

2 Stand der Technik und Grundlagen

In den vergangenen 25 Jahren haben sich eine Vielzahl moderner Fahrerassistenzsysteme auf dem Markt etabliert und sind in einigen Fällen zum technischen und gesetzlichen Standard geworden. Systeme, wie das Antiblockiersystem ABS und das elektronische Stabilitätsprogramm ESP, sind aufgrund ihres herausragenden Beitrags zur aktiven Sicherheit eines Fahrzeugs nicht mehr wegzudenken. Bisher standen hauptsächlich Komfort und aktive Sicherheit im Fokus der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Zunehmend rücken jedoch auch weitere Aspekte, wie die Verbesserung der Energieeffizienz, in den Vordergrund. Die durch den Einfluss des Fahrers auftretenden relativen Kraftstoffverbrauchsschwankungen betragen bis zu 33 % [32]. Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer bei einer effizienten Fahrweise unterstützen oder die Längsregelung des Fahrzeugs automatisiert durchführen, sind daher eine vielversprechende Maßnahme zur Reduzierung des Energiebedarfs. Dies gilt insbesondere für vorausschauende Fahrerassistenzsysteme [33].

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik von Fahrerassistenzsystemen dargestellt, die die Verbesserung der Energieeffizienz eines Fahrzeugs zum Ziel haben. Des Weiteren werden Grundlagen behandelt, die zum Verständnis dieser Arbeit beitragen.

2.1 Kategorisierung von Fahrerassistenzsystemen

Fahrerassistenzsysteme lassen sich nach Edmund Donges anhand der Fahraufgaben, die das System übernimmt, kategorisieren. Dabei wird in der Drei-Ebenen-Hierarchie zwischen den Fahraufgaben Navigation, Führung und Stabilisierung unterschieden. Die Ebene der Navigation beinhaltet Systeme, die den Fahrer bei der Wahl einer Fahrtroute unterstützen. Bei dieser wissensbasierten Unterstützung sind verschiedenste Ausprägungen und Optimierungskriterien denkbar, beispielsweise die Nutzung telematischer Informationen anderer Verkehrsteilnehmer. Ein System, das eine Fahraufgabe auf der Führungsebene übernimmt, ermittelt eine für die jeweilige Verkehrssituation geeignete Geschwindigkeit oder Fahrspur. Ein typisches Beispiel ist ACC (Adaptive Cruise Control). Ein System, das die Einhaltung bestimmter Zustandsgrößen überwacht und beeinflusst, beispielsweise ESP, agiert auf der Stabilisierungsebene. [4]

Demnach bieten insbesondere Systeme, die auf den Ebenen der Navigation und der Führung arbeiten, Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz eines Fahrzeugs.

2.2 Systeme im Serieneinsatz

Für moderne Fahrzeuge ist eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen erhältlich. Die meisten Systeme dienen der aktiven Sicherheit und dem Komfort des Fahrers, beispielsweise ESP, ABS, Notbrems-, Totwinkel- oder Einparkassistenten. Dieses Kapitel stellt Systeme vor, die den Energiebedarf eines Fahrzeugs senken können und heute bereits in Serienfahrzeugen verfügbar sind.

Seit 1999 ist das Fahrerassistenzsystem ACC auf dem europäischen Markt erhältlich [4]. Auch wenn der Fokus dieses Systems auf dem Komfortgewinn für den Fahrer liegt, bringt ein Abstandsregeltempomat durch die Harmonisierung des Fahrstils gleichzeitig einen Energieverbrauchsvorteil mit sich, wie in [34] gezeigt wird. Bei einer repräsentativen Probandenstudie wurden Messfahrten mit und ohne Serien-ACC-System durchgeführt. Der Vergleich der Fahrten lieferte einen um 1,5 % geringeren Kraftstoffverbrauch bei der Verwendung von ACC. In schweren Nutzfahrzeugen sind ACC-Systeme im Einsatz, die in Kombination mit topografischen Informationen über die vorausliegende Strecke die Fahrzeuggeschwindigkeit anpassen, beispielsweise bei [35,36,37]. Vor einem Berg wird die Geschwindigkeit erhöht, um Schaltvorgänge am Berg vermeiden oder reduzieren zu können. Vor einer Bergabfahrt oder auf einer Kuppe wird die potenzielle Energie des Fahrzeugs genutzt, um die Sollgeschwindigkeit zu erreichen. Durch diese Maßnahmen wird weniger Kraftstoff benötigt und die durch das Bremsen dissipierte Energie verringert. Der Kraftstoffverbrauch sinkt um 3 [36,37] bis 5 % [35]. Diese Maßnahme kann mit einem System gekoppelt werden, das in Segelphasen die Schleppverluste durch automatisches Auskuppeln des Motors verringert [36].

Ein weitverbreitetes System in Fahrzeugen mit manuellen Schaltgetrieben ist die Empfehlung einer verbrauchsgünstigen Gangwahl, wie in [38,39]. Dabei wird dem Fahrer in einem Display angezeigt, ob ein Gangwechsel im aktuellen Fahrzustand sinnvoll ist, um möglichst kraftstoffsparend zu fahren. Im Stadtverkehr mit häufigen Gangwechseln lässt sich ein Verbrauchsvorteil von bis zu 25 % erreichen [38]. In [40] wird der Fahrer bei der Wahl einer effizienten Gaspedalstellung für die jeweilige Fahrsituation unterstützt. Zusätzlich zu einer visuellen Anzeige erhält der Fahrer über das Gaspedal ein haptisches Signal, indem ein entsprechender Gegendruck im Pedal erzeugt wird. Die effizienteste Gaspedalstellung wird dabei aus einem Motorverbrauchs-kennfeld und einem Getriebewirkungsgradkennfeld ermittelt. Der Verbrauchsvorteil beträgt 5 bis 10 % [40].

Die haptische Signalübertragung über das Gaspedal kommt in [41] in einem Hybridfahrzeug zum Einsatz. Mithilfe eines Radarsensors werden vorausfahrende Fahrzeuge erkannt. Bei Annäherung an ein solches Fahrzeug gibt das ECO-Assistent-System dem Fahrer eine Empfehlung, wann er vom Gas gehen soll, damit die Annäherung durch eine möglichst lange Segelphase energieoptimal erfolgen kann. Der Verbrennungsmotor wird dabei ausgeschaltet und vom Antriebsstrang abgekoppelt. Das Rekuperationsmoment des Elektromotors wird an sich ändernde Randbedingungen des Annäherungsmanövers angepasst. Das Hybridfahrzeug verfügt darüber hinaus über verschiedene Hybridmodi. Diese können vom Fahrer gewählt werden. Ist die Route durch Eingabe in das Navigationsgerät bekannt, kann ein Fahrerassistenzsystem diese Auswahl übernehmen und die Modi durch Kenntnis der vorausliegenden Strecke energetisch optimal einsetzen. So kann beispielsweise der verbrennungsmotorische Betrieb des Fahrzeugs im Stadtverkehr am Ende einer Route vermieden werden, indem das System für diesen Streckenteil einen entsprechenden Ladezustand der Batterie vorhält. Die Strategie wird so angepasst, dass die Batterie des Fahrzeugs am Zielort den geringstmöglichen Ladezustand erreicht hat. [41]

Navigationssysteme, wie in [42] und [43], die neben der schnellsten und der kürzesten Route auch die Berechnung der sparsamsten Route ermöglichen, sind auf dem Markt verbreitet und besitzen das Potenzial, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Der Fahrer kann zu Beginn einer Fahrt unter Berücksichtigung aktueller Verkehrsdaten die voraussichtlich verbrauchsgünstigste Route wählen. In [42] ist die Funktion zu einem Reichweitenassistenten für ein Elektrofahrzeug erweitert. In Abhängigkeit des Fahrstils, der vorausliegenden Strecke und des Ladezustands der Batterie wird dynamisch die Reichweite des Fahrzeugs angezeigt. Liegt diese unterhalb der Entfernung des eingegebenen Zielorts, empfiehlt das System eine nahegelegene Ladestation aufzusuchen.

2.3 Systeme in Forschung und Vorentwicklung

Die zunehmende Bedeutung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung der Energieeffizienz spiegelt sich in einer wachsenden Zahl an Forschungsarbeiten und Vorentwicklungsprojekten zu diesem Thema wider. Im Folgenden werden Systeme und Ansätze betrachtet, deren Schwerpunkt die Minimierung des Energiebedarfs eines Fahrzeugs durch geeignete Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit ist. In der Literatur sind hierzu zahlreiche Lösungsansätze zu finden. Bei allen nachfolgend beschriebenen Ansätzen werden Modelle der energetisch relevanten Fahrzeugkomponenten

verwendet, um den Energiebedarf zu berechnen. Mithilfe eines Optimierungsalgorithmus wird, unter Berücksichtigung von Randbedingungen, die optimale Lösung ermittelt.

In [44] wird ein Ansatz simulativ untersucht, der die Geschwindigkeitstrajektorie eines Elektrofahrzeugs zwischen zwei gegebenen Ereignissen, beispielsweise Ampeln, optimiert. Die Streckeninformationen werden als gegeben vorausgesetzt. Der Optimierungsalgorithmus ist mit dynamischer Programmierung nach Bellman umgesetzt. Ziel der Optimierung ist es, den Energieverbrauch zu minimieren. Das dabei identifizierte Einsparpotenzial für eine betrachtete Einzelsituation beträgt 20 %. Bei der Simulation eines vollständigen Stadtverkehrsszenarios wird in [45] die Kraftstoffeinsparung durch einen vergleichbaren Ansatz auf 13,2 % beziffert. [44,45]

In [46] wird ein theoretischer Ansatz für energieeffizientes Fahren als Problem einer optimalen Steuerung beschrieben. Es werden verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Algorithmen zur Lösung der Optimierungsaufgabe untersucht und evaluiert. Die Untersuchungen beschränken sich auf simulative Betrachtungen. Das dabei eingesetzte Fahrzeugmodell basiert auf einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb. [46]

In [47] wird die modellprädiktive Regelung zur energetischen Optimierung in Verbindung mit dem Fahrerassistenzsystem ACC simulativ untersucht. Dabei stehen sowohl Freifahrt- als auch Folgefahrtszenarien⁵ im Fokus der Potenzialermittlung. Bei der Freifahrt werden dem System wechselnde Geschwindigkeitsbegrenzungen vorgegeben. Der Vergleich mit einem ACC-System ohne energetische Optimierung ergab einen um 12,8 % verringerten Kraftstoffverbrauch. Bei einem Folgefahrtszenario mit einem oszillierenden Geschwindigkeitsverlauf des vorausfahrenden Fahrzeugs, konnte ein Kraftstoffeinsparpotenzial von 17,4 % erreicht werden. [47]

Auch die Verwendung von Verkehrsdaten, wie der Verkehrsdichte und der Verkehrsgeschwindigkeit auf einer Autobahn, als Eingangsinformationen für ACC kann zu einer Kraftstoffeinsparung führen, wie in [48] simulativ gezeigt wurde. Durch die vorausschauende Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit konnte, in Abhängigkeit der Länge des Vorausschauhorizonts, zwischen 5 und 7 % Kraftstoff eingespart werden. Die Fahrdauer hat sich dabei um bis zu 3 % erhöht. [48]

Im Stadtverkehr haben Ampeln als wichtigstes Steuerungselement für den Verkehrsablauf einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Im Projekt

⁵ Der Begriff der Folgefahrt bezeichnet ein Verkehrsszenario, bei dem die Fahrzeuglängsführung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug beeinflusst wird.

TRAVOLUTION, das in [49] vorgestellt wird, wurde unter anderem eine Lichtsignal-Fahrzeug-Kommunikation umgesetzt. Über ein Display wird dem Fahrer eine Geschwindigkeit empfohlen, mit der er die nächste Ampel in einer Grünphase, ohne anzuhalten, passieren kann. Durch die Vermeidung von Stillständen besitzt ein derartiges System Potenzial, den Energieverbrauch von Fahrzeugen zu verringern. Anstelle einer Geschwindigkeitsempfehlung ist auch eine Einbindung dieser Information in eine automatisierte Fahrzeuglängsführung denkbar. [49]

Für die Darstellung theoretischer Ansätze in Prototypen sind onlinefähige Algorithmen erforderlich. In Kombination mit einem elektronischen Horizont, der energetisch relevante Streckenparameter zur Verfügung stellt, können optimierte Geschwindigkeitstrajektorien für eine automatisierte Fahrzeuglängsregelung verwendet werden. Im Folgenden werden Systeme und Ansätze vorgestellt, bei denen eine modellprädiktive, automatisierte Fahrzeuglängsregelung realisiert und teilweise in Versuchsträgern prototypisch implementiert ist.

In [50] wird ein bei der Robert Bosch GmbH entwickeltes System mit dem Namen ECO-ACC beschrieben. Es ist eine Erweiterung des klassischen Abstandsregeltempomaten für Elektro- und Hybridfahrzeuge. Die Arbeiten entstanden im Rahmen des EU-Förderprojekts OpEneR (Optimal Energy Consumption and Recovery based on a System Network). Dabei stand die energetische Optimierung einer Annäherung an ein langsames, vorausfahrendes Fahrzeug im Fokus. Die verwendete Sensorik unterscheidet sich nicht von der, die bei einem Standard-ACC zum Einsatz kommt. Durch Rekuperation und Segelbetrieb wird die Verwendung der Reibbremsen minimiert und damit der Energiebedarf für das Annäherungsmanöver gesenkt. Für den Segelbetrieb können die Elektromotoren mechanisch abgekoppelt werden, um Verluste im elektrischen Antriebsstrang während des Segelns zu vermeiden. Mittels dynamischer Programmierung nach Bellman wird für einen Optimierungsterm, bestehend aus Energie, Zeit und einem Gewichtungsfaktor, das globale Optimum gefunden. Je nach Wahl des Gewichtungsfaktors lässt sich ein Ergebnis zwischen minimalem Energieverbrauch und minimaler Manöverdauer erzielen. Die gefundene energieoptimale Strategie setzt sich aus einer anfänglichen Rekuperationsphase mit anschließendem Segelbetrieb zusammen. Das Potenzial zur Energieeinsparung hängt von der Relativgeschwindigkeit sowie der Sensorreichweite und dem damit verbundenen Vorausschauhorizont ab. Für ein Annäherungsmanöver mit ECO-ACC konnte eine Energieeinsparung von bis zu 25 %, im Vergleich zu einem simulierten Standard-ACC, erreicht werden. Die Ergebnisse der Optimierung sind auf einem Fahrzeugsteuergerät in Form von Tabellen hinterlegt und so in die Regelstrategie von ECO-ACC eingebunden. [50]

Das Fahrerassistenzsystem Porsche InnoDrive ist, wie das zuvor beschriebene System, eine Erweiterung des bekannten Abstandsregeltempomaten ACC. Die automatisierte Fahrzeuglängsführung wird durch Vorausschauinformationen ergänzt, sodass, insbesondere bei einer Freifahrt ohne vorausfahrendes Fahrzeug, die Betriebs- und Fahrstrategie hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs optimiert werden kann. Das System übernimmt für den Fahrer die Wahl des geeigneten Betriebszustands und setzt die gefundene Fahrstrategie in der automatisierten Fahrzeuglängsführung um. Bei einem konventionell angetriebenen Fahrzeug, wie im Falle des von Porsche eingesetzten Demonstrators, setzt sich die Fahrstrategie aus den Betriebszuständen Beschleunigung, Konstantfahrt, Schubabschaltung und Segeln zusammen. Zusätzlich zu den Umfeldinformationen des Radarsensors werden eine digitale Karte, eine Kamera sowie Fahrzeuginformationen und ein vom Fahrer gewähltes Fahrprofil für die Optimierung der Fahrstrategie verwendet. Der dabei eingesetzte echtzeitfähige Optimierungsalgorithmus basiert auf dynamischer Programmierung nach Bellman und berücksichtigt neben Kraftstoffverbrauch auch Dynamik und Fahrkomfort. Durch die globale Optimierung des gesamten Vorausschauhorizontes wird die kinetische und potenzielle Energie des Fahrzeugs effizient eingesetzt, um lange, verbrauchsgünstige Segelphasen zu ermöglichen. Die Einbindung von Motor- und Getriebekennfeldern ermöglicht darüber hinaus den Betrieb des Verbrennungsmotors in verbrauchsgünstigen Kennfeldbereichen. Bei Messfahrten mit dem Demonstratorfahrzeug auf öffentlichen Straßen im Raum Weissach konnte eine Verbrauchseinsparung von durchschnittlich 10 % erreicht werden. [51,52]

Das System Automatic Cruise Control wurde im Rahmen von Forschungsarbeiten am FKFS entwickelt. Als Demonstratorfahrzeug dient ein Smart Fortwo, der in studentischen Projekten von einem konventionell betriebenen Fahrzeug mit Dieselmotor zu einem batterieelektrischen Fahrzeug umgerüstet wurde. Mithilfe eines Radarsensors, einer digitalen Karte und sämtlicher durch den Eigenumbau bekannter Charakteristika des elektrischen Antriebsstrangs errechnet das System energieeffiziente Geschwindigkeitstrajektorien, die durch eine automatisierte Fahrzeuglängsführung umgesetzt werden. Um den unterschiedlichen Fahrertypen Rechnung zu tragen, können die der Trajektorienberechnung zugrundeliegenden Beschleunigungswerte verändert werden. Das System hält eine Mindestzeitlücke von 2,5 Sekunden zu einem vorausfahrenden Fahrzeug ein. Der Fokus der energetischen Optimierung liegt auf der Freifahrt des Fahrzeugs, bei der die Trajektorien aufgrund der bekannten Streckenparameter und Fahrzeugcharakteristika berechnet werden. Neben dem Energieverbrauch fließen in den mit dynamischer Programmierung nach Bellman umgesetzten Optimie-

rungsalgorithmus auch Zeit und Komfort ein. Die Quantifizierung des Energieeinsparpotenzials wurde auf einer Teststrecke mit einem repräsentativen Probandenkollektiv durchgeführt. Die Teststrecke besteht aus innerstädtischen Abschnitten und Landstraßenanteilen mit Höchstgeschwindigkeiten bis 60 km/h. Bei den Testfahrten mit Automatic Cruise Control wurde im Durchschnitt 6 % weniger Traktionsenergie benötigt als bei den manuellen Fahrten. Die Fahrtdauer nahm bei den automatisierten Fahrten um 1 % zu. [53]

Eco-Cruise Control ist ein theoretischer Ansatz, der an der University of Luxembourg entwickelt wurde. Dabei werden Vorausschauinformationen in Verbindung mit Fahrzeugparametern genutzt, um mit einer automatisierten, energieeffizienten Fahrzeuglängsregelung die Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs zu verlängern. Die Optimierung basiert auf Streckeninformationen über Geschwindigkeitsbegrenzungen, Steigungen und Gefällen sowie den Fahrwiderständen und den gemessenen Wirkungsgraden im elektrischen Antriebsstrang eines Smart Fortwo Electric Drive. Besonderer Schwerpunkt ist die Optimierung einer Freifahrt ohne Einflüsse und Einschränkungen durch vorausfahrende Fahrzeuge. Die Funktion ist in einer Simulationsumgebung implementiert. Die Auswirkungen von Eco-Cruise Control auf die Reichweite des Elektrofahrzeugs sind nicht quantifiziert. Eine prototypische Darstellung in einem Smart Fortwo Electric Drive ist geplant. [54]

Der am Institut für Kraftfahrzeuge (IKA) der RWTH (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule) Aachen entwickelte Ansatz Eco ACC zeigt das Einsparpotenzial eines Hybridfahrzeugs mit kartenbasierter Vorausschau. Neben einer vorausschauenden Betriebsstrategie des hybriden Antriebsstrangs, wird insbesondere das Ziel einer energieeffizienten, automatisierten Fahrstrategie in ACC-relevanten Fahrsituationen verfolgt. Die Informationen des Abstandssensors werden durch die kartenbasierten Informationen über Geschwindigkeitsbegrenzungen ergänzt und in der modellprädiktiven Regelung zur Berechnung einer energieeffizienten Fahrzeuglängsführung verwendet. Diese beruht auf der algorithmischen Minimierung einer Kostenfunktion. Bei Messfahrten mit einem Hybridfahrzeug auf einer Versuchsstrecke im öffentlichen Straßenverkehr im Raum Aachen wurde eine manuelle Fahrt mit einer Fahrt im ACC-Betrieb verglichen. Es konnte insgesamt eine Kraftstoffeinsparung von 6,3 % erreicht werden. [55]

Ein ebenfalls am IKA der RWTH Aachen entwickeltes System verwendet zur Realisierung einer energieeffizienten Längsregelung Informationen aus einer V2I-Kommunikation (Vehicle-to-Infrastructure). Grundlage für das System bildet eine digitale Karte, die statische Streckenmerkmale enthält. Diese Informationen werden

durch die Informationen aus der V2I-Kommunikation ergänzt. Das System kann damit auch Signalanlagen in die Berechnung energieeffizienter Geschwindigkeitstrajektorien einbeziehen. Mithilfe einer Verkehrsflusssimulation wird ein durchschnittliches Fahrerverhalten für die jeweils aktuelle Situation geschätzt. Die auf diesem Wege prädiizierte Normalfahrweise wird bei der energetischen Optimierung der Geschwindigkeitstrajektorien, zusätzlich zu den Randbedingungen aus der digitalen Karte, der Umfeldsensorik und der V2I-Kommunikation, berücksichtigt. Das Ziel der Einbeziehung einer prädiizierten Normalfahrweise ist die Realisierung von Geschwindigkeitstrajektorien, die nur geringfügig von der durchschnittlichen Fahrweise abweichen, um so eine hohe Akzeptanz der Fahrer für die energieeffiziente Längsführung zu erreichen. Die Informationen der V2I-Kommunikation umfassen die Signalzustände von Ampeln, deren Umschaltzeit sowie die Länge einer eventuellen Warteschlange vor der Ampel. Das System ist prototypisch in einem konventionell angetriebenen Fahrzeug implementiert. Für die Umsetzung der automatisierten Längsführung werden die vorhandenen ACC-Schnittstellen verwendet. Bei realen Versuchsfahrten auf einer Teststrecke im Stadtverkehr wurde ein Kraftstoffeinsparpotenzial von 6 % für die Anfahrt an eine Lichtsignalanlage erreicht. Wird dabei der Stillstand des Fahrzeugs vermieden, kann der Kraftstoffverbrauch für die betrachtete Verkehrssituation um bis zu 15 % reduziert werden. Ein entsprechender Nachweis durch eine Probandenstudie ist in Planung. [56]

In [57] wird das Kraftstoffeinsparpotenzial eines erweiterten ACC-Systems untersucht, das bei der Volkswagen-Konzernforschung in einem konventionell angetriebenen Fahrzeug implementiert ist. Neben einem Radarsensor zur Umfelderkennung werden Daten einer digitalen Straßenkarte verwendet, um einen Vorausschauhorizont zu generieren. Das System kann die Geschwindigkeit des Fahrzeugs automatisch an Gegebenheiten der Strecken, beispielsweise Tempolimits oder Kurven, anpassen. Der Fahrer wird über ein Display über das jeweils relevante Streckeneignis informiert. Im Fokus der Betrachtungen stehen dabei vorausschauende Verzögerungsmanöver als Maßnahme zur Kraftstoffeinsparung. Die Reduzierung des Verbrauchs beruht auf der Verringerung von Bremsvorgängen. Der manöverbasierte Vergleich von Schubbetrieb, Freilaufbetrieb und Konstantfahrt mit anschließender Verzögerung mit dem Reibbremsen weist eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs für das Verzögerungsmanöver von 86 % aus. Die Länge des untersuchten Manövers ist auf die Länge des Verzögerungsmanövers bei Freilaufbetrieb bezogen. Das System besteht aus einem Modul zur Manöverplanung, das den Geschwindigkeitsverlauf aufgrund der Daten aus dem elektronischen Horizont berechnet und einem Ausrollregler, der die berechnete Trajektorie umsetzt. Auf einer Teststrecke auf öffentlichen Straßen wurden Referenzfahrten

durchgeführt, bei denen die Verzögerungsmanöver mit einer konstanten Verzögerung von 1 m/s^2 durchgeführt wurden. Im Vergleich zu den Referenzfahrten wurde mit dem Green-Driving-System ein um 13 % geringerer Kraftstoffverbrauch erzielt, bei gleichzeitigem Anstieg der Fahrtdauer um 3 %. [57]

2.4 Vergleichsbasis für die Messungen

Das FKFS verfügt über eine Flotte an Elektrofahrzeugen, die unter anderem für repräsentative Untersuchungen in Probandenstudien eingesetzt wird. Das Fahrzeug, das in dieser Arbeit als Basis für das Demonstratorfahrzeug verwendet wird, ist Teil dieser Flotte und in Kapitel 2.5.6 beschrieben. Die Ergebnisse, die bei der im Folgenden beschriebenen repräsentativen Probandenstudie entstanden sind, dienen als Vergleichsbasis für die Resultate, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erzielt werden. Das Studienlayout der Probandenstudie wurde aus einer vorangegangenen Studie mit der Elektrofahrzeugflotte übernommen, deren Layout in [22] dargestellt ist.

Um reale, kundenrelevante Randbedingungen während der Messfahrten zu gewährleisten, wurden die Messfahrten auf öffentlichen Straßen und auf einem nach repräsentativen Kriterien zusammengestellten Rundkurs durchgeführt. Dieser spiegelt die statistische Verteilung der Kilometerleistung in Deutschland wider [22]. Abbildung 2 zeigt die prozentuale Verteilung der einzelnen Streckentypen und den Streckenverlauf des 60 km langen Rundkurses im Raum Stuttgart.

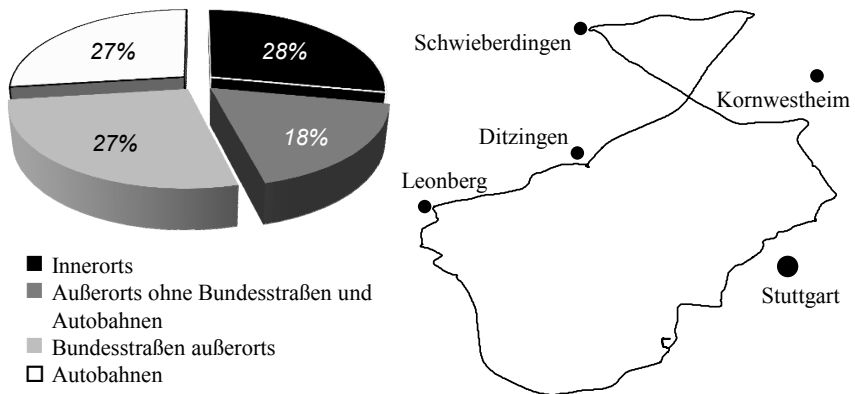


Abbildung 2: Rundkurs mit repräsentativen Straßentypanteilen nach [22]

Das Fahrerkollektiv für die Messfahrten der Probandenstudie wurde nach statistischen Kriterien zusammengestellt. Die Stichprobengröße wurde in Abhängigkeit der erwarteten Standardabweichung, der Stichprobengröße einer vergleichbaren Studie und des gewünschten Signifikanzniveaus auf 42 Fahrer pro Fahrzeug festgelegt. Die Zusammensetzung des Probandenkollektivs entspricht der statistischen Verteilung der Bevölkerung Deutschlands hinsichtlich der Kriterien Alter, Geschlecht und jährlicher Fahrleistung. [22]

Die bei der Studie eingesetzten Fahrzeuge wurden vor jeder Fahrt in einen definierten Ausgangszustand gebracht. Sie wurden vor den Messfahrten in einer Halle thermisch vorkonditioniert. Die Temperaturen der Antriebsstrangkomponenten und des Innenraums waren daher bei Beginn jeder Messfahrt innerhalb eines geringen Toleranzbereichs. Des Weiteren wurde das Gesamtgewicht, das durch die verschiedenen Probanden und Begleitpersonen schwankt, durch Ballast an ein definiertes Gesamtgewicht angeglichen. Um Einflüsse des Reifendrucks auf den Rollwiderstand zu vermeiden, wurde dieser an definierte Ausgangszustände angepasst. Definierte Zustände galten zudem für Fenster, Verdeck, Abblendlicht und Radio.

2.5 Eingesetzte Werkzeuge und Komponenten

In der vorliegenden Arbeit werden zur Realisierung des Fahrerassistenzsystems zahlreiche Werkzeuge und Komponenten eingesetzt. In den folgenden Unterkapiteln werden die wesentlichen Grundlagen dieser Werkzeuge und Komponenten beschrieben, die für das Verständnis der Arbeit relevant sind.

2.5.1 Rapid Control Prototyping

Rapid Control Prototyping ist eine rechnergestützte Entwicklungsmethode im Bereich der Regelungs- und Steuerungstechnik. Diese unterstützt einen ganzheitlichen Entwurf interdisziplinärer, mechatronischer Systeme. Mit der Interdisziplinarität der Systeme nimmt auch deren Komplexität zu, sodass die Entwicklung komplexer Funktionen oder Systeme geeignete Methoden und Werkzeuge erfordert. Ein Vorteil des Rapid Control Prototyping ist die Verknüpfung von Modellierung, Simulation und Realität. Die charakteristische Vorgehensweise umfasst die Beschreibung der zu implementierenden Funktion, deren Modellierung einschließlich des Entwurfs von Steuerungs- und

Regelungskomponenten sowie die Erprobung der Funktion auf verschiedenen Plattformen⁶. [58]

MATLAB und die dazugehörige Simulationskomponente Simulink sind in Forschung und Entwicklung an Hochschulen und in der Industrie etablierte Werkzeuge zur Modellierung und Simulation dynamischer Systeme [59]. In Verbindung mit entsprechenden Toolboxen zur Codegenerierung und einem echtzeitfähigen Rapid-Prototyping-Steuergerät steht eine durchgängige Rapid-Prototyping-Toolkette für die Entwicklung und Erprobung von Funktionen zur Verfügung. MATLAB/Simulink ist das zentrale Werkzeug bei der prototypischen Umsetzung des Fahrerassistenzsystems, welches Gegenstand dieser Arbeit ist.

2.5.2 ADAS Framework

Während der prototypischen Entwicklung und Erforschung von Fahrerassistenzfunktionen mit Rapid Control Prototyping werden oftmals verschiedene Plattformen verwendet. Nach der Implementierung der Funktionalitäten in einer Simulationsumgebung werden die prototypischen Fahrerassistenzfunktionen zu Erprobungs- und Validierungszwecken in Fahrsimulatoren und Prototypenfahrzeugen eingesetzt. Um die Kompatibilität der Fahrerassistenzfunktion mit den verschiedenen Plattformen zu gewährleisten und den Portierungsaufwand zu minimieren, wird am FKFS ein einheitliches Framework für Fahrerassistenzsysteme (Advanced Driver Assistance Systems, kurz: ADAS) eingesetzt.

Das ADAS Framework stellt ein Grundgerüst für die Programmierung von Fahrerassistenzfunktionen in MATLAB/Simulink dar. Darin sind eine Vielzahl von Variablen und Schnittstellen definiert, die für die Realisierung von Fahrerassistenzsystemen benötigt werden. Mit definierten Schnittstellen und standardisierten Variablen kann die Verwendung der Funktionssoftware auf verschiedenen Plattformen mit geringem Aufwand realisiert werden. [60]

Das Framework ist modular aufgebaut, sodass die Kompatibilität der Funktionssoftware zu verschiedenen Plattformen und verschiedenen Prototypenfahrzeugen durch Wahl geeigneter Module sichergestellt wird. Das Grundgerüst für eine Funktionssoftware besteht aus drei Modulen:

⁶ Der Begriff „Plattform“ ist im Kontext der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) zu verstehen und umfasst hier eine komplette Systemumgebung bestehend aus entsprechender Hardware und Software, beispielsweise ein PC mit entsprechendem Simulationstool oder ein Steuergerät.

- Das „IO Module“ enthält spezifische Informationen der verwendeten Hardwareplattform, insbesondere über verfügbare analoge und digitale Ein- und Ausgänge.
- Das Modul „Signal Routing“ enthält die fahrzeug- und plattformspezifische Zuordnung der Hardwareschnittstellen zu Signalen und Signalbussen entsprechend den Busdefinitionen.
- Im fahrzeugspezifischen „Function Module“ ist die Fahrerassistenzfunktion eingebettet. Die Signale, die in einem Prototypenfahrzeug verfügbar sind, sind über Busdefinitionen zu inhaltlich geordneten Schnittstellen gruppiert.

In Abbildung 3 sind die definierten Schnittstellen zur Fahrerassistenzfunktion abgebildet, wie sie im verwendeten Prototypenfahrzeug verfügbar sind.

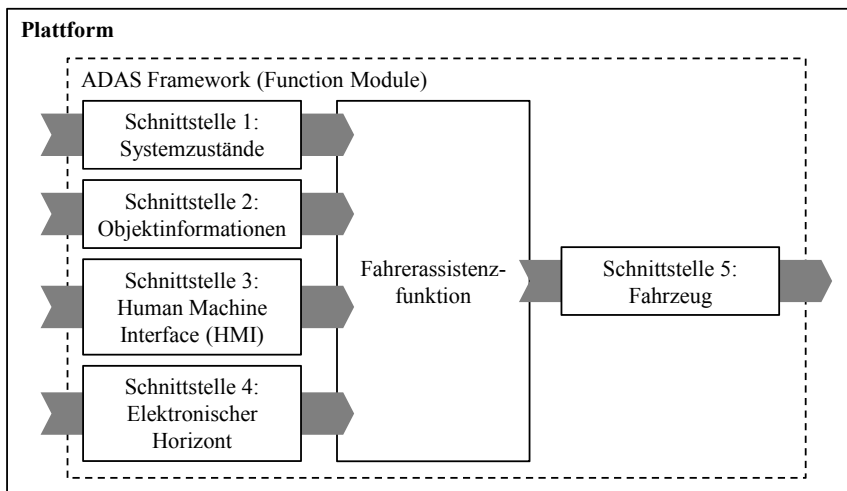


Abbildung 3: Schnittstellen des ADAS Framework zur Fahrerassistenzfunktion

2.5.3 Dynamische Programmierung nach Bellman

Die dynamische Programmierung nach Bellman ist ein bekanntes Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen. Es beruht auf dem von Richard Bellman formulierten Optimalitätsprinzip. Es besagt, dass eine optimale Lösung aus einer Sequenz optimaler Entscheidungen besteht und die für die Gesamtlösung verbleibenden Entscheidungen, unabhängig vom betrachteten Zwischenzustand und den vorangegangenen Entscheidungen, wieder eine optimale Lösung in Bezug auf den betrachteten

Zwischenzustand und den Endzustand bilden. Grundsätzlich werden dabei alle möglichen Lösungen eines Problems als Sequenz von möglichen Entscheidungen angesehen. In dieser Arbeit werden ausschließlich deterministische Optimierungsprobleme betrachtet. Das bedeutet, dass die Optimierung für konkrete Fahrmanöver angewendet wird, deren Ergebnis durch einen Ausgangszustand und die Entscheidungen eindeutig definiert ist. Bei der Betrachtung stochastischer Prozesse sind lediglich Verteilungen möglicher Ergebnisse durch die Entscheidungen definiert. [61]

Aufgrund des Optimalitätsprinzips lassen sich die möglichen Lösungen in einzelne Teillösungen unterteilen. Dies ermöglicht eine Diskretisierung des Optimierungsproblems. Um die optimale Lösung für ein Problem zu finden, muss die optimale Teillösung in jedem Diskretisierungsschritt gefunden werden. Bei einer zweidimensionalen Diskretisierung mit den Dimensionen $n \times i$ gilt für die optimale Lösung $\hat{L}_x(z)$ eines deterministischen Optimierungsproblems nach x Optimierungsschritten gemäß [61] folgende Beziehung:

$$\hat{L}_x(z) = \min_y \left(\hat{L}_{x-1} \left(E_y(z) \right) \right), \quad 2 \leq x \leq n, \quad 1 \leq y \leq i \quad (2.1)$$

Darin ist z der Systemzustandsvektor des Ausgangszustands und E_y die Übergangsfunktion zwischen zwei Systemzuständen.

2.5.4 Abstandssensor

Für die Fahrzeuglängsführung ist es grundlegend, den Abstand und die Geschwindigkeit vorausfahrender Fahrzeuge zu erkennen. Ein System zur Automatisierung der Längsführung benötigt daher einen Abstandssensor mit entsprechenden Eigenschaften. In Europa werden dafür häufig Sensoren eingesetzt, die auf dem physikalischen Prinzip des Radar (Radio Detecting and Ranging) basieren [62].

Über eine Antenne werden elektromagnetische Wellen ausgesendet, die an vorausfahrenden Fahrzeugen und anderen Objekten aus elektrisch leitfähigen Materialien reflektiert werden. Der für die prototypische Realisierung des Fahrerassistenzsystems verwendete Radarsensor arbeitet mit Frequenzen von 76 bis 77 GHz. Der Abstand zu Objekten wird mit einer indirekten Laufzeitmessung über den Frequenzvergleich von Sendesignal und Empfangsecho realisiert. Voraussetzung dafür ist eine zeitliche Änderung der Sendefrequenz. Dieses Verfahren ist unter der Bezeichnung FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) bekannt. Durch den Doppler-Effekt erfährt das Echosignal eine Frequenzverschiebung gegenüber dem ausgesendeten Signal. Die

Differenzfrequenz des Echsignals setzt sich somit aus der Differenz durch die Signallaufzeit und der Frequenzverschiebung durch die relative Geschwindigkeit des Fahrzeugs zum reflektierenden Objekt zusammen. Zur eindeutigen Interpretation der Differenzfrequenz sind daher zwei Frequenzrampen mit unterschiedlichen Steigungen erforderlich. [63]

Über eine Auswertungselektronik werden die reflektierten Signale ausgewertet und zu Objekten zusammengefasst [63]. Zur Auswahl des Objekts, das in der jeweiligen Situation für die Längsführung des Fahrzeugs relevant ist, benötigt der Radarsensor Eingangsinformationen zur Kursprädiktion [63]. Diese werden dem Sensor über eine CAN-Schnittstelle (Controller Area Network) zur Verfügung gestellt. Ebenfalls über CAN werden die Objektinformationen ausgegeben, auf Basis derer die Längsführung bei vorausfahrenden Fahrzeugen angepasst wird.

2.5.5 Elektronischer Horizont

Unter einem elektronischen Horizont wird im Kontext automobiltechnischer Anwendungen, im Gegensatz zu dem aus der Luftfahrt bekannten Begriff, eine Erweiterung eines Navigationssystems verstanden. Basierend auf einer digitalen Karte können Fahrerassistenzsystemen Informationen zur Verfügung gestellt werden, die für die aktuelle Fahrzeugposition und einen Vorausschauhorizont mit vorab definierter Länge relevant sind. Die statischen Informationen aus digitalen Karten können durch dynamische Informationen von Umfeldsensoren oder aus einer V2X-Kommunikation (Vehicle-to-X) ergänzt werden. Die Zahl der Anwendungen und Anwendungsgebiete, die sich auf Daten aus einem elektronischen Horizont stützen, ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. Heutige Fahrerassistenzsysteme verwenden Streckeninformationen zur Verbesserung von Komfort und Sicherheit sowie zur Effizienzsteigerung, beispielsweise bei Schaltempfehlungen, zur Anzeige gültiger Geschwindigkeitsbegrenzungen oder der Steuerung von Nebenaggregaten. [64,65]

Für Forschungs- und Entwicklungsanwendungen existieren geeignete, windowsbasierte Softwareplattformen, die einen elektronischen Horizont generieren. Diese bieten für prototypische Anwendungen viele Freiheitsgrade und können einen elektronischen Horizont mit gewünschter Länge und ausgewählten Attributen über die vorausliegende Strecke zur Verfügung stellen [66]. In der vorliegenden Arbeit wird für die prototypische Implementierung des Fahrerassistenzsystems eine derartige Softwareplattform eingesetzt, um den elektronischen Horizont zu generieren.

2.5.6 Basisfahrzeug

Zu Demonstrationszwecken und als Teil des Quantifizierungskonzepts, das in Kapitel 3.7 beschrieben ist, wurde ein Elektrofahrzeug prototypisch mit dem erarbeiteten Fahrerassistenzsystem ausgerüstet. Die Basis für die Umbauten bildet ein batterieelektrisches Fahrzeug vom Typ Roadster des Herstellers Tesla Motors. Die Eckdaten dieses Fahrzeugs sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Spezifikationen des Tesla Roadster [67,68]

Motortyp	Asynchronmotor
Maximale Leistung	225 kW (302 PS) bei 5.000 - 6.000 min ⁻¹
Maximales Drehmoment	370 Nm bei 0 - 5.400 min ⁻¹
Batterietyp	Lithium-Ionen-Akkumulator
Nennspannung der Batterie	375 V
Energieinhalt der Batterie	56 kWh
Leergewicht des Fahrzeugs	1335 kg

Abbildung 4 zeigt das für die Umbaumaßnahmen verwendete Basisfahrzeug.



Abbildung 4: Basisfahrzeug für die Umbauten

2.5.7 Messtechnik

Für Quantifizierungskonzepte, die auf empirischen Untersuchungen mit realen Versuchsträgern beruhen, ist eine messtechnische Ausrüstung der Versuchsträger, die die Messung und Erfassung relevanter Größen ermöglicht, grundlegend. Das Konzept zur Quantifizierung des Effekts des Fahrerassistenzsystems auf die Reichweite eines Elektrofahrzeugs, das dieser Arbeit zugrundeliegt und in Kapitel 3.7 beschrieben wird, stützt sich auf die Ergebnisse, die mit einem realen Versuchsträger erzielt wurden. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf Größen, die von energetischer Relevanz sind.

Das Demonstratorfahrzeug, das in Kapitel 3.6 vorgestellt wird, ist dazu mit Energiemesstechnik ausgerüstet, die aus Messumformern zur Messung elektrischer Ströme und Spannungen, Messkarten zur Signalwandlung sowie einem System zur Aufzeichnung der Messdaten besteht. Die Bordnetzarchitektur des Fahrzeugs legt dabei die Messstellen fest, die zur Messung energetisch relevanter Größen erforderlich sind. Besondere Bedeutung kommt den Messstellen zu, die zur Bestimmung der Traktionsenergie und des Energiebedarfs der Nebenverbraucher benötigt werden, da diese als zentrale Quantifizierungsgröße und zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs bei den Vergleichsfahrten verwendet werden.

2.5.8 Statistische Methoden

Der Nachweis der Gültigkeit einer behaupteten Ursache-Wirkungs-Relation oder deren Widerlegung erfordert wissenschaftliche und stichhaltige Belege. Zur Erzeugung dieser Belege eignen sich experimentelle Untersuchungen, die nach statistischen Kriterien durchgeführt werden. Im Vorfeld der Untersuchungen ist daher eine detaillierte Untersuchungsplanung notwendig. Es wird eine Forschungshypothese formuliert, die den Zusammenhang, den Unterschied oder eine Veränderung allgemein ausdrückt. Daraus wird eine operationale Hypothese abgeleitet, die ein konkretes Untersuchungsergebnis voraussagt. Zur statistischen Überprüfung der Hypothesen werden Signifikanztests eingesetzt, für deren Durchführung aus der operationalen Hypothese ein statistisches Hypothesenpaar erstellt wird. Dieses besteht aus einer Alternativhypothese H_1 , die den postulierten Zusammenhang, Unterschied oder die Veränderung widerspiegelt, und einer komplementären Nullhypothese H_0 , die der Alternativhypothese genau widerspricht. Ergebnis eines Signifikanztests ist die Irrtumswahrscheinlichkeit, die aussagt, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass dieses Ergebnis bei Gültigkeit der Nullhypo-

these zustande kommt und die Nullhypothese irrtümlich zugunsten der Alternativhypothese verworfen wird. Der Grenzwert der dabei noch zulässigen Irrtumswahrscheinlichkeit wird durch das Signifikanzniveau α ausgedrückt. Dieses ist per Konvention auf die Werte $\alpha = 0,01$ oder $\alpha = 0,05$ festgelegt. Die Auswahl eines geeigneten Signifikanztests erfolgt in Abhängigkeit der formulierten Hypothesen. Ausschlaggebend ist dabei beispielsweise die Art des durch die Hypothesen beschriebenen Effekts sowie die Anzahl der untersuchten Stichproben oder die Anzahl abhängiger und unabhängiger Variablen. Im Kontext dieser Arbeit ist als Signifikanztest der t-Test für unabhängige Stichproben von Bedeutung. Dieser ist auf die Untersuchung eines Unterschieds empirisch ermittelter Mittelwerte zweier Stichproben ausgerichtet, die unabhängig voneinander erzeugt wurden. [69]

Das Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, statistisch abgesicherte Ergebnisse mit möglichst geringem Aufwand zu erzielen. Dazu ist die Wahl einer optimalen Stichprobengröße erforderlich, die der notwendigen Mindestgröße entspricht, die zur statistischen Absicherung des untersuchten Effekts mit einer gewünschten Wahrscheinlichkeit benötigt wird. Die gewünschte Wahrscheinlichkeit lässt sich über die Randbedingungen festlegen, die den Untersuchungsplanungen zugrundeliegen. Eine ausschlaggebende Größe in diesem Zusammenhang ist die Teststärke, die die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der der Signifikanztest zu einem signifikanten Ergebnis führt, wenn die Alternativhypothese gültig ist. Neben der Wahl des Signifikanzniveaus und der Teststärke ist zur Bestimmung der optimalen Stichprobengröße zusätzlich die Größe des erwarteten Effekts zu ermitteln sowie die zu prüfende Nullhypothese festzulegen. Die Effektgrößenschätzung $\hat{\delta}$ wird nach [69] für t-Tests für unabhängige Stichproben wie folgt berechnet:

$$\hat{\delta} = \frac{\hat{\mu}_A - \hat{\mu}_B}{\hat{\sigma}} \quad (2.2)$$

Darin sind $\hat{\mu}_A$ und $\hat{\mu}_B$ die Mittelwerte der Stichproben als Schätzwerte für die Mittelwerte der entsprechenden Populationen und $\hat{\sigma}$ die Standardabweichung der Stichproben als Schätzwert für die Standardabweichung der Populationen. Unterscheiden sich die erwarteten Standardabweichungen der Populationen, so wird im Falle homogener Varianzen der Populationen eine zusammengesetzte Standardabweichung zur Berechnung der Effektgröße δ herangezogen. Bei heterogenen Varianzen mit $\sigma_A^2/\sigma_B^2 > 4$ wird die Standardabweichung der Vergleichspopulation verwendet. Als angemessene Teststärke für experimentelle Untersuchungen hat sich der Wert $(1 - \beta) = 0,8$ etabliert. Basierend darauf kann die optimale Stichprobengröße in Abhängigkeit der ermit-

telten Effektgröße $\hat{\delta}$ und dem gewählten Signifikanzniveau α den entsprechenden Tabellen in [69] entnommen werden. [69]

Im Nachgang der experimentellen Untersuchung erfolgt die statistische Auswertung. Ein zentrales Ergebnis des Signifikanztests ist die Wahrscheinlichkeit, mit der dieses Ergebnis bei Gültigkeit der Nullhypothese auftritt. Dazu wird aus den erzielten Ergebnissen ein standardisiertes Maß der erzielten Mittelwertdifferenz berechnet. Der t-Wert ist der standardisierte Stichprobenkennwert und wird nach [70] für die Nullhypothese wie folgt berechnet:

$$t = \frac{\hat{\mu}_A - \hat{\mu}_B}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}_A^2}{n_A} + \frac{\hat{\sigma}_B^2}{n_B}}} \quad (2.3)$$

Darin sind $\hat{\sigma}_A^2$ und $\hat{\sigma}_B^2$ die Varianzen der jeweiligen Stichprobe als Schätzwerte für die Varianzen der Populationen und n_A und n_B die Größe der jeweiligen Stichprobe. Aus dem t-Wert kann mithilfe der freiheitsgradabhängigen t-Verteilung die Auftretenswahrscheinlichkeit des empirisch gefunden Ergebnisses bestimmt werden. Während die Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit bei Varianzhomogenität der Populationen aus der t-Verteilung exakt bestimmt werden kann, wird bei heterogenen Varianzen eine Näherungslösung mit einer t-Verteilung mit angepassten Freiheitsgraden verwendet [70,71]. Die Freiheitsgrade df der Verteilung werden im Falle heterogener Varianzen nach [71] wie folgt berechnet:

$$df = \frac{\left(\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B}\right)^2}{\frac{1}{(n_A-1)} \cdot \left(\frac{\sigma_A^2}{n_A}\right)^2 + \frac{1}{(n_B-1)} \cdot \left(\frac{\sigma_B^2}{n_B}\right)^2} \quad (2.4)$$

Darin sind σ_A^2 und σ_B^2 die Varianzen der jeweiligen Stichprobe. Aus der t-Verteilung für die angepassten Freiheitsgrade kann die Auftretenswahrscheinlichkeit des empirisch gefundenen t-Werts bei Gültigkeit der Nullhypothese approximiert werden. [70]

Die Nullhypothese nimmt einen Effekt an, der exakt Null ist. In der Realität tritt dieser Fall jedoch selten auf, weshalb die Prüfung von Minimum-Effekt-Nullhypothesen sinnvoll ist. Diese gehen anstelle eines Effektes, der exakt Null ist, von einem zu vernachlässigenden Effekt aus. Es wird angenommen, dass Varianzaufklärungen von höchstens 1 % zu vernachlässigen sind. Die Minimum-Effekt-Nullhypothese, bei der die Varianzaufklärung nicht größer als 1 % sein darf, wird mit H_{01} abgekürzt. Zur Prüfung der Minimum-Effekt-Nullhypothese H_{01} wird der t-Wert aus dem t-Test in ein

F-Äquivalent transformiert, dessen Signifikanzprüfung anhand von in Tabellen enthaltenen kritischen F-Werten F_{krit} erfolgen kann. Die F-Verteilungen sind durch Zähler- und Nennerfreiheitsgrade bestimmt. Die Transformation der Teststatistik aus dem t-Test in ein F-Äquivalent erfolgt nach [69] gemäß folgender Gleichung:

$$F = t^2 \tag{2.5}$$

Der Zählerfreiheitsgrad beträgt im Falle des t-Tests $df_z = 1$, der Nennerfreiheitsgrad $df_N = (n_A + n_B) - 2$. Wenn die Minimum-Effekt-Nullhypothese H_{01} aufgrund von $F > F_{krit}$ abgelehnt werden kann, ist der untersuchte Effekt nicht zu vernachlässigen. [69]

Ein Fahrerassistenzsystem zur Vergrößerung der
Reichweite von Elektrofahrzeugen

Becker, G.

2016, XXIII, 108 S. 39 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-14139-4