

2 Stand der Technik

Die Erprobung neuer Fahrzeuge und deren Komponenten wird bereits seit einiger Zeit von der Straße weg in Richtung Prüflabore verlagert. Dabei ist zu beobachten, dass der Anteil der Erprobung durch Simulationen stetig steigt. Dies ist vor allem durch die zunehmenden Möglichkeiten in der Simulationstechnik begründet, welche sich aus dem anhaltend rasanten technischen Fortschritt auf dem Gebiet der digitalen Datenverarbeitung und dem sprichwörtlichen Preisverfall bei den Chipsätzen bieten. Neben den sinkenden Kosten ist die Steigerung der Leistungsfähigkeit integrierter Schaltungen ausschlaggebend, welche im 1965 erstmals von Gordon Moore formulierten und bis heute gültigen mooreschen Gesetz (engl. Moore's law) quantifiziert wird [48]. Die ursprüngliche Formulierung besagt, dass sich die Anzahl der Schaltkreiskomponenten pro Chipfläche jährlich verdoppelt. Später stellte sich heraus, dass der tatsächliche Zeitraum der Verdopplung bei ein bis zwei Jahren liegt.

Während bei der Erfindung des Automobils und in der Zeit danach noch sämtliche Erprobungen auf der Straße stattfanden, sinkt deren Anteil seitdem kontinuierlich. Zum Ende der 1980er Jahre lag der Anteil der Straßenerprobung bei 47,2 % gegenüber 52,8 % bei der Laborerprobung [50]. Aktuelle Zahlen sind nicht bekannt, doch dürfte der Anteil der Straßenversuche seitdem noch deutlich weiter gesunken sein. Die wesentlichen Hauptziele der Laborerprobung sind die Verkürzung der Entwicklungszeiten und die Verringerung der Entwicklungskosten durch möglichst weitgehenden Verzicht auf kostenintensive reale Versuchsträger. Gleichzeitig kann dadurch die Entwicklungsdauer einer neuen Fahrzeuggeneration drastisch reduziert werden.

Die Erprobung einzelner Fahrzeugkomponenten in der Simulation oder auf Prüfständen ermöglicht deren parallele Entwicklung, ohne dass dafür ein komplett funktionstüchtiger Fahrzeugprototyp benötigt wird. Die Tendenz geht dahin, dass in Zukunft immer größere Anteile des Entwicklungsprozesses simulativ durchgeführt werden und Erprobungen mit realen Versuchsträgern immer mehr nur der Validierung von Simulationsergebnissen dienen werden. Dadurch reduziert sich der Bedarf an Fahrzeugprototypen während des Entwicklungsprozesses. Eine vollständige

Ersetzung von Prototypen durch Simulationsmodelle und Prüfstandsversuche ist jedoch nicht absehbar.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist es so, dass es im durch Fahrer, Fahrzeug und Umwelt gebildeten Regelkreis noch einige Komponenten gibt, welche weder im Entwicklungsprozess, noch bezogen auf den realen Straßenverkehr mit hinreichender Genauigkeit simuliert werden können. Um die Verwendung simulierter und real vorhandener Fahrzeugkomponenten möglichst flexibel handhaben zu können, werden die Simulationsmodelle in der Regel modular aufgebaut. Dazu gehört eine strikte Trennung von mechanischen Komponenten und Steuergerätefunktionen bei der Modellerstellung. Dabei ist eine systemorientierte Sichtweise anzuwenden, welche sich an den Systemschnittstellen des realen Fahrzeugs orientiert. In [63] wird diese Vorgehensweise am Beispiel eines Nutzfahrzeugantriebs erläutert.

Bei der Verwendung realer Komponenten, wie beispielsweise auf Prüfständen, müssen die Simulationsmodelle Echtzeitanforderungen erfüllen. Daraus ergeben sich Grenzen beim realisierbaren Detaillierungsgrad [43]. Gleiches gilt für den Einsatz in Fahrsimulatoren, wo mindestens der Fahrer, gegebenenfalls zusammen mit einzelnen Fahrzeugkomponenten, als nicht simuliertes Element im Regelkreis vorhanden ist.

In den folgenden Abschnitten werden die für diese Arbeit relevantesten Entwicklungswerkzeuge Fahrsimulatoren und Antriebsstrangprüfstände, sowie die Messfahrzeugflotte zur Gewinnung von Daten zur Modellerstellung näher betrachtet.

2.1 Fahrsimulatoren

Mit dem Begriff Fahrsimulator wird in dieser Arbeit ein System bezeichnet, in dem ein realer Fahrer ein Fahrzeug in einer virtuellen Simulationsumgebung bewegt. Der Umfang der simulierten oder real vorhandenen Komponenten und der Grad der Detaillierung der Simulation variiert zwischen den einzelnen Anwendungsfällen.

2.1.1 Anwendungsgebiete

In der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen bieten Fahrsimulatoren eine gute Möglichkeit, diese lange vor der Markteinführung im kundenrelevanten Fahrbetrieb zu erproben. Im Vordergrund stehen, neben den technischen Aspekten, besonders Untersuchungen zur Akzeptanz bei den Fahrern und zum Nutzen der Systeme im kundenrelevanten Fahrbetrieb. Auf diese Weise kann frühzeitig ermittelt werden, ob Normalfahrer mit neuartigen Systemen gut zurechtkommen oder ob sie damit überfordert sind. Bisherige Versuche, auch den Fahrer zu simulieren, scheiterten an der Komplexität und der fehlenden Vorhersehbarkeit menschlichen Verhaltens. Insbesondere die Abbildung der kognitiven, emotionalen und motivationalen Einflüsse kann nur schwer umgesetzt werden [41]. Zwar existieren Modelle zur Darstellung der psychologischen Zusammenhänge, jedoch liegen diese in der Regel nicht in für Ingenieure verwendbarer Form als mathematische Zusammenhänge oder ausführbare Algorithmen vor [36]. Hinzu kommt, dass sich verschiedene Menschen in gleichen (Verkehrs-) Situationen höchst unterschiedlich verhalten. Benötigt und eingesetzt werden Fahrermodelle jedoch zur Simulation des Fremdverkehrs in Fahrsimulatoren [31]. Hierbei ist es für eine erfolgreiche Anwendung bereits ausreichend, wenn das Verhalten des Umgebungsverkehrs dem Probanden im Simulator realistisch erscheint.

In [22] wird die Methodik zur Untersuchung beispielhaft an der Entwicklung von sicherheitsrelevanten Fahrerassistenzsystemen im ehemaligen Fahrsimulator der DaimlerChrysler Forschung in Berlin beschrieben. In ähnlicher Weise kann das Vorgehen auch auf andere Fragestellungen, wie beispielsweise die Entwicklung von Assistenzsystemen zur Kraftstoffverbrauchsreduktion, angewandt werden.

In Fahrsimulatoren können die unterschiedlichen Fahrertypen durch ein repräsentatives Probandenprofil, mit einer ausreichend großen Anzahl an unterschiedlichen Probanden, abgedeckt werden. Bei der Auswahl der Probanden werden je nach dem Ziel der Studie unterschiedliche Faktoren berücksichtigt. Die wichtigsten unter diesen sind Alter, Geschlecht, Fahrerfahrung, jährliche Fahrleistung und der Fahrstil, d. h. ob es sich beispielsweise um einen sportlichen oder eher ruhigen Fahrer handelt. Neben diesen mittel- bis langfristigen Faktoren spielen auch kurzfristige Stimmungsschwankungen eine Rolle. Ein gestresster Fahrer verhält sich anders als ein entspannter, ein gut gelaunter anders als ein schlecht gelaunter, ein erschöpfter anders als ein ausgeruhter.

Weiterhin bieten Fahrsimulatoren den Vorteil reproduzierbarer Umgebungsbedingungen, so dass Einflüsse von Störgrößen wie beispielsweise Witterung und Verkehr

eliminiert werden. Die fahrerspezifischen Einflussfaktoren können dadurch wesentlich besser identifiziert werden, als dies im realen Straßenverkehr möglich ist. Außerdem können im Fahrsimulator auch kritische Fahrsituationen ohne Gefährdung von Menschen und Material dargestellt werden.

2.1.2 Bestandteile der Simulationsumgebung

Die im Simulator ermittelten Versuchsergebnisse sind dabei im Allgemeinen umso repräsentativer, je realistischer die Umwelt für den Probanden im Simulator dargestellt wird. Dies umfasst die Nachbildung sämtlicher im Verkehr auf den Fahrer wirkenden Sinneswahrnehmungen, insbesondere hörbarer, sehbarer und fühlbarer Art. Die akustisch wahrnehmbaren Geräusche des Ego-Fahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer können durch mehrkanalige Audiosysteme recht gut nachgebildet werden.

In [51] werden die Grenzen bei der Nachbildung der Umwelt des Fahrers aufgezeigt. Insbesondere im Bereich der Optik gibt es Einschränkungen, die nach heutigem Stand der Technik noch nicht vollständig behoben werden können. Sitzen die Probanden im Simulator in einem realen Fahrzeug, so können die Bedienelemente haptisch so wahrgenommen werden, wie das bei einer Fahrt auf einer Straße der Fall ist. Dies bedeutet auch einen enormen Vorteil für die optische Wahrnehmung, da die wichtigsten sichtbaren Objekte, welche sich in unmittelbarer Nähe des Fahrers befinden, real vorhanden sind und nicht über das Visualisierungssystem dargestellt werden.

In [24] wird als weitere Wahrnehmungsquelle das Temperaturempfinden der Probanden aufgeführt, welches über eine Dom-Klimasimulation mit den entsprechenden Reizen bedient werden kann. Außerdem wird hier zwischen Fahrdynamiksimulation und Komfortsimulation unterschieden. In beiden Fällen handelt es sich um die Nachbildung von Kräften und Beschleunigungen über ein Bewegungssystem. Dabei deckt die Fahrdynamiksimulation den niederfrequenten und die Komfortsimulation den höherfrequenten Bereich ab. Als erforderlicher Frequenzbereich für eine realitätsnahe Simulation von Komfortaspekten werden 0 bis 40 Hz genannt. Im Allgemeinen sind die Bewegungsamplituden der Fahrdynamiksimulation höher als die der Komfortsimulation. Ziel ist es, beide Simulationen miteinander zu verknüpfen.

Um einzelne Komponenten des Simulators leichter austauschen zu können sind, analog zu den Simulationsmodellen, auch Fahrsimulatoren in der Regel modular aufgebaut. Je nach Einsatzzweck werden bei der Zusammenstellung der Komponenten

unterschiedliche Schwerpunkte hinsichtlich der Komplexität, und damit einhergehend der Realitätsnähe, der einzelnen Bestandteile gesetzt. Es wird unterschieden, zwischen den Simulatorkomponenten Fahrzeugsimulation, Umfeldsimulation und Simulatorhardware. Die Fahrzeugsimulation lässt sich weiter unterteilen in die Subkomponenten Fahrdynamik, Antriebsstrang/Bordnetz und gegebenenfalls Assistenzsysteme. Die Umfeldsimulation beinhaltet eine Fremdverkehrssimulation, Streckenmodelle und grafische Datensätze. Die wichtigsten Bestandteile der Simulatorhardware sind ein Fahrzeug-Mockup, ein Projektionssystem, ein Soundsystem und das Bewegungssystem. [33, 52, 53]

2.1.3 Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem

Sogenannte statische Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem haben gegenüber solchen mit Bewegungssystem zwei gravierende Nachteile. Zum einen fehlt bei diesen die Wahrnehmung der während dem Beschleunigen und Verzögern des Fahrzeugs, sowie in Kurvenfahrten auftretenden Trägheitskräfte. Dies führt dazu, dass die gefahrene Geschwindigkeit in den Simulatoren meist falsch und in der Regel als deutlich zu niedrig eingeschätzt wird. Zum anderen stimmen die optischen und kinästhetisch wahrgenommenen Sinneseindrücke nicht miteinander überein, was bei vielen Probanden zur Simulatorkrankheit führt. Die Simulatorkrankheit ist ebenso wie die Seekrankheit eine Form der Bewegungskrankheit und führt bei bestimmten Personen häufig zu Übelkeit. [51]

In [32] wird beschrieben, wie das Auftreten der Simulatorkrankheit durch ein spezielles Training zur Gewöhnung an die Fahrt bestimmter Fahrmanöver im Fahrsimulator vermindert und in den meisten Fällen sogar ganz vermieden werden kann. Außerdem wird auf die Unterschiede zwischen Simulatorkrankheit und Bewegungskrankheit hinsichtlich Ursachen und Symptomen eingegangen. Simulatorkrankheit und Bewegungskrankheit tritt jedoch nicht ausschließlich in Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem auf. Stimmen die Bewegungen eines Bewegungssystems nicht mit den visuell wahrgenommenen Sinneseindrücken überein, so können die Symptome auch bei Simulatoren mit Bewegungssystem auftreten.

Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem werden bevorzugt bei Anwendungen eingesetzt, bei denen das Verhalten des Fahrers keinen gravierenden Einfluss auf die Ergebnisse hat. Wegen ihres einfachen Aufbaus haben sie daher eine gewisse Verbreitung im Einsatz als Schulungs- und Ausbildungswerkzeug, z. B. in Fahrschulen, erlangt.

2.1.4 Fahrsimulatoren mit Bewegungssystem

Fahrsimulatoren mit Bewegungssystem bieten die Möglichkeit, zumindest einen Teil der Bewegungen, welche ein Fahrzeug auf der Straße durchführt, nachzubilden. Der Gesamtbewegungsablauf eines Fahrzeugs setzt sich aus der Überlagerung der unterschiedlichen im Folgenden beschriebenen Bewegungsanteile zusammen. Die wichtigsten Ursachen, welche die Fahrzeugbewegung beeinflussen, resultieren aus dem Fahrzeugantrieb, der Lenkung, der Fahrbahnoberfläche und aus der Aerodynamik des Fahrzeugs.

Die aus dem Antrieb resultierenden Bewegungen setzen sich wiederum aus der Beschleunigung des Fahrzeugs in Längsrichtung und aus diversen Schwingungen und Vibrationen zusammen. Die Beschleunigung des Fahrzeugs ergibt sich aus dem Antriebsmoment und den auf das Fahrzeug wirkenden Fahrwiderständen [47]. Zusammen mit den Verzögerungen des Fahrzeugs beim Bremsen werden diese Zusammenhänge unter dem Begriff Längsdynamik zusammengefasst. Auf die durch den Antrieb verursachten Schwingungen und Vibrationen wird in Kapitel 3.5.3 detaillierter eingegangen.

Die Lenkeingriffe des Fahrers während der Fahrt, Seitenwindkräfte sowie seitliche Fahrbahnneigung führen zu einer Reaktion des Fahrzeugs in Querrichtung. Das daraus resultierende Fahrzeugverhalten wird unter dem Begriff Querdynamik zusammengefasst. Ursache für die Bewegung des Fahrzeugs in Seitenrichtung sind Querkräfte, welche in den Kontaktpunkten zwischen Reifen und Fahrbahn auftreten, wenn Vorder- und Hinterreifen eines fahrenden Fahrzeugs nicht in der Spur sind. Es existieren unterschiedliche dynamische Modelle zur Berechnung und Simulation der Querdynamik von Fahrzeugen in Form von Differentialgleichungen für Ein- und Zweispurmodelle [47]. Die Darstellung der Querschleunigungskräfte durch ein Bewegungssystem im Fahrsimulator ist von entscheidender Bedeutung dafür, wie gut Probanden die Kurvengeschwindigkeiten einschätzen können. Beobachtungen an Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem haben gezeigt, dass in den meisten Fällen mit deutlich höheren Kurvengeschwindigkeiten gefahren wird und die fahrdynamischen Grenzbereiche häufiger überschritten werden, wenn keine Seitenführungskräfte dargestellt werden.

Die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche haben ebenfalls einen Einfluss auf die Bewegungsabläufe eines Fahrzeugs. Hierbei ist nach der Größenordnung dieser Fahrbahneigenschaften zu unterscheiden. Zum einen sind hier großflächigere Fahrbahneigenschaften zu nennen, zu denen Steigungen, Neigungen und größere Unebenheiten gehören. In [47] werden diese Schwingungen auf den nicht hörbaren

Frequenzbereich von 0 bis etwa 25 Hz begrenzt behandelt. Zum anderen wird das Fahrzeugverhalten auch durch lokal begrenzte Fahrbahneigenschaften wie die Rauigkeit des Fahrbahnbelags beeinflusst.

Die Aerodynamik umfasst die Reaktionen des Fahrzeugs, welche aus der Umströmung des Fahrzeugs mit Luft oder aus Seitenwind resultieren. Entsprechend den drei translatorischen und den drei rotatorischen Freiheitsgraden setzen sich die Einwirkungen durch die Fahrzeugumströmung aus den Kräften Luftwiderstandskraft, seitliche Luftkraft und Auftriebskraft, sowie den Momenten Luftwankmoment, Luftnickmoment und Luftgiermoment zusammen [47]. Typische Fahrdynamikmodelle, wie veDYNA (Tesis), erlauben die Vorgabe der Luftwiderstandsbeiwerte und Stirnflächen des Fahrzeugs, sowie die Vorgabe von Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Der von der Geschwindigkeit in Fahrtrichtung abhängige Luftwiderstand des Fahrzeugs ist bereits vollständig in der Fahrwiderstandsgleichung, aus welcher die Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung des Fahrzeugs in Längsrichtung errechnet wird, enthalten. Aus diesem Grund muss der Luftwiderstand auch nicht gesondert berücksichtigt werden. Anders verhält es sich dagegen bei Fahrzeugbewegungen, welche durch Wind verursacht werden. Hierbei handelt es sich um eine der Bewegung des Fahrzeugs bei Windstille überlagerte Bewegung. Da der Fahrer erst auf das durch Seitenwind ausgelöste Verhalten des Fahrzeugs reagiert ist es notwendig, die durch den Seitenwind verursachten Bewegungen des Fahrzeugs im Simulator durch das Bewegungssystem darzustellen. Andernfalls würden Fahrzeugverhalten und Fahrerverhalten in Simulator stark von der Realität abweichen, insbesondere deshalb, weil Seitenwind im Gegensatz zur Geschwindigkeit nicht optisch wahrnehmbar ist.

Um die während der Fahrt auftretenden Kräfte im Simulator exakt nachzubilden, wäre ein Bewegungsraum erforderlich, der die Größe der befahrenen Strecke aufweist. Allerdings können die bei moderater Fahrt im Straßenverkehr auftretenden Kräfte auch schon in einem Fahrsimulator mit einem Hexapod und zusätzlicher, über ein Schienensystem realisierter, Bewegung des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung mit guter Genauigkeit abgebildet werden. Die Darstellung von Wank- und Nickbewegungen über ein Hexapodsystem stellt kein Problem dar. Durch Fahrbahnebenenheiten verursachte Bewegungen des Fahrzeugs nach oben und unten können ebenfalls gut nachgestellt werden. Am problematischsten ist die Darstellung der Längs- und Querkkräfte bei längeren Beschleunigungen und Verzögerungen, sowie bei längeren Kurvenfahrten. Diese können umso besser nachgebildet werden, je größer der translatorische Bewegungsraum des Simulators in Fahrzeuglängs- und -querrichtung ist. Am Ende dieses Bewegungsraumes können Längs- und Querkkräfte zwar durch Neigung des Hexapods nachgebildet werden, jedoch muss

der Übergang von der translatorischen Bewegung in den geneigten Zustand unterhalb der Wahrnehmbarkeitsgrenze des Fahrers stattfinden. Hinzu kommt, dass Querkräfte nur bis zu einer gewissen Grenze durch Neigung dargestellt werden können, da mit zunehmender Neigung auch die vom Fahrer als nach unten wirkend wahrgenommene Gewichtskraft abnimmt. Durch Motion-Cueing-Algorithmen, welche die gewünschten Beschleunigungswerte in eine Bewegung des Simulators umsetzen, wird versucht, die aus der Fahrdynamiksimulation errechneten Kräfte im Bereich des Fahrerkopfes, wo sich das Vestibularorgan befindet, möglichst genau nachzubilden. [24, 51, 75]

2.1.5 Übersicht über realisierte Fahrsimulatoren mit Bewegungssystem

Im Folgenden werden einige realisierte Fahrsimulatoren mit Bewegungssystem vorgestellt.

Der derzeit größte Fahrsimulator weltweit wird von Toyota in Japan betrieben. Weitere allgemein bekannte Fahrsimulatoren sind der von Daimler in Sindelfingen (ehemals Berlin), von Renault, am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig und der NADS (National Advanced Driving Simulator) der Iowa State University in den USA.

An der Universität der Bundeswehr in Hamburg steht ein Fahrsimulator mit 7 Freiheitsgraden, der speziell für die Simulation von Fahrten im Gelände ausgelegt ist. Das Linearsystem kann sowohl für Längs- als auch für Querbeschleunigungen verwendet werden [27].

BMW hat in München einen Fahrsimulator auf einem Hexapod-System, welcher komplette Fahrzeuge aufnehmen kann. Dieser wurde zunächst als Bewegungsplattform mit Plasmabildschirmen zur Visualisierung ausgeführt. Später wurde auf der Plattform eine Kuppel angebracht, deren Innenwand als Projektionsfläche für die Umgebungsvisualisierung dient. Dieser Simulator wurde speziell für die realitätsgetreue Nachbildung komfortrelevanter Schwingungen ausgelegt. [33, 42]

Zum Abschluss sei noch der Fahrsimulator der Universität Leeds (Großbritannien) genannt. Dieser diene in gewisser Weise als Vorbild bei der Konzeption des Stuttgarter Fahrsimulators. Die beiden Fahrsimulatoren unterscheiden sich dadurch, dass der in Leeds einen kleineren Bewegungsraum hat als der Stuttgarter. Außerdem ist die Nutzlast des Hexapods in Leeds geringer, was dazu führt, dass keine kompletten Fahrzeuge in der Kuppel untergebracht werden können.

2.1.6 Der Stuttgarter Fahrsimulator

Im Folgenden wird der Stuttgarter Fahrsimulator des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart und des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) vorgestellt. Es handelt sich hierbei um eine Anlage mit acht Freiheitsgraden, siehe Bild 2.1. Der Hexapod ist auf einem Schienensystem montiert, welches einen Fahrweg von 10 Metern in Fahrzeuglängsrichtung und 7 Metern in Fahrzeugquerrichtung ermöglicht. Die Nutzlast des Hexapods beträgt 4 Tonnen. In Tabelle 2.1 sind die maximalen Fahrwege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Stuttgarter Fahrsimulators, jeweils bezogen auf die Freiheitsgrade (engl. Degree Of Freedom, DOF) des Bewegungssystems aufgelistet. Im oberen Teil der Tabelle stehen die Werte für das Schienensystem, darunter die für den Hexapod. Die damit erreichbare Dynamik ist ausreichend, um die im normalen Straßenverkehr auftretenden Kräfte auf den Fahrer fast vollständig abzubilden. In Bild 2.2 sind die Beschleunigungsbereiche aus im realen Straßenverkehr aufgezeichneten Daten und die des Fahrsimulators gegenübergestellt [7]. Einschränkungen bestehen bei längeren Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen, sowie in langgezogenen schnellen Kurven, da die Beschleunigungen am Simulator durch die Endlichkeit des Bewegungsraums nur zeitlich begrenzt dargestellt werden können.

Tabelle 2.1: Maximale Fahrwege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Stuttgarter Fahrsimulators [13]

DOF	Fahrweg	Geschwindigkeit	Beschleunigung
X	$\pm 5 \text{ m}$	$\pm 2 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
Y	$\pm 3,5 \text{ m}$	$\pm 3 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
x	$+0,538/-0,453 \text{ m}$	$\pm 0,5 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
y	$\pm 0,445 \text{ m}$	$\pm 0,5 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
z	$+0,387/-0,368 \text{ m}$	$\pm 0,5 \text{ m/s}$	$\pm 6 \text{ m/s}^2$
wank	$\pm 18 \text{ deg}$	$\pm 30 \text{ deg/s}$	$\pm 90 \text{ deg/s}^2$
nick	$\pm 18 \text{ deg}$	$\pm 30 \text{ deg/s}$	$\pm 90 \text{ deg/s}^2$
gier	$\pm 21 \text{ deg}$	$\pm 30 \text{ deg/s}$	$\pm 120 \text{ deg/s}^2$

Auf dem Hexapod befindet sich eine Kuppel, welche ganze Fahrzeuge aufnehmen kann. Die Größe der Kuppel ist so ausgelegt, dass auch die Einbringung größerer Limousinen und Geländefahrzeuge möglich ist. Die Kuppel hat ein abnehmbares Toremment, das es erlaubt, das Simulatorfahrzeug durch ein anderes auszutauschen.



Bild 2.1: Stuttgarter Fahrsimulator

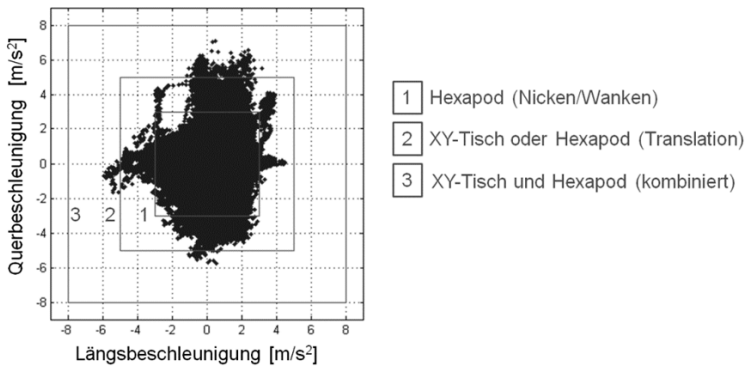


Bild 2.2: Beschleunigungsbereich von Normalfahrern und Simulatorabdeckung [7]

Die Innenwand der Kuppel bildet die Projektionsfläche. Zur Grafikanlage gehören zwölf Projektoren, von denen neun die visuelle Fahrzeugumgebung vor und neben

dem Fahrzeug darstellen und je einer die Bilder für die beiden Aussen- und den Innenspiegel des Fahrzeugs darstellt.

2.2 Antriebsstrangprüfstände

Antriebsstrangprüfstände dienen der Erprobung von Fahrzeugantriebssträngen, ohne dass dafür ein reales Gesamtfahrzeug benötigt wird. In den folgenden Abschnitten werden zuerst einige Grundlagen zu Antriebsstrangprüfständen hinsichtlich Einsatzgebieten und Aufbau solcher Systeme erläutert. Im Anschluss daran wird der Antriebsstrang- und Hybridprüfstand am IVK/FKFS detailliert vorgestellt.

2.2.1 Allgemeines zu Antriebsstrangprüfständen

Mittlerweile werden komplette Antriebsstränge bis zur Serienreife am Prüfstand entwickelt [65]. Der Prüfling umfasst dabei, in Kraftflussrichtung von der Antriebs- zur Abtriebsseite betrachtet, in der Regel den Antriebsstrang beginnend mit der Kupplung und dem Schaltgetriebe und endet an den Radnaben der angetriebenen Räder. Antriebsseitig kommt entweder ein realer Verbrennungsmotor oder eine hochdynamische elektrische Antriebsmaschine, welche die Drehzahl- und Drehmomentungleichförmigkeit eines Verbrennungsmotors nachbilden kann, zum Einsatz. Bei Elektroantrieben sind mehrmotorige Antriebe realisierbar, bei denen für jedes angetriebene Rad eine eigene Antriebsmaschine vorhanden ist [72]. Auf der Abtriebsseite nehmen meist elektrische Radmaschinen die vom Antrieb aufgebrachten Drehmomente auf, welche mit den in einer Fahrdynamiksimulation errechneten Fahrwiderständen übereinstimmen. Wegen der kurzen Ansprechzeiten und der hohen Drehzahldynamik kommen hierbei überwiegend Drehstrom-Synchron-Motoren zum Einsatz [65]. Bild 2.3 zeigt verschiedene Konfigurationen am Beispiel des Antriebsstrangprüfstands am IVK/FKFS.

Das für die Bedienung des Prüfstands, die Vorbereitung von Versuchen, die Vernetzung der einzelnen Prüfstandskomponenten und die automatisierte Durchführung der Tests inklusive Erfassung und Aufbereitung der Messdaten verwendete Automatisierungssystem wird von den verschiedenen Prüfstandsherstellern zur Verfügung gestellt. Beispiele hierfür sind PUMA Open von der AVL List GmbH [5] oder PATools von der Kratzer Automation AG.

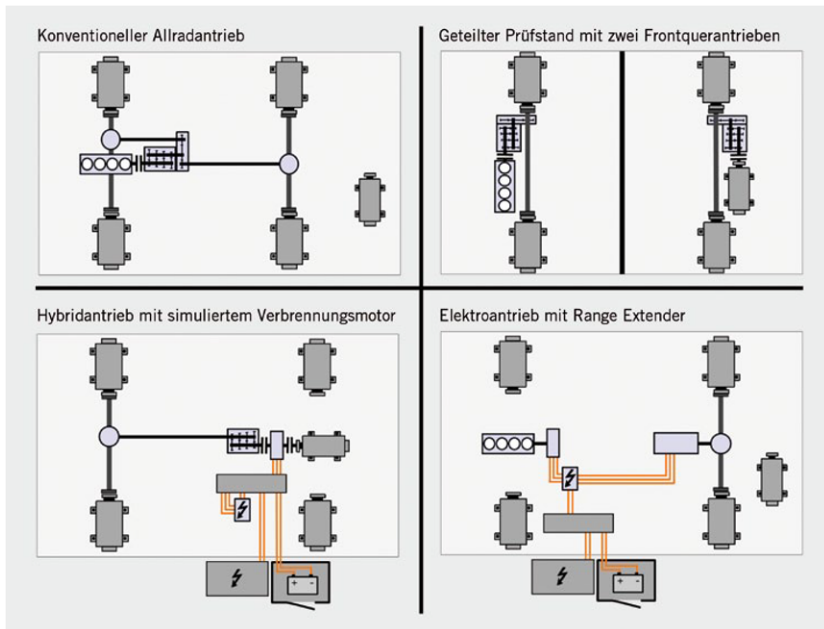


Bild 2.3: Verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten des Antriebsstrangprüfstands am IVK/FKFS [12]

Schwerpunkt der Untersuchungen sind höchst unterschiedliche Anwendungen. So werden solche Prüfstände beispielsweise zur Beurteilung von Komforteigenschaften des Antriebsstrangs eingesetzt. Sie bieten hierbei eine interessante Alternative bzw. Ergänzung zu Rollenprüfständen und realen Fahrversuchen [60]. Durch das Fehlen anderer Schallquellen eines Fahrzeugs kann die Beurteilung von NVH-Eigenschaften (NVH: Noise Vibration Harshness) an einem Antriebsstrangprüfstand leichter durchgeführt werden als im realen Fahrzeug [54]. Ein weiteres Einsatzgebiet sind mechanische Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Antriebsstrangkomponenten, beispielsweise Getrieben [66], bei denen Langzeiterprobungen von der Straße auf den Prüfstand verlagert werden. In [2] wird die Erprobung einzelner Antriebsstrangkomponenten auf einem Prüfstand am Beispiel eines Zweimasenschwungrads erläutert. Ziele für den Einsatz neuer Methoden in der Entwicklung von Antriebssträngen sind die Verkürzung der Entwicklungsdauer der Fahrzeuge, die Steigerung der Variantenvielfalt und der Zuverlässigkeit, sowie die Verringerung von Erprobungsversuchen mit realen Fahrzeugprototypen [65]. Auch für Versuche zur Ermittlung der Energieflüsse im Antriebsstrang und des Kraftstoffverbrauchs

werden solche Prüfstände häufig eingesetzt [25]. Sie bieten dabei nicht nur den Vorteil, dass kein komplettes Fahrzeug benötigt wird. Darüber hinaus bestehen an einem Prüfstand deutlich bessere Möglichkeiten, Messtechnik einzusetzen, welche im Fahrzeug nicht eingesetzt werden kann oder durch zusätzliches Gewicht, insbesondere bei Messungen des Energieverbrauchs, die Ergebnisse verfälscht. Ein weiterer Vorteil von Prüfständen gegenüber Fahrversuchen ist die weitgehende Reproduzierbarkeit der Umgebungsbedingungen. [59]

Für die Ermittlung des Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugantrieben auf Prüfständen können sowohl Lastprofile aus genormten Fahrzyklen als auch an den realen Fahrbetrieb angelehnte Lastprofile verwendet werden. Die am meisten verbreiteten Fahrzyklen sind der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ), der Japanische Fahrzyklus 10-15 Mode und der Amerikanische Fahrzyklus FTP75. Bei Hybridfahrzeugen ist bei Untersuchungen des Kraftstoffverbrauchs insbesondere darauf zu achten, dass die Ladezustände der Batterien vor und nach den Versuchen jeweils identisch sind. Der Einsatz genormter Fahrzyklen ist besonders dann von Vorteil, wenn unterschiedliche Antriebskonzepte oder unterschiedliche Fahrzeuge miteinander verglichen werden. Aufgrund des eingeschränkten Realitätsbezugs genormter Fahrzyklen sind sie für die Beurteilung von Fahrereinflüssen und die Einschätzung des Nutzens von passiven Fahrerassistenzsystemen nicht geeignet.

In [65] wird die Systemarchitektur von Leistungsprüfständen in fünf Funktionsebenen unterteilt, welche durch definierte Schnittstellen miteinander verbunden sind (siehe Bild 2.4). Die oberste Ebene ist die Leitebene. Diese bietet eine Hard- und Software-Plattform, durch welche Modelle, Prüfläufe und Ergebnisse auf einer zentralen Datenbank basierend vernetzt werden können. Darunter befindet sich die Bedienebene, welche die zur Erstellung und Durchführung der Versuche erforderliche Bedienoberfläche bereitstellt. Unter der Bedienebene liegt die Operativebene. Dabei handelt es sich um eine echtzeitfähige Hard- und Softwareplattform zur Steuerung und Regelung des Versuchsablaufs, sowie zur Überwachung durch diverse Sicherheitsfunktionen. Zwischen der Operativebene und der Prozessebene liegt die Interfaceebene, welche über digitale und analoge Schnittstellen die Verbindung zwischen der Informationsverarbeitung auf der einen Seite und den Sensoren, Aktoren und dem Prüfling auf der anderen Seite herstellt. Letztere werden als Prozessebene zusammengefasst. [65]

2.2.2 Der Antriebsstrang- und Hybridprüfstand

Beim Antriebsstrang- und Hybridprüfstand am IVK/FKFS (Bild 2.5) handelt es sich um einen Multikonfigurationsprüfstand (MKP), auf dem sowohl konventionelle

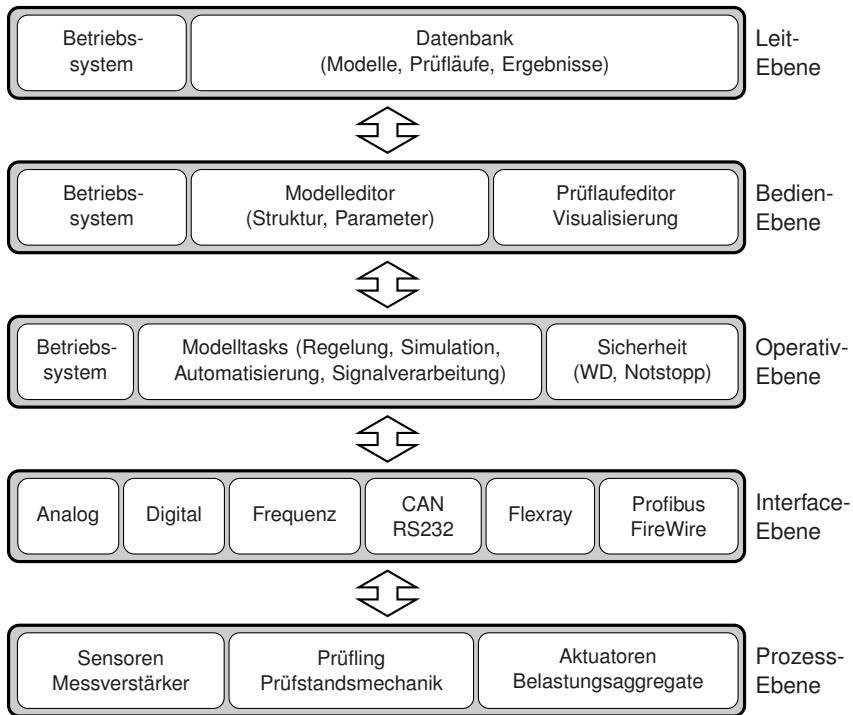


Bild 2.4: Systemarchitektur von Leistungsprüfständen [65]

Antriebsstränge als auch Hybrid- und reine Elektro-Antriebsstränge erprobt werden können. Auf der Abtriebsseite stehen vier elektrische Lastmaschinen mit einem maximalen Drehmoment von 500 Nm und einer maximalen Drehzahl von 3.000 U/min zur Verfügung. Die Nennleistung jeder Radmaschine beträgt 250 kW . Kurzzeitig kann das Drehmoment auf 3.500 Nm erhöht werden. Antriebsseitig kann eine zum Prüfstand gehörende, hochdynamische elektrische Antriebsmaschine verwendet werden, welche in der Lage ist, die Drehmomentungleichförmigkeit von Verbrennungsmotoren nachzubilden. Diese Maschine hat eine Nennleistung von 300 kW , eine maximale Drehzahl von 8.000 U/min und ein maximales Drehmoment von 640 Nm , kurzzeitig können bis zu 1.000 Nm aufgebracht werden. Alternativ zu dieser Maschine kann auch der Verbrennungsmotor, bzw. bei Elektrofahrzeugen der Elektromotor aus dem Fahrzeug oder bei Hybridfahrzeugen die Kombination aus beiden zum Antreiben des Prüflings verwendet werden.

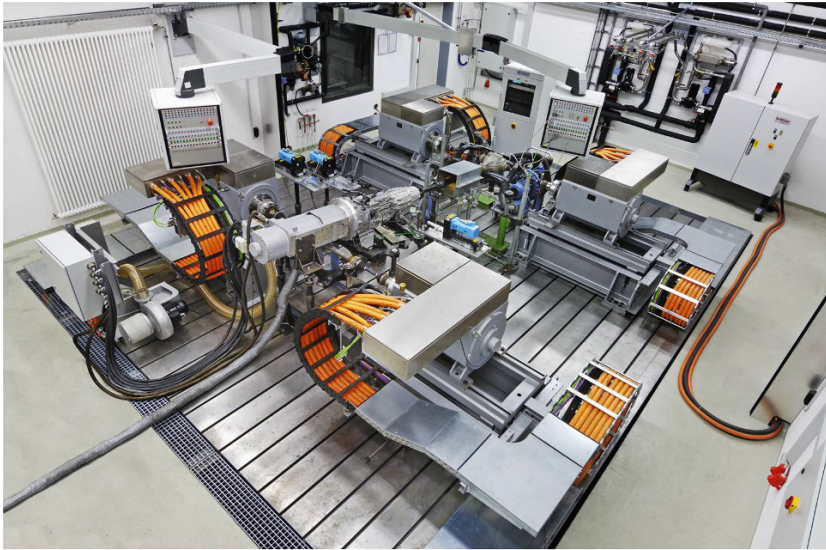


Bild 2.5: Antriebs- und Hybridprüfstand am IVK/FKFS

Mit dem Prüfstand ist die Erprobung von Antriebssträngen mit einer oder zwei angetriebenen Achsen möglich. Darüber hinaus ist die Prüfzelle durch ein Rollltor teilbar, so dass auch zwei Einachs-Antriebsstränge gleichzeitig getestet werden können, von denen einer elektrisch und der andere über einen Verbrennungsmotor angetrieben wird. Aufbautechnisch betrachtet handelt es sich dann um zwei voneinander unabhängige Prüfstände, da sowohl steuerungstechnisch als auch messtechnisch zwei eigenständige Systeme mit je einer eigenen Leitwarte vorhanden sind. Aus den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten ergeben sich insgesamt 20 verschiedene Prüfstandskonfigurationen, welche sich in der Antriebsart (verbrennungsmotorisch oder elektrisch), dem Einbauort des Antriebs (vor oder hinter der/den angetriebenen Achse/n), der angetriebenen Achsen (nur vorne, nur hinten, beide Achsen) und der Ausrichtung des Antriebsstrangs in der Prüfzelle (nach links oder nach rechts) voneinander unterscheiden.

Zur weiteren Ausstattung des Prüfstands gehören neben umfangreicher Messtechnik ein Bordnetzkomponentenprüfstand und hochdynamische Batteriesimulatoren für Niedervolt- (0 bis 50 V) und Hochvoltbordnetze (50 bis 500 V). Die Batteriesimulatoren können sowohl als Energiequelle als auch als Energiesenke betrieben werden. In einer Temperaturprüfkammer können Batterien und andere Komponenten des Fahrzeugbordnetzes thermisch konditioniert und auch unter hohen und

niedrigen Umgebungstemperaturen getestet werden. Der einstellbare Temperaturbereich reicht von -30 bis $+60$ °C. Dies ist besonders bei Batterien wichtig, da sich deren Verhalten in Abhängigkeit von der Temperatur signifikant ändern kann. [59]

2.3 Kopplung von Fahr Simulator und Antriebsstrangprüfstand

In [3] und [65] wird das Konzept eines in einen Antriebsstrangprüfstand integrierten Fahr Simulators vorgestellt. Hintergrund ist hier die Erlebbarkeit der verschiedenen dynamischen Antriebsstrangeigenschaften, wie zum Beispiel Rupf- und Ruckelschwingungen, in einer frühen Entwicklungsphase des Antriebsstrangs, ohne dass dafür ein komplettes Fahrzeug benötigt wird. Durch die Einbindung realer Fahrer und deren subjektives Empfinden können die dynamischen Merkmale neuer Antriebsstrangkonzeppte besser und in einer früheren Entwicklungsphase beurteilt werden als durch reine Analyse von am Prüfstand aufgezeichneten Messdaten. Als Besonderheit ist hier die Simulation des Reifenschlupfes zu nennen, welche von der Porsche AG und der AVL Deutschland GmbH entwickelt und patentiert wurde [15]. Diese erlaubt es, die im Antriebsstrang entstehenden Eigenschwingungen, insbesondere im Hinblick auf Frequenz und Dämpfung, realistischer nachzubilden, als dies mit herkömmlichen Methoden möglich ist.

Bei der Kopplung von Fahr Simulator und Prüfstand handelt es sich um eine Art der Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiL). Während der Antriebsstrang und einige weitere Komponenten des Fahrzeugbordnetzes real vorhanden sind, wird der Rest des Bordnetzes und insbesondere die Fahrdynamik simuliert. Die Einbindung realer Komponenten in einen Simulationsprozess erfordert die Echtzeitfähigkeit der Simulationsumgebung [20]. Auf der Simulatorseite ist diese Anforderung durch die Einbindung eines realen Fahrers jedoch ohnehin gegeben.

2.4 Messfahrzeuge

Neben Prüfständen werden in vielen Fällen Messfahrzeuge zur Erzeugung von Messdaten eingesetzt. Die Einsatzbereiche erstrecken sich dabei von der Erprobung einzelner Fahrzeugkomponenten in der Vorserienentwicklung über die Erpropung von Softwarefunktionen bis hin zum Test serienreifer Gesamtfahrzeuge.

Dabei werden jedoch nicht alle zu prüfenden Eigenschaften messtechnisch erfasst. Einige Kriterien wie beispielsweise die Beurteilung des Fahrgefühls, sowie haptische und akustische Wahrnehmungen im Fahrzeug, können nur durch speziell ausgebildete Testfahrer durchgeführt werden. Für andere Anwendungen ist es dagegen wünschenswert, gerade nicht geübte Personen, sondern möglichst durchschnittliche Autofahrer in einer realistischen Fahrzeugumgebung einzusetzen.

Für die im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Modellierungsverfahren kommen unter anderem auch Daten von Messfahrzeugen zum Einsatz. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf deren Besonderheiten gegenüber reinen Prüfstandsversuchen und Simulatorfahrten hingewiesen.

2.4.1 Unterschiede zu Prüfstandsversuchen

Gegenüber der Erprobung an Prüfständen oder in einer Simulationsumgebung ergeben sich durch den Einsatz von Messfahrzeugen spezifische Vor- und Nachteile. Diese werden im Folgenden näher betrachtet.

Messfahrzeuge haben den Vorteil, dass die zu untersuchenden Fahrzeugkomponenten in ihrer tatsächlichen Fahrzeugumgebung betrieben werden können. Damit ist sichergestellt, dass die auftretenden Betriebszustände mit den Bedingungen im realen Straßenverkehr übereinstimmen. Einige Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise extreme Witterungseinflüsse, lassen sich am Prüfstand nicht oder nur mit hohem Aufwand darstellen.

Auf der anderen Seite ergeben sich in Messfahrzeugen einige Nachteile gegenüber den Bedingungen an Prüfständen. So sind beispielsweise viele Messstellen im Fahrzeug nicht so gut zugänglich wie an einem Prüfstand. Hinzu kommt, dass bei Messfahrzeugen stets die komplette Messtechnik inklusive der Messdatenaufzeichnung im Fahrzeug mitgeführt werden muss. Insbesondere bei energetisch relevanten Untersuchungen können die Messergebnisse im Fahrzeug durch das zusätzliche Gewicht und den Energieverbrauch der Messeinrichtungen verfälscht werden. Letzterem Umstand kann zwar durch eine unabhängige Energieversorgung der Messtechnik entgegnet werden, jedoch erhöht sich dadurch das mitzuführende Zusatzgewicht weiter.

2.4.2 Einteilung

Insbesondere bei der Erprobung einzelner Fahrzeugkomponenten in der Entwicklungsphase kommen als Messfahrzeuge spezielle Versuchsträger zum Einsatz, welche mit dem endgültigen Serienfahrzeug mehr oder weniger stark übereinstimmen. Häufig handelt es sich dabei um Fahrzeuge aus einer anderen Modellbaureihe oder um Fahrzeuge des Vorgängermodells, in welche die neuen und zu erprobenden Komponenten eingebaut werden. Selbstverständlich kommen auch Vorserienfahrzeuge in Form von Prototypen als Messfahrzeuge zum Einsatz. In manchen Fällen liegt für diese Fahrzeuge noch gar keine Straßenzulassung vor, sodass diese im realen Straßenverkehr nicht oder nur mit einer Ausnahmegenehmigung als Erprobungsfahrzeug betrieben werden dürfen. Demgegenüber werden teilweise auch fertige Serienfahrzeuge als Messfahrzeuge ausgerüstet und eingesetzt.

2.4.3 Einsatzbereiche

Ein anderer wichtiger Aspekt ist der Einsatzort der Messfahrzeuge. Die Fahrten finden entweder auf abgesperrten Teststrecken oder im realen Straßenverkehr statt.

Bei Messfahrten auf Teststrecken ist eine Straßenzulassung für die Fahrzeuge nicht erforderlich, da die Fahrten auf abgesperrten privaten Grundstücken stattfinden. Das kommt insbesondere der Erprobung von Fahrzeugprototypen entgegen. Außerdem ist eine Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer ausgeschlossen. Dadurch können auch unausgereifte sicherheitskritische Systeme oder riskante Fahrmanöver relativ gefahrlos durchgeführt werden.

Für den Einsatz von Messfahrzeugen im realen Straßenverkehr gelten hingegen wesentlich strengere Auflagen. Da hier stets die Sicherheit unbeteiligter Verkehrsteilnehmer gewährleistet werden muss, haben die Fahrzeuge Anforderungen zu erfüllen, welche den gängigen Normen, Regelungen und dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Die Bedingungen für den Betrieb von solchen Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr sind u. A. in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) [1] im Abschnitt B. Fahrzeuge in den §§ 19-21 StVZO geregelt.

Im Gegensatz zu speziellen Versuchsstrecken ist es im realen Straßenverkehr schwieriger, teilweise sogar unmöglich, bestimmte Fahrmanöver zu fahren oder bestimmte Verkehrssituationen gezielt und reproduzierbar darzustellen. Demgegenüber steht der Vorteil, dass die Einsatzbedingungen im realen Straßenverkehr stets mit dem vorgesehenen Einsatz der Fahrzeuge im Kundenbetrieb identisch sind.

2.4.4 Messtechnik

Die in Messfahrzeugen eingesetzte Messtechnik unterscheidet sich zum Teil erheblich von jener, welche in Prüfstandsversuchen verwendet wird. Die Unterschiede ergeben sich hauptsächlich aus den veränderten Bedingungen im Fahrzeug.

Bei realen Fahrten können einige Signale aufgezeichnet werden, welche am Prüfstand nicht darstellbar sind. Dazu gehören vor allem Umwelteinflüsse, wie z. B. Anregungen des Fahrzeugs durch die Fahrbahn, welche über Schwingungs- und Beschleunigungssensoren erfasst werden. Außerdem sind Geschwindigkeiten und Positionsdaten (z. B. GPS-Signale) vorhanden.

Viele der am Prüfstand messbaren Größen, wie Drehzahlen, Drehmomente, Temperaturen, Drücke, sowie elektrische Spannungen und Ströme können auch in Messfahrzeugen erfasst werden.

Im Allgemeinen müssen im Fahrzeug Einschränkungen hingenommen werden, welche am Prüfstand in der Art nicht vorherrschen. Diese betreffen insbesondere die Zugänglichkeit mancher Messstellen, den zur Verfügung stehenden Platz für die Messtechnik, sowie deren Energieversorgung. Einige Messgrößen, beispielsweise Schadstoffkonzentrationen im Abgas von Verbrennungsmotoren, können deshalb im Fahrzeug nach derzeitigem Stand der Technik praktisch überhaupt nicht erfasst werden.

Darüber hinaus muss im Fahrzeug die gesamte Messtechnik die im Fahrbetrieb auftretenden thermischen und mechanischen Belastungen ertragen können. Dies betrifft sowohl die Lebensdauer als auch die erzielbare Genauigkeit der verwendeten Geräte. Für viele Anwendungen existieren daher spezielle hochwertige Lösungen für den Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen.

In vielen Fällen werden die im Fahrzeug ohnehin vorhandenen Sensoren als Quelle für die Messdaten verwendet. Die Signale werden entweder analog oder digital direkt von den Sensoren, in den meisten Fällen aber digital vom Fahrzeugbussystem (z. B. CAN, Controller Area Network) eingelesen.

Modellierung von Fahrzeugantrieben anhand von
Messdaten aus dem Koppelbetrieb zwischen
Fahr Simulator und Antriebsstrangprüfstand

Schmidt, A.

2016, XIII, 141 S. 54 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-13471-6