet, um die Performance der Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage bestmöglich zu vergleichen und zu beurteilen. Um den Umfang der verschiedenen Metrikarten zu berücksichtigen, werden drei unterschiedliche Arten von Metriken entwickelt und anschließend in den einzelnen Erprobungsfahrten angewendet. Zuerst wird eine qualitative Metrik mit einer Kategorisierung von 0 bis 7 angewendet, die die Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage bewerten soll. Als zweite Metrik wird eine quantitative Metrik angewendet, die die Systeme unabhängig voneinander und einzeln bewertet. Hier werden jeweils für das System der Verkehrszeichenerkennung, als auch für eine intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelanlage Metriken entwickelt und angewendet, die anschließend ähnlich eines Key Performance Indikators (kurz: KPI) zusammengefasst werden. Als dritte und letzte Metrik wird eine True-False-Formel angewendet, welche als Ergebnis zu einem KPI führt. Hier wird mit der Zahl 1 bewertet, wenn das Verkehrszeichen erkannt wird und die intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelanlage die Fahrzeuggeschwindigkeit richtig anpasst. Sobald eines dieser beiden Fahrerassistenzsysteme nicht richtig reagiert, wird die Performance mit 0 bewertet. Anschließend wird ein Key Performance Indikator erhalten, der die Performance der beiden Systeme im Verbund evaluieren soll. Dabei wird die Summe aller mit der Zahl 1 bewerteten Situationen durch die Summe aller richtig und falsch erkannten Verkehrssituationen geteilt und mit dem Faktor 100 multipliziert.

Im Folgenden werden die drei verschiedenen Metriken dieser Arbeit dargestellt und näher beschrieben.

Bei der ersten Metrik, welche qualitativ ist, wird von 0 bis 7 kategorisiert. Hier wird die Leistung des Fahrzeugs anhand dieser Skala bewertet. Wie in der Tabelle 2 dargestellt, werden die Kriterien in VZE- und iACC-Leistung eingeteilt, aber in Kombination bewertet. Zum Beispiel wird die Fahrzeuleistung mit einer 5 bewertet, wenn das Fahrzeug das Verkehrszeichen richtig erkennt, aber die Geschwindigkeit schon 2 Sekunden vorher angepasst hat. Gleiches gilt, wenn die Geschwindigkeit erst 2 Sekunden nach dem Schild mit der Anpassung begonnen hat. Falls die Geschwindigkeit 2 Sekunden vor oder nach dem Verkehrszeichen angepasst wird, wird mit einer 6 bewertet. Mit 0 wird bewertet, wenn weder das Verkehrszeichen erkannt, noch die Fahrzeuggeschwindigkeit angepasst wird. Wird die Zielgeschwindigkeit weniger als 2 Sekunden vor oder bis zum Passieren des Schildes erreicht, wird die Leistung des Fahrzeugs mit einer 7 bewertet. Ebenfalls wird auch die Kennzeichnung jeder einzelnen Zone in der Bewertung festgelegt, die sich wie folgt unterscheiden:

A: Durch ein Schild gekennzeichnete Geschwindigkeitszone

B: Geschwindigkeitszone mit durchgestrichenem Schild

C: nicht beschilderte Geschwindigkeitszone (z.B. definiert durch die StVO [22] in Deutschland)

*Tabelle 3: Metrik 1 zur Bewertung der Fahrzeugperformance hinsichtlich Verkehrszeichenerkennung und des iACC nach den Tests [5]*

Kriterium	Verkehrszeichen-erkennung	Int. Adaptive Cruise Control	Bemerkung
0	Nicht erkannt	Fahrzeuggeschwindigkeit nicht angepasst	
1	Falsch erkannt	Fahrzeuggeschwindigkeit falsch angepasst	
2	Richtig erkannt	Fahrzeuggeschwindigkeit in der Zone falsch angepasst	
3	Richtig erkannt	Fahrzeuggeschwindigkeit nicht angepasst	
4	Richtig erkannt	Fahrzeuggeschwindigkeit falsch angepasst	
5	Richtig erkannt	Fahrzeuggeschwindigkeit zu früh/spät angepasst	wenn die Zeit vor oder nach dem Verkehrszeichen $> 2$ s und $< 10$ s ist
6	Richtig erkannt	Geschwindigkeitsanpassung beginnt ab dem Verkehrszeichen	wenn die Zeit vor oder nach dem Verkehrszeichen $\leq 2$ s ist
7	Richtig erkannt	Fahrzeuggeschwindigkeit ab Schild angepasst	

Bei der zweiten Metrik handelt es sich um eine quantitative Metrik, bei der, wie bereits oben erwähnt, die beiden Fahrerassistenzsysteme zunächst einzeln bewertet und anschließend zusammengefasst werden. Um die Leistung der Verkehrszeichenerkennung ( $P_{VZE}$ ) der einzelnen Fahrzeuge zu bewerten, werden anfangs 100 Punkte vergeben und anschließend in Abhängigkeit der Zeit Punkte abgezogen, sodass bei einer Verkehrszeichenerkennung, die länger als 10 Sekunden nach dem Passieren des Schildes benötigt, 0 Punkte vergeben werden. Gleiches gilt bei der Erkennung des Verkehrszeichens vor dem Schild.

Folgende Formel wird für die Leistung der Verkehrszeichenerkennung verwendet:

$$P_{VZE} = 100 - 10 \cdot t \quad (1)$$

Mit:  $t = \text{Zeit}$ ;  $P_{VZE} = \text{Performance der VZE}$

Tabelle 4: Beschreibung einer Metrik bezüglich VZE-Eigenschaften zur Bewertung der VZE-Performance

VZE-Eigenschaften	Bemerkung
Richtig erkannt	Zeitpunkt Passieren des Verkehrszeichens
Zu früh / zu spät erkannt	Zeitpunkt vor bzw. nach dem Passieren des Verkehrszeichens (Zeitfenster = 10 sek.)
Nicht erkannt	Verkehrszeichen wird innerhalb des Zeitfensters nicht erkannt

Um die Leistung der intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage bewerten zu können, wird der Dividend aus der Differenz der aktuellen Geschwindigkeit bei dem Passieren des Verkehrszeichens ( $V_{akt}$ ) und der Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone ( $V_{zk}$ ), durch den Divisor aus der Differenz der Zielgeschwindigkeit der vorherigen Zone ( $V_{za}$ ) und der Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone von der Zahl 1 abgezogen und anschließend mit dem Faktor 100 multipliziert. Diese Formel (2) gilt nur, wenn die Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone größer und die aktuelle Geschwindigkeit beim Passieren des Verkehrszeichens größer gleich ist als die Zielgeschwindigkeit der vorherigen Zone. Ebenfalls gilt die Formel (2), wenn die Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone kleiner und die aktuelle Geschwindigkeit beim Passieren des Verkehrszeichens größer gleich ist als die Zielgeschwindigkeit der vorherigen Zone. Falls die Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone gleich der Zielgeschwindigkeit der vorherigen Zone ist, werden diese als Zielgeschwindigkeit beider Zonen ( $V_z$ ) bezeichnet und es gilt die Formel (3). Sobald keiner dieser Fälle bei einer Verkehrssituation eintritt, wird die Leistungsperformance des iACCs mit 0 bewertet.

Als Ergebnis dieser Formeln, wird eine Punktezahl erhalten, die die Leistung der intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage für jedes einzelne Verkehrszeichen bewertet.

Folgende Formel wird für die Leistungsbewertung des iACCs verwendet:

$$\begin{aligned} \text{Wenn } V_{Z_k} > V_{Z_a} \& V_{akt} \geq V_{Z_a}: P_{iACC} = \left(1 - \left| \frac{V_{akt} - V_{Z_k}}{V_{Z_a} - V_{Z_k}} \right| \right) \cdot 100 \\ \text{Wenn } V_{Z_k} < V_{Z_a} \& V_{akt} \geq V_{Z_a}: P_{iACC} = \left(1 - \left| \frac{V_{akt} - V_{Z_k}}{V_{Z_a} - V_{Z_k}} \right| \right) \cdot 100 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Wenn } V_{Z_k} = V_{Z_a} = V_Z: P_{iACC} = \left(1 - \left| \frac{V_{akt} - V_Z}{V_Z} \right| \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$\text{Sonst: } P_{iACC} = 0$$

Mit:  $P_{iACC}$  = Leistungsperformance des iACC

$V_{akt}$  = aktuelle Geschwindigkeit bei dem Verkehrszeichen

$V_{Z_k}$  = Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone

$V_{Z_a}$  = Zielgeschwindigkeit der vorherigen Zone, aus der herausgefahren wird

$V_Z$  = Zielgeschwindigkeit beide Zonen

Nachdem die einzelnen Fahrerassistenzsysteme individuell bewertet wurden, werden im letzten Schritt die Ergebnisse in einer Formel zusammengeführt und im Verbund bewertet. Dabei wird der Durchschnitt der Verkehrszeichenerkennungsperformance und der Durchschnitt der iACC-Performance mit dem Faktor 0,5 multipliziert. Somit werden beide Systeme mit der gleichen Gewichtung bewertet und man erhält als Ergebnis den Mittelwert, der die Performance hinsichtlich Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage bewertet.

Folgende Formel wird für die Beurteilung der Gesamtpformance des Fahrzeugs verwendet:

$$P_G = (\emptyset P_{VZE} + \emptyset P_{iACC}) \cdot 0,5 \quad (4)$$

Mit:  $P_G$  = Gesamtpformance

Die dritte und letzte Metrik ist eine Metrik, die bereits häufiger in ähnlicher Art und Weise in der Literatur zu finden ist. Die Grundlage bilden in diesem Fall alle 95 zu bewertenden Verkehrssituationen. Sobald ein Verkehrszeichen korrekt erkannt wird und der iACC die Geschwindigkeit richtig anpasst, wird mit der Zahl 1 bewertet. Bei dieser Metrik spielt es keine Rolle, ob das Verkehrszeichen vor oder erst ab dem Verkehrsschild erkannt wird. Gleiches gilt für den iACC. Eine korrekt angepasste Geschwindigkeit ist, wenn der iACC die Geschwindigkeit ab der Erkennung des Verkehrszeichens reguliert, sei es vor oder erst ab dem Verkehrsschild. Mit 0 wird die Situation bewertet, wenn er das Verkehrszeichen überhaupt nicht erkennt oder erst mitten in der Geschwindigkeitszone. Ebenfalls wird mit 0 bewertet, wenn der iACC die Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone schon weit vorher erreicht hat. Falls eines dieser beiden Systeme sich nicht richtig verhält, wird die Zahl 0 vergeben. Anschließend wird eine True-False-Formel angewendet, der die Anzahl aller mit der Zahl 1 bewerteten Situationen durch die Anzahl aller 95 Verkehrssituationen teilt. Der Quotient wird mit dem Faktor 100 multipliziert. Als Ergebnis erhält man einen KPI mit dem prozentualen Anteil aller richtig erkannten Verkehrssituationen, bei denen die Verkehrszeichenerkennung und der iACC richtig reagiert haben.

Die folgende Tabelle visualisiert die Metrik zur Bewertung:

*Tabelle 5: Metrik 3 zur Bewertung der Fahrzeugperformance hinsichtlich Verkehrszeichenerkennung und des iACC nach den Tests*

Kriterium	Verkehrszeichenerkennung	Intelligente Adaptive Geschwindigkeitsanpassung
1	1	1
0	1	0
0	0	1
0	0	0

Legende:      1: Richtig      0: Falsch

$$P_G = \frac{\sum \text{Anzahl an richtig bewerteten Situationen}}{\sum \text{Anzahl aller richtig und falsch bewerteten Situationen}} \cdot 100 \quad (5)$$

### 3.4 Methodische Vorgehensweise

Im Folgenden wird die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit zur Entwicklung und Vergleich von Metriken zur Performancebewertung von Verkehrszeichenerkennungssystemen in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage genauer dargestellt.

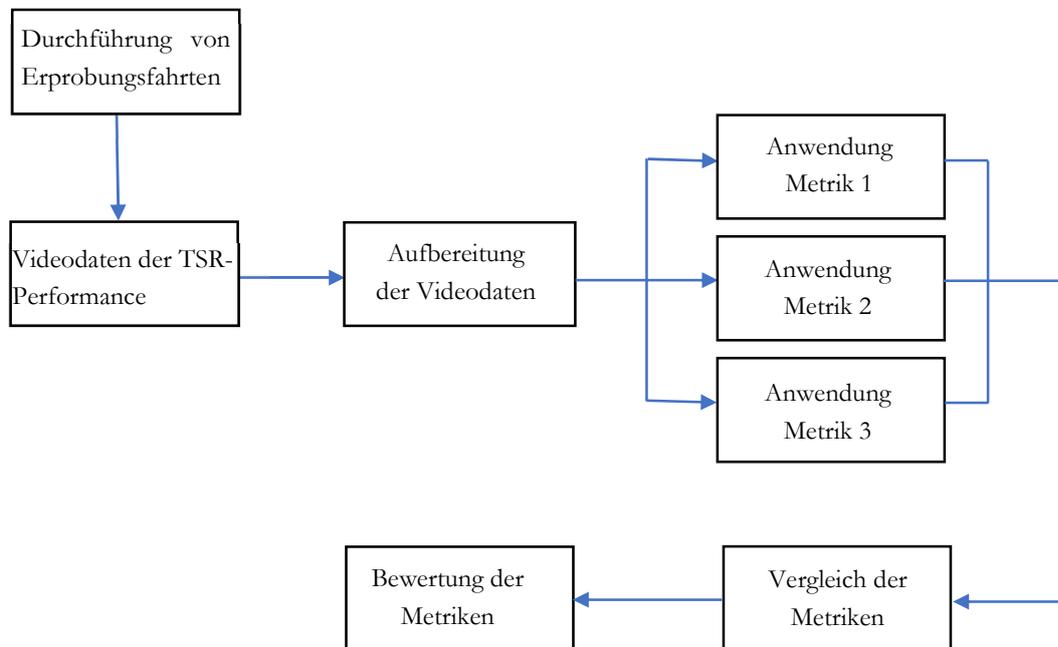


Abbildung 11: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise der Arbeit

Zuerst werden mit drei Fahrzeugen die Erprobungsfahrten durchgeführt. Diese Fahrzeuge sind die Mercedes E-Klasse, der VW ID.4 und der Tesla Model 3. Anhand der mittels einer Go-Pro aufgezeichneten Fahrten entstehen die Videodaten der Verkehrszeichenerkennungssysteme, die anschließend aufbereitet werden. Da die Performance aus einem zeitlich und örtlich beobachteten Systemverhalten resultiert, werden drei Metriken entwickelt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Im nächsten Schritt werden diese drei entwickelten Metriken auf das Videomaterial angewendet, um anschließend einen Vergleich der angewendeten Metriken zu schaffen. Nachdem die Metriken miteinander verglichen sind, werden die Metriken hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Kriterien bewertet. Im letzten Schritt wird eine qualitative Metrik ausgewählt, die die Performance hinsichtlich Verkehrszeichenerkennung in Kombination einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage am besten bewerten lässt. Mit Hilfe der zum Schluss ausgewählten Metrik können in Zukunft weitere Untersuchungen für Forschungszwecke durchgeführt werden.

## 4 Versuchsbeschreibung und -durchführung

Um die Fahrzeugperformance hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage bewerten zu können, wurden drei Testfahrzeuge von verschiedenen Automobilherstellern ausgewählt. Aufgrund der Aktualität und Verfügbarkeit der Modelle waren die drei Fahrzeuge der Mercedes E 300 de, der Volkswagen ID.4 und der Tesla Model 3. Um die Fahrzeugleistung hinsichtlich der tageszeitlich bedingten Unterschiede der genannten Systeme zu bewerten, wurden neben jeweils drei Tagesfahrten, auch drei Nachtfahrten pro Testfahrzeug durchgeführt. Diese Fahrten wurden bei klaren, bis leicht bewölkten Wetterbedingungen durchgeführt. Bei 3 von 18 Testläufen kam es aufgrund der jahreszeitlich bedingten schwankenden Wetterverhältnissen trotzdem in einigen Abschnitten der langen Teststrecke zu leichtem Regenfall. Allerdings hatte dies keinen Einfluss auf die Fahrzeugsystemleistung und kann deshalb vernachlässigt werden. Um klare Ergebnisse zu erzielen, wurden die Testfahrten bei Nacht ab 22 Uhr durchgeführt und nicht bei Sonnenuntergang, da die Blendung der Sonne negative Auswirkungen haben hätte können. Alle 18 Testfahrten wurden im Frühjahr im Zeitraum vom 27. März bis zum 18. April 2023 durchgeführt.

Folgende Tabelle zeigt die relevanten Informationen der untersuchten Fahrzeuge.

*Tabelle 6: Technische Daten und Informationen der untersuchten Testfahrzeuge nach [5]*

Fahrzeug	Erstzulassung	Softwareversion	Navigationssoftwareversion	VZE-Methode
Mercedes E 300 de	11/2020	apilevel /ntg6/081	2020 (V13.2) EUROPE GERMANY V292	Kamera & digitale Karten
Volkswagen ID.4	06/2021	2.3.0 / 0912	22.7	Kamera & digitale Karten
Tesla Model 3	11/2021	V11.1 (2023.2.12 a734fb860b32)	EU-2022.40-14215	Kamera & digitale Karten

Unter Berücksichtigung der bereits in der Einleitung genannten möglichen Herausforderungen wurde eine Teststrecke mit ca. 92,6 km definiert. Durch erste Testfahrten mit den Fahrzeugen konnte anschließend die Strecke ausgewählt werden, die die genannten Herausforderungen und Schwierigkeiten für den Verbund von Verkehrszeichenerkennung und intelligente adaptive Geschwindigkeitsregelanlage mindestens einmal beinhaltet. Begonnen haben die Fahrten an der Tiefgarageneinfahrt der Technischen Hochschule in Ingolstadt. Anschließend führt die Teststrecke über Oberhaunstadt nach Lenting und von dort auf die Autobahn A9 in Richtung München. An der Ausfahrt Langenbruck angekommen, geht es auf die B300 in Richtung Augsburg. Bei der zweiten Ausfahrt wird die B300 wieder verlassen und fährt in Richtung Ingolstadt. Auf der Höhe der Ortschaft Oberstimm, biegt die Strecke auf die B16 in Richtung Neuburg ab. Durch Neuburg fahrend und am Ende dieses Ortes, geht die Versuchstrecke nach links wieder auf die B13 in Richtung Ingolstadt und von dort nach Zell.

In Zell angekommen wird links nach Irgertsheim abgelenkt und folgt der Landstraße über Dünzlau und Gerolfing nach Ingolstadt. In Ingolstadt angekommen endet die Teststrecke wieder an der Tiefgarageneinfahrt der Technischen Hochschule in Ingolstadt.

Folgende Abbildung zeigt die definierte Teststrecke zwischen Ingolstadt und Neuburg als Basis dieser Arbeit.

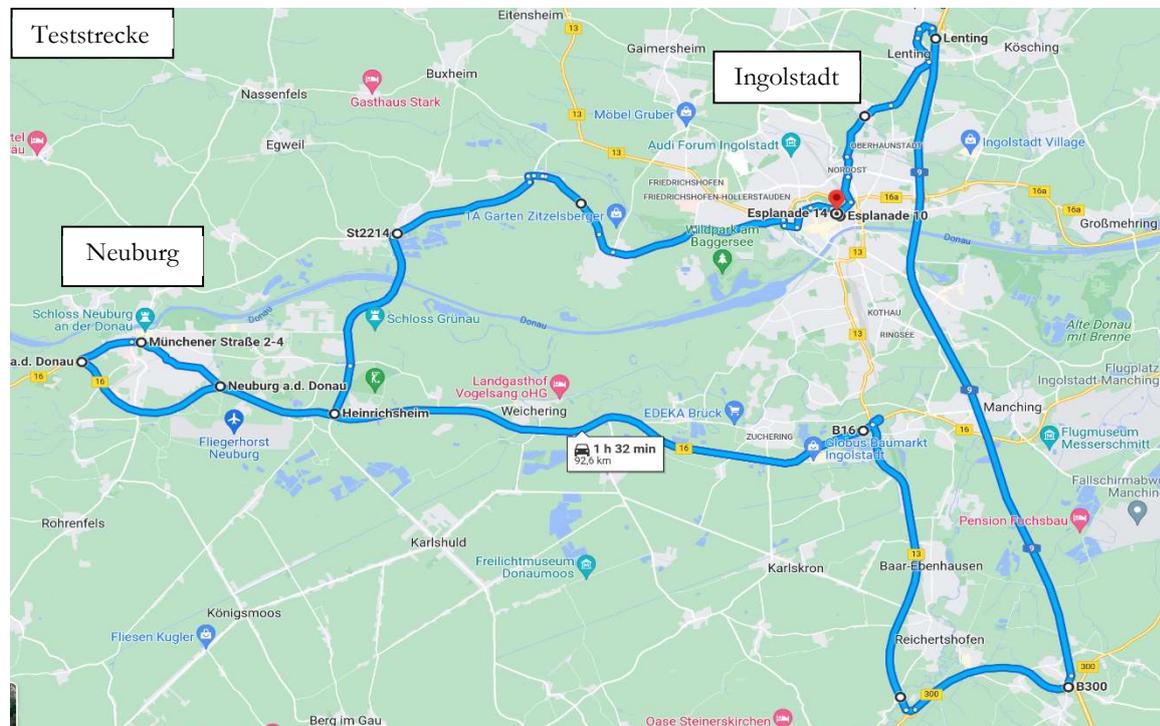
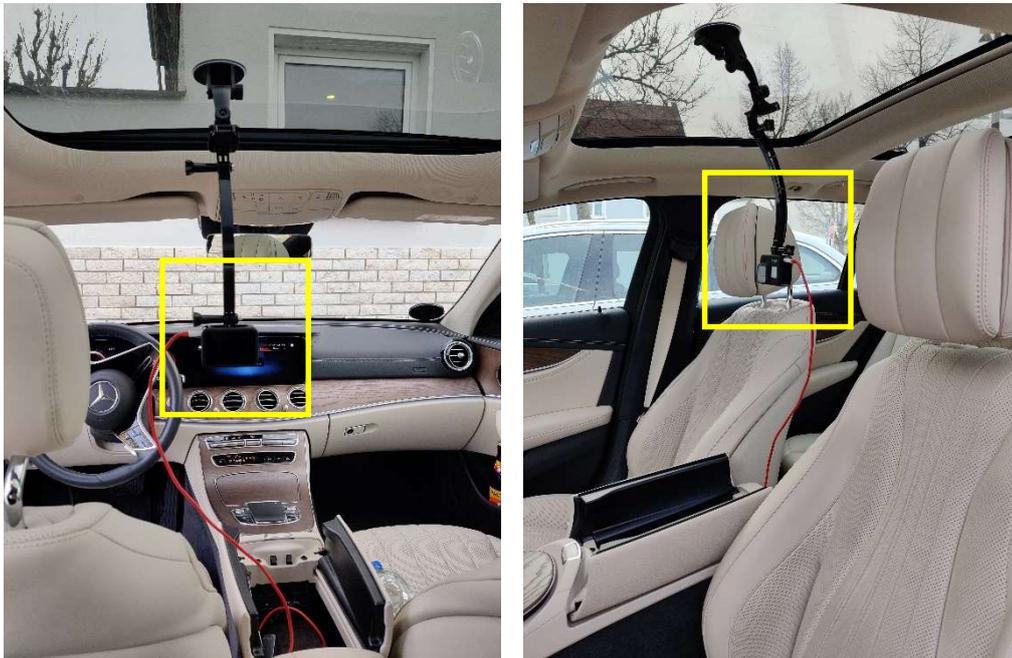


Abbildung 12: Definierte Teststrecke zwischen Ingolstadt und Neuburg für die Untersuchung der Fahrzeugperformance

Zur Visualisierung der Systemleistung wurden die Testfahrzeuge mit einer mobilen Kamera (Go Pro Hero 8) ausgestattet, um die Anzeigen dieser Fahrzeuge filmen zu können. Wenn ein Fahrzeug das Verkehrszeichen erkannt oder nicht erkannt hat, wurde dies am Display angezeigt und es konnte somit die Performance der Fahrzeuge visualisiert werden. Mit Hilfe einer Halterung wurde die Go Pro Hero 8 an den Fahrzeugdecken im Innenraum befestigt. Die Kamera wurde bereits bei der Montage so ausgerichtet, dass die Fahrzeugscheibe, als auch die Umgebung durch die Windschutzscheibe gut sichtbar waren. Zusätzlich wurde vor jeder Testfahrt die Windschutzscheibe gereinigt. Somit konnte garantiert werden, dass eine klare Sicht der Fahrzeugkamera hinter der Windschutzscheibe vorhanden ist. Bevor die 18 Testfahrten durchgeführt wurden, wurden die drei Testfahrzeuge auf alle sicherheitsrelevanten Funktionen und auf die Funktionstüchtigkeit der zu untersuchenden Fahrerassistenzsysteme in einer kurzen Probefahrt überprüft. Des Weiteren wurde nach der Probefahrt kontrolliert, ob alle Verkehrs- und Geschwindigkeitsschilder, sowie die Anzeige des Fahrzeugs, gut erkennbar für die Auswertung waren.

In folgenden Abbildungen wird der Aufbau der Go Pro Hero 8 im Innenraum in allen drei Fahrzeugen dargestellt.



*Abbildung 13: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum des Mercedes E 300 de*



*Abbildung 14: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum in der Vorderansicht des Tesla Model 3*



Abbildung 16: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum in der Seitenansicht des Tesla Model 3

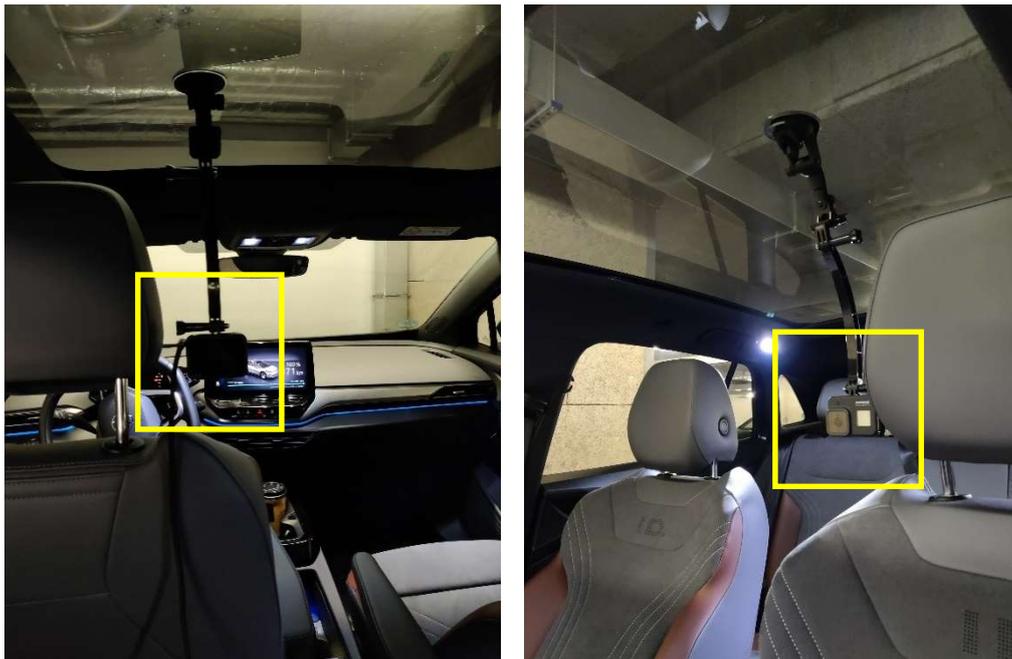


Abbildung 15: Darstellung des Aufbaus der Go Pro Hero 8 im Innenraum des Volkswagen ID.4

## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Erprobungsfahrten aller Testfahrzeuge anhand der drei verschiedenen Metriken dargestellt und beschrieben. Wie bereits oben erwähnt, sind die Testfahrzeuge der Mercedes E 300 de, der VW ID.4 und der Tesla Model 3. Bei der Auswertung war zu berücksichtigen, dass Tesla Model 3 die kommende Zielgeschwindigkeit nie automatisch angepasst hat. Bei den Erprobungsfahrten wurde stets versucht, die Geschwindigkeit nach der Erkennung des Verkehrszeichens sofort manuell durch Betätigung des VZ-Symbols am Display umzustellen bzw. zu bestätigen. Sobald das Fahrzeug das Verkehrszeichen erkannt hat, wurde von einem richtigen Verhalten des iACC ausgegangen.

### 5.1 Ergebnis Metrik 1

In Abbildung 17 ist die Leistung der Fahrzeuge über alle Versuchsfahrten dargestellt, welche den prozentualen Anteil der Kategorisierung zeigt. Das Tortendiagramm, welches sich links oben befindet, zeigt die zusammengefasste Leistung aller Fahrzeuge und Versuchsfahrten. Hier ist vor allem zu sehen, dass die Verkehrszeichenerkennung in 90,53% aller Fälle die Verkehrszeichen richtig erkannt hat (Kategorisierung 2-7). Hingegen wurden 5,61% falsch erkannt und 3,86% der Verkehrszeichen wurden nicht erkannt. Unter Berücksichtigung des iACC wurde die Geschwindigkeit in ca. einem Drittel aller Verkehrssituationen bereits bei der Einfahrt in die Geschwindigkeitszone angepasst. In 53,51% der Fälle wurde die Geschwindigkeit erst beim Einfahren in die neue Zone angepasst. In 3,45% der Fälle wurde die Geschwindigkeit zu spät oder zu früh angepasst. Falsche oder keine Geschwindigkeitsanpassungen waren eher selten der Fall. Allerdings kam es trotzdem immer wieder zu Situationen, bei denen die Verkehrszeichenerkennung und der iACC falsch reagierten. Neben der Gesamtleistung der Fahrzeuge, wurde die individuelle Leistung der Fahrzeuge bewertet und dargestellt. Insgesamt kristallisiert sich heraus, dass die Verkehrszeichenerkennung des Mercedes am zuverlässigsten agiert hat. In 93,16% der Fälle hat die Verkehrszeichenerkennung das Verkehrszeichen erkannt (Kriterien 2-7). Der Tesla zeigt mit 88,60% an erkannten Verkehrszeichen die unzuverlässigste Leistung aller Fahrzeuge. Hier wurden sogar in 9,82% der Fälle das Verkehrszeichen falsch erkannt und weitere 1,58% werden überhaupt nicht erkannt. Die eindeutigsten Unterschiede zeigen sich bei der Geschwindigkeitsregelung. Während der Volkswagen in 48,42% aller Fälle die Geschwindigkeit bereits beim Einfahren der Zone richtig angepasst hat, zeigt der Tesla mit nur 17,02% die schlechteste Leistung. Der Mercedes ist mit 27,89% im Mittelfeld einsortiert. Ein nächster erwähnenswerter Punkt ist der hohe Anteil an falsch (Kategorie: 4) und nachträglich in der Zone falsch (Kategorie: 2) angepassten Geschwindigkeiten des Teslas. Ebenfalls zeigt der Tesla bei der Kategorie 5 das schlechteste Ergebnis. Hier wurden die Verkehrszeichen zu 6,67% aller Fälle entweder zu früh oder zu spät erkannt. Weiter ist zu sagen, dass bei allen Fahrzeugen überwiegend die Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone erst ab dem Verkehrszeichen angepasst wurde.

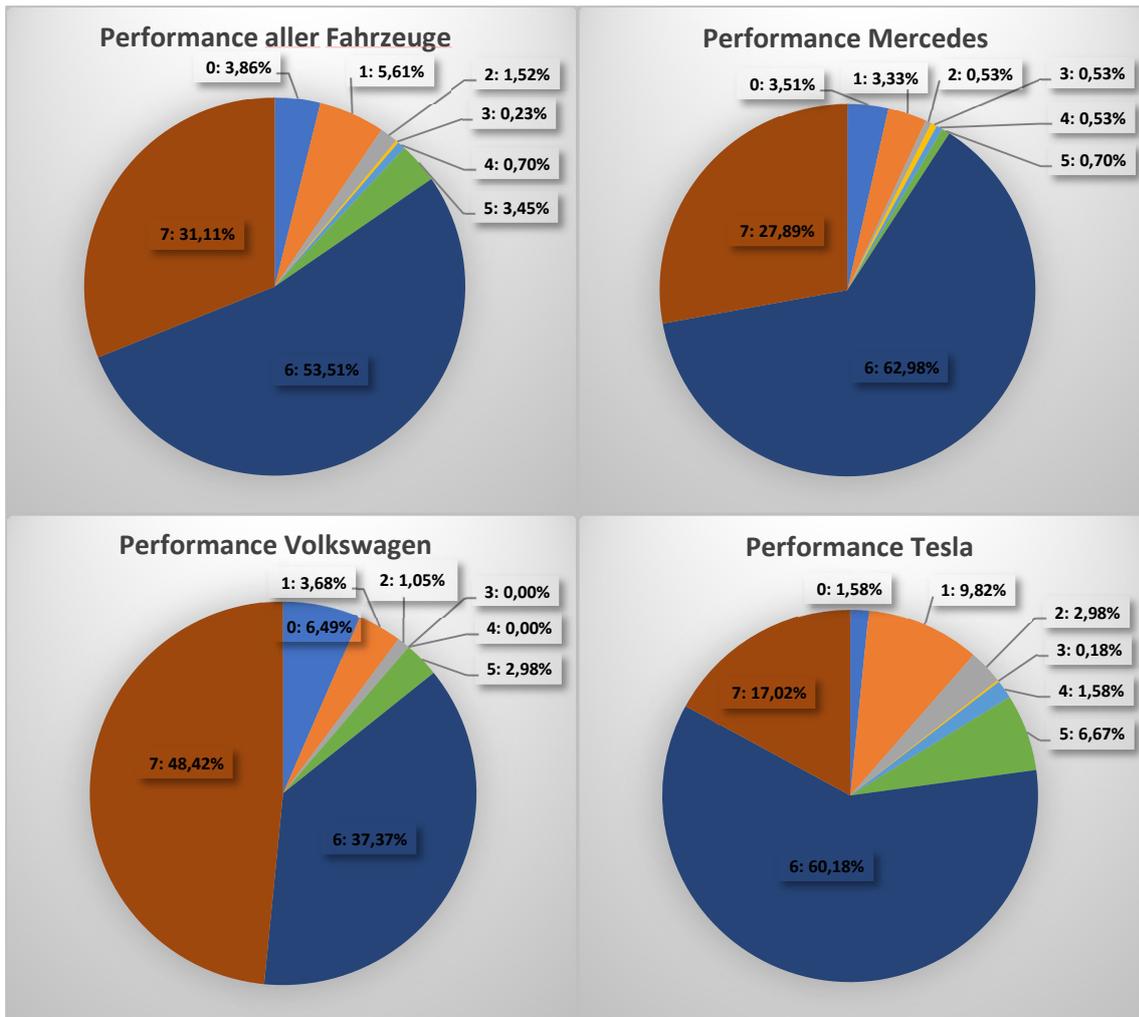


Abbildung 17: VZE-Performance und iACC-Performance der Testfahrzeuge gesamt und individuell über alle Testfahrten (Tag und Nacht) nach [5]

Die Abbildung 18 zeigt die Leistung der Versuchsfahrzeuge am Tag. Hier ist ersichtlich, dass der Mercedes am Tag mit 93,33% (Kategorie 2-7) die zuverlässigste Leistung hinsichtlich der Verkehrszeichen-erkennung aufweist. Am schlechtesten ist der Tesla, der nur 88,42% (Kategorie 2-7) aller Verkehrszeichen richtig erkennt. Zudem passt der Tesla die Geschwindigkeit zu 17,55% falsch oder überhaupt nicht an (Kategorie 0-4). Mit 8,77% zeigt auch hier der Mercedes die beste Leistung aller Fahrzeuge bei Tag. Volkswagen erzielt hingegen mit großem Abstand in der Kategorie 7 mit 49,12% die beste Leistung. Das Fahrzeug erkannte das Verkehrszeichen und passte die Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone so an, dass bereits beim Einfahren in die Zone die Geschwindigkeit erreicht wurde. Hier erzielte der Tesla erneut die unzuverlässigste Leistung mit nur 16,14%. Auffällig jedoch ist, dass der Volkswagen in 7,02% aller Fälle das Verkehrszeichen überhaupt nicht erkennt und der iACC die Geschwindigkeit deshalb nicht anpasste. Im Vergleich zu den beiden anderen Fahrzeugen schnitt in dieser Kategorie (0) der Volkswagen am schlechtesten und der Tesla mit 2,11% aller Fälle am besten ab. In 6,67% aller Fälle, passte der iACC des Tesla nach Erkennung des Verkehrszeichens die Geschwindigkeit zu früh oder zu spät an (Kategorie: 5).

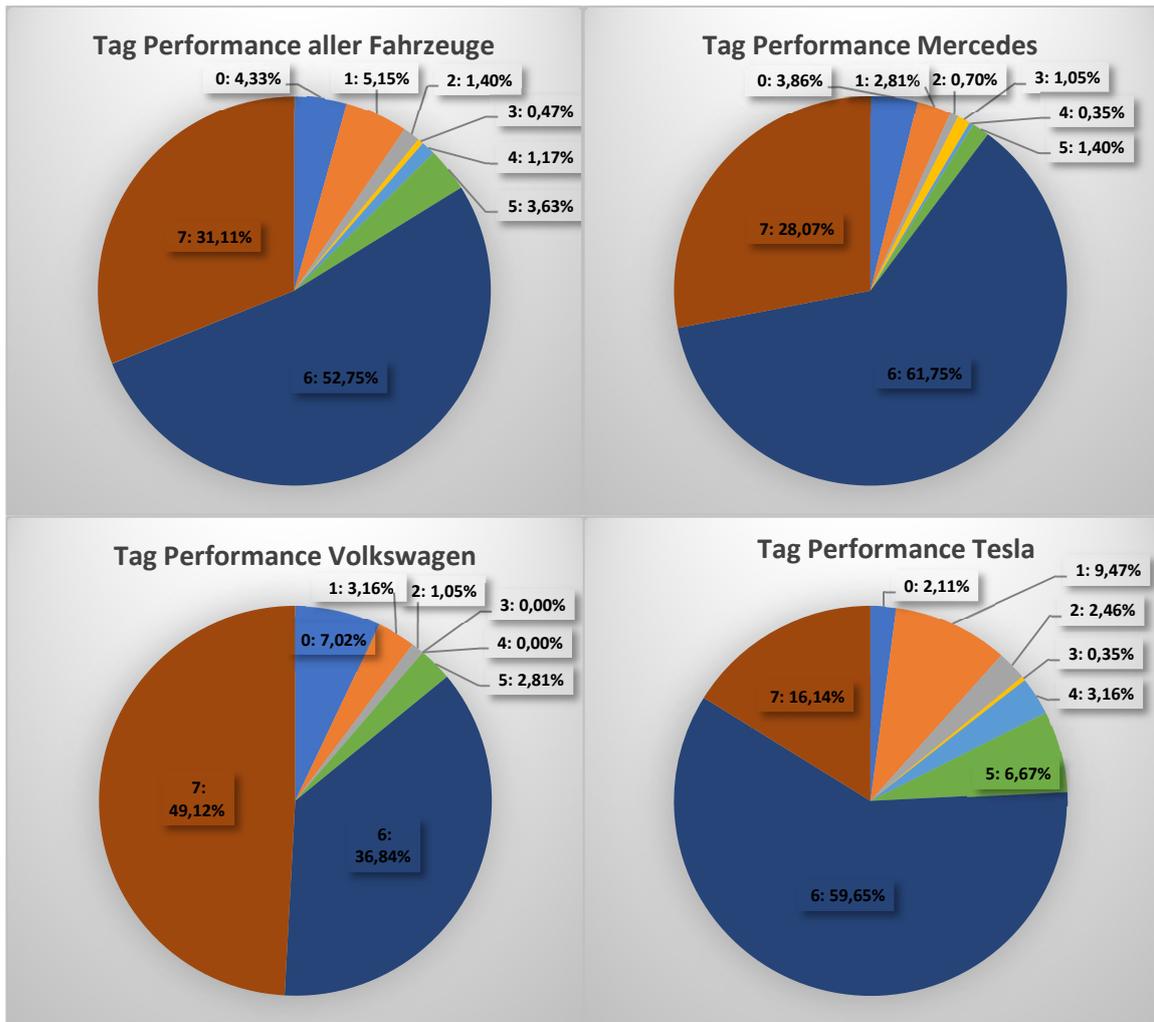


Abbildung 18: VZE-Performance und iACC-Performance der Testfahrzeuge gesamt und individuell am Tag nach [5]

In Abbildung 19 wird die Leistung der Versuchsfahrzeuge bei Nacht dargestellt. Allgemein lässt sich sagen, dass die Erkennung der Verkehrszeichen nachts besser ist als tagsüber. Die Verkehrszeichen werden zu 90,53% richtig erkannt. Zudem ist nachts die Nichterkennungsrate (Kategorie: 0) der Verkehrszeichen für alle Fahrzeuge um 0,94% besser als bei Tag. Allerdings ist der Anteil an falsch erkannten Verkehrszeichen um 0,93% höher als bei Tag. Eine mögliche Ursache dafür könnte die Reflexion der metallischen Verkehrsschilder sein, die durch die Scheinwerfer angestrahlt werden und sich deshalb die Erkennbarkeit verschlechtert. Ein weiterer Grund für die leicht bessere Performance bei Nacht könnte das erhöhte Verkehrsaufkommen sein, da insbesondere LKW und Transporter die Sicht auf die Verkehrsschilder bei Tag verhindern können.

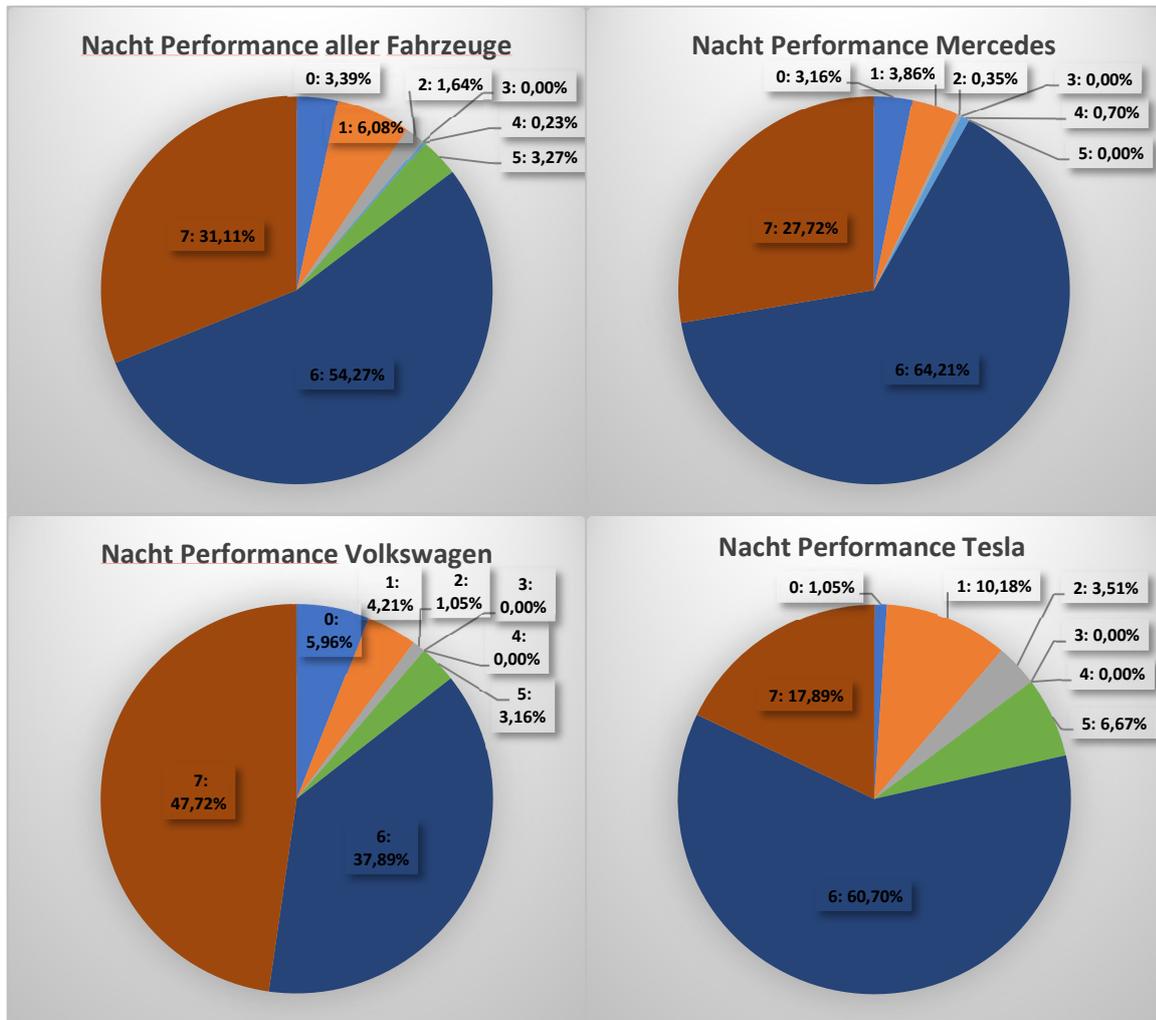


Abbildung 19: VZE-Performance und iACC-Performance der Testfahrzeuge gesamt und individuell bei Nacht nach [5]

## 5.2 Ergebnis Metrik 2

Die zweite Metrik bewertet die Performance der Verkehrszeichenerkennung und des iACC zunächst einzeln. Im Anschluss werden die Ergebnisse ähnlich eines KPIs zusammengeführt. Die Abbildung 20, welches als Säulendiagramm dargestellt ist, zeigt die Leistung der Fahrzeuge über alle Versuchsfahrten. In der Abbildung ist zu erkennen, dass über alle Fahrzeuge hinweg, die Verkehrszeichen zu 82,27% aller Fälle richtig erkannt wurden und der iACC die Geschwindigkeit im Schnitt nur zu 39,86% korrekt anpasste. Mit Hilfe der oben aufgeführten Formel für die Verkehrszeichenerkennung, welche den Faktor Zeit berücksichtigt, konnte der Mercedes mit seiner Leistung von 88,77% am besten überzeugen. Das bedeutet, dass der Mercedes im Schnitt zwischen einer und zwei Sekunden benötigte, um das Verkehrszeichen richtig zu erkennen. In 81,54% aller Fälle, hatte der Volkswagen die Verkehrszeichen richtig erkannt. Der Tesla erkannte die Verkehrszeichen hingegen nur zu 76,49% richtig. Wie in Abbildung 20 zu sehen, kann der iACC mit der oben hinterlegten Formel nur auf maximal 51,25% kommen, welches der Volkswagen erreichte. Während der Volkswagen in den meisten Fällen bereits mit der Zielgeschwindigkeit der kommenden Zone das Verkehrszeichen passierte, hatte der Mercedes und der Tesla die Geschwindigkeit erst beim Einfahren in die neue Zone angepasst. Am unzuverlässigsten zeigt sich der Tesla mit gerade einmal 31,92% aller Fälle. Die Gesamtperformance  $P_G$  ergibt sich aus der Zusammenführung der Verkehrszeichenerkennung und des iACC. Auf Basis der oben genannten Formel konnte folgendes Ergebnis erzielt werden: Über alle Testfahrzeuge und Versuchsfahrten hinweg konnte ein Wert von 61,07% erzielt werden. Der Volkswagen zeigt mit 66,40% die beste Gesamtperformance. Knapp dahinter der Mercedes mit 62,20% und der Tesla mit 54,20%.

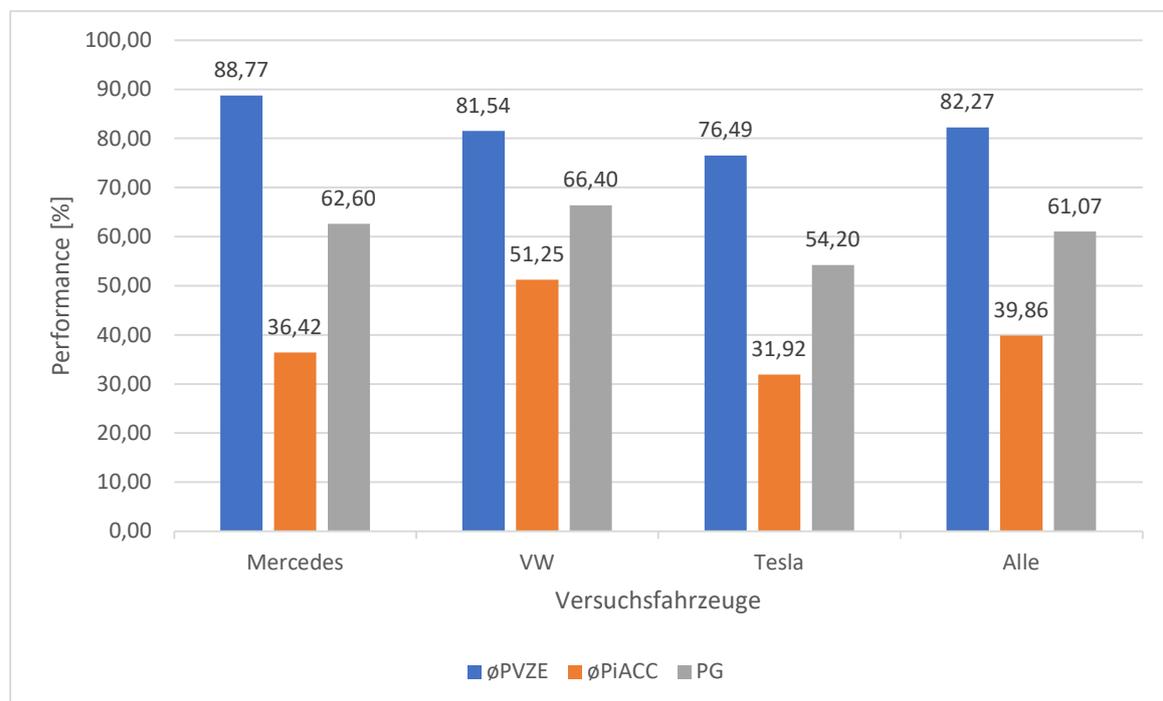


Abbildung 20: Darstellung der Leistung aller Testfahrzeuge gesamt und individuell über alle Testfahrten (Tag und Nacht) unter Anwendung der Metrik 2

Die Abbildung 21 zeigt die Performance der beiden Fahrerassistenzsysteme und die Gesamtpformance der einzelnen Fahrzeuge, sowie die Leistung aller Fahrzeuge zusammen am Tag. Das Säulendiagramm auf der rechten Seite zeigt die zusammengefasste Leistung aller Fahrzeuge tagsüber. Hier ist zu sehen, dass die Versuchsfahrzeuge im Schnitt 81,43% aller Fälle die Verkehrszeichen richtig erkennen. Das bedeutet, dass die Verkehrszeichenerkennung ungefähr zwei Sekunden vor bzw. nach dem Passieren des Verkehrsschildes, die neue Geschwindigkeitszone richtig erkannt hat. Während die Verkehrszeichenerkennung im Durchschnitt eine solide Leistung zeigte, kann der iACC mit der Performance weniger gut überzeugen. Dieser erreichte 42,52%, bei dem der iACC die Geschwindigkeit richtig angepasst hat. Die Gesamtpformance ergibt sich wieder aus dem Durchschnitt der Verkehrszeichenerkennung und des iACC. Tagsüber wurde über aller Fahrzeuge hinweg eine Gesamtpformance von 61,97% erzielt. Das heißt, dass sich die Versuchsfahrzeuge bei ca. 2/3 aller Verkehrssituationen richtig verhalten haben. Ebenfalls ist auffällig, dass der Mercedes mit 88,63% aller Fälle, die Verkehrszeichen um 14,28% besser erkennt als der Tesla. In 51,86% aller Fälle, erzielte der Volkswagen mit der Leistung des iACC die zuverlässigste Performance. Der Tesla erzielte auch unter Anwendung dieser Metrik die schlechteste iACC-Performance.

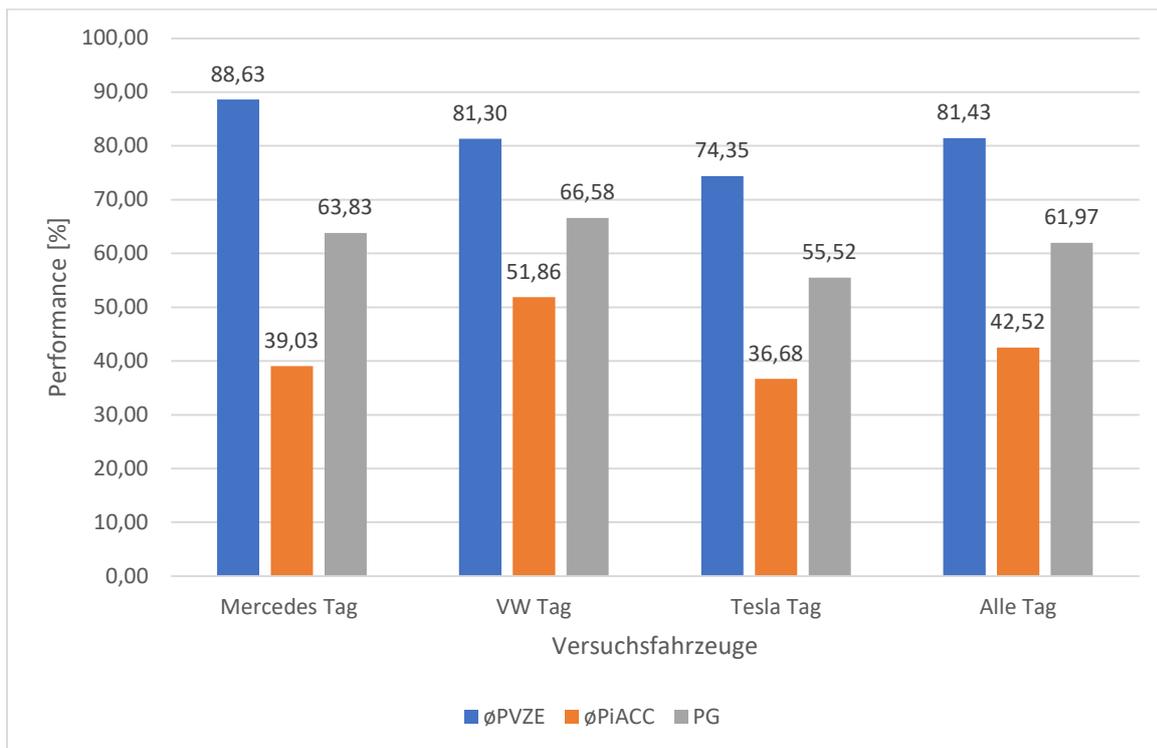


Abbildung 21: VZE-Performance, iACC-Performance und Gesamtpformance der Testfahrzeuge gesamt und individuell am Tag unter Anwendung der Metrik 2

In Abbildung 22 wird die Performance der beiden Fahrerassistenzsysteme und die Gesamtperformance der einzelnen Fahrzeuge, sowie die Leistung aller Fahrzeuge zusammen bei Nacht dargestellt. Allgemein lässt sich sagen, dass die Verkehrszeichenerkennung bei allen drei Versuchsfahrzeugen nachts besser ist als tagsüber. Allerdings ist im Gegenzug die Geschwindigkeitsanpassung am Tag bei allen drei Fahrzeugen besser als nachts. Hier erreichte der Mercedes nur 33,81%, der Volkswagen 50,65% und der Tesla 27,15%. Dies hat zur Folge, dass die Gesamtperformance der einzelnen Fahrzeuge, als auch die Gesamtperformance über alle Versuchsfahrzeuge hinweg, nachts schlechter ist als tagsüber. Mit 61,36% hat der Mercedes um 2,47%, der Volkswagen um 0,36% und der Tesla um 2,63% schlechter abgeschnitten als bei den Tagfahrten. Am besten konnte der Mercedes mit 88,91% aller Fälle die Verkehrszeichen bei Nacht richtig erkennen. Anschließend der Volkswagen mit 81,79% und zu guter Letzt der Tesla mit 78,63%.

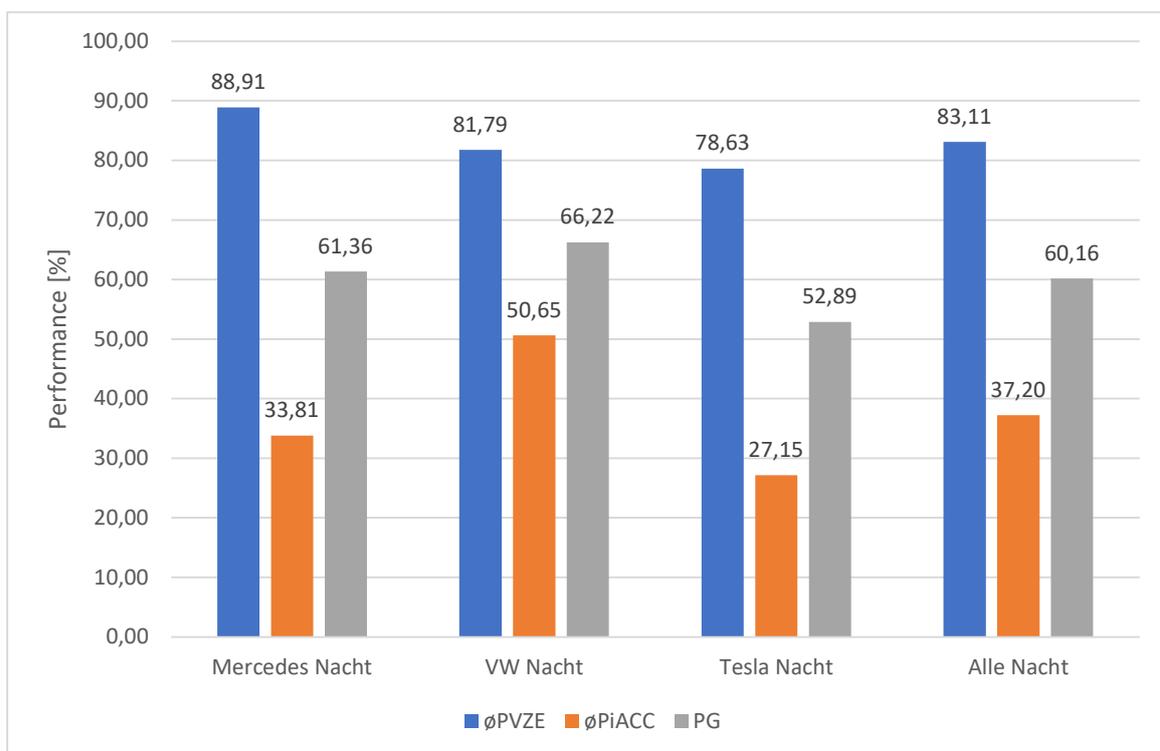


Abbildung 22: VZE-Performance, iACC-Performance und Gesamtperformance der Testfahrzeuge gesamt und individuell bei Nacht unter Anwendung der Metrik 2

### 5.3 Ergebnis Metrik 3

In Abbildung 23 ist die Leistung der Fahrzeuge über alle Versuchsfahrten hinweg dargestellt. Das Säulendiagramm, welches sich rechts befindet, zeigt die zusammengefasste Leistung aller Fahrzeuge und Versuchsfahrten. Da die Verkehrszeichenerkennung und der iACC mit dieser Metrik ausschließlich gemeinsam bewertet wurden, ist hier zu sehen, dass die Versuchsfahrzeuge über alle Testfahrten in 87,84% aller Fälle die Verkehrssituationen richtig erkannt und sich richtig verhalten haben. Am überzeugendsten war der Mercedes. Dieser erkannte zu 92,11% aller Verkehrssituationen die Verkehrszeichen und passte die Geschwindigkeit korrekt an. Der Volkswagen verhielt sich ungefähr in 9 von 10 Verkehrssituationen korrekt. Der Tesla hingegen, hatte im Schnitt nur ungefähr 8 von 10 Verkehrssituationen richtig erkannt und die Geschwindigkeit angepasst.

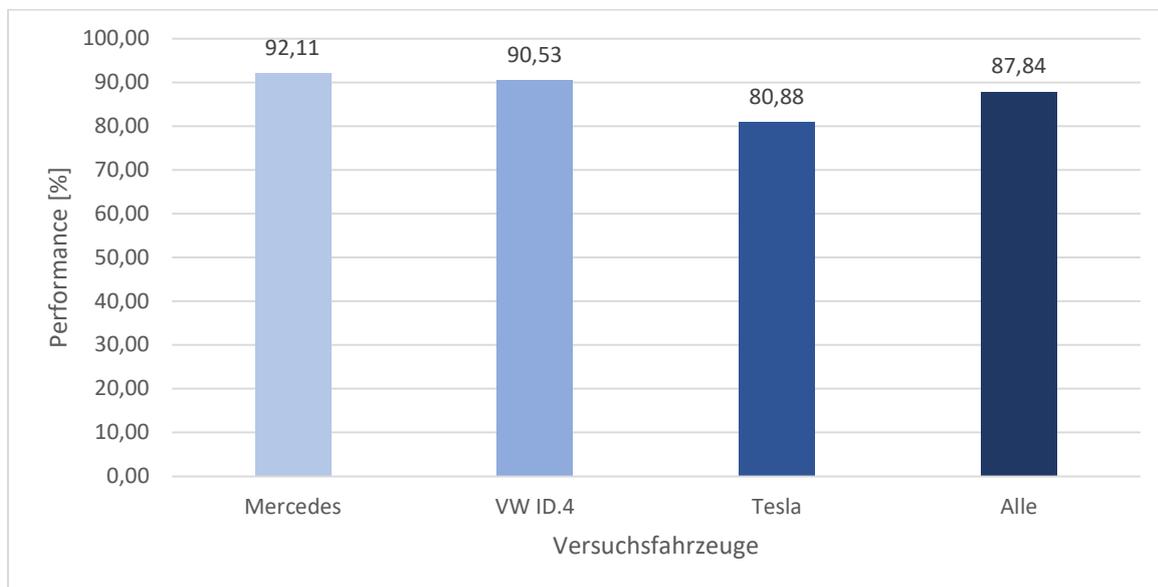


Abbildung 23: Darstellung der Gesamtperformance aller Testfahrzeuge gesamt und individuell über alle Testfahrten (Tag und Nacht) mit der Metrik 3

Die Abbildung 24 zeigt die Leistung der Testfahrzeuge am Tag. Hier erwies sich der Mercedes als ein Fahrzeug mit der konsequentesten Leistung. Mit 91,93% verhielt sich der Mercedes in 9 von 10 Fällen richtig. Auffällig ist die Leistung des Tesla, die im Gegensatz zu den anderen Fahrzeugen mit 78,95% relativ gering ausfällt. Der Tesla hatte vor allem am Tag Probleme mit der Erkennung von zeitabhängigen Geschwindigkeitszonen. Hier erkannte das Fahrzeug kaum ein Verkehrszeichen richtig und erzielte deshalb in diesen Zonen keine Punkte. Der Volkswagen, der des Öfteren die Zielgeschwindigkeit bereits weit vor der neuen Zone erreichte, kam mit einer Tages-Performance von 89,82% erneut zu einer guten Leistung und reiht sich somit hinter dem Mercedes und vor dem Tesla ein. Alle Fahrzeuge zusammen und über alle Tagfahrten hinweg, konnte unter Anwendung dieser Metrik eine Performance von 86,90% erzielt werden, welches die rechte Säule darstellt.

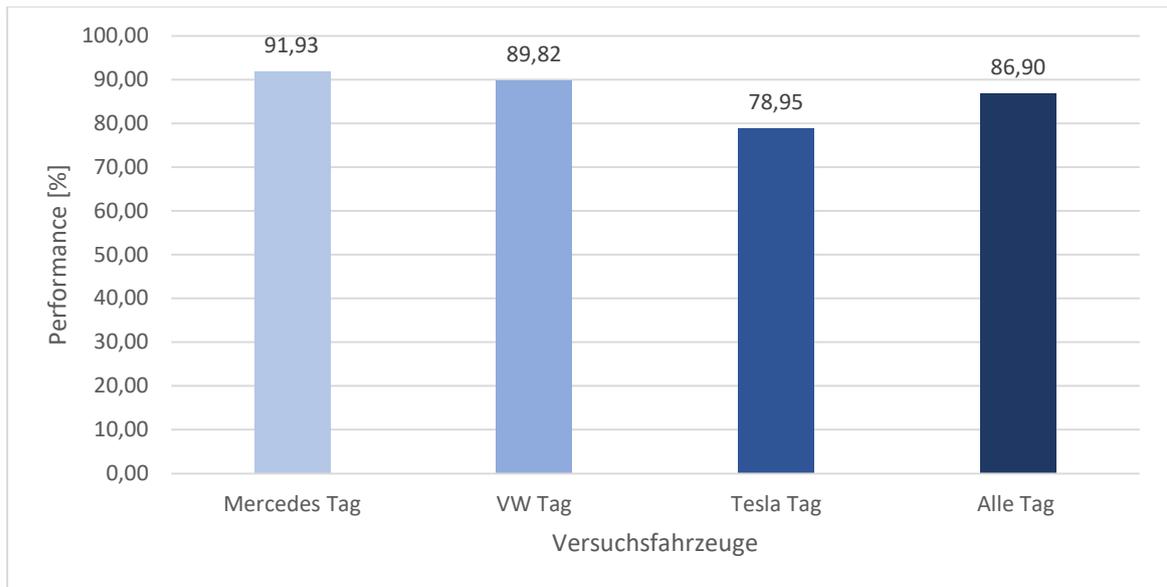
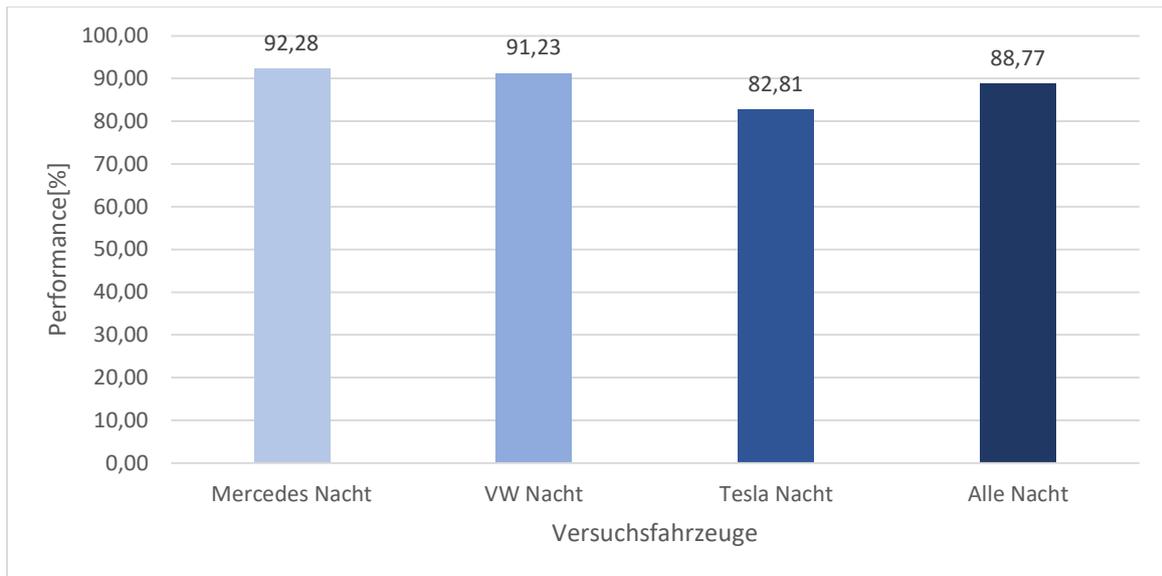


Abbildung 24: Darstellung der Gesamtpformance aller Testfahrzeuge gesamt und individuell am Tag unter Anwendung der Metrik 3

In Abbildung 25 ist die Leistung der Versuchsfahrzeuge bei Nacht dargestellt. Allgemein lässt sich sagen, dass unter Anwendung dieser Metrik die Leistung der Fahrzeuge nachts (88,77%) erneut besser war als tagsüber (86,90%). Der Tesla verhielt sich nachts deutlich zuverlässiger als tagsüber. Mit 82,81% an richtig bewerteten Verkehrssituationen, erzielte das Fahrzeug um 3,86% eine bessere Leistung als bei den Testfahrten am Tag. Diese Differenz kann vor allem daher kommen, da der Tesla die zeitabhängigen Geschwindigkeitszonen nachts deutlich besser erkannte und die Geschwindigkeit richtig anpasste. Eine mögliche Ursache dafür könnten fehlerhafte Navigationsdaten sein, die die Geschwindigkeitszonen tagsüber falsch erkennen. Der Volkswagen erzielte ebenfalls in der Nacht eine bessere Leistung als am Tag. Auffällig war, dass der Volkswagen nachts das Verkehrszeichen „Ende der zulässigen Höchstgeschwindigkeit“, welches von einer 70er Zone in eine 100er Zone übergeht und auf der anderen Straßenseite einer 3-spurigen Fahrbahn aufgestellt war, deutlich öfter erkannte als bei Tag. Hier könnte das erhöhte Verkehrsaufkommen eine mögliche Ursache sein, da insbesondere LKWs und Transporter die Sicht auf die Verkehrsschilder bei Tag verhindern können. Anhand der besseren Performance in diesen Situationen, erreichte der Volkswagen eine Leistung von 91,23% bei Nacht. Der Mercedes zeigte ebenfalls nachts die beste Gesamtpformance. In 92,28% aller Fälle, konnte das Fahrzeug die Verkehrszeichen richtig erkennen und die Geschwindigkeit korrekt anpassen.



*Abbildung 25: Darstellung der Gesamtperformance aller Testfahrzeuge gesamt und individuell bei Nacht unter Anwendung der Metrik 3*

## 6 Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die drei Metriken auf Basis des Erfüllungsgrades der jeweiligen Kriterien, welche eine Metrik beschreiben, verglichen und bewertet.

Das erste Kriterium ist die Objektivität. Unter der Annahme, dass die Auswertung von jeder auswertenden Person gewissenhaft erfolgt und der Zeitpunkt des Ablesens beim Ansehen des Videomaterials gleich ist, ist die Objektivität bei Metrik 1 nur bedingt gegeben. Bei dieser Metrik, welche eine Kategorisierung ist, wurde eine subjektive Vorauswahl mit einer Zeitbegrenzung und einer individuellen Punktevergabe getroffen. Aufgrund dessen kann bei dieser Metrik nur ein Plus vergeben werden. Werden die Zeitgrenzen durch eine subjektive Festlegung verändert, besteht die Möglichkeit, dass andere Ergebnisse erzielt werden. Ebenso spielt bei Metrik 2 der Zeitfaktor eine wesentliche Rolle. Hier wird durch Ablesen des Tachos, unabhängig von der auswertenden Person, vorerst auf eine hohe Objektivität geschlossen, da sowohl iACC als auch Verkehrszeichenerkennung abgelesen werden können. Durch den einfließenden Zeitfaktor kann jedoch auch bei dieser Metrik nur ein Plus vergeben werden. Die dritte Metrik ist mit einer hohen Objektivität zu bewerten, da diese die Verkehrssituationen nur als richtig oder falsch erkennt. Da es hier keinen Spielraum für subjektive Einflüsse gibt, wird die Objektivität bei dieser Metrik mit zwei Plus bewertet. Das Gütekriterium ist an alle drei Metriken gut anwendbar, jedoch ist die Messmethode aufgrund der Unterschiede des betrachteten Zeitpunktes beim Passieren des Verkehrszeichens weniger objektiv und unterliegt subjektiven Einflüssen.

Als nächstes Kriterium wird die Reliabilität betrachtet. Dies bedeutet, dass die Zuverlässigkeit eines Tests hoch ist, wenn ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Bei dem Vergleich der drei Tag- und Nachtfahrten der verschiedenen Fahrzeuge miteinander, können bei Metrik 1, unter Ansatz des ingenieurmäßigen Sachverstandes, ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Gleiches gilt für Metrik 2 und 3. Alle drei Metriken können unter der Test-Retest-Methode, bei der die Versuchsfahrten zu unterschiedlichen Zeitpunkten und ähnlichen Bedingungen durchgeführt wurden, betrachtet und verglichen werden. Somit sind alle drei Metriken gleich reliabel.

Eine Metrik ist valide, wenn die Messung zielgerichtet das zu untersuchende Merkmal misst und erfasst. Es soll herausgefunden werden, ob das Ergebnis der Untersuchung der Wirklichkeit entspricht und wiedergibt. Dazu wurde der Fahrer der Versuchsfahrzeuge befragt und machte folgende Angaben:

Auf die Frage, welches der Versuchsfahrzeuge die beste Performance hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung und des iACC hat, war die Antwort, dass der Mercedes am besten abschnitt, als zweites der Volkswagen und am schlechtesten der Tesla. [35] Nach der Auswertung des Videomaterials der einzelnen Versuchsfahrten, zeigen die Ergebnisse, dass unter der Betrachtung von Metrik 3 die gleiche Reihenfolge gegeben ist, während bei den Ergebnissen der ersten und zweiten Metrik der Volkswagen am besten abschneidet.

Als nächstes wurde der Fahrer auf die Performance der einzelnen Fahrerassistenzsysteme befragt. Desse Eindruck war es, dass die Verkehrszeichenerkennung des Volkswagen und des Mercedes gleich gut performten und am schlechtesten der Tesla abschnitt. Der iACC zeigte bei dem Volkswagen die beste Leistung, während hingegen der Mercedes und der Tesla gleich bewertet wurden. [35]

Die Ergebnisse der Metrik 1 zeigen, dass der Mercedes die Verkehrszeichen am häufigsten erkannte und der Volkswagen sowie der Tesla ungefähr die gleiche Leistung erzielten. Unter der Anwendung der Metrik 2, brachte erneut der Mercedes die beste Leistung hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung, gefolgt von dem Volkswagen und einem erneut deutlichen Abstand des Tesla.

Wie bei Metrik 1 und Metrik 2, ist der Mercedes auch bei Metrik 3 führend. Allerdings ist der Volkswagen mit dem Mercedes gleichzusetzen. Der Tesla schneidet wiederholt am schlechtesten ab. Wird die Performance des iACC betrachtet, schneidet unter Anwendung aller drei Metriken der Volkswagen am besten ab und der Tesla am schlechtesten. Somit decken sich die Ergebnisse der iACC Performance mit dem Eindruck des Fahrers.

Auf die Frage, ob signifikante Unterschiede der einzelnen Fahrerassistenzsysteme zwischen Tag und Nacht erkennbar waren, gab der Fahrer an, dass dies nicht der Fall war. [35] Die Ergebnisse zeigen, dass unter Anwendung drei verschiedener Metriken keine signifikanten Unterschiede zwischen Tag und Nacht ersichtlich sind. Allgemein lässt sich sagen, dass alle drei Metriken das Kriterium Validität erfüllen, aber unter Anwendung der Metrik 3 den Eindruck des Fahrers mehr bestätigt. Daher wird die dritte Metrik mit zwei Plus bewertet, während ein Plus für Metrik 1 und Metrik 2 vergeben wird.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Einfachheit der Erhebung. Eine Metrik ist dann als einfach zu bezeichnen, wenn wenige Faktoren oder Elemente in die Metrik einfließen. Dadurch können potenzielle Fehlerquellen vermieden und aussagekräftige Resultate erzielt werden. Die erste Metrik umfasst acht Kategorisierungsstufen, welche von 0 bis 7 deklariert sind. Zudem beeinflusst ausschließlich der Faktor Zeit die Metrik als potenzielle Fehlerquelle. Somit ist diese Metrik einfach anzuwenden und das Kriterium ist als erfüllt anzusehen. Allerdings kann aufgrund des Zeitfaktors in dieser Metrik nur ein Plus angesetzt werden. Bei der zweiten Metrik wird der iACC und die Verkehrszeichenerkennung zunächst einzeln bewertet und anschließend ähnlich eines Key Performance zusammengefasst. Der Faktor Zeit spielt erneut bei der Bewertung der Verkehrszeichenerkennung eine Rolle und die Gesamtperformance wird durch das Zusammenführen zweier Ergebnisse errechnet. Hierbei handelt es sich um eine komplexe Metrik, bei der die Gefahr der Fehleranfälligkeit als sehr hoch einzustufen ist und daher das Kriterium am schlechtesten erfüllt. Das Gegenteil stellt die dritte Metrik dar, die das Kriterium am besten erfüllt. Bei dieser Metrik wird eine Verkehrssituation als richtig bewertet, sobald das Fahrzeug das Verkehrszeichen erkennt und der iACC die Zielgeschwindigkeit anpasst. Somit wird anschließend mit einem Key Performance Indikator die Anzahl aller richtig bewerteten Verkehrssituationen ins Verhältnis mit allen zu bewerteten Verkehrssituationen gesetzt. Diese Metrik ist als sehr einfach einzustufen.

Eine Metrik muss neben der Erfüllung der bisher genannten Kriterien eine gewisse Repräsentanz aufweisen. Allgemein bedeutet Repräsentanz, dass ausgehend von einer kleinen Stichprobe, Rückschlüsse auf die Gesamtheit gezogen werden kann. Aufgrund ähnlicher Ergebnisse der Metriken für die einzelnen Versuchsfahrten je Fahrzeug, scheinen diese Metriken repräsentative Ergebnisse für die jeweiligen Fahrzeuge mit dessen Sensorik und aktuellem Softwarestand zu liefern. Diese Repräsentativität beschränkt sich jedoch nur auf Einzelfahrzeuge. Die Ergebnisse der Metrik lassen nicht von einem Fahrzeug auf ein anderes schließen, was beispielsweise anhand der unterschiedlichen Ergebnisse des Teslas und Mercedes bei Tag zeigen. Auf die Grundgesamtheit aller Fahrzeuge lässt sich somit nur schwer schließen. Wird als Grundgesamtheit jedoch das einzelne Fahrzeugmodell definiert, zeigen alle drei Metriken ähnliche Ergebnisse für die jeweilige Versuchsfahrt. Zur Überprüfung dieser „Ähnlichkeit“ der Ergebnisse wird definiert, dass alle drei Fahrversuche über Tag und Nacht der einzelnen Fahrzeuge eine prozentuale Übereinstimmung von mindestens 95% besitzen sollen. Dies wird unter Anwendung der Metrik 1 und 3 bei allen Versuchen erreicht. Daher werden beide Metriken hinsichtlich des Kriteriums als gleich repräsentativ betrachtet und bewertet. Metrik 2 hingegen erzielte bei den Nachtversuchen des Mercedes nur eine prozentuale Übereinstimmung von 94,35% und liegt knapp unter der Grenze von 95%. Daher wird diese Metrik nur mit einem Plus bewertet.

Des Weiteren muss eine Metrik eindeutig sein. Das bedeutet, dass die erzielten Ergebnisse in mehreren Abbildungen dargestellt werden können und eine klare aussagekräftige Bedeutung haben. Diese Abbildungen dürfen zudem genau eine Interpretation zulassen und es besteht keine Gefahr der Verwirrung und Unsicherheit darüber, was es zu bedeuten hat. Die Ergebnisse der Fahrzeugperformance unter Anwendung der Metrik 1 lässt sich, wie in Abbildung 26 zu sehen, in mehreren Diagrammen darstellen. Sowohl das Kreisdiagramm als auch das Säulen- und Balkendiagramm zeigen eindeutig, dass die Kategorisierungsstufe 6 am häufigsten und die Kategorisierungsstufe 3 am wenigsten erzielt wurde. Allerdings kann aus den einzelnen Abbildungen nicht direkt herausgelesen werden, welches der beiden Systeme fehlerhaft reagierte. Um einzusehen, was hinter den einzelnen Kategorisierungsstufen steckt, müsste ein Blick auf die Metrik geworfen werden. Allgemein lässt sich sagen, dass das Kriterium „Eindeutigkeit“ bei der ersten Metrik erfüllt wurde, aber nur mit einem Plus bewertet wird. Die folgende Abbildung zeigt die Gesamtperformance aller Fahrzeuge in drei verschiedenen Diagrammen.

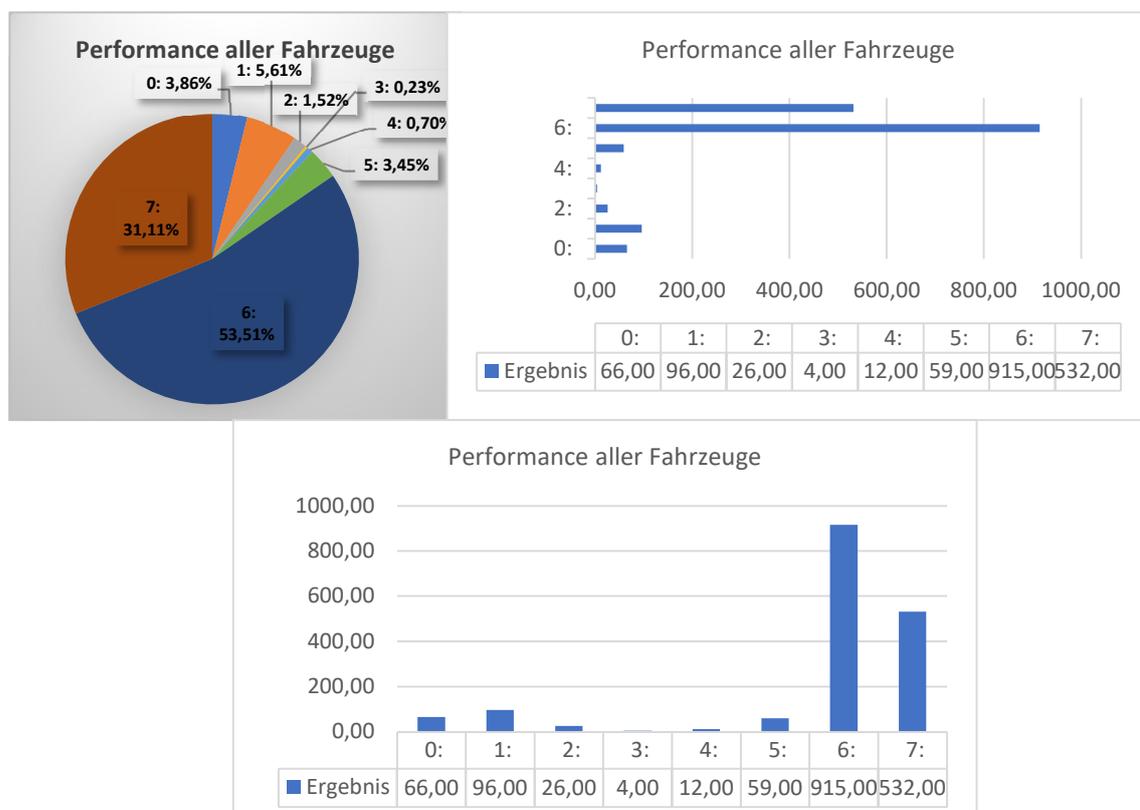


Abbildung 26: Darstellung der VZE-Performance und der iACC-Performance aller Fahrzeuge gesamt in drei verschiedenen Diagrammen unter Anwendung der Metrik 1

Ebenso wie bei der ersten Metrik, lassen sich die Ergebnisse der zweiten Metrik, in verschiedenen Darstellungen abbilden. Alle drei Diagramme in der Abbildung 27 zeigen, dass die Gesamtperformance des Volkswagen am besten und die des Tesla am schlechtesten war. Im Gegensatz zu Abbildung 26 zeigt die Abbildung 27 die Performance der einzelnen Fahrerassistenzsysteme und die Gesamtperformance unter Anwendung der Metrik 2. Somit kann genau und auf den ersten Blick beurteilt werden, wie die Performance der Verkehrszeichenerkennung und die des iACCs war. Diese Metrik erfüllt daher das Kriterium sehr gut und ist mit einem Plus mehr zu bewerten als bei der ersten Metrik.

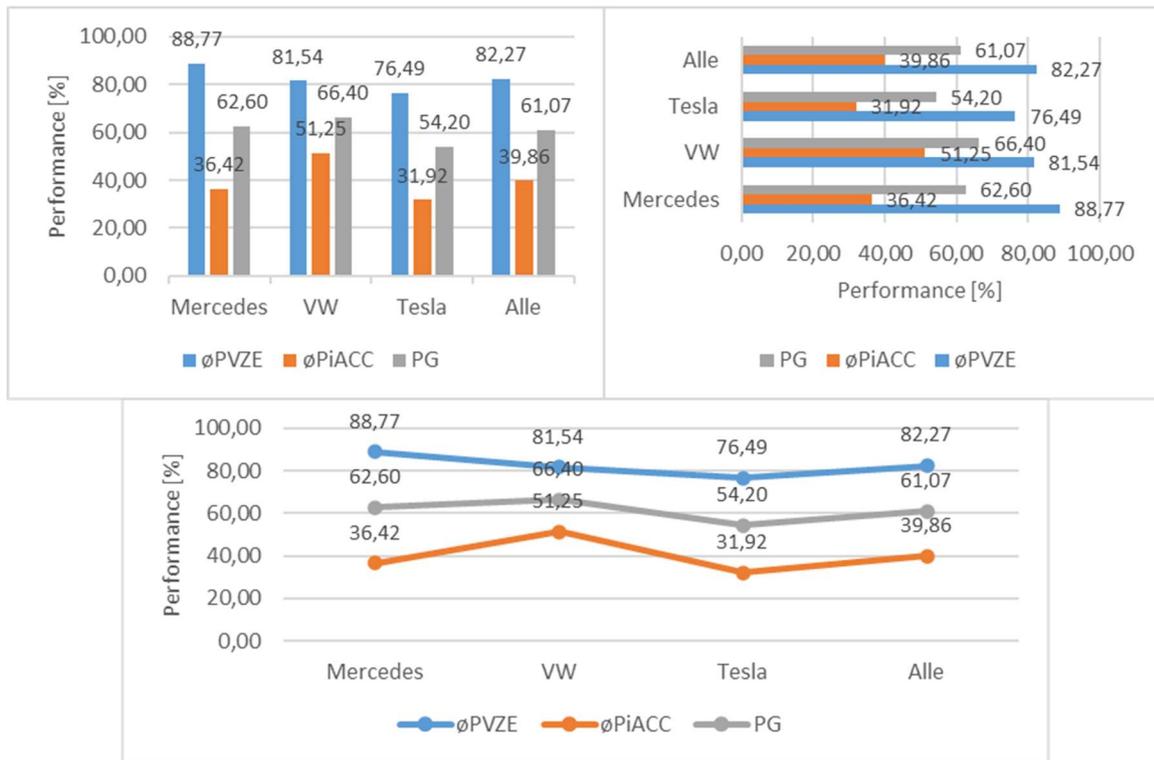


Abbildung 27: Darstellung der VZE-Performance und der iACC-Performance aller Fahrzeuge gesamt in drei verschiedenen Diagrammen unter Anwendung der Metrik 2

Bei der Betrachtung der Metrik 3 und der damit verbundenen Abbildung 28 wird klar, dass sich die Ergebnisse ebenfalls in mehreren Diagrammen darstellen lassen und nur eine aussagekräftige Interpretation zulassen. Alle drei Arten der Diagramme zeigen, dass die Performance des Mercedes unter Anwendung der Metrik 3, mit 92,11% am besten war. Ebenso, wie die ersten beiden Metriken, ist diese Metrik als eindeutig zu deklarieren, da keine Gefahr der Verwirrung und Unsicherheit darüber besteht, was die einzelnen Diagramme zu bedeuten haben. Allgemein lässt sich sagen, dass alle drei Metriken dieses Kriterium gut erfüllen, wobei Metrik 1, wie oben bereits beschrieben, nur mit einem Plus bewertet wird und daher etwas schlechter ist als Metrik 2 und 3.

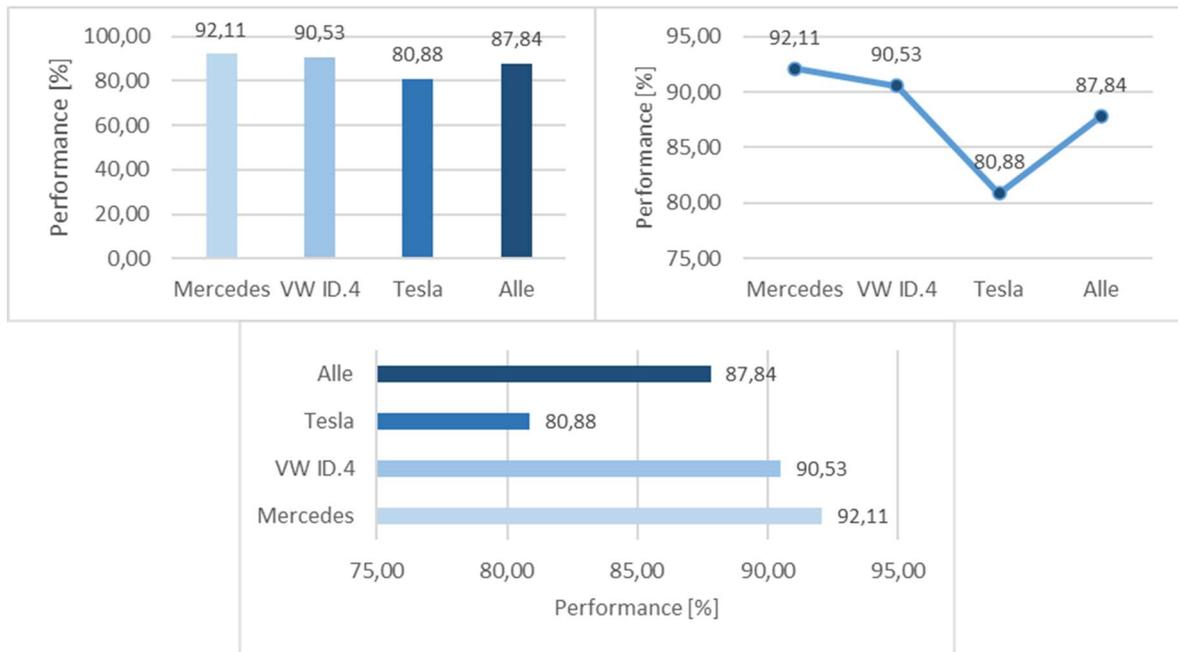


Abbildung 28: Darstellung der VZE-Performance und der iACC-Performance aller Fahrzeuge gesamt in drei verschiedenen Diagrammen unter Anwendung der Metrik 3

Das letzte Kriterium einer Metrik in der Tabelle ist die Granularität. Die Granularität bezieht sich auf die Detailstufe eines Systems. Je höher die Granularität, desto höher ist der Detaillierungsgrad einer Untersuchung. Sie definiert die Detailtiefe und bestimmt, wie fein oder grob die Daten für eine Analyse verwendet werden können. [32] Die erste Metrik zeigt durch die einzelnen Kategorisierungsstufen genau an, ob das Fahrzeug die Verkehrszeichen erkennt und der iACC die Zielgeschwindigkeit korrekt angepasst hat. Hier sind die Stufen genau bestimmt und weisen daher eine hohe Granularität auf, da direkt auf die einzelnen Systeme geschlossen werden kann. Wird die Metrik 2 näher betrachtet, so kann eine Punktzahl als Teilergebnis dieser Metrik für die zu bewertende Situation abgelesen werden. Diese Punktzahl gibt jedoch keine genaue Auskunft darüber, wie die Verkehrszeichenerkennung und der intelligente adaptive Geschwindigkeitsregler sich in der jeweiligen Verkehrssituation verhielten. Daher ist der Detaillierungsgrad als nicht hoch einzustufen. Am schlechtesten erfüllt die Metrik 3 dieses Kriterium, da das Ergebnis unter Anwendung dieser Metrik nur richtig oder falsch sein kann. Das Ergebnis liefert keine Aussage darüber, welches der beiden Systeme in den einzelnen Situationen sich nicht richtig verhielt. Daher kann nicht bestimmt werden, welches System besser oder schlechter ist. Diese Metrik erfüllt dieses Kriterium nicht und wird mit zwei Minus bewertet.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Bewertung der drei Metriken in Hinblick ihrer Erfüllung der Kriterien.

*Tabelle 7: Bewertungstabelle der drei Metriken hinsichtlich ihrer Kriterien*

<b>Kriterien</b>	<b>Metrik 1</b>	<b>Metrik 2</b>	<b>Metrik 3</b>
Objektivität	+	+	++
Reliabilität	++	++	++
Validität	++	+	+
Eindeutigkeit	+	++	++
Einfachheit der Erhebung	+	-	++
Repräsentanz	++	+	++
Granularität	++	0	--

++ = Kriterium sehr gut erfüllt

+ = Kriterium erfüllt

0 = Kriterium mittelmäßig erfüllt

- = Kriterium schlecht erfüllt

-- = Kriterium nicht erfüllt

Die Metrik 1 zeigt in Summe mit einer Gesamtpunktzahl von elf Plus die beste Bewertung, da Metrik 2 nur auf sechs Plus kommt, weil ein Minus die Gesamtpunktzahl reduziert. Die dritte Metrik umfasst ebenfalls elf Plus, allerdings erreicht diese eine Gesamtpunktzahl von neun Plus, da das Kriterium Granularität zweifach negativ bewertet wurde. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Metrik 1 alle Kriterien zum Teil oder sogar ganz erfüllt und daher im Gegensatz zu den beiden anderen Metriken, welche schlecht erfüllte oder nicht erfüllte Kriterien beinhalten, die geeignetste Metrik für die Performancebewertung von Fahrzeugen hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage ist.

## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Entwicklung und dem Vergleich von Metriken zur Performancebeurteilung hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennungssysteme in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage. Zu Beginn wurde eine Teststrecke unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 genannten Hypothesen festgelegt. Anschließend wurden mit drei Versuchsfahrzeugen von verschiedenen Automobilherstellern jeweils drei Tag- und Nachfahrten durchgeführt. Diese Fahrzeuge waren die Mercedes E-Klasse, der Volkswagen ID.4 und der Tesla Model 3. Mit Hilfe der Go Pro Hero 8 wurden diese Testfahrten aufgezeichnet. Jede Testfahrt wurde anschließend unter Anwendung von drei unterschiedlichen selbst definierten Metriken ausgewertet. Die erste Metrik ist qualitativ und ist eine Kategorisierung von 0 bis 7. Die zweite Metrik ist eine quantitative Metrik, die die Systeme einzeln und unabhängig voneinander bewertet. Nachdem die Systeme einzeln bewertet wurden, wurden diese im Anschluss zusammengeführt. Als dritte Metrik wird eine True-False-Formel angewendet, die die beiden Systeme im Verbund evaluiert. Nachdem die drei Metriken miteinander verglichen wurden, sind diese hinsichtlich ihrer Kriterien und Eigenschaften im Anschluss bewertet worden.

Die drei verschiedenen Metriken wurden mit den Kriterien Objektivität, Reliabilität, Validität, Eindeutigkeit, Einfachheit der Erhebung, Repräsentanz und der Granularität miteinander verglichen und bewertet. Das Kriterium Reliabilität erfüllen alle drei Metriken gleich gut. Geringe Unterschiede lassen sich bei der Objektivität, Validität, Eindeutigkeit und der Repräsentanz feststellen. Bei dem Kriterium Objektivität kann die dritte Metrik am besten überzeugen, da es keinen Spielraum für subjektive Einflüsse gibt. Bei der ersten Metrik wurden im Vorfeld selbstdefinierte Zeitgrenzen gesetzt und unterliegt deshalb einer geringeren Objektivität. Analog zur ersten Metrik fließt auch bei Metrik 2 der Faktor Zeit mit ein und stellt daher eine geringere Objektivität dar. Das Kriterium Validität erfüllt die Metrik 1 am besten, da das subjektive Empfinden des Fahrers, im Vergleich zur zweiten und dritten Metrik, am ehesten wiedergespiegelt wird. Weiter lässt sich ein geringer Unterschied in dem Kriterium Eindeutigkeit der Metriken feststellen. Da zwar die Ergebnisse der ersten Metrik in verschiedenen Abbildungen dargestellt werden können, aber nicht direkt herausgelesen werden kann, welche der beiden Systeme fehlerhaft reagierte, schneidet diese Metrik im Vergleich zu den beiden anderen Metriken am schlechtesten ab. Das Kriterium Repräsentanz erfüllt Metrik 1 und Metrik 3 am besten. Hierfür war eine prozentuale Übereinstimmung der Fahrversuche über Tag und Nacht von 95% erforderlich, welche selbst festgelegt wurde. Die zweite Metrik erreichte bei den Ergebnissen der Nachtversuche eine prozentuale Übereinstimmung unterhalb der festgelegten Grenze und erfüllt dieses Kriterium daher nur bedingt. Die deutlichsten Unterschiede sind in den Kriterien in der Einfachheit der Erhebung und der Granularität der einzelnen Metriken zu erkennen. Das Kriterium „Einfachheit der Erhebung“ erfüllt die Metrik 3 am besten, da nur zwischen richtig und falsch bewerteten Verkehrssituationen unterschieden wird. Die Metrik 2 hingegen erfüllt dieses Kriterium nicht, da die Gefahr der Fehleranfälligkeit als sehr hoch einzustufen ist, weil zuerst die beiden Systeme einzeln mit verschiedenen Formeln bewertet und anschließend zusammengefasst werden müssen. Zudem spielt der Faktor Zeit bei dieser Metrik eine wesentliche Rolle, der die Metrik beeinflusst. Hinsichtlich des Kriteriums Granularität lässt sich sagen, dass im Gegensatz zur ersten Metrik, welche das Kriterium vollumfänglich erfüllt, die Metrik 3 nicht granular ist, da das Ergebnis unter Anwendung dieser Metrik nur richtig oder falsch sein kann und daher keine weitergehende Detailtiefe aufweist. Die zweite Metrik erfüllt dieses Kriterium „Granularität“ nur zum Teil, da nur eine Punktezahl als Teilergebnis für die zu bewertende Situation abgelesen werden kann und deshalb ausschließlich eine grobe Datenerhebung erfolgt.

Übertragen auf die einzelnen Versuchsfahrten zeigt sich, dass unter Anwendung der Metrik 1 der Mercedes bei der Verkehrszeichenerkennung am zuverlässigsten agiert hat. Am schlechtesten schnitt der Tesla ab, der in ca. 10% aller Fälle das Verkehrszeichen falsch erkannte. Die eindeutigsten Unterschiede zeigten sich in der Geschwindigkeitsregelung. Hier konnte der Volkswagen am besten überzeugen, der in knapp 50% aller Fälle bereits beim Einfahren in die neue Geschwindigkeitszone die korrekte Zielgeschwindigkeit erreicht hat. Mit ca. 17% konnte der Tesla die Geschwindigkeiten am schlechtesten anpassen. Allgemein ist zu sagen, dass die einzelnen Fahrzeuge die Zielgeschwindigkeit überwiegend erst ab dem Passieren des Verkehrszeichens angepasst haben. Ein minimaler Unterschied ist beim Vergleich der Tag- und Nachtfahrten zu erkennen. Hierbei war die Verkehrszeichenerkennung nachts um ca. 1% besser als tagsüber. Ein wesentlicher Grund für die leicht bessere Performance bei Nacht könnte das erhöhte Verkehrsaufkommen sein, da insbesondere LKW und Transporter die Sicht auf die Verkehrsschilder bei Tag verhindern können. Allerdings ist der Anteil an falsch erkannten Verkehrszeichen um 0,93% höher als bei Tag. Eine mögliche Ursache dafür könnte die Reflexion der metallischen Verkehrsschilder sein, die durch die Scheinwerfer angestrahlt werden und deshalb die Erkennbarkeit ein wenig verschlechtert. Falsche oder keine Geschwindigkeitsanpassungen waren eher selten der Fall. Unter Anwendung der zweiten Metrik lässt sich sagen, dass die beste Gesamtperformance der beiden Systeme der Volkswagen darstellt. Wie in Metrik 1 zeigt der Tesla die schlechteste Systemperformance. Allerdings zeigen die Ergebnisse im Gegensatz zur ersten Metrik, dass die Gesamtperformance aller drei Fahrzeuge nachts minimal schlechter ist als tagsüber. Die dritte Metrik bewertet die Verkehrszeichenerkennung und den iACC ausschließlich gemeinsam. Analog zur ersten Metrik, schneidet der Mercedes am besten und der Tesla am schlechtesten ab. Auch beim Vergleich von Tag und Nacht ist zu erkennen, dass die Systemperformance nachts geringfügig besser ist als tagsüber.

Unabhängig der verwendeten Metriken lässt sich zu den untersuchenden Systemen feststellen, dass die Verkehrszeichenerkennung in den meisten Fällen funktioniert. Um jedoch die Funktionalität der Verkehrszeichenerkennung in Zukunft zu erhöhen, wäre es zu empfehlen, die Verkehrsschilder auf beiden Seiten der Fahrbahn und ohne Behinderung der Sicht anzubringen. Im Gegensatz dazu, ist die adaptive Geschwindigkeitsanpassung nicht so zuverlässig, da diese in den meisten Fällen erst beim Einfahren in die neue Geschwindigkeitszone reagiert. Dies hat zur Folge, dass das Fahrzeug zumeist mit einer falschen Geschwindigkeit in die jeweilige Zone einfährt. Eine weitere Erkenntnis der Studie ist es, dass unter Anwendung von drei verschiedenen Metriken es nur geringe bis gar keine Unterschiede der Systemperformance zwischen Tag und Nacht gibt.

In der Gegenüberstellung der drei verschiedenen Metriken ist festzustellen, dass die Metrik 1 die geeignetste Metrik für die Performancebewertung von Fahrzeugen hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung in Kombination mit einer intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage ist, da diese die Kriterien für Metriken am besten erfüllt. Auch die Meinung des Fahrers spiegelt sich in den Ergebnissen der ersten Metrik am besten wider und bestätigt somit die Validität der Metrik.

## 8 Ausblick

In weiteren Arbeiten sollten Daten von mehreren Fahrzeugen und anderen Automobilherstellern gesammelt werden, um die Validität der ersten Metrik allgemein sicherzustellen. Zudem können andere Teststrecken definiert werden, die die Systemperformance weitergehend analysieren.

Die Ergebnisse in Kapitel 5 zeigen, dass die Verkehrszeichenerkennung zuverlässig agierte. Allerdings passte der iACC die Geschwindigkeit in den meisten Fällen erst beim Einfahren in die neue Geschwindigkeitszone an, was zur Folge hat, dass das Fahrzeug zumeist mit erhöhter Geschwindigkeit in die Zone einfährt. Vor allem zeitlich begrenzte Geschwindigkeitszonen bereitete den Fahrerassistenzsystemen enorme Probleme. Aus diesen Gründen könnte es sich lohnen, zu untersuchen, inwieweit die Verkehrszeichen und vor allem die zeitlich begrenzten Geschwindigkeitszonen mit einer aktuelleren Navigationssoftwareversion und digitalem Kartenmaterial erkannt werden. Neben der Aktualisierung des digitalen Kartenmaterials, kann die Verkehrszeichenerkennung durch den Einsatz von neuen Kamertechnologien verbessert werden. Zum Beispiel durch Kamerasysteme mit schnellen Zoomobjektiven, welche weit entfernte Verkehrszeichen in hochauflösenden Bildern erkennen und somit die Zuverlässigkeit der Verkehrszeichenerkennung im Straßenverkehr erhöhen.

Großes Potenzial und ein wichtiger Bestandteil der aktuellen Verkehrszeichenerkennung ist die künstliche Intelligenz, die sich in Zukunft stetig weiterentwickelt und potenziell die Performance der Systeme verbessern. Mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Metrik, kann in Zukunft die Performance der Systeme auf dem Markt bewertet und weiterverfolgt werden. Mit dem Einsatz der gleichen Bewertungsmetrik, kann zudem eine Vergleichbarkeit der Systemperformance zwischen den Herstellern erreicht werden.

## 9 Literatur

- [1] *Dittmann, F.*: Die lange Geschichte des Autonomen Fahrens | VDI, 2020, <https://www.technik-in-bayern.de/mehr-technik/technikgeschichte/die-lange-geschichte-des-autonomen-fahrens> [Zugriff am: 02.10.2023].
- [2] *H., G.* Level 3-autonomes Fahren: Definition, Autos, Gesetze [online]. In: *bussgeldkatalog.org*, 2023 [Zugriff am: 02.10.2023], <https://www.bussgeldkatalog.org/level-3-autonomes-fahren/>.
- [3] Statistiken zum Thema Straßenverkehrsunfälle [online], 2023 [Zugriff am: 02.10.2023], <https://de.statista.com/themen/34/verkehrsunfall/#topicOverview>.
- [4] *Publisher: BMDV* - Neue Fahrzeugsicherheitssysteme, 2023, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/neue-fahrzeugsicherheitssysteme.html> [Zugriff am: 10.10.2023].
- [5] *Bander, M.; Paula, D.; Febringer, T. et al.*: Performance of Automatic Speed Sign Recognition and Adaptive Speed Adjustment of Real Vehicles on German Roads. In: *European Association for Accident Research and Analysis (Hrsg.): EVU 31st Annual Congress*, 2023, S. 242-252.
- [6] *Allianz Direct*: Verkehrszeichenerkennung - Hilfe im Schilderdschungel, 2023, <https://www.allianz-direct.de/kfz-versicherung/verkehrszeichenerkennung-ratgeber/> [Zugriff am: 04.11.2023].
- [7] *Weißborn, S.*: Autonomes Fahren – Das Roboter-Auto schläft noch, 2020 [Zugriff am: 04.11.2023].
- [8] *Paulsen, T.* Autonomes Fahren: Die 5 Stufen zum selbst fahrenden Auto [online]. In: *ADAC*, 2021 [Zugriff am: 04.11.2023], <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/grundlagen/autonomes-fahren-5-stufen/>.
- [9] *Fraunhofer-Institut für Kognitive Systeme IKS*: Autonomes Fahren - Fraunhofer IKS, 2023, <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/autonomes-fahren.html> [Zugriff am: 04.11.2023].
- [10] *Volkswagen Newsroom*: Selbstfahrende Autos - Die fünf Level des automatisierten Fahrens, 2021, <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/storys/selbstfahrende-autos-die-fuenf-level-des-automatisierten-fahrens-15747> [Zugriff am: 04.11.2023].
- [11] *Miura, J.; Kanda, T.; Shirai, Y.*: An active vision system for real-time traffic sign recognition. In: *2000 intelligent transportation systems proceedings – October 1 - 3, 2000, the Ritz Carlton Hotel, Dearborn, (MI), USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers; ITSC. IEEE, Dearborn, MI, USA, 2000, pp. 52-57.*
- [12] *Fraunhofer-Institut für Kognitive Systeme IKS*: Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen - Fraunhofer IKS, 2023, <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/kuenstliche-intelligenz.html> [Zugriff am: 04.11.2023].
- [13] *Wuttke, L.*: Deep Learning: Definition, Beispiele & Frameworks, 2023, <https://datasolut.com/was-ist-deep-learning/> [Zugriff am: 16.10.2023].
- [14] *Liu, C.; Li, S.; Chang, F. et al.*: Machine Vision Based Traffic Sign Detection Methods: Review, Analyses and Perspectives. In: *IEEE Access 7 (2019)*, S. 86578-86596. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924947>.
- [15] *Jan Steffen Jendry*: Einsatz von Hardware-in-the-loop Systemen zur Evaluation der IT-Sicherheit von visuellen Fahrassistenzsystemen. FernUniversität in Hagen, Hagen Ausgabe 2021.
- [16] Die Verkehrszeichen der StVO | *drivolino.de*, 2023, <https://www.drivolino.de/in-der-ausbildung/verkehrszeichen> [Zugriff am: 04.11.2023].
- [17] Handbuch für die Maschine Vision - Template Matching [online], 2017 [Zugriff am: 05.11.2023], [https://docs.adaptive-vision.com/4.7/studio/machine\\_vision\\_guide/TemplateMatching.html](https://docs.adaptive-vision.com/4.7/studio/machine_vision_guide/TemplateMatching.html).
- [18] *Autor: Philip Hubertus, Here Technologies; Veigel, R.K.*: Drive Pilot für autonomes Fahren: Digitale HD-Karten sind der Schlüssel für Stufe 3, 2022, <https://www.elektroniknet.de/automotive/assistenzsysteme/digitale-hd-karten-sind-der-schlüssel-fuer-stufe-3.196582.html> [Zugriff am: 06.11.2023].
- [19] *Wiesinger, J.*: Wie funktioniert die Navigation? *beckett.de*, 2023, <https://www.kfztech.de/kfztechnik/komfort/navigationssystem.htm> [Zugriff am: 06.11.2023].

- [20] *Bubeck, S.* Wie funktioniert GPS? Die Technik im Navi einfach erklärt [online]. In: Giga, 2017 [Zugriff am: 06.11.2023], <https://www.giga.de/extra/gps/tipps/wie-funktioniert-gps-die-technik-im-navi-einfach-erklart/>.
- [21] *Nentwig, M.*: Evaluations Concerning the Applicability of Computer Generated Camera Images for Development and Test of Driver Assistance Systems. FAU - Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014.
- [22] *K., S.* Adaptive Cruise Control (ACC): Abstandsregeltempomat fürs Kfz [online]. In: bussgeldkatalog.org, 2022 [Zugriff am: 13.11.2023], <https://www.bussgeldkatalog.org/adaptive-cruise-control/>.
- [23] *Kılıç, I.; Yazıcı, A.; Yıldız, O. et al.*: Intelligent adaptive cruise control system design and implementation. In: : 2015 10th System of Systems Engineering Conference (SoSE 2015) – San Antonio, Texas, USA 17 - 20 May 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society; IEEE Reliability Society; International Council on Systems Engineering. IEEE, San Antonio, TX, USA, 2015, pp. 232-237.
- [24] *Redaktion.* ISA-Assistenten: Intelligente Bremsen [online]. In: ADAC, 2021 [Zugriff am: 13.11.2023], <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/assistentensysteme/geschwindigkeitsassistent-isa/>.
- [25] *Honda Motor Co., td.*: Intelligenter adaptiver Tempomat (i-ACC), 2015, <https://hondanews.eu/at/de/cars/media/pressreleases/41673/intelligenter-adaptiver-tempomat-i-acc> [Zugriff am: 13.11.2023].
- [26] *Witte, F.*: Metriken und Testreporting. In: *Witte, F.* (Hrsg.): Metriken für das Testreporting – Analyse und Reporting für wirkungsvolles Testmanagement. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018, S. 197-206.
- [27] Objektivität: Definition, Bedeutung & Erklärung · [mit Video], 2024, <https://studyflix.de/statistik/objektivitaet-1514> [Zugriff am: 17.02.2024].
- [28] *Pfeiffer, F.* Validität, Reliabilität und Objektivität – Die quantitativen Gütekriterien [online]. In: Scribbr, 2018 [Zugriff am: 17.02.2024], <https://www.scribbr.de/methodik/validitaet-reliabilitaet-objektivitaet/>.
- [29] Validität: Definition, Erklärung & Validitätstypen · [mit Video], 2024, <https://studyflix.de/statistik/validitaet-1513> [Zugriff am: 17.02.2024].
- [30] Einfachheit – Definition für alle, die verständlich schreiben wollen, 2023, <https://wortliga.de/glossar/einfachheit/> [Zugriff am: 17.02.2024].
- [31] *Statista Lexikon*: Repräsentativität - Statista Definition, 2024, <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/116/repraesentativitaet/> [Zugriff am: 17.02.2024].
- [32] Granularität&nbsp;– Definition | GIS-Wörterbuch, 2024, <https://support.esri.com/de-de/gis-dictionary/granularity> [Zugriff am: 22.02.2024].
- [33] *Bretscher, P.*: INSEDE | Entwicklung von Metriken | Business Engineering Systems, 2023, [https://benjin.net/bes/metrics\\_development\\_d.html](https://benjin.net/bes/metrics_development_d.html) [Zugriff am: 04.12.2023].
- [34] *morefire*: KPI vs Metrik - Unterschiedliche Definitionen | morefire, 2023, <https://www.morefire.com/blog/kpi-vs-metrik-unterschiedliche-definitionen-von-kpis-und-metriken/> [Zugriff am: 04.12.2023].
- [35] *Maximilian Bauder*: Befragung zur Fahrzeupformance hinsichtlich der Verkehrszeichenerkennung und der intelligenten adaptiven Geschwindigkeitsregelanlage, 2024.