



In diesem Beitrag werden der Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen sowie das Entwicklungswerkzeug DRIVASSIST (Driver Assistance Evaluation Tool) vorgestellt. Virtuelle Testfahrten erlauben die unmittelbare Einbeziehung des Fahrers. Dies gestattet ohne zusätzlich finanziellen und zeitlichen Aufwand Rückschlüsse auf die Kundenakzeptanz. Realisiert wird dies durch ein Fahrsimulatorkonzept, bei dem realitätsgetreue Fahrstreckenmodelle dargestellt und in Probandenstudien dem Fahrer in einer virtuellen Fahrumgebung (Virtual Reality) präsentiert werden.

Individuell abgestimmter Fahrsimulator

Mit dem Elektroauto virtuell unterwegs

Von Dieter Schramm und Gregor Hiesgen

Die Fahrzeugentwicklung steht vor neuen Herausforderungen: Kürzere Entwicklungszeiten bei gleichzeitig steigender Fahrzeugkomplexität müssen bewältigt werden. Zusätzlich erfordert die Entwicklung elektrifizierter Antriebe den Einsatz neuer Entwicklungsmethoden. Die Elektrifizierung führt zu Änderungen der Fahrzeugcharakteristik, die auch

beim Fahrzeugnutzer Verhaltensänderungen implizieren, etwa durch geänderte Reichweiten und längere Ladevorgänge. Daher sind neue Entwicklungswerkzeuge erforderlich, um die Lücke zwischen Simulation und realen Versuchen mit Prototypen zu schließen. Fahrsimulatoren sind ein Instrument, um den Fahrer in der frühen Entwicklungsphase zu integrieren. Sie gestatten neben der

technischen Funktion auch das subjektive Empfinden zu testen. Dabei gilt es, den haptischen, den visuellen und den akustischen Kommunikationskanal zum Menschen in geeigneter Weise zu nutzen, ohne ihn zu überfordern.

In diesem Beitrag werden der Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen sowie das Entwicklungs-



(1) Ford Fiesta Fahrsimulator.

werkzeug DRIVASSIST (Driver Assistance Evaluation Tool) vorgestellt. Virtuelle Testfahrten erlauben die unmittelbare Einbeziehung des Fahrers. Dies gestattet ohne finanziellen und zeitlichen Aufwand Rückschlüsse auf die Kundenakzeptanz. Realisiert wird dies durch ein Fahrsimulatorkonzept, bei dem realistische Fahrzeugmodelle auf realistischen Fahrstreckenmodellen dargestellt und in Probandenstudien den Fahrern in einer virtuellen Fahrumgebung (Virtual Reality) präsentiert werden.

Der Simulator erlaubt ergänzend zu Rollenprüfstandversuchen, Realfahrten und Offline-Simulationen die Bewertung der Fahrzeugeffizienz und des Fahrzeugenergieverbrauchs. Die klassischen Test-Fahrzyklen – wie beispielsweise der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) – wurden für verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge entwickelt und sind für die Bewertung der Effizienz von Elektrofahrzeugen (BEV – Battery Electric Vehicle) wenig hilfreich. Mit dem Fahrsimulator lassen sich schnell neue Testfahrzyklen entwer-

fen und prüfen. Weiterhin erlaubt der Simulator eine exakte Reichweiten-Prognose für Elektrofahrzeuge. Dies ist aufgrund der eingeschränkten Ladeinfrastruktur wichtig. Das individuelle Fahrverhalten sowie Verkehr- und Umweltbedingungen haben einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und somit auch auf den Aktionsradius des Fahrzeugs.

Der Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik

Der Fahrsimulator auf Basis des Simulationskonzepts DRIVASSIST (Abb. 1) wird am Lehrstuhl für Mechatronik für Forschung und Entwicklung in verschiedensten Bereichen – wie beispielsweise Elektromobilität, Bordnetztopologie, Fahrerassistenzsysteme, Fahrdynamiksimulation und Car-2-X Communication – eingesetzt.¹ So unterschiedlich die Einsatzgebiete sind, eine Gemeinsamkeit gibt es immer: Der Fahrer kann durch den Einsatz von Fahrsimulatoren zu einem frühen Zeitpunkt in den

Entwicklungsprozess integriert werden. Das subjektive Empfinden kann erfasst und bewertet sowie in der Weiterentwicklung berücksichtigt werden. Der in Abbildung (1) gezeigte Simulator basiert auf einem serienmäßigen Ford Fiesta. Das Lenkungs- und Bremssystem wurde für den Simulatorbetrieb mit Aktoren und Sensoren ausgestattet, um die Fahrereingaben in der Fahrzeugsimulation verfügbar zu machen und dem Fahrer Rückmeldung aus der Simulation – wie beispielsweise das Lenkmoment – bereitzustellen. Einer der Hauptvorteile bei der Verwendung eines Realfahrzeugs liegt darin, dass der Fahrerarbeitsplatz vollständig erhalten bleibt. Die Visualisierung der virtuellen Realität erfolgt in dieser Variante mit drei LCD-Bildschirmen. So wird ein Sichtblichwinkel von etwa 160° realisiert. Das Fahrerinformationssystem sowie alle weiteren relevanten Fahrereingaben können direkt über den CAN-Bus (Controller Area Network) abgegriffen werden. Durch die Integration eines 7-Zoll-LCD-Monitors im Fahrzeugcockpit können zukünftige

FIS-Konzepte bereits heute getestet werden.

Für das Empfinden des Menschen im Fahrzeug sind im Wesentlichen die visuellen, akustischen, haptischen, vestibulären und gegebenenfalls olfaktorischen Eindrücke und Interaktionen zwischen Mensch und Maschine entscheidend.² In Abbildung (2) wird die bidirektionale Kommunikation über die Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human-Machine-Interface – HMI) anhand einiger Beispiele aufgeschlüsselt. Zur Realisierung der Kommunikation verfügen sowohl Mensch als auch Maschine (Fahrzeug) über verschiedene Sende- und Empfangssysteme.

Im Bereich der Kundenakzeptanz kann der Entwickler so bereits frühzeitig auf Rückmeldungen und Ergebnisse aus Simulatorstudien reagieren. Das subjektive Empfinden wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren geprägt. So können im Bereich der haptischen Interaktion zwischen technischem System und Bediener schon kleinste Variationen der gewählten Frequenz oder Amplitude tiefgreifenden Einfluss auf das Fahrerempfinden zur Folge haben. In modernen Fahrzeugen wird der Fahrer oft schon heute durch die enorme Informationsflut gefordert. Hier müssen zukünftig adaptive, fahrsituationsabhängige Informationskonzepte eingeführt werden. Im Simulator kann die Vorabstimmung für spätere, reale Versuchsfahrten vorgenommen werden.

Anwendungsfelder von Fahrsimulatoren

Die Anwendungsfelder für Fahrsimulatoren sind vielfältig. Neben dem Einsatz in Forschung und Entwicklung ist ihr Einsatz bei der Ausbildung von Fahrschülern, zur Demonstration innovativer Systeme auf Messen, für Kundenpräsentationen oder zur Straßenplanung möglich. Die Anforderungen an den Simulator können in Abhängigkeit vom Anwendungsfall sehr

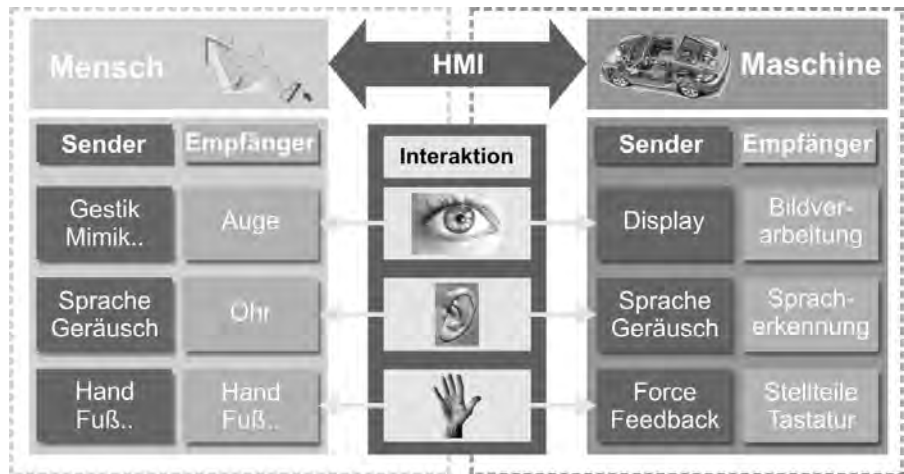
unterschiedlich sein. Während in der Entwicklung sehr komplexe Modelle und oftmals HIL-Simulation (Hardware in the Loop) eingesetzt werden, liegt für Kundenpräsentationen der Fokus vorrangig auf möglichst fotorealistischen Visualisierungen.

Simulation und Prüfstandkopplung

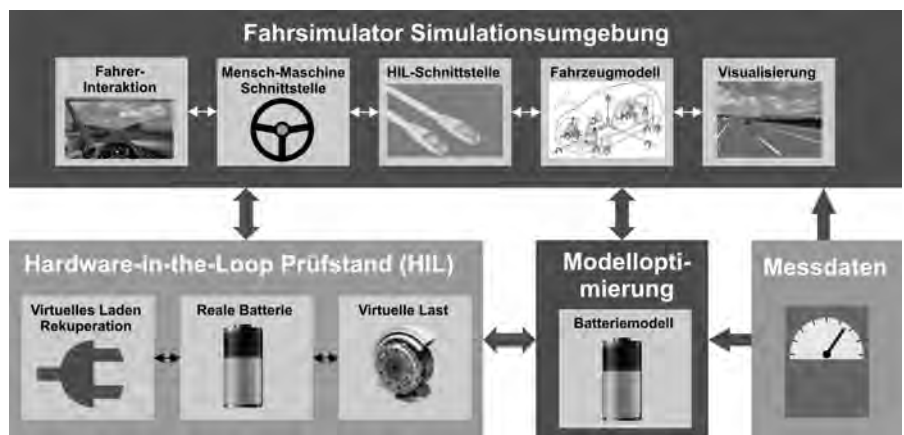
Durch die stetig steigende verfügbare Rechenleistung wird die Echtzeitberechnung immer komplexerer Simulationsmodelle möglich. Um die Gesamtfahrzeugsimulation für den Fahrsimulator zu realisieren, müssen die wesentlichen Komponenten des Fahrzeugs durch geeignete mathematische Modelle nachgebildet werden.³ Je nach Anwendungsfall können auch reale Komponenten als Hardware in die

Simulation (HIL – Hardware in the Loop) integriert werden.

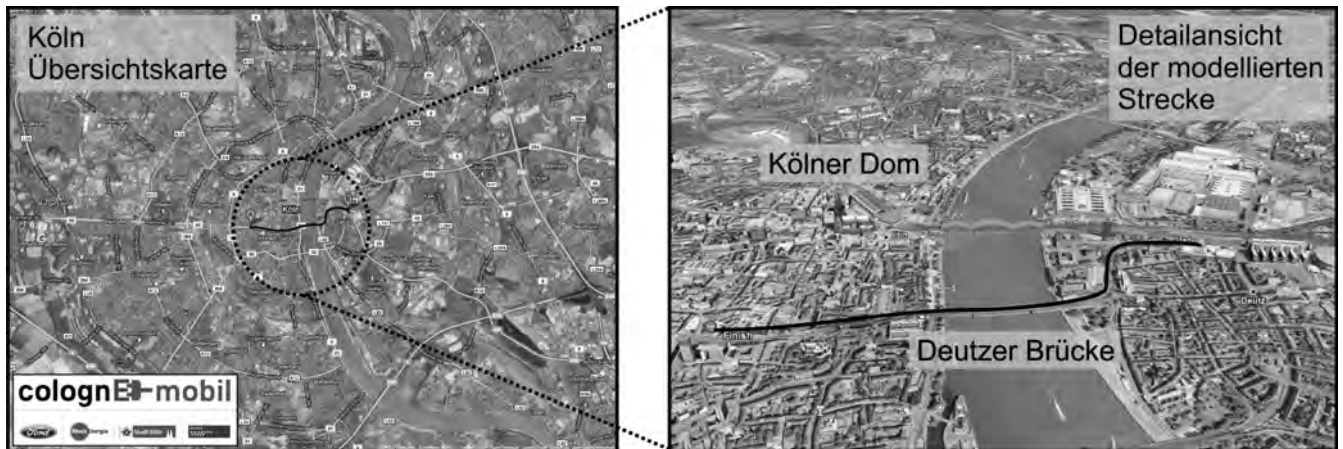
Die in Abbildung (3) gezeigte Simulations- und Prüfstandstruktur zeigt die Interaktionspfade zwischen Simulation und realen Komponenten. In der Fahrsimulator-Simulationsumgebung wird sowohl das gesamte Fahrzeug als auch die Umgebung simuliert und visualisiert. Weiterhin werden hier die Schnittstellen für die Fahrerinteraktion (z.B. Lenkrad, Gas-, Bremspedal und FIS) sowie auch die Schnittstellen zu den real verfügbaren Komponenten bereitgestellt. Immer wenn der menschliche Fahrer oder aber ein reales technisches System in die Simulation integriert werden soll, ist eine Echtzeitsimulation unverzichtbar. Bei der Entwicklung neuer Antriebsstrangkonzeppte für Elektrofahrzeuge stellt beispiels-



(2) Interaktion zwischen Mensch und Maschine (Fahrzeug) anhand ausgewählter Beispiele.



(3) Simulatorstruktur mit Prüfstandkopplung.



(4) Google Maps/Earth Darstellung des Innenstadtszenarios in Köln.
Quelle: Google

weise der Energiespeicher eine der zentralen Komponenten dar. Es besteht die Möglichkeit, über die HIL-Simulation die Batterie im Elektrofahrzeug zu testen, ohne dass diese real existiert. Die vom Fahrer im Fahrsimulator über Gas- und Bremspedal angeforderte Beschleunigungs- und Bremsleistung wird in der Gesamtfahrzeugsimulation in eine Leistungsanforderung für die Batterie umgesetzt. Über die Umsetzung auf einen Lastmotor kann dann die Batterie real entladen werden. Ebenso kann beim Bremsvorgang die in der Fahrdynamiksimulation berechnete Bremsleistung über eine geeignete Rekuperationsstrategie wieder anteilig in die Batterie zurückgespeist werden. Durch eine entsprechende Vernetzung können Hardwareprüfstand und Fahrsimulator beziehungsweise Echtzeitsimulation räumlich getrennt voneinander betrieben werden. Die Kopplung und der Datenaustausch erfolgen über das Intranet.

Die aus der Integration der realen Komponenten gewonnenen Erkenntnisse können dann beispielsweise genutzt werden, um bereits vorhandene Modelle zu optimieren, beziehungsweise entscheidende Parameter des Systems zu identifizieren. Auch wenn die Modellstruktur von einem Batteriemodell bereits festgelegt ist und alle benötigten mathematischen Zusammenhänge ausreichend beschrieben sind, sind

es doch oftmals die unbekannt Systemparameter, die zu Abweichungen zwischen realem Systemverhalten und Simulation führen. Die Modelloptimierung mit Messdaten – auch aus realen Fahrversuchen – kann die Modellqualität deutlich verbessern. Wenn das Modell validiert ist, besteht dann beispielsweise die Möglichkeit, Langzeittests oder Alterungserscheinungen effizient und realitätsnah zu simulieren.

Erstellung der virtuellen Realität für den Fahrsimulator

Die Echtzeitvisualisierung ist ein essentieller Bestandteil des Simulators. Zur Realisierung einer möglichst tiefen Immersion wird die Visualisierung mit einer leistungsfähigen 3D-Game-Engine durchgeführt. Für die Erstellung der virtuellen Realität bestehen verschiedene Möglichkeiten. Die virtuellen Strecken können frei auf Basis der Richtlinien für die Anlage von Straßen in Deutschland⁴, auf Basis von Navigationskarten, durch GPS-Vermessung oder unter Verwendung der Google-Architektur erstellt werden.⁵ Weiterhin können virtuelle Verkehrsteilnehmer – wie beispielsweise Fahrzeuge oder Fußgänger – integriert werden. Das Verhalten der Verkehrsteilnehmer kann individuell parametrisiert werden. Von großer Bedeutung für eine realistische Simulation ist die Kopplung

zwischen Visualisierung und Echtzeitsimulation aller Fahrzeuge und Verkehrsteilnehmer. So muss jeder Simulationsteilnehmer relativ zur virtuellen Straße erfasst werden, um die Bewegung physikalisch korrekt simulieren zu können. Darüber hinaus können Effekte wie Wetter, Wind, Tageszeit, Sichtweise oder beispielsweise die Wolkenbewegung beeinflusst werden. Die Qualität der virtuellen Welten muss sowohl höchsten visuellen als auch physikalischen Ansprüchen genügen. Um die Fahrdynamik moderner Elektrofahrzeuge – auch mit zukünftigen Fahrerassistenzsystemen – zu realisieren, müssen die Straßencharakteristik und die Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller Verkehrsteilnehmer möglichst genau verfügbar sein. Im Folgenden werden zwei Beispiele für die Erstellung einer Virtual Reality für den Fahrsimulator aufgezeigt.

colognE-mobil-Innenstadtszenario in Köln (Rheinüberquerung über die Deutzer Brücke)

Der in Abbildung (4) dargestellte Streckenverlauf wurde auf Basis der von Google zur Verfügung gestellten Informationen und von SRTM-Satellitendaten (NASA-Mission – Shuttle Radar Topography Map) im Fahrsimulator rekonstruiert. Die Gesamtstreckenlänge beträgt etwa zwei Kilometer und reicht von den

Constantin-Höfen in Deutz über die Deutzer Brücke bis hin zum Kölner Neumarkt.

Die Strecke kann im Fahr Simulator mit einem virtuellen Fahrzeug abgefahren werden. Dabei können sowohl Fahrzeugtyp als auch Antriebsstrangkonzzept frei definiert werden. So kann beispielsweise während der Fahrt zwischen verbrennungsmotorischem, hybridem oder batterieelektrischem Antrieb umgeschaltet werden. Der Proband erhält dann ein direktes Feedback über die Beschleunigungscharakteristik, die Anzeigekonzepte im Fahrzeugcockpit sowie die Geräuschentwicklung des Fahrzeugs.

Im Rahmen des *colognE-mobil* Projektes kann die Strecke im Fahr Simulator mit virtuellen Elektro-Kleintransportern (Ford Transit BEV) abgefahren werden. Somit ist Elektromobilität in einem real vorhanden urbanen Szenario schon heute virtuell erlebbar. Aufgrund der Skalierbarkeit der Ergebnisse können zukünftig Hochrechnungen für Nordrhein-Westfalen erfolgen.

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Erstellung der virtuellen Welt wird in Abbildung (5) gezeigt. Die virtuelle Realität – also die Visualisierung des Szenarios – wird unter Verwendung von Google Sketchup (3D-Gebäude) sowie aus Satellitenbildern der SRTM-NASA Mission gewährleistet. Die physikalische Modellierung der Straße erfolgt durch die Umsetzung der GPS-Koordinaten (Längen-, Breitengrad, Höheninformation) in kartesische Koordinaten. Mit ausreichend großem Modellierungsaufwand ist es somit theoretisch möglich, vollständige Städte im Simulator zu rekonstruieren und virtuell „erfahrbar“ zu machen.

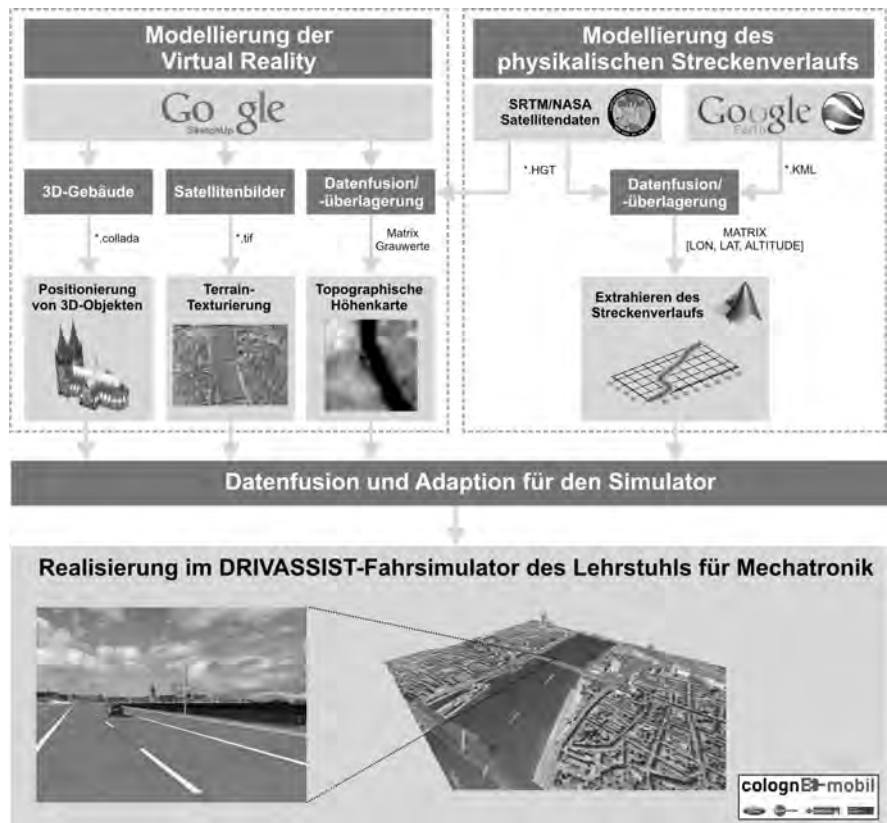
In Abbildung (6) wird die Überquerung des Rheins auf der Deutzer Brücke im direkten Vergleich zwischen Google Street View (links) und dem Fahr Simulator dargestellt. Im Hintergrund sind der Kölner Dom, die Kirche Groß St. Martin sowie die Bahnbrücke kurz vor dem

Hauptbahnhof zu erkennen. Durch die exakte Positionierung der charakteristischen Gebäude sowie die Verwendung von Satellitenbildern für die Texturierung ist der Immersionsgrad erstaunlich hoch.

Autobahnabschnitt A40 von AS Duisburg-Kaiserberg bis AS Essen-Zentrum

Die beiden Campus der Universität Duisburg-Essen werden größtenteils durch den so genannten Ruhr-

schnellweg (Bundesautobahn A40) miteinander verbunden. Die Autobahnstreckenlänge beträgt – vom Autobahnkreuz Kaiserberg bis zur Ausfahrt Essen-Zentrum – etwa 15 Kilometer (s. Abb. 8). Die Geschwindigkeitsbeschränkungen liegen zwischen 80 und 120 km/h. Da dieser Autobahnabschnitt die Verkehrssituation im Ruhrgebiet sehr gut repräsentiert, wurde dieser exakt mit einem GPS-Logger und einer Kamera vermessen und für die Anwendung im Fahr Simulator rekonstruiert.



(5) Erstellung des Innenstadtszenarios von Köln im Fahr Simulator.



(6) Vergleich der virtuellen Fahrt über die Deutzer Brücke in Google Street View und im Simulator.

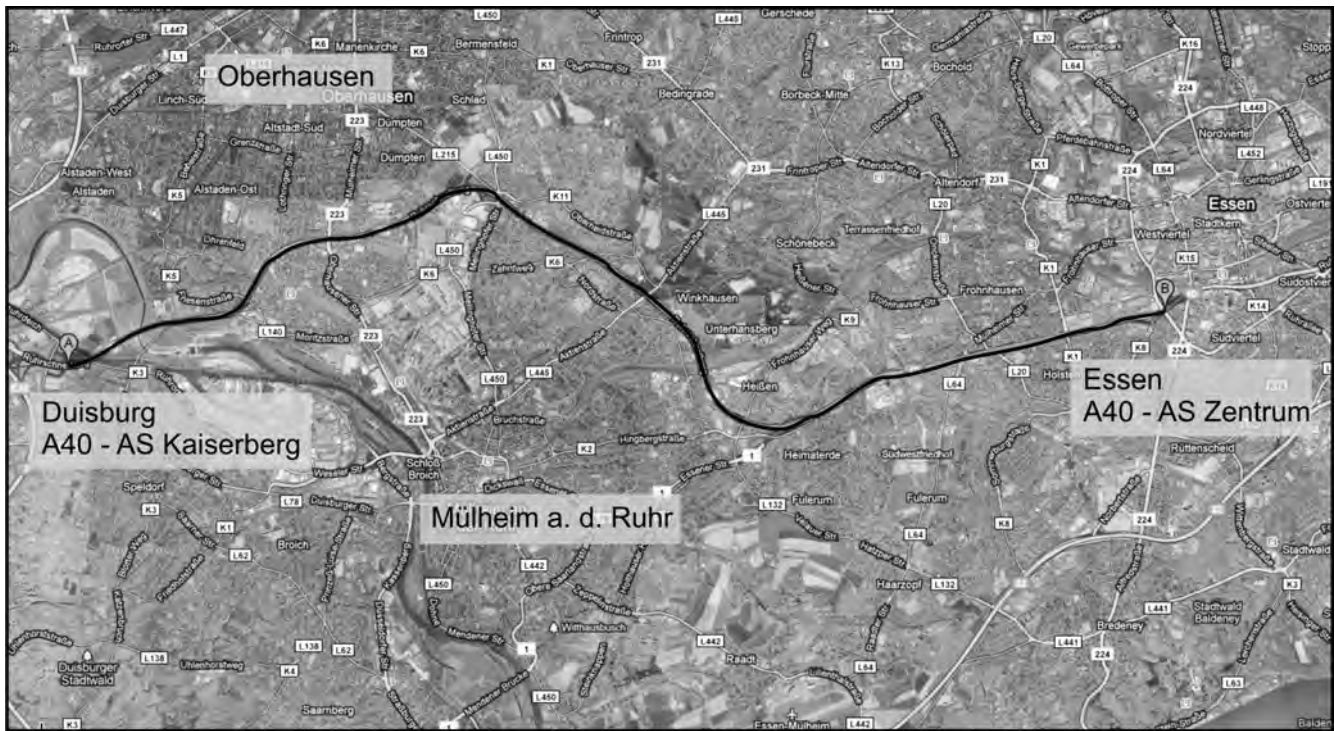


(7) Fahrersicht durch das virtuelle Cockpit auf dem Autobahnabschnitt der A40 im DRIVASSIST-Simulator.

In Abbildung (7) wird beispielhaft eine Fahrsituation aus dem Simulator dargestellt. In dieser Studie wurden innovative Konzepte für das Fahrerinformationssystem getestet. Zusätzlich zu den serienmäßig visualisierten Informationen – wie beispielsweise der Fahrzeuggeschwindigkeit – wird der Fahrer hier über den aktuellen Ladezustand (State of Charge), die Restreichweite, den durchschnittlichen Energieverbrauch in kWh/100 km sowie die Stromkosten pro 100 Kilometer in Abhängigkeit des aktuellen Strompreises informiert. In herkömmlichen – verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen – wird der Fahrer oftmals bereits bei einer Restreichweite von ungefähr 100 Kilometern zum Beispiel durch das Einblenden einer Zapfsäule im Display und einen Signalton gewarnt. Die Fahrer-Informationsstrategie muss für Elektrofahrzeuge neu konzipiert werden. Viele der derzeit bereits auf dem Markt befindlichen Elektrofahrzeuge haben Reichweiten von nicht viel mehr als 100 bis

150 Kilometern. Der Fahrer würde somit bereits kurze Zeit nach dem Aufladen aufgefordert werden, eine Ladesäule anzusteuern. Da dies zu einer starken Verunsicherung des Fahrers führen würde, müssen an dieser Stelle neue Konzepte erarbeitet werden. Durch Verwendung von hochgenauen Navigationskarten und der zunehmenden Qualität der Verkehrsflussmessung über TMCpro (Traffic Message Channel) inklusive Floating Car Data (FCD) kann mit modellprädiktiven Konzepten sowohl die Restreichweite als auch die energetisch optimale Navigationsroute immer präziser bestimmt werden. TMCpro greift direkt auf etwa 4.000 automatische Datensensoren an Autobahnbrücken, auf etwa 5.500 in die Fahrbahn integrierte Sensorschleifen sowie auf mehr als 50.000 mit FCD ausgestattete Fahrzeuge zu. Die Verlässlichkeit der Restreichweitenanzeige kann so gesteigert und die Aufforderung, eine Ladesäule anzusteuern, auch in Hinblick auf Verfügbarkeit der Infrastruktur, intelligent gestaltet werden.

Zusätzlich dazu werden am Lehrstuhl für Mechatronik auf dieser Strecke innovative Fahrerassistenzsysteme im Fahrsimulator entwickelt, bevor diese in realen Prototypfahrzeugen getestet werden. Dazu ist das virtuelle Fahrzeug mit Sensoren ausgestattet, die sowohl das Fahrerverhalten als auch die Umwelt überwachen. Zu nennen sind an dieser Stelle beispielsweise Lenkmomentsensoren, Beschleunigungssensoren, Raddrehzahlsensoren, Kameras, Ultraschallsensoren, RADAR, LIDAR oder Laserscanner. Bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist es von essentieller Bedeutung, den menschlichen Fahrer und sein Empfinden so früh wie möglich in der Systementwicklung zu berücksichtigen. Im Fahrsimulator können in Probandenstudien Assistenzsysteme wie beispielsweise der Spurhalteassistent, der Automatische Notausweichassistent, der Automatische Notbremsassistent, der Kreuzungsassistent oder der Stauassistent getestet werden. Der Vorteil einer Simulatorstudie liegt insbesondere



(8) Google Maps Darstellung der A40-Autobahnstrecke von Duisburg nach Essen.

darin, dass für jeden Probanden identische Bedingungen bezüglich Verkehrssituation, Fahrdynamik, Wetter, Akustik et cetera präsentiert werden können. Weiterhin können auch hochdynamische Fahrsituationen – wie sie beispielsweise beim automatischen Notausweichen auftreten können – gefahrlos erprobt werden. So können sowohl Entwicklungszeit als auch -kosten reduziert werden.

Methoden zur Bestimmung der Fahrzeugeffizienz

Grundsätzlich bestehen verschiedene Möglichkeiten, die Effizienz eines Fahrzeugs zu bewerten. Im Wesentlichen werden Rollenprüfstandversuche, Realfahrten auf repräsentativen Strecken, Offline-Simulationen und Fahrsimulator/HIL-Simulationen durchgeführt.

Fahrzyklen und Normverbräuche

Die vom Hersteller angegebenen Normverbräuche basieren auf Standardfahrzyklen, wie beispielsweise

dem NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus), der FTP-75 (Federal Test Procedure, USA) oder dem 10/15-Mode-Test (Japan).

Der Anstieg des Verkehrsaufkommens und die damit einhergehende erhöhte Umweltbelastung machen eine Begrenzung und Kontrolle der Fahrzeug-Emissionen nötig. Um den Kraftstoff- beziehungsweise Energieverbrauch und die resultierenden Schadstoffemissionen von Fahrzeugen zu messen, werden oftmals Norm-Fahrzyklen verwendet. Dabei legt ein genormter Fahrzyklus genau fest, unter welchen Bedingungen der Verbrauch und die Emissionen ermittelt werden müssen. Üblicherweise wird ein Geschwindigkeitsverlauf über Zeit sowie beispielsweise Umgebungstemperatur vorgegeben. Der Geschwindigkeitsverlauf wird dann auf einem Rollenprüfstand von einem realen Fahrer nachgefahren. Dabei werden sämtliche Abgase gesammelt und auf dieser Basis der Verbrauch sowie die CO₂-Emissionen ermittelt. Fahrzyklen sind erforderlich, um die Verbräuche

unterschiedlicher Fahrzeuge objektiv miteinander vergleichen zu können.

Bevor der NEFZ als Fahrzyklus in Europa festgelegt wurde, existierten in Deutschland und Europa andere Normen zur Messung des Verbrauchs und der Emissionen von Personenkraftwagen. Bis 1978 wurde der Verbrauch von Fahrzeugen nach der DIN 70020 gemessen. Diese Norm schrieb vor, dass das Fahrzeug mit 75 Prozent der Höchstgeschwindigkeit, jedoch mit maximal 110 km/h und konstanter Geschwindigkeit zu fahren ist. Zu diesem Wert wurden dann 10 Prozent, repräsentativ für „instationäres“ Fahren, zugerechnet.

In der Zeit von 1978 bis 1996 wurden Pkw-Emissionen und der Verbrauch mittels des „Drittmix“ bestimmt. Dieser Zyklus bestand aus drei Teilen: Das erste Drittel bildet der heutige ECE 15-Zyklus (Abb. 9), die weiteren beiden Drittel werden aus konstanten Fahrten bei 90 km/h (Landstraße) und 120 km/h (Autobahn) zusammengesetzt. 1996 wurde der Zyklus dann überarbeitet, um realistischer Ergebnisse zu liefern und als Neuer Europäischer Fahrzyklus

(NEFZ) in Europa eingeführt. Dieser hat bis heute Gültigkeit.

Der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ, Abb. 9) ist ein synthetischer Zyklus, der sich in insgesamt fünf Teilbereiche – vier identische, aneinandergereihte Stadtzyklen und ein Überlandzyklus – gliedert. Im Stadtzyklus (ECE 15 – Economic Commission for Europe 15) wird eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h erreicht und es wird zwölfmal vollständig angehalten. Der Überlandzyklus (EUDC – Extra-Urban Driving Cycle) soll eine Überlandfahrt mit höheren Geschwindigkeiten und ohne Fahrunterbrechungen simulieren. Alle weiteren Eckdaten bezüglich der auftretenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen können Abbildung (9) entnommen werden. Im Fall, dass ein Fahrzeug die Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h nicht erreichen kann – was bei einem Elektrofahrzeug durchaus realistisch ist – wird der Überlandteil durch den so genannten EUDCL (Extra-Urban Driving Cycle Low Power) substituiert. Hier ist die Maximalgeschwindigkeit auf 90 km/h reduziert. Erreicht ein Fahrzeug die Höchstgeschwindigkeit nicht, so muss diese Phase mit Fahrzeughöchstgeschwindigkeit absolviert werden.

Bevor ein Fahrzeug den NEFZ auf dem Rollenprüfstand absolviert, wird dieses acht Stunden auf 20 °C vorgeheizt. Außerdem werden alle Hilfsaggregate, wie beispielsweise Klimaanlage oder Heizung abgeschaltet. Lediglich die zur Fortbewegung relevanten Nebenverbraucher (Steuergeräte, Sensoren etc.) bleiben eingeschaltet. Zwischen dem im NEFZ ermittelten Normverbrauch und den Praxisverbräuchen entsteht somit selbstverständlich ein großer Unterschied.

Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird diese Vorgehensweise schon sehr häufig kritisiert. Bei Fahrzeugen, die über einen teilelektrischen Antriebsstrang verfügen, sind die heutigen Fahrzyklen jedoch nahezu unbrauchbar. Wird

beispielsweise ein Hybridfahrzeug im NEFZ getestet, so ist nach Norm erlaubt, dass die Traktionsbatterie bei Beginn voll geladen ist. Es ist somit durchaus realistisch, dass ein Hybridfahrzeug einen Teil des Zyklus rein elektrisch absolviert. Da die verbrauchte elektrische Energie, um das Fahrzeug zu beschleunigen, im Gesamtverbrauchsergebnis jedoch in keiner Weise auftaucht, entstehen bei der Hochrechnung auf 100 Kilometer utopische (niedrige) Durchschnittsverbräuche. Beim Einsatz (teil-)elektrischer Antriebsstränge wird auch die Wirkungsgradkette für die Stromerzeuger beziehungsweise „well-to-wheel“ wichtig. Diese wird ebenfalls nicht berücksichtigt.

Normzyklus und Simulation beim Ford Transit BEV im cologne-mobil Projekt

Im Rahmen des *cologne-mobil* Projektes wurde ein Simulationsmodell für den elektrischen Antriebsstrang des dort eingesetzten Ford Transit BEV aufgebaut und anhand des NEFZ evaluiert. Die Fahrzeuge sind mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, so dass im Fahrbetrieb diverse physikalische Zustandsgrößen erfasst und automatisch auf einem zentralen Server gespeichert werden können. Insbesondere im elektrischen Antriebsstrang werden die Daten bis auf Zellebene verfügbar gemacht. Die Messdaten werden unter anderem genutzt, um Rückschlüsse auf die notwendige Infrastruktur, das Nutzerverhalten und ein Simulationsmodell für das Gesamtfahrzeug aufzubauen. Das Simulationsmodell kann zukünftig für die weiteren Testfahrzeuge (Ford Transit Connect und Ford Focus) adaptiert werden. Weiterhin ermöglicht die modulare Modellstruktur auch die Simulation von seriellen und parallelen Hybridfahrzeugen. Aufgrund der Skalierbarkeit der Modelle können dann eine Vielzahl von Elektrofahrzeugen virtuell in Köln simuliert werden.

Im *cologne-mobil* Projekt wurde der NEFZ mit dem Transit BEV auf dem Rollenprüfstand abgefahren. Die Ergebnisse wurden genutzt, um die Modellparameter so zu optimieren, dass möglichst genau die reale Fahrzeugcharakteristik simuliert werden kann. In Abbildung (10) ist der Vergleich zwischen der Messung auf dem Rollenprüfstand und der Simulation für die Leistung des Elektromotors und den Batterieladegrad dargestellt. Sowohl die Gradienten und Spitzenleistungen des Elektromotors als auch der Ladezustand der Batterie zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Modellqualität ist nach der Optimierung erstaunlich hoch, so dass die Korrelation zwischen realem Verhalten und Simulation gewährleistet werden kann. Da das Modell echtzeitfähig ist, kann dieses auch für die virtuelle Testfahrt mit dem Fahrsimulator eingesetzt werden.

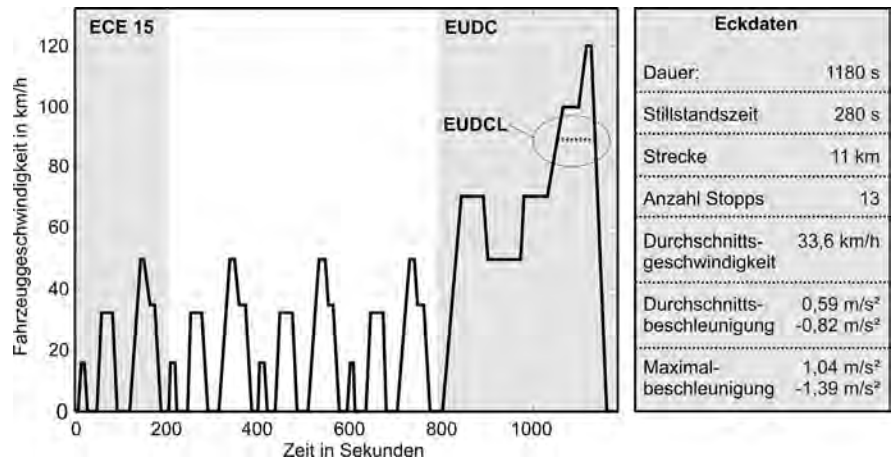
Vergleich von Realverbrauch, Simulator- und Fahrzyklusergebnis

Der mit einem Fahrzeug im Alltagsbetrieb erreichbare Verbrauch weicht deutlich von den Normverbräuchen ab. Dies kann auf die geringen Beschleunigungswerte und hohen Fahrtanteile mit konstanter Geschwindigkeit zurückgeführt werden. Im direkten Vergleich mit einer realen Fahrt, die auf der Strecke in der Kölner Innenstadt (Abb. 4) durchgeführt wurde, wird sofort deutlich, dass der Geschwindigkeitsverlauf wesentlich dynamischer ist. Die maximal auftretenden Beschleunigungen und Verzögerungen sind um den Faktor drei bis vier höher. Insbesondere Motorlaständerungen, unter anderem erkennbar durch stark nicht-lineare Geschwindigkeitsverläufe über der Zeit, haben erhöhte Verbräuche zur Folge. Die gestrichelte Linie markiert die Fahrt eines Probanden auf identischer Strecke im Fahrsimulator. Aufgrund der geringeren Verkehrsdichte, die bei

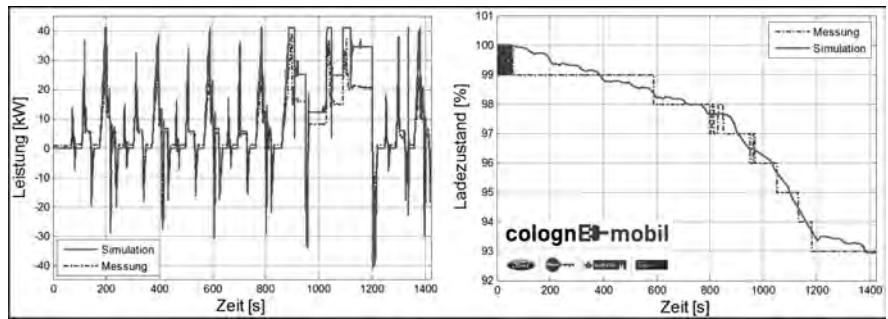
diesem Test eingestellt wurde, zeigt sich eine höhere Endgeschwindigkeit im Verlauf. Die Ampelphasen zeigen im Versuch eine gute Übereinstimmung, so dass sich ähnliche Brems- und Standphasen ergeben. Die Durchschnittsgeschwindigkeit im Simulator ist etwas höher, so dass die virtuelle Fahrt ungefähr 13 Sekunden kürzer ist. Die charakteristischen Eckdaten beider Fahrten können Abbildung (11) entnommen werden.

Weiterhin haben Zusatzverbraucher bei Elektrofahrzeugen – wie die elektrische Heizung, die Klimaanlage oder die elektrische Servolenkung – einen großen Einfluss auf die Reichweite beziehungsweise den Energieverbrauch. Laut VDE Studie „Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf“ werden durchschnittlich 2.470 Watt für elektrische Zusatzverbraucher benötigt. Für ein Elektrofahrzeug aus der Kleinwagenklasse können somit Mehrverbräuche von bis zu 45 Prozent auftreten. Die Referenz für diese Hochrechnung bildet an dieser Stelle ein vollständig abgeschaltetes Bordnetz.

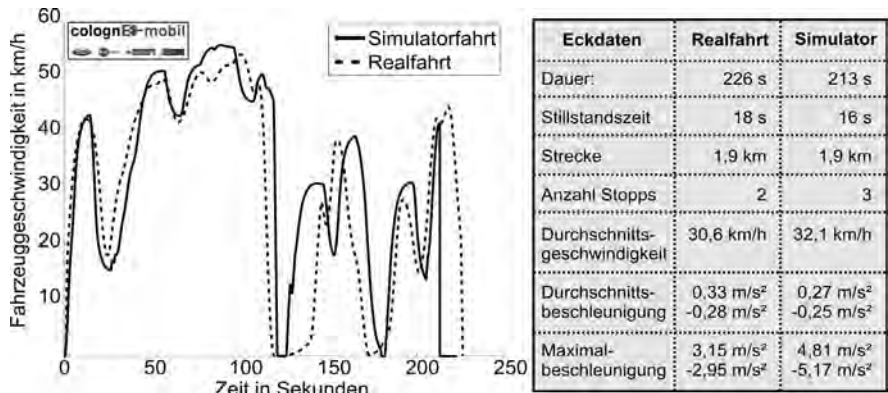
Auch die optimalen Klimabedingungen im NEFZ tragen zum geringen Verbrauch bei. Batterieelektrische Fahrzeuge können nicht repräsentativ mit dem NEFZ bewertet werden, an dieser Stelle müssen neue Bewertungsnormen geschaffen werden. Bei Hybridfahrzeugen darf die Batterie bei Beginn des NEFZ vollgeladen sein. Da nur sehr geringe Leistungen – in Abhängigkeit von Fahrzeuggewicht und Antriebsstrang meist weniger als 30 PS – für das Absolvieren des NEFZ benötigt werden, können die Fahrzeuge zumindest im Stadtzyklus vorerst rein elektrisch fahren. Die dabei verbrauchte elektrische Energie – welche unter Berücksichtigung des deutschen Strom-Mixes keinesfalls CO₂-neutral produziert wird – bleibt im Normverbrauch gänzlich unberücksichtigt. Die Abweichungen vom Normverbrauch für verbrennungsmoto-



(9) Geschwindigkeitsverlauf des Neuen Europäischen Fahrzyklus.



(10) Vergleich der Elektromotorleistung (links) und des Batterieladezustands (rechts) für den NEFZ auf dem Rollenprüfstand (Messung) und in der Simulation.



(11) Vergleich der Geschwindigkeitsprofile bei der realen Fahrt und der Simulatorfahrt auf der Teststrecke in Köln.

risch betriebene Fahrzeuge im Durchschnitt der letzten fünf Jahre – basierend auf der Auswertung verschiedener Automobilzeitschriften – liegen zwischen 12 und 19 Prozent. Der resultierende geringere Mehrverbrauch im Vergleich zum Elektrofahrzeug resultiert unter anderem daraus, dass die Abwärme

des Verbrennungsmotors für Sekundäranwendungen verwendet werden kann. Während im Elektrofahrzeug – aufgrund des hohen Wirkungsgrades – rein elektrisch geheizt werden muss, kann beim verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug die Abwärme zum Heizen genutzt werden.

Auch in der virtuellen Fahrt im Fahrsimulator zeichnet sich die höhere Fahrzeuglängsdynamik im Vergleich zum NEFZ ab. Natürlich ist dies auch stark von Verkehrssituation, Verkehrsleitsystemen und weiteren Umweltbedingungen abhängig. Im Simulator besteht die Möglichkeit, auch das individuelle Fahrverhalten verschiedener Probanden zu charakterisieren und somit auch diesen Einfluss auf den Energiebedarf sowohl für verbrennungsmotorisch als auch für (teil-)elektrische Fahrzeuge zu identifizieren.

Fazit

Die zukünftigen Fahrzeugkonzepte mit (teil-)elektrischen Antrieben sind eine neue Herausforderung für die Bewertung unterschiedlicher Antriebskonzepte. Hierbei werden die Einflüsse von Fahrer, Umgebung und der Betriebsstrategie noch wichtiger als bei konventionellen Antrieben. Aus diesem Grund wird es wichtig, verschiedene Fahrzeugkonzepte bereits in einem frühen Entwicklungsstadium unter Berücksichtigung sämtlicher relevanter Randbedingungen zu erproben und zu optimieren. Hierfür sind Fahrsimulatoren ein geeignetes Instrument.

Der am Lehrstuhl für Mechanik der Universität Duisburg-Essen mit dem Entwicklungssystem DRIVASSIST aufgebaute Fahrsimulator gestattet neben der realitätsnahen Erprobung neuartiger Fahrerassistenzsysteme auch den Test teil- und vollelektrischer Antriebssysteme unter Berücksichtigung des Fahrerverhaltens, der Umwelt und der Betriebsstrategie. Im Projekt *colognE-mobil* wurden durch Einsatz des Fahrsimulators „realitätsnähere“ Fahrzyklen als der NEFZ entwickelt, die dazu beitragen, Optimierungen in Ladeinfrastruktur und Batteriegröße durchzuführen.

Summary

The growth of hybrid and battery-powered electric vehicles requires new development strategies. The changes in the drive train and energy storage systems have an important impact on the automobile. The main changes can be found in reduced cruising range, new engine characteristics, reduced sound emissions, new charging infrastructure and times, driver information systems, as well as new design procedures for innovative interior concepts. From the customer point of view, new technologies often give rise to suspicion. Thus, it becomes important to integrate the driver in the early development process to obtain subjective feedback in terms of functionality and driver acceptance.

In this article, a modular and flexible architecture for the development of automotive systems is presented. The central component is a driving simulator architecture, which allows the simulation of different electric or semi-electric vehicles in real time. This real time capability allows the integration of the driver as well as real technical components like the battery system (hardware in the loop) in the simulation. This facilitates driving a virtual electric vehicle with the real target propulsion system. From the results, optimizations of the system can be carried out with respect to human perception.

Two virtual test tracks, one highway section between the campus of the University of Duisburg-Essen and an urban route in Cologne, are designed in the simulator. Therefore, data from Google and NASA satellite images are processed to generate the virtual reality for the simulator. The results in terms of energy consumption, which results from the virtual test drives, can be compared to standard drive cycles. Furthermore, the impact of new driver information systems and

the characteristics of the electrified drive train on the human driver can be studied.

Anmerkungen

- 1) Hiesgen, Unterreiner, Hesse, Brandt, Schramm
- 2) Jürgensohn, Maurer
- 3) Wallentowitz, Schramm, Hiller, Bardini, Hiesgen
- 4) RAS-L/RAS-Q
- 5) Feldmann, Hiesgen

Literatur

- Brandt, Thorsten; Hiesgen, Gregor: Virtuelle Testfahrt, Fahrsimulator-Konzept schließt Lücke zwischen Simulation und realen Versuchen mit Prototypen, in Automobilkonstruktion – Fachwissen für Entwicklungsingenieure, November 2009.
- Feldmann, Sebastian; Hiesgen, Gregor: Automatisierte Generierung von realitätsgetreuen Umgebungsszenarien für Fahrsimulatoren, to be published: 3. Wissenschaftsforum mobilität, Duisburg 2011.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Straßenentwurf: Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung RAS-L, FGSV Verlag, 1995.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Straßenentwurf: Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitte RAS-Q, FGSV Verlag, 1996.
- Hesse, Benjamin; Hiesgen, Gregor; Brandt, Thorsten; Schramm, Dieter: Ein Fahrsimulator als Werkzeug zur frühzeitigen Eigenschaftsabsicherung von Mensch-zentrierten mechatronischen Systemen, in Tagung Mechatronik 2009 – Komplexität beherrschen, Methoden und Lösungen aus der Praxis für die Praxis, Wiesloch 2009.
- Hiesgen, Gregor; Unterreiner, Michael; Hesse, Benjamin; Brandt, Thorsten; Schramm, Dieter: Ein Werkzeug zur frühzeitigen Integration des Fahrers in den Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen, in 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz, VDI-Berichte 2048, Wolfsburg 2008.
- Hiesgen, Gregor; Hesse, Benjamin: A Multifunctional Tool for Designing the HMI of Mechatronic Products, in Automotive UI 2009, Essen 2009.
- Jürgensohn, Thomas: Hybride Fahrermodelle, PHD Thesis, Technische Universität Berlin 1997.
- Maurer, Markus: Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, Springer 2005.

- Schramm, Dieter; Hiller, Manfred; Bardini, Roberto: Modellierung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, Springer 2010.
- Schramm, Dieter; Lalo, Wildan; Unterreiner, Michael: Application of Simulators and Simulations for the Functional Design of Mechatronic Systems, International Conference on Robotics, Cluj-Napoca, Romania, 2010.
- VDE-Studie: Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf – Studie der Energietechnischen Gesellschaft VDE (ETG), 2010.
- Wallentowitz, Henning: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Vieweg 2006.
- Wallentowitz, Henning: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges, Vieweg 2010.

Die Autoren

Dieter Schramm studierte von 1974 bis 1980 Mathematik in Stuttgart, war von 1981 bis 1986 wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl B für Mechanik der Universität Stuttgart und promovierte dort 1986 mit dem Thema „Ein Beitrag zur Dynamik reibungsbehafteter Mehrkörpersysteme“. Schramm war von 1986 bis 1992 Gruppenleiter der Simulationstechnik bei der Robert Bosch GmbH in Stuttgart und leitete von 1992 bis 1997 die Abteilung „Neue Systeme“ und war Assistent der Geschäftsführung Kraftfahrzeugsysteme sowie von 1997 bis 1999 Leiter der Hauptabteilung Neuentwicklung Starter. Danach war Dieter Schramm von 1999 bis 2001 Entwicklungsleiter bei Tyco Electronics und ab 2001 bis 2004 Geschäftsführer und Produktbereichsleiter Tyco Electronics Pretema GmbH, Pforzheim. Seit Oktober 2004 hat er den Lehrstuhl Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen mit etwa 20 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Stipendiatinnen und Stipendiaten inne. Dieter Schramm ist seit 2006 Dekan der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen. Seit November 2007 ist er Vorsitzender des Verwaltungsrates des IUTA. Zudem ist Schramm Mitherausgeber der Zeitschrift *memo*.

Gregor Hiesgen studierte von 2004 bis 2007 Ingenieurwissenschaften in der Fachrichtung Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen. Seit 2007 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen. Am Lehrstuhl für Mechatronik betreut Gregor Hiesgen die Projekte „Fahrsimulatorentwicklung“, „Fahrerassistenzsysteme“ und „Elektromobilität“. Zudem ist er fachlicher Beirat für das Formula Student Electric Team der Universität.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/73878

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210210-115805-4

Alle Rechte vorbehalten.