WILHELM BÜCHNER HOCHSCHULE

Anforderungen und Bewertung der Erprobung autonomer Fahrsysteme auf Fahrzeugprüfständen

Andreas Rosenke, Prof. Dr. Tobias Ruf

Schriftenreihe der
Wilhelm Büchner Hochschule

Band 23/2026

Andreas Rosenke, Prof. Dr. Tobias Ruf

Schriftenreihe der Wilhelm Büchner Hochschule

Herausgeber:
Forschungsausschuss der Wilhelm Büchner Hochschule
01.10.2024

Impressum

ISSN (Online) 2751-0514

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

©Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt 2026

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Werden Personenbezeichnungen aus Gründen der besseren Lesbarkeit nur in der männlichen oder weiblichen Form verwendet, so schließt dies das jeweils andere Geschlecht mit ein.

Herausgeber: Forschungsausschuss der Wilhelm Büchner Hochschule
Layout und Satz: Ciara Menzel, Natascha Christl
Projektkoordination: Prof. Steffen Rümpler

E-Mail: Forschung@wb-fernstudium.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Abstract

Das autonome Fahren verspricht eine signifikante Verbesserung der Sicherheit, Effizienz und Komfort im Straßenverkehr. Um diese Systeme zu entwickeln und zu testen, werden erhebliche Ressourcen investiert, wobei die Erprobung des kompletten Fahrzeugs in der Regel auf öffentlichen Straßen oder privaten Prüfgeländen erfolgt. Die Nutzung von Fahrzeugprüfständen für die Erprobung und Validierung hat sich jedoch noch nicht komplett etabliert, da bestehende Prüfstände nicht für alle notwendigen Anforderungen ausgelegt sind. Es liegen neue Konzepte vor, allerdings wird aktuell immer noch diskutiert, inwiefern welche Prüfstände sinnvoll angepasst oder entwickelt werden sollen. Diese Arbeit untersucht die spezifischen Anforderungen, die Fahrzeugprüfstände erfüllen müssen, um die Erprobung autonomer Fahrsysteme zu ermöglichen. Verschiedene Konzepte zur Umsetzung werden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit bewertet. Mit diesen Methoden können schneller Testdaten generiert und die Systeme validiert werden, was die Erprobung schneller und kostengünstiger gestaltet.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Fahrzeugkoordinatensystems [7].....15
Abbildung 2: Haftreibungszahlen in Abhängigkeit der Fahrbahneigenschaften [11].....17
Abbildung 3: Darstellung des Kammschen-Kreises [12] 18
Abbildung 4: Ein Fahrzeug wird auf einem Rollenprüfstand erprobt [15] 19
Abbildung 5: Fahrwindgebläse für Zyklenmessung [17].....20
Abbildung 6: Aufgebautes Fahrzeug auf einem Antriebsstrangprüfstand [20] 21
Abbildung 7: Freiheitsgrade des Fahrzeugs und Einflussmöglichkeiten durch Aktuatoren [22] 22
Abbildung 8: Layout des x-road Prüfstands [25].....23
Abbildung 9: Fahrzeug mit angebrachten Wheel Torque Dynamometer steht auf den Drehteller [26] 24
Abbildung 10: Unterschied traditionelle Programme und ML [60] 31
Abbildung 11: Test und Entwicklungszentrum Immendingen [65] 33
Abbildung 12: Querbeschleunigungen bei PKWs [73].....37
Abbildung 13: Montierter MXsteerAct an der Spurstangenkopf eines Fahrzeugs [83] 48
Abbildung 14: Schematische Aufbau für das Erproben der Umgebungssensoren [96] 50

Abkürzungsverzeichnis

AMCW	Amplitude Modulated Continuous Wave
CGR	Center of Gravity Restraint System
CNN	Convolutional Neural Networks
CPU	Central Processing Unit
DL	Deep Learning (tiefes Lernen)
DLR	Deep Reinforcement Learning
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FoV	Field of View
GPS	Global Positioning System
GPU	Grafikprozessor
GNSS	Global Navigation Satellite System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
IMU	Inertia Measurement Unit
KI	Künstliche Intelligenz
LIDAR	Light Detection and Ranging
ML	Machine Learning
NVH	Noise Vibration Harshness
OTA	Over the Air

PKW	Personenkraftwagen
RADAR	Radio Detection and Ranging
RNN	Recurrent Neural Networks
SAE	Society of Automotive Engineers
TISAX	Trusted Information Security Assessment Exchange
ToF	Time of Flight
UDP	User Datagram Protocol
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

Formelzeichen

A	Fläche (angeströmte Fläche Fahrzeug)
a_l	Längsbeschleunigung
a_y	Querbeschleunigung
c_w	Strömungswiderstand (Fahrzeug)
F_B	Beschleunigungswiderstand
F_l	Längskraft
F_L	Luftwiderstandskraft
F_R	Rollwiderstand
f_R	Rollwiderstandsbeiwert
F_{St}	Steigungswiderstand
F_y	Seitenkraft
F_x	Längskraft
F_Z	Radlast
$F_{x\,max}$	maximale Umfangskraft für den Reifen
g	Erdbeschleunigung
λ	Drehmassenzuschlag
m	Masse
p_L	Dichte der Luft
R_o	Radius Reifen
S_B	Bremsschlupf
S_T	Triebsschlupf
v	Geschwindigkeit
$\ddot{x}$	Beschleunigung
$\dot{\varphi}$	Gier Geschwindigkeit
μ_r	Haftreibungszahl
μ_g	Gleitreibungszahl

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten des Fahrdynamikprüfstands [24] 22

Tabelle 2: Technische Daten der schwenkbaren Doppelrollenachse [25] 23

Tabelle 3: Tabelle zum Vergleich der Sensorleistung bei verschiedenen Aufgaben und Bedingungen. In Anlehnung an [59] 30

Tabelle 4: Berechnete Seitenkraft pro Achse bei einer Achslastverteilung von 50:50 in Abhängigkeit von Querbeschleunigung und Fahrzeugmasse 38

Tabelle 5: Abschätzung von Lucid Motors zu den Datenmengen und Anzahl an Sensoren in einem autonomen Fahrzeug [81] 43

Tabelle 6: Bewertung der erreichbaren Seitenkräfte mithilfe des MXsteerAct basierend auf Tabelle 4 48

Inhaltsverzeichnis

Abstract V
Abbildungsverzeichnis VI
Abkürzungsverzeichnis VII
Formelzeichen IX
Tabellenverzeichnis X
Inhaltsverzeichnis XI
1 Einleitung 13
1.1 Motivation und Relevanz 13
1.2 Zielsetzung 13
1.3 Abgrenzung und Annahmen 14
1.4 Methodisches Vorgehen 14
2 Fahrdynamische Grundlagen 15
2.1 Fahrdynamik 15
2.2 Fahrwiderstände 16
2.3 Kraftübertragung auf die Fahrbahn 16
3 Fahrzeugprüfstände 19
3.1 Fahrzeugrollenprüfstände 19
3.2 Antriebsstrangprüfstand 20
3.3 FKFS-Fahrzeugdynamiksimulator (Flachbandprüfstand) 21
3.4 Dürr x-road curve Rollenprüfstand 23
3.5 Torque Wheel Dynamometer 24
4 Autonome Fahrsysteme und die Erprobung 25
4.1 Autonome Fahrsysteme 25
4.1.1 Ebenen der Fahrzeugautonomie 25
4.1.2 Übersicht der Funktionen 26
4.2 Sensorik 27
4.2.1 Lidar 27
4.2.2 Radar 28
4.2.3 Ultraschall 28
4.2.4 Kamera 29
4.2.5 Beschleunigungs- und Drehratensensoren 29
4.3 Technologien für die Entwicklung autonomer Fahrsysteme 29

4.4 Aktuelle Erprobungsmethoden 32

5 Analyse der Anforderung, Bewertung und die Umsetzungsfähigkeit an das Erproben 34

5.1 Anforderungen an die Fahrzeugprüfstände für die Erprobung autonomer Fahrsysteme 34

5.1.1 Erhöhte Sicherheitsanforderung..... 35

5.1.2 Erproben der Wahrnehmung..... 39

5.1.3 Verarbeitung und Interpretation von Daten..... 41

5.1.4 Handhabung hoher Datenmengen 42

5.1.5 Effiziente Teststrategien und realitätsnahe Erprobung 43

5.2 Umsetzung und Bewertung 44

5.2.1 Umsetzung und Bewertung der erhöhten Sicherheitsanforderung..... 45

5.2.2 Umsetzung und Bewertung für die Erprobung der Wahrnehmung 49

5.2.3 Umsetzung und Bewertung der Anforderung an die Verarbeitung und Interpretation von Daten..... 51

5.2.4 Umsetzung und Bewertung für die Handhabung höher Datenmengen..... 52

5.2.5 Umsetzung und Bewertung für effiziente Teststrategien und realitätsnahe Erprobung 54

5.2.6 Zusammenfassung der Bewertung..... 55

6 Zusammenfassung und Fazit.....58

6.1 Kritische Betrachtung und mögliche Nachfolgearbeiten 59

Literaturverzeichnis..... LXI

Anhang LXXV

1 Einleitung

1.1 Motivation und Relevanz

Autonome Fahrsysteme versprechen mehr Sicherheit, Komfort und Effizienz im Vergleich zum manuellen Fahren (vgl. [1]). Heutige Serienfahrzeuge besitzen deutlich mehr Fahrassistenzsysteme und stellen eine notwendige Bedingung für das autonome Fahren dar. Diese Entwicklung hin zu mehr Fahrerassistenzsystemen wird nicht nur durch den Wettbewerb der Hersteller vorangetrieben, sondern auch gesetzlich verpflichtend gemacht (vgl. [2]). Fahrzeughersteller und Zulieferer investieren erhebliche Mittel in die Entwicklung und Erprobung fortgeschrittener autonomer Fahrsysteme, wobei der größte Kostenanteil auf das Validieren entfällt [3]. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser Trend fortsetzen wird und die Anforderungen und Komplexität der Systeme weiter steigen werden.

Das Erproben von autonomen Fahrsysteme in kompletten Fahrzeugen findet häufig auf einem Prüfgelände oder öffentlichen Straßen statt. Dies ist nicht nur kostspielig, sondern birgt auch Sicherheitsrisiken für Mensch und Fahrzeug (vgl. [4]). Laut Nidhi Kalra und Susan M. Paddock benötigt es, statistisch gesehen, 275 Millionen Meilen, um mit 95%iger Sicherheit nachweisen zu können, dass die Todesfallrate eines autonomen Fahrzeugs bei 1,09 pro 100 Millionen Meilen liegt [5]. Ergänzend werden Komponenten-Prüfstände eingesetzt, um einzelne oder mehrere Funktionalitäten zu testen.

Fahrzeugprüfstände ermöglichen die umfassende Erprobung des kompletten Fahrzeugs. Je nach Prüfstands Typ sind jedoch der Erprobung in Bezug auf der Fahrdynamik, Umweltbedingung und Testen der Funktionalitäten Grenzen gesetzt [6].

Eine teilweise Verlagerung der Erprobungen von autonomen Fahrsystemen könnte neue Kapazitäten schaffen und die Sicherheitsrisiken senken. Weiterhin könnte man auf vorhandene Infrastruktur zugreifen und die Erprobung reproduzierbar gestalten.

1.2 Zielsetzung

Auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche wurden die Anforderungen für die Erprobung von autonomen Fahrsystemen entworfen und kategorisiert. Darüber hinaus wurde die Umsetzbarkeit dieser Maßnahmen auf verschiedene Typen von Fahrzeugprüfständen, unterstützt durch eine Patentrecherche, untersucht und bewertet.

1.3 Abgrenzung und Annahmen

Alle Aspekte des autonomen Fahrens und dessen Erprobung in dieser Bachelorarbeit zu erfassen und darzustellen, ist kaum möglich. Das Thema wurde in Abstimmung mit dem Betrieb (Horiba Europe GmbH) gewählt, wobei der Fokus gezielt auf jene Bereiche beschränkt wurde, die für den Betrieb aktuell von besonderer Relevanz sind. Infolgedessen wird der Umfang des Themengebiets bewusst eingegrenzt. Die folgenden Abgrenzungen und Annahmen wurden daher getroffen:

Fahrzeugprüfstände werden definiert als Einrichtungen zur Erprobung von kompletten Fahrzeugen. Adaptionen an Reifen und Radnaben sind erlaubt.

Die Erprobung konzentriert sich derzeit ausschließlich auf

Personenkraftwagen, da diese im aktuellen Fokus der Untersuchungen stehen. Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen wurden dabei nicht berücksichtigt.

Aktuelle und zukünftige Fahrzeuge sind mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet. In diesem Kontext werden ausschließlich die gängigsten Sensoren für die **externe Wahrnehmung autonomer Fahrzeuge** betrachtet, da die Perzeption eine fundamentale Voraussetzung für das autonome Fahren darstellt.

1.4 Methodisches Vorgehen

Für die Literaturrecherche kamen die Datenbanken Google Scholar, Springer Link, die Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt sowie IEEE Xplore zum Einsatz. Fundamentales Grundlagenwissen wurde ohne zeitliche Einschränkung der Veröffentlichung berücksichtigt. Bei der Literatur zum autonomen Fahren, zu Sensoren und zur Prüfstands-Technik lag der Fokus auf aktuellen Beiträgen. Nahliegende Suchbegriffe und verschiedene Kombinationen mithilfe von Booleschen Operatoren dienten der Recherche. Zusätzlich erfolgte eine Durchsicht der Literaturverzeichnisse ausgewählter Quellen, um weitere relevante Werke zu identifizieren. Die Patentrecherche erfolgte über das Web-Portal Espacenet, während Citavi zur Organisation des Wissens genutzt wird.

Der Zitierstil „IEEE“ wird angewendet, um durch die Verwendung von Zahlen in Klammern als Literaturreferenz den Lesefluss zu wahren und auf Fußnoten zu verzichten.

2 Fahrdynamische Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich den grundlegenden fahrdynamischen Prinzipien, die die Bewegung eines Fahrzeugs auf der Straße bestimmen, einschließlich der beteiligten Kräfte und Widerstände.

2.1 Fahrdynamik

In der Fahrdynamik wird zwischen sechs Freiheitsgraden unterschieden. Diese unterteilen sich in 3 rotatorische und 3 translatorische Bewegungen. Die translatorischen Bewegungen werden wiederum in Längs,- Quer- und Vertikaldynamik gegliedert [7].

Wie in Abbildung 1 dargestellt, bezieht sich das Fahrzeugkoordinatensystem auf den Fahrzeugschwerpunkt.

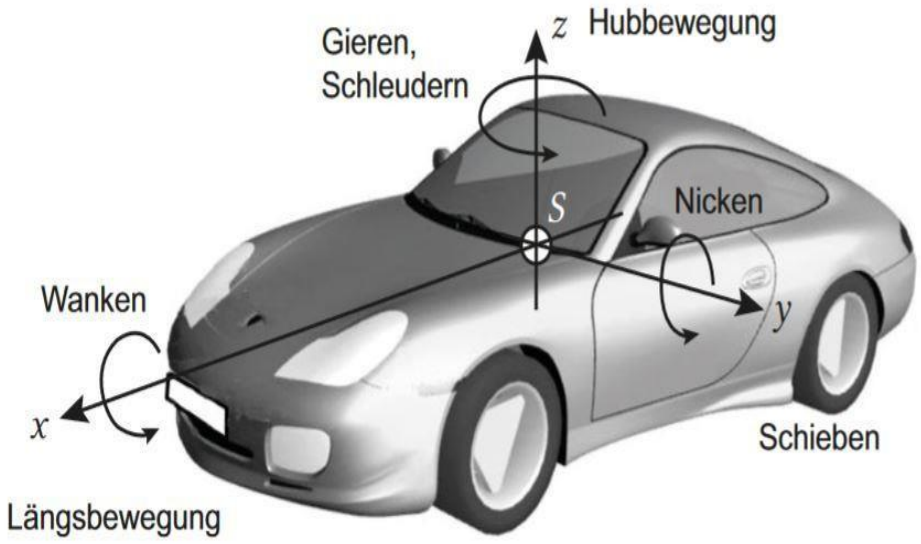


Abbildung 1: Darstellung des Fahrzeugkoordinatensystems [7]

Bei der Längsdynamik werden Kräfte betrachtet, die in Fahrtrichtung durch Beschleunigen oder Bremsen wirken. Kräfte, die aufgrund von Kurvenfahrten entstehen, sind der Querdynamik zugeordnet. Die Vertikaldynamik hingegen bezieht sich auf Kräfte und Bewegungen, die in vertikaler Richtung wirken, wie zum Beispiel, das Ein- und Ausfedern vom Fahrwerk [7].

Rotatorische Bewegungen entstehen durch die Wirkung von Momenten. Die Bewegung um die x-Achse nennt man Wanken, während man bei der Bewegung, um die y- und z-Achse jeweils von Gieren und Schleudern spricht [8].

2.2 Fahrwiderstände

Beim Fahren eines Fahrzeugs wirken verschiedene Fahrwiderstände. Diese lassen sich in vier Kategorien einteilen:

Rollwiderstand F_R: Die Kraft, die notwendig ist, um ein Rad mit einer bestimmten Geschwindigkeit rollen zu lassen. Sie ist proportional zur Normalkraft und dem Rollwiderstandsbeiwert. Die Normalkraft ist abhängig von den Radlasten F_Z des Fahrzeugs, während der Rollwiderstandsbeiwert f_R durch die Eigenschaften der Reifen und die Beschaffenheit der Fahrbahn bestimmt wird [9].

$$F_R = f_R \cdot F_Z \quad (1)$$

Luftwiderstand F_L: Der Luftwiderstand setzt sich aus Druckwiderstand, Reibungswiderstand, innerem Widerstand und induziertem Widerstand zusammen. Die Summe der einzelnen Widerstände fasst man mit F_L zusammen und kann mit Gleichung 2 berechnet werden [9].

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot p_L \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Anhand der Gleichung kann man erkennen, dass die Geschwindigkeit vom Fahrzeug den größten Einfluss hat. Die Kräfte können nicht nur in Längsrichtung zum Fahrzeug wirken, sondern auch über mehrere Richtungen und dabei Momente hervorrufen [9].

Beschleunigungswiderstand F_B: Um Massen rotatorisch zu beschleunigen, muss die Trägheit überwunden werden. Diese aufgewendete Kraft ist proportional zur Masse m, der Trägheit und der Beschleunigung $\ddot{x}$. In der Fahrzeugtechnik wird die Summe der Trägheit der rotierenden Teile mit einem Drehmassenzuschlag λ berücksichtigt [9].

$$F_B = \lambda \cdot m \cdot \ddot{x} \quad (3)$$

Steigungswiderstand: Bei einer Steigung muss das Fahrzeug mehr Kraft aufwenden, um der Schwerkraft entgegenzuwirken. Der Widerstand ergibt sich aus dem Produkt der Gewichtskraft mg und dem Steigungswinkel $\sin \alpha$ der Fahrbahn [9].

$$F_{St} = mg \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

2.3 Kraftübertragung auf die Fahrbahn

Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn findet auf dem Reifenlatsch statt, der Kontaktzone von Reifen und Straße.

Während des Beschleunigens oder Verzögern entsteht entweder ein Treib S_T oder Bremsschlupf S_B. Die Umfangsgeschwindigkeit des beschleunigten

Rads ist größer als der Radmittelpunkt, während es beim Verzögern umgekehrt ist. Rollt das Rad nur ist der Schlupf 0 [10].

Die mathematischen Definitionen für den Schlupf lauten:

$$S_T = \frac{v - R_o \cdot \dot{\varphi}}{R_o \cdot \dot{\varphi}} \qquad (5)$$

$$S_B = \frac{v - R_o \cdot \dot{\varphi}}{v} \qquad (6)$$

Die maximale übertragbare Umfangskraft $F_{x\,max}$ auf die Fahrbahn wird durch die Haftreibungszahl μ_r und die Radlast F_Z bestimmt.

$$F_{x\,max} = \mu_r * F_Z \qquad (7)$$

Wird die maximal zulässige Kraft überschritten gleitet das Rad mit der Gleitreibungszahl $\mu_g$begrenzt. Es gilt, dass die Gleitreibungszahl immer kleiner als die Haftreibungszahl ist [10].

Abbildung 2 zeigt die Haftreibungszahlen bei Fahrbahnen mit unterschiedlichen Zuständen.

Fahrgeschwindigkeit in km/h	Reifenzustand	Straßenzustand				
		trocken	nass, Wasserhöhe etwa 0,2 mm	starker Regen, Wasserhöhe etwa 1 mm	Pfützen, Wasserhöhe etwa 2 mm	vereist (Glatteis)
		Haftreibungszahl μ_r				
50	neu	0,85	0,65	0,55	0,5	0,1 und kleiner
	abgenutzt[1]	1	0,5	0,4	0,25	
90	neu	0,8	0,6	0,3	0,05	–
	abgenutzt[1]	0,95	0,2	0,1	0,05	
130	neu	0,75	0,55	0,2	0	–
	abgenutzt[1]	0,9	0,2	0,1	0	

[1] Abgenutzt auf 1,6 mm Profilhöhe (Mindestwert in Deutschland nach § 36 StVZO).

Abbildung 2: Haftreibungszahlen in Abhängigkeit der Fahrbahneigenschaften [11]

Bei Kurvenfahrten rollt das Rad nicht nur längs, sondern auch seitlich. Dabei stellt sich eine Seitenkraft F_y ein. Das Rad folgt dem Geschwindigkeitsvektor zwischen der x- und y-Achse. Man bezeichnet den Winkel zwischen der x-Richtung und dem Geschwindigkeitsvektor Schräglaufwinkel. Je größer die Seitenkraft, desto größer wird dieser Winkel. Die Ausnahme stellt das Lenken mit kleinen Geschwindigkeiten dar. Ist diese klein genug fährt man seitenkraftfrei mit dem Ackermann Winkel.

Die vektorielle Summe der Längs- F_x und Seitenkraft F_y muss kleiner sein als das Produkt der Radlast F_z und der Haftreibungszahl oder andernfalls gleitet das Rad, siehe Gleichung 8 [10].

$$\sqrt{F_x^2 + F_{2y}} \leq \mu_r F_z \quad (8)$$

Abbildung 3 zeigt eine grafische Darstellung des Kammschen-Kreises. Die Längskraft

F_x und die Seitenkraft $F_y$bilden zusammen die resultierende Kraft, die innerhalb des Kreises liegen muss, um ein Gleiten des Reifens zu vermeiden.

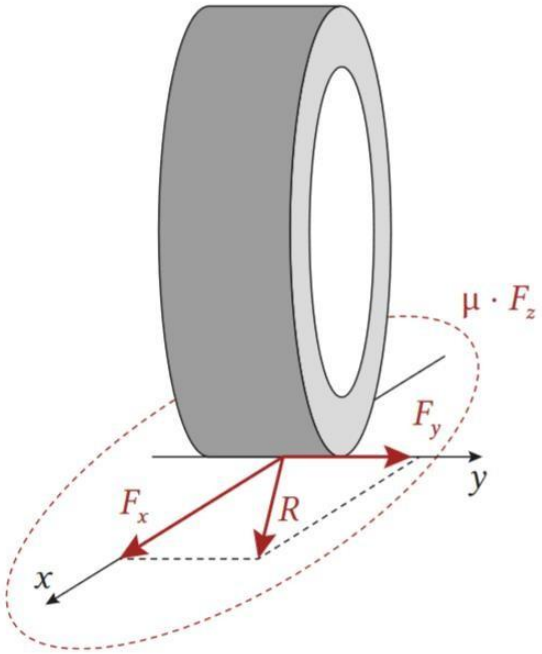


Abbildung 3: Darstellung des Kammschen- Kreises [12]

Der Schwimmwinkel β ist ein wichtiger Parameter in der Fahrdynamik, insbesondere bei Kurvenfahrten und instabilen Fahrzuständen. Er beschreibt den Winkel zwischen der Richtung, in die das Fahrzeug tatsächlich fährt, und der Ausrichtung der Fahrzeuglängsachse [13].

3 Fahrzeugprüfstände

Fahrzeugprüfstände spielen eine entscheidende Rolle bei der umfassenden Erprobung und Entwicklung kompletter Fahrzeuge. Sie ermöglichen eine breite Palette von Tests unter Laborbedingungen, einschließlich Abgaszertifizierung, Leistungsmessung, NVH-Analysen (Noise, Vibration, Harshness) und EMV-Tests (Elektromagnetische Verträglichkeit) sowie Fahrwerkserprobung.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden mehrere Prüfstandstypen vorgestellt, die für die Erprobung autonomer Fahrsysteme in Kapitel 5 auf dessen Potenzial untersucht werden. Zu diesen zählen gängige Fahrzeugrollenprüfstände und der Antriebsstrangprüfstand. Der x-road curve Prüfstand stellt eine Weiterentwicklung des traditionellen Rollenprüfstands dar. Der FKFS- Fahrzeugdynamiksimulator zählt zu den Flachbandprüfständen, während der Torque Wheel Dynamometer ein neues Konzept ist.

3.1 Fahrzeugrollenprüfstände

Ein Fahrzeugrollenprüfstand simuliert die Fahrbahn und die Fahrwiderstände für das Fahrzeug und besteht im Wesentlichen aus einem Rahmenkonstrukt, das ebenerdig in einer Grube eingelassen wird. Vier Rollen stellen die Kontaktfläche zu dem Fahrzeugreifen dar. Die Rollen werden von elektrischen Maschinen, je nach Lastzustand des Fahrzeugs, gebremst oder angetrieben. Es ist nur eine Kraftübertragung in Längsrichtung auf die Rollen möglich [14]. In Abbildung 4 sieht man ein Fahrzeug, das gerade auf einem Rollenprüfstand erprobt wird.

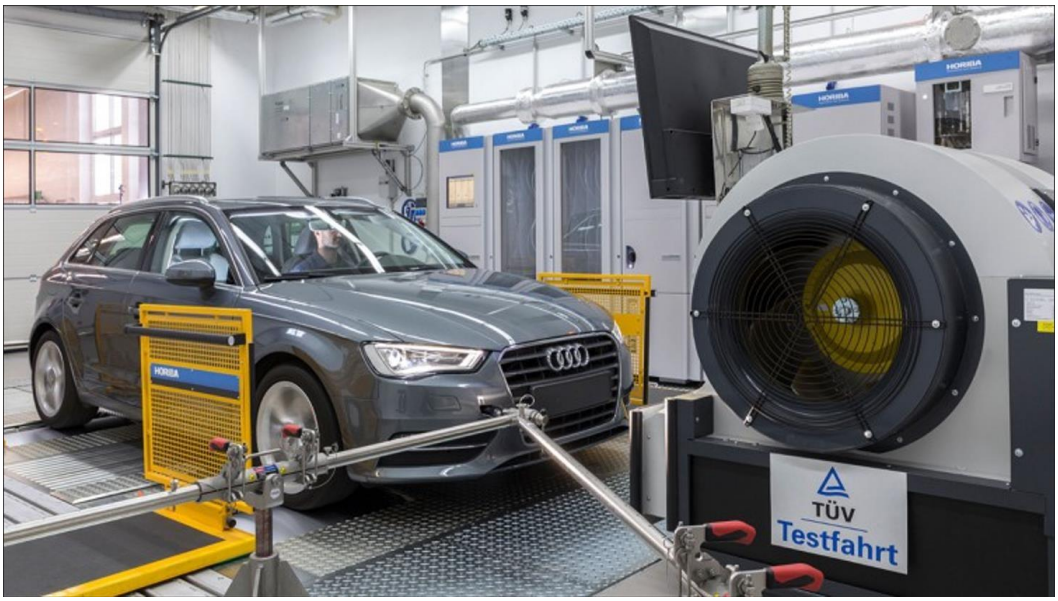


Abbildung 4: Ein Fahrzeug wird auf einem Rollenprüfstand erprobt [15]

Die Rollen haben, in der Regel, einen deutlich größeren Durchmesser als die Fahrzeugreifen und einen Reibbelag mit einer Haftreibungszahl ähnlich der asphaltierten Straße [16].

Das Fahrzeug selbst wird durch eine Fahrzeugfixierung auf dem Rollenprüfstand gesichert. Es können Ketten oder Gurte angewendet werden, um das Fahrzeug zu sichern. Alternativ kommen Radnabenfixierungen oder Metallstangen zum Einsatz. Diese Fixierungen verhindern die Nickbewegung des Fahrzeugs [14], [16].

Für die Fahrzeugkühlung findet ein Fahrtwindgebläse Anwendung, siehe Abbildung 5

[14].



Abbildung 5: Fahrwindgebläse für Zyklenmessung [17]

Die Erkenntnisse der Fahrwiderstände werden experimentell mit einem Auslaufversuch des Fahrzeugs auf der Straße gewonnen. Diese Daten werden in den Prüfstandsrechner parametriert, um anschließend einen Coast Down Versuch durchzuführen. Dabei wird das Fahrzeug auf dem Prüfstand auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt und dann Ausrollen gelassen. Der Prüfstandrechner passt auf dieser Grundlage die simulierten Fahrwiderstände an. Dies wird mehrfach wiederholt, bis eine akzeptable Abweichung zwischen realer und simulierter Straßenlast vorhanden ist. Diese beträgt in der Regel zwischen 0 und 1 %. [14].

3.2 Antriebsstrangprüfstand

Auf Antriebsstrangprüfstände können diverse Getriebe und unterschiedlich angeordnete Antriebsstränge erprobt werden. Dazu gehören neben den Motoren auch Getriebe oder Differentiale. Die Erprobung reicht von Dauerlauf,- Entwicklung,- und Leistungstest bis hin zu NVH.

Es können auch komplette Fahrzeuge erprobt werden. Dazu werden entweder die Räder des Fahrzeugs entfernt und an den Radnaben werden über Wellen elektrische Belastungsmaschinen montiert oder die Räder können verbleiben, wenn spezielle Adapter verwendet werden. Die Belastungsmaschinen können Fahrwiderstände und Belastungen simulieren. Durch eine Gelenkwelle wird eine lenken der vorderen Räder möglich [18] [19].

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 6 ein Fahrzeug auf einem Allrad-Antriebsstrangprüfstand.



Abbildung 6: Aufgebautes Fahrzeug auf einem Antriebsstrangprüfstand [20]

3.3 FKFS-Fahrzeugdynamiksimulator (Flachbandprüfstand)

Der FKFS-Fahrzeugdynamiksimulator ermöglicht die Untersuchung der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik eines Fahrzeugs. Die Räder des Fahrzeugs werden auf Flachbandeinheiten positioniert, die von Elektromotoren angetrieben und gebremst werden können. Weitere Aktuatoren ermöglichen eine Drehung um die eigene Hochachse und somit die Erzeugung von Schräglaufwinkeln am Reifen. Hydraulische Aktuatoren sorgen für eine vertikale Anregung des Flachbands [21] [23].

Das Fahrzeug wird mit einer speziellen Schwerpunktfesselung (CGR) befestigt, die Hub-, Nick- und Wankbewegungen erlaubt, aber Längs-, Quer- und Gierbewegungen verhindert. Für die Simulation der gesperrten Bewegungen werden die Reaktionskräfte im CGR gemessen und einem virtuellen Simulationskörper aufgeprägt. Zusätzliche Aktuatoren am CGR erzeugen Vertikalkräfte sowie Wank- und Nickmomente (siehe Abbildung 7). Dadurch wird die Simulation von aerodynamischen Auftriebskräften ermöglicht [21] [23].

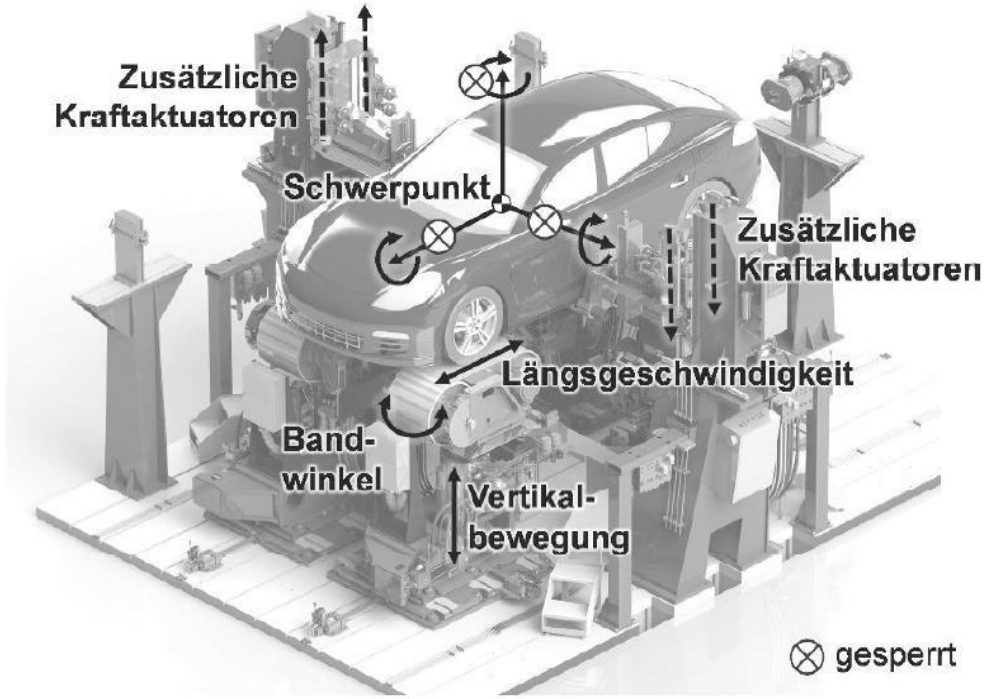


Abbildung 7: Freiheitsgrade des Fahrzeugs und Einflussmöglichkeiten durch Aktuatoren [22]

Eine der Hauptanwendungen ist die Untersuchung fahrdynamischer Manöver sowie von Achsen- und Lenkungssystemen. Zudem ermöglicht der Simulator die Entwicklung und Validierung von Fahrwerksregelsystemen wie ESP oder Torque-Vectoring. Auch Fahrassistenzsysteme können damit getestet werden [21] [23].

Tabelle 1 zeigt die technische Spezifikation des Fahrdynamikprüfstands auf.

Tabelle 1:Technische Daten des Fahrdynamikprüfstands [24]

Laufbandgeschwindigkeit:	0,5 – 220 km/h
Spitzen-/Dauerleistung:	220/140 kW
Max. Längs-/Quer-/Vertikalkraft:	6/10/15 kN
Max. Lenkwinkel Laufbänder:	±20°
Bandbreite Laufband-Lenkung:	15 Hz
Max. vertikaler Weg:	±75 mm
Max. vertikale Beschleunigung:	7 g
Bandbreite Vertikalanregung:	30 Hz

3.4 Dürr x-road curve Rollenprüfstand

Der x-road curve ist ein Rollenprüfstand, bei dem die vorderen Räder eines Fahrzeugs über eine vertikal schwenkbare Doppelrolle gelenkt werden können. Vier vektorgeregelte Antriebe sind integriert, die sowohl einen motorischen als auch generatorischen Betrieb ermöglichen. Diese Antriebe ermöglichen eine präzise Steuerung der Drehmomente und Geschwindigkeiten der Fahrzeugräder. Ein berührungsloses Messsystem erfasst kontinuierlich die Winkelstellung der Fahrzeugräder sowie die Position des Fahrzeugs auf dem Prüfstand und führt dementsprechend die Lenkbewegung mit. Somit können verschiedene Funktionsprüfungen von Fahrassistenz- oder autonomen Fahrsystemen durchgeführt werden, wie zum Beispiel ein Fahrspurwechsel [25].

In der Abbildung 8 sind die schwenkbaren Rollen für die Vorderachse des Fahrzeugs auf der linken Seite deutlich erkennbar, während die Rollen auf der rechten Seite, die für die Hinterachse vorgesehen sind, starr sind.

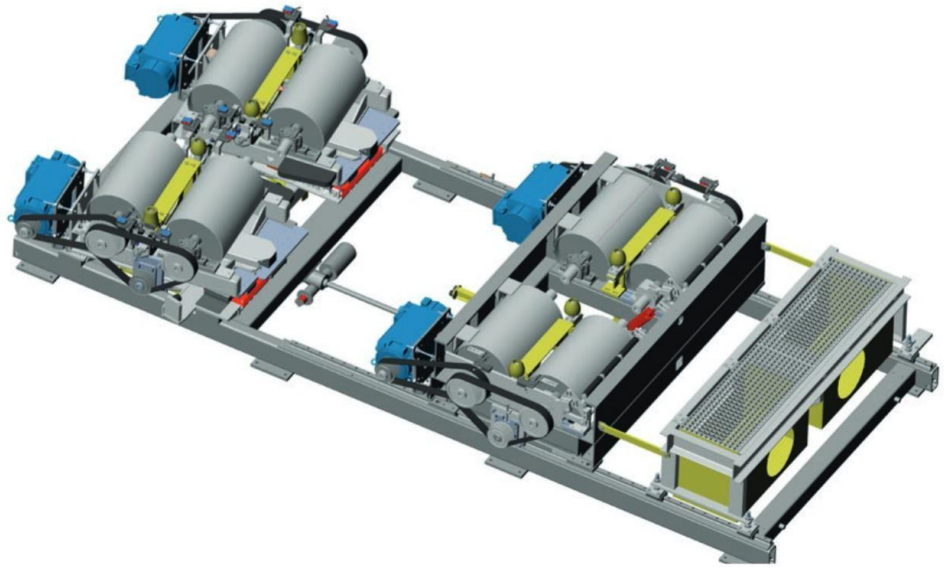


Abbildung 8: Layout des x-road Prüfstands [25]

Tabelle 2: Technische Daten der schwenkbaren Doppelrollenachse [25]

TECHNISCHE DATEN	
Prüfgeschwindigkeit	130 km/h mit Lenkmöglichkeit
Prüfgeschwindigkeit	170 km/h ohne Lenkmöglichkeit
Max. Lenkeinschlag	+/- 10° an der Vorderachse
Typische Motorzugkraft	3.700 N/6.000 N abhängig von der Antriebstechnik

3.5 Torque Wheel Dynamometer

Bei diesem Konzept des Torque Wheel Dynamometer werden an dem Versuchsfahrzeug Räder mit integrierten Elektromotoren angebracht. Das Rad selbst und die Felge stehen still, während über die Radnabe Kräfte aufgenommen und abgegeben werden können. So können Fahrwiderstände über die Elektromotoren simuliert werden, während das Fahrzeug stationär bleibt, siehe Abbildung 10 [26].

Das Versuchsfahrzeug steht mit den Rändern jeweils auf einem elektrischen Drehteller, der die Lenkbewegung des Fahrzeugs ermöglicht. [26].



Abbildung 9: Fahrzeug mit angebrachten Wheel Torque Dynamometer steht auf den Drehteller [26]

4 Autonome Fahrsysteme und die Erprobung

Das folgende Kapitel befasst sich mit dem aktuellen Stand der Fahrassistenzsysteme und des autonomen Fahrens sowie mit den Methoden zur Erprobung dieser Technologien. Da Fahrassistenzsysteme eine wesentliche Grundlage für das autonome Fahren bilden, werden zunächst deren einzelne Funktionen betrachtet. Im Anschluss wird das autonome Fahren selbst thematisiert [27], [28].

Zunächst wird in Kapitel 4.1.1 die Klassifizierung der Fahrzeugautonomie gemäß SAE J3016 erläutert. Kapitel 4.1.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Funktionen. Kapitel 4.2 behandelt die Sensoren zur Umgebungswahrnehmung, während Kapitel 4.3 die Technologien für die Entwicklung der Software thematisiert. Abschließend werden in Kapitel 4.4 aktuelle Erprobungsmethoden für Fahrassistenzsysteme und autonome Fahrsysteme vorgestellt.

4.1 Autonome Fahrsysteme

4.1.1 Ebenen der Fahrzeugautonomie

Die **SAE J3016** definiert sechs Klassen von Automatisierungsgraden.

Level 0: Keine Automatisierung. Die Steuerung erfolgt ausschließlich durch den Fahrer.

Level 1: Fahrerunterstützung. Das Fahrzeug kann den Fahrer durch Funktionen wie Tempomat oder Spurhalteassistent unterstützen.

Level 2: Teilautomatisiertes Fahren. Das Fahrzeug kann Aufgaben wie automatisches Einparken oder Spurhalten übernehmen, muss aber vom Fahrer ständig überwacht werden.

Level 3: Bedingtes automatisiertes Fahren. Der Fahrer kann, unter bestimmten Rahmenbedingungen, sich von der Fahraufgabe lösen. Das Fahrzeug signalisiert, wenn der Fahrer wieder die Kontrolle übernehmen soll. Als Beispiel sei der Stau-Assistent genannt.

Level 4: Hochautomatisiertes Fahren. Hier hat das Fahrzeug die komplette Fahrzeugführung. Nur im Bedarfsfall teilt das Fahrzeug, mit genügen Zeitreserve, dem Fahrer mit, wenn er einzugreifen hat.

Level 5: Hier spricht man von autonomem Fahren. Das Fahrzeug hat die komplette Fahraufgabe und die Insassen sind nur Passagiere [28].

4.1.2 Übersicht der Funktionen

Moderne Fahrassistenzsysteme bilden die Grundvoraussetzung für das autonom fahrende Auto. Es werden kurz die Systeme vorgestellt, die für die Fahrzeugbewegung und Umgebungserkennung notwendig sind [28].

Spurhalteassistenz: Das Fahrzeug erkennt die Fahrspur und kann dieser auch folgen [30].

Fahrstreifenwechselassistenz: Das Fahrzeug erkennt Fahrspuren und ist in der Lage diese auch zu wechseln. Hindernisse werden erkannt [30] [31].

Ausweichassistenz: Sobald das Fahrzeug eine drohende Kollision erkennt und der Fahrer ausweicht, hilft ihm der Assistent, indem er das Lenkradmoment erhöht. Autonome Fahrzeuge sind in der Lage, die Querführung selbst zu übernehmen [29].

Automatischer Bremsassistent: Das Fahrzeug überwacht die Umgebung mittels RADAR, LIDAR und Kamera und analysiert Geschwindigkeit und relativ Geschwindigkeit zwischen sich selbst und anderen Objekten. Wenn eine potenzielle Kollision erkannt wurde, bremst das Fahrzeug selbstständig [32].

Geschwindigkeit und Abstandsreglung: Das Fahrzeug erkennt mittels LIDAR und Radar die Position und Geschwindigkeit vorausfahrender Fahrzeuge und kann entweder eine Sollgeschwindigkeit beibehalten oder bei Bedarf die Geschwindigkeit und den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug anpassen

[33].

Einparkassistent: Ultraschallsensoren erkennen stehende Fahrzeuge und andere Objekte und vermessen die Parklücke. Diese Sensoren haben eine Reichweite von 4,5 bis 5,5 Metern. Während des Einparkvorgangs übernimmt das Fahrzeug die Kontrolle über die Lenkung, während der Fahrer weiterhin das Gaspedal und das Bremspedal bedienen muss. Die Weiterentwicklung dieses Systems ist das autonome Einparken. Hierbei übernimmt das Fahrzeug nicht nur die Lenkung, sondern auch die Längsführung. Es kann selbstständig in

Parklücken einparken und bei reduzierter Geschwindigkeit auch in Parkhäusern manövrieren [29] [34].

Positionsbestimmung: Über das GPS kann das Fahrzeug seine Position bestimmen. Im Falle von kurzzeitigen Interferenzen oder Abschirmung wird durch Koppelortung die Position berechnet. Dazu werden die Daten des Tachosignals für Geschwindigkeit und der Drehratensensoren zur

Richtungsbestimmung genutzt. Um Sensorfehler und akkumulierende Fehler der Koppelortung auszugleichen, wird die Position des Fahrzeugs mit seinem digitalen Karten abgeglichen [35].

Verkehrszeichenerkennung: Über die Kamera werden Verkehrszeichen, unter anderem wie Tempolimit, Gefahrenzeichen sowie Sondermarkierungen aufgezeichnet und interpretiert [36].

Car-to-X-Kommunikation (Car 2 X): Diese Funktion ermöglicht es dem

Fahrzeug, Daten wie Stauinformationen, Umleitungen, Geschwindigkeit und

Position mit anderen Teilnehmern auszutauschen. Das "X" bedeutet, dass die Kommunikation nicht auf eine bestimmte Kategorie von Teilnehmern beschränkt ist. Das Fahrzeug kann sowohl mit anderen Fahrzeugen als auch mit Infrastrukturkomponenten wie Verkehrssignalen oder Funktürmen kommunizieren [37].

Mit den oben genannten Fahrsystemen werden die Kriterien, laut **SAE J3016**, für autonomes Fahren erfüllt [28] und laut Bosch Mobility sind die Fahrassistenzsysteme der Wegbereiter für das autonome Fahren [29].

4.2 Sensorik

Die Erfassung der Fahrzeugumgebung erfolgt durch eine Vielzahl an Sensoren. Dieser Abschnitt widmet sich den gebräuchlichsten Sensortypen, die in modernen Fahrassistenzsystemen verwendet werden. Da die Sensoren auf verschiedenen Messprinzipien basieren, sind die Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf sie unterschiedlich. Um die zuverlässige Funktion der Systeme zu gewährleisten, werden in Fahrzeugen Sensoren eingesetzt, die sich in ihren **Stärken und Schwächen gegenseitig ergänzen** [38] [39]. Diese Kombination und Integration von Daten aus verschiedenen Sensoren sind allgemein als **Sensorfusion** bekannt [39]. Es ist derzeit nicht absehbar, dass sich die grundlegenden Funktionsweisen dieser Sensoren für zukünftige autonome Fahrsysteme ändern werden, im Gegenteil, diese werden als Schlüsseltechnologien gesehen [40]. Weiterhin wird die Funktionsweise des Beschleunigungssensors kurz erläutert.

4.2.1 Lidar

Lidar verwendet elektromagnetische Wellen zur Distanzmessung und zur Erstellung dreidimensionaler Umgebungskarten. Das genutzte Frequenzspektrum umfasst ultraviolettes, infrarotes und sichtbares Licht. Lidar-Sensoren können als Flash-, MEMS- oder OPA-Sensoren ausgeführt werden [41] [42].

Es gibt verschiedene Messverfahren, darunter die Laufzeitmessung, auch bekannt als ToF, bei der die Zeit gemessen wird, die ein ausgesendeter Impuls benötigt, um zurückzukehren. Das AMCW-Verfahren moduliert die Amplitude der elektromagnetischen Welle und ermittelt die Entfernung eines Objekts durch die Phasenverschiebung des zurückkehrenden Signals. Bei

der FMCW-Methode wird die Frequenz des ausgesendeten Signals moduliert, und die Entfernung des Objekts wird anhand der Frequenzdifferenz zwischen dem ausgesendeten und empfangenen Signal bestimmt

[42].

Ein Vorteil der FMCW-Methode gegenüber den anderen Verfahren ist die Möglichkeit, Geschwindigkeiten zu messen, da der Dopplereffekt durch die Frequenzverschiebung berücksichtigt werden kann [43].

Der Hauptvorteil von LiDAR ist die hohe Genauigkeit und Auflösung, mit der Objekte erkannt und dreidimensionale Modelle erstellt werden können. Zudem arbeitet das Lidar unabhängig von den Lichtverhältnissen [42]. Allerdings ist Lidar empfindlich gegenüber Nebel, Staub und Regen, was die Genauigkeit und Reichweite negativ beeinflussen kann [44].

4.2.2 Radar

Radar basiert, ebenso wie Lidar, auf elektromagnetischen Wellen. Beide Messverfahren können als ToF, AMCW oder FMCW ausgeführt werden [45].

Der wesentliche Unterschied liegt in den verwendeten Frequenzen. Für Radarsensoren im Automobilbereich sind die Frequenzbänder für Nahbereichsradar (24,25 bis 24,25 GHz) und Fernbereichsradar (76 bis 77 GHz) freigegeben [46].

Radar zeichnet sich durch die höchste Robustheit gegenüber widrigen Wetter- und

Umgebungsbedingungen aus und erreicht zudem die größte Reichweite im Vergleich zu anderen Sensoren. Allerdings ist die Auflösung von Radar geringer als die von LiDAR. [47].

4.2.3 Ultraschall

Durch den piezoelektrischen Effekt wird ein Piezoplättchen zum Schwingen angeregt. Diese Schallwellen, deren Frequenz zwischen 40 kHz und 50 kHz liegt, werden ausgesendet und von einem Objekt reflektiert. Überschreitet die Amplitude der reflektierten Schwingung einen bestimmten Schwellenwert, wird das Signal als gültiges Echo bewertet. Dies ist ein ToF-Messverfahren, bei dem keine Relativgeschwindigkeit eines Objekts bestimmt wird. Da diese Sensoren typischerweise als Parksensoren verwendet werden, ist dies auch nicht weiter relevant. Ultraschallsensoren haben nur eine kurze Reichweite, und da das Piezoplättchen zwischen dem Aussenden der Schallwelle und dem Empfang in Ruhe sein muss, ergibt sich ein minimaler Abstand, der gemessen werden kann [48].

4.2.4 Kamera

Kameras gehören zu den passiven Sensoren, was bedeutet, dass keine Signale ausgesendet werden. Stattdessen sind diese Systeme auf gute Lichtverhältnisse bzw. externe Beleuchtung angewiesen. Sie sind empfindlich gegenüber schlechten Wetter- und Witterungsverhältnissen sowie Verschmutzung der Optik [49] [50]. Die Messgenauigkeit nimmt mindestens reziprok proportional mit der Entfernung ab und ist deshalb weniger für die Entfernungsmessung geeignet als Radar oder LiDAR [47]. Weiterhin kann man Kameras noch in Infrarotkameras und Wärmebildkameras unterscheiden. Diese unterscheiden sich in der Nutzung des Wellenlängenbereichs. Infrarotkameras nutzen den nahen Infrarotbereich und ermöglichen eine gute Nachtsicht. Wärmebildkameras können Objekte detektieren, die sich von der Umgebungstemperatur unterscheiden. Dies kann helfen, Menschen oder Wild besser zu detektieren. Allerdings liefern beide Kameratypen eine geringere Auflösung und schlechtere Farberkennung [51].

Kameras erzeugen einen hochaufgelösten Datenstrom, die höher sind als die von Radar und LiDAR. Weiterhin sind die enthaltenen Informationen sehr vielfältig und ermöglicht potenziell die Erfassung aller für die Fahrzeugführung benötigten Daten. Das Prinzip kommt der menschlichen Wahrnehmung am nächsten. Allerdings muss die von der Kamera aufgenommenen Daten verarbeitet und interpretiert werden [47], [52].

4.2.5 Beschleunigungs- und Drehratensensoren

Beschleunigungssensoren bei Fahrzeugen werden zur Messung der Längsbeschleunigung genutzt. Durch die Oberflächenmikromechanik können kleine Feder-Masse-Systeme erstellt werden. Typischerweise sind diese als Doppel-Kammstrukturen aufgebaut, die zusammen als Elektrode für einen Kondensator fungieren. Ein Kamm ist fixiert, während der zweite frei beweglich ist. Sobald eine Beschleunigung auftritt, wird der zweite Kamm ausgelenkt, was eine Kapazitätsänderung bewirkt [53].

Der Drehratensensor erfasst die Gierrate des Fahrzeugs um seine vertikale Achse. Für die Bestimmung wird die Coriolis-Kraft genutzt, um Elektroden auszulenken. Diese Sensoren werden oft, wie die Beschleunigungssensoren, als mikromechanische Sensoren ausgeführt [54].

Beide Sensortypen werden unter anderem für die elektronische Stabilitätskontrolle und die Koppelnavigation verwendet [55] [56].

4.3 Technologien für die Entwicklung autonomer Fahrsysteme

Autonome Fahrsysteme sind die komplexen Steuerungseinheiten eines Fahrzeugs.

Folgende Schritte sind erforderlich, um ein Fahrzeug sicher auf öffentlichen Straßen zu bewegen [57]:

Wahrnehmung der Umgebung und des Fahrzeugstatus: Erfassung und Analyse der relevanten Informationen aus der Umgebung und dem Fahrzeug selbst.

Verarbeitung und Interpretation dieser Informationen: Erstellung eines verständlichen Modells der Umgebung basierend auf den gesammelten Daten.

Fällen von (Fahr-)Entscheidungen: Treffen fundierter Entscheidungen über das Fahrverhalten auf Grundlage des interpretierten Modells.

Umsetzen der Entscheidungen: Ausführung der getroffenen Entscheidungen durch Steuerung des Fahrzeugs, um sicher und effizient zu navigieren.

Während viele Fahrszenarien mit klassischen Methoden der Wahrnehmung, Routenplanung und Bewegungssteuerung gelöst werden können, erfordern komplexere Situationen den Einsatz fortschrittlicher Technologien.

Sensorfusion spielt eine entscheidende Rolle bei der zuverlässigen Detektion des Fahrzeugumfelds. Daten aus verschiedenen Sensoren werden zusammengefasst und ausgewertet. Dadurch können die Stärken der einzelnen Sensoren für sich genutzt und die Schwächen kompensiert werden. Die Präzision und Zuverlässigkeit der Umgebungswahrnehmung werden gesteigert [58]. Beispielhaft wird das Ergebnis eines Experiments aus den USA vorgestellt, siehe Tabelle 3. Dabei wurden verschiedene Tests bzw. Szenarien jeweils einzeln mit einem Lidar, Radar und einer Kamera durchgeführt und anschließend in verschiedenen Kombinationen wiederholt.

Tabelle 3: Tabelle zum Vergleich der Sensorleistung bei verschiedenen Aufgaben und Bedingungen. In Anlehnung an [59]

	Radar	Lidar	Kamea	Radar + Lidar	Lidar+ Kamera	Radar + Kamera	Radar+ Lidar+ Kamera
Objekterkennung							
Objektklassifizierung							
Entfernungsabschätzung							
Abschätzung der Annäherungsgeschwindigkeit							
Erkennung der Objektkanten							
Spurerkennnung							
Sichtbereich							
Alle Wetterverhältnisse							
Tag und Nacht							
Lokalisierung/ Kartierung							

Auf der linken Seite der Tabelle sind die getesteten Eigenschaften aufgeführt, während die Farbgebung auf der rechten Seite qualitativ das Ergebnis darstellt. Grün signalisiert ein robustes Verhalten des Sensors im Test, gelb weist auf Einschränkungen hin, und rot deutet auf ein instabiles Verhalten hin.

KI-basierte Architekturen können für die Entwicklung und Verbesserung autonomer Fahrsysteme genutzt werden. Ein wichtiges Teilgebiet ist das

maschinelle Lernen, das verschiedene Ansätze und Komplexitätsstufen umfasst. Abbildung 11 zeigt den Unterschied zwischen einem statischen Programm und dem maschinellen Lernen [60].

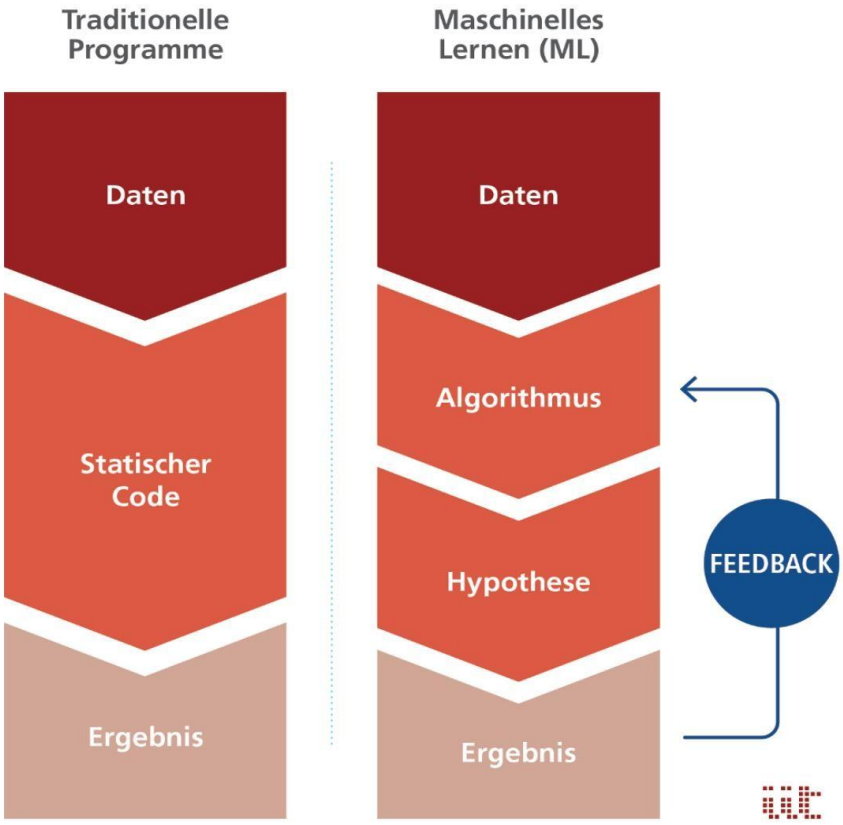


Abbildung 10: Unterschied traditionelle Programme und ML [60]

Während traditionelle Programme auf der Grundlage von Daten mit Code programmiert werden, um ein gewünschtes Ergebnis zu erzielen, ermöglicht maschinelles Lernen (ML) eine Rückkopplung. Dies bedeutet, dass sich der Algorithmus basierend auf den erlernten Mustern anpassen und verändern kann [60].

Die gebräuchlichsten Methoden für die Entwicklung autonomer Fahrsysteme fallen in die Unterkategorie des Deep Learning und umfassen CNNs, RNNs und DRL. Durch das Training neuronaler Netze mit großen Mengen an Fahrdaten können die Systeme lernen. So können komplexe Aufgaben wie Objekterkennung und Entscheidungsfindung kontinuierlich verbessert werden [60] [61].

Für den Einsatz dieser Methoden im maschinellen Lernen sind leistungsstarke Computer und eine große Menge qualitativ hochwertiger Daten erforderlich. Je qualitativer die Daten, desto besser kann der KI-Algorithmus lernen.

4.4 Aktuelle Erprobungsmethoden

Die Erprobung von Fahrassistenzsystemen und autonomen Fahrsystemen erfolgt entweder auf öffentlichen Straßen, in privaten Testgeländen oder in virtuellen Umgebungen mit realen Fahrzeugen.

Beispielsweise wird eine Flotte von mehr als 300 Fahrzeugen mit mehr als 1000 Testfahrern in Kalifornien eingesetzt. Diese Fahrzeuge nehmen am öffentlichen Straßenverkehr teil und sammeln Daten zur weiteren Entwicklung und Validierung. Ein wesentlicher Nachteil dieser Realtests ist die eingeschränkte Kontrolle über die Testbedingungen. Unvorhersehbare Umweltfaktoren und Verkehrsstörungen können die Reproduzierbarkeit beeinträchtigen und die gewünschten Testergebnisse verfälschen. Darüber hinaus besteht das Risiko, kostspielige Prototypen zu beschädigen oder sogar zu zerstören. Zudem sind Fahrmanöver im Grenzbereich im öffentlichen Verkehr nicht erlaubt, was die Testmöglichkeiten weiter einschränkt. Das Erproben kann auch negative Auswirkungen auf die öffentliche Meinung haben, da sie Bedenken hinsichtlich der Sicherheit, der Umweltbelastung und der Staus in Innenstädten hervorrufen [62].

Darüber hinaus zeigen Schätzungen, dass die bloße Imitation menschlichen Fahrverhaltens für die Verbesserung einer KI, etwa zur Reduzierung von Unfallquoten, zu aufwendig ist. Virtuelle Tests bieten eine effizientere Möglichkeit, zusätzliche Trainingsdaten zu generieren und gefährliche Szenarien zu simulieren. Ein Beispiel hierfür ist Waymo, die bereits 2,7 Milliarden Simulationskilometer generiert hat [63].

Ein Vehicle in the Loop Konzept kombiniert reale Fahrzeuge mit einer simulierten Umgebung, die beispielsweise durch Software wie Nvidia's AutoSim dargestellt wird [64].

Als Beispiel für die Erprobung auf Testgeländen sei auf das Prüfgelände von Mercedes-Benz in Immendingen verwiesen. Dort wird ein Bereich von 100.000 m² mit einer Breite von 650 m und eine Länge von 950 m ausschließlich zur Erprobung von autonomen Fahrzeugen genutzt, siehe Abbildung 12 [65].

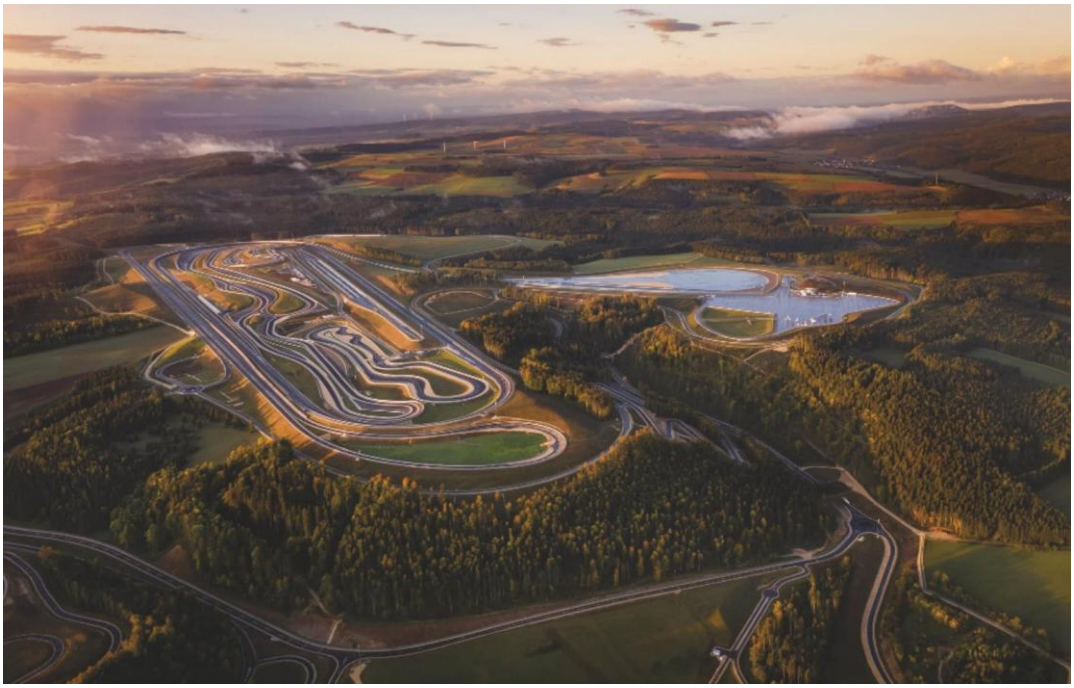


Abbildung 11: Test und Entwicklungszentrum Immendingen [65]

Testdaten aus realen Fahrversuchen auf öffentlichen Straßen werden verwendet, um einen Planungsalgorithmus im Kontrollzentrum mit Informationen zu versorgen. Auf dieser Grundlage werden bis zu fünf autonomen Fahrzeugen parallel gesteuert, die Stadtfahrprofile mit einer Geschwindigkeit von maximal 60 km/h abfahren. Der Planungsalgorithmus legt virtuelle Sicherheitszonen fest, die von den Fahrzeugen nicht überschritten werden dürfen. Je mehr Fahrzeuge eingesetzt werden, desto größer ist die räumliche Einschränkung für die Erprobung. Die Fahrzeuge stehen über LTE in ständigem Kontakt mit dem Kontrollzentrum und sind mit einem Ortungsgerät ausgestattet, das zwei GPS-Antennen zur Fahrzeuglokalisierung umfasst [65].

Für die Validierung von Fahrassistenz- und autonomen Fahrsystemen wurde im Jahr 2023 von der UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) ein technisches Regelwerk veröffentlicht. Dieses Regelwerk dient als Leitfaden zur Einführung internationaler Standards. Es enthält detaillierte Empfehlungen für die Erprobung dieser Systeme auf Teststrecken, in Simulationen und im realen Straßenverkehr. Außerdem werden Richtlinien zur Gestaltung der zu prüfenden Szenarien bereitgestellt. Aufgrund des Umfangs dieses Dokuments wird auf das Literaturverzeichnis zur weiteren Einsicht verwiesen [66].

5 Analyse der Anforderung, Bewertung und die Umsetzungsfähigkeit an das Erproben

In dem vorliegenden Kapitel werden die spezifischen Anforderungen an die Erprobung identifiziert und mögliche Umsetzungen und Ideen anhand dieser Anforderungen auf Fahrzeugprüfständen aufgezeigt und bewertet.

5.1 Anforderungen an die Fahrzeugprüfstände für die Erprobung autonomer Fahrsysteme

Aus dem vorangegangenen Kapiteln werden folgende Anforderungen an das Erproben eines autonomen Fahrsystems abgeleitet und identifiziert:

Erhöhte Sicherheitsanforderungen: Für die Validierung des Gesamtsystems kann nach wie vor die Erprobung für risikoarme Szenarien auf Testgeländen oder der öffentlichen Straßen stattfinden. Für kritische und risikoreiche Fahrmanöver ist dies jedoch nicht geeignet. Daher ist es sinnvoll, diese

Manöver auf Fahrzeugprüfstände zu verlagern. Somit besteht die Notwendigkeit zu prüfen, ob die Fahrzeugprüfstände in der Lage sind, die

Kräfte, die während eines kritischen Fahrmanövers entstehen, aufzunehmen. Fahrzeugprüfstände, die zu Homologation und Zertifizierung genutzt werden, haben in der Regel deutlich kleinere Anforderungen an die Fahrdynamik. Der

US-06-Zyklus gilt als einer der aggressivsten Testzyklen in Bezug auf die Beschleunigung. Diese beträgt ca. 3,8 m/s² [67].

Erproben der Wahrnehmung: Die Voraussetzung für eine korrekte

Entscheidungsfindung des autonomen Fahrsystems, ist eine zuverlässige

Wahrnehmung der Umwelt. Daher muss die Sensorik auf Zuverlässigkeit und Robustheit überprüft werden. Störfaktoren wie Licht, Regen und Schnee dürfen keinen gefährlichen Einfluss auf das System haben. Nicht nur

Verkehrsteilnehmer, sondern auch Tiere, Verkehrszeichen und die Fahrspur müssen erkannt werden. Weiterhin muss das Fahrzeug in der Lage sein, seine Position jederzeit zu lokalisieren.

Verarbeitung und Interpretation von Daten: Es muss gewährleistet sein, dass Fahrzeugprüfstände regelkonformes Fahren und korrekte Entscheidungen unter allen denkbaren Verkehrsszenarien überprüfen können.

Handhabung hoher Datenmengen: Die von autonomen Fahrzeugen generierten Datenmengen sind weitaus größer als die von konventionellen Fahrzeugen. Für die Analyse müssen die Daten sortiert und gespeichert werden. Dazu braucht es eine passende Infrastruktur auf dem Fahrzeugprüfstand.

Effiziente Teststrategien und realitätsnahe Erprobung: Mit zunehmender Komplexität der Fahrzeuge steigt der Bedarf an intensiver und realitätsnaher Validierung. Um den erheblichen Testaufwand zu bewältigen und eine effiziente Nutzung der Testzeiten zu gewährleisten, müssen kritische Szenarien, die nicht auf öffentlichen Straßen oder Testgeländen durchgeführt werden können, priorisiert werden. Zudem muss die Qualität der Erprobung im Hinblick auf Realitätsnähe gewährleistet sein.

5.1.1 Erhöhte Sicherheitsanforderung

Ausgehend von der Prämisse kritische Fahrmanöver zu prüfen, muss der Prüfstand im Idealfall die komplette Fahrdynamik simulieren können. Dies schließt die exakte Reproduktion aller Fahrwiderstände sowie die Aufnahme der dabei entstehenden Kräfte ein.

Längsdynamik:

Für die Längsdynamik des Fahrzeugs könnten daher die maximal mögliche Beschleunigung und Geschwindigkeit als Referenz herangezogen werden. Das Beschleunigungsvermögen eines Fahrzeugs wird primär durch die Leistung des Antriebs und die Fahrzeugmasse bestimmt, ist jedoch durch die verfügbare Traktion, also den Reibungswiderstand zwischen Reifen und Straße, begrenzt. Eine Beschleunigung von **10 m/s²** gilt im Straßenverkehr als sehr hoch und wird von Sportfahrzeugen wie dem Porsche 911 Turbo S erreicht. Solche Werte könnten als obere Grenze für die Prüfung der Längsdynamik auf Fahrzeugprüfständen herangezogen werden. Es ist jedoch fraglich, ob eine solche Referenz für autonome Fahrzeuge sinnvoll ist, da Passagiere in autonomen Fahrzeugen keine Kontrolle über das Fahrzeug haben und somit anfälliger für Reisekrankheit (**Motion Sickness**) sind. Erste Forschungsergebnisse zeigen, dass dieses Problem durch eine Verringerung der Beschleunigung auf etwa **2,5 m/s²** deutlich gemindert werden kann. Überschreitet man diesen Wert, beginnt das Unbehagen der Passagiere [68] [69]. Trotzdem besteht die Notwendigkeit, bei einer Notfallbremsung mit maximaler Verzögerung zu stoppen. Ausgehend von Abbildung 2, wird eine Haftreibungszahl von 0,95 bei trockener Straße möglich. Damit ist nach Gleichung 9 eine maximale Verzögerung von **9,32 m/s²** möglich.

$$\mathrm{a} = g \cdot \mu_r \qquad (9)$$

Mit diesem Beschleunigungswert und einer Masse ähnlich dem Porsche 911 Turbo S ergibt sich nach dem zweiten Newtonsches Gesetz eine Kraft von 16776 N, die ein Fahrzeugrollenprüfstand aufbringen muss. Diese wurde mittels Gleichung 10 errechnet.

$$F_l = m \cdot a_l \qquad (10)$$

Für den weiteren Verlauf wird die maximale Masse von **2000 kg**, dem durchschnittlichen Gewicht eines in Europa verkauften Teslas, als oberste Grenze

für die Betrachtung der Anforderungen festgelegt [70]. Die Wahl eines Fahrzeugs mit einer Masse von 2000 kg repräsentiert ein marktübliches und technologisch fortschrittliches Elektrofahrzeug. Somit erhalten wir eine Kraft von **18640 N**, die der Prüfstand aufnehmen muss.

Für Prüfstände, bei denen die Welle direkt an der Radnabe verbunden wird, muss das

Raddrehmoment für Vergleichszwecke herangezogen werden. Zum Beispiel wird zur Berechnung eine Kraft von 18640 N angenommen. Bei einem Reifenradius von 0,3 m ergibt sich daraus ein Drehmoment von etwa **5592 Nm**. Je nach Antriebsart, ob Front-, Heck- oder Allradantrieb, müssen die einzelnen Antriebsmaschinen des Prüfstands entsprechend ausgelegt werden. Dies führt zur folgenden Anforderung:

Die Erprobung der maximalen Geschwindigkeit sollte unter Berücksichtigung der Zielmärkte und Einsatzgebiete des Fahrzeugs festgelegt werden. Mit **130 km/h** deckt man, bis auf wenige Ausnahmen, alle Tempolimits der Welt ab [71].

Für eine realitätsnahe Simulation der Fahrdynamik soll das Fahrzeug Nickbewegungen ausführen können.

Deshalb werden folgende Anforderungen gestellt:

A1: Der Prüfstand muss in der Lage sein, eine maximale **Verzögerung** von **9,32 m/s²** zu simulieren und damit eine Kraft von 18640N aufnehmen.

A2: Der Prüfstand muss in der Lage sein, eine maximale **Beschleunigung** von **2,5 m/s²** zu simulieren und damit eine Kraft von 5000N aufnehmen.

A3: Der Prüfstand muss in der Lage sein, eine Geschwindigkeit von **130 km/h** zu erreichen oder dies zu simulieren.

A4: Der Prüfstand muss dem Fahrzeug die **Nickbewegung** erlauben können oder diese simulieren.

Querdynamik:

Für die Querdynamik eines Fahrzeugs muss der vollständige Lenkwinkel abgebildet werden können. Beim maximalen Radeinschlag kann dieser Winkel typischerweise zwischen 40 bis 50° betragen, allerdings sind Winkel von größer als 20° in der Regel nur für das Rangieren von Bedeutung. Da der Fokus vor allem auf kritische Fahrmanöver liegt, wird die Anforderung bis **20° Lenkwinkel** als ausreichend erachtet [72].

Zusätzlich muss die Lenkgeschwindigkeit berücksichtigt werden, die sich aus der Lenkbewegung des Lenkrads und der Übersetzung im Lenkgetriebe ergibt. Die Übersetzung ist variabel und passt sich an die Fahrzeuggeschwindigkeit an. Um eine einheitliche Referenz zu erhalten, wird nicht die Lenkgeschwindigkeit als Maß angegeben, sondern die Geschwindigkeit der

Zahnstange im Lenkgetriebe. Diese kann typischerweise bis zu 0.225 m/s betragen [72].

Bei höherer Geschwindigkeit und engerem Kurvenradius stellt sich der Schräglaufwinkel ein. In Abbildung 12 sieht man einen typischen Zusammenhang von Radlasten, Schräglaufwinkel und Seitenkraft. Fahrzeuge können grundsätzlich bis zu 10 m/s² Querbeschleunigung im Grenzbereich erreichen. Abbildung 13 zeigt resultierende

Querbeschleunigungen in Abhängigkeit des Kurvenradius und der Geschwindigkeit. Man erkennt, dass mit ca. 4m/s² auf Landstraßen die höchste Querbeschleunigung auftritt, allerdings mit einer Auftritts-Wahrscheinlichkeit von 0,01 %. Da der Grenzbereich dennoch mit erprobt werden soll, werden 8 m/s² als Anforderung als ausreichend gesehen [73].

Bild 8: Querbeschleunigungsbereiche.
A Kleinsignalbereich,
B linearer Bereich (relevant für normale Autofahrer),
C Übergangsbereich,
D Grenzbereich (Stabilität steht im Vordergrund, relevant für Presse und Experten).

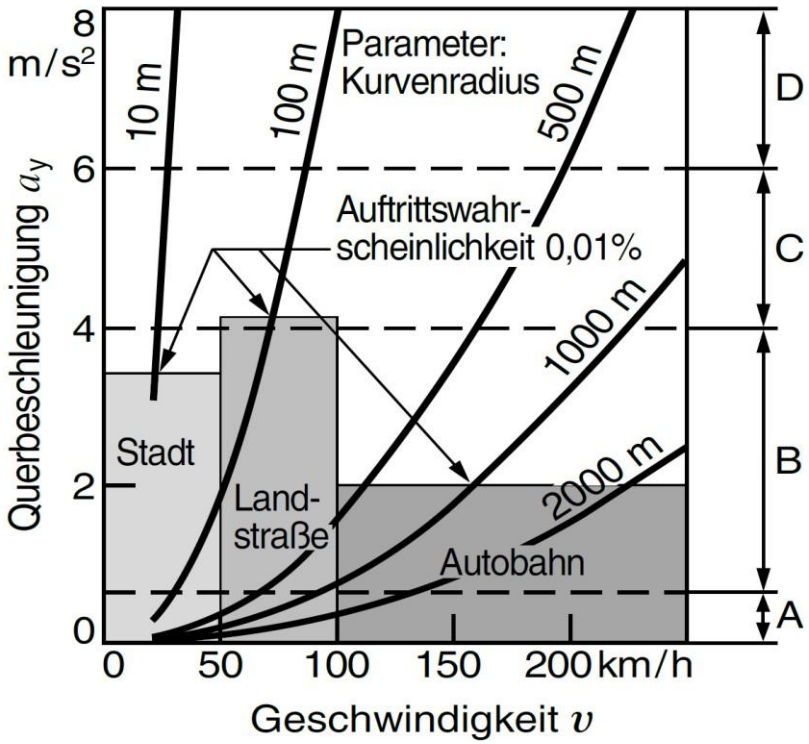


Abbildung 12: Querbeschleunigungen bei PKWs [73]

Darauf basierend sind folgende Daten in der Tabelle 4 mit dem zweiten Newtonsche Gesetz errechnet worden.

Tabelle 4: Berechnete Seitenkraft pro Achse bei einer Achslastverteilung von 50:50 in Abhängigkeit von Querbeschleunigung und Fahrzeugmasse

	Fahrzeugmasse in kg				
Querbeschleunigung in m/s²	1500	2000	2500	3000	3500
2	1500	2000	2500	3000	3500
4	3000	4000	5000	6000	7000
6	4500	6000	7500	9000	10500
8	6000	8000	10000	12000	14000
10	7500	10000	12500	15000	17500
	Seitenkraft in N pro Achse bei 50:50 Achslastverteilung				

Die dynamische Radlastverteilung ist weder in der Abbildung 12 noch in der Tabelle 4 berücksichtigt worden.

Zusammenfassend werden folgende Anforderungen gestellt:

A5: Der Prüfstand muss die Querkräfte von **9600 N pro Achse** aufnehmen können. Damit hat man bei einem **2000 kg** Fahrzeug und einer Querbeschleunigung von **8 m/s²** auch noch Puffer für den Fall, dass die Achslastverteilung 60:40 beträgt.

A6: Die Lenkgeschwindigkeit muss mit **0.225 m/s** an der Zahnstange am Prüfstand bewegt oder simuliert werden können.

A7: Der Prüfstand soll einen Lenkwinkel von **20°** erlauben oder simulieren können.

A8: Der Prüfstand muss ein **Gieren** erlauben oder simulieren können.

A9: Der Prüfstand muss ein **Wanken** erlauben oder simulieren können.

Vertikaldynamik:

Eine Fahrbahn ist in der Regel nicht komplett eben, sondern weist Unebenheiten auf. Zudem ist bei Fahrten mit Schlaglöchern zu rechnen. Um eine realitätsgetreue Nachstellung dieser Bedingungen zu gewährleisten, muss ein Fahrzeugprüfstand in der Lage sein, das Fahrzeug vertikal anzuregen. Die maximale vertikale Auslenkung kann sich an den maximal zulässigen Fahrbahnzuständen im jeweiligen Markt orientieren. In Deutschland gibt es zwar keine genauen gesetzlichen Vorgaben für die Tiefe von Schlaglöchern, allerdings wurde dieses Thema bereits in Deutschland gerichtlich behandelt. Die Rechtsprechung besagt, dass auf verkehrswichtigen Straßen Schlaglöcher mit einer Tiefe bis zu 15 cm und auf Autobahnen sowie Landstraßen mit 10 cm zu erwarten sind [75]. Diese Werte können als Anhaltspunkte für die Auslegung der vertikalen Auslenkung auf Prüfständen dienen.

Deshalb werden folgende Anforderungen gestellt:

A10: Der Prüfstand muss in der Lage sein, das Fahrzeug **15 cm vertikal auszulenken** oder dies zu simulieren.

Die Testumgebung muss verschiedene Fahrbahnzustände simulieren können, um die Fahrsysteme auf unterschiedlichen Untergründen zu testen. Dazu gehören trockene, nasse, vereiste und verschneite Fahrbahnen. Diese Bedingungen beeinflussen die Traktion und das Bremsverhalten erheblich und sind für die Prüfung der Fahrspurerkennung und der Reaktionsfähigkeit des Fahrzeugs auf unterschiedliche Fahrbahnbedingungen unerlässlich.

5.1.2 Erproben der Wahrnehmung

Die Wahrnehmung des autonomen Fahrsystems erfolgt über die Sensorik und wurde in Kapitel 4.2 vorgestellt.

Zur Überprüfung von **Umgebungssensoren** für autonome Fahrsysteme müssen folgende Eigenschaften getestet werden:

Reichweitengenauigkeit und Auflösung: Neben der maximalen Reichweite der Sensoren muss auch ihre Fähigkeit geprüft werden, nahe beieinanderliegende Objekte präzise zu unterscheiden. Eine hohe Auflösung ist insbesondere in komplexen Verkehrssituationen von Bedeutung, um die genaue Position von Objekten korrekt zu erfassen.

Azimut- und Elevationswinkel: Die horizontalen und vertikalen Erfassungswinkel der Sensoren bestimmen das Sichtfeld und die

Abdeckungsbereiche des autonomen Fahrzeugs. Eine präzise Messung dieser

Winkel ist essenziell, um eine lückenlose Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung zu gewährleisten.

Geschwindigkeitserfassung: Das autonome Fahrzeug muss in der Lage sein, die Geschwindigkeit anderer Verkehrsteilnehmer präzise zu messen.

Objekterkennung: Die Sensoren müssen zuverlässig die Art, Form und Position von Objekten, wie Fußgängern, Fahrzeugen oder Verkehrszeichen, erkennen. Dies ist entscheidend für die korrekte Interpretation und Reaktion des Fahrsystems auf die jeweilige Verkehrssituation.

Die genauen Anforderungen variieren stark, je nach Sensortyp. Selbst innerhalb eines Sensortyps gibt es Unterschiede in den spezifischen Eigenschaften, weshalb es nicht sinnvoll ist, feste Parameter als allgemeine Anforderung festzulegen. Stattdessen sollten diese Anforderungen je nach Anwendung und Szenario spezifiziert werden.

Eine Herausforderung für die Sensorik stellen die **unterschiedlichen Wetterbedingungen** dar, einschließlich simuliertem Regen und Nebel. Dabei muss die Tropfengröße, -form und -verteilung entsprechend angepasst werden. Für die Tropfengröße und -verteilung kann die Marshall-Palmer-Verteilung als Referenz dienen, während für die Kategorisierung der Regenmenge auf die Standards des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen werden kann. Dies gilt für alle Arten von Niederschlag, zu denen unter anderem

Schnee, Hagel, Sprühregen und Eiskörner zählen. Weitere Details sind dem Anhang zu entnehmen [76], [77].

Für die Koppelnavigation und den Kartenabgleich sind sowohl **Beschleunigungs- und Drehratensensoren** als auch **GNSS-Systeme** unerlässlich. Diese Sensoren liefern die notwendigen Daten zur Bestimmung von Bewegungen und Richtungsänderungen des Fahrzeugs, während GNSS-Systeme eine präzise Positionsbestimmung ermöglichen. Gemeinsam tragen sie dazu bei, das Fahrzeug kontinuierlich zu lokalisieren und Abweichungen zwischen der tatsächlichen Position und der Karteninformation zu erkennen.

Die **Umgebungstemperaturen** im Prüfstand sollten auf die klimatischen Bedingungen der Zielmärkte des Fahrzeugs abgestimmt werden. So wurden in Death Valley, USA, Temperaturen von fast 60 °C gemessen, während in nördlichen Regionen wie Kanada, Russland und Teilen der USA Temperaturen von unter -60 °C auftreten können [78]. Für die Prüfung der Elektronikkomponenten im Fahrzeug unter diesen extremen Bedingungen bietet die Norm ISO 16750-4 detaillierte Vorschriften. Aus der Norm kann man entnehmen, dass viele Erprobungen diesbezüglich im unteren Temperaturbereich bei -40 °C begrenzt sind [79]. Deshalb werden die Anforderungen für die Umgebungstemperatur mit **-40 °C bis +60 °C** als ausreichend erachtet.

Der Prüfstand muss in der Lage sein, **verschiedene Tageszeiten und Lichtverhältnisse** realistisch nachzubilden, um die Reaktion des Fahrzeugs auf wechselnde Beleuchtung zu testen. Dazu zählt die direkte Sonneneinstrahlung an klaren Tagen, diffuses Licht bei bewölktem Himmel und auch Situationen völliger Dunkelheit. Darüber hinaus müssen künstliche Lichtquellen, wie Straßenlaternen, Ampeln und die Scheinwerfer anderer Fahrzeuge, realistisch simuliert werden. Diese Faktoren sind entscheidend, um die Leistung der Kamerasysteme unter Bedingungen wie Nachtfahrten, schlechten Lichtverhältnissen oder Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge zu prüfen. Bei Tageslicht können bis zu 100.000 Lux ausgestrahlt werden. Weiterhin ist anzunehmen, dass in Kamerablitz deutlich heller ist und dementsprechend muss der schlechteste Fall ebenfalls mit simuliert werden [80].

Für realitätsnahe Tests müssen in der Umgebung verschiedene Objekte integriert werden, die in typischen Verkehrssituationen vorkommen. Dies umfasst Fußgänger, andere Fahrzeuge, Gebäude und Parklücken. Die autonome Fahrsoftware muss in der Lage sein, diese Objekte zuverlässig zu erkennen und entsprechend darauf zu reagieren. Dies gilt ebenso für Verkehrszeichen und Markierungen, sowie die Fahrspur selbst, um die Fähigkeit des Fahrzeugs zu prüfen, auf Verkehrsvorschriften zu reagieren.

Zusätzlich sollten auch unvorhersehbare Elemente wie plötzlich auftretende Hindernisse oder Tiere in die Testumgebung integriert werden, um das Verhalten des Systems unter außergewöhnlichen Bedingungen zu testen. Hier-

bei sollten Objekte nicht nur statisch, sondern auch dynamisch simuliert werden können, um möglichst viele Verkehrsszenarien abzubilden, wie zum Beispiel, Stadtverkehr, Kreuzungssituationen, Autobahn etc. Gerade die unklaren und risikoreichen Szenarien sind wichtig, um die Entscheidungsfähigkeit und Reaktionszeit autonomer Fahrsystem zu beurteilen.

Deshalb werden folgende Anforderungen gestellt:

A11: Der Prüfstand muss die Sensorik auf ihre **spezifizierte Reichweite und Auflösung** erproben.

A12: Der Prüfstand muss die Sensorik auf ihre **spezifizierte FoV** testen.

A13: Der Prüfstand muss die Sensorik dahingehend prüfen, **Formen und Art von Objekten zuverlässig zu erkennen**.

A14: Der Prüfstand muss die Sensorik dahingehend testen, dass die **korrekte Erfassung der Geschwindigkeit** von Objekten gewährleistet ist.

A:15: Der Prüfstand muss die Sensorik bei Temperaturen zwischen **-40 °C und +60 °C** erproben können.

A:16: Der Prüfstand muss in der Lage sein, **kontinuierlich Lichtintensitäten** von bis zu **100.000 Lux** zu erzeugen, um verschiedene Umgebungsbedingungen wie starkes Sonnenlicht realistisch simulieren zu können.

A17: Der Prüfstand muss in der Lage sein, **kurze Lichtintensitäten** zu erzeugen die vergleichbar mit einem Kamerablitz.

A18: Der Prüfstand muss verschiedenste **Wetter- und Witterungsbedingungen simulieren** können.

A19: Der Prüfstand muss in der Lage sein, realistische **Daten für Beschleunigungs- und Drehratensensoren** zu simulieren.

A20: Der Prüfstand muss die Erprobung von **GNSS-Daten** durch realistische Simulation ermöglichen.

5.1.3 Verarbeitung und Interpretation von Daten

Es reicht nicht aus, dass autonome Fahrsysteme ihre Umgebung nur erfassen, sondern sie müssen auch in der Lage sein, die erfassten Daten korrekt zu verarbeiten und zu interpretieren. Für die Entwicklung und Validierung des Gesamtfahrzeugs am Prüfstand bedeutet dies, dass das Fahrsystem verschiedene Fahrszenarien durchläuft und im Anschluss bewertet wird, ob es regelkonform am Straßenverkehr teilgenommen hat und korrekte Fahrentscheidungen getroffen worden sind.

Zur Bewertung der Regelkonformität autonomer Fahrsysteme kann die jeweilige Straßenverkehrsordnung herangezogen werden. Diese enthält klar definierte Vorgaben, beispielsweise zur Einhaltung von Vorfahrtsregeln, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Sicherheitsabständen, die vergleichs-

weise leicht zu überprüfen sind. Komplexere Entscheidungen, wie strategische Fahrentscheidungen oder ethische Dilemmas, können jedoch nicht allein durch festgelegte Regeln bewertet werden. In solchen Fällen liegt die Verantwortung bei den Entwicklern des autonomen Systems, entsprechende Vorschriften zur Prüfung zu erstellen.

Im realen Straßenverkehr existiert eine riesige Anzahl an Parametern, die ein Fahrszenario definieren. Diese umfassen Elemente wie den Verkehrsteilnehmer, Wetterbedingungen und unerwartete Hindernisse. Verkehrszeichen, Straßen und Spurführung müssen eindeutig erkannt werden. Um dieser Komplexität gerecht zu werden, muss der Prüfstand alle erdenklichen Szenarien anbieten. Weiterhin muss die Datenübertragung und Simulation echtzeitfähig sein.

Ein übergeordnetes Automatisierungsprogramm muss zudem in der Lage sein, die verschiedenen Simulationsprogramme anzupassen und unterschiedliche Szenarien zu erstellen. Dazu gehören einfache Zyklen, Stresstests, ethische Dilemma-Tests sowie zufällig generierte Testszenarien. Nur so kann eine umfassende und realistische Erprobung der Systeme gewährleistet werden.

Deshalb werden folgende Anforderungen an den Fahrzeugprüfstand gestellt:

A21: Der Prüfstand muss in der Lage sein, **detaillierte Umgebungsmodelle inklusive Verkehrsinfrastruktur** zu simulieren.

A22: Der Prüfstand muss die Simulation dynamischer **Verkehrsteilnehmer** (z. B. Fußgänger, Fahrräder, Fahrzeuge) ermöglichen und **deren Verhalten in Echtzeit anpassen**.

A23: Der Prüfstand muss **komplexe Fahrszenarien** generieren können und diese müssen **variabel beliebig gestaltbar** sein. Darunter auch Stresstests und ethische Dilemmas-Tests, sowie zufallsgenerierte Hindernisse.

A24: Der Prüfstand muss für die Simulation **Echtzeitfähigkeit** gewährleisten können.

A25: Der Prüfstand muss **offene Schnittstellen** zur Anbindung von Simulationsprogrammen, Automatisierungssoftware und dem autonomen Fahrsystem bereitstellen, um eine **flexible Integration** zu ermöglichen.

5.1.4 Handhabung hoher Datenmengen

Mit steigender Entwicklung des autonomen Fahrsystems erhöhen sich auch die Datenmengen, die generiert werden. Dies liegt unter anderem daran, dass die Anzahl der Sensoren und deren Auflösung immer fortschrittlicher werden. Tabelle 5 zeigt eine Abschätzung der generierten Datenmenge der Sensoren eines autonomen Fahrzeugs. Die Abschätzung wurde 2017 von

Lucid Motors getroffen. Auf Grundlage dieser Daten könnten somit über 19 Terabyte an Daten pro Stunde generiert werden.

Tabelle 5: Abschätzung von Lucid Motors zu den Datenmengen und Anzahl an Sensoren in einem autonomen Fahrzeug [81]

Sensortyp	typische Anzahl	Daten generiert in einer Sekunde pro Sensor
GPS, IMU	1	<0.1 Mbit
Ultraschall Sensor	8-16	<0.01 Mbit
Kamera	6-12	500-3500 Mbit
Radar	4-6	0.1-15 Mbit
Lidar	1-5	20-100 Mbit

Bei einer 30-tägigen Erprobung autonomer Fahrzeuge, die rund um die Uhr erfolgt, könnten dabei etwa 13,68 Petabyte nur für die Sensordaten anfallen. Dementsprechend müssen hohe Speicherkapazitäten geschaffen werden.

Daraus resultieren folgende Anforderungen an den Prüfstand:

A26: Die Speicherkapazität sollte auf Grundlage der Anforderungen des Entwicklers zur Datenverarbeitung festgelegt werden. Es wird empfohlen, mindestens so viel Speicher bereitzustellen, dass ein Monat an generierten Daten (**ca. 14 Petabyte**) gespeichert werden kann. Zudem sollte die Speicherlösung **flexibel skalierbar** sein.

A27: Die Daten müssen **effizient komprimiert** werden, um **Speicherplatz** zu sparen.

A28: Die Bandbreite der Datenübertragung sollte **mindestens 5,4 Gigabyte pro Sekunde** betragen.

A29: Der Prüfstand sollte ein **effizientes Datenmanagementsystem** enthalten.

A30: Die Daten müssen **gegen Zugriff** von **unberechtigten Personen geschützt** werden.

5.1.5 Effiziente Teststrategien und realitätsnahe Erprobung

Der Testaufwand für die Validierung autonomer Fahrsysteme im Gesamtfahrzeug nimmt immens zu. Es ist nicht realistisch, diesen Aufwand ausschließlich im Straßenverkehr oder auf Testgeländen zu bewältigen. Vor allem kritische Fahrmanöver müssen auf einem Fahrzeugprüfstand darstellbar sein, da diese sonst nur mit erheblichem Aufwand und Risiko nachgestellt werden können. Eine effektive Teststrategie ist daher erforderlich, um die Erprobungszeit zu verkürzen und Kosten zu sparen.

Neben der Quantität der Daten spielt auch deren Qualität eine entscheidende Rolle. Nur wenn das autonome Fahrsystem in einer Simulations- oder

Testumgebung genauso reagiert wie im realen Straßenverkehr, können zuverlässige Rückschlüsse auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Systems gezogen werden.

Dazu ist es notwendig, eine realitätsnahe Umgebung zu schaffen, was erhebliche Rechenkapazität erfordert, um alle Funktionen und Abläufe parallel zu verarbeiten. Dies deutet auf den Einsatz von Hochleistungsrechnern oder Cloud-Computing hin.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

A31: Der Prüfstand muss über eine **ausreichend hohe Rechenleistung** verfügen, um komplexe Simulationsprogramme flüssig laufen zu lassen.

A32: Der Prüfstand muss gewährleisten, dass **kritische Fahrmanöver und realitätsnah** simuliert werden können.

A33: Der Prüfstand muss **realistische Witterungsbedingung** simulieren können.

A34: Der Prüfstand muss **unterschiedliche Fahrbahnzustände** realitätsnah abbilden können.

A35: Der Prüfstand muss eine **realistische Verkehrsinfrastruktur** simulieren können.

A36: Eine **effiziente Teststrategie** muss der Erprobung zugrunde gelegt werden.

5.2 Umsetzung und Bewertung

In diesem Abschnitt werden die Fahrzeugprüfstände anhand der in Kapitel 5.1 definierten Anforderungen geprüft und bewertet. Jeder Prüfstand wird separat analysiert, um seine Eignung für die spezifischen Anforderungen zu überprüfen. Dabei wird auch untersucht, ob fehlende Anforderungen durch alternative Lösungen oder zusätzliche Ideen abgedeckt werden können.

Zur Bewertung wird eine Matrix erstellt, die folgendermaßen gegliedert ist:

- Anforderung erfüllt = grün
- Anforderung teilweise erfüllt = gelb
- Anforderung nicht erfüllt = rot
- Keine Aussage möglich = grau

Eine Übersicht und die Zusammenfassung der Bewertungen werden in Kapitel 5.2.6 dargestellt.

5.2.1 Umsetzung und Bewertung der erhöhten Sicherheitsanforderung

Fahrzeugrollenprüfstände:

Der Fahrzeugrollenprüfstand kann eine Zugkraft von über 18.640 N erzeugen und aufnehmen, sowie Geschwindigkeiten von über 130 km/h erreichen [82]. Fahrwiderstände werden nach einem Coast-Down-Test realitätsnah simuliert.

Übliche Fahrzeugfixierungen wie Stangen-, Radnaben-, Seil- oder Kettenbefestigungen verhindern allerdings Querdynamik sowie Nickbewegungen des Fahrzeugs, wodurch auch Wank- und Gierbewegungen ausgeschlossen sind. Darüber hinaus sind keine Aktuatoren vorhanden, die das Fahrzeug während der Fahrt anheben könnten, weshalb keine Vertikaldynamik simuliert werden kann [14], [16].

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10

Antriebsstrangprüfstand:

Ähnlich wie beim Rollenprüfstand simulieren elektrische Maschinen die Längsdynamik sowie den Fahrwiderstand. Aufgrund der fehlenden Größenbeschränkung der Antriebsmotoren können sie das notwendige Drehmoment und die erforderliche Geschwindigkeit bereitstellen. Im Gegensatz zum Rollenprüfstand sind die Maschinen über eine Verbindungswelle direkt an der Radnabe angebunden. Diese Verbindungswelle kann in Form eines Gelenks ausgeführt werden, wodurch Lenkbewegungen von bis zu 18° ermöglicht werden. Eine vertikale Anregung ist nicht vorgesehen, da die entsprechenden Aktoren fehlen. Durch die Fixierung an den Radnaben wird das Fahrzeug stabilisiert, sodass keine Nick-, Wank- oder Gierbewegungen möglich sind [19].

Obwohl keine direkten Seitenkräfte simuliert werden können, ermöglichen die beiden synchronen Elektromotoren, die für jedes Rad individuell ein Selbstlenkmoment erzeugen, dennoch ein realistisches Lenkverhalten. Zudem bestehen keine Einschränkungen in Bezug auf die Lenkgeschwindigkeit [19].

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10

Torque Wheel Dynamometer:

Die Längsdynamik und die Fahrwiderstände können durch in den Rädern integrierte

Elektromotoren simuliert werden. Dieses Konzept weist jedoch Einschränkungen in Bezug auf das maximal erzeugbare Drehmoment und die erreichbare Geschwindigkeit auf. Aktuelle Systeme auf dem Markt sind in der Lage, bis zu 2400 Nm Drehmoment und 1350 Umdrehungen pro Minute zu generieren [26]. Bei einem angenommenen Radius des Reifens von 0,35 m entspricht dies einer maximalen Beschleunigung bzw. Verzögerung von etwa 3,42 m/s². Darüber hinaus kann eine maximale simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit von etwa 178 km/h erreicht werden.

Für die Simulation der Vertikaldynamik fehlen jedoch die erforderlichen Aktoren. Es ist jedoch möglich, volle Lenkeinschläge zu simulieren. Da die Reifen nicht auf der Straße abrollen und keine tatsächliche Kraftübertragung stattfindet, werden keine Seitenkräfte generiert, was bedeutet, dass keine Querkräfte auftreten. Folglich sind Gier-, Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs nicht darstellbar.

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10

Dürr x-road curve Fahrzeugprüfstand:

Dieser Prüfstandstyp weist in Bezug auf die Längsdynamik weitgehend Ähnlichkeiten mit einem Rollenprüfstand auf. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der Querdynamik, da hier ein Lenkeinschlag von ±10° möglich ist. Darüber hinaus sind die erreichbaren Längskräfte und Geschwindigkeiten im Vergleich eingeschränkt (siehe Tabelle 2). Während die Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h für bestimmte Testanforderungen ausreichend ist, reichen die maximalen 6000 N an Längskraft nicht aus, um eine vollständige Vollbremsung eines schweren Fahrzeugs realitätsnah abzubilden

[25].

Ein weiterer entscheidender Unterschied besteht darin, dass bei diesem Prüfstand keine Fixierung durch Ketten, Seile, Stangen oder an der Radnabe erfolgt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Fahrzeug in der Längs- und Querdynamik frei agieren kann und somit während Brems- und Beschleunigungsvorgänge Nickbewegungen auftreten.

Es bleibt jedoch unklar, ob beim Lenken Seitenkräfte entstehen, wenn die Rollen gemeinsam mit den Rädern rotieren. Ohne Seitenkräfte entstehen keine Wankbewegungen. Für die Beurteilung fehlen dazu weitere Informationen. Da die Hinterachse des Fahrzeugs fixiert ist und das Fahrzeug geradlinig fährt, kann sich der Schwerpunkt nicht um die Hochachse drehen, wodurch Gierbewegungen ausgeschlossen sind.

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10

FKFS-Fahrzeugdynamiksimulator:

Die Flachbahneinheiten erreichen eine maximale Längskraft von 6000 N und können somit die Anforderung A1 nicht vollständig erfüllen. Querkräfte bis zu 10.000 N können simuliert werden, und es lassen sich maximale Lenkwinkel von 20° realisieren. Die Vertikalaktuatoren können eine Kraft von bis zu 15.000 N aufbringen, mit einem maximalen Verfahrweg von 7,5 cm [21], [23].

Das Fahrzeug ist mit einer sogenannten Schwerpunktfesselung (CGR - Center of Gravity Restraint) fixiert, welche keine Gierbewegungen zulässt. Obwohl Nick- und Wankbewegungen möglich sind, ist die systemdynamische Kopplung zwischen diesen Bewegungen nicht vollständig gegeben. Um dies zu kompensieren, werden auf Basis von berechneten Simulationen Aktoren am Fahrzeug angebracht, die die fehlenden Kräfte auf das System übertragen. Dies verbessert die Fahrdynamik und macht sie realistischer [21], [23].

Zusätzlich übt die Masse des CGR ein weiteres Trägheitsmoment auf das Fahrzeug aus, was das Schwingungsverhalten des Fahrzeugs beeinflusst. Durch die Nutzung eines Flachbandes wird die Druckverteilung realistischer dargestellt als bei anderen Prüfständen. Allerdings kann der Rauheitswert von Oberflächen wie Beton oder Asphalt nicht vollständig nachgebildet werden, da die Oberfläche der Flachbahneinheiten einen kleinen Biegeradius benötigt [21], [23].

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10

Zusätzliche Hardware:

Es wurden spezielle Aktuatoren entwickelt, die Lenkbewegungen am Fahrzeug simulieren können. Bei AVL ist diese Technologie unter dem Namen Dynamic Steering Force Emulator bekannt, während MDynamix sie als MXsteerAct bezeichnet. Diese Module werden direkt an den Spurstangenköpfen des Fahrzeugs befestigt und sind in der Lage, durch gezielte Krafteinwirkung Lenkkräfte zu simulieren, siehe Abbildung 14. Mithilfe eines Controllers, der eine modellgestützte Steuerung verwendet, lassen sich so Seitenkräfte simulieren [83].

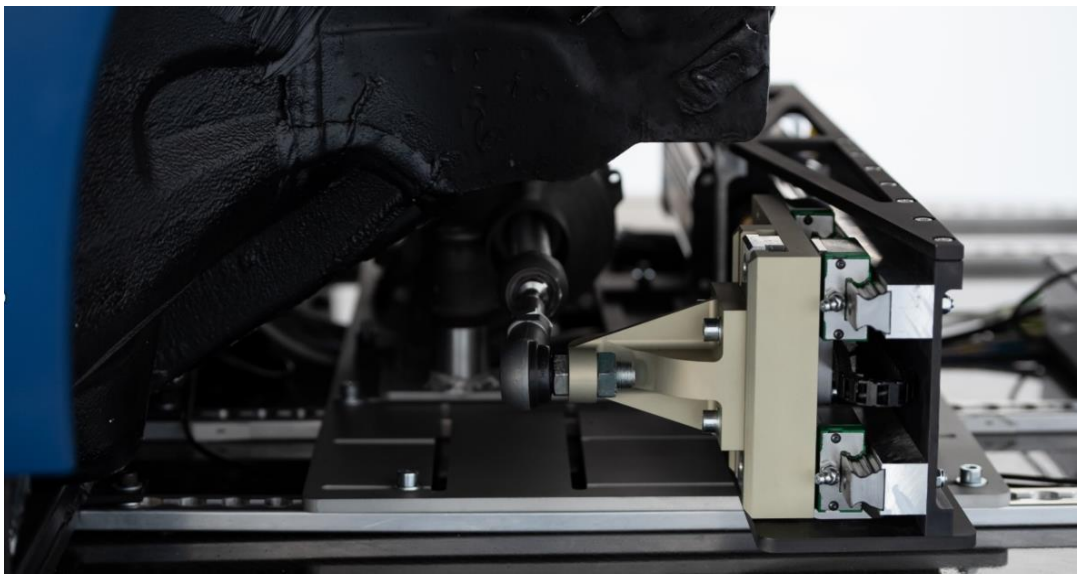


Abbildung 13: Montierter MXsteerAct an der Spurstangenkopf eines Fahrzeugs [83]

MDynamix bietet verschiedene Leistungsstufen, wobei die größte folgende technische Spezifikation aufweist [83]:

Statische Kraft bis zu **8 kN**

Maximale dynamische Kraftübertragung von **16 kN**

Maße (L/B/H): 1100 mm x 200 mm x 250 mm

Gewicht von ca. 80 kg

Maximale Geschwindigkeit von **+-330 mm/s**

Ein Vergleich dieser Daten mit den in **Tabelle 4** berechneten Seitenkräften zeigt, dass ein Großteil der benötigten Kräfte in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse durch den Aktuator simuliert werden kann. In der **Tabelle 6** werden die erreichbaren Kombinationen aus Masse und Beschleunigung farblich dargestellt. **Grün** markiert Kombinationen, die durch die statische Kraft des Aktuators erreicht werden können, **Gelb** zeigt Bereiche an, in denen die maximale dynamische Kraft wirkt, und **Rot** kennzeichnet unzureichende Leistungsfähigkeit des Moduls für bestimmte Kombinationen.

Tabelle 6: Bewertung der erreichbaren Seitenkräfte mithilfe des MXsteerAct basierend auf Tabelle 4

	Fahrzeugmasse in kg				
Längsbeschleunigung in m/s²	1500	2000	2500	3000	3500
2	1500	2000	2500	3000	3500
4	3000	4000	5000	6000	7000
6	4500	6000	7500	9000	10500
8	6000	8000	10000	12000	14000
10	7500	10000	12500	15000	17500
	Seitenkraft in N pro Achse bei 50:50 Radlastverteilung				

Mit einer maximalen Geschwindigkeit von **330 mm/s** an der Zahnstange ermöglicht der Aktuator schnelle Lenkbewegungen. Da Seitenkräfte von mehr

als 8000 N in der Praxis nur kurzzeitig auf ein Fahrzeug einwirken, und der Aktuator dynamische Kräfte von bis zu 16000 N simulieren kann, erfüllt dieser Aktuator die Anforderung **A5, A6 und A7** vollständig.

Der **MXsteerAct** stellt somit eine **sinnvolle Ergänzung** dar, insbesondere im Hinblick auf die Lenkfunktion. Die Integration auf einem Antriebsstrangprüfstand erscheint unkompliziert, da das Fahrzeug angehoben wird. Auf einem Fahrzeugrollenprüfstand sollte geprüft werden, ob der Aktuator aufgrund seiner Höhe zu Platzproblemen führen könnte, die vom jeweiligen Fahrzeugtyp abhängen. Dennoch ist es realistisch, den benötigten Raum durch eine Öffnung in der Grubenabdeckung zu schaffen und so den Einbau des Aktuators zu ermöglichen.

Die Integration mit den anderen vorgestellten Prüfstandstypen erscheint nicht sinnvoll, da diese bereits jeweils eigene Lenksysteme haben.

5.2.2 Umsetzung und Bewertung für die Erprobung der Wahrnehmung

Um die Wahrnehmung autonomer Fahrsysteme zu testen, gibt es verschiedene Ansätze.

Sensorsimulation durch reale Objekte:

Verkehrsteilnehmer und andere typische Objekte im Straßenverkehr lassen sich mithilfe von Fahrrobotern und speziell entwickelten Dummys nachbilden. Diese Dummys sind je nach Anwendung als Fußgänger, Fahrzeuge oder Verkehrsschilder konzipiert und können flexibel auf den Fahrrobotern montiert werden. Ein Nachteil dieser Methode besteht jedoch in der beschränkten Anzahl gleichzeitig simulierbarer Objekte sowie den begrenzten Geschwindigkeiten, die aufgrund der räumlichen Gegebenheiten im Prüfraum umgesetzt werden können [84], [85], [86].

Die physische Umsetzung der Umgebungsanforderungen lässt sich zum Beispiel mit einer **Klimawindkammer** realisieren. Diese Kammern stellen ein **autarkes Umweltsystem** dar und ermöglichen folgende Funktionen:

Niederschläge: Durch stationäre Deckenberegnungsanlagen oder mobile Sprühgerüste können verschiedene Regen- und Schneeszenarien simuliert werden. Diese reichen von leichtem Nieselregen über Starkregen bis hin zu Schnee, Eisregen und Nebel [87], [88].

Umgebungstemperatur: Die Kammer ermöglicht eine

Umgebungstemperatur von -45 °C bis +60 °C [87], [88].

Wind: Ein leistungsstarker Ventilator erzeugt Windgeschwindigkeiten bis zu 250 km/h [87], [88].

Beleuchtung: Spezielle Lampen simulieren die Sonneneinstrahlung, um die Auswirkungen von Solarstrahlung auf das Fahrzeug zu testen. Für die Simulation von Blitzen können Stroboskope verwendet werden [87], [88].

OTA (Over the Air):

Die Sensoren werden durch reale, physische Signale stimuliert, etwa durch Licht, Schall, oder elektromagnetische Wellen. Durch die Verwendung von OTA-Simulation entfällt die Notwendigkeit, Fahrroboter und Dummys aufwendig vorzubereiten und auszustatten. Dies führt zu einer deutlich flexibleren Testdurchführung und ermöglicht es, Tests auch in kleineren Prüflaboren durchzuführen, da der Platzbedarf für physische Testobjekte reduziert wird.

Zur Erprobung von **Kamerasensoren** können hochauflösende Leinwände mit Projektoren oder Monitore rund um das Fahrzeug positioniert werden, um eine visuelle Umgebung zu simulieren. Diese Methode stellt Verkehrsszenarien sowie wechselnde Licht- und Wetterverhältnisse dar, wodurch die Kamera getestet wird. Durch die gleichzeitige Integration eines **Lidar-Testsystems**, wie es von **Horiba** angeboten wird, können diese Sensoren parallel erprobt werden [89] [90] [91].

Für die Erprobung von Radar- und Ultraschallsensoren können spezielle Geräte vor den jeweiligen Sensoren platziert werden, die frequenztypische Signale aussenden.

Diese Geräte, wie der **Radar Target Simulator (RTS100)** von Rohde & Schwarz, simulieren Objekte und können dabei auch Doppler-Effekte berücksichtigen, um Bewegung und Geschwindigkeit vorzutäuschen. Für Ultraschallsensoren kann der **Ultrasonic Target Simulator** verwendet werden. Abbildung 14 zeigt schematisch, wie ein Aufbau aussehen kann [91], [92], [93], [94], [95].

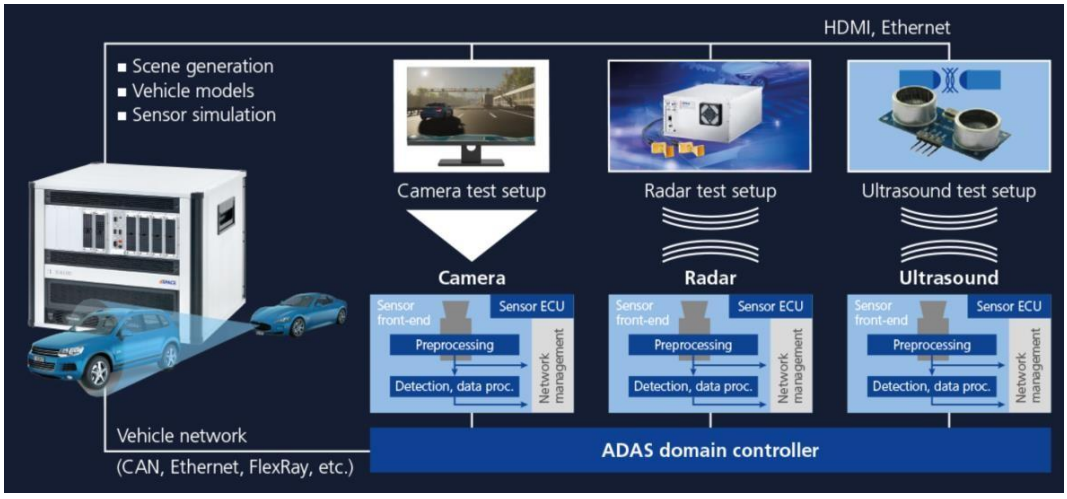


Abbildung 14: Schematische Aufbau für das Erproben der Umgebungssensoren [96]

Sensorinjektion- Simulation:

Hier werden die Rohdaten oder Umgebungsmodelle direkt in die Sensordatenströme bzw. in das Steuergerät eingespeist. Die Daten werden zum Beispiel durch Simulationssoftware zur Verfügung gestellt. Jedoch wird der **Sensor selbst jedoch nicht stimuliert**, was bedeutet, dass die reale Interaktion mit der Umwelt nicht vollständig nachgebildet wird. Somit ist die grundlegende Voraussetzung für eine Validierung der Sensorkette nicht erfüllt [95], [97].

Dennoch wird diese Methode häufig eingesetzt, um GNSS-Daten, Drehraten und Beschleunigungswerte zu simulieren, da das Fahrzeug auf einem Prüfstand ortsgebunden ist und Bewegungen wie Gieren nicht realisiert werden können. Durch Sensorinjektion-Simulation können so fehlende Fahrdynamiken ergänzt und in die Simulation integriert werden.

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20

5.2.3 Umsetzung und Bewertung der Anforderung an die Verarbeitung und Interpretation von Daten

Um das regelkonforme Fahren und die Entscheidungsfindung eines autonomen Fahrsystems zuverlässig zu bewerten, muss es vielfältigen Fahrszenarien ausgesetzt werden. Da das Fahrzeug auf dem Prüfstand jedoch stationär ist, müssen sowohl die Umgebung als auch die Verkehrsteilnehmer simuliert werden. Neben den bereits in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Methoden zur Sensorerprobung gibt es mehrere Softwarelösungen, die diese Aufgabe übernehmen können. Diese bieten nicht nur die Möglichkeit, realitätsnahe Umgebungen zu simulieren, sondern auch Fahrdynamiken nachzubilden.

Simulationssoftware:

CarSim kann Umgebungsmodelle mit Elementen wie Fußgängern, Verkehrsampeln und Gebäuden simulieren. Der Fokus der Software liegt jedoch auf der Simulation der Fahrdynamik von Fahrzeugen. Es werden detaillierte physikalische Modelle der Fahrzeuge verwendet, die flexibel angepasst werden können [98], [99], [100], [101], [102].

CARLA wurde speziell für die Entwicklung und Validierung von autonomen

Fahrsystemen entwickelt. Es können 3D-Umgebungen, in denen

Verkehrsteilnehmer und Wetterbedingungen und Verkehrsszenarien simuliert werden können. Dies umfasst auch die Simulation von GNSS- und

Beschleunigungssensordaten. Primär liegt hier der Fokus auf das Erproben von autonomen Fahrsystemen [100], [101], [102] [103].

Artery V2X Framework: Diese Software kann ergänzend mit **CARLA** eingesetzt werden, um zusätzlich V2X-Kommunikation zu simulieren. Dies ist

besonders nützlich für die Erprobung von Szenarien, in denen Fahrzeuge miteinander und mit der Infrastruktur kommunizieren müssen [104].

PTV Vissim: Diese Software simuliert umfassend den Verkehr samt

Infrastruktur. Obwohl sie nicht speziell für Prüfstände entwickelt wurde, ist sie in der Lage, komplexe Verkehrsszenarien zu erzeugen und zu exportieren. PTV Vissim ist besonders geeignet, um Verkehrsdichte, Fluss und Störungen in städtischen oder regionalen Umgebungen zu simulieren. Es kann die Verkehrsanalyse präzisieren und ist eine wertvolle Ergänzung zu den anderen

Tools, wenn realistische Verkehrsszenarien erforderlich sind [101], [102], [105].

Folgende Ideen werden zur **Co-Simulation** vorgeschlagen:

CARLA unterstützt die Co-Simulation mit **PTV VISSIM**, **CarSim** und dem **Artery V2X**

Framework. Damit wären die grundlegenden Voraussetzungen geschaffen, dass alle Simulationswerkzeuge parallel in einer virtuellen Umgebung betrieben werden können, wodurch ihre jeweiligen Stärken optimal genutzt werden. Diese virtuelle Umgebung könnte zudem mit einem Fahrzeugprüfstand kombiniert werden, um eine umfassende Simulation zu ermöglichen [101], [104], [106], [107].

Allerdings liegen bislang keine belastbaren Daten oder Quellen vor, die belegen, dass eine derartige Co-Simulation bereits erfolgreich durchgeführt wurde. Dementsprechend fehlen auch Informationen darüber, ob die Echtzeitfähigkeit in einer solchen Konfiguration gewährleistet werden kann und welche Rechenleistung für eine solche Simulation erforderlich wäre.

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A21	A22	A23	A24	A25

5.2.4 Umsetzung und Bewertung für die Handhabung höher Datenmengen

Wie bereits in Kapitel 5.1.4 dargestellt, ist mit einer erheblichen Menge an Daten zu rechnen, die während der Erprobungsphasen generiert wird. Die folgenden Punkte sollen mögliche Ansätze zur Handhabung und effizienten Verarbeitung dieser Datenmengen beleuchten und bewerten.

Erweiterter Speicherplatz:

Die Anforderungen an die Datenmenge **(Big Data**) können nicht ausschließlich durch externe Speicherlösungen gedeckt werden. Selbst leistungsstarke **Blockspeicher**, wie die 2,5-Petabyte-Lösungen von **Seagate**, reichen nicht

aus, um die geforderten Kapazitäten zu erfüllen [108]. Daher ist es notwendig, zusätzlich auf **Cloud- und Serverdienste**, wie zum Beispiel **Amazon Web Services** zurückzugreifen [109]. Damit kann man den Speicher nach oben hin **skalieren**. Bei der Nutzung von Cloud-Speichern muss jedoch ein ausreichend großer lokaler Zwischenspeicher als Schnittstelle fungieren, da selbst moderne Glasfaseranschlüsse oder 5G-Netzwerke mit typischen Upload-Geschwindigkeiten von bis zu **500 Mbit/s** nicht schnell genug sind [110]. Bei kontinuierlichen Erprobungen würde dies dazu führen, dass der lokale Speicher überlastet und voll ausgelaufen wäre. Somit wäre der lokale Blockspeicher der Zwischenspeicher, bis die Daten auf eine Cloud oder Server gespeichert worden sind. Eine Alternative ist aktuell nicht bekannt und deshalb ist die Anforderung **A28** nur teilweise erfüllbar.

Datenkompression:

Um die Speicherkapazität effizienter zu nutzen, wird zusätzlich eine Datenkomprimierung vorgeschlagen. Während ZIP-Dateien allgemein bekannt sind, existieren auch andere leistungsfähige Algorithmen wie **Zstandard, LZ4 und zlib.** Diese Algorithmen zeichnen sich jeweils durch spezifische Vor- und Nachteile in Bezug auf **Geschwindigkeit**, **Kompressionsverhältnis** und ihre Eignung für verschiedene Datentypen aus [111]. Es lässt sich somit kein Algorithmus pauschal empfehlen, da die optimale Wahl stark von den spezifischen Anforderungen des Entwicklers sowie den Datentypen abhängt, die ein autonomes Fahrsystem erzeugt.

Datenmanagement-System:

Eine effiziente Verwaltung und Organisation der Daten sind durch ein geeignetes Datenmanagement-System erscheint sinnvoll. Ein Beispiel hierfür ist **Apache Hadoop**, das große Datensätze durch sein verteiltes Dateisystem und parallele Berechnungen verarbeiten kann. **Apache Spark** kann ergänzend eingesetzt werden, um die Verarbeitung zu beschleunigen, da Spark die Berechnungen im Arbeitsspeicher durchführt und somit deutlich schneller als Hadoop's Festplattenspeicher-basiertes **MapReduce** arbeitet [112], [113].

Sicherheit:

Der Zugang zu den Daten sollte durch starke Verschlüsselungsmechanismen und eine mehrstufige Authentifizierung geschützt werden. Es wird empfohlen, sich an die Richtlinien von TISAX zu halten, um den Schutz sensibler Daten sicherzustellen [114].

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A26	A27	A28	A29	A30

5.2.5 Umsetzung und Bewertung für effiziente Teststrategien und realitätsnahe Erprobung

Ein zentraler Aspekt der Verlagerung der Erprobung autonomer Fahrsysteme auf

Fahrzeugprüfstände ist die Beschleunigung der Validierung. Um die Effizienz der Tests weiter zu steigern und gleichzeitig realitätsnahe Bedingungen zu gewährleisten, werden folgende Vorschläge unterbreitet:

Künstliche Intelligenz: Als Ergänzung zu den in Kapitel 5.2.3 vorgestellten Simulationswerkzeugen kann KI eine entscheidende Rolle bei der Erstellung von Testfällen und Szenarien spielen. Sie ermöglicht es, Fahrdaten automatisch zu analysieren und sicherheitskritische Manöver oder Verstöße gegen Verkehrsregeln zu identifizieren. Dies beschleunigt die Bewertung und Analyse der Erprobung und steigert insgesamt die Testeffizienz. Ähnliche

Ansätze werden bereits diskutiert, und erste Anwendungen, wie etwa die Integration von RevoAI in Kombination mit dem CarMaker-Simulationssystem, zeigen die Praxistauglichkeit solcher Methoden in der automatisierten Fahrsystemvalidierung auf [115], [116].

Da keine genauen Daten zur benötigten Rechenkapazität vorliegen, kann keine präzise Aussage darüber getroffen werden, welche Rechenleistung tatsächlich erforderlich ist. Es werden jedoch drei Ansätze zur Steigerung der Rechenleistung als Idee vorgeschlagen:

Dezentrales Erproben: Durch die Vernetzung von Prüfständen können alle verfügbaren Computer und Server in das Testverfahren eingebunden werden. Dies ermöglicht eine Verteilung der Rechenlast auf verschiedene Systeme, was die Effizienz steigert. V.S. Handur und S.L. Deshpande stellen beispielsweise die Optimierungsmethode des Artificial Bee Colony (ABC) Algorithmus vor, die in verteilten Systemen zur Lastverteilung eingesetzt werden kann. Diese dezentrale Struktur soll es ermöglichen, parallele Prozesse nahtlos zu koordinieren und die Rechenleistung besser auszunutzen [117].

Integration von GPUs: CPUs sind leistungsstark, stoßen jedoch bei der parallelen Verarbeitung von Rechenschritten an ihre Grenzen. GPUs hingegen haben eine spezialisierte Hardwarearchitektur, die aus tausenden kleiner Rechenkerne, den sogenannten Shadern, besteht. Im Vergleich zu einem CPUKern sind diese Shader zwar weniger leistungsfähig, aber die enorme Anzahl dieser Kerne ermöglicht es, viele Berechnungen gleichzeitig durchzuführen. Ein weiterer entscheidender Vorteil von GPUs ist die deutlich schnellere Anbindung des Speichers. Der Speicher einer Grafikkarte ist bis zu 10-mal schneller angebunden als der eines CPUs, was insbesondere bei der Verarbeitung großer Datenmengen von Vorteil ist. Nvidia ist bekannt für ihre leistungsstarken GPUs und die Forschung und Entwicklung für präzise Simulationen im Automotive Feld [118], [119].

Anwendungsspezifische Schaltungen (ASICS): Eine weitere Möglichkeit, um Rechenleistung zu erhöhen und demzufolge Simulationen präziser zu berechnen, sind ASICs. Diese Schaltkreise werden für spezielle Aufgaben entworfen, was bedeutet, dass sie sich auf bestimmte rechenintensive Prozesse fokussieren können und diese mit hoher Effizienz bewältigen. Laut Google hat die eigens entwickelte Tensor Processing Unit eine 30-mal höhere Rechenleistung pro Watt im Vergleich zur Nvidia K80 GPU [119], [120].

Die Realitätsnähe von Simulationen an Prüfständen kann nicht pauschal bewertet werden. Die zugrunde liegenden Physik-Modelle entwickeln sich stetig weiter und haben außerdem ihre jeweils eigenen Vor- und Nachteile. Da die Auswahl und Anpassung der Modelle von den Entwicklern selbst vorgenommen werden, spielt deren Kompetenz eine entscheidende Rolle bei der Schaffung realitätsnaher Simulationen. Es ist wichtig, abzuwägen, welche Schwerpunkte in den jeweiligen Szenarien und bei der Erprobung gesetzt werden. Je nach den spezifischen Anforderungen der Tests sollten die passenden Modelle ausgewählt werden, um ein möglichst realistisches Ergebnis zu erzielen [102], [116]. Trotzt der Abhängigkeit von guten Daten, Parametern und Kompetenz des Entwicklers werden die Modelle und Simulationstool durchweg bei Hersteller und Zulieferern als gegennutzt und daraus geschlussfolgert, dass diese allgemein akzeptiert ist. Die Anforderungen an Realitätsnähe wird mit teilweise erfüllt bewertet.

Somit werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A31	A32	A33	A34	A35	A36

5.2.6 Zusammenfassung der Bewertung

In diesem Kapitel wird die Bewertung der Anforderung noch einmal zusammengefasst.

Um die Übersicht zu bewahren, werden folgende Abkürzungen getroffen:

- Fahrzeugrollenprüfstand = FZRP
- Antriebsstrang Prüfstand = ATPS
- FKFS-Fahrzeugdynamiksimulator = FKFS
- Dürr x-road curve Rollenprüfstand = x-road
- Torque Wheel Dynamometer = TWD

Schlagwörter	FZRP	ATPS	FKFS	x-road	TWD

Verzögerung	A1	A1	A1	A1	A1
Beschleunigung	A2	A2	A2	A2	A2
Geschwindigkeit	A3	A3	A3	A3	A3
Nicken	A4	A4	A4	A4	A4
Querkräfte	A5	A5	A5	A5	A5
Lenkgeschwindigkeit	A6	A6	A6	A6	A6
Lenkwinkel	A7	A7	A7	A7	A7
Gieren	A8	A8	A8	A8	A8
Wanken	A9	A9	A9	A9	A9
Vertikal auslenken	A10	A10	A10	A10	A10
Prüfstand + MXsteerAct					
Querkräfte	A5	A5	Integration nicht sinnvoll		
Lenkgeschwindigkeit	A6	A6			
Lenkwinkel	A7	A7			

Die übrigen Anforderungen sind nicht prüfstandsspezifisch, sondern allgemein gültig				
Schlagwörter			Schlagwörter	
Reichweite und Auflösung	A11		Echtzeitfähigkeit	A24
FoV	A12		Offene Schnittstelle	A25
Objekterkennung	A13		Speicherkapazität	A26
Erfassung der Geschwindigkeit	A14		Komprimierung der Daten	A27
Umgebungstemperatur	A15		Geschwindigkeit Datenübertragung	A28
Kontinuierliche Lichtintensität	A16		Effizientes Datenmanagementsystem	A29
Kurze Lichtintensität	A17		Sicherheit	A30

Wetter- und Witterungsbedingungen	A18		Ausreichende Rechenleistung	A31
Beschleunigungsund Drehratensensoren	A19		Realitätsnähe von kritischen Fahrmanövern	A32
GNSS-Daten	A20		Realistische Witterungsbedingungen	A33
Umgebungsmodelle und Verkehrsinfrastruktur	A21		Unterschiedliche Fahrbahnzustände	A34
Verkehrsteilnehmer	A22		Realistische Verkehrsinfrastruktur	A35
Komplexe Fahrszenarien	A23		Effiziente Teststrategie	A36

Wie erkennbar wird, sind die Anforderungen ab A11 nicht spezifisch auf den Prüfstand bezogen, da deren Umsetzung unabhängig von der Art des Prüfstands erfolgen kann. Zudem wird deutlich, dass kein einzelner Prüfstand in der Lage ist, sämtliche Aspekte der Fahrdynamik physisch abzubilden. Fehlende Dynamiken müssen daher durch ergänzende Simulationen kompensiert werden.

6 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegende Arbeit untersucht die Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten für die Erprobung autonomer Fahrsysteme auf Fahrzeugprüfständen. Nach der Identifizierung der Anforderungen wird aufgezeigt, welche Umsetzungsmöglichkeiten man dafür hat, und bewertet diese anschließend.

Autonome Fahrsysteme basieren auf einer Vielzahl von Sensoren zur Umwelterkennung. Algorithmen und/oder Künstliche Intelligenz sind erforderlich, um regelkonformes und sicheres Fahren zu gewährleisten. Laut Schätzungen von Kalra und Paddock sind ca. 443 Millionen Kilometer notwendig, um eine statistische Sicherheit für autonomes Fahren nachzuweisen.

Fahrzeugprüfstände bieten eine mögliche Lösung, da sie Realitätsnähe mit kontrollierten Bedingungen und hoher Wiederholbarkeit kombinieren. Verschiedene Prüfstandstypen sind hinsichtlich ihrer Eignung für die Erprobung bewertet, wobei festgestellt worden ist, dass alle eigene Einschränkungen, aufgrund ihres Konzepts, in der Abbildung der Fahrdynamik aufweisen. Die erhöhten Sicherheitsanforderungen können jedoch größtenteils erfüllt werden. Dazu kann zusätzlich ein Aktuator genutzt werden, um Querkräfte in Fahrzeugrollen- und Antriebsstrangprüfstände physisch zu simulieren.

Die Erprobung der Sensoren kann entweder mit realen Dummys oder durch OTASimulationen durchgeführt werden. Für GNSS-, Beschleunigungs- und Drehratensensoren ist jedoch die Sensorinjektion am besten geeignet, da das Fahrzeug seine Position nicht verändern kann und die Fahrdynamik nur eingeschränkt abgebildet werden kann. Umgebungsbedingungen wie Temperatur oder Niederschlag lassen sich hingegen durch eine Klimakammer simulieren.

Ein weiteres Thema ist die Handhabung der enormen Datenmengen, die durch autonome Fahrsysteme erzeugt werden. Als möglicher Ansatz ist der Einsatz von Blockspeichern in Kombination mit einer Cloud-Lösung vorgeschlagen worden, um die Datenmengen handzuhaben. Allerdings reicht selbst die Geschwindigkeit von Glasfasern nicht aus, um sicherzustellen, dass die Datenübertragung zur Cloud abgeschlossen ist, bevor der lokale Speicher erschöpft ist. Kompressionsalgorithmen können zusätzlichen Speicherplatz schaffen, während ein Datenmanagement die Verarbeitung beschleunigt. Zudem gewährleistet die TISAX-Zertifizierung die Einhaltung der notwendigen Sicherheitsstandards bei der Datenverarbeitung und Schutz von Unbefugten.

Für die Erprobung der Fahrentscheidungen des autonomen Fahrsystems kann eine virtuelle Umgebung geschaffen werden, die mithilfe verschiedener Simulationstools realisiert wird. Diese virtuelle Umgebung umfasst unterschiedliche Umweltbedingungen, Straßeninfrastrukturen, Verkehrsteilnehmer und Verkehrseinrichtungen. Zusätzlich können fehlende physische

Fahrdynamiken ebenfalls durch Simulationen nachgebildet werden, um eine umfassende und realitätsnahe Testumgebung zu gewährleisten. Allerdings ist die vorgeschlagene Co-Simulation noch nicht getestet worden und es kann keine klare Aussage über den Aufwand getroffen werden.

Es sind Ideen und Vorschläge eingebracht worden, um KI als zusätzliches Werkzeug für die Erstellung von Testszenarien sowie die Auswertung zu nutzen. Um der hohen Rechenlast, durch KI und Simulationsprogrammen, gerecht zu werden, sollen GPUs, ASICs und Deszentrales Erproben mit einer Lastverteilung eingesetzt werden. Damit soll insgesamt die Testeffizient gesteigert werden.

Es wird deutlich, dass die Kombination aus physischen Testumgebungen, den vorgestellten virtuellen Simulationslösungen und fortschrittlichen Datenmanagementsystemen, unterstützt durch KI, eine sichere und effiziente Validierung autonomer Fahrsysteme ermöglichen kann. Dazu sind entweder erhebliche Anpassungen an der bestehenden Infrastruktur oder der Bau neuer Anlagen erforderlich.

Nichtsdestotrotz kann das Erproben auf Fahrzeugprüfständen nur als Ergänzung gesehen werden und die finale Validierung muss auf der Straße erprobt werden.

6.1 Kritische Betrachtung und mögliche Nachfolgearbeiten

Einige der in dieser Arbeit behandelten Themen erfordern eine weiterführende Untersuchung und bieten Potenzial für zukünftige Forschungen. Dabei wurden sechs mögliche Nachfolgearbeiten identifiziert, die in der vorliegenden Arbeit nicht ausreichend tief behandelt wurden und daher als Grundlage für weiterführende Studien dienen könnten:

Analyse der erforderlichen Rechenleistung und Integration der in diese Arbeit vorgeschlagenen CO-Simulation: Eine detaillierte Untersuchung der benötigten Rechenleistung und geeigneten Architekturen (wie GPU-basierte

Systeme oder Cloud-Lösungen) ist notwendig, um mehrere

Simulationsprogramme parallel und mit akzeptabler Latenz auszuführen.

Zudem existiert eine Vielzahl an Softwareprogrammen zur Simulation von Umgebungsszenarien und Fahrzeugmodellen. Es sollte daher untersucht werden, welche Alternativen zu den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Lösungen existieren und wie diese in die Co-Simulationsumgebung integriert werden können.

Lösung zu Handhabung von Big Data auf Fahrzeugprüfständen: Es wurden

Ansätze zur Erweiterung des Speicherplatzes auf Prüfständen vorgeschlagen. Dennoch bleibt das Problem der Bewältigung der enormen Datenmengen bei kontinuierlichen Tests ungelöst. Es sollte untersucht werden, welche Möglichkeiten bestehen, um dieses Problem effektiv zu lösen.

KI-basierte Optimierung der Erprobung: Eine Untersuchung der

Anwendungsmöglichkeiten von KI zur Optimierung der Teststrategien, wie etwa das automatisierte Erstellen von Testszenarien oder die Echtzeitanalyse von Testergebnissen, sollte erfolgen. Dabei wäre es aufschlussreich zu analysieren, inwieweit maschinelles Lernen genutzt werden kann, um die Testzyklen bzw.

Fahrszenarien effizienter zu gestalten.

Vergleich der Ergebnisse vom Prüfstand mit realen Straßentests: Eine detaillierte quantitative Analyse der Unterschiede zwischen den auf dem Prüfstand und in der Simulation erzielten Ergebnissen und den Ergebnissen realer Straßentests ist notwendig. Ziel ist es, die Genauigkeit der Prüfstände zu optimieren und mögliche Diskrepanzen zu identifizieren, die sich auf die Validierung auswirken könnten.

Dezentrales Erproben von autonomen Fahrsystemen auf Prüfständen: Ein Ansatz wurde vorgestellt, wie die Rechenlast auf verschiedene Prüfstände verteilt werden könnte. Eine weiterführende Analyse könnte untersuchen, wie diese Umsetzung konkret gestaltet werden sollte und welche Algorithmen sich dafür eignen. Zudem wäre es aufschlussreich, zu erforschen, inwieweit mehrere Prüfstände, sowohl identische als auch unterschiedliche Typen, in einer gemeinsamen Umgebungssimulation parallel betrieben werden können.

Weitere Untersuchung der Fahrdynamik auf Prüfständen: Für die Erstellung der Anforderungen an die Fahrdynamik wird auf das lineare Einspurmodell zurückgegriffen. Da dieses Modell jedoch nur eine stark vereinfachte Betrachtungsweise darstellt, ist es sinnvoll, die Anforderungen auf Basis nichtlinearer Einspurmodelle oder Mehrkörpermodelle zu stellen.

Literaturverzeichnis

C. Köllner. (2019.05.28). *Fahrzeugautomatisierung verringert Verkehrsunfälle.* [Online]. Available: https://www.springerprofessional.de/car-to-x/automatisiertesfahren/fahrzeugautomatisierung-verringert-verkehrsunfaelle/16735286
[Zugriff am 21 07 2024]

UNITED NATIONS. (2021.01.22). *Addendum 156 – UN Regulation No. 157.* [Online]. Available: https://unece.org/sites/default/files/2023-12/R157e.pdf
[Zugriff am 28 07 2024].

B. Impley. (2024.07.05). *Umfrage zu den Entwicklungskosten für autonomes Fahren im Jahr 2021.* [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1294457/umfrage/umfrageautonomes-fahren-entwicklungskosten/
[Zugriff am 24 07 2024].

D. Shepardson. (2024.05.31) *US agency seeks more details on self-driving Zoox crashes*. [Online]. Available: https://www.reuters.com/business/autos-transportation/us-agency-seeksmore-details-self-driving-zoox-crashes-2024-05-31/
[Zugriff am 21 07 2024]

N. Kalra, S.Paddock. (2016.04.16). *Driving to Safety: How Many Miles of Dribing Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability?* [Online]. Available: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1478.html
[Zugriff am 21 08 2024]

D. Großlau, *Fahrzeugmesstechnik*. Grundlagen der Messtechnik und Statistik, Prüfstandstechnik, Messtechnik im Motoren- und Fahrzugversuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. S. 201

Prof.-Ing. S, et. Al. (2024). *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*, Wilhelm Büchner Hochschule. S. 7-8

Prof.-Ing. S, et. Al. (2024). *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*, Wilhelm Büchner Hochschule. S. 62

Prof.-Ing. S, et. Al. (2024). *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*, Wilhelm Büchner Hochschule. S. 54-73

H. Wallentowitz, K. Reif (Hrsg.), *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2006. S.113-114

Robert Bosch GmbH (Hrsg.), *kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Wiesbaden: Springer, 2024. S.472
Prof.-Ing. S, et. Al. (2024). *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*,
Wilhelm Büchner Hochschule. S.28

B. Heißling, M. Ersoy (Hrsg.), *Chassis Handbook*. Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011, S.89-90

D. Großlau, *Fahrzeugmesstechnik*. Grundlagen der Messtechnik und Statistik, Prüfstandstechnik, Messtechnik im Motoren- und Fahrzugversuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. S. 201-210

Autohaus TECVIA GmbH (2019.06.03). *WLTP-Tests: TÜV Rheinland investiert in modernes Abgaslabor*. [Online]. Available: https://www.autohaus.de/nachrichten/autohandel/wltp-tests-tuevrheinland-investiert-in-modernes-abgaslabor-2710932
[Zugriff am 29 07 2024]

K. Borgeest, *Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren*. Messungen am Motor, Abgasanalytik, Prüfstände und Medienversorgung Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. S57

D. Großlau, Fahrzeugmesstechnik. Grundlagen der Messtechnik und Statistik, Prüfstandstechnik, Messtechnik im Motoren- und Fahrzugversuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. S. 212

M. Paulweber, K. Lebert, *Mess- und Prüfstandstechnik*. Antriebsstrangentwicklung · Hybridisierung · Elektrifizierung, Wiesbaden: Springer Vierweg, 2014. S64-68

C. Kurz, L. Stangenberg, F. Gauterin, A Generic Approach to Modeling Vehicle Pitch Dynamics on a Vehicle Test Bench. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology,* Ausgabe *4*, S.739-748, 2023

DIE NEUDENKER®, *Rüdiger Dunker Fotodesign, Marta Czernek, Gregor Schuster Fotografie, Uhland Werkstätten GmbH, Horiba Europe GmbH*, [Online]. Available: https://dieneudenker.de/projekte/produktvideo-titan-powertrain-vsl-fuer-horiba/
[Zugriff am 30 07 2024]

A. Ahlert, *ein modellbasiertes Regelungskonzept für einen Gesamtfahzeug-Dynamikprüfstand, wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart*, S.7-22, 2020

A. Ahlert*, ein modellbasiertes Regelungskonzept für einen Gesamtfahzeug-Dynamikprüfstand, wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart*, S.9, 2020

D. Zeitvogel*, Methodik für die Querdynamik-Evaluation auf einem Fahrzeugdynamikprüfstand, wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart*, S.5-19, 2024

FKFS-Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart Stiftung bürgerlichen Rechts. *Fahrzeugdynamikprüfstand.* [Online]. Available: https://www.fkfs.de/pruefeinrichtungen/fahrzeugpruefstaende/fahrdynamikpruefstand
[Zugriff am 02.08.2024]

Dürr. (2022). *x-road curve der Multifunktionsprüfstand*. [Online]. Available: https://www.durr.com/fileadmin/durr.com/01_Products/09_Testing_Systems/01_Autonomous_Driving/duerr-testing-flyer-x-road-curve-de.pdf
[Zugriff am 05.08.2024]

AIP GmbH & Co. KG. (2024). *Torque Wheel Dynamometer*. [Online]. Available: https://www.aip-automotive.de/en/Products/E-Mobility/ADAS-TEST-ING-SYSTEMS/Torque-Wheel-Dynamometer
[Zugriff am 05.08.2024]

A. Rolf, et al. *Risiko im Wandel*. Herausforderung für die Versicherungswirtschaft, Wiesbaden: Springer Gable, 2023. S.272-274 SAE International. (2024). *SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update.* [Online]. Available: https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-drivinggraphic
[Zugriff am 05.08.2024]

Bosch Mobility Solutions. (2024). *Ausweichassistent.* [Online]. Available: https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/assistenzsysteme/ausweich-assistent/
[Zugriff am 05.08.2024]

K.Bogeest, *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*. Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2023. S.498501 H. Winner, et al., Fahrstreifenwechselassistenz. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. *Auflage 3*, S.960-965, 2015

K.Bogeest, *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*. Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2023. S.476-477

K.Bogeest, *Elektronik in der Fahrzeugtechnik.* Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2023. S.477-480

Robert Bosch GmbH (Hrsg.). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. S.1884-1889

Robert Bosch GmbH (Hrsg.). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Wies-baden: Springer Vieweg, 2024. S.1872-1875

Robert Bosch GmbH (Hrsg.). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Wies-baden: Springer Vieweg, 2024. S.1884-1899

K.Bogeest, *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*. Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2023. S.507

S.Erichsen, et al., Semantic Segmentation of Solid-State LiDAR Measurements for Automotive Applications. *21. Internationales Stuttgarter Symposium*, *Band 1*, S.383-393, 2021

R.Dixon, T. Tille (Hrsg.), Trends in der Automobil-Sensorik. *Automobil-Sensorik 2 Systeme, Technologien und Applikationen, Auflage 1*, S17-28, 2018

W. Knight (2013.10.22). *Driverless cars are further away than you think.* [Online]. Available: https://www.technologyreview.com/s/520431/driverless-cars-are-further-away-than-you-think/
[Zugriff am 06.08.2024]

H.W. Yoo, et al., MEMS-based lidar for autonomous driving. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Ausgabe 135,* S.408-415, 2018

S. Royo, M. Ballesta-Garcia, An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles, *Applied Sciences, Ausgabe 9*, 2019

B. Behroozpour, et al., Lidar System Architectures and Circuits. *IEEE Communications Magazine, Ausgabe 55*, S. 135-142, 2017

T. Trautmann, F. Mendt, S.Reisinger, Lidar-Objekterkennung – Witterungsabhängigkeit der Sensorik, ATZelektronik, Ausgabe 05/2024, 2024

H. Wallentowitz, K. Reif (Hrsg.), *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2006. S412-419

H. Winner, et al., Testen mit koordinierten automatisierten Fahrzeugen. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Auflage 3*, 2015. S.216, 2015

S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), Fahrerassistenzsysteme und Automatisiertes Fahren. Vieweg Handbuch, Ausgabe 9, S.1021-1032, 2021

K. Reif, *Automobilelektronik*, Eine Einführung für Ingenieure. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. S.325-329

E.Yurtsever, et al., A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies. *IEEE Access, Ausgabe 8*, 2020

S. Genser, et al., Occlusion Model—A Geometric Sensor Modeling Aproach for Virtual Testing of ADAS/AD Functions. *IEEE OpenJournal of Intelligent Transportation Systems, Ausgabe* 4, S.440, 2023

F. Rosique et al., A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research, *Sensors, Ausgabe 3,* 2019

SA. Bagloee, et al., Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies, *Journal of Modern Tansportation, Ausgabe 24*, S284-300, 2016

H. Wallentowitz, K. Reif (Hrsg.), *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik.* Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2006. S.510-511

H. Wallentowitz, Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen,1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg; 2006, S.511-512 SA. Bagloee, et al., Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies, Journal of Modern Transportation, Ausgabe 24, S297, 2016

H. Winner, et al., Radarsensorik. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Ausgabe 3,* S.288, 2015

M. Maurer (Hrsg.), W. Wachenfeld, H. Winner Lernen autonome Fahrzeuge? *Autonomes Fahren Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, Ausgabe 1,* S.472, 2015

F. Homm, N. Kaempchen, D. Burschka, Fusion of laserscannner and video based lanemarking detection for robust lateral vehicle control and lane change maneuvers. *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S.969-974, 2011

I. J. Xique, et al., Evaluating Complementary Strengths and Weaknesses of ADAS Sensors. *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference*, S.1-5, 2018

V. Wittpahl (Hrsg.), M Kirste, M.Schürholz, Einleitung: Entwicklungswege zur KI. *iit-Themenband: Künstliche Intelligenz*. S.21-33, 2019

S. Grigorescu, et al., A Survey of Deep Learning Techniques for Autonomous Driving. *Journal of Field Robotics, Ausgabe 3,* S.362-386, 2020

V. Wittpahl (Hrsg.) M.Kappel et al., Die Rolle der KI beim automatisierten Fahren. *iit-Themenband: Künstliche Intelligenz*, S.176-191, 2019

D. Zhao, H. Peng, From the Lab to the Street: Solving the Challenge of Accelerating Automated Vehicle Testing. *Arxiv: University of Michigan,* 2017

Z. Szalay, Next Generation X-in-the-Loop Validation Methodology for Automated Vehicle Systems. *IEEE Access, Ausgabe 9,* 2021

F.Kistler, et al., Vehicle endurance testing through automated test driving. *20. Internationales Stuttgarter Symposium, Band 1*, S.389-400, 2020.

Economic Commission for Europe. (2023). *New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM) Guidelines for Validating Automated Driving System (ADS).* [Online]. Available: https://unece.org/sites/default/files/2023-04/ECE-TRANS-WP.29-2023-44e.pdf
[Zugriff am 022.09.2024]

Galvagno, et al., Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy With Rule-Based Gear Selection for the Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Equipped With Dual Clutch Transmissions. *IEEE Access, Ausgabe 8*, (2020).

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. [Online]. Available: https://www.porsche.com/germany/models/911/911-turbo-models/911-turbo-s/
[Zugriff am 11.08.2024]

I. Yunus, Motion sickness in autonomous driving: Prediction models and mitigation using trajectory planning, *KTH Royal Institute of Technology*, 2024

B. Impley. (2024.07.05). *Durchschnittliches Gewicht bei Pkw-Neuzulassungen in Europa nach Marken 2022*. [Online].
Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/238004/umfrage/gewicht-von-pkw-nachautoherstellern/
[Zugriff am 22.09.2024]

Laenderdaten.info. (2023). *Tempolimits weltweit*. [Online]. Available: https://www.laenderdaten.info/tempolimit.php#google_vignette
[Zugriff am 22.09.2024]

F. Küçükay. *Grundlagen der Fahrzeugtechnik.* Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022, S.1007-1042

Robert Bosch GmbH (Hrsg.). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Wies-baden: Springer Vieweg, 2024. S.479

H. Meyer. *Die 10 steilsten Straßen der Welt*. [Online].
Available: https://www.adac.de/reise-freizeit/reiseplanung/inspirationen/international/steilsten-strassen-der-welt/#baldwin-street-in-dunedin/neuseeland /
[Zugriff am 19.08.2024]

Dr. C.G. Kotz (2024.05.23). *Verkehrssicherungspflicht: Keine Haftung bei Schlagloch von 9 cm Tiefe*. [Online]. Available: https://www.rakotz.de/verkehrssicherungspflicht-keine-haftung-bei-schlagloch-von-9cm-tiefe.htm
[Zugriff am 19.08.2024]

J. S Marshall, W. McK. Palmer, THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE. *Journal of Meteorology,* 1948

(DWD) Deutscher Wetterdienst. *Wetter- und Klimalexikon*. [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html;jsessionid=FA286DB5FDF8316C504789F6D6913B41.live11054?lv2=101812&lv3=101906
[Zugriff am 22.09.2024]

KOMPASS-Karten GmbH. *Die zehn kältesten Orte der Erde*. [Online]. Available: https://www.kompass.de/magazin/inspiration/die-zehn-kaeltestenorte-der-erde/
[Zugriff am 22.09.2024]

ISO16750-4. (2023) *Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 4: Climatic loads*

T.Q. Khan, J. Kobbert, T. Singer. Sichtverbesserungssysteme und Signaleinrichtungen. *Handbuch Assistiertes und Automatisiertes Fahren: Grundlagen, Komponenten und Systeme für assistiertes und automatisiertes Fahren, Auflage 4*, S.763- 766, 2024

S.Heinrich.(2019.02.07). *Memory in the emerging age of autonomy, 2017.* Lucid Motors. [Online]. Available: https://files.futurememorystorage.com/proceedings/2017/20170808_FT12_Heinrich.pdf
[Zugriff am 23.09.2024]

Horiba Automotive. (2023). *Vulcan Chassis Dynamometers.* [Online]. Available: https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Automotive/Mechatronics/VULCAN/VULCAN_Brochure_USA_23V3.pdf
[Zugriff am 23.09.2024]

MdynamiX AG. *MXsteerHiL: Lenksysteme und ADAS/AD frühzeitig erleben, bewerten und anwenden mit dem robusten Lenkprüfstand.* [Online]. Available: https://www.horiba.com/deu/products/detail/action/show/Product/light-duty-vehicle-chassis-dynamometers-5224/
[Zugriff am 24.09.2024]

O. Gietelink, et al., Development of advanced driver assistance systems with vehicle hardware-in-the-loop simulations. Vehicle System Dynamics, Ausgabe 44, S.569-590, 2006

Anthony Best Dynamics Limited. *ADAS-Plattformen.* [Online]. Available: https://www.abdynamics.com/de/track-testing/adas-plattformen/
[Zugriff am 25.09.2024]

C. Schwarzl, *Physical environment simulator for testing vehicle sensor systems*. UK Patent Application GB2557252, (2018)

B. Griffig. (2024,06, 21). *Der Klimawindkanal in Weissach – die Simulation der weltweiten Klimaverhältnisse.* [Online]. Available: https://newsroom.porsche.com/de/2024/innovation/porsche-klimaverhaeltnisse-simulieren-klima-windkanal-weissach-36352.html
[Zugriff am 26.09.2024]

RTA Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH. *Simulationsmöglichkeiten.* [Online]. Available: https://www.rta.eu/service/simulations-moeglichkeiten
[Zugriff am 26.09.2024]

A. Engelbert (2020.12.21). *Prüfung von ADAS-Funktionen Optisches Testsystem für LIDAR-Sensoren* [Online]. Available:https://www.elektroniknet.de/automotive/assistenzsysteme/optischestestsystem-fuer-lidar-sensoren.182269.html
[Zugriff am 26.09.2024]

IPG Automotive GmbH*. Kamerasensoren mit Camera-in-the-Loop „Overthe-Air“ testen.*
[Online]. Available: https://www.ipg-automotive.com/de/produkteloesungen/testsysteme/camera-in-the-loop/
[Zugriff am 26.09.2024]

P. Agostinelli, et al., Funktionale Prüfung von ADAS/AD entlang des Fahrzeuglebenszyklus. *ATZ- Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 6*, 2024

A.Diewald, et al., Radar Target Simulation for Vehicle-in-the-Loop Testing. *Vehicles, Ausgabe 3*, S.257-271, 2021

Electronic Engineering Journal (2021.06.25). *New Rohde & Schwarz test system for automotive radar sensors electronically simulates even laterally*

moving objects. [Online]. Available: https://www.eejournal.com/industry_news/new-rohde-schwarz-test-system-for-automotive-radar-sensorselectronically-simulates-even-laterally-moving-objects/
[Zugriff am 26.09.2024]

Konrad Technologies (2024). *Ultrasonic Target Simulator.* [Online]. Available: https://cdn.prod.websitefiles.com/62e0d3e00f555f83150a517d/664f2b7395f10c2a5d5df355_2024-05%233%20USTS%20Ultrasonic%20Target%20Simulator.pdf
[Zugriff am 26.09.2024]

Dr. S. Siegl, et al., Vehicle-in-the-Loop am Prüfstand zur Validierung von ADAS/AD. *ATZelektronik, Ausgabe 7*, 2021

dSPACE GmbH*. Over-the-Air-Tests Validierung der Funktion und Leistung von Sensoren und Steuergeräten auf physikalischer Ebene*
[Online]. Available: https://www.dspace.com/de/gmb/home/applicationfields/foo/over-the-air-testing.cfm
[Zugriff am 26.09.2024]

L. Teschler. (2019.08.19). *Data injection — Testing autonomous sensors through realistic simulation.*
[Online]. Available: https://www.eeworldonline.com/data-injection-testingautonomous-sensors-through-realistic-simulation/
[Zugriff am 26.09.2024]

Carsim mechanical simulation. *Mechanical Simulation Corporation.*
[Online]. Available: https://www.carsim.com/
[Zugriff am 27.09.2024]

Casim mechanical simulation. *CarSim Advantages.*
[Online]. Available: https://www.carsim.com/products/carsim/index.php
[Zugriff am 27.09.2024]

M.Wen, et al., Virtual Scenario Simulation and Modeling Framework in Autonomous Driving Simulators. *Electronics, Ausgabe 10,* 2021

I.Silva, et al., Realistic 3D Simulators for Automotive: A Review of Main Applications and Features. *Sensors, Ausgabe 24,* 2024

T. Zhang, et al., Virtual Tools for Testing Autonomous Driving: A Survey and Benchmark of Simulators, Datasets, and Competitions. *Electronics, Ausgabe 13,* 2024

X. Cao, et al., Vehicle-in-Virtual-Environment (VVE) Method for Autonomous Driving System Development, Evaluation and Demonstration. *Sensors, Ausgabe 11*, 2023

M. Jooriah, et al., A Co-Simulation Platform for V2X-Based Cooperative Driving Automation Systems. *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC),* S. 227-230, 2024

PTV Group. *PTV Vissim Anwendungsfälle.*
[Online]. Available: https://www.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim
[Zugriff am 27.09.2024]

Carla Simulator. *PTV-Vissim co-simulation.*
[Online]. Available: https://carla.readthedocs.io/en/latest/adv_ptv/
[Zugriff am 27.09.2024]

Carla Simulator. *CarSim Integration.*
[Online]. Available: https://carla.readthedocs.io/en/latest/tuto_G_carsim_integration/
[Zugriff am 27.09.2024]

Seagate Technology LLC. (2023.11.14). *Seagate erreicht mit seinem leistungsstarken, mehrere Petabyte umfassenden Blockspeichersystem mit 2,5 PB neue Dimensionen*

[Online]. Available: https://www.seagate.com/de/de/news/news-archive/seagate-takes-its-high-performing-multi-petabyte-capacity-blockstorage-system-to-new-heights-reaching-2-5-pb-pr/
[Zugriff am 27.09.2024]

Amazon Web Services. *Cloud-Computing mit AWS*
[Online]. Available: https://aws.amazon.com/de/what-is-aws/
[Zugriff am 27.09.2024]

Telefónica Germany GmbH & Co. OHG. (2024.05.24) *Glasfasergeschwindigkeit: So schnell ist Glasfaser.* [Online]. https://www.o2online.de/ratgeber/glasfaser/glasfaser-geschwindigkeit/
[Zugriff am 27.09.2024]

A. P. Maulidina. Comparative Study of Data Compression Algorithms: Zstandard, zlib & LZ4. *Science, Engineering Management and Information-Technology, Ausgabe 2198*, S. 394-406, 2024

Amazon Web Services. *Was ist Hadoop?*
[Online]. https://aws.amazon.com/what-is/hadoop/
[Zugriff am 28.09.2024]

Amazon Web Services. *Was ist Apache Spark?*
[Online]. Available: https://aws.amazon.com/what-is/apache-spark/
[Zugriff am 28.09.2024]

A. Hillmer. (2024.05.30) *TISAX®: Der Komplett-Guide für Ihr Unternehmen.*
[Online]. Available: https://www.secjur.com/blog/tisax/
[Zugriff am 28.09.2024]

C. Xia, et al., TraModeAVTest: Modeling Scenario and Violation Testing for Autonomous Driving Systems Based on Traffic Regulations. *Electronics, Ausgabe 13*, 2024

R. Pfeffer, M. Hermann, H. Kemper, Efficient Failure Rate Estimation Using AI-Based Simulation of Critical Scenarios. *ATZelectronics, Ausgabe 11*, 2023

V.S. Handur, S.L. Deshpande. Artificial Bee Colony Optimization-Based Load Balancing in Distributed Computing Systems—A Survey. *Smart Trends in Computing and Communications. Lecture Notes in Networks and Systems, Ausgabe 396*, S.733-740, 2023

NVIDIA Corporation, *Boosting Vehicle Aerodynamics with NVIDIA GPUs*.
[Online]. Available: https://www.nvidia.com/en-us/case-studies/boostingvehicle-aerodynamics-with-nvidia-gpus/
[Zugriff am 28.09.2024]

V. Wittpahl (Hrsg.) M. Schürholz, E.C. Spitzner. Hardware für KI. *iit-Themenband: Künstliche Intelligenz*, S.36-45, 2019

P. Alcorn (2017.09.05), *Hot Chips 2017: A Closer Look At Google's TPU v2.* [Online]. Available: https://www.tomshardware.com/news/tpu-v2-googlemachine-learning,35370.html
[Zugriff am 28.09.2024]

Anhang

Kategorisierung der Niederschlagsmenge / Referenz [77]

Die Niederschlagsintensität (Niederschlagsstärke) gibt die Niederschlagshöhe, d.h. die Menge des gefallenen Niederschlags, in mm pro Zeiteinheit an.

Sprühregen:
leicht: Niederschlagshöhe < 0,1 mm in 60 Minuten
mäßig: Niederschlagshöhe ≥ 0,1 mm bis < 0,5 mm in 60 Minuten
stark: Niederschlagshöhe ≥ 0,5 mm in 60 Minuten

Gefrierender / unterkühlter Sprühregen
leicht: Niederschlagshöhe <0,1 mm in 60 Minuten
mäßig: Niederschlagshöhe ≥ 0,1 mm bis < 0,5 mm in 60 Minuten
stark: Niederschlagshöhe ≥ 0,5 mm in 60 Minuten

Regen:
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 2,5 mm, in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 2,5 mm bis < 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 50,0 mm, in 10 Minuten ≥ 8,3

Gefrierender / unterkühlter Regen:
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 2,5 mm, in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 2,5 mm bis < 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 50,0 mm, in 10 Minuten ≥ 8,3

Regen und Sprühregen:
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 2,5 mm, in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 2,5 mm bis < 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 50,0 mm, in 10 Minuten ≥ 8,3

Gefrierender / unterkühlter Regen und Sprühregen:
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 2,5 mm, in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 2,5 mm bis < 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 10,0 mm, in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 50,0 mm, in 10 Minuten ≥ 8,3

Schnee (auch Industrieschnee):
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 1,0 mm, in 10 Minuten < 0,2 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 1,0 mm bis < 5,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,2 mm bis < 0,9 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 5,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,9 mm

Schneeregen:
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 1,0 mm, in 10 Minuten < 0,2 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 1,0 mm bis < 5,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,2 mm bis < 0,9 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 5,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,9 mm

Eiskörner:
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 1,0 mm, in 10 Minuten < 0,2 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 1,0 mm bis < 5,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,2 mm bis < 0,9 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 5,0 mm, in 10 Minuten ≥ 0,9 mm

Schneegriesel:
leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 0,1 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 0,1 mm bis < 0,5 mm
stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 0,5 mm

Regenschauer:
leicht: Niederschlagshöhe in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 10 Minuten: ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 8,3 mm

Schneeschauer:
leicht: Niederschlagshöhe in 10 Minuten < 0,2 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 0,2 mm bis < 0,9 mm
stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 0,9 mm

Frostgraupelschauer:
leicht: Niederschlagshöhe in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 8,3 mm

Reifgraupelschauer:
leicht: Niederschlagshöhe in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 8,3 mm

Hagelschauer:
leicht: Niederschlagshöhe in 10 Minuten < 0,5 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 0,5 mm bis < 1,7 mm stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 1,7 mm
sehr stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 8,3 mm

Schneeregenschauer:
leicht: Niederschlagshöhe in 10 Minuten < 0,2 mm
mäßig: Niederschlagshöhe in 10 Minuten: ≥ 0,2 mm bis < 0,9 mm
stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten ≥ 0,9

Autor:innen



Andreas Rosenke

ist als Applikationsingenieur im Bereich kundenspezifischer Prüf- und Entwicklungssysteme tätig. Nach seiner Ausbildung zum Mechatroniker sammelte er langjährige Berufserfahrung in der Prüfstands- und Fahrzeugentwicklung. Berufsbegleitend absolvierte er das Studium der Fahrzeugtechnik an der Wilhelm Büchner Hochschule und schloss dieses 2024 mit dem akademischen Grad Bachelor of Engineering (B.Eng.) ab. Seine fachlichen Schwerpunkte liegen in der Prüf- und Messtechnik, der technischen Systemintegration sowie der Entwicklung und Erprobung komplexer Fahrzeugsysteme. Im Rahmen seiner Bachelorarbeit untersuchte er die Anforderungen an Fahrzeugprüfstände für die Erprobung autonomer Fahrsysteme und bewertete verschiedene technische Konzepte hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit.



Tobis Ruf

Ist seit 2022 Professor Fahrzeugtechnik an der WBH. Nach Physikstudium und Promotion war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an einem Max-Planck-Institut. Er erforschte Quanteneffekte in neuen Materialien, insbesondere Halbleiter und Nanostrukturen. Nach der Habilitation wechselte er in die Industrie. In mehreren Industrien und Unternehmen lernte er alle Phasen des Produktlebenszyklus kennen und hatte verschiedene internationale Führungsrollen inne. Zuletzt war er Entwicklungsdirektor für elektrische Antriebe bei einem Automobilzulieferer.

Überblick über die Bände der Schriftenreihe

Band 1 / 2022 **Christoph Sternberg, Ralf Isenmann**
Untersuchung regionaler Besonderheiten imIndividualverkehr bei ausgewählten deutschen Smart-City-Projekten

Band 2 / 2022 **Fabian Fries, Manfred Hahn**
Dynamik von Doppelstern-Systemen

Band 3 / 2022 **Stefan Kaden, Ralf Isenmann**
IT based Framework facilitating Technology Roadmapping striving for Sustainability

Band 4 / 2022 **Hannah Seibel, Manfred Hahn**
Von der Raupe zur Drohne – Leichtbau in Anlehnung an die Natur

Band 5 / 2022 **Thomas König, Manfred Hahn**
Statische Festigkeitsberechnung einer 5-Speichen Fahrradfelge aus Faserverbund-kunststoff

Band 6 / 2022 **Alrik Selle, Manfred Hahn**
Ertüchtigung der automatisierten Wetterbeobachtung unter extremen Vereisungen

Band 7 / 2022 **Valerie Seitz, Birgit Zimmermann**
Nachhaltiges Energiekonzept für einen Bauernhaushalt im ländlichen Äthiopien

Band 8 / 2022 **Volker Kempf, Helge Nuhn**
Validation of personality survey instruments using vector space representations of natural language

Band 9 / 2022 **Torben Rippe, Klaus Fischer**
Umweltökonomische Instrumente und Stakeholdermanagement

Band 10/ 2023 **Guido Walz**
Introduction to Extrapolation Algorithms in Numerical Analysis including New Results

Band 11 / 2024 **René Kumpf, Rüdiger Breitschwerdt, Helge Nuhn**
Evaluationskriterien für IT-Reifegradmodelle eine Analyse aus der Literatur mit beispielhafter Anwendung der Ergebnisse

Band 12/ 2024 **Kurt Becker, Henrik Bruns, Prof. Dr. Gernot Graeßner, Ralf Isenmann**
Never stop learning – Aktuelle Entwicklung in Unternehmen Jahrestagung 2022 Forschungscluster Lebenslanges und Selbstgesteuertes Lernen (LSL)

Band 13/ 2024 **Transformation gestalten - Wissenschaftsforum 2023**
Klaus Fischer, Karsten Glöser, Michael Haag, Ralf Isenmann, Ursula Tischner
Introduction to Extrapolation Algorithms in Numerical Analysis including New Results

Band 14/ 2024 **Yanez Ahlfs, Nina Golowko**
Konzept zur Komplexitätsbewältigung für die Produktionsplanung und-steuerung in der auftragsorientierten Werkstattfertigung im Tischlerhandwerk

Band 15/2026 **Valerie Seitz, Birgit Zimmermann**
Nachhaltigkeitsanalyse einer Bauerngemeinschaft in Äthiopien zur Identifikation von Förderpotential zur nachhaltigen ländlichen Entwicklung

Band 16/ 2026 **Lukas Ebner, Thomas Wenisch**
Identifikation und Evaluation vonAntriebstopologien in elektrischenAntriebssträngen von Elektrofahrzeugen mittels Patentanalyse

Band 17/ 2026 **Jessica Riemer, Ralf Isenmann**
TRIGA – Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors -
Eine vergleichende technologische Innovationssystemanalyse

Band 18/ 2026 **Tobias Tannenhauer, Ralf Isenmann**
Zukunft autonom fahrender Straßenbahnen und Busse in Deutschland und Schweden im Nachhaltigkeitskontext bis zum Jahr 2035 - ein Mini-Delphi

Band 19/ 2026 **Lea Hagedorn, Ralf Isenmann**
Innovation Champions in Sprints: Einsatz und Rahmenbedingungen

Band 20/2026 **Lea Apfel, Martina Schwarz-Geschka**
Steigerung der Innovationsfähigkeit - Vorgehensmodell zur Entwicklung eines Innovationskonzeptes

Band 21/2026 **Felix Häring, Klaus-Michael Ahrend**
Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens zur Erfüllung der Nachhaltigkeitsanforderungen von ecoVadis
- Ein lösungsorientierter Ansatz für KMU

Band 22/2026 **Petar Knežić, Ralf Isenmann, Klaus-Michael Ahrend**
Ökobilanz alternativer Antriebe und Kraftstoffe im PKW-Sektor der Europäischen Union: Eine Lebenszyklusanalyse

Band 23/2026 **Andreas Rosenke, Tobias Ruf**
Anforderungen und Bewertung der Erprobung autonomer Fahrsysteme auf Fahrzeugprüfständen

WILHELM BÜCHNER HOCHSCHULE

Eine Hochschule der Klett Gruppe

Wilhelm Büchner Hochschule
Hilpertstraße 31
64295 Darmstadt

KLETT