

Anbindung des Antriebsstrangprüfstands an den Fahrsimulator zur energetischen Untersuchung von Hybrid-Antriebssträngen

Connection of the power train test bench and the driving simulator for energetically trial of hybrid power trains

Dipl.-Ing. **A. Schmidt**, IVK, Universität Stuttgart;
Dipl.-Ing. **N. Stegmaier**, IVK, Universität Stuttgart;
Dr.-Ing. **A. Piegsa**, FKFS, Stuttgart;
Prof. Dr.-Ing. **H.-C. Reuss**, IVK, Universität Stuttgart;

Kurzfassung

Die Universität Stuttgart baut derzeit in enger Kooperation mit dem FKFS den größten Fahrsimulator an einer europäischen Forschungseinrichtung auf. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. In einem weiteren öffentlich geförderten Projekt wird ein Antriebsstrang- und Hybridprüfstand aufgebaut, dessen Inbetriebnahme nahezu abgeschlossen ist.

Der Fahrsimulator verfügt über ein Bewegungssystem mit 8 Freiheitsgraden, welches Linearbewegungen von 7x10 Metern zulässt. Auf dem Linearbewegungssystem befindet sich ein Hexapod auf dem eine Kuppel installiert ist. Die Kuppel ist mit einer Rundumprojektion sowie einem Audio- und NVH-Simulationssystem ausgestattet und kann komplette PKW aufnehmen.

Bei dem Antriebsstrangprüfstand handelt es sich um einen Multikonfigurationsprüfstand, der auch zur Erprobung von Hybrid- und Elektroantriebssträngen geeignet ist. Zum Prüfstand gehören auch ein Bordnetzkomponentenprüfstand, eine Klimakammer und Simulatoren für ein Hoch- und Niedervoltbordnetz.

Ziel der Verbindung des Fahrsimulators mit dem Antriebsstrangprüfstand ist die Erprobung von Hybridkomponenten und Fahrerassistenzsystemen im kundenrelevanten Fahrzyklus. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Reduktion des CO₂-Ausstoßes. Der Prüfstand bietet die Vorteile der besseren Messtechnik gegenüber einem realen Versuchsfahrzeug. Im Fahrsimulator können Verkehrssituationen dargestellt werden, welche im realen Straßenverkehr nicht beliebig realisierbar sind. Die Kombination aus beiden ermöglicht die Reproduzierbarkeit der Umgebungsbedingungen und den Verzicht auf ein kostenintensives Versuchsfahrzeug, erlaubt jedoch gleichzeitig die Erprobung neuer Technologien in einem

frühen Entwicklungsstadium. In der Vergangenheit war es teilweise schwierig vorherzusagen, wie neue Systeme von den Kunden angenommen werden. Durch eine repräsentative Auswahl an Probanden für den Fahrsimulator hinsichtlich Alter, Geschlecht und Fahrstil kann eine Aussage über die Akzeptanz neuer Systeme bei den Fahrern und deren Nutzen im Kundenbetrieb bereits lange vor der Markteinführung getroffen werden.

In dem Beitrag wird außerdem auf die technische Umsetzung der Verbindung zwischen Fahrsimulator und Antriebsstrangprüfstand eingegangen. Dabei geht es zum Einen um die Verbindung zwischen der Fahrdynamiksimulation und der Prüfstandssteuerung, zum Anderen um die Verbindung des Bordnetzes vom Fahrzeug in der Kuppel und dem Bordnetz des Antriebsstrangs am Prüfstand. Außerdem wird anhand von Beispielen dargestellt, welche zukünftigen Systeme hiermit erprobt werden können.

Abstract

The University of Stuttgart is building up the largest driving simulator at a European research institute together with the FKFS. The project is funded by the German Federal Ministry for Education and Research (BMBF). In a further public funded project a power train- and hybrid test bench was build up.

The driving simulator is equipped with a motion system with 8 degrees of freedom. It allows linear motion in a field of 7x10 meters. On top of the linear motion system is a hexapod on which a dome is installed. The dome is outfitted with a wraparound projection system together with an audio- and NVH-simulation system and is able to assimilate whole cars.

The power train test bench is a multi-configuration test bench which is also adapted for testing power trains of hybrid and electric cars. A climatic chamber and simulators for low and high voltage onboard power supply are also part of the test bench.

The aim of the connection of the driving simulator and the power train test bench is the proving of hybrid components and driver assistance systems in a customer relevant driving cycle. The focus of the research is on the reduction of CO₂-emission. The advantage of the test bench towards real test drives is the better measure equipment. The driving simulator allows the reconstruction of traffic situations which are difficult to realize on the road. The combination of both enables the reproducibility of environmental conditions and the discontinuation of expensive experimental vehicles, but it allows the test of new technologies in an early stage of development. In the past it was partially difficult to forecast how new systems would be accepted by the customers. With a representative choice of probands relating to age, sex and driving it is possible to predict the acceptance of new systems and the benefit for the customers at a time long before market launch.

The article will also attend to the technical realization of the connection between driving simulator and power train test bench. On the one hand there is the link between the driving dynamics simulation and the control of the test bench. On the other hand there is the link between the wiring system of the car in the dome and the wiring system of the power train on the test bench. Based on examples it is shown which prospective systems could be proved.

1. Fahrsimulator

Das Bewegungssystem des Fahrsimulators ermöglicht Beschleunigungen von bis zu 6 m/s^2 in alle Richtungen bei einer Frequenz von bis zu 10Hz. Damit können alle im normalen Fahrbetrieb auftretenden Kräfte, die auf den Fahrer wirken, sowie Längs- und Querneigungen des Fahrzeugs weitestgehend nachgebildet werden.

In einer auf dem Bewegungssystem montierten Kuppel wird ein komplettes Fahrzeug untergebracht. Bei der Konstruktion der Kuppel und der Bodenplatte wurde hoher Wert auf Leichtbau gelegt und als Material ein Kohlefaser-Verbundwerkstoff gewählt. Aus Gewichtsgründen werden aus dem Fahrzeug nicht benötigte Komponenten wie Motor, Getriebe und Antriebsstrang ausgebaut. Allerdings werden nur solche Umbauten vorgenommen, die für die Probanden nicht sichtbar in Erscheinung treten. Um flexibel auf die Erfordernisse unterschiedlicher Forschungsprojekte eingehen zu können ist die Anlage so konzipiert, dass das Fahrzeug ausgewechselt werden kann. Die Kuppel ist groß genug, um auch große Limousinen und SUVs aufnehmen zu können. In Abbildung 1 ist ein CAD-Modell des Fahrsimulators mit eingebrachtem Fahrzeug zu sehen.

Die Innenwand der Kuppel dient als Projektionsfläche für die aus 12 LED-Projektoren bestehende Projektionsanlage. Davon werden neun Projektoren für die Sicht in Fahrtrichtung und die Bereiche links und rechts vom Fahrzeug verwendet und je einer für die beiden Außenspiegel und den Innenspiegel. Die Bilder der neun Projektoren werden so aneinander gefügt, dass sich daraus ein einziges Bild ergibt.

Über eine leistungsfähige Akustiksimulation werden nicht nur die vom Fahrzeug selbst verursachten Fahrgeräusche wie Wind-, Reifen- und Motorgeräusche nachgebildet, sondern auch die durch den weiteren Verkehr verursachten Umgebungsgeräusche. Dabei können entweder die im Fahrzeug vorhandenen Lautsprecher genutzt oder zusätzliche Lautsprecher in das Fahrzeug eingebaut werden. Darüber hinaus ist die Akustiksimulation in der Lage, über zusätzliche Shaker auch die höherfrequenten Schwingungen, welche durch den Motor oder durch Antriebsstrangschwingungen verursacht werden und durch das Bewegungssystem nicht abgedeckt werden können, darzustellen.

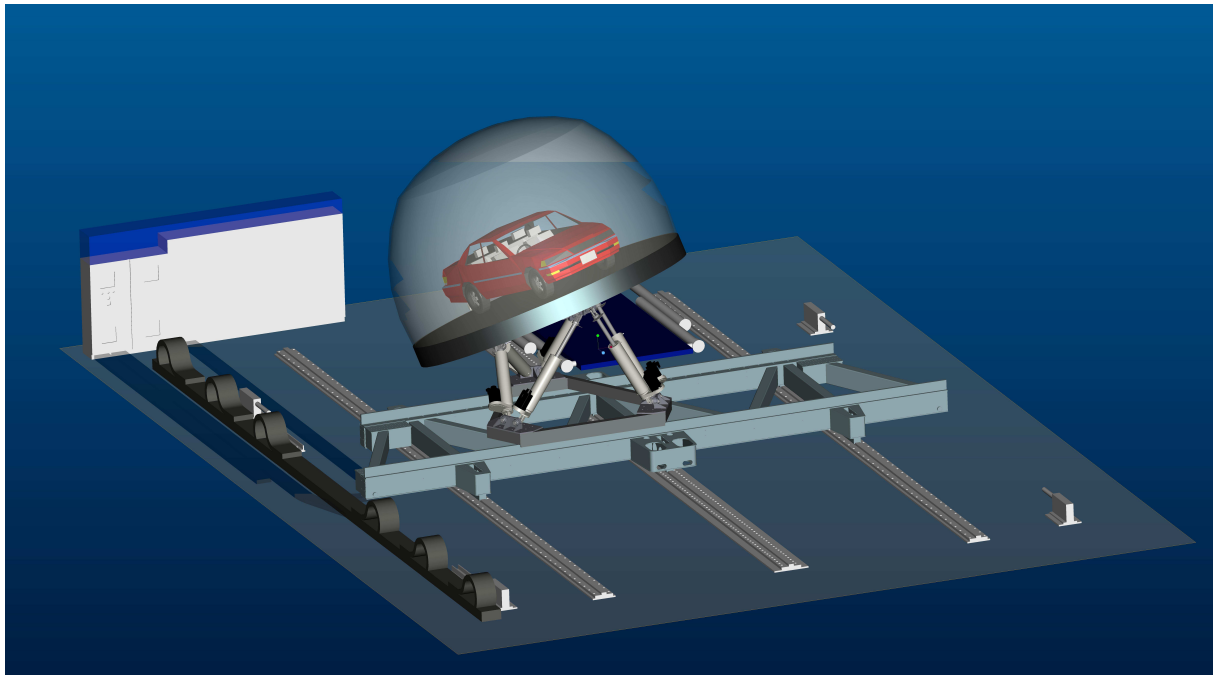


Abbildung 1: CAD-Grafik des Fahrsimulators

2. Prüfstand

Beim Antriebsstrangprüfstand handelt es sich um einen modernen Multikonfigurationsprüfstand, der von Anfang an auch für die Erprobung von Hybrid- und reinen Elektroantriebssträngen ausgelegt wurde. Zur Ausstattung der Anlage gehören 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. Abbildung 2 zeigt einen Überblick über das Prüfstandslayout, auf welchem der eigentliche Antriebsstrangprüfstand und der Bordnetzkomponentenprüfstand zu sehen sind.

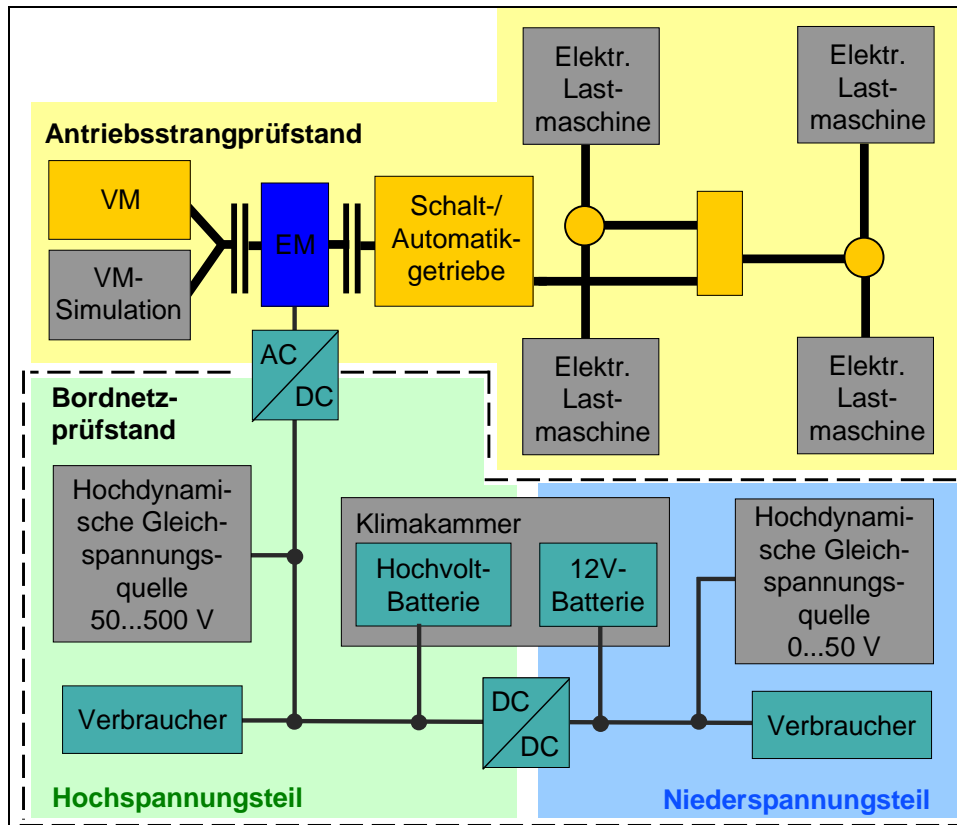


Abbildung 2: Prüfstandslayout

Auf der Antriebsseite des Prüflings ist entweder ein Verbrennungsmotor installiert oder dieser wird durch einen hochdynamischen elektrischen Antrieb ersetzt. Dieser ist in der Lage auch die Drehmomentschwankungen eines Verbrennungsmotors über eine Umdrehung mit einer Frequenz von bis zu 500 Hz nachzustellen. Auf der Abtriebsseite befinden sich vier hochdynamische elektrische Radmaschinen, welche das Drehmoment und die Drehzahl an den Rädern nachbilden. Das Nenndrehmoment der elektrischen Antriebsmaschine beträgt 640 Nm, die maximale Drehzahl liegt bei 8000 U/min und die maximale elektrische Antriebsleistung beträgt 300 kW. Das Nenndrehmoment der Abtriebsmaschinen beträgt 2500 Nm und die Nennleistung 250 kW. Die maximale Drehzahl liegt bei 3000 U/min, womit auch Fahrzeuggeschwindigkeiten von über 300 km/h dargestellt werden können.

Der Prüfstand kann in zwei einzelne Prüfstände für Antriebsstränge mit jeweils nur einer angetriebenen Achse aufgeteilt werden. Zwei parallel vorhandene Automatisierungssysteme sorgen dafür, dass die beiden Teilprüfstände voneinander völlig unabhängig sind. In diesem Fall wird der eine Antriebsstrang von einem Verbrennungsmotor angetrieben und der andere durch die elektrische Antriebsmaschine. Prinzipiell ist der Prüfstand auch für die Erprobung von rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen geeignet. In diesem Fall wird anstatt des

hochdynamischen Elektromotors für die Verbrennungsmotorsimulation der Elektromotor installiert, der zusammen mit dem Antriebsstrang im Fahrzeug verbaut wird. An- und Abtriebsmaschinen können auf einer Spannplatte so verschoben werden, dass die Antriebsstränge aller gängigen PKWs montiert werden können. Die einstellbare Spurweite liegt im Bereich von 1,2 bis 2,0 m, der mögliche Radstand beträgt 2,3 bis 3,1 m. Abbildung 3 zeigt eine Auswahl von möglichen Prüfstandskonfigurationen.

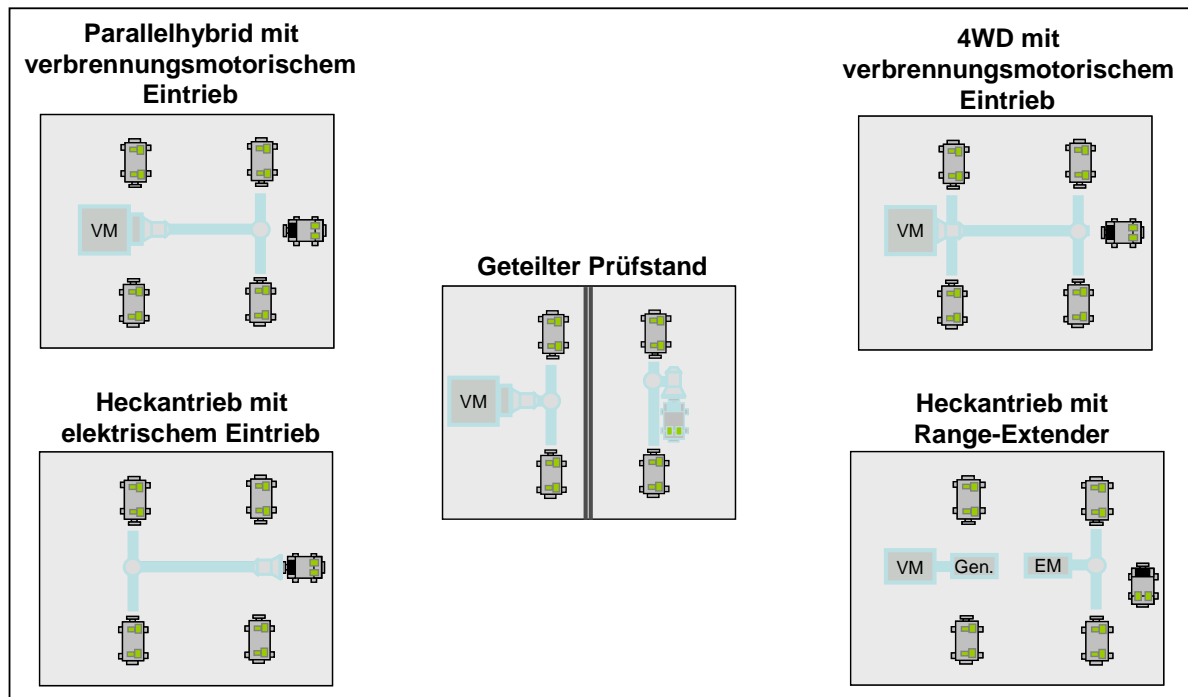


Abbildung 3: Auswahl möglicher Prüfstandskonfigurationen

3. Verbindung zwischen Fahrsimulator und Prüfstand

Prinzipiell besteht die Verbindung zwischen Fahrsimulator und Antriebsstrangprüfstand aus zwei Teilen. Auf der einen Seite ist die Verbindung zwischen der Fahrdynamiksimulation und der Steuerung des Prüfstands zu betrachten. Auf der anderen Seite steht die Verbindung zwischen dem Bordnetz des Fahrzeugs in der Kuppel und dem Bordnetz des Antriebsstrangs auf dem Prüfstand. Bei beiden Verbindungen liegt ein besonderes Augenmerk auf der bei der Signalumwandlung und Übertragung auftretenden zeitlichen Verzögerungen.

Vom Fahrsimulator bzw. aus der Fahrdynamiksimulation werden die Werte für Fahrpedalstellung, Kupplungspedalstellung, gewähltem Gang und die Raddrehzahlen an den Prüfstand gesendet. Dort werden die Pedalwerte und die Gangwahl als Eingangsgrößen des Prüflings verwendet und die Raddrehzahlen als Sollwerte an den elektrischen

Abtriebsmaschinen eingeregelt. Vom Prüfstand an den Fahrsimulator werden die sich am Prüfling einstellenden, gemessenen Istwerte der Drehmomente an den Flanschen zurückgesendet. Es handelt sich hierbei um die Werte, welche im Fahrzeug am Ende der Antriebswellen unmittelbar vor den Bremsen auftreten würden. Aus diesen Werten und weiteren Einflussgrößen der Fahrdynamiksimulation werden wiederum die Raddrehzahlen für den nächsten Simulationsschritt berechnet. Diese Regelungsart wird bei Antriebsstrangprüfständen im Allgemeinen als α -n-Regelung bezeichnet. Dabei steht der Wert α für den Fahrpedalwinkel und der Wert n für die Drehzahlen an den Rädern bzw. Abtriebsmaschinen. Abbildung 4 zeigt einen Überblick über die Signalflüsse zwischen Fahrer, Fahrdynamik und Antriebsstrang.

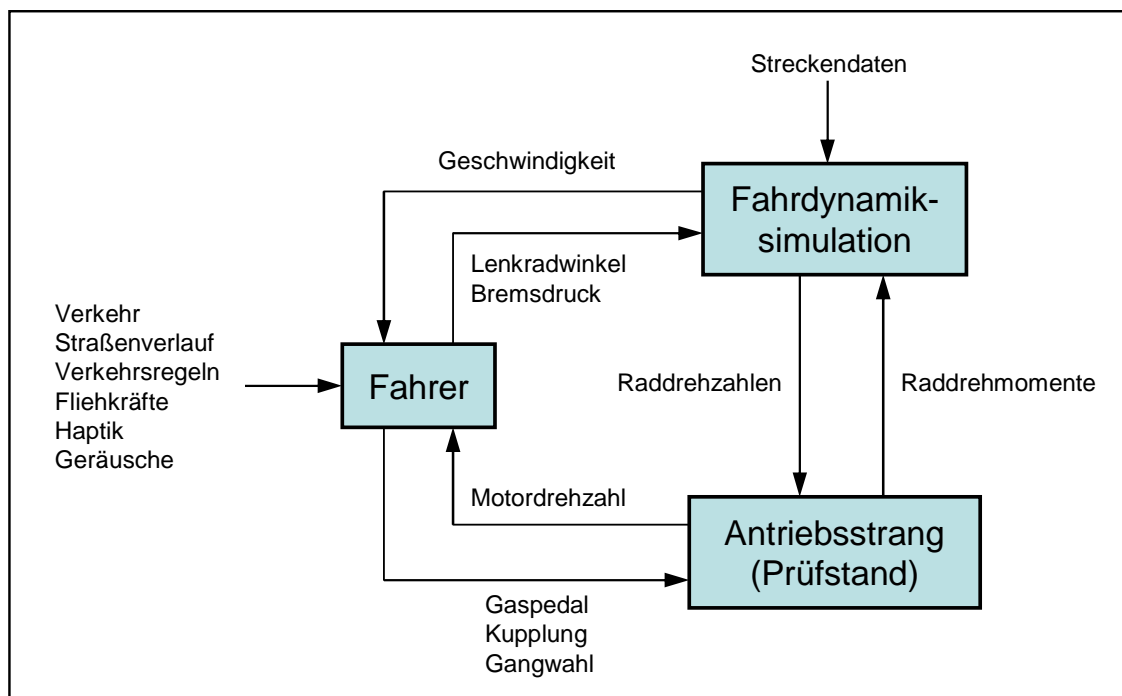


Abbildung 4: Informationsfluss im Regelkreis

Alternativ könnten an den Abtriebsmaschinen auch die aus der Fahrdynamiksimulation errechneten Drehmomente an den Rädern als Sollwerte vorgegeben und die sich am Prüfstand einstellenden Drehzahl-Istwerte an die Fahrdynamiksimulation zurückgesendet werden. Da sich die Drehmomentwerte allerdings mit einer höheren Dynamik ändern als die Drehzahlwerte wäre diese Regelungsart tendenziell anfälliger für Instabilitäten, welche aus der Verzögerung der Signale bei der Datenübermittlung resultieren könnten. Andere Regelungsarten, bei denen auf der Antriebsseite die Drehzahl oder das Drehmoment vom Fahrsimulator aus als Sollwert vorgegeben wird, kommen für diese Anwendung nicht in

Betracht. Entweder ist am Prüfstand ein realer Verbrennungsmotor vorhanden oder dieser wird, da er als Teil des Antriebsstrangs zu betrachten ist, am Prüfstand simuliert. In beiden Fällen wird als Eingangsgröße der Fahrpedalwinkel verwendet.

Da es sich bei dem System um einen geschlossenen Regelkreis handelt, dürfen die zeitlichen Verzögerungen bei der Signalübertragung nicht zu groß sein. Dies gilt insbesondere für den Datenaustausch zwischen Fahrdynamiksimulation und Antriebsstrangprüfstand. Die bei der Signalübertragung auftretenden Verzögerungen haben dabei gleiche Auswirkungen wie Totzeitglieder in einem dynamischen Regelsystem. Der Betrag der zulässigen Verzögerungszeiten hängt vom jeweiligen Fahrzustand ab. Bei hochdynamischen Vorgängen wie beim Anfahren, Schalten und bei Lastwechseln ist die tolerierbare Zeitverzögerung geringer als bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit bei gleichbleibenden Fahrwiderständen. Zu hohe Latenzzeiten können zu unerwünschten Schwingungen am Antriebsstrang und in der Fahrdynamiksimulation führen. Bei Versuchen mit einem simulierten Antriebsstrang und verschiedenen langen Signalverzögerungen zwischen Fahrdynamiksimulation und Antriebsstrang hat sich gezeigt, dass bei den untersuchten Fahrmanövern erst ab einer Zeitverzögerung von mehr als 10 ms Schwingungen auftreten. Als Verbindungstechnologien, welche die sich daraus abzuleitenden Voraussetzungen bezüglich der Signallaufzeiten erfüllen, kommen beispielsweise Ethernet, EtherCAT oder auch Shared Memory in Frage. Obwohl eine Standard Ethernet Verbindung keine deterministischen Übertragungszeiten hat kommt diese Variante als Übertragungsmedium dennoch in Betracht. Da es sich bei dem gegebenen System um ein privates Netzwerk (Private LAN) mit gleichbleibend niedriger Auslastung handelt, können die Anforderungen erfüllt werden. Mit EtherCAT und Shared Memory können auch harte Echtzeitanforderungen mit nahezu vernachlässigbaren Latenzzeiten erfüllt werden. Viele andere Bussysteme sind wegen ihrer niedrigeren Datenrate oder aufgrund der zu überbrückenden Entfernung von mehr als 100 Metern Leitungslänge ungeeignet.

Wie die genaue Topografie des Fahrzeugbordnetzes und der Steuergerätekommunikation im Fahrsimulator und am Prüfstand aussieht, hängt von der jeweiligen Kombination vom Fahrzeug im Simulator und dem Antriebsstrang am Prüfstand ab. Prinzipiell wäre es denkbar, am Prüfstand einen Antriebsstrang zu installieren, der nicht dem Antriebsstrang des Fahrzeugs entspricht, welches sich im Simulator befindet. Dies wäre entweder dann der Fall, wenn der Antriebsstrang aus einem anderen Fahrzeug stammt oder es sich hierbei um einen Prototypen handelt, zu dem es noch kein Fahrzeug gibt. In diesem Fall ist es wahrscheinlich, dass das Bordnetz des Antriebsstrangs und das des Fahrzeugs nicht kompatibel sind. Die beiden Bordnetze werden dann unabhängig voneinander parallel betrieben, ohne dass eine

direkte Verbindung zwischen ihnen besteht. Im jeweiligen Teilbordnetz nicht vorhandene Steuergeräte (SG) werden durch eine Restbussimulation (RBS) dargestellt, soweit dies für eine korrekte Funktion der übrigen Busteilnehmer erforderlich ist. In gleicher Weise werden fehlende Sensordaten ebenfalls durch in der Simulation ermittelte Werte ersetzt. Falls ein Datenaustausch zwischen den beiden unterschiedlichen Teilbordnetzen notwendig ist, erfolgt dieser über eine Verbindung der jeweiligen Restbussimulationen. Stammen jedoch der Fahrzeugaufbau und der Antriebsstrang vom gleichen Fahrzeugtyp bzw. sind kompatibel zueinander, können die beiden Teilbordnetze analog zum Aufbau im fahrbereiten Fahrzeug zu einem Gesamtbordnetz zusammengefasst werden. Abbildung 5 zeigt die beiden genannten Möglichkeiten der Bordnetzkommunikation in einer schematischen Darstellung. Im linken Teil sind die beiden Teilbordnetze kompatibel, im rechten Teil handelt es sich um zueinander nicht kompatible Teilbordnetze.

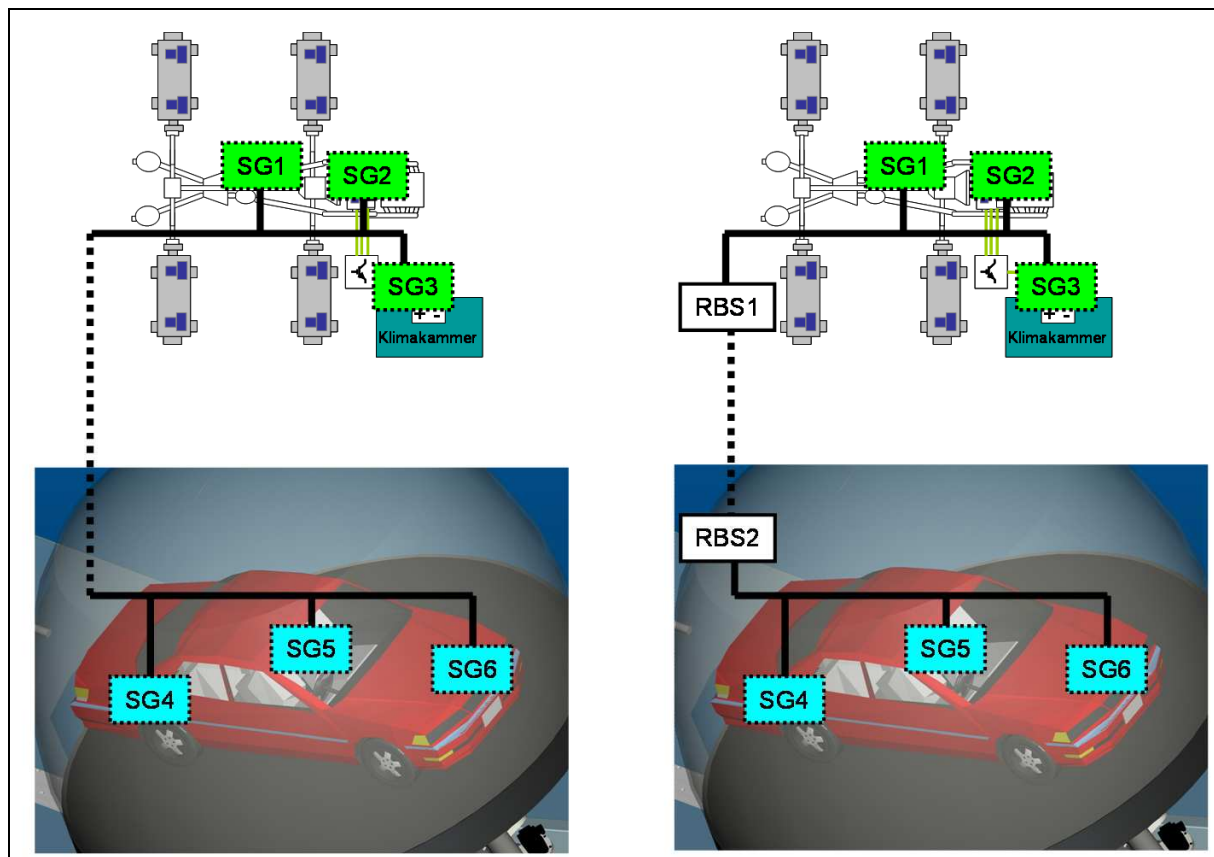


Abbildung 5: Verbindungen der Bordnetze

Aufgrund der Entfernung zwischen dem Fahr Simulator und dem Prüfstand kann für die Datenübertragung zwischen den Steuergeräten im Fahrzeug und denen am Antriebsstrang für die im Automobil übliche Übertragungsrates auf CAN-Bussen von 500MBit/s keine CAN-

Leitung verwendet werden. Stattdessen müssen die Signale umgewandelt werden, sodass für die Übertragung eine für die Entfernung taugliche Leitung wie beispielsweise Ethernet oder Lichtwellenleiter verwendet werden kann. Der erforderliche Aufwand für eine Verbindung der beiden Teilbordnetze zwischen Fahrzeugaufbau und Antriebsstrang ist jedoch in hohem Maße vom jeweiligen Fahrzeugtyp abhängig und muss in der Regel individuell geplant und realisiert werden.

4. Probandenstudien

Der Forschungsschwerpunkt der geplanten Untersuchungen liegt auf der Erprobung von passiven Fahrerassistenzsystemen mit dem Ziel der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Dabei handelt es sich um Systeme, die dem Fahrer dabei helfen sollen ökonomisch zu fahren, welche jedoch nicht aktiv in die Fahrzeugsteuerung eingreifen. Es liegt also stets in der Entscheidung des Fahrers auf die Unterstützung durch die Assistenzsysteme zu reagieren oder diese zu ignorieren. Da der Nutzen solcher Assistenzsysteme sehr stark davon abhängt, wie diese vom Fahrer akzeptiert werden, ist es wichtig diesen schon sehr früh in die Entwicklung einzubinden. Jedoch sind die Reaktionen der Fahrer auf die verschiedenen Assistenzsysteme auch in hohem Maße vom Temperament der jeweiligen Personen abhängig. Dies kann je nach Alter, Geschlecht sowie bevorzugtem Fahrzeugtyp stark variieren und hängt zudem auch noch von der jeweiligen Tagesverfassung ab. Bei der Auswahl der Probanden ist es also wichtig, eine repräsentative Gruppe an Probanden zusammenzustellen, welche mit hinreichender Genauigkeit die Zielgruppe beziehungsweise den Käuferkreis des untersuchten Fahrzeugs und der untersuchten Assistenzsysteme widerspiegelt.

Bei einem typischen Ablauf einer Probandenstudie wird zunächst eine Referenzmessung bei einer Testfahrt ohne Assistenzsystem durchgeführt. Diese wird dann als Vergleichsbasis herangezogen um das relative Kraftstoffeinsparpotential der zu testenden Assistenzsysteme zu ermitteln. Bei den Messfahrten mit aktivierten Assistenzsystemen wird jeweils die gleiche Strecke mit den gleichen Umgebungsbedingungen abgefahren. Im Gegensatz zu realen Messfahrten stellt die Nachbildung von identischen Umgebungsbedingungen im Fahrsimulator kein Problem dar. Auf der Seite des Prüfstands ist dafür zu sorgen, dass auch hier für alle Messfahrten die gleichen Start- und Umgebungsbedingungen herrschen. Insbesondere müssen beim Start der Messfahrten gerade bei Hybridfahrzeugen die Ladezustände der Batterie identisch sein. Weiteren Einfluss haben auch die Temperaturen des Verbrennungsmotors.

Als Schnittstelle zwischen den Assistenzsystemen und dem Fahrer kann beispielsweise ein aktives Gaspedal verwendet werden oder diverse Anzeigen im Kombiinstrument bzw. in zusätzlichen Displays. Über ein aktives Gaspedal kann dem Fahrer über Vibrationen oder eine Variation der Gegenkraft eine Hilfestellung gegeben werden, wie er möglichst verbrauchsoptimal beschleunigen kann, oder wann er vor Kurven oder einem nahende Stauende ganz vom Gas gehen kann. Über optische Anzeigen können beispielsweise Empfehlungen gegeben werden, welches aktuell die richtige Geschwindigkeit ist oder für den Gang, mit dem der Verbrennungsmotor im bestmöglichen Betriebspunkt gefahren wird.

Literatur

- [1] Baumann, G.; Piegsa, A.; Liedecke, Ch.: Der neue Fahrsimulator der Universität Stuttgart; In ASIM-Treffen 2010 - Simulation technischer Systeme und Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation (Tagungsband), Hochschule Ulm, S. 25-30, 2010; ISBN: 978-39810998-3-6

- [2] Carlsson, A.; Baumann, G.; Schmidt, A.; Reuss, H.-C.: VALIDATE – Eine virtuelle Forschungsplattform: Optimierung von Fahrzeugsystemen hinsichtlich des Energieverbrauchs. Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, Würzburg, 2009.

- [3] Carlsson, A.; Baumann, G.; Rumbolz, P.; Schmidt, A.; Reuss, H.-C.: VALIDATE – Virtual Development of Vehicle Systems for Fuel Consumption Reduction in Hybrid Electric Vehicles. 9. International Stuttgart Symposium Automotive and Engine Technology, 2009

- [4] Reisser, C.; Zellbeck, H.; Härtle, C.; Kleiß, T.: Kundenfahrverhalten im Fokus der Fahrzeugentwicklung. In: Automobiltechnische Zeitschrift 110 (2008), Nr.7-8, S.684-692.