

Schlussbericht zum Verbundprojekt

ZuSE - Zuverlässigkeit und Sicherheit von Elektrofahrzeugen

Teilvorhaben:

Kollisionsvermeidung und Fahrstabilisierung von Elektrofahr-
zeugen durch Fahrerassistenzsysteme

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Förderkennzeichen: 16N12548K

Projektlaufzeit: 01.01.2013 bis 30.06.2016

Berichtszeitraum: 01.01.2013 bis 30.06.2016

Erstellungsdatum: 08.12.2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
1 Aufgabenstellung	7
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
2.1 IVK	8
2.2 ISV	8
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	9
4.1 Wissenschaftliche Situation.....	9
4.2 Bisherige Arbeiten des Antragsstellers.....	10
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
6 Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	11
6.1 Erfassung von Lastkollektiven für Elektrofahrzeuge.....	11
6.2 Echtzeitsimulation des E-Fahrzeugs und seiner Umgebung	16
6.3 Fahrerassistenzsysteme für E-Fahrzeuge.....	45
6.4 Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz	56
6.5 Beispielhafte Umsetzung im Fahrsimulator	60
7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	73
8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	73
9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	73
10 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	74
11 Referenzen.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Eyetracking-System und Messbox.....	12
Abbildung 2: Geschwindigkeitsverläufe bei verschiedenen Geschwindigkeitsbeschränkungen	13
Abbildung 3: Statistische Auswertung der Geschwindigkeitsüberschreitungen.....	14
Abbildung 4: Szenerie am in der Studie ausgewerteten Zebrastreifen.....	14
Abbildung 5: Geschwindigkeitsverlauf am Zebrastreifen ohne Fußgänger	15
Abbildung 6: Geschwindigkeitsverlauf am Zebrastreifen mit Fußgänger	15
Abbildung 7: Veränderung der Achslasten in Abhängigkeit der Batteriekapazität..	16
Abbildung 8: Hardware Akustik	17
Abbildung 9: Schema Regelkreis Schwingungsanregung am Fahrersitz. V, C: Spannungs-/ Ladungssignal; a, F: Beschleunigung/Kraft der Schwingung; xPC: echtzeitfähiger Target-PC	19
Abbildung 10: Signalausgabe und Beschleunigungsmessung für 20 Hz-Sinussignal	19
Abbildung 11: Gemessene Übertragungsfunktion für Sinussignale von 10–200 Hz für a) Sollsignal und Signalausgabe am DA-Wandler, b) Beschleunigungsmessung an Schwingerreger und Fahrersitz.....	20
Abbildung 12: Schwingungssynthese Überfahrt Bremsschwelle.....	21
Abbildung 13: Schwingerreger Fahrzeugunterboden im eingebauten Zustand und CAD-Konstruktion mit Trägerplatte und Gleitlager	22
Abbildung 14: Schwingerreger Lenkrad im eingebauten Zustand	22
Abbildung 15: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeugen bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten.....	23
Abbildung 16: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeug und benzinbetriebenem Fahrzeug bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten	24
Abbildung 17: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeug und dieselbetriebenem Fahrzeug bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten.....	25
Abbildung 18: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeug und dieselbetriebenem Fahrzeug ohne Motorbetrieb bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten.....	25
Abbildung 19: Frequenzspektrum Beschleunigungssensor am Fahrersitz eines dieselmotorisch betriebenen Fahrzeugs bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit.....	27

Abbildung 20: Frequenzspektrum Beschleunigungssensor am Fahrersitz eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit.....	28
Abbildung 21: Frequenzspektren Beschleunigungssensor am Fahrersitz eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit.....	28
Abbildung 22: Zeitverlauf des Frequenzspektrums (STFT) bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit.....	29
Abbildung 23: Zeitverlauf des Frequenzspektrums (STFT) bei beschleunigter Fahrt	30
Abbildung 24: Manipulation des Wetters.....	31
Abbildung 25: Imagegenerator Sick Laserscanner.....	32
Abbildung 26: Kameraprüfstand.....	33
Abbildung 27: Kameraprüfstand – SiL.....	34
Abbildung 28: Kameraprüfstand – HiL Half Mode	34
Abbildung 29: Kameraprüfstand – HiL Full Mode.....	35
Abbildung 30: Vergleich des Höhenplans eines Streckenabschnittes aus TT-SIB®-Daten und messtechnisch erfassten Daten (Messfahrzeug)	36
Abbildung 31: Ablauf der Datenverarbeitung zur Erstellung von Straßen in OpenDRIVE®-Format aus CAD-geplanten Straßen	37
Abbildung 32: Messfahrzeug zur Erfassung der Strecken- und Fahrbahnoberflächeneigenschaften.....	38
Abbildung 33: Verlauf des äquivalenten Schalldruckpegels im Fahrzeuginnenraum in Abhängigkeit der Geschwindigkeit: a) Vergleich mehreren Fahrzeugtypen; b) Vergleich getrennt nach Geräuschtyp für zwei Fahrzeuge [Wie14].....	40
Abbildung 34: Vergleich der Lärmmessungen mit ein- und ausgeschaltetem Motor eines benzinbetriebenes Fahrzeug auf eine Asphaltbeton Oberfläche nach der CPB- und der CPX-Methode: a) Verlauf des äquivalenten Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Geschwindigkeit; b) Terzspektrum bei 50 km/h [Fis16]	41
Abbildung 35: Äquivalenter Schalldruckpegel bei CPX-Messungen über einen definierten Streckenabschnitt: a) bei verschiedenen Geschwindigkeiten (nach [Rec15]), b) bei verschiedenen Lufttemperaturen (nach [Röh15])	42
Abbildung 36: Links: Texturspektren (Rauigkeitstiefe R in Abhängigkeit von der Texturwellenlänge λ) für mehrere Fahrbahnoberflächen zweier Deckschichttypen. Links: abgestreute Oberflächen, rechts: gewalzte Oberflächen, jeweils mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung [Bec08] Rechts: Definition des Gestaltfaktors g zur Kennzeichnung der unterschiedlichen Gestalt von Texturen [Bec08]	43

Abbildung 37: Ausschnitt aus einem Straßenlängsprofil und Vertikalbeschleunigungen innerhalb des Fahrzeugs [Fer15].....	44
Abbildung 38: Systemaufbau des elektrisch angetriebenen haptischen Bremspedals	46
Abbildung 39: Pulssequenzbasierte für den Einsatz im Fahrzeug entwickelte Informations- und Warnsignale.....	48
Abbildung 40: Erzeugbare Signalvielfalt und Möglichkeiten der Pedalkennlinienbeeinflussung.....	49
Abbildung 41: Beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf bei Ortsdurchfahrt	51
Abbildung 42: Schema der Sicherheitsoptimierten Längsführungsassistentz	51
Abbildung 43: Geschwindigkeits- und Momentenverlauf bei Variation der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.....	53
Abbildung 44: Geschwindigkeits- und Momentenverlauf bei Notbremsung.....	53
Abbildung 45: Anbindung HMI, Netzwerktopographie.....	54
Abbildung 46: Anbringung des HMI im Simulatorfahrzeug.....	55
Abbildung 47: HMI Warnung Fußgänger.....	55
Abbildung 48: HMI Kollisionswarnung Fußgänger	55
Abbildung 49: Konfiguration des Antriebsstrangs.....	57
Abbildung 50: Soll-Istwert-Vergleich an einem Hinterrad.....	58
Abbildung 51: Verlauf der Raddrehzahlen und der Geschwindigkeit während einer Fahrt im Koppelbetrieb	59
Abbildung 52: Reale (H_F , H_{SS}) und virtuelle (H_{PF} , H_{FS}) Transferpfade in Messfahrzeug und Prüfstand/Fahrsimulator	60
Abbildung 53: Rundkurs für Fahrsimulatoruntersuchung.....	61
Abbildung 54: Erhebung der Fahrerakzeptanz nach van der Laan.....	62
Abbildung 55: Geschwindigkeitsprofile in Bereichen mit $v_{max} = 30\text{km/h}$ bei verschiedenen Gewichtungen	62
Abbildung 56: Geschwindigkeitsprofile in Bereichen mit $v_{max} = 50\text{km/h}$ bei verschiedenen Gewichtungen	62
Abbildung 57: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe in Bereichen mit $v_{max} = 30\text{km/h}$	63
Abbildung 58: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe in Bereichen mit $v_{max} = 30\text{km/h}$	63
Abbildung 59: Darstellung der Schiefe	64
Abbildung 60: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe bei Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50km/h auf 30km/h	64



Abbildung 61: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe bei Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100km/h auf 50km/h	64
Abbildung 62: Messesequenz eines Notbremsmanövers mit den relevanten Bewertungsgrößen	65
Abbildung 63: Ergebnisse Fahrerakzeptanz nach van der Laan für verschiedene Eingriffsintensitäten.	67
Abbildung 64: Amplitude Rollrate	69
Abbildung 65: Vergleich von Fahrzeug- und Simulatorreaktion [Pitz14, Pitz17].....	70
Abbildung 66: Bremsvorgang mit und ohne Vorpositionierung.....	71
Abbildung 67: Simulator Sickness Questionnaire [Ken93, Pitz17].....	72
Abbildung 68: Ergebnisse des SSQ [Pitz16, Pitz17].....	73

1 Aufgabenstellung

Die Aufgaben des Projektes ZuSE waren die interaktive Simulation sicherheitsrelevanter Systeme für die Fahrdynamik und den Antrieb von Elektrofahrzeugen, insbesondere die Untersuchung der Beherrschbarkeit von Gefahrensituationen durch den Fahrer und die Untersuchung von kollisionsvermeidenden Assistenzsystemen für Elektrofahrzeuge im urbanen Raum mit besonderer Berücksichtigung der Gefährdung von Fußgängern, Radfahrern und Kindern.

Eine Schlüsselrolle im Hinblick auf beide Ziele kam den simulationsgestützten Entwicklungsmethoden zu, ohne die eine effiziente Entwicklung und hinreichende Absicherung von sicherheitsrelevanten Fahrzeugsystemen nicht möglich ist. Diesbezüglich nutzte ZuSE die Einrichtungen der Universität Stuttgart, die mit Förderung durch das BMBF im Projekt VALIDATE geschaffen wurden, v. A. den Stuttgarter Fahrsimulator einschließlich Simulationssoftware. Diese Forschungsinfrastruktur wurde in Verlauf des Projektes für die Herausforderungen bei Untersuchungen von Sicherheitssystemen für Elektrofahrzeuge erweitert und weiterentwickelt. Neben den technischen Voraussetzungen für die Implementierung solcher Funktionalitäten wurde die Wiedergabe von spezifischen Eigenschaften von Elektrofahrzeugen fokussiert, um dem Fahrer einen möglichst realitätsnahen Fahreindruck zu vermitteln.

Für die Entwicklung von Assistenzfunktionen zur Kollisionsvermeidung wurden Ansätze von Systemen für konventionell angetriebene Fahrzeuge analysiert und für den Einsatz in einem Elektrofahrzeug weiterentwickelt. Dabei wurde ein Demonstrator im Stuttgarter Fahrsimulator umgesetzt und in Probandenstudien optimiert. Neben der Regelung der Fahrzeugführung wurde auch die Information und Warnung des Fahrers betrachtet, um ihm eine Rückmeldung über den Zustand des Systems zu vermitteln und somit die Akzeptanz für solche Systeme zu erhöhen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt ZuSE wurde von der Universität Stuttgart und ZF durchgeführt. Die Adam Opel AG war als assoziierter Partner eingebunden. Die beteiligten Institute an der Universität Stuttgart waren das IVK (Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen) sowie das ISV (Institut für Straßenverkehrswesen). Alle beteiligten Partner standen während der gesamten Projektlaufzeit in engem Kontakt und tauschten Simulationsmodelle und Ergebnisse aus aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen regelmäßig aus.

Die beiden beteiligten Institute der Universität Stuttgart und deren bisherige Forschungstätigkeiten auf den für ZuSE relevanten Gebieten werden im Folgenden kurz dargestellt. Neben den im Rahmen des Projekts beantragten Einrichtungen und Gegenständen wurden auch vorhandene Einrichtungen und Infrastruktur der Institute genutzt.

2.1 IVK

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart hat die primären Aufgaben Lehre und Grundlagenforschung. Seine Lehrveranstaltungen bietet das IVK hauptsächlich in den Studiengängen Fahrzeug- und Motorentechnik, Maschinenwesen sowie Technologiemanagement an. Daneben ist das IVK noch in weiteren Studiengängen aktiv. Das Institut ist in drei Lehrstühle gegliedert. Die Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls Kraftfahrwesen sind Fahrzeug-Aerodynamik, Thermomanagement, Fahrzeugakustik, NVH und Fahrdynamik. Der Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik befasst sich mit den Themen Elektronik, Software und Simulation. Am Lehrstuhl Verbrennungsmotoren stehen die Fachbereiche Motorakustik und -mechanik, Thermodynamik, Brennverfahrensentwicklung, Abgasanalytik und Entwicklungstools im Vordergrund.

Das IVK kooperiert mit dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), das anwendungsbezogene Forschung in Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie durchführt. Gemeinsam betreiben beide Institute eine Reihe von modernen Prüfständen, u. A. einen aeroakustischen Fahrzeugwindkanal, einen Modellwindkanal und einen Thermowindkanal mit integriertem Allrad-Rollenprüfstand. Hinzu kommen dynamische Motorenprüfstände, ein hochdynamischer Antriebsstrang- und Bordnetz-Prüfstand sowie verschiedene Elektronik-Testsysteme und Fahrsimulatoren.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts VALIDATE (2008 - 2011) wurde an der Universität Stuttgart in enger Kooperation der Institute IVK, ISV und IHR/HLRS eine umfassende virtuelle Entwicklungsumgebung für Fahrerassistenzsysteme aufgebaut. [Rumb11, Pieg11]. Unter Anderem entstand der größte Fahrsimulator an einer europäischen Forschungseinrichtung, es wurde ein Messfahrzeug für energetische Untersuchungen sowie eine Echtzeit-Simulationsumgebung geschaffen [Baum12].

2.2 ISV

Der Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau beschäftigt sich mit planerischen, verkehrstechnischen und bautechnischen Fragestellungen im Hinblick auf Sicherheit, Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit von Straßenverkehrsanlagen. Ein Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Simulation von Prozessen beim Entwurf, Bau, Erhaltung und Betrieb. Für das Projekt VALIDATE liegen sowohl Erfahrungen in mehreren Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit Bezug auf Oberflächeneigenschaften von Straßenbefestigungen vor, wie auch in der praktischen Umsetzung im Hinblick auf die funktionalen Anforderungen von Straßenbefestigungen durch Mitarbeit bei Entwicklung der Grundlagen von Funktionsbauverträgen. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel ist Mitglied des Arbeitsausschusses 4.6 „Wirtschaftlichkeit von Bauweisen“ und Leiter des Arbeitsausschusses 4.2 „Funktionale Anforderungen“ der FGSV. Der Lehrstuhl hat derzeit 9 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Beschreibung, Darstellung und Wirkung des Oberflächenzustandes von Straßenbefestigungen war bereits mehrfach zentraler Teil von Forschungsthemen am Lehrstuhl. So unter anderem im Hinblick auf die wirtschaftliche Bewertung von Straßenbefestigungen über eine Lebenszyklusanalyse

(FE 09.140/2005/MRB im Auftrag der BASt) [Ress07a], wie auch bei der Festlegung funktionaler Anforderungen an die Straßenoberfläche im Rahmen von Funktionsbauverträgen [Knoll99].

Umfangreiche Untersuchungen von Fahrbahntexturen wurden zur Bestimmung von Wasserfilmdicken durchgeführt, mit dem Ziel das Aquaplaningrisiko in Verwindungsbereichen zu simulieren. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes (FE 05.126/2001/AGB im Auftrag der BASt) bildeten auch die Grundlage einer Dissertation am Lehrstuhl [Herm07]. Die Modellierung und Simulation des Wasserabflusses auf Fahrbahnoberflächen wurde in einer weiteren Dissertation vertieft [Wolff13].

Im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl wurde, in Zusammenarbeit mit der Firma Müller-BBM, der Zusammenhang zwischen Fahrbahntextur und Lärmemission für offenporige Asphaltdeckschichten mit Hilfe lasergestützter Messungen der Oberflächentextur untersucht [Hein08]. Die Arbeiten im Rahmen des vom BMBF initiierten Forschungsverbundes „Leiser Straßenverkehr II“ (Förderkennzeichen 19U5002 A-E) bildeten die Grundlage einer Dissertation [Alber13]. Ebenfalls liegen Erfahrungen zur Anwendung von Straßendatenbanken, wie der TT-SIB[®], vor. Deren Zusammenführung mit weiteren Datenkatalogen aus dem Umweltbereich ist Ziel eines aktuell am Lehrstuhl bearbeiteten Forschungsprojektes im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg [Ress08b].

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Laufzeit des Projektes ZuSE wurde für den Zeitraum 01.01.2013 bis 31.12.2015 genehmigt. Das Projekt wurde einmalig kostenneutral um sechs Monate verlängert. Dadurch konnte ein System zur Simulation der Haptik und Akustik von Elektrofahrzeugen eigenentwickelt werden, welches sich durch eine größere Flexibilität gegenüber kommerziellen Lösungen auszeichnet. Ebenso konnten Lieferverzögerungen aufgefangen werden und umfangreichere Probandenstudien durchgeführt werden als ursprünglich geplant. Die Projektergebnisse sind daher belastbarer und auf eine größere Personengruppe übertragbar. Es wurden alle Ziele des Projekts vollständig erreicht.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

4.1 Wissenschaftliche Situation

Zum Themengebiet Zuverlässigkeit und Sicherheit von Elektrofahrzeugen waren zu Projektbeginn nur wenige Forschungsaktivitäten bekannt. Diese Themen wurden erstmals als Unterpunkte in einigen Projekten adressiert, z. B. in ePerformance und e-generation oder sie wurden indirekt über das Thema „zuverlässige Reichweitenprädiktion“ angegangen. Den Antragstellern war kein Vorhaben bekannt, das sich explizit diesem Themenkreis widmet.

Im Bereich der unfallvermeidenden Systeme basierend auf Umfeldsensorik wurden bisher nur Systeme für konventionelle Fahrzeuge betrachtet. Die Grundlagen und Anwendungen solcher Systeme wurden unter anderem im Rahmen des vom BMWi

geförderten Vorhabens AKTIV („Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr“) erforscht, an dem u. A. die Adam Opel AG beteiligt war [Aktiv10].

Das Thema Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz von Elektrofahrzeugen und Elektroantrieben beschränkte sich in der Forschungslandschaft auf die Frage von Einzelkomponenten oder -Funktionen wie Batterieschädigung, und Reichweitenprädiktion, es fehlten jedoch Ansätze für BEV-spezifische Synthese- und Testverfahren auf der Systemebene.

Unter Berücksichtigung dieses Standes der Forschung bestand Forschungsbedarf bezüglich der Frage, wie sich eingreifenden Systeme und Fahrerassistenzsysteme unter den technisch völlig veränderten Rahmenbedingungen des nativen BEV verhalten werden und welche neuen Möglichkeiten zur Erhöhung der Sicherheit, jedoch auch welche neuen Gefahren sich daraus ergeben und wie diese effizient und gefahrlos erprobt abgesichert werden können. Diese Kernthemen wurden im Rahmen des Vorhabens ZuSE adressiert. Es war hingegen nicht Gegenstand des Projektes, die Technologie und Wirkungsweise bereits erforschter Assistenzsysteme oder Umfoldsensoren zu optimieren.

4.2 Bisherige Arbeiten des Antragsstellers

Institut für Verbrennungsmotoren u. Kraftfahrwesen (IVK)

Das IVK ist seit mehr als 10 Jahren auf dem Gebiet der Hybridantriebe tätig, z.B. im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundvorhabens „Antriebskonzept mit Erdgashybrid“ gemeinsam mit Opel und Bosch [Riem12, Böhm12].

Das IVK arbeitete an mehreren Vorhaben zur Elektromobilität mit:

- ELENA: Elektro-Nachrüstätze (Förderung durch das BMVBS), 2010 bis 2015: Nachrüstung konventioneller Fahrzeuge mit Elektroantrieben am Beispiel eines Transporters.
- BIPOL: Berührungsloses, induktives und positionstolerantes Ladekonzept für elektrisch angetriebene Fahrzeuge (Förderung durch das Wirtschaftsministerium BW), 2010-2015.
- VALIDATE: IM Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes entstand der Stuttgarter Fahrsimulator mit einer modularen, echtzeitfähigen Simulationsumgebung (2008 – 2011) [Baum12].
- Studentisches Ausbildungs-Projekt der Universität Stuttgart: Umbau eines konventionellen Fahrzeugs zum Elektrofahrzeug mit Erstellung eines Fahr- und Ladekoordinators [Freu12].
- Anfang 2011 wurde mit Unterstützung der DFG beim IVK ein deutschlandweit einmaliger Antriebsstrang- und Hybrid-Prüfstand in Betrieb genommen, der aufgrund seiner modularen Struktur auch für reine Elektroantriebe geeignet ist. [Böhm11].

Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV)

In einer Vielzahl an Forschungsprojekten widmete sich das ISV sowohl den Themenbereichen Eigenschaften und Wirkungen von Fahrbahnoberflächen sowie der Straßensicherheit, z. B. in den BASt-Projekten (Bundesanstalt für Straßenwesen):

- FE 05.126: Entwicklung eines Modells zur Vorhersage von Wasserfilmdicken und Aquaplaninggefahr in Abhängigkeit der Fahrbahnoberfläche [Ress08]
- FE 02.269: Sicherer sechsstreifiger Ausbau von Autobahnen im Hinblick auf die Linienführung [Ress10],
- FE 02.295: U.a. fahrdynamische und sicherheitskritische Untersuchungen zu besonderen Elementen des Straßenentwurfs,
- FE 09.140: Betrachtung von Fahrbahnoberflächenzuständen im Sinne einer Life-Cycle-Bewertung von Straßenbefestigungen [Ress07a].

Im Rahmen des vom BMBF initiierten Forschungsverbundes „Leiser Straßenverkehr II“ wurden in [Ress07b] detailliert die akustischen Wirkungen offenporiger Asphalte und deren Verschmutzungsverhalten untersucht. Mehrere aktuelle Forschungsprojekte behandeln zudem die Themen Simulation und Modellierung bestimmter Material- und Straßeneigenschaften, so z. B. das Projekt „Infiltrationsprozesse in porösen Fahrbahnsystemen“ (DFG-Förderkennzeichen Re 1620/2-1.) sowie ein Projekt zur Simulation der Fahrbahngriffigkeit innerhalb des Exzellenzclusters SimTech an der Universität Stuttgart.

Innerhalb des Projekts VALIDATE wurden am Lehrstuhl die Hardware sowie Verfahren zur Erfassung und Modellierung unterschiedlicher Fahrbahneigenschaften (Geometrie und Unebenheiten) entwickelt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das IVK kooperiert mit dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), das anwendungsbezogene Forschung in Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie durchführt. Gemeinsam betreiben beide Institute eine Reihe von modernen Prüfständen. Für die Durchführung der Studie im Realverkehr wurde die Elektrofahrzeugflotte sowie weitere Ressourcen in Form von Messtechnik oder Probanden des FKFS genutzt.

6 Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

6.1 Erfassung von Lastkollektiven für Elektrofahrzeuge

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge werden derzeit hauptsächlich im urbanen Umfeld eingesetzt. Hier spielt das Elektrofahrzeug durch die Energieeffizienz im Stop and Go Verkehr seine Stärken aus. Auch ist eine entsprechende Ladeinfrastruktur vorhanden und die Reichweitenproblematik stellt im Kurzstreckenbetrieb kaum Einschränkungen dar.

Die geringere Geräuschemmission der Elektrofahrzeuge stellt einerseits eine Entlastung für Anwohner und den Fahrer dar, andererseits geht von ihr eine erhöhte Gefahr für Fußgänger aus. Deshalb ist der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen zum Fußgängerschutz gerade bei Elektrofahrzeugen sinnvoll und notwendig. Ein Einsatz von Systemen mit Eingriff in Längs- und/oder Querdynamik ist in Elektrofahrzeugen relativ einfach, was eine wirtschaftliche Realisierung auch im Kleinwagen- und Mittelklassesegment möglich macht.

Um die Anforderungen an zukünftige Fahrerassistenzsysteme zum Fußgängerschutz abschätzen zu können, wurde eine Probandenstudie zum Thema Fahrerwahrnehmung im urbanen Umfeld geplant und durchgeführt. In der Studie sollen folgende Fragestellungen betrachtet werden:

- Vergleich des subjektiven Geschwindigkeitseindrucks mit der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit
- Wird bei Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die Fahrzeuggeschwindigkeit rechtzeitig reduziert?
- (Wie) werden Warnschilder wahrgenommen (z.B. Achtung Kinder)?
- Aufmerksamkeitschwerpunkt an verschiedenen Gefahrenstellen (z.B. Bushaltestellen, Kindergärten, ...)

Im Hinblick auf die Fragestellungen wurde ein Rundkurs im Stadtgebiet Stuttgart zusammengestellt. Dieser weist über eine Strecke von ca. 23km entsprechende Gefahrenstellen wie beispielsweise Kindergärten, unübersichtliche Straßen und Spielstraßen auf. Weiterhin wurde ein Probandenkollektiv von 32 Probanden anhand der demographischen Kriterien Alter, Geschlecht und Fahrleistung zusammengestellt.

Während der Versuchsfahrten werden u.a. Blickrichtungen, ein Bild von der Szenerie, Fahrdynamikgrößen und Fahrereingaben (z.B. Gas- und Bremspedal, Beschleunigungen, Position) aufgezeichnet. Die hierfür benötigte Messtechnik bestehend aus Eyetrackingsystem und Messbox (Abbildung 1) wurde in ein Versuchsfahrzeug mit E-Antrieb (Typ: Citroen CZero) integriert. Für eine nachträgliche Synchronisierung der Messdaten beider Systeme wurde ein CAN-Gateway erstellt, dass eine Synchronisierung über Zeitstempel ermöglicht. Für die Erhebung der subjektiven Eindrücke wurden die Probanden per Fragebogen befragt.



Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Eyetracking-System und Messbox

Für die Auswertung der gesammelten Messdaten wurde mit Hilfe von Matlab ein Softwaretool erstellt, welches die Datenströme von Eyetracking und Messbox synchronisiert. Weiterhin bietet das Tool die Möglichkeit, Informationen die manuell aus dem Videobild der Szenenkamera erhoben werden dem Datenstrom hinzuzufügen („Labeln“). Die so gewonnenen Datensätze dienen als Grundlage für die Auswertung und die Untersuchung hinsichtlich der vorangegangenen Fragestellungen.

Bei der anschließenden Auswertung der Daten wurden zunächst die Geschwindigkeitsverläufe bei verschiedenen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten betrachtet. Dafür wurden die Datensätze auf die entsprechenden Streckenabschnitte gefiltert. Weiterhin wurden Kurven- und Kreuzungsbereiche ausgeschnitten um verkehrs- und streckenbedingte Geschwindigkeitsänderungen weitestgehend auszuschließen. In Abbildung 2 sind die verbleibenden Streckenabschnitte in verkehrsberuhigten Bereichen, in Tempo 30 Zonen und im urbanen Umfeld mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h dargestellt. Die Grenzen zwischen den ausgewerteten Streckenabschnitten sind mit vertikalen blauen Linien markiert, die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist jeweils mit einer schwarzen horizontalen Linie markiert.

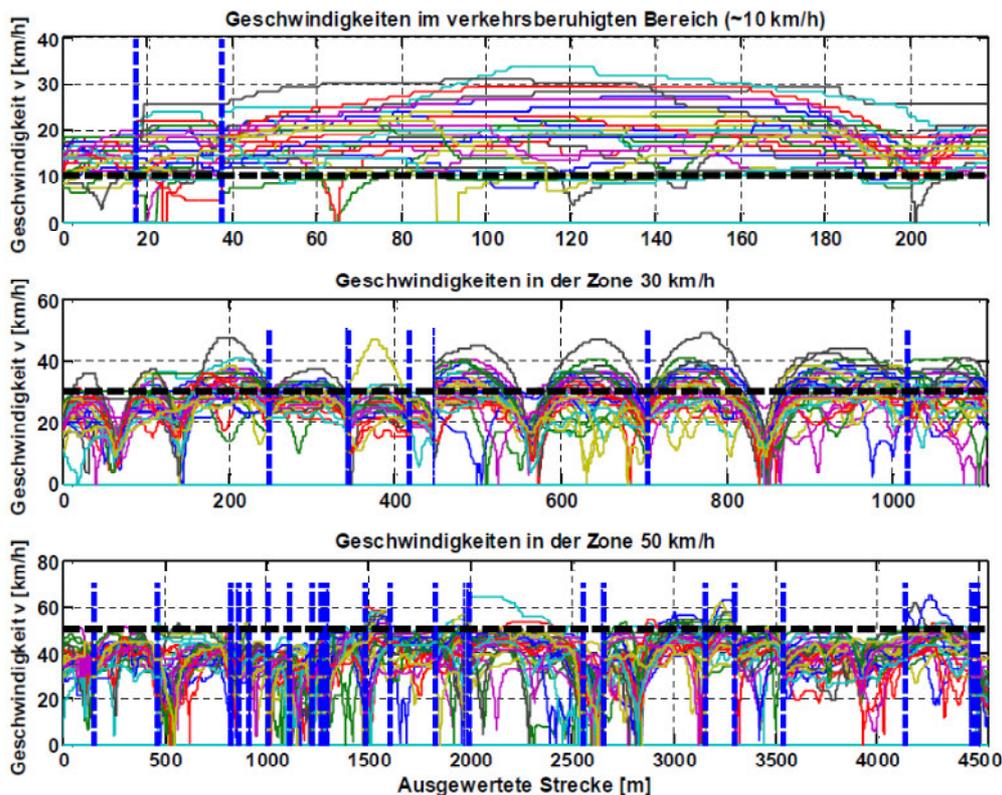


Abbildung 2: Geschwindigkeitsverläufe bei verschiedenen Geschwindigkeitsbeschränkungen

Da es für Verkehrsberuhigte Bereiche keine gesetzlich festgelegte zulässige Höchstgeschwindigkeit gibt, wird diese, basierend auf Gerichtsurteilen, zu 10 km/h angenommen. Im Plot ist deutlich zu sehen das auf weiten Teilen der ausgewerteten Strecke die 10km/h Grenze überschritten wird: Die Fahrer waren auf 94% der ausgewerteten Strecke mit überhöhter Geschwindigkeit unterwegs. Dabei wird die Geschwindigkeit durchschnittlich um 6.2 km/h (Standardabweichung $\sigma=2,9$ km/h) überschritten. Die maximal gefahrene Geschwindigkeit erreicht gar 34 km/h.

Auch bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h sind verbreitet Geschwindigkeitsüberschreitungen zu beobachten. Hier übertreten die Fahrer auf 33,3% der ausgewerteten Streckenabschnitte die zulässige Höchstgeschwindigkeit um durchschnittlich 2,9 km/h (Standardabweichung $\sigma=2,0$ km/h).

Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h sind nur noch vereinzelt Geschwindigkeitsübertretungen zu beobachten. Es werden auf 5,2% der ausgewerteten Strecke Geschwindigkeitsüberschreitungen von durchschnittlich 2,9 km/h (Standardabweichung $\sigma=2,1$ km/h) verzeichnet. In Abbildung 4 sind die verzeichneten Geschwindigkeitsüberschreitungen zusammenfassend dargestellt.

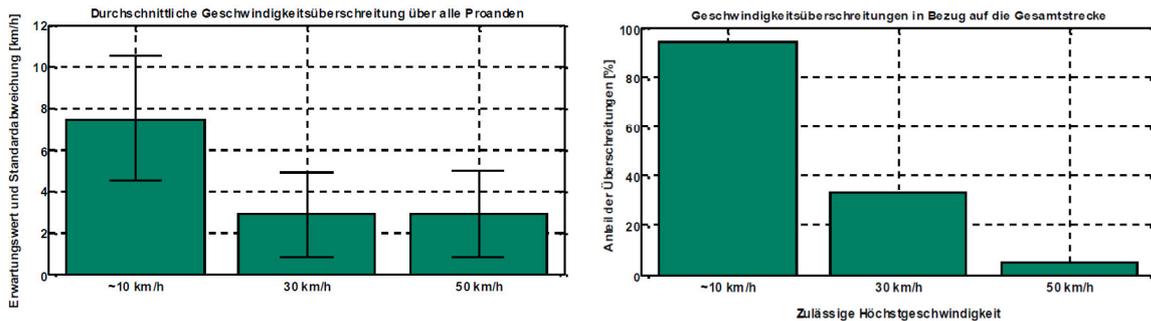


Abbildung 3: Statistische Auswertung der Geschwindigkeitsüberschreitungen

Neben dem allgemeinen Geschwindigkeitsverhalten der Probanden soll deren Verhalten auch in Verkehrssituationen mit erhöhtem Gefahrenpotential untersucht werden. Als Beispiel für eine solche Gefahrenstelle wurde ein Fußgängerüberweg („Zebrastrreifen“) identifiziert. Die Zugänge zum betrachteten Fußgängerüberweg (Abbildung 3) sind durch parkende Fahrzeuge schlecht einsehbar. Im Folgenden wird angenommen, dass ein Fahrer der sich dem Fußgängerüberweg nähert in einem Abstand von 6m erkennen kann, ob ein Fußgänger die Straße überqueren möchte. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Bereich des Zebrastrreifens beträgt 50 km/h.

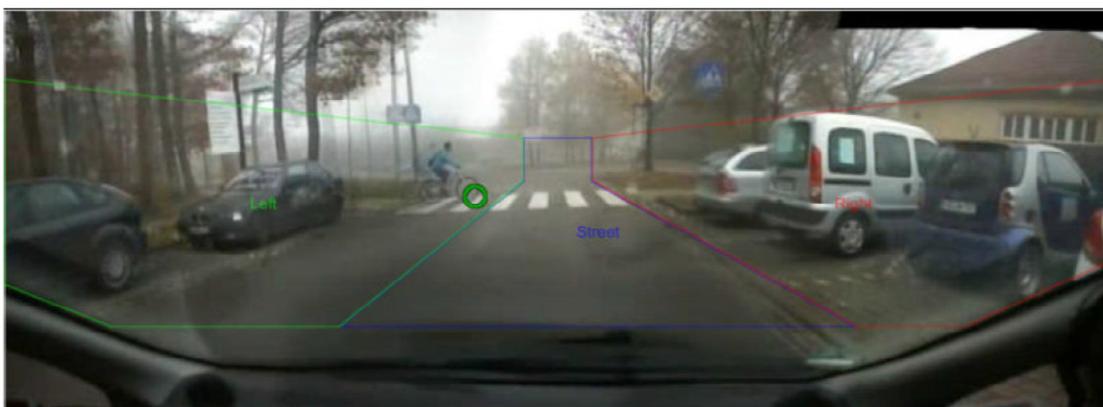


Abbildung 4: Szenerie am in der Studie ausgewerteten Zebrastrreifen

In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind im oberen Zeitgraphen jeweils Geschwindigkeitsverläufe für alle Fahrer 30m vor und 5m hinter dem Zebrastrreifen dargestellt. Die blaue vertikale Linie stellt den Beginn des Zebrastrreifens dar. Die rote Linie stellt die maximal erlaubte Geschwindigkeit dar, um ein rechtzeitiges Anhalten vor dem Zebra-

raustreifen zu garantieren. Dabei wird eine maximale Verzögerung von 8 m/s^2 und eine Reaktionszeit von 0.8 s angenommen. In den unteren Zeitgraphen wird in die Blickrichtung nach links und rechts dargestellt. Dabei entspricht 0 dem linken, und 1 dem rechten Rand des Sichtbereiches (Abbildung 4).

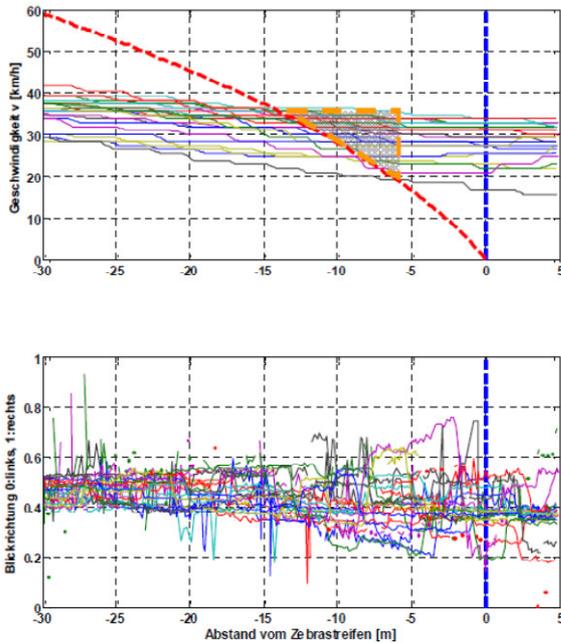


Abbildung 5: Geschwindigkeitsverlauf am Zebrastreifen ohne Fußgänger

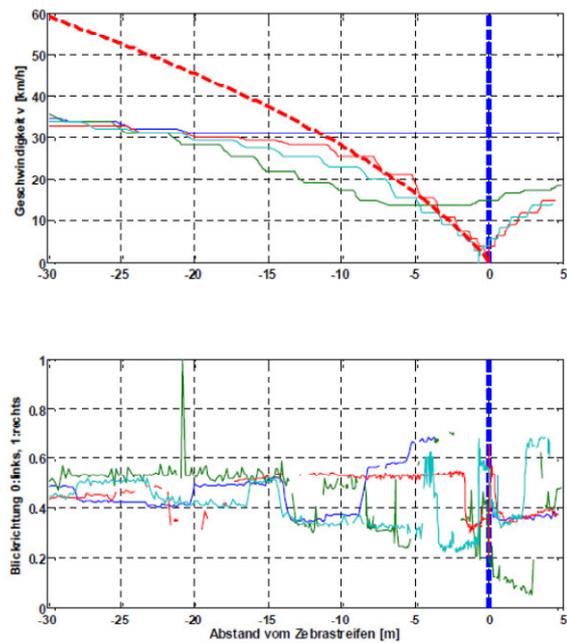


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverlauf am Zebrastreifen mit Fußgänger

In 24 Fahrten gehen keine Fußgänger auf den Zebrastreifen zu, um diesen zu überqueren. Die Geschwindigkeitsverläufe dieser Fahrten sind in Abbildung 5 dargestellt. Bei allen Probanden ist tendenziell eine Verringerung der Geschwindigkeit zu beobachten. Trotzdem wird deutlich, dass zu einem Zeitpunkt, an dem der Zugangsbereich zum Zebrastreifen für die Fahrer noch nicht einsehbar ist (Abstand zum Zebrastreifen $>6 \text{ m}$), für den Großteil der Fahrer ein rechtzeitiges Anhalten bis zum Fußgängerüberweg nicht mehr möglich wäre (Bereich orange markiert). In den Verteilungen für die Blickrichtungen ist zu erkennen, dass die meisten Fahrer den Zebrastreifen wahrnehmen, da die horizontale Blickrichtungsverteilung zum Fußgängerüberweg hin tendenziell größere Blickwinkel aufweist.

In 4 Testfahrten sind tatsächlich Fußgänger an den Zebrastreifen herangetreten, um diesen zu überqueren. Aus der Blickrichtungsverteilung ist zu entnehmen, dass alle Probanden den Fußgängerüberweg wahrgenommen haben. Zwei Probanden konnten gerade noch rechtzeitig zum Stillstand kommen. Ein Fahrer (blaue Linie) hat dennoch den Fußgängerüberweg ohne anzuhalten oder abzubremsten passiert, ein anderer hat zwar die Geschwindigkeit reduziert, aber dennoch nicht angehalten.

Die Ergebnisse der Probandenstudie zeigen, dass im urbanen Umfeld häufig Geschwindigkeitsüberschreitungen auftreten. Dabei gilt: je niedriger die zulässige Höchstgeschwindigkeit, desto höher und häufiger die Überschreitungen. Jedoch ist gerade in Bereichen mit niedriger zulässiger Höchstgeschwindigkeit (v.A. in verkehrsberuhigten Bereichen und 30er Zonen) das Fußgängeraufkommen meist erhöht. Daraus resultiert insbesondere in diesen Bereichen ein erhöhtes Kollisionsrisi-

ko. Die Untersuchungen am Fußgängerüberweg mit schlecht einsehbaren Zugängen zeigen, dass oft in potentiell gefährlichen Situationen Risiko und Geschwindigkeit bzw. der Anhalteweg falsch eingeschätzt werden. Dies äußert sich insbesondere in einer der Situation nicht angepassten Wahl der Fahrgeschwindigkeit. Dies wird auch durch die Fahrten verdeutlicht, in denen Fußgängern in zwei von 4 Fällen am Überweg die Vorfahrt genommen wurde.

Basierend auf diesen Ergebnissen ist anzunehmen, dass eine Geschwindigkeitsreduzierung in potentiell gefährlichen Bereichen (verkehrsberuhigte Bereiche, Schulen, Zebrastreifen...), die Sicherheit von Fußgängern erheblich steigern würde.

6.2 Echtzeitsimulation des E-Fahrzeugs und seiner Umgebung

Simulation des EGO-Fahrzeuges

Zur Simulation des Egofahrzeugs wurde eine echtzeitfähige Mehrspurfahrdynamik aufgebaut. Die Fahrdynamik wurde basierend auf einem aktuellen Fahrzeugmodell in Zusammenarbeit mit der Adam Opel AG parametrisiert und validiert. Ergänzend zur Fahrdynamik wurde eine variable, echtzeitfähige Antriebsstrangsimulation aufgebaut. Diese ermöglicht die Simulation von unterschiedlichsten Konfigurationen von Elektrofahrzeugen (Zentralmotor, Fronttrieb, Hecktrieb, Radnabenantriebe usw.). Dabei werden beispielsweise die Positionen, Trägheitsmomente und Massen der Antriebsstrangkomponenten für die Ermittlung der Gesamtfahrzeugparameter berücksichtigt. Hierdurch können beispielsweise die Auswirkungen einer veränderten Batteriekapazität und Positionierung im Fahrzeug auf die Achslastverteilung und damit Fahrdynamik direkt in Echtzeit simuliert werden, vgl. Abbildung 7.

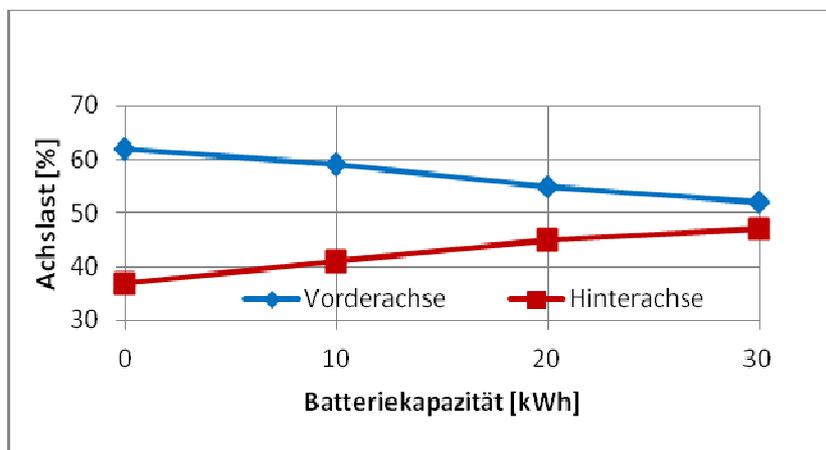


Abbildung 7: Veränderung der Achslasten in Abhängigkeit der Batteriekapazität

Für die Einbindung des Fahrdynamikmodells in die Fahrsimulatorumgebung wurde eine plattformunabhängige Kommunikationsschnittstelle definiert. Diese Integration ermöglicht es jegliche Fahrdynamik- und Antriebsstrangvarianten auf dem Fahrsimulator zu verwenden und zu fahren.

Simulation der Akustik und Haptik von E-Fahrzeugen

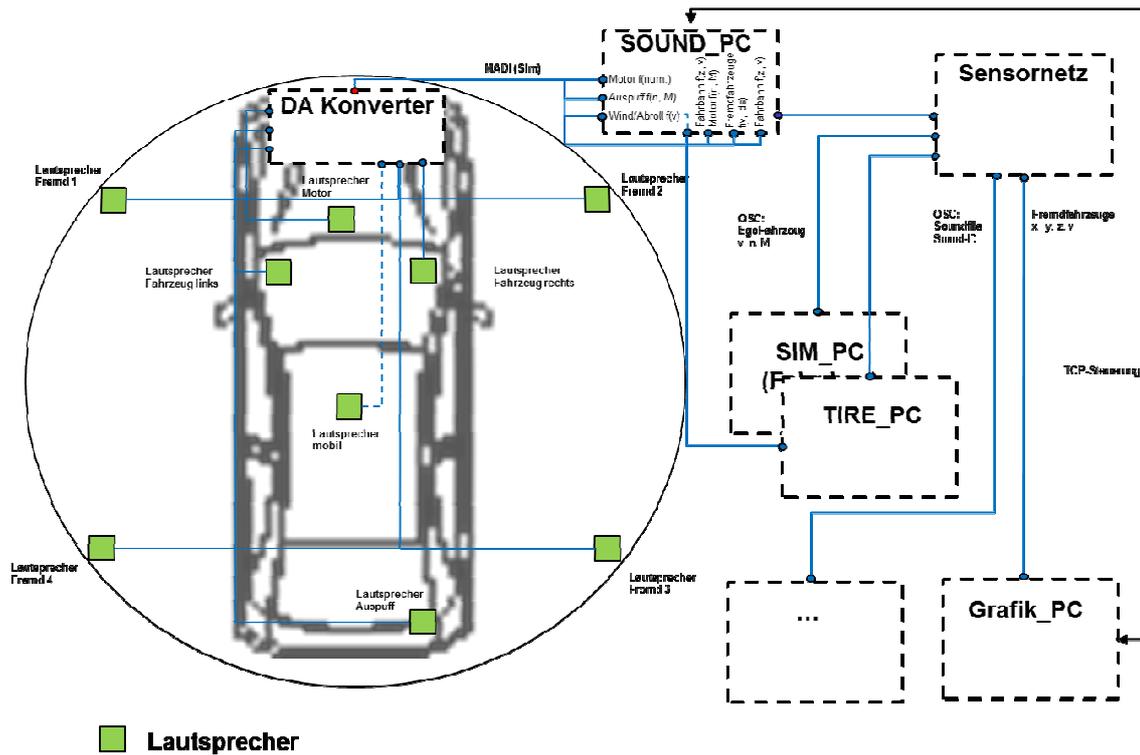


Abbildung 8: Hardware Akustik

Um die entsprechenden Geräusche bei einer Autofahrt abbilden zu können wurden im Mockup bzw. der Kuppel verschiedene Lautsprecher installiert. Die 4 Lautsprecher in der Kuppel geben die Reifengeräusche, Fremdverkehrsfahrzeuge sowie ggf. das Motorgeräusch wieder. Für die Darstellung des Windgeräuschs werden die zwei internen Fahrzeuglautsprecher genutzt. Um trotz gleichem Mockup auch verschiedene Antriebstypen darstellen zu können wurden zwei Lautsprecher vorne und hinten im Mockup installiert. Der mobile Lautsprecher mit integriertem Akku und einer Bluetooth-Audio-Verbindung dient der Wiedergabe von speziellen Fahrerbeeinflussungen wie z.B. Navigationsangaben.

Die Sounderzeugung erfolgt in zwei Rechner im Sensornetz. Der Sound PC simuliert alle Geräusche und kann über den Tire PC um eine bessere Reifengeräuschsimulation erweitert werden. Dem Sound PC werden hierzu der Motorzustand, die Fremdverkehrspositionen sowie das Auslösen von speziellen Geräuschen um das Sensornetz mitgeteilt. Die Audio Signale werden als Digitalsignal im MADI Format in die Kuppel übertragen. Dort werden sie über die Lautsprecher dann wiedergegeben.

Es können insgesamt bis zu 4 Motoren simuliert werden. Diesen können als Vordrad-, Hinterrad- oder Einzelradantrieb konfiguriert werden. Je nach Konfiguration wird das Signal dann auf den entsprechenden Lautsprecher geroutet. Das Motorgeräusch wird hierbei über das Mixen einer Vielzahl von aufgenommen Audiodateien bei bestimmten Motordrehzahlen und Motordrehmomenten realisiert. Der gleiche Ansatz wurde auch bei der Darstellung der Windgeräusche gewählt.

Die Reifengeräusche können in einer einfachen Variante über eine Kombination von Tiefpass- und Hochpassfiltern mit den Eingängen Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahr-

bahnrauigkeit, Fahrbahnreibungswert und Wetter erzeugt werden. Über den Tire PC kann eine genauere Simulation des Reifengeräuschs erfolgen. Dabei können drei unterschiedliche Geräuschquellen unterschieden werden:

- Mechanische Vibrationen: Geräusche bedingt durch die mechanischen Schwingungen des Reifens können durch Masse-Feder-System abgeschätzt werden. Dazu werden in Abhängigkeit des Reifenkontakts zur Straße die Amplituden der Eigenfrequenzen als akustisches Signal ausgegeben. Die hier erzeugten Frequenzen bewegen sich in einem Bereich unter 1 kHz.
- Aerodynamische Effekte: Durch das Abrollen des Reifens wird Luft in der Kontaktfläche komprimiert und wieder entspannt. Da dies ein hochkomplexer Vorgang ist wird hier das Ausgangssignal über eine Filterkombination erzeugt. Parameter hier sind Fahrzeuggeschwindigkeit sowie das Straßenmaterial. Hier liegen die Frequenzen in einem Bereich größer als 1 kHz.
- Schlupf Effekte: Durch das Rutschen des Reifens über die Straßenoberflächen werden hochfrequente Geräusche erzeugt, was der Mensch als Quietschen wahrnimmt. Bei der Untersuchung verschiedener Audioaufnahmen konnten dabei bestimmte Frequenzen ermittelt werden. Die Querschluft des Reifens hatte dabei höhere Amplituden bei niedrigeren Frequenzen als der Längsschlupf des Reifens. Basierend darauf wurde eine Geräusch in Abhängigkeit der Reifengeschwindigkeit, des Längs- und des Querschlupfs realisiert.

Die Fremdverkehrsgeräusche werden über eine Kombination von Motor- und Wind-sound auf den vier Kuppellautsprechern wiedergegeben. Dabei wird zum Einen der Doppler Effekt miteinbezogen sowie der Sound im Raum positioniert.

Auch Regen kann über die Kuppellautsprecher in Abhängigkeit des in AP 2.8 erwähnten Wettersensors akustisch dargestellt werden. Über Open Sound Control Nachrichten (OSC) können überdies auch verschiedene Sounddateien ausgelöst werden.

Zur Reproduktion der Vibrationen im Fahrzeuginnenraum und zur Sensibilisierung des Fahrers für Umgebungsbedingungen (im Wesentlichen Fahrbahnbeschaffenheit) und Fahrzustand wurden Schwingerreger im Fahrzeug angebracht. Diese füllen den Frequenzbereich zwischen den niederfrequenten, durch das Bewegungssystem des Fahrsimulators angeregten Schwingungen und den hauptsächlich auditiv wahrnehmbaren Schwingungen, können aber optional auch zur Anregung von auditiv wahrnehmbaren Körperschallschwingungen verwendet werden. Die Schwingerreger wurden möglichst nahe den Fahrzeug-Fahrer-Schnittstellen (Fahrersitz, Lenkrad) angebracht, um einerseits die Schwingerreger mit möglichst geringem Gewicht und geringer Leistung auslegen zu können, andererseits um kurze Übertragungswege zwischen Anregung und Fahrer zu erreichen. Bei der Nachbildung von in Realfahrzeugen an z. B. Sitzschiene oder Lenkrad gemessenen Schwingungen im Fahrsimulator muss somit nur ein kurzer Übertragungspfad zwischen Anregungspunkt und Messpunkt berücksichtigt werden. Dieser wird durch eine Transferpfadanalyse ermittelt und fließt in das Regelungssystem der Schwingerreger ein. Abbildung 9 zeigt schematisch den Aufbau und die Regelung der Schwingungsanregung am Fahrersitz. Der Beschleunigungs- und der Kraftsensor am Schwingerreger ermöglichen ei-

ne definierte Schwingungsanregung – der Beschleunigungssensor am Fahrersitz in Kombination ermöglicht die Transferpfadanalyse bzw. die Validierung der Reproduktion von Realfahrtmessdaten.

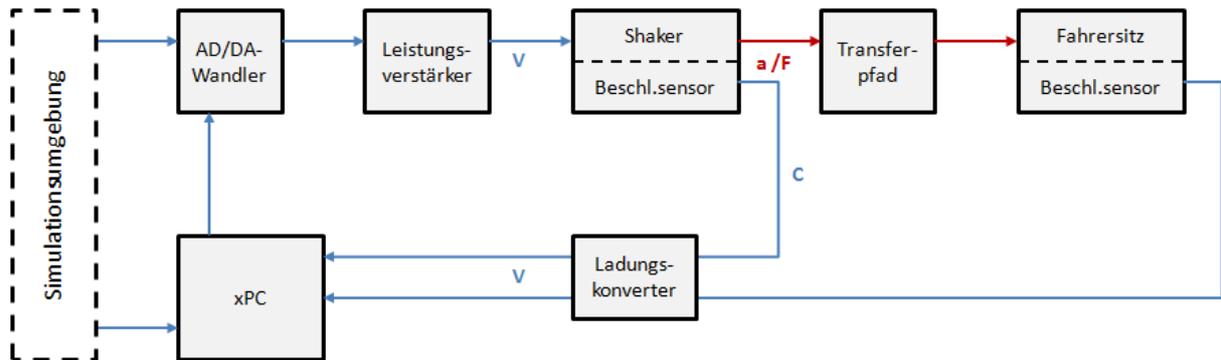


Abbildung 9: Schema Regelkreis Schwingungsanregung am Fahrersitz. V, C: Spannungs-/ Ladungssignal; a, F: Beschleunigung/Kraft der Schwingung; xPC: echtzeitfähiger Target-PC

Abbildung 10 zeigt die Übertragung eines 20 Hz-Sinussignals vom Prüfstandsrechner (Sollsignal) über den Ausgang am DA-Wandler zur Messung der Beschleunigung am Schwingerreger am Fahrzeugunterboden sowie die gemessene Antwort an der Sitzschiene des Fahrersitzes. Neben der nicht linearen Übertragungscharakteristik der einzelnen Übertragungspfadabschnitte, die zu unterschiedlichen Amplituden bei Ausgabesignal und Messungen bei unterschiedlichen Frequenzen führt, ist auch das Auftreten von Oberschwingungen in der physischen Struktur zu beachten. Zudem existieren weitere Schwingungsquellen, die das Frequenzspektrum beeinflussen und bei der Regelung der Schwingerreger unberücksichtigt bleiben sollen.

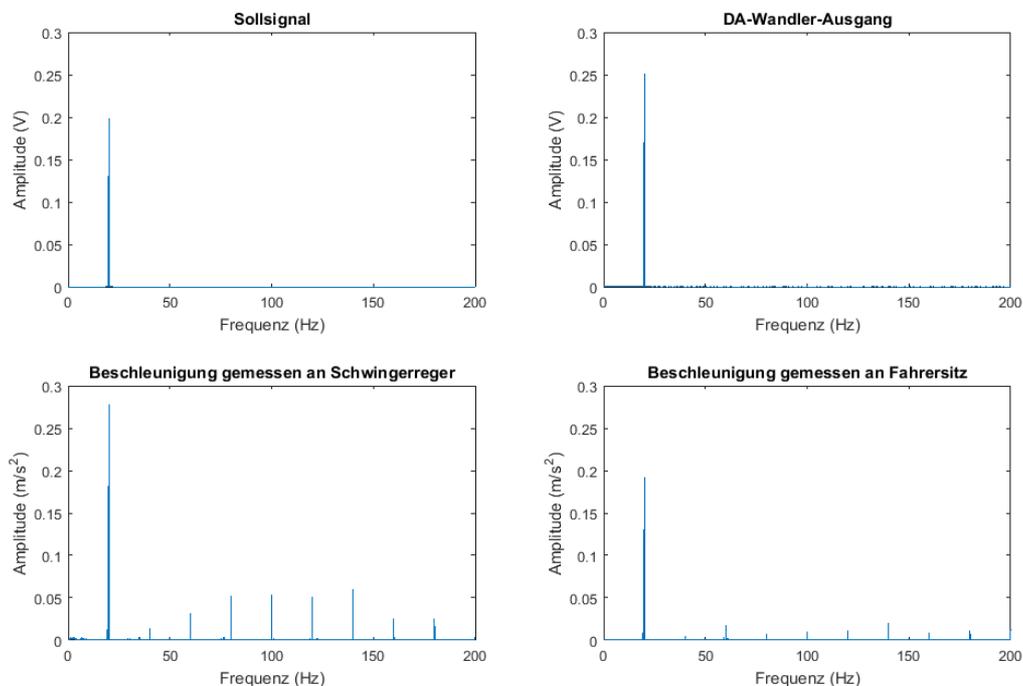


Abbildung 10: Signalausgabe und Beschleunigungsmessung für 20 Hz-Sinussignal

In Abbildung 11 ist die Übertragung von Sinussignalen verschiedener Frequenz gezeigt. Aus Abbildung 11a ist neben einer generellen Verstärkung des Signals das nicht lineare Übertragungsverhalten des DA-Wandlers zu niedrigen Frequenzen hin erkennbar, das vor allem unterhalb 30 Hz eine zu 0 Hz deutlich abfallende Übertragungscharakteristik bewirkt. Die oberhalb 40 Hz zunächst abfallende Amplitude ist auf die ebenfalls niedrigere Amplitude in der Vorgabe durch das Sollsignal zurückzuführen. Abbildung 11b zeigt die bei Vorgabe der Signale aus Abbildung 11a gemessenen Beschleunigungen an Schwingerreger an Fahrzeugunterboden und Sitzschiene des Fahrersitzes. Ein Peak bei 30 Hz ist erkennbar, der wie auch der starke Abfall der Amplitude zu niedrigeren Frequenzen hin der Charakteristik des Schwingerregers entstammt. Bei 100 Hz bildet sich ein deutlicher Peak aus, der auf die Fahrzeugstruktur zurückzuführen ist. Gleichzeitig zeigt sich, dass mit steigender Frequenz das Verhältnis der gemessenen Amplitude am Schwingerreger zu der gemessenen Amplitude am Fahrersitz steigt, da höhere Frequenzen stärker durch die Fahrzeugstruktur gedämpft werden.

Diese analysierten Übertragungspfadcharakteristiken werden durch ein Vorfilter kompensiert, womit die Regelung des Systems vereinfacht wird.

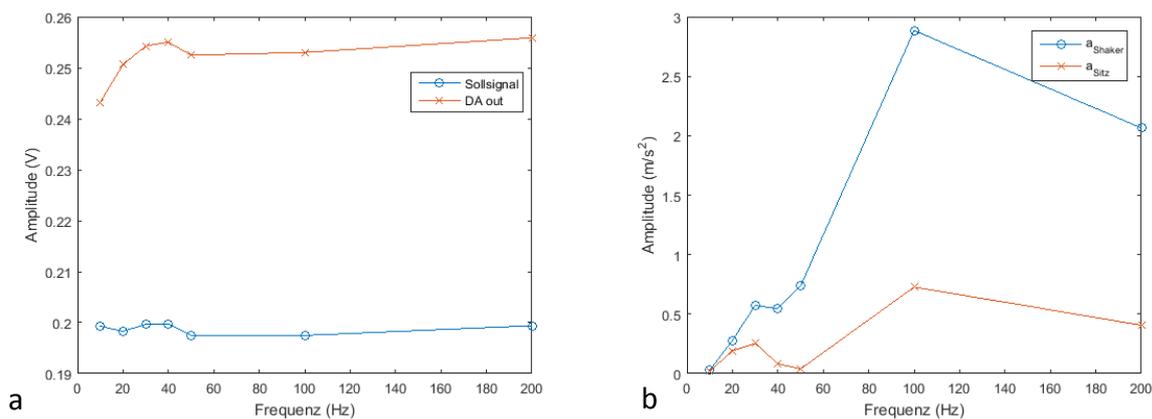


Abbildung 11: Gemessene Übertragungsfunktion für Sinussignale von 10–200 Hz für a) Sollsignal und Signalausgabe am DA-Wandler, b) Beschleunigungsmessung an Schwingerreger und Fahrersitz

Durch Analyse der Transferpfade im Straßenfahrzeug von den entscheidenden Krafteinleitungspunkten (insbesondere durch Straßenanregung, Motor und Triebstrang) zur Fahrerschnittstelle lässt sich der Transferpfad im Pkw-Mock-up des Fahrersimulators zusammen mit dem Shaker (und vorgeschalteter Peripherie wie DA-Wandler, Verstärker) zu einem virtuellen Transferpfad erweitern, dem die Übertragung von den im Fahrersimulator nur theoretisch vorhandenen Krafteinleitungspunkten von Motor, Fahrbahnanregung etc. in die Fahrerkabine entspricht. Dies eröffnet die Möglichkeit, virtuelle Transferpfade als Modell zu hinterlegen. Damit kann ein am Motor- oder Antriebsstrangprüfstand gemessenes Schwingungssignal in ein Anregungssignal an der Fahrzeug-Fahrer-Schnittstelle überführt werden (s. AP 5).

Neben der Reproduktion von Messdaten können Schwingungen auch rein synthetisch generiert werden. Die Signalgenerierung kann dann z. B. durch ein Fahrzeugmodell erfolgen, welchem die Straßendaten (aus Umgebungssimulation) als Eingangsparameter übergeben werden. Ebenso lässt sich mit einem Motormodell mit

der Eingabe von z. B. Drehzahl und Fahrpedalstellung verfahren. Über einen semiempirischen Ansatz kann ein Realfahrzeug, für das Schwingungsmessdaten zur Transferpfadanalyse bestehen, als Modell repliziert werden. Bei einem ausgereiften Modell kann somit durch Variation der Fahrzeugmodellparameter die Auswirkung der Änderung der Fahrzeugstruktur „spürbar“ gemacht werden.

Als weitere Möglichkeit kann die Signalgenerierung aus einer Datenbank erfolgen, die durch Fourieranalyse von Messsignalen, Frequenzselektion und Einordnung der Frequenzen zu Fahrzustand und Fahrbahnoberfläche erstellt wurde. Bei vorhandenen Messdaten stellt dies eine einfach umzusetzende, rudimentäre Methode dar. Die Methode kann aber auch ergänzend zu den zuvor genannten, z. B. zur Darstellung bestimmter Ereignisse, angewendet werden. Abbildung 12 zeigt als Beispiel die Beschleunigungsmessung am Fahrersitz bei der Überfahrt über eine Bremsschwelle und die Fourieranalyse. Zur Nachstellung des Ereignisses wird eine Sinusschwingung mit einer Frequenz von 10 Hz und der gemessenen Amplitude generiert.

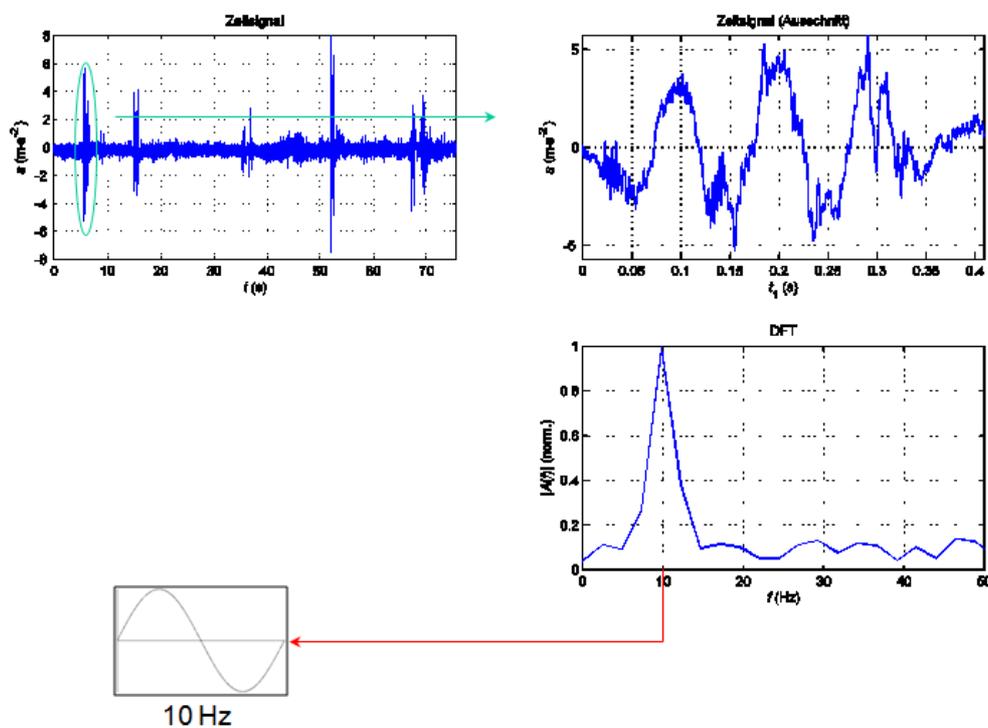


Abbildung 12: Schwingungssynthese Überfahrt Bremsschwelle

Im Simulatorfahrzeug wurden zwei elektromagnetische Inertial-Schwingerer angebracht. Ein Schwingerer wurde über eine steife Trägerplatte an die Unterseite des Bodenblechs unterhalb des Fahrersitzes montiert (s. Abbildung 13). Dieser Schwingerer mit einer Gesamtmasse von 12,7 kg und einem nutzbaren Frequenzbereich von 5–2000 Hz dient zur Anregung hoher Kräfte und Schwingungen in vertikaler Richtung am Fahrersitz und im Fußraum. Gegen seitlich wirkende Kräfte durch Bewegung des Fahrzeugs ist der Schwingerer mit einem umgebenden Gleitlager abgestützt. Der zweite Schwingerer mit einer Gesamtmasse von 170 g und einem nutzbaren Frequenzbereich von 10–10000 Hz ist parallel zum Lenkgestänge am Lenkradaufbau montiert (Abbildung 14), um Vibrationen im Lenkrad zu erzeugen.



Abbildung 13: Schwingerreger Fahrzeugunterboden im eingebauten Zustand und CAD-Konstruktion mit Trägerplatte und Gleitlager



Abbildung 14: Schwingerreger Lenkrad im eingebauten Zustand

Zur Charakterisierung der Geräusche bzw. Schallimmissionen in den Fahrerraum von Elektrofahrzeugen wurden vom ISV Schallpegelmessungen sowohl an verschiedenen elektrisch als auch verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen durchge-

führt. Die Schallpegel wurden im Inneren der Fahrzeuge bei verschiedenen Fahrzuständen, mit und ohne Motorbetrieb aufgenommen. Sämtliche Messungen sind als A-bewertete Schalldruckpegel dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen an den elektrischen Fahrzeugen dargestellt und die Messungen aus verbrennungsmotorischen Fahrzeugen ähnlicher Fahrzeugklassen zum Vergleich herangezogen. Bei den elektrischen Fahrzeugen handelt es sich um einen Smart ED und einen Citroën C-ZERO. Als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor werden eine Mercedes B-Klasse (Ottomotor) und ein VW Golf (Dieselmotor) verglichen.

Abbildung 15 zeigt zunächst die Terzspektren der beiden Elektrofahrzeuge bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Insbesondere im Bereich hoher Frequenzen ab ca. 1 kHz zeigen beide Fahrzeuge sehr ähnliche Pegel. Bei niedrigeren Frequenzen sind die Pegel beim Smart ED generell höher als beim Citroën C-ZERO. Bei 400 Hz sind im Frequenzspektrum des Smart ED einzelne Peaks erkennbar. Diese rühren vermutlich vom elektrischen Antrieb her. Zu niedrigeren Frequenzen hin werden die Pegel von Fahrwerk- und Karosserieschwingungen bestimmt. Diese werden beim Smart ED stärker angeregt bzw. weniger gedämpft.

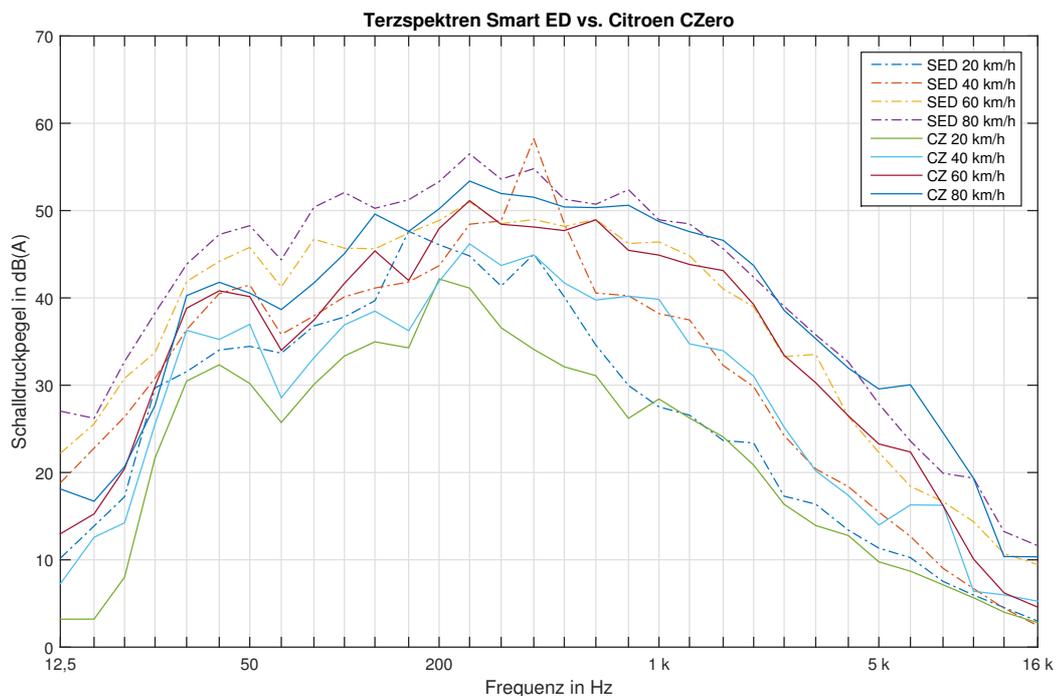


Abbildung 15: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeugen bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten

Abbildung 16 vergleicht die Spektren des Citroën C-ZERO mit denen der Mercedes B-Klasse. Die Fahrzeuge sind vom Fahrkomfort her gut vergleichbar, wie sich anhand der Spektren im langwelligen Bereich bis 50 Hz erkennen lässt. Deutlich sind bei der Mercedes B-Klasse die Peaks im Frequenzbereich zwischen 50 und 200 Hz, die aus der Geräuschemission des Verbrennungsmotors resultieren. Beim Citroën C-ZERO treten dagegen ca. zwischen 5 und 10 kHz höhere Pegel auf.

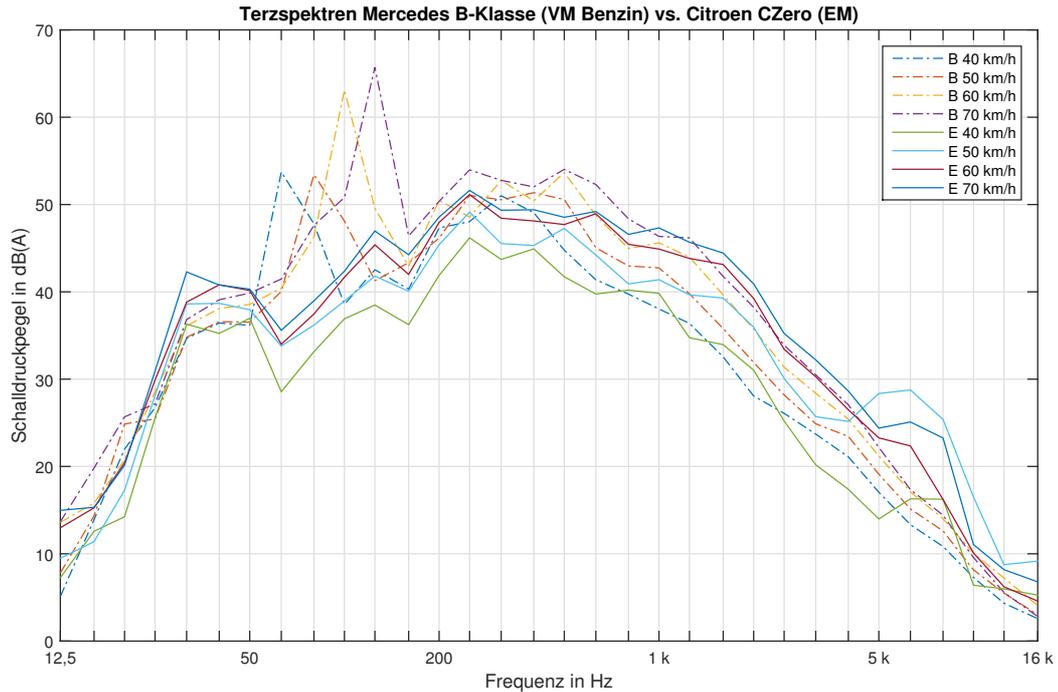


Abbildung 16: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeug und benzinbetriebenen Fahrzeug bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten

Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Vergleich des Citroën C-ZERO mit dem dieselbetriebenen VW Golf, s. Abbildung 17. Auch hier treten deutliche Peaks zwischen 50 und 200 Hz auf, die auf den Verbrennungsmotor zurückzuführen sind. Der Vergleich mit Abbildung 18, in der die Spektren des VW Golf ohne Betrieb des Motors dargestellt sind, verdeutlicht dies. Die Peaks zwischen 50 und 200 Hz treten nicht auf, und auch im Frequenzbereich bis ca. 1 kHz sind die Schalldruckpegel niedriger. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Lautstärke elektrischer Fahrzeuge durchaus vergleichbar ist mit verbrennungsmotorischen Fahrzeugen ohne Betrieb des Motors, wobei bei hohen (bezogen auf den vom menschlichen Gehör wahrnehmbaren Frequenzbereich) Frequenzen etwas höhere Pegel auftreten.

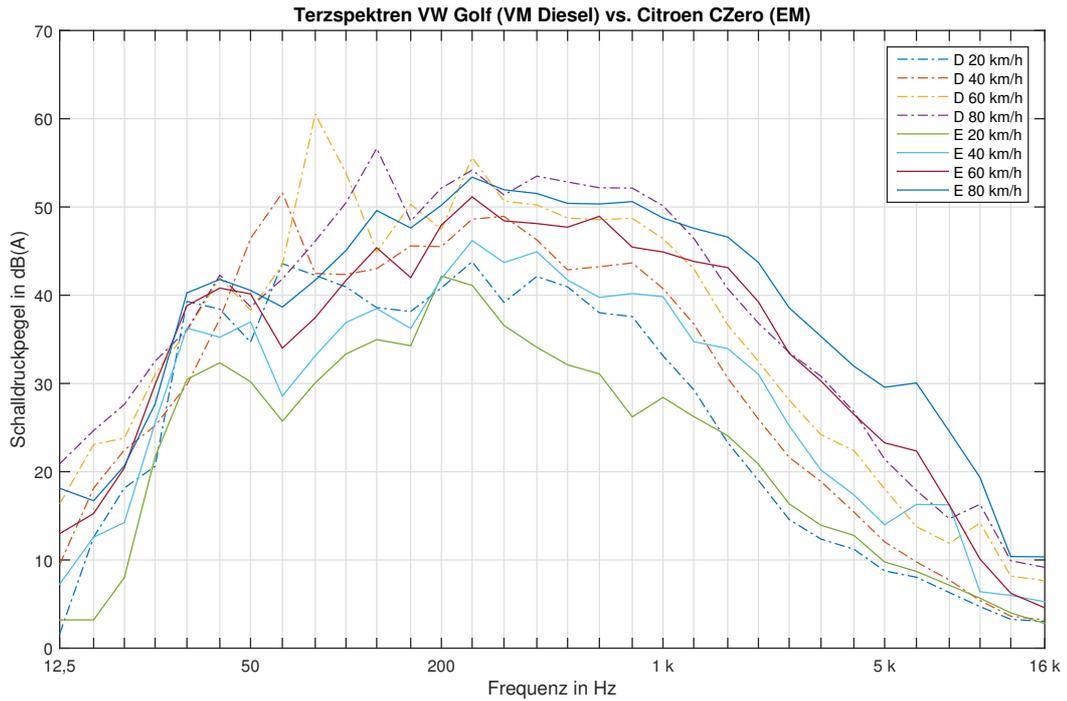


Abbildung 17: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeug und dieselbetriebenem Fahrzeug bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten

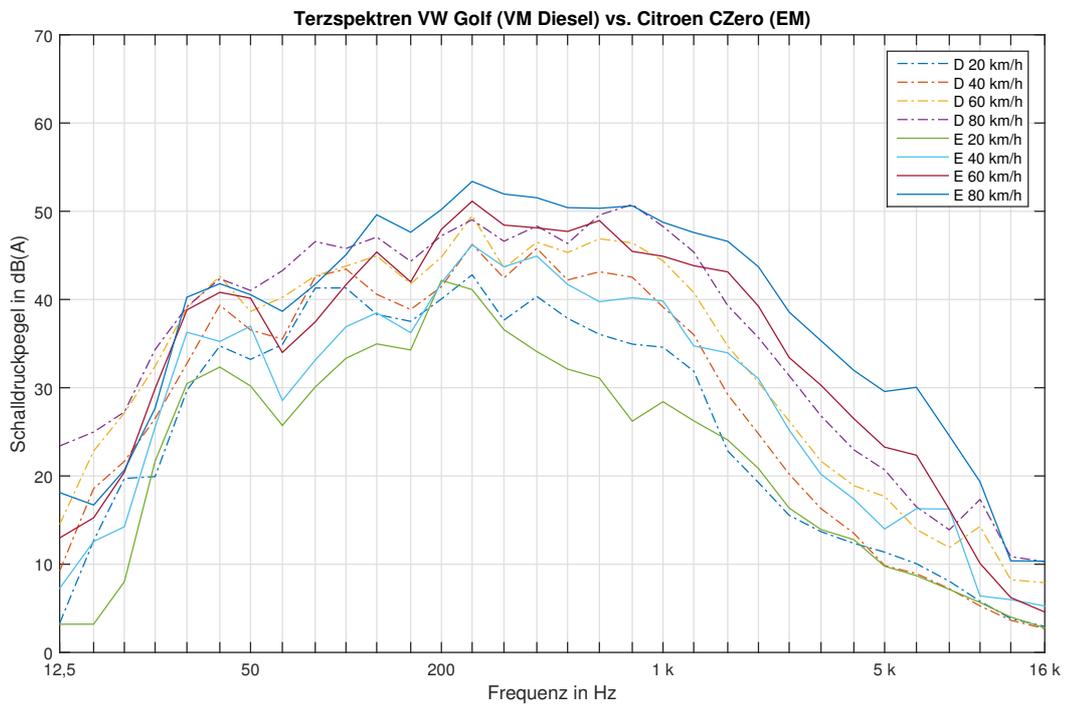


Abbildung 18: Terzspektren A-bewertete Schalldruckpegel von Elektrofahrzeug und dieselbetriebenem Fahrzeug ohne Motorbetrieb bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten

Eine andere Analyse zeigt die Zusammensetzung des Frequenzspektrums eines Fahrzeugs anhand Messdaten von Beschleunigungsaufnehmern. Zur Veranschaulichung des Einflusses des Verbrennungsmotors ist in Abbildung 19 ein Fahrzeug mit

Dieselmotor gezeigt. Mit dem Fahrzeug wurden mehrere Versuchsreihen von Fahrten mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit und mit Beschleunigungs-/Verzögerungsvorgängen im Teil- und Volllastbereich durchgeführt. Neben der Aufnahme von Beschleunigungsmessdaten an Motor, Fahrersitz und Differenzial wurden auch den Fahrzustand charakterisierende Größen wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Motordrehzahl, Raddrehzahlen etc. aufgezeichnet. Über eine Analyse mittels FFT-Methoden wurden die unterschiedlichen Einflüsse auf die Schwingungsanregung im Fahrzeug untersucht und zugeordnet. Der Fokus der Betrachtung liegt hier im Frequenzbereich von ca. 0–100 Hz, d. h. primär im taktil wahrnehmbaren Frequenzbereich.

Die Abbildung 19 zeigt beispielhaft das Frequenzspektrum der Beschleunigungsmessung am Fahrersitz in vertikaler Richtung, bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit von 77 km/h. Die Abbildung zeigt die Zuordnung ausgeprägter Peaks zu den Einflussgrößen Rad- und Motorresonanzen. Im Frequenzbereich zwischen 2 und 20 Hz treten Resonanzschwingungen des Fahrzeugaufbaus bzw. Koppelschwingungen von Karosserie und Aggregat sowie vom Fahrersitz auf. Der Peak bei 26,5 Hz ist vermutlich der Biege- oder Torsionseigenfrequenz der Karosserie zuzuordnen. Aus der Raddrehzahl und dem dynamischen Rollradius lässt sich der Peak bei 10,6 Hz als die 1. Radordnung identifizieren. Die entsprechenden Vielfachen der Frequenz können den höheren Radordnungen zugeordnet werden (dargestellt mit nummerierten orangefarbenen Kreisen). Auf ähnliche Weise lassen sich die Frequenzanteile der Motorordnungen zuordnen. Im vorliegenden Fall eines 4-Zylinder-Verbrennungsmotors treten – bei einer Motordrehzahl von 1305 min⁻¹ (21,75 Hz) – die 2. Motorordnung bei 43,5 Hz sowie die 4. und 6. Motorordnung hervor. Das Auftreten der geradzahigen Motorordnungen ist typisch für den 4-Zylinder-Motor, da pro Umdrehung zwei Zündvorgänge stattfinden, die zu einer unwuchtartigen Anregung der Kurbelwelle mit der doppelten Frequenz der Drehzahl führen.

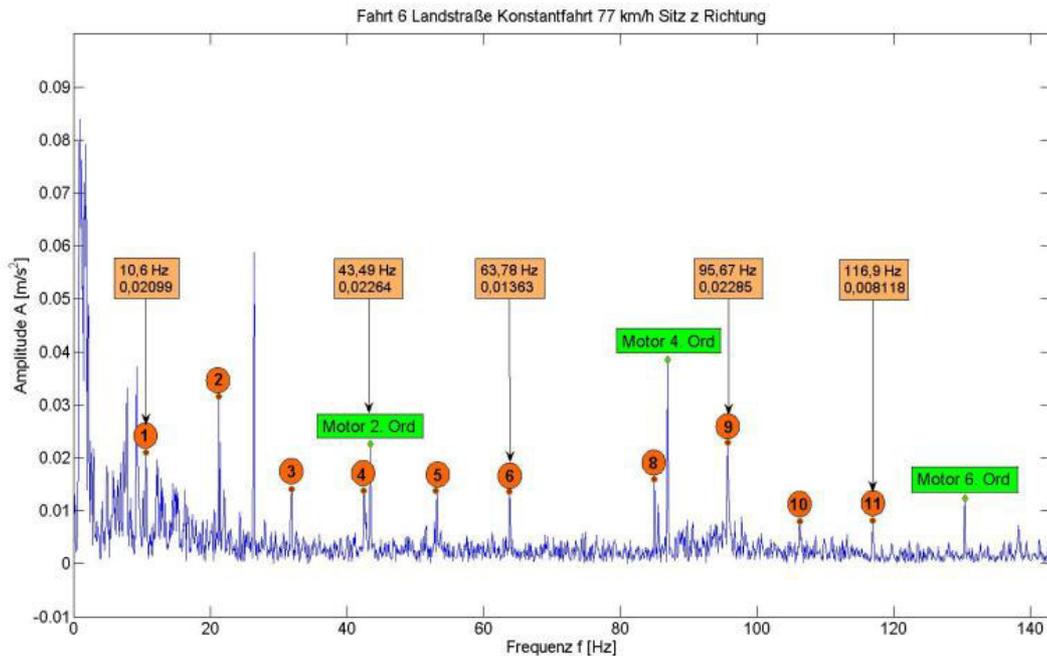


Abbildung 19: Frequenzspektrum Beschleunigungssensor am Fahrersitz eines dieselmotorisch betriebenen Fahrzeugs bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit

Das Frequenzspektrum eines Fahrzeugs selben Typs, aber mit elektrischem Antrieb müsste sich ähnlich zusammensetzen (bei Ausschluss von Modifikationen des Chassis, der Karosserie oder des Fahrwerks), ohne die Anteile der dominanten Motorordnungen des Verbrennungsmotors und unter Berücksichtigung eventueller Änderungen des restlichen Triebstrangs. Dagegen müssten zusätzliche Frequenzanteile um z. B. die 20., 40. usw. Motorordnung auftreten, abhängig von der Bauart der elektrischen Maschine. Als Beispiel zeigt Abbildung 20 das Frequenzspektrum eines Elektrofahrzeugs, gemessen mit einem Beschleunigungssensor am Fahrersitz, bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit von 44 km/h. Auch hier zeigt sich, dass die, im niedrigen Frequenzbereich mit Datenpunkten markierten Radresonanzen einen wesentlichen Teil des Spektrums ausmachen. Fällt die Frequenz einer Radresonanz mit einer anderen Resonanzfrequenz zusammen, bilden sich hohe Amplituden aus wie am Punkt $X = 54,63$. An der Schulter des Peaks bei $X = 53,1$ lässt sich erkennen, dass hier noch ein weiterer Peak liegt. Abbildung 21 zeigt dasselbe Frequenzspektrum neben den Spektren zu einem früheren und einem späteren Zeitpunkt während derselben Messfahrt. Die Fahrzeuggeschwindigkeiten liegen nahe beieinander, woraus sich eine ähnliche Frequenzlage der Radresonanzen ergibt (markiert mit Datenpunkten). Da die Resonanzfrequenzen Vielfache (Harmonische) der Grundfrequenz sind, folgen aus kleinen Frequenzabweichungen im niedrigen Frequenzbereich größere Abweichungen im hohen Frequenzbereich. Daher lässt sich die Ähnlichkeit der Spektren vor allem im niedrigen Frequenzbereich erkennen. Der Anstieg der Amplitude bei Zusammenfallen der Radresonanz mit anderen Resonanzfrequenzen lässt sich hier um ca. 28 Hz erkennen. Aus Abbildung 20 bzw. Spektrum t_2 in Abbildung 21 erkennt man den Peak der Radresonanz bei $X = 27,47$ sowie einen Peak bei 28,69 Hz. Die etwas höhere Fahrzeuggeschwindigkeit zu den Zeitpunkten t_1 und t_3

führt zu einer etwas höheren Radresonanz und damit einem Zusammenfallen der beiden Peaks, was sich in einer hohen Amplitude bei $X = 28,84$ äußert.

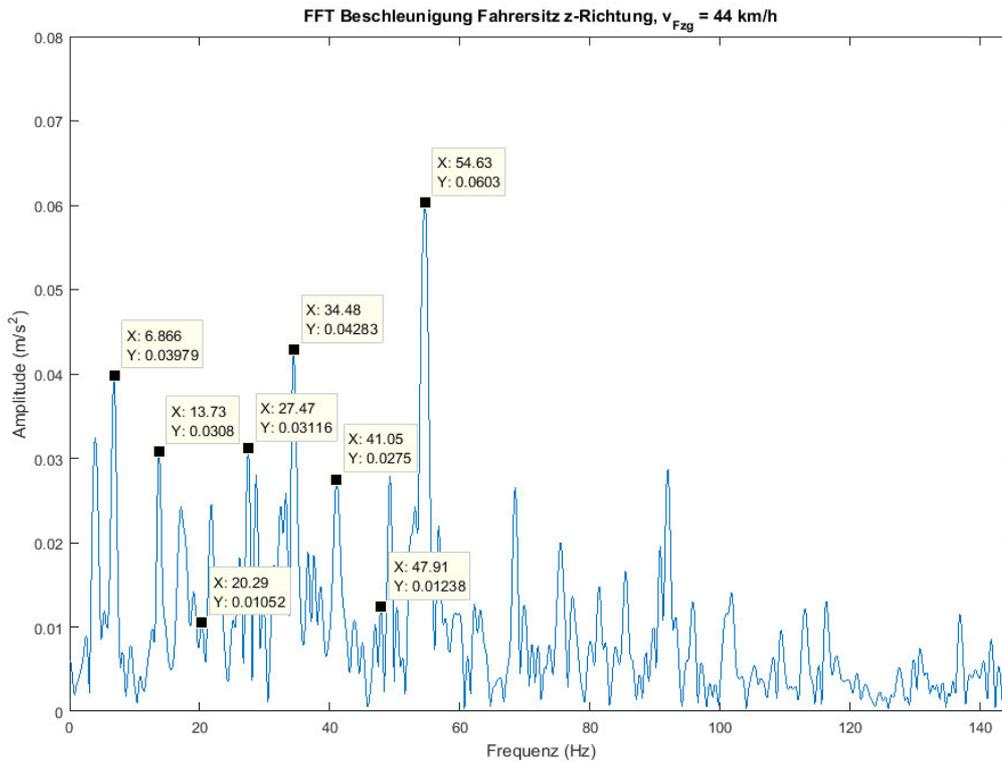


Abbildung 20: Frequenzspektrum Beschleunigungssensor am Fahrersitz eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit

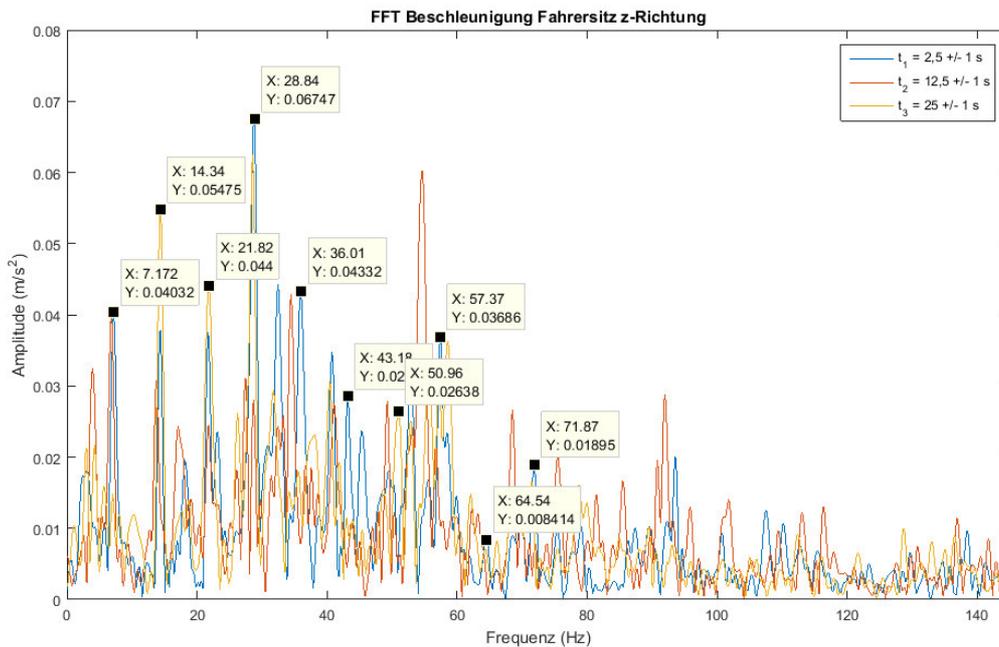


Abbildung 21: Frequenzspektren Beschleunigungssensor am Fahrersitz eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit

Abbildung 22 zeigt über einen längeren Zeitabschnitt mit annähernd konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit zwischen 44 und 47 km/h das Frequenzspektrum der Beschleunigungen am Sitz (Vertikalachse) des E-Fahrzeugs, berechnet mittels Kurzzeit-Fouriertransformation (STFT). Über die Zeitachse betrachtet ändert sich das Spektrum nur wenig, was die Ergebnisse aus Abbildung 21 bestätigt. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 23 eine beschleunigte Fahrt, wobei deutlich erkennbar mit steigender Motordrehzahl mehrere Peaks zu höheren Frequenzen verschoben werden, die Anregungen der drehzahlabhängigen Resonanzen von Motor, Antriebstrang und Rädern entsprechen. Einige Peaks bleiben dagegen von der Drehzahl unbeeinflusst und treten stets bei denselben Frequenzen auf, die den Resonanzen von Karosserie, Fahrwerk etc. entsprechen. Deutlich erkennbar „schneiden“ die drehzahlabhängigen Resonanzen eine drehzahlunabhängige Resonanz bei ca. 1 kHz, was sich in hohen Amplituden in diesem Bereich äußert.

Insbesondere im Bereich von ca. 8–16 s treten relativ hohe Amplituden auf. Da diese in einem breiten Frequenzbereich erkennbar sind, lässt dies auf stärkere Fahrbahn-anregungen schließen.

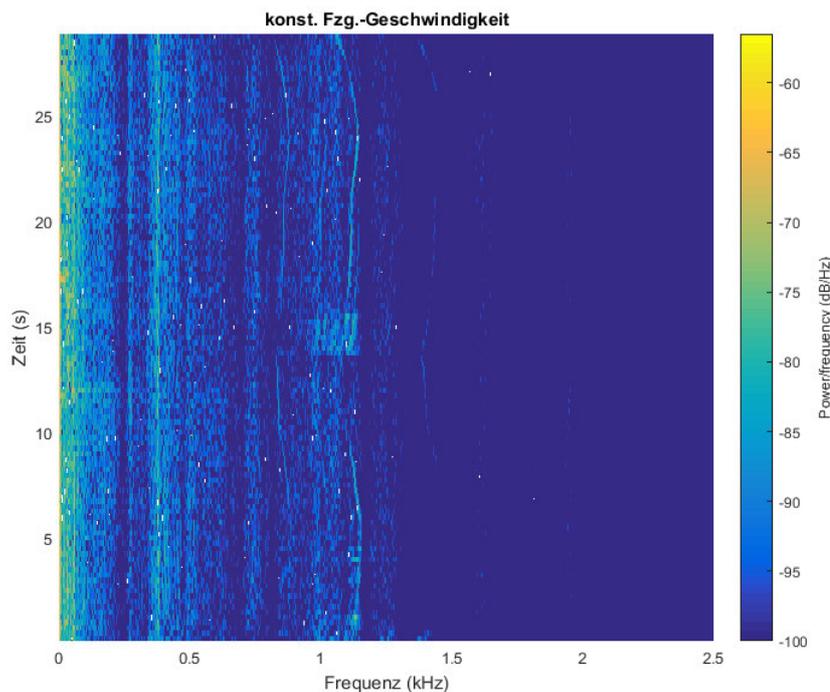


Abbildung 22: Zeitverlauf des Frequenzspektrums (STFT) bei Fahrt mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit

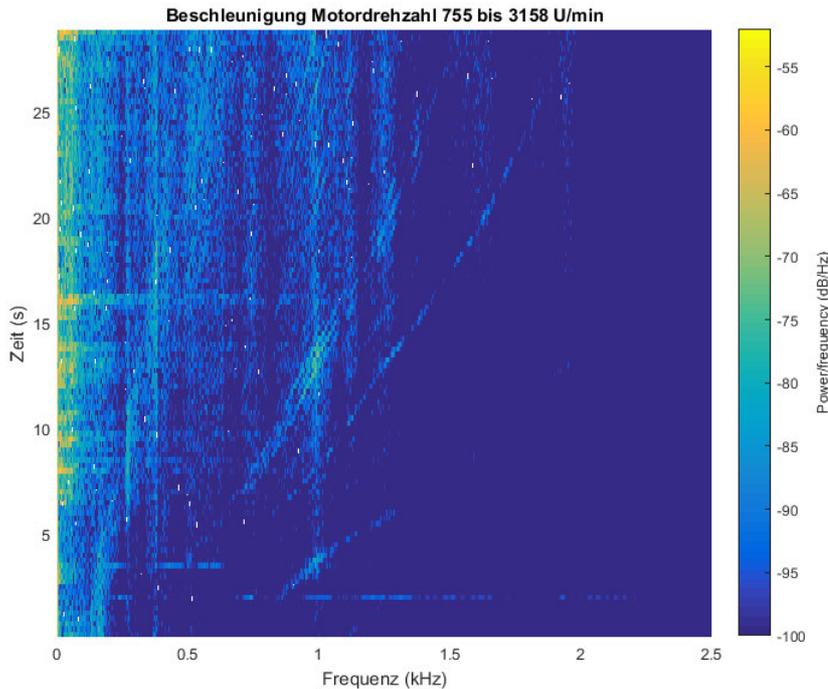


Abbildung 23: Zeitverlauf des Frequenzspektrums (STFT) bei beschleunigter Fahrt

Die gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, den Radresonanzen bei der Darstellung der Schwingungen und Geräuschen von E-Fahrzeugen besonderes Gewicht beizumessen. Die Frequenzen der Radschwingungen können über ein einfaches Modell in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit moduliert werden, wobei der Detaillierungsgrad des Radmodells beliebig hoch sein kann. Wichtig sind zudem im niedrigen Frequenzbereich die Aufbauschwingungen von Karosserie und Fahrwerk. Diese treten, wie bereits angesprochen, bei diskreten Frequenzen auf und können über die Frequenzspektrale und die Fahrzeugparameter analysiert werden. Aus der aus Messdaten ermittelten Geschwindigkeitsabhängigkeit und Varianz der Amplituden wird eine Amplitudenmodulation für die Synthese der Schwingungen entwickelt. Zum „Füllen“ des Spektrums wird ein Rosa Rauschen unterlegt (dessen Amplitude umgekehrt proportional zur Frequenz ist), das die Schwingungsanregung durch die Fahrbahnoberfläche annähert.

Echtzeitsimulation des Fahrzeugumfelds

Für die Echtzeitsimulation des Fahrzeugumfelds wurde ein Szenario Editor in Betrieb genommen. Dieser ermöglicht es uns die verschiedensten Formen von Verkehrsszenarien zu erstellen und während der laufenden Simulation zu beeinflussen. Dabei können Fremdverkehrsfahrzeug/Fußgänger zum Einen konkret positioniert und bzgl. ihrem Verhalten parametrisiert werden und zum Anderen einfach um das Simulationsfahrzeug innerhalb einer einstellbaren räumlichen Grenze verteilt werden. Darüber hinaus können Trigger Punkte absolut oder relativ bzgl. eines Objektes platziert werden, die definierte Aktionen auslösen, falls sich ein oder mehrere bestimmte Objekte in ihrem Aktionsradius befinden. Der Szenario Editor bietet auch die Möglichkeit die Bewegung der Objekte während der Simulation zu verfolgen. Auch Ampelschaltungen können über den Szenario Editor eingestellt werden. Dabei kann neben der

Zykluszeit und der Dauer der einzelnen Phasen auch die Synchronizität zwischen verschiedenen Ampelschaltungen parametrisiert werden. Somit kann z.B. eine grüne Welle simuliert werden.

Der Scenario Editor wurde bzgl. seiner Möglichkeiten der Beeinflussung anderer Simulationskomponenten erweitert. Bisher konnten über den Editor mittels Trigger Points nur grafische Events wie Regen oder eine Veränderung der Tageszeit ausgelöst bzw. das Verhalten von anderen Verkehrsteilnehmern beeinflusst werden. Durch den Aufbau eines Simulation Control Protocol Servers kann nun auch z.B. eine Kommunikation mit der Fahrdynamiksimulation oder der Sensorsimulation erfolgen. Durch diese zusätzliche Schnittstelle können nun weitere Szenarien (Ausfall eines Sensors oder der Wegfall eines Fahrzeugassistenzsystems) realisiert werden.



Abbildung 24: Manipulation des Wetters

Neben der Abbildung des Verkehrsflusses kann auch das Wetter über ein sogenanntes SCP Interface verändert werden (siehe Abbildung 24). Dabei kann die Erscheinungsbild des Himmels (Grad der Bewölkung), die Sichtweite, die Tageszeit usw. manipuliert werden.

Einbindung optischer Umfeldsensorik in das Grafiksystem

Neben der Simulation des Umfelds wurde auch eine Sensorsimulation am Fahrsimulator integriert. Über einen sogenannten Modulmanager können verschiedene Sensoren wie Kamera-, Radar- oder Lasersensoren am Fahrzeug platziert werden. Über ein separates Netzwerk werden deren Informationen dann zur Verfügung gestellt. Deren Daten sind zum Einen die Rohdaten wie ein Kamerabild oder Tiefenbild und zum Anderen die Positionen der detektierten Objekte innerhalb des jeweiligen Sensors. Neben den Sensoren die es auch in der Realität gibt wurde auch ein sogenannter Perfekter Sensor definiert, der alle Objekte innerhalb eines bestimmten Radius um das Fahrzeug detektiert. Dadurch wurde eine Möglichkeit geschaffen Fahrassistenzsystem schnell zu testen, da keine Überlegungen zur Platzierung der Sensoren erfolgen müssen, und die Soundsimulation kann mit diesen Daten die Fremdverkehrsgeräusche darstellen.

Die Sensorsimulation wurde zudem um den Radarsensor LRR3 der Firma Bosch und um die Laserscanner von Sick erweitert. Zuvor konnten in der Simulation schon die verschiedenen Sensoren wie Kamera, Radar und Laserscanner konfiguriert und genutzt werden, aber die Schnittstellen zu den genutzten Assistenzsystemen im Fahrsimulator waren bisher immer in einem selbst definiertem Format. Jetzt werden die

entsprechenden Schnittstellen der realen Sensoren bereitgestellt. Im Falle des Radarsensors LRR3 ist dies eine CAN Interface mit Ausgabe der Fremdfahrzeuge im Sichtbereich des Sensors. Bei den Laserscannern von Sick ist die Schnittstelle als TCP Kommunikation realisiert, die die Rohdaten zur Verfügung stellt. Um diese Rohdaten zu simulieren wurde ein eigener Imagegenerator IG implementiert (siehe Abbildung 25).

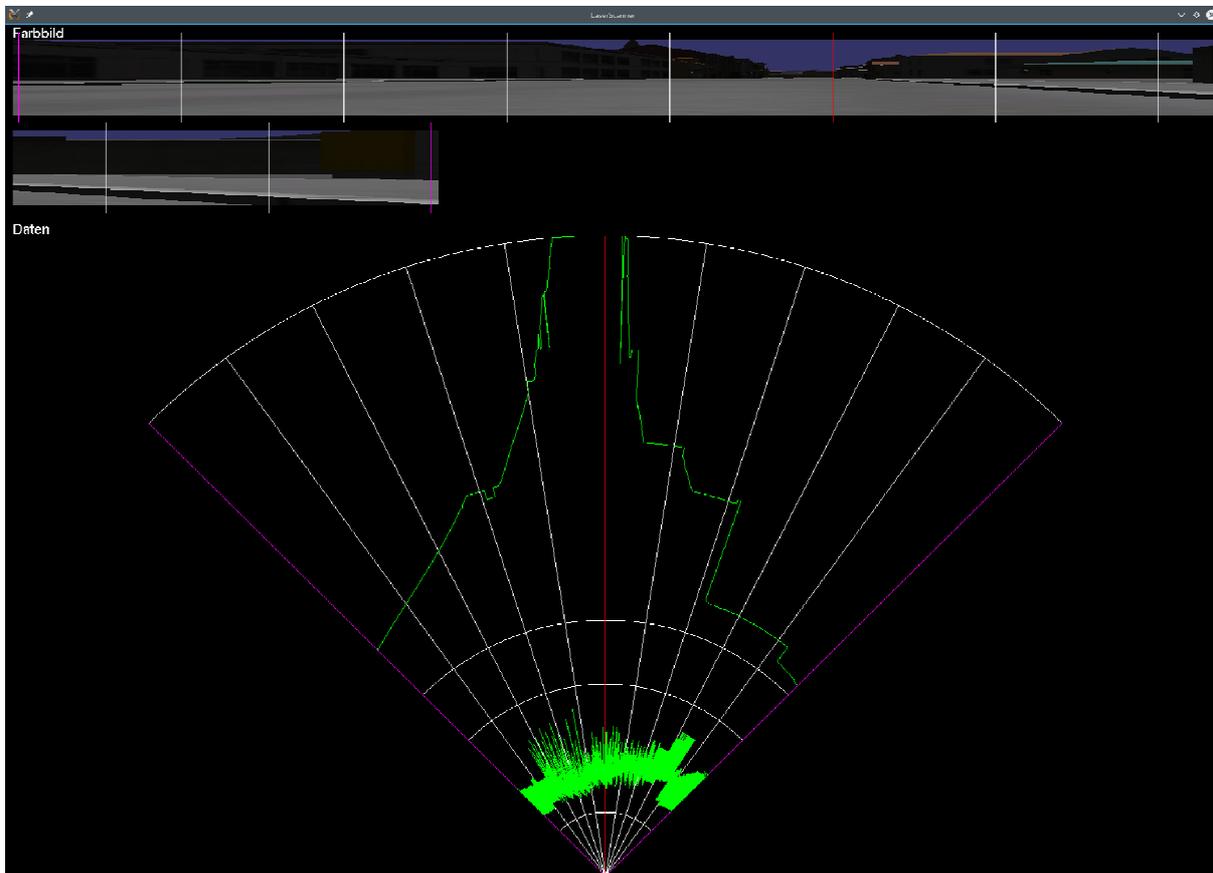


Abbildung 25: Imagegenerator Sick Laserscanner

In der oberen Abbildung sind die simulierten Rohdaten dargestellt. Es werden die Distanzwerte (obere grüne Linie) sowie die RSSI Werte (untere grüne Linie) berechnet. Die vier weißen Linien im Halbkreis stellen die minimalen/maximalen Distanz-/RSSI-Werte dar. Das Farbbild dient zur Kontrolle der Ausgabe. Bei den Laserscannern wird neben der Kommunikation im Betrieb auch die Vorabkonfiguration des Sensors simuliert. Der Vorteil dieser neuen Schnittstellen besteht nun darin, dass jetzt die Assistenzsysteme, die diese Sensoren nutzten, nicht mehr zwischen einem Einsatz im Fahrzeug oder im Fahrsimulator angepasst werden müssen. Die Systeme können nun mit ihren Schnittstellen getestet werden.

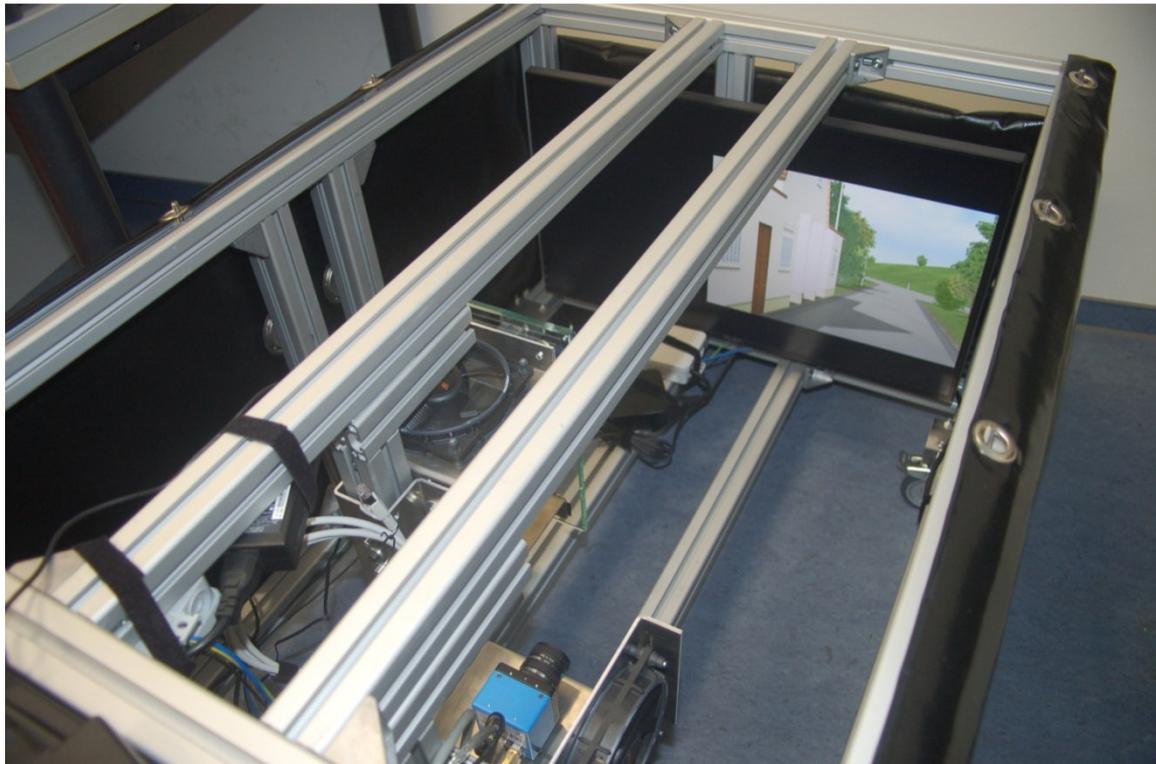


Abbildung 26: Kameraprüfstand

Um auch Kamerasysteme mit unterschiedlichen Systemgrenzen zur Simulation testen zu können wurde ein Prüfstand aufgebaut, der die entsprechenden Schnittstellen/Daten bereitstellt (siehe Abbildung 26). Die Anlage erlaubt das Testen folgender Systemkonfigurationen:

- **Software in the Loop (SiL):** Hier wird nur die Software des Systems getestet. Dazu werden notwendigen Eingangsdaten über einen entsprechenden Imagegenerator oder über den Runtime Data Bus (RDB) bereitgestellt. Neben Kamerasystemen können hier auch andere Sensoren wie z.B. die erwähnten Laserscanner von Sick eingesetzt werden. Die Ausgangsdaten werden entweder über ein standardisierte Schnittstelle im Fahrsimulator ausgegeben oder über die Schnittstelle des Realsensors (UDP, TCP, CAN).
- **Hardware in the Loop (HiL) – Half Mode:** Es wird nun auch die Hardware des System einbezogen. Allerdings werden in dieser Konfiguration die Eingangsdaten noch über Shared-Memory bereitgestellt und noch nicht über dessen eigentlicher Schnittstelle mit seinem Umfeld. Auch hier ist noch die Verwendung aller Sensortypen möglich, falls eine Eingangsschnittstelle bereitgestellt werden kann.
- **Hardware in the Loop (HiL) – Full Mode:** Der Sensor verarbeitet die Daten, die ihm über seine reale Schnittstelle bereitgestellt werden. Andere Sensoren, die nicht auf einem Kamerasystem basieren, sind in dieser Konfiguration nicht möglich. Neben intelligenten Sensoren, die z.B. Objekte im Eingangsbild erkennen und diese als Ausgang liefern, können auch einfache Kamera eingebunden werden, die das aufgenommen Bild über Ethernet (ETH), FireWire (FW) oder Universal Serial Bus (USB) kommunizieren. Bei „Black Box“ Sys-

temen (z.B. das Mobileye 560) muss die Software/Ablauf zur Kamerakalibrierung vorhanden sein.

Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 verdeutlichen nochmals die unterschiedlichen Konfigurationen mit den entsprechenden Signalflüssen und Systemgrenzen. Im Lauf des Projekts konnten im SiL-Modus der Bosch LRR3 Radarsensor und die Sick Laserscanner, im HiL-Modus Half und Full Mode die Kameraplattform D3 von VRmagics und im Full Mode das Mobileye-System getestet werden.

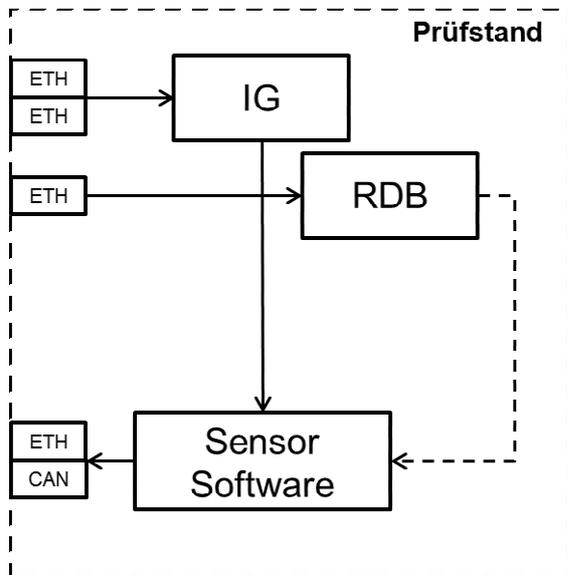


Abbildung 27: Kameraprüfstand – SiL

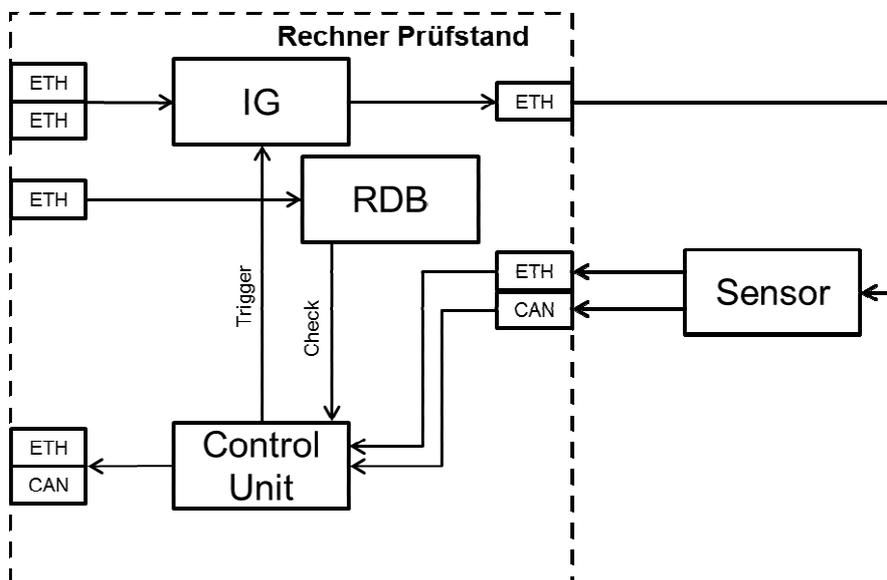


Abbildung 28: Kameraprüfstand – HiL Half Mode

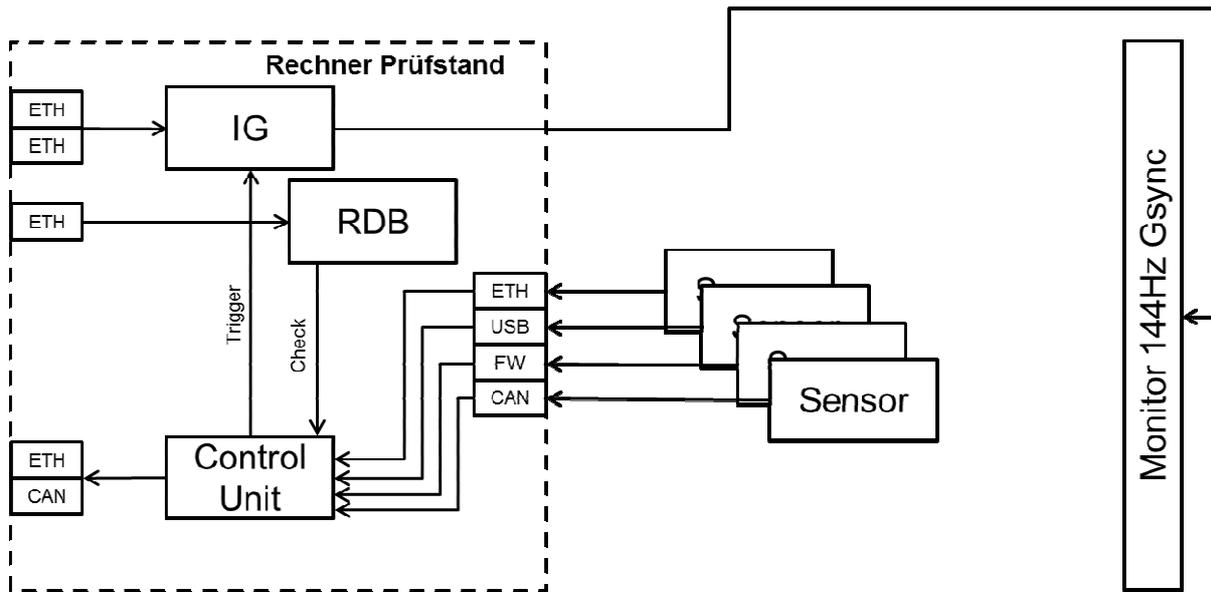


Abbildung 29: Kameraprüfstand – HiL Full Mode

Neben den Fahrzeugsensoren basierend auf Hardware wurde auch ein Sensor für die Bereitstellung des elektronischen Horizonts im ADASRP Format. Grundlage der Datenbereitstellung ist das Straßennetzwerk im OpenDRIVE-Format, wobei auch OpenStreetMap Dateien (OSM) eingelesen werden können. Die Simulationssoftware ist dabei sowohl auf einer x86 Architektur sowie auf eine ARM Architektur lauffähig. Dadurch kann der Sensor auch im Realfahrzeug verwendet werden. Dies erbringt den Vorteil, dass Streckeneigenschaften modifiziert bzw. hinzugefügt werden aufgrund des offenen Formats von OSM. Die zuvor nur nutzbaren NAVTEQ Karten konnten nicht angepasst werden. Das ADASRP Format wurde auch im Lauf des Projekts um bestimmte Streckenmerkmale erweitert und um dynamische Objekte ergänzt. Zum Beispiel können nun neben der Position einer Ampelschaltung auch dessen Zustände abgefragt werden.

Als letzter wurde auch ein Wettersensor entwickelt, der die grafischen Wetterbindungen bereitstellt. Somit können zum einen die Straßenreibung der Fahrdynamik und zum anderen das Reifengeräusch passend zur Grafik modifiziert werden.

Generierung von ganzheitlichen, virtuellen Straßennetzen und Modellierung von Straßenoberflächeneigenschaften

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Zuverlässigkeit und Sicherheit von Elektrofahrzeugen (ZuSE)“ befasst sich das Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) mit zwei Schwerpunkten: die Generierung von ganzheitlichen, virtuellen Straßennetzen (AP 2.5 und AP 2.7) und die Modellierung von Oberflächeneigenschaften (AP 2.6). Ziel ist die Erstellung von realistischen Straßenumgebungen und damit auch realistischen Simulationsfahrten in Fahrsimulatoren.

Für die Durchführung von Simulationsfahrten im Fahrsimulator wird ein virtuelles Straßennetz benötigt. Idealerweise sollte das virtuelle Netz reale Strecken beinhalten, sodass Fahrversuche realitätsnah durchgeführt werden können. Die Geometrie der virtuellen Strecken muss somit auch die gleichen Eigenschaften wie in der Reali-

tät besitzen. Als Grundlage für das virtuelle Netz dienen Messfahrten mit einem bereits vorhanden System sowie Daten aus digitalen Karten. Zusätzlich zur Erfassung der Straßen und Konvertierung der Messdaten in OpenDRIVE[®]-Format, wurden zwei weitere Ansätze zur Generierung von virtuellen Straßennetzen verfolgt:

- Die Generierung von Straßennetzen aus Straßeninformationsbanken (SIB¹) , d. h. die Übertragung der Straßengeometrien aus vorhandenen Datenbanken der Straßenbauverwaltung in das OpenDRIVE[®]-Format, damit diese in Fahrsimulatoren simuliert werden können.
- Die Generierung von Straßennetzen aus digitalen Planungsunterlagen, d. h. die Übertragung von Straßengeometrien aus computergestützten Straßenplanungsprogrammen bzw. Straßenentwürfen in das OpenDRIVE[®]-Format.

Ziel beim ersten Ansatz ist die schnelle Generierung von virtuellen Straßennetzen aus vorhandenen digitalen Straßendaten, die zentral in SIB gespeichert sind. Vorteil ist, dass die Straßen nicht mit dem Messfahrzeug erfasst werden müssen, was zu einer großen Zeitersparnis führt. Nachteil ist, dass die in der SIB gespeicherten Daten teilweise von der Realität abweichen (z. B. durch Ungenauigkeiten in der Bauausführung oder Änderungen in der Ausführungsplanung, die in den Datenbanken ggf. nicht erfasst sind). Ein Beispiel ist in Abbildung 30 dargestellt. Sie zeigt einen Vergleich eines Höhenplans (Gradiente bzw. Steigungen und Gefälle) eines Streckenabschnittes aus messtechnisch erfassten Höhendaten (blau) und aus Daten der SIB (rot). In diesem Fall weichen die Geometrien, vor allem im Bereich der Ausrundungen, geringfügig voneinander ab. Die automatische Übertragung der Daten von der SIB in das OpenDRIVE[®]-Format ist dahingehend schwierig, weil die Datenstrukturen sehr unterschiedlich sind.

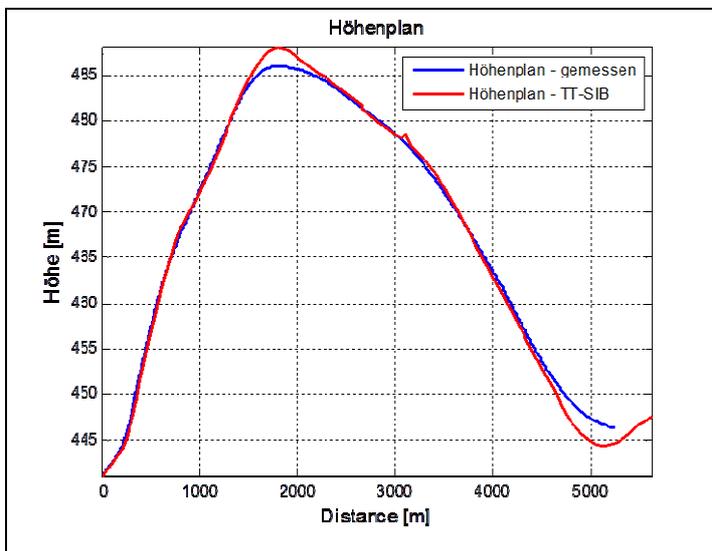


Abbildung 30: Vergleich des Höhenplans eines Streckenabschnittes aus TT-SIB[®]-Daten und messtechnisch erfassten Daten (Messfahrzeug)

¹ Straßeninformationsbanken sind digitale Datenbanken, in denen die Bundesländer Informationen des übergeordneten Straßennetzes (u. a. Geometrie und Eigenschaften) speichern und pflegen. Das Bundesland Baden-Württemberg nutzt die TT-SIB[®] der Fa. Novasib; dementsprechend werden in ZuSE die Untersuchungen mit dieser Datenbank durchgeführt.

Die zweite Methode, virtuelle Straßennetze zu generieren, ist die Generierung von Straßengeometrien aus digitalen Planungsunterlagen (Konvertierung von digitalen Informationen aus computergestützter Straßenplanungssoftware in das OpenDRIVE[®]-Format). Ziel beim zweiten Ansatz ist die Untersuchung von noch in der Planung befindlichen Straßenabschnitte in Fahrsimulatoren zu erlauben, um z. B. mögliche Planungsfehler vor dem Bau zu erkennen. Hierfür ist ein MATLAB[®]-Tool entwickelt worden. Die Software erlaubt die automatische Übertragung von Lage- und Höhenplaninformationen sowie Querneigungen der Straße in das OpenDRIVE[®]-Format. Dafür müssen die Daten zuerst aus dem computergestützten Straßenplanungsprogramm² in die gängigen Dateiformate *.txt und *.xls exportiert werden. Die Anzahl der Fahrstreifen sowie ihre Breite muss dabei manuell eingegeben werden. Dies wird in Kauf genommen, weil für einzelne Straßenabschnitte diese Information in der Regel konstant bleibt. Der schematische Ablauf des Tools ist in Abbildung 31 dargestellt.

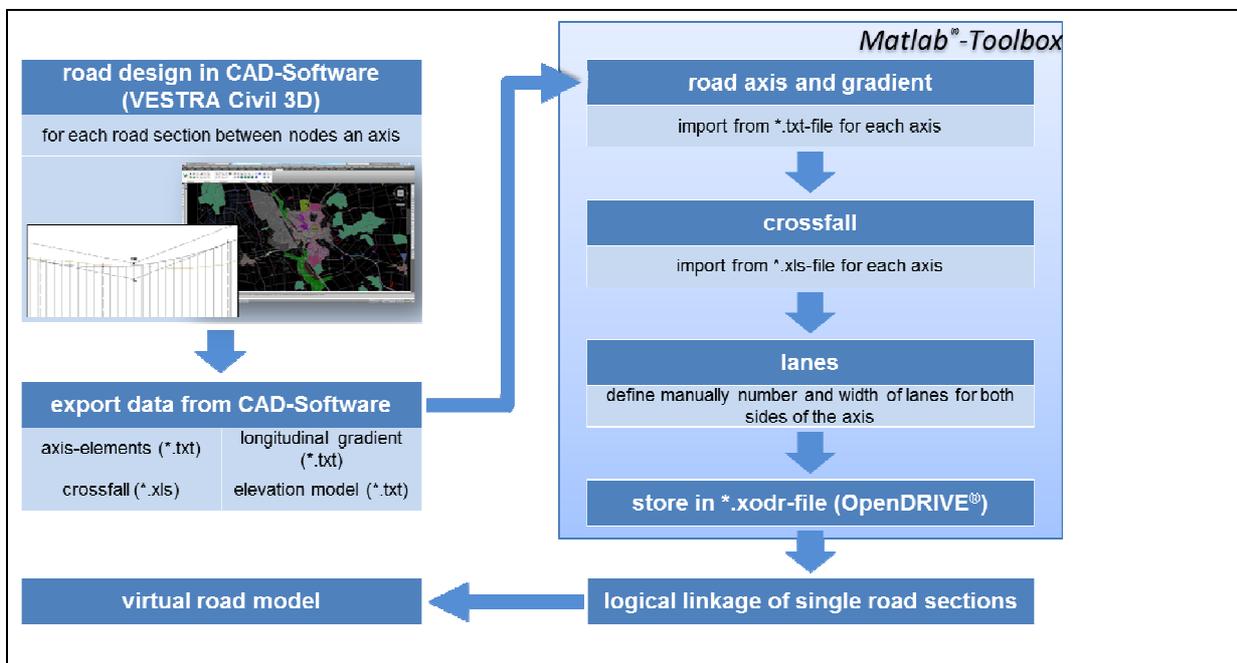


Abbildung 31: Ablauf der Datenverarbeitung zur Erstellung von Straßen in OpenDRIVE[®]-Format aus CAD-geplanten Straßen

Mit dem entstehenden Tool können auch Straßenabschnitte, die sich noch in der Planung befinden, im Fahrsimulator untersucht werden und mögliche Planungsfehler bzw. kritische Bereiche der Trassierung bereits vor dem Bau erkannt und rechtzeitig korrigiert werden. Durch die Überführung von CAD-Entwürfen in den Fahrsimulator bzw. das OpenDRIVE[®]-Format ist es zudem möglich, gängige Trassierungsrichtwerte nach den deutschen Richtlinien und Erfahrungen (z. B. Mindestradien, Radienfolgen, Höchstlängen von Geraden, Phänomene der räumlichen Linienführung) im Fahrsimulator zu untersuchen. Zusätzlich können von den Straßenentwurfsrichtlinien abweichende sowie ungewöhnliche Planungslösungen (z. B. Schrägver-

² Hier wurde mit VESTRA seven Civil 3D der Fa. AKG Software Consulting GmbH gearbeitet, die in Deutschland zu den führenden Anbietern von CAD-Software für den Straßenentwurf zählt.

windungen) in einer sicheren Umgebung, untersucht werden (z. B. fahrdynamische Auswirkungen und insbesondere Fahrverhaltensuntersuchungen bzw. Umgang des Fahrers mit „ungewohnten“ Trassierungssituationen).

Die Modellierung von Knotenpunktbereichen ist bei allen Ansätzen problematisch, da diese in OpenDRIVE® und in der tatsächlichen Straßenplanung verschieden beschrieben werden. Aufgrund ihrer Komplexität und Verschiedenheit müssen Knotenpunkte daher nach wie vor manuell erstellt werden.

Der zweite Schwerpunkt befasste sich mit der Modellierung von sicherheitsrelevanten Straßeneigenschaften und wie diese den Betrieb von Elektro-Fahrzeugen beeinflussen. Hier wurden insbesondere zwei Auswirkungen, die von der Straßenoberfläche (mit-)verursacht werden, untersucht: die Reifen-Fahrbahn-Geräusche (RFG) bzw. Akustik und die Haptik.

Für die Untersuchungen in diesem Bereich musste das vorhandene Messfahrzeug erweitert werden. Für die Erfassung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen wurde eine Messvorrichtung nach der ISO/DIS 11819-2 [ISO12] entworfen und eingebaut. Somit sind Messungen nach der „close-proximity“ Methode (CPX) möglich. Zusätzlich wurden Thermometer für die Erfassung der Luft- und Oberflächentemperatur montiert. Diese Sensoren, sowie ein vorhandener Abstands-Laser-Sensor für die Erfassung der Fahrbahntextur und eine Inertialmesseinheit (IMU) für die Erfassung der Position und die Bewegungen des Fahrzeugs, sind an den zentralen Messcomputer angeschlossen. Dies erlaubt die parallele Erfassung der Fahrbahneigenschaften und der Reifen-Fahrbahn-Geräusche sowie Fahrzeugbewegungen. Dank des modularisierten Aufbaus der Messvorrichtung sind Messungen auch mit anderen Fahrzeugen möglich. In Abbildung 32 ist das Messfahrzeug mit der aktuellsten Konfiguration der Sensoren zu sehen.

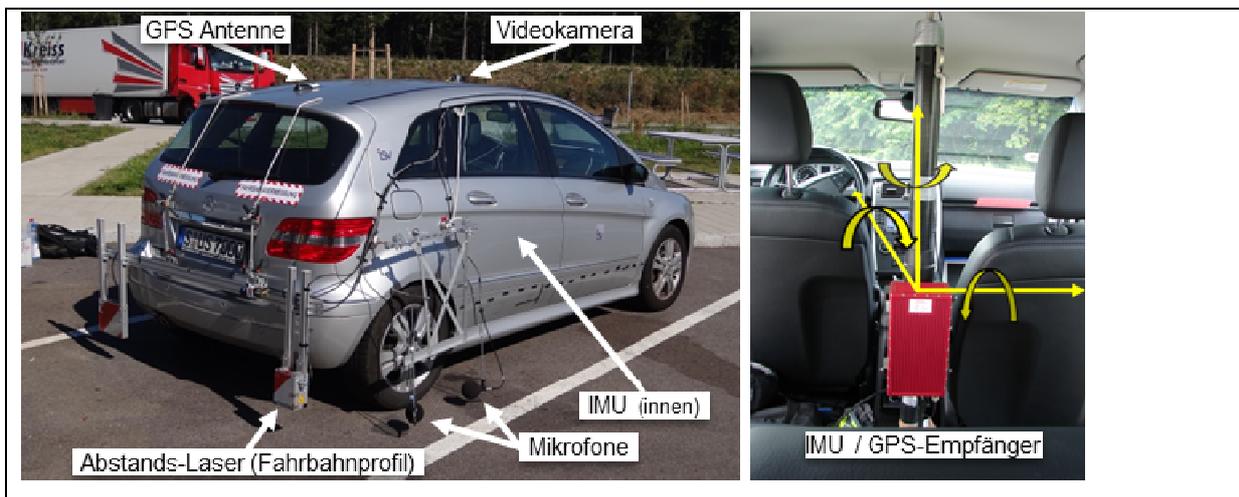


Abbildung 32: Messfahrzeug zur Erfassung der Strecken- und Fahrbahnoberflächeneigenschaften

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Untersuchung der Auswirkungen der Fahrbahnoberfläche auf die Lärmemissionen bei Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen. Straßenverkehrslärm lässt sich in drei Komponenten unterteilen: Antriebsgeräusche, Reifen-Fahrbahn-Geräusche und Umströmungsgeräusche. Da bei niedrigen Geschwindigkeiten die Umströmungsgeräusche eine untergeordnete Rolle spielen

[Zel12], wurden diese nicht weiter untersucht. Interessant ist wie sich die anderen beiden Komponenten bei Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen bei Geschwindigkeiten zwischen 30 und 80 km/h. In diesem Bereich spielen beide Geräusche (Roll- und Antriebsgeräusch) eine wesentliche Rolle. Deshalb wurde untersucht, wie sich das bei Elektro- und Verbrennungsantrieben unterscheidet (z. B. hinsichtlich Wahrnehmbarkeit der Fahrzeuge im städtischen Umfeld durch Fußgänger). Dafür wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Messungen des Reifen-Fahrbahn-Geräusches nach der ISO/DIS 11819-2 [ISO12]
- Schalldruckpegelmessungen innerhalb verschiedener Fahrzeugtypen nach DIN ISO 5128 [DIN84]
- Schalldruckpegelmessungen von verschiedenen Fahrzeugtypen (Außenpegel bei Vorbeifahrt) nach DIN EN ISO 11819-1 [Anf07]
- Die Arbeiten in diesem Bereich lassen sich in drei Bereiche aufteilen:
- Untersuchung der Auswirkungen der Fahrbahn auf die Geräuschenstehung
- Untersuchung der Einflüsse auf Reifen-Fahrbahn-Geräusche
- Modellierung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches

Im Fahrzeuginnenraum wurden Messungen in drei verschiedenen Zustände durchgeführt: Normale Fahrt (Gesamtgeräusch); Leerlaufahrt, um die Antriebsgeräusche so niedrig wie möglich zu halten und Stillstand mit angeschaltetem Motor (Antriebsgeräusch im Leerlauf bzw. bei verschiedenen Drehzahlen des Motors). Alle Messungen wurden im gleichen Gang, mit dem gleichen Fahrzeug und über ein gleiches Zeitintervall gemessen. So konnten aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Bei den Messungen mit den Elektro-Fahrzeugen war eine Besonderheit zu beachten: Eine mechanische Trennung der Antriebskomponenten war bei den verfügbaren Modellen nicht möglich, weil der Elektromotor direkt ohne Kupplung und Wechselgetriebe an die Antriebswelle angeflanscht war. Somit konnten auch Messungen im Stillstand (Antriebsgeräusch) nicht durchgeführt werden, weil der Motor im Leerlauf nicht elektrisch angesteuert wird.

Die Untersuchungen haben u. a. gezeigt, dass im Innenraum E-Fahrzeuge bei Geschwindigkeiten zwischen 20 und 80 km/h in der Regel leiser als Verbrennungsfahrzeuge sind (Abbildung 33, a)). Werden die Geräuschtypen (Antriebs- gegenüber Reifen-Fahrbahn-Geräusch) getrennt betrachtet (Abbildung 33, b)), wird erkannt, dass bei Geschwindigkeiten zwischen 40 und 80 km/h das Rollgeräusch einen geringeren Einfluss als das Antriebsgeräusch hat. Nichtsdestotrotz wurde bei der Betrachtung der Terzspektren erkannt, dass die Rollgeräusche in einigen Frequenzbereichen je nach Geschwindigkeit die maßgebende Geräuschquelle bezüglich der Innenraumgeräusche sein können. Mit Hilfe der Ergebnisse kann u. a. die realitätsnahe Wiedergabe von Innenraumgeräuschen bei verschiedenen Fahrbahnzuständen im Fahr Simulator verifiziert werden, z. B. hinsichtlich Frequenz und Schalldruckpegel.

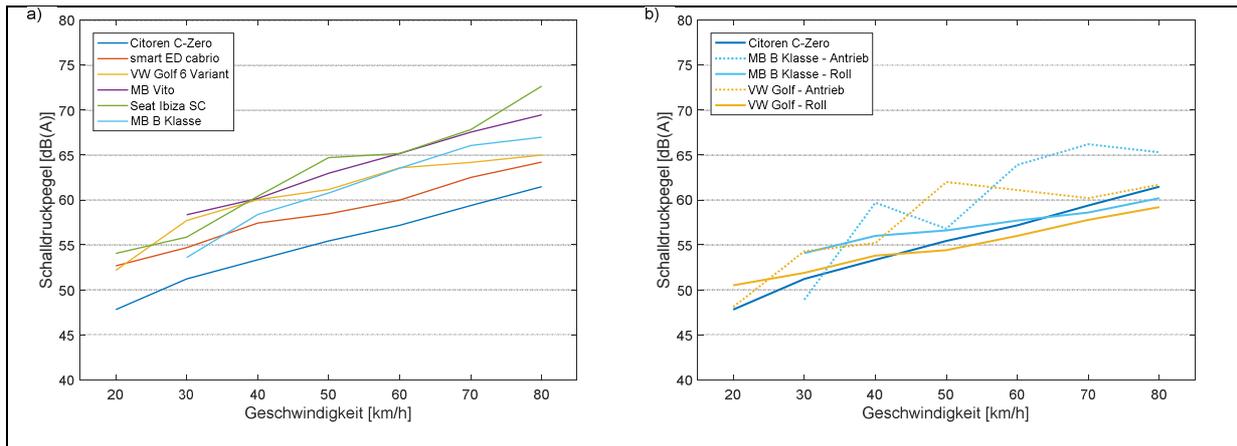


Abbildung 33: Verlauf des äquivalenten Schalldruckpegels im Fahrzeuginnenraum in Abhängigkeit der Geschwindigkeit: a) Vergleich mehreren Fahrzeugtypen; b) Vergleich getrennt nach Geräuschtyp für zwei Fahrzeuge [Wie14]

Davon sehr verschieden sind die Charakteristika bei den Außen- oder Umgebungsgeräuschen. Verschiedene Messungen nach der CPB-Methode haben gezeigt, dass bei konstanten Geschwindigkeiten zwischen ca. 30 und 80 km/h die Reifen-Fahrbahn-Geräusche für das Außengeräusch maßgebend sind (unter ca. 30 km/h sind i. d. R. Antriebsgeräusche dominant) [Fis14]. Dieser Effekt lässt sich sehr gut beim Vergleich von Messungen mit ein- und ausgeschaltetem Motor nachvollziehen. Wie in der Abbildung 34 a) zu sehen ist, gibt es bei den Lärmemissionen zwischen 30 und 60 km/h weder bei den CPB-Messungen noch bei den CPX-Messungen kaum Unterschiede. Wird das Terzspektrum bei ca. 50 km/h (Abbildung 34 b)) betrachtet, sind auch kaum Unterschiede zu erkennen. Lediglich bei sehr niedrigen Frequenzen bei der CPB-Messung sind die maximalen Schalldruckpegel mit angeschaltetem Motor höher. Das ist ein eindeutiges Indiz, dass bei Umgebungsgeräuschen und bei konstanten Geschwindigkeiten (zwischen ca. 30 und 80 km/h) die Reifen-Fahrbahn-Geräusche für das Außengeräusch maßgebend sind, wie es auch in den meisten Literaturquellen dargestellt wird. Für Elektro-Fahrzeuge bedeutet dies, dass in Geschwindigkeitsbereichen von über 30 km/h ein „Überhören“ der Elektro-Fahrzeuge durch Fußgänger wegen ihres geringen Antriebsgeräuschs mutmaßlich nicht zu erwarten ist. In niedrigeren Geschwindigkeitsbereichen ist dies jedoch ggf. problematisch.

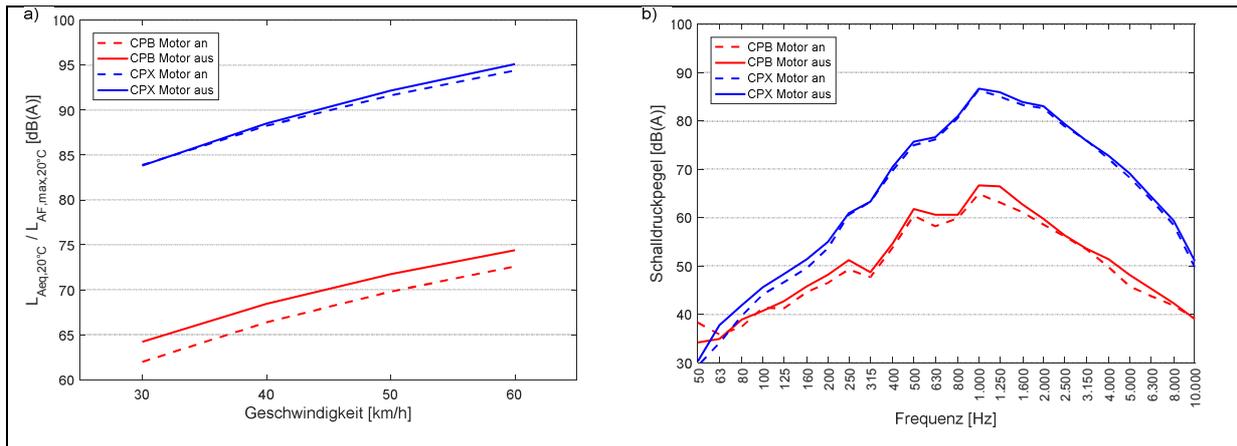


Abbildung 34: Vergleich der Lärmmessungen mit ein- und ausgeschaltetem Motor eines benzinbetriebenes Fahrzeug auf eine Asphaltbeton Oberfläche nach der CPB- und der CPX-Methode: a) Verlauf des äquivalenten Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Geschwindigkeit; b) Terzspektrum bei 50 km/h [Fis16]

Für die spätere Modellbildung wurden zunächst Messungen zur Analyse der Einflüsse verschiedener Parameter auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch durchgeführt. Die Geschwindigkeit spielt, wie schon in mehreren Studien gezeigt (u. a. [San02]), eine bedeutende Rolle beim Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Je schneller ein Fahrzeug fährt, desto höher ist das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Die Messungen mit dem Messfahrzeug haben die Ergebnisse der Literatur bestätigt. Wie die Messergebnisse zeigen (Abbildung 35, a)), ist eine logarithmische Korrelation zwischen der Geschwindigkeit und dem Schalldruckpegel am Reifen auszumachen. Die Messungen wurden jeweils auf der gleichen Strecke durchgeführt. Dabei wurde versucht, alle anderen Parameter konstant zu halten. Die Temperaturänderungen wurden mit dem Korrekturfaktor nach der ISO/DIS 11819-2 [ISO12] berücksichtigt, sodass die Messungen untereinander vergleichbar sein sollten (trotz unterschiedlicher Messtage). Messungen, bei denen über einen definierten Streckenabschnitt die Geschwindigkeit nicht konstant gehalten werden konnte, sind in die Ergebnisse nicht eingeflossen.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Luft-, Fahrbahn- und Reifentemperatur. Dazu sind viele Studien in den letzten Jahren durchgeführt worden (u. a. [Anf07], [Bue08], [Büh13] und [Mio14]). Diese haben ergeben, dass eine lineare Korrelation zwischen den verschiedenen Temperaturen und dem Reifen-Fahrbahn-Geräusch vorhanden sind. Inwiefern die Temperatur das Reifen-Fahrbahn-Geräusch beeinflusst, hängt vom benutzten Reifen und der Fahrbahnoberfläche ab [Mio15]. Es ist aber unvorstellbar, für jeden Reifen, der auf dem Markt zu finden ist, und jede Fahrbahn den Einfluss zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde vom Arbeitskreis ISO/TC 43/SC 1/WG 27 der International Standard Organization entschieden, die Lufttemperatur als Einflussfaktor zu wählen. Für diese sind daher Korrekturfaktoren für drei verschiedene Fahrbahnbelagstypen und zwei Reifen festgelegt, die mit den Messungen bei verschiedenen Temperaturen verglichen werden können [Mio15].

Aus diesen Grundlagen wird der Einfluss der Lufttemperatur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch bei dem verwendeten Messreifen untersucht. Es konnte überprüft werden, ob die mit dem Messfahrzeug gemessenen Schalldruckpegel mit dem von der ISO/DIS 11819-2 [ISO12] vorgegebenen Temperaturkorrekturfaktor korrigiert

werden kann oder ob ein „eigener“ Temperaturkorrekturfaktor entwickelt werden sollte. Die Ergebnisse der Messungen mit dem ISV-Messfahrzeug sind in der Abbildung 35, b) dargestellt.

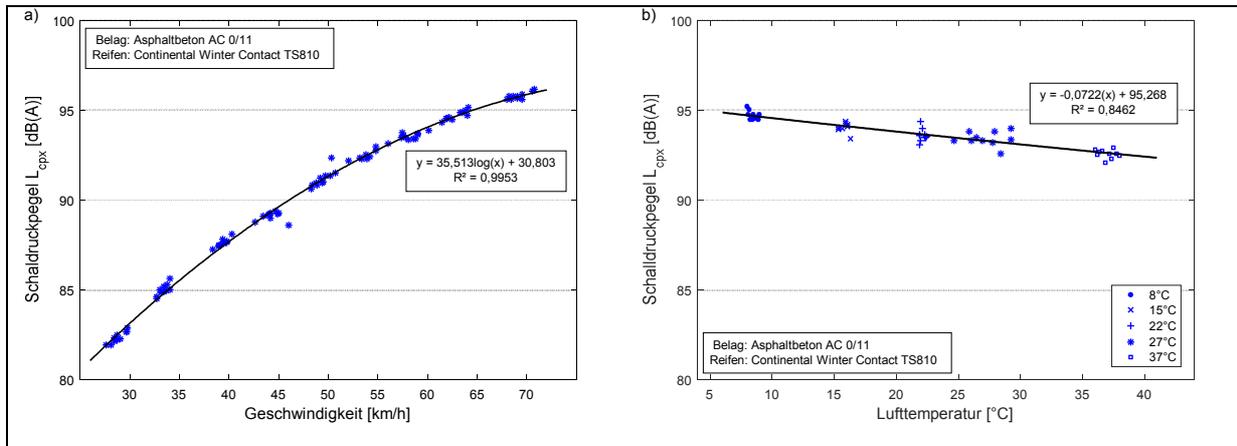


Abbildung 35: Äquivalenter Schalldruckpegel bei CPX-Messungen über einen definierten Streckenabschnitt: a) bei verschiedenen Geschwindigkeiten (nach [Rec15]), b) bei verschiedenen Lufttemperaturen (nach [Röh15])

Für den Vergleich der Messungen wurde der Temperaturkorrekturfaktor C_T nach der ISO/DIS 11819-2 [ISO12] nicht angewendet. Somit war es möglich das Verhalten des Schalldruckpegels zu beobachten. Die Ergebnisse bestätigen die Literaturausagen: zwischen Lufttemperatur und Reifen-Fahrbahn-Geräusch besteht näherungsweise eine lineare Korrelation (je wärmer es wird, desto niedriger ist das Reifen-Fahrbahn-Geräusch) [San02], [Anf07] und [Büh13].

Es wurde der Einfluss von weiteren Parametern, z. B. des Luftdrucks, untersucht. Allerdings konnte in dieser Hinsicht keine eindeutige Aussage getroffen bzw. eine Korrelation festgestellt werden, da entweder zu wenige verwertbare Messungen vorhanden waren oder keine eindeutige Korrelation zu sehen war.

Die genannten Untersuchungen sind die Grundlage für die Erstellung eines Modells zur Simulation des Reifen-Fahrbahn-Geräusches. Die Möglichkeit, das Reifen-Fahrbahn-Geräusch über eine Modellierung abzubilden, eröffnet die Möglichkeit, abhängig von bestimmten Straßenoberflächeneigenschaften, das Reifen-Fahrbahn-Geräusch und seine Charakteristik auch im Fahr Simulator in Echtzeit zu reproduzieren und auf diese Weise einen möglichst realistischen Fahreindruck zu vermitteln. Vorhandene Modelle arbeiten mit bekannten Informationen über den Fahrbahnbelagtyp oder mit bekannten Radlasten. Diese sind in Fahr Simulatoren meistens nicht vorhanden. Die Fahrbahndaten sind entweder als Fahrbahnprofil oder als 3D-Fahrbahntextur hinterlegt. Aus diesem Grund entstand ein empirisches Modell, das auf bestimmten Fahrbahnkenngößen (der Textur) basiert. Diese lassen sich aus Fahrbahnprofilen bestimmen und sind vom Fahrbahnbelagtyp unabhängig, sofern die Deckschicht keine schallabsorbierenden Eigenschaften (durch hohen zugänglichen Hohlraumgehalt) aufweist. Diese werden in den weiteren Betrachtungen zur Modellbildung daher ausgeschlossen.

Akustisch betrachtet spielen bei der Entstehung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen folgende Texturkenngößen eine Rolle: der Gestaltfaktor g , der Effektivwert der

Rauigkeitstiefe im Maximum der spektralen Hüllkurve, kurz maximale Rauigkeitstiefe R_{max} und dem R_{max} -Wert entsprechende Wellenlänge des Spektrums, kurz maximale Wellenlänge λ_{max} . Anhand dieser Kenngrößen lässt sich jedes Fahrbahnprofil charakterisieren, was maßgebend für die Anregung der Reifen beim Rollen ist, die zu Reifen-Fahrbahn-Geräuschen führt (sowohl mechanische als auch aerodynamische Anregungen). Zur Veranschaulichung sind diese in der Abbildung 36 dargestellt [Bec08,For13].

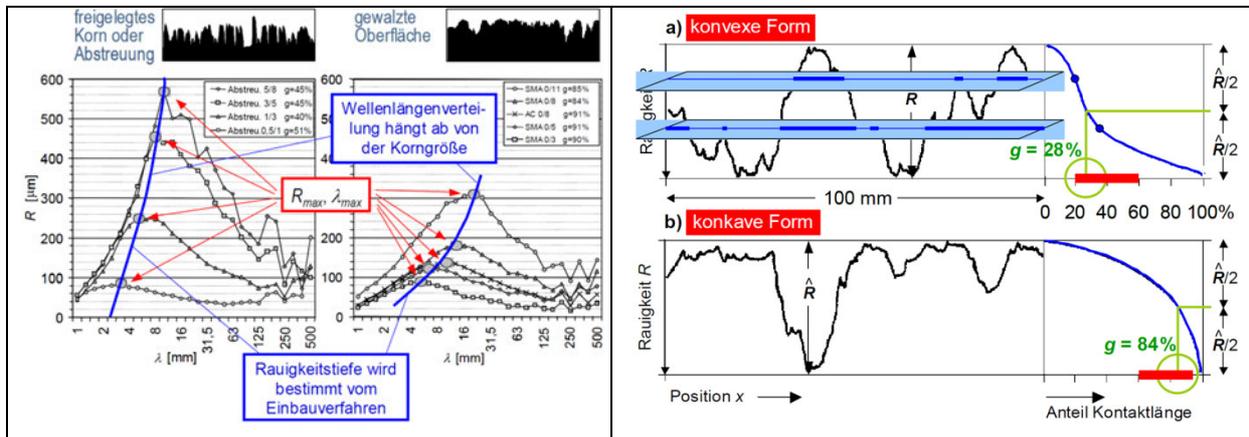


Abbildung 36: Links: Texturspektren (Rauigkeitstiefe R in Abhängigkeit von der Texturwellenlänge λ) für mehrere Fahrbahnoberflächen zweier Deckschichttypen. Links: abgestreute Oberflächen, rechts: gewalzte Oberflächen, jeweils mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung [Bec08]

Rechts: Definition des Gestaltfaktors g zur Kennzeichnung der unterschiedlichen Gestalt von Texturen [Bec08]

In der aktuellen Version des Modells wird das Reifen-Fahrbahn-Geräusch aus drei Einflussfaktoren simuliert: die Fahrgeschwindigkeit, die Fahrbahnstruktur und die Lufttemperatur. Diese sind laut der Literaturanalyse und eigenen Untersuchungen, die wichtigsten. Ein weiterer Vorteil der genannten Einflussfaktoren ist, dass diese drei Faktoren relativ einfach zu messen sind, was für weitere Untersuchungen und die Validierung des Modells hilfreich ist. Beim Modell wird zunächst jeder Einflussfaktor getrennt betrachtet. Für jeden einzelnen Faktor wird eine Korrelation zu gemessenen Schalldruckpegeln erstellt. Diese Korrelationen enthalten Koeffizienten, die aus den Auswertungen eigener Messungen berechnet sind. Dabei werden die Fahrbahnprofile nach den genannten Kenngrößen in verschiedene Gruppen aufgeteilt. Für jede Gruppe sind die jeweiligen Koeffizienten bestimmt worden. Am Ende werden die einzelnen Schalldruckpegel zum Reifen-Fahrbahn-Geräusch rechnerisch zusammengefasst. Dieser Prozess erlaubt die Simulation von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen aus in Fahrsimulatoren hinterlegten Fahrbahnprofilen, Informationen zur Lufttemperatur sowie simulierter Fahrgeschwindigkeit. Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass das Längsprofil im Voraus bekannt sein muss.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Analyse der Auswirkungen der Längsunebenheiten auf das Fahrzeug (und Fahrzeuginsassen). Längsunebenheiten haben i. d. R. Auswirkungen auf den Fahrkomfort, können aber, je nach Straßenoberflächenzustand, auch Auswirkungen auf die Fahrsicherheit, Ladegut, erhöhte dynamische Straßenbelastung oder/und auf die Fahrzeuginsassengesundheit haben. Um diese in Fahrsimulatoren realistisch abzubilden, müssen Zusammenhänge zwi-

schen dem Längsprofil einer Straße und den Bewegungen innerhalb des Fahrzeugs bekannt sein. Diese wurden anhand eigener Messungen mit dem Messfahrzeug untersucht.

Bei den Untersuchungen wurden verschiedene Hindernistypen (Schlaglöcher, Hindernisse mit großer Amplitude etc.) mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren. Ein Beispiel ist in Abbildung 37 dargestellt. Dabei werden die vertikalen Beschleunigungen innerhalb des Fahrzeugs und das Straßenlängsprofil verglichen.

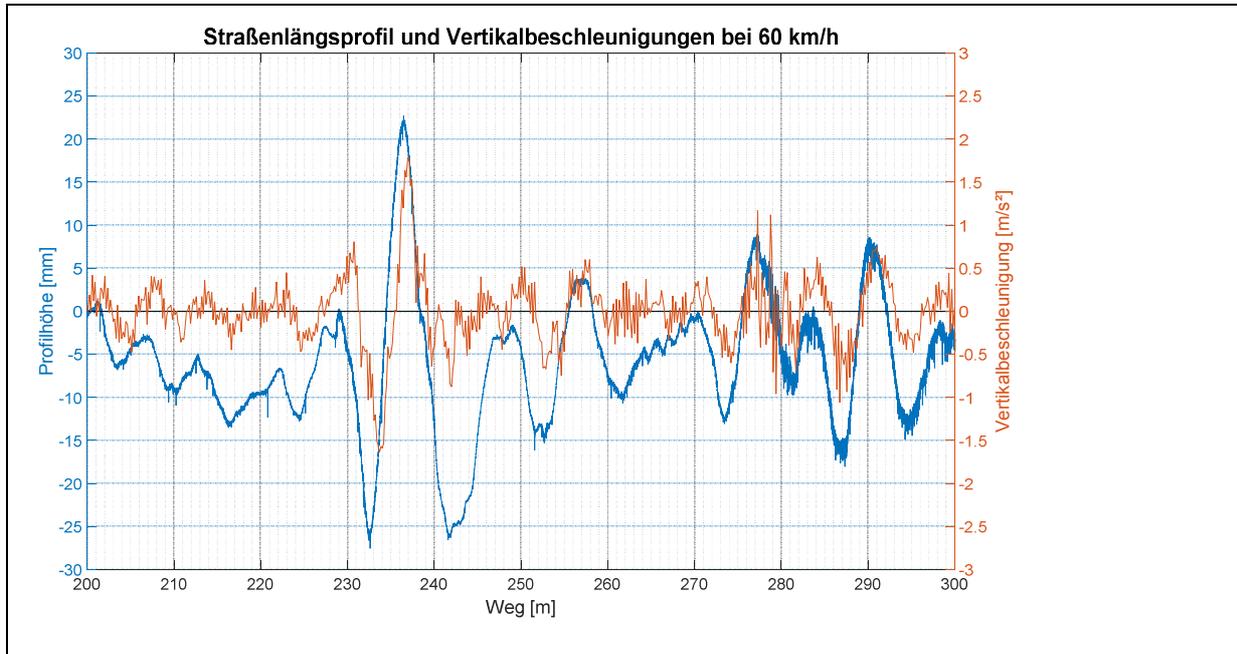


Abbildung 37: Ausschnitt aus einem Straßenlängsprofil und Vertikalbeschleunigungen innerhalb des Fahrzeugs [Fer15]

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Vertikalbeschleunigungen sich ähnlich wie das Längsprofil verhalten: Bei einem lokalen Hochpunkt im Längsprofil bewegt sich das Fahrzeug nach oben; bei einem lokalen Tiefpunkt, wird das Fahrzeug nach unten beschleunigt. Des Weiteren ist zu sehen, dass wie erwartet Hindernisse mit großen Wellenlängen und kleiner Amplitude geringere Vertikalbeschleunigungen verursachen als Hindernisse mit kurzen Wellenlängen und großer Amplitude. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führte auch zu einer Steigerung der Vertikalbeschleunigungen. Bei allen Messungen lagen die höchsten Amplituden zwischen 2,5 Hz und 4,5 Hz und somit nach [Hei13] im Bereich, in dem der Fahrkomfort beeinflusst wird.

Fahrsimulatoren sind für die Weiterentwicklung von neuen Technologien im Bereich der Fahrsicherheit ein wichtiges Werkzeug. Aufgrund der Vorteile gegenüber herkömmlichen Tests sind sie heutzutage nicht mehr wegzudenken. Um die Ergebnisse der Untersuchungen in Fahrsimulatoren in die reale Welt zu übertragen, muss das Fahrerlebnis so realistisch wie möglich sein. Ohne zu wissen, wie sich die Fahrbahn auf das Fahrzeug und die Fahrer auswirkt, sind keine realitätsnahen Untersuchungen in Fahrsimulatoren möglich. Die Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben haben gezeigt, wie sicherheitsrelevante Eigenschaften verschiedener Fahrbahnbeläge erfasst werden können. Das Augenmerk lag vor allem auf den beiden funktionalen

Straßeneigenschaften Akustik und Auswirkungen von Unebenheiten (Haptik). Die Akustik spielt sicherheitstechnisch aufgrund der unterschiedlichen Geräuschcharakteristik von E-Fahrzeugen gegenüber Verbrennungsfahrzeugen eine übergeordnete Rolle. Die Haptik ist im Zusammenhang mit der Akustik insbesondere in kritischen Fahrsituationen zur Unfallvermeidung entscheidend. Für die Akustik wurde ein Modell entwickelt, um das Rollgeräusch aus Fahrbahneigenschaften zu simulieren. Bezüglich der komplexen Simulation der Haptik im Fahrsimulator aus Fahrbahneigenschaften und geeigneten Übertragungsmodellen ist noch Forschungsbedarf zu sehen.

Weiterhin wurden weitere Methoden entwickelt, um virtuelle Straßenabschnitte (aus Bestandsdaten oder Planungsdaten ohne Messfahrten) zu erstellen. Diese ergänzen die Erstellung von realitätsnahen, ganzheitlichen Straßennetzen aus Messerfassungen und eröffnen weitere Möglichkeiten der Anwendung von Fahrsimulatoren für bestimmte Fragestellungen.

6.3 Fahrerassistenzsysteme für E-Fahrzeuge

Die Simulation der Umgebung des Fahrzeugs wird in Kapitel 6.2 beschrieben.

Haptische Fahrerwarnung und -information

Informationen aufzunehmen zu selektieren und zu verarbeiten stellt heutzutage eine der wichtigsten aber zugleich auch eine der den Fahrer am meisten beanspruchenden Aufgaben beim Führen eines Kraftfahrzeugs dar. Eine Überforderung des Fahrers aufgrund von Informationsüberfluss führt zum „Übersehen“ bzw. Nichtbeachten von einzelnen Informationen und kann als Folge dessen falsche Fahrerreaktion und entsprechend gefährliche Verkehrssituationen erzeugen. Haptische Signale bieten im Vergleich zu visuellen oder akustischen Signalen entscheidende Vorteile bei der Informationsübertragung. So ist die Reaktions- und Wahrnehmungszeit bis zu vier Mal kürzer als bei visuellen Signalen. Außerdem erlaubt die Anwendung haptischer Signale eine bidirektionale Datenübertragung, so dass Signale am selben Ort (Bedienteil) gesendet wie auch empfangen werden können. Desweiteren ist eine vor allem fürs Fahrzeug wichtige Eigenschaft, dass haptische Signale direkt an Fahrer gesendet werden können, ohne andere Passagiere im Fahrgastraum zu stören. Ein Fahrzeuginnenraum bietet dem Fahrer durch Sitze, Lenkrad, Schalthebel oder Pedale mehrere haptische Schnittstellen die mit dem Körper, den Fingern oder den Füßen bedient werden. Da die Finger bei Realisierung von „Vollautomatisiertem Fahren“ für die Ausführung von Nebenaufgaben zur Verfügung stehen sollen, steht die Schnittstelle Fuß-Pedal im Fokus der Untersuchungen. In der durchgeführten Probandenstudie wurden die haptischen Signale durch ein elektrisch angetriebenes Bremspedal erzeugt (siehe Abbildung 38).

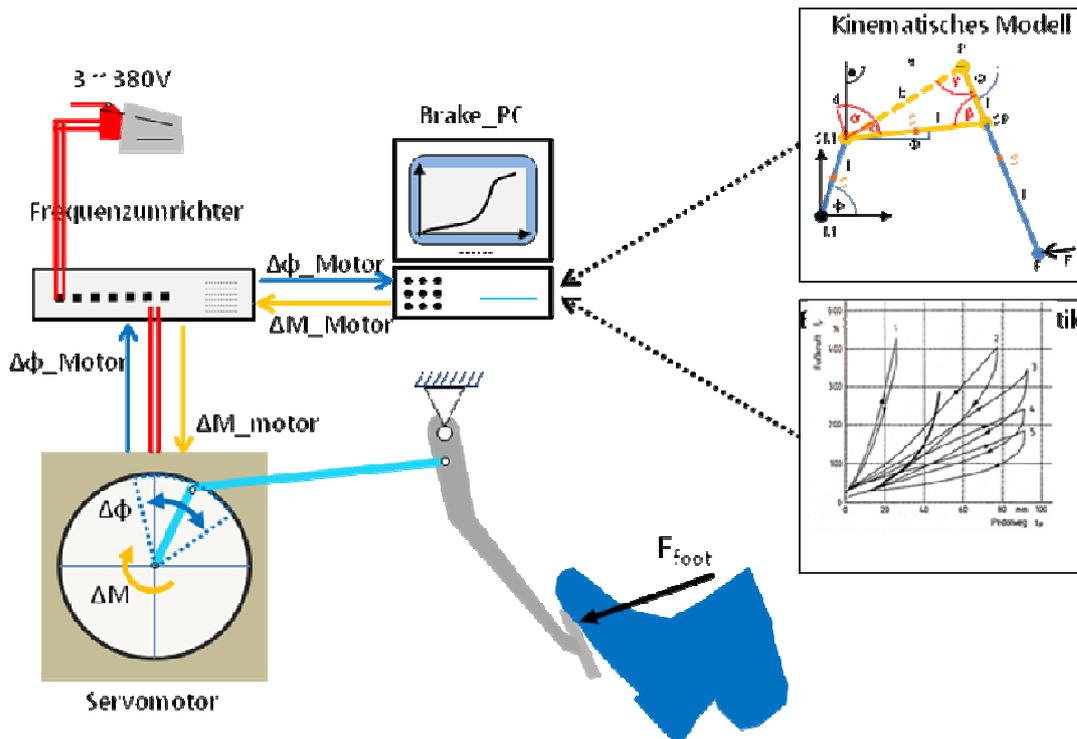


Abbildung 38: Systemaufbau des elektrisch angetriebenen haptischen Bremspedals

Dafür wurde das serienmäßig im Fahrzeug vorhandene Bremspedal über eine Koppelstange mit einem Servomotor verbunden. Zur Steuerung des Systems wird am Servomotor der Drehwinkel gemessen und über den Frequenzumrichter zum Steuerungsrechner weitergeleitet. Dort wird anhand eines Kinematikmodells der Pedalweg berechnet, aus der hinterlegten Pedalcharakteristik die Pedalkraft bestimmt und wieder mit Hilfe des Kinematikmodells das notwendige Drehmoment ermittelt. Dieser Wert wird an den Frequenzumrichter geschickt welcher dann den entsprechenden Strom stellt.

Der Einsatz eines Servomotors ermöglichte zugleich die Darstellung variabler Pedalkennlinien wie auch das Erzeugen von verschiedenen haptischen Signalen. Veränderbare Signaleigenschaften sind z.B. die Frequenz, die Amplitude und die Signalform.

Die Fahrstudie besteht aus einem schriftlichen und einem praktischen Teil. Im schriftlichen Teil mussten die Probanden einen Fragenkatalog beantworten, der sich mit den Themen Fahrerfahrung, Wahrnehmung von Straßengriffigkeit, Aussagen zu haptischen Signalen und körperliches Wohlbefinden vor und nach der Simulatorfahrt befasst hat. Die Beantwortung der Fragen fand jeweils vor und nach dem praktischen Teil statt, der aus vier Einzelversuchen bestand.

Bei den praktischen Versuchen war das Ziel quantitative Aussagen zu kinästhetischen und taktilen Wahrnehmungseigenschaften sowie Aussagen zum subjektiven Empfinden und Unterscheidbarkeit von haptischen Signalen zu erhalten.

Im ersten Teilversuch musste 32 Bremsungen ausgeführt werden, wobei jede zweite Bremsung mit einer veränderten Pedalcharakteristik erfolgte. Die Aufgabe des Probanden bestand darin nach jeder Bremsung mit veränderter Charakteristik eine Aussage zu machen ob er eine Verkürzung, Verlängerung oder gar kein Unterschied ge-

spürt hat. Ziel war es eine quantitative Aussage über den minimalen Wert einer wahrnehmbaren Pedalwegänderung zu erhalten. Im zweiten Teilversuch wurde am Bremspedal eine Schwingung erzeugt, deren Amplitude sich abwechselnd vergrößerte und verkleinerte. Der Proband musste immer den Moment angeben ab welchem er die Schwingung gespürt hat bzw. nicht mehr gespürt hat. Diese Werte wurden gespeichert um anschließend aus dem Durchschnitt aller Probanden einen Zahlenwert für die Kraftschwelle zur Wahrnehmung einer Schwingung zu berechnen. Der dritte Teilversuch befasste sich mit der auf der persönlichen Empfindung beruhenden Bewertung und Einteilung von dem Probanden in zufälliger Reihenfolge präsentierten Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen zwischen 2 und 200Hz. Der vierte Teilversuch ist wie der Dritte, nur das anstelle verschiedener Frequenzen ein Signal mit variierender Anzahl von Pulsen in zufälliger Reihenfolge dem Probanden über das Bremspedal präsentiert wurde. Im Moment findet eine detaillierte Auswertung der Versuchsdaten statt mit dem Ziel daraus Anforderungen für besonders geeignete haptische Signale ableiten zu können um diese im letzten Schritt in ein Fahrerassistenzsystem einbinden zu können.

Das Fahrerassistenzsystem soll den Fahrer in schwierigen Situationen oder auf dessen Wunsch hin unterstützen. Dabei kann die Art der Unterstützung vom bloßen Hinweis bis zum aktiven Eingriff in die Fahrzeugsteuerung gehen. E-Fahrzeuge bieten durch ihre standardmäßig vorhandene leistungsstarke E-E Architektur in Kombination mit den Möglichkeiten der Antriebsregelung eine sehr gute Grundlage zur Entwicklung neuer Funktionalitäten in Bezug auf Fahrerassistenzsysteme. Eine solche neue Form der Assistenz ist, dem Fahrer über die Schnittstelle Fahrerfuß ↔ Fahrzeug durch haptische Signale gezielt Informationen zur Fahrsituation zu geben.

Zur Entwicklung haptischer Signale wurden Untersuchungen zu haptischen Wahrnehmungsschwellwerten sowie zur subjektiven Wahrnehmung von haptischen Signalen durchgeführt. Die Auswertung zeigt z.B. ab welcher minimalen Wegänderung dieses vom Fahrer als Unterschied in der Pedalcharakteristik wahrgenommen wird oder ab welcher Amplitude eine Schwingung wahrgenommen wird (siehe nachfolgende Tabelle).

Tabelle 6.1: In Simulatorstudie ermittelte haptische Schwellwerte für Schwingungswahrnehmung am Fuß

	3 Hz	6 Hz	12 Hz
Mittelwert [N]	4,5	4,2	3,0
SdAbw +/- σ [N]	0,8	0,7	0,5
Mittelwert +2 σ [N]	6,1	5,6	4,0
Mittelwert +3 σ [N]	6,8	6,3	4,5

Da auch die subjektive Wahrnehmung eine große Rolle spielt, wurden z. B. Fragen der Unterscheidbarkeit bei mehreren vorhandenen haptischen Signalen untersucht oder die empfundene Warnfähigkeit des jeweiligen Signals erfragt.

Der Einsatz haptischer Signale verlangt neben Beachtung der physikalischen Schwellwerte auch die Berücksichtigung der Randbedingungen des jeweiligen Einsatzgebietes. Beim Fahrzeug muss z.B. beachtet werden, dass durch die Vielfalt der Schuhe unterschiedlichste Sohlentypen vorhanden sind, dass es durch Umgebungseinflüsse oder den Fahrzustand des Fahrzeugs zu akustischen und haptischen Störsignalen kommen kann und dass der Fahrer meistens nur einen Teil seiner Aufmerksamkeit auf die Wahrnehmung von Signalen richten kann. Zusätzlich stellt der Mensch selbst mit seiner tages-, alters- und gemütsabhängigen Wahrnehmung eine der wichtigsten Randbedingungen beim Einsatz haptischer Signale dar.

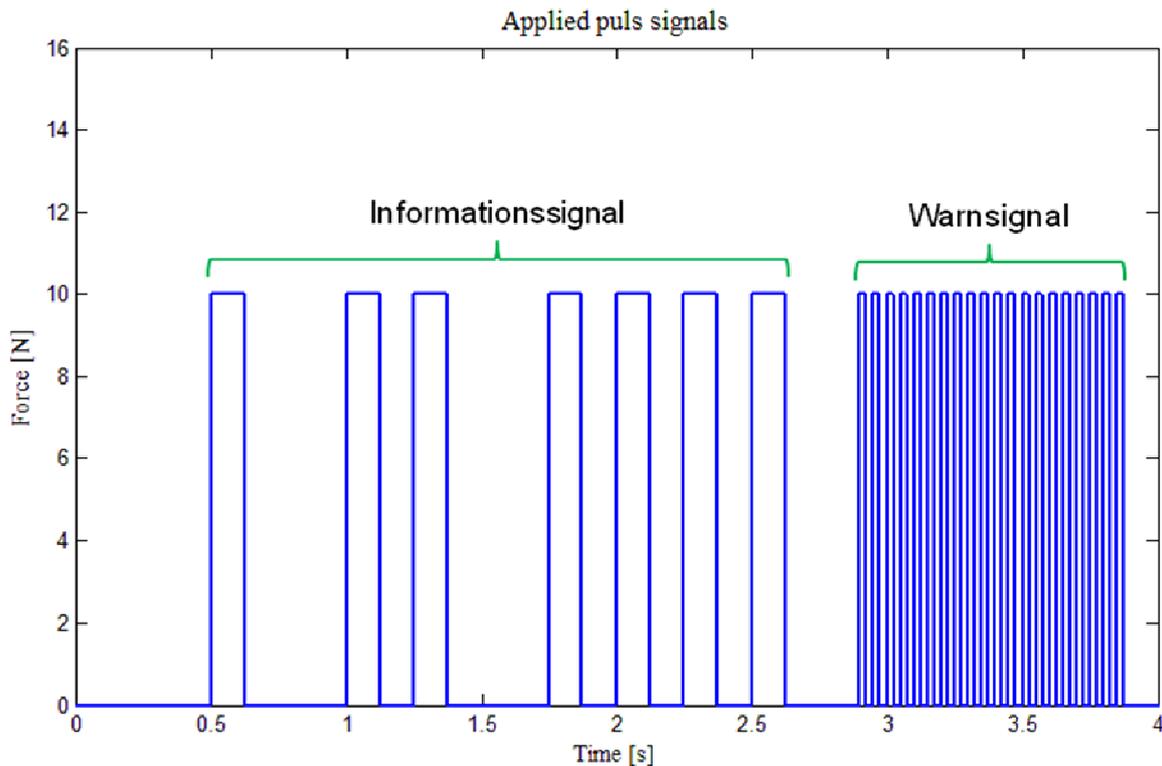


Abbildung 39: Pulssequenzbasierte für den Einsatz im Fahrzeug entwickelte Informations- und Warnsignale

Aus der Simulatorstudie und den zuvor erwähnten Randbedingungen wurden dann ausgesuchte Signale für Warn- und Informationsnachrichten entwickelt. Unter anderem wurde z.B. ein dreifach gestuftes und skaliertes Informationssignal, das aus drei verschiedenen Pulssequenzen besteht und ein damit kombinierbares Warnsignal entwickelt (siehe Abbildung).

Die haptischen Signale am Fuß werden durch einen Cogging armen Servomotor erzeugt, der über einen Kurbeltrieb mit dem Pedal verbunden ist. Das ermöglicht eine gefühlsechte Pedalbetätigung durch einstellbare Feder- und Dämpferkennlinien sowie ein breites Spektrum an variierbaren Signalformen, -frequenzen und -amplituden. Zusätzlich lassen sich frei parametrierbare Pedalkennlinien und die entsprechenden haptischen Effekten sehr gut kombinieren (siehe nachfolgende Abbildung).

Mit dem haptischen Bremspedal beeinflussbare Parameter

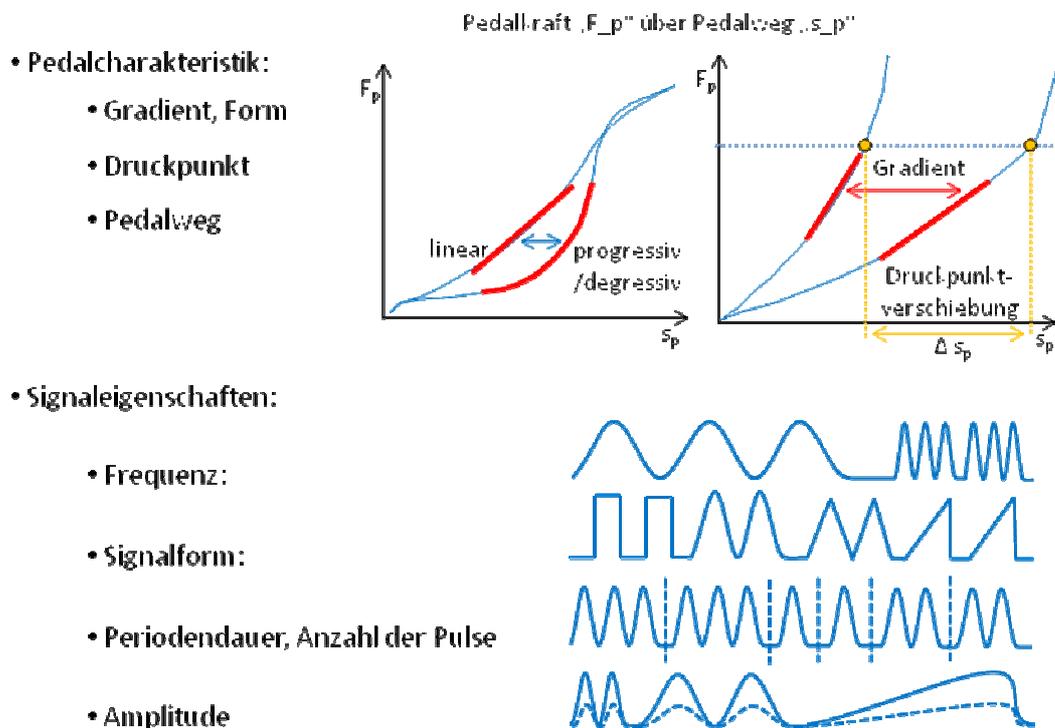


Abbildung 40: Erzeugbare Signalvielfalt und Möglichkeiten der Pedalkennlinienbeeinflussung

Aus Teilversuchen der Vorstudie zu haptischen Signalen am Bremspedal (Wahrnehmungsschwellen, Intuitive Zuordnung von Frequenzen, Unterscheidbarkeit von Pulssignalen) konnten grundlegende Eigenschaften der haptischen Wahrnehmung am Fuß ermittelt werden. Z. B. quantitative Aussagen für Kraftschwellen, Amplituden und Frequenzen. Durch Variation dieser Signaleigenschaften wurden ausgesuchte haptische Signale generiert die dann mit bestimmten Anwendungen verknüpft werden können z.B. Information oder Warnung. Es wurden die drei Zustände einer Information „niedrig“, „mittel“, „hoch“, sowie ein Warnsignal abgeleitet.

Mit diesen Signalen wurde eine Studie im Fahrsimulator mit 36 Personen (17-74 Jahre, 17 Frauen, 18 Männer) durchgeführt. Es wurde eine ca. 23-minütige Autobahnstrecke im automatisierten Fahrmodus befahren. „Automatisierter Fahrmodus“ hieß in diesem Fall, dass das Fahrzeug alle Aufgaben der Längs- und Querverführung übernimmt. Der Fahrer wird in diesem Modus also vollständig „gefahren“ und hat keine Aufgabe der Fahrzeugsteuerung mehr auszuführen. Der Fahrerfuß lag dabei zum Spüren haptischer Signale, wie bereits aus Versuchen der Vorstudie bekannt, auf dem Bremspedal. Eine wesentliche Neuerung und Weiterentwicklung dabei war jedoch die Integration eines „Rastpunktes“ in die Pedalkennlinie. Dieser half dem Fahrer die richtige Pedalposition zu finden und zu halten.

Während der Fahrt wurden vier verschiedene und in der Summe 18 Pulssignale am Bremspedal erzeugt, die der Proband selbständig, ohne Hinweis oder Nachfrage durch den Versuchsleiter, erkennen und hinsichtlich der Entscheidungssicherheit bewerten musste. Die Pulssignale wurden dabei durch einen vorher bestimmten Zu-

fallsvektor in zufällig gewählten Abständen und zufällig gewählter Reihenfolge dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass es für die Zeitabstände die Randbedingung eines minimalen und maximalen Abstandes gab.

Um bewusst mentale Beschäftigung der Probanden zu erzeugen, wurde ein Hörspiel vorgespielt und dem Proband vor der Fahrt gesagt, dass er nach der Fahrt Fragen beantworten muss.

Ziel dieses Versuches war es festzustellen, ob Fahrer in einer denkbaren automatisierten Fahrsituation in der Lage sind, ohne vorheriges Üben, haptische Signale zu erkennen, zwischen verschiedenen Signalen zu unterscheiden und gegebenenfalls zu reagieren.

Durch Befragung der Probanden wurde festgestellt, ob und mit welcher Sicherheit die präsentierten Signale unterschieden werden konnten. Es zeigt sich, dass hohe Erkennungsraten möglich sind, sowie ein positiver Einfluss des Lerneffektes.

Assistenzsystem mit teilautomatisierter Fahrzeugführung

Basierend auf den Ergebnissen der Probandenstudie die im Rahmen von AP1 durchgeführt wurde, wurde eine Assistenzfunktion zur Längsführung von Elektrofahrzeugen entworfen und prototypisch umgesetzt.

Die derzeit am Markt befindlichen Assistenten zur Fahrzeuglängsführung sind zu meist Notbremsassistenten, die bei Vorliegen einer akuten Gefahrensituation (bspw. Fußgänger auf Fahrbahn) eine Teil- oder Vollbremsung realisieren. Wie in der Probandenstudie zum Thema Wahrnehmung festgestellt wurde, ist häufig schon bei Erkennen der Gefahrensituation die Ausgangsgeschwindigkeit zu hoch, so dass oftmals auch durch eine Vollbremsung kein rechtzeitiges Anhalten erfolgen kann.

Deshalb soll der Fahrer im urbanen Umfeld und in Situationen mit erhöhtem Gefahrenpotential darin unterstützt werden eine angemessene Fahrgeschwindigkeit zu wählen. Hierzu wird permanent eine vom Fahrer über das Fahrpedal vorgegebene Geschwindigkeitstrajektorie mithilfe eines Nichtlinearen Modellprädiktiven Reglers (NMPC) im Hinblick auf Sicherheitsaspekte optimiert. Als Sicherheitsaspekte können beispielsweise statische Umgebungsdaten wie beispielsweise Geschwindigkeitsbeschränkungen, Points of Interest (Schulen, Fußgängerüberwege...) oder dynamische Umgebungsdaten wie Fußgänger oder Fremdverkehr berücksichtigt werden. Der Einfluss von Fahrerwunsch und Sicherheitsaspekten auf die optimierte Geschwindigkeit kann über Gewichtungsfaktoren Q in Abhängigkeit vom Gefahrenpotential variabel eingestellt werden. Beispielsweise kann in offensichtlich ungefährlichen Situationen eine Geschwindigkeitsüberschreitung zugelassen werden um die Fahrerakzeptanz zu steigern. In Situationen mit akuter Gefahr (z.B. Fußgänger auf Fahrbahn) kann die obere Geschwindigkeitsbegrenzung zu null gesetzt werden und keine Überschreitung zugelassen werden (Notbremsung).

Durch die Verringerung der Geschwindigkeit in potentiell gefährlichen Situationen kann der Anhalteweg verkürzt und somit die Sicherheit gesteigert werden. Falls das Fahrzeug dennoch nicht rechtzeitig bis zum Stillstand abgebremst werden kann,

kann zumindest die Aufprallenergie reduziert werden. In Abbildung ist ein beispielhafter Verlauf der Geschwindigkeit bei einer Ortsdurchfahrt dargestellt.

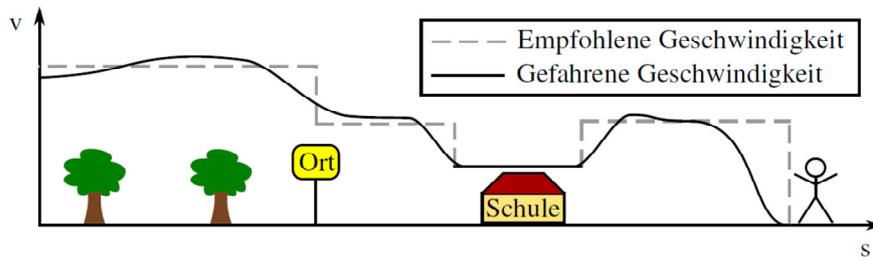


Abbildung 41: Beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf bei Ortsdurchfahrt

Zunächst wird dem Fahrer Außerorts eine Geschwindigkeitsüberschreitung ermöglicht, da die Gefährdung für Fußgänger gering ist. Am Ortseingang wird die Geschwindigkeit rechtzeitig gedrosselt, falls der Fahrer die Geschwindigkeit nicht selbsttätig reduziert. Im Bereich einer Schule wird die Maximalgeschwindigkeit „hart“ nach oben hin beschränkt. Tritt ein Fußgänger auf die Straße wird zunächst die Geschwindigkeit gedrosselt, der Fahrer gewarnt und falls nötig eine Notbremsung eingeleitet.

In Abbildung 42 ist das Schema für jeden Iterationsschritt der Sicherheitsoptimierten Längsführungsassistenz dargestellt. Dieser Iterationsschritt wird mit einer Frequenz von 10 Hz ausgeführt.

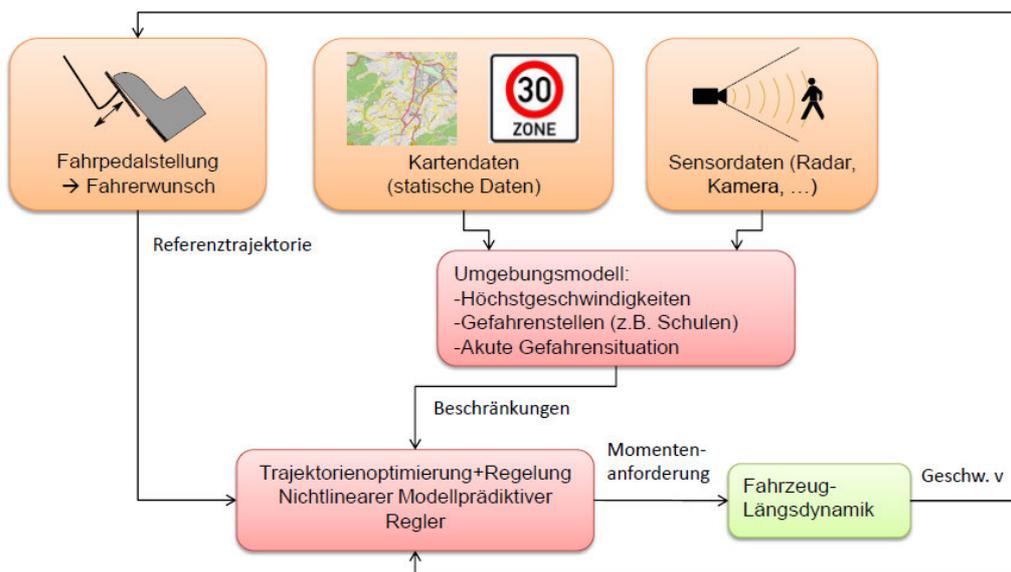


Abbildung 42: Schema der Sicherheitsoptimierten Längsführungsassistenz

In jedem Iterationsschritt wird zunächst aus der vom Fahrer vorgegebenen Fahrpedalstellung der Fahrerwunsch geschätzt und eine Referenz-geschwindigkeits- und Streckentrajektorie für einen Vorausschauhorizont von 5s berechnet. Zusätzlich werden für den Vorausschauhorizont statische Streckeninformationen (Geschwindigkeitsbegrenzungen) aus digitalem Kartenmaterial ausgelesen. Weiterhin werden dynamische Objekte (z.B. Fußgänger) aus Sensordaten extrahiert, die zum Beispiel von Video oder Radarsensoren zur Verfügung gestellt werden können. Aus sämtli-

chen gewonnenen Umgebungsinformationen wird für den Vorausschauhorizont ein Set von Beschränkungen zusammengestellt. Ein zugehöriger Gewichtungsvektor Q beschreibt die Kritikalität der Beschränkungen und gibt so an, wie viel Gewicht auf die Einhaltung der Beschränkung gelegt werden soll. Schließlich wird im NMPC mithilfe von Referenztrajektorien, Beschränkungen und Gewichtungsvektor eine sicherheitsoptimierte Geschwindigkeits- und Streckentrajektorie berechnet. Zusätzlich wird eine zugehörige Momententrajektorie ausgegeben, deren erstes Element als Momentenanforderung für den Antriebsstrang verwendet wird.

Die SOL ist eine semi-autonome Assistenzfunktion, da der Fahrer permanent seinen Beschleunigungswunsch über das Fahrpedal vorgibt. Dabei kann er auf eventuell vom Regler forcierten Geschwindigkeitsänderungen mit einer Änderung seines Wunsches reagieren. Aus diesem Grund ist der Fahrer in den Regelkreis integriert, was eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung und dem Test eines solchen Systems darstellt. Untersuchungen bezüglich Fahrbarkeit und Akzeptanz der sicherheitsoptimierten Längsführungsassistenz müssen frühzeitig in Human-in-the-Loop Tests durchgeführt werden. Für solche Tests sind dynamische Fahrsimulatoren wie der Stuttgarter Fahrsimulator besonders geeignet, da sie Assistenzfunktionen im Prototypenstatus erlebbar machen und dabei einen realistischen Fahreindruck bieten.

Prototypische Realisierung

Für die Testfahrten im Stuttgarter Fahrsimulator wurde die SOL echtzeitfähig auf einem Rapid-Control-Prototyping (RCP) System implementiert. Nachdem sich die Implementierung auf einer dSpace Autobox Typ DS1005 aufgrund der beschränkten Rechenleistung nicht bewährt hat, wurde das System auf einem Fahrzeugrechner mit x86 Architektur implementiert. Um die harten Echtzeitanforderungen zu erfüllen, wird als Betriebssystem Ubuntu Linux mit Xenomai Erweiterung verwendet. Dafür wurde der Linux Kernel gepatched und neu erstellt. Das so modifizierte Betriebssystem weist ein reproduzierbares und deterministisches Verhalten auf und hat geringe Latenzen. Für die Programmierung von Echtzeitprogrammen steht eine Xenomai API (Programierschnittstelle) in der Programmiersprache C zur Verfügung. Für die Einbindung des Echtzeitrechners in die Simulationsumgebung wurden die Simulatorschnittstellen implementiert. Dabei wurde auf die Wiederverwendbarkeit der einzelnen Module für weitere Fahrerassistanzanwendungen Wert gelegt.

Basierend auf den Schnittstellen zur Fahrsimulatoranbindung wurden die Komponenten der Sicherheitsoptimierten Längsführungsassistenz implementiert. Für die Lösung des Trajektorienoptimierungsproblems stellt insbesondere die effiziente Lösung des dem NMPC zugrundeliegenden Optimierungsproblems eine Herausforderung dar. Der Einsatz des Softwarepaketes ACADO Code Generator ermöglicht die Generierung von echtzeitfähigem Code zur Lösung von nichtlinearen Optimierungsproblemen. Dieser konnte nach einigen Modifikationen auf der RCP Zielplattform eingebunden werden.

Funktionsstests

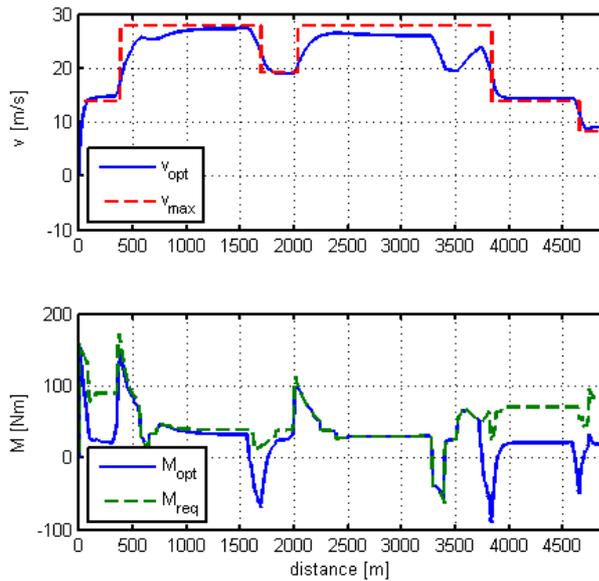


Abbildung 43: Geschwindigkeits- und Momentenverlauf bei Variation der zulässigen Höchstgeschwindigkeit

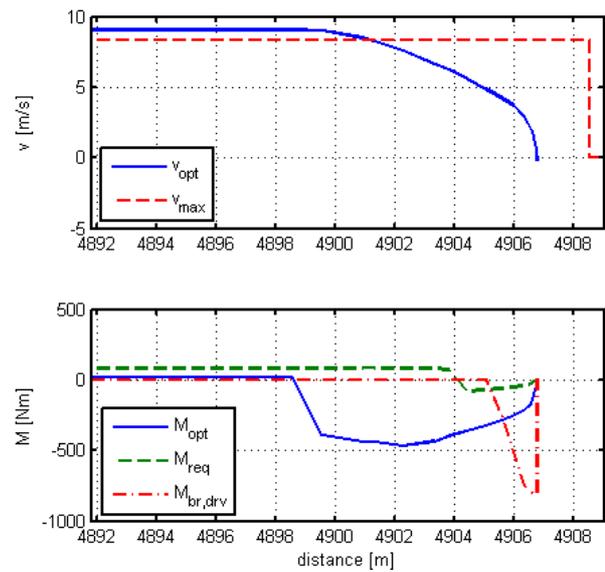


Abbildung 44: Geschwindigkeits- und Momentenverlauf bei Notbremsung

In ersten Testfahrten im Stuttgarter Fahrimulator wurde überprüft, ob der Algorithmus auf der RCP Hardware echtzeitfähig ist. Weiterhin wurden Funktionstests für die zwei Hauptmerkmale Geschwindigkeitsassistentz und Notbremsvorgang durchgeführt. Hierzu wurde zunächst ein virtueller Rundkurs mit Variation der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abgefahren. In Abbildung 43 ist der Geschwindigkeits- und Momentenverlauf einer Messfahrt dargestellt. Der Verlauf von v_{\max} stellt die zulässige Höchstgeschwindigkeit, der Verlauf von v_{opt} den Verlauf der optimierten (gefahrenen) Geschwindigkeit dar. Zugehörig sind im unteren Schaubild der Verlauf des vom Fahrer angeforderten Moments M_{req} und des optimierten (beaufschlagten) Moments M_{opt} dargestellt. Die Versuchsfahrt zeigt, dass das geforderte Moment, und damit auch die gefahrene Geschwindigkeit, verringert werden sobald der Fahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreitet. Durch eine moderate Gewichtung Q wird es dem Fahrer jedoch ermöglicht die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu überschreiten. Auch an Ortseinfahrten (Verringerung der zul. Höchstgeschwindigkeit) ist zu beobachten, dass das Antriebsmoment rechtzeitig reduziert wird, was eine rechtzeitige Abbremsung (per Rekuperation) bewirkt. Bewegt sich der Fahrer innerhalb der zulässigen Grenzen wird das geforderte Moment auch an den Antriebstrang weitergegeben. Abbildung 44 zeigt einen Notbremsvorgang bei dem zum Streckenabschnitt 4909m ein Fußgänger auf die Straße tritt. Sowohl der Fahrer als auch die SOL haben die Möglichkeit den Fußgänger bei einer Time to Collision $TTC=1,4s$ (Streckenabschnitt 4896,6m) zu erkennen. Die Bezeichnungen der Signalverläufe sind weitgehend identisch mit den Verläufen in Abbildung 43. Im Momentenverlauf ist jedoch ein weiteres Signal $M_{\text{br,drv}}$ aufgetragen, welches das vom Fahrer über das Bremspedal angeforderte Bremsmoment zeigt. Nachdem die Information über die Kollisionsgefahr vorliegt, wird diese im nächsten Optimierungszyklus berücksichtigt und durch eine hohe Gewichtung von Q das Moment M_{opt} dementsprechend reduziert. Dies bewirkt eine Verzögerung des Fahrzeugs mit Bremsengriff. Die erste Reaktion des

Fahrers erfolgt 0.7s nach der Reaktion der SOL indem der Fahrer vom Fahrpedal geht und somit M_{req} reduziert. Weitere 0.2s später betätigt er das Bremspedal wodurch ein Bremsmoment $M_{br,drv}$ aufgebracht wird. Da dieses Moment das von der SOL geforderte Moment übersteigt, wird die SOL überstimmt und das Fahrzeug kommt mit 1.8m Abstand zum Fußgänger zum Stehen. Hätte die SOL nicht frühzeitig reagiert, wäre bei gleicher Reaktionszeit des Fahrers eine Kollision unvermeidbar gewesen.

Die ersten Versuchsfahrten im Fahrsimulator zeigen, dass die SOL zur Steigerung der Fußgängersicherheit im Straßenverkehr beitragen kann. Eine Verringerung des Geschwindigkeitsniveaus in Kombination mit schnellen Reaktionszeiten in akuten Gefahrensituationen können Bremswege erheblich verkürzen.

Implementierung eines visuellen und Akustischen HMI

Im Hinblick auf die in AP 6 vorgestellte Probandenstudie wurde ein visuelles und akustisches System zur Fahrereinformation und –warnung entworfen und implementiert. Das entworfenen System wurde in das Simulatorfahrzeug integriert.

Als Display wird ein handelsüblicher Tabletcomputer mit 8“ Bilddiagonale verwendet. Diese Lösung bietet den Vorteil einer flexiblen Anbringung im Fahrzeuginnenraum sowie dem Einsatz zu Überwachungs- oder Demonstrationsaufgaben außerhalb des Fahrzeuges. Die Anbindung an die Fahrsimulatorumgebung erfolgt kabellos und ist in Abbildung 45 dargestellt. Da das Fahrerassistenzsystem auf dem Echtzeitsystem (RCP-Rechner) ausgeführt wird, laufen auf diesem alle zur Anzeige relevanten Daten zusammen. Von der Simulatorumgebung werden Fahrereingaben, Fahrdynamikdaten sowie Umfeldinformationen bereitgestellt. In die andere Richtung können Steuerungssignale manipuliert, und an die Fahrdynamiksimulation zurückgesendet werden. Ein weiteres Netzwerk stellt die Verbindung zu den HMI Bedienelementen zur Verfügung: Zunächst wird ein 802.11n Wireless Router an den RCP Rechner angehängt. Dieser übernimmt die drahtlose Kommunikation per UDP mit einem oder mehreren Tabletcomputern.

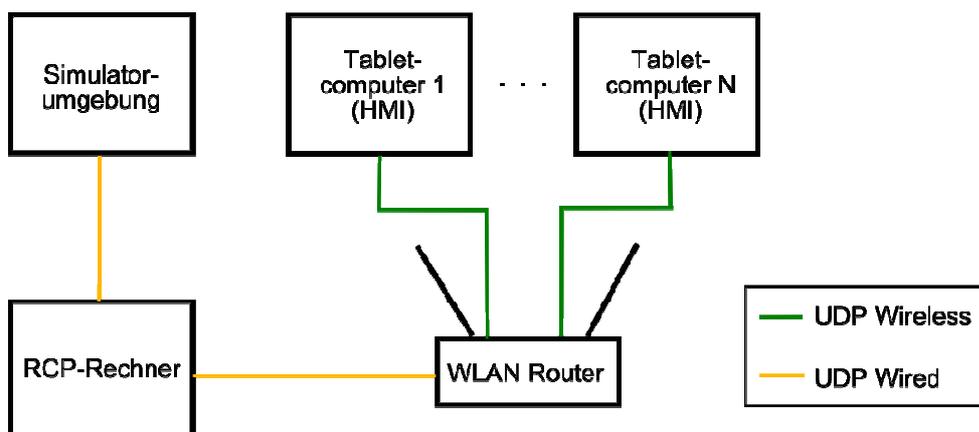


Abbildung 45: Anbindung HMI, Netzwerktopographie

Diese Topographie ermöglicht einen flexiblen Einsatz von einem oder mehreren Anzeigeelementen im Fahrzeuginnenraum oder der Leitwarte des Fahrsimulators. Als Anzeigeelement für das Fahrerassistenzsystem wird ein Anzeigeelement in der Mitte des Armaturenbrettes verwendet (Abbildung 46).

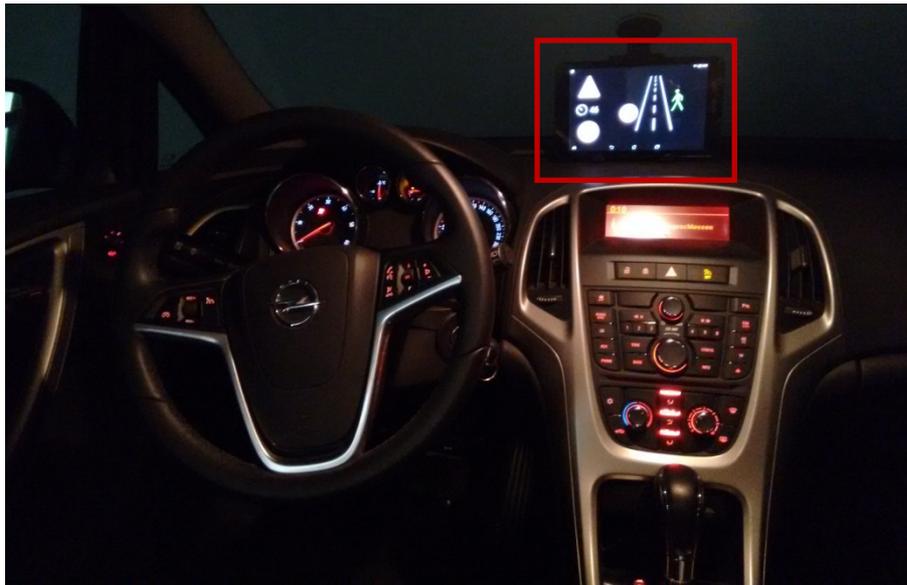


Abbildung 46: Anbringung des HMI im Simulatorfahrzeug

Die Benutzeroberfläche wurde in Form einer Android Applikation implementiert. Als Programmiersprache kam dafür QT zum Einsatz. QT eignet sich zur Plattformübergreifenden Entwicklung von Benutzeroberflächen, dies Ermöglicht den Einsatz der Software auch auf anderen Zielplattformen (z.B. Windows/Linux PC). Die in den UDP Nachrichten enthaltenen Informationen umfassen aktuelle und zukünftige Geschwindigkeitsbegrenzungen, Warnungen für potentielle Gefahrensituationen sowie Informationen über detektierte Fußgänger. Diese Informationen werden aufbereitet und anschließend visuell und akustisch dargestellt (Abbildung 47 und Abbildung 48).



Abbildung 47: HMI Warnung Fußgänger

Abbildung 48: HMI Kollisionswarnung Fußgänger

Am linken Bildschirmrand wird unten die aktuell geltende Geschwindigkeitsbegrenzung dargestellt, darüber die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit. In der linken oberen Ecke wird auf potentielle Gefahrenstellen (Zebrastreifen, Schulen, ...) hingewiesen. Zusätzlich zum optischen Hinweis ertönt bei Bedarf ein kurzer akustischer Hinweis. Auf der rechten Seite der Oberfläche ist eine stilisierte Fahrbahn dargestellt. Links neben dieser Fahrbahn erscheinen kommende Geschwindigkeitsbegrenzungen ab einem Abstand von 150m. Mit abnehmendem Abstand wandert das Begrenzungsschild von hinten nach vorne, bis es dann nach links in die aktuelle Geschwindig-

keitsbegrenzung verschoben wird (Abbildung 47 grüne Pfeile). Rechts neben der Straße erscheint ein stilisierter grüner Fußgänger falls dieser von der Umfeldsensorik erkannt wird, jedoch nicht auf Kollisionskurs befindet. Steht eine Kollision unmittelbar bevor erscheint der Fußgänger in roter Farbe auf der Fahrbahn und es ertönt ein lautes Warngeräusch (Abbildung 48).

Basierend auf den Ergebnissen der Probandenstudie im Realverkehr aus AP1 wurde eine Assistenzfunktion für die sicherheitsoptimierte Längsführung von Elektrofahrzeugen entwickelt. Die Funktion soll den Fahrer dabei unterstützen eine der Umgebung und dem damit zusammenhängenden Gefährdungspotential angepasste Fahrgeschwindigkeit zu wählen. Dafür greift das System in die Längsdynamik ein falls der Fahrer versucht die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu überschreiten. Dabei wird die Geschwindigkeit gedrosselt und der Fahrer spürt einen Gegendruck am Fahrpedal. Um die Fahrerakzeptanz zu steigern, werden in Abhängigkeit des Gefahrenpotentials in gewissem Maße Geschwindigkeitsüberschreitungen zugelassen. Die Eingriffsintensität des Systems kann über einen Parameter eingestellt werden. Die Funktionsvalidierung auf der Zielplattform im Fahrsimulator zeigt, dass das System in Echtzeit Lauffähig ist, und das geforderte Systemverhalten erreicht wird. Eine umfangreiche Driver in The Loop Simulatorstudie wird in AP 6 vorgestellt.

6.4 Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz

Diese Themenumfänge wurden hauptsächlich vom Partner ZF bearbeitet. In diesem Bericht steht die Kopplung des Fahrsimulators mit einem Antriebsstrangprüfstand im Fokus.

Für die Umsetzung und Untersuchung sicherheitsrelevanter Antriebsstrang-Anwendungen wurde das Verfahren zur Kopplung des Antriebsstrangprüfstandes mit dem Fahrsimulator erweitert.

Zuerst wurden die zwischen Simulator und Prüfstand zu übertragenden Daten ermittelt. Anschließend wurden die Anforderungen an die Datenübertragung im Hinblick auf Übertragungsraten und zulässiger Verzögerungszeiten festgelegt. Anhand dieser Anforderungen konnte eine geeignete Übertragungstechnologie ausgewählt und installiert werden. Es handelt sich dabei um eine Glasfaserleitung, über welche mit dem verbindungslosen Netzwerkprotokoll UDP die Nachrichten direkt zwischen der Fahrdynamiksimulation und der Prüfstandssteuerung übertragen werden.

Außerdem wurden sowohl auf der Prüfstands- als auch auf der Simulatorseite in der jeweiligen Software Schnittstellen für die Kopplung festgelegt und umgesetzt. Dabei wurde im Simulationsmodell für die Fahrdynamik das Teilmodell des Antriebsstrangs entfernt und stattdessen die im Koppelbetrieb vom Prüfstand empfangenen bzw. an diesen gesendeten Signale eingefügt. Die Prüfstandssteuerung wurde so verändert, dass der Wert für den Fahrpedalwinkel und die jeweiligen Sollwerte für die Raddrehzahlen vom Fahrsimulator empfangen und die Messwerte an den Fahrsimulator gesendet werden können.

Die so definierten Schnittstellen und die installierte Verbindung zur Datenübertragung konnte mit einem am Prüfstand simulierten Antriebsstrang erfolgreich getestet werden. Für die Untersuchungen wurde ein geeigneter Antriebsstrang ausgewählt. Die-

ser ist als Umrüstsatz für den Umbau eines konventionell angetriebenen Smart zu einem Elektrofahrzeug verfügbar. Der Umrüstsatz besteht aus der Leistungselektronik und einem Elektromotor. Für den Einsatz im Fahrzeug ist auch eine Batterie erhältlich. Diese wird jedoch am Prüfstand nicht benötigt, da hier das vorhandene Fahrzeugenergiesystem die Spannungs- und Stromversorgung gewährleistet. Um den Antriebsstrang zu komplettieren sind noch das Getriebe und die Antriebswellen eines Realfahrzeugs notwendig. Diese können aus einem Gebrauchtwagen entnommen werden. Ein Vorteil dieses Prüflings ist, dass er weitgehend unabhängig vom Rest des Fahrzeugs ist und damit verhältnismäßig einfach am Prüfstand in Betrieb genommen werden kann. Da es sich bei dem Umrüstsatz um ein, im Vergleich zu Elektroantrieben von Serienfahrzeugen, verhältnismäßig offenes System handelt, ist es einfacher, die notwendigen Eingriffe für die Assistenzfunktionen und sicherheitsrelevanten Untersuchungen vorzunehmen.

Die Verbindung zwischen Fahrsimulator und Antriebsstrangprüfstand wurde mit einem realen Antriebsstrang in Betrieb genommen. Bei diesem handelt es sich um die Hinterachse eines allradgetriebenen SUVs. Abbildung 49 zeigt die Konfiguration des am Prüfstand installierten Antriebsstrangs. Die Kardanwelle, das Achsgetriebe und die beiden Antriebswellen mit den Radnaben sind Teile des Antriebsstrangs aus dem Fahrzeug. Der zum Antrieb verwendete E-Motor und Umrichter sind Bestandteile des Prüfstands. Die damit realisierte Antriebsstrangkonfiguration entspricht einem an der Hinterachse angetriebenen E-Fahrzeug mit einer Antriebsmaschine.

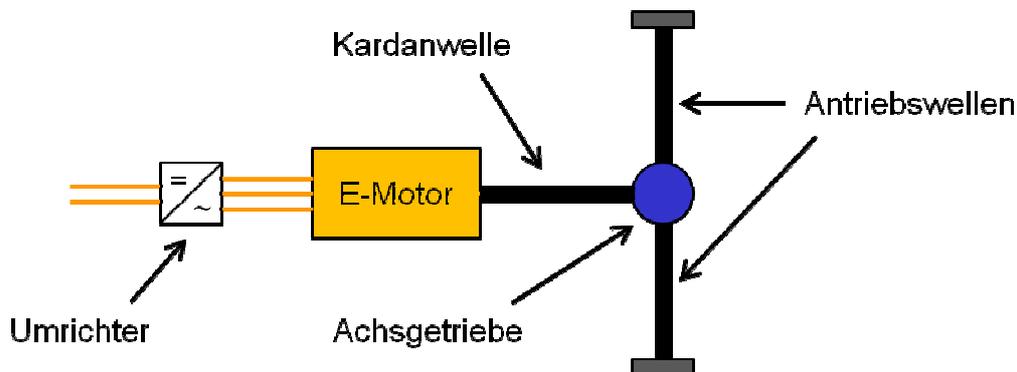


Abbildung 49: Konfiguration des Antriebsstrangs

Hauptziel der Inbetriebnahme der Verbindung war der Nachweis, dass die Kopplung von Fahrsimulator und Prüfstand auch mit einem realen Prüfling funktioniert. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden die mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs am Prüfstand durch ein Simulationsmodell abgebildet. Prinzipiell hat die Verbindung bereits mit dem auf einem Rechner am Prüfstand simulierten Antriebsstrang reibungslos funktioniert. Es bestand lediglich ein geringes Restrisiko, ob das Simulationsmodell das Schwingungsverhalten eines realen Antriebsstrangs mit hinreichender Genauigkeit abbildet.

Durch den realisierten Koppelbetrieb von Fahrsimulator und Prüfstand konnte bestätigt werden, dass die Stabilität des durch die Verbindung aufgebauten Regelkreises auch mit einem realen Antriebsstrang gewährleistet ist. In Abbildung 50 wird dies am Beispiel des aus der Fahrdynamiksimulation berechneten Sollwertes und des am Prüfstand gemessenen Istwertes der Drehzahl an einem der angetriebenen Räder

verdeutlicht. Es ist erkennbar, dass die Messwerte den vorgegebenen Sollwerten mit sehr geringer Abweichung folgen.

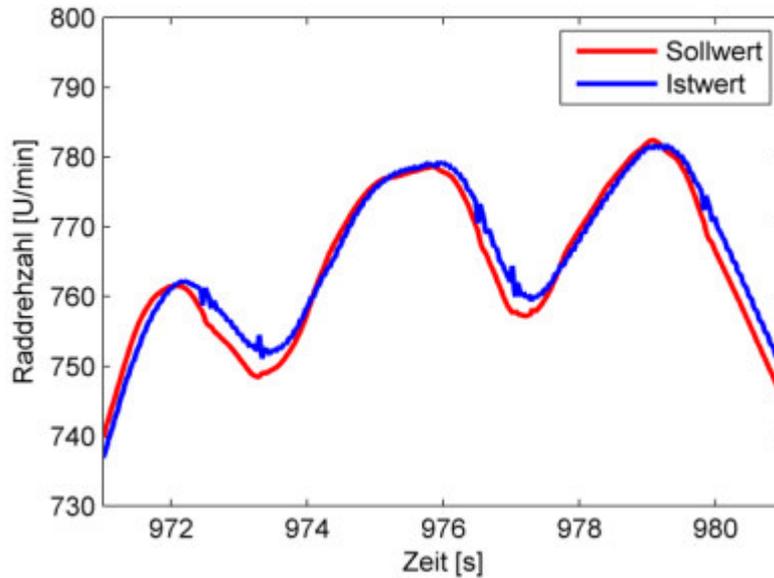


Abbildung 50: Soll-Istwert-Vergleich an einem Hinterrad

In Abbildung 51 ist der am Prüfstand gemessene Verlauf der Raddrehzahlen an der Hinterachse und der zugehörige in der Fahrdynamiksimulation am Simulator aufgezeichnete Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit für eine Fahrt im Koppelbetrieb dargestellt. Auch hieraus wird das funktionierende Zusammenspiel der beiden Anlagen deutlich. Damit sind die Voraussetzungen für die Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz von E- Antrieben geschaffen.

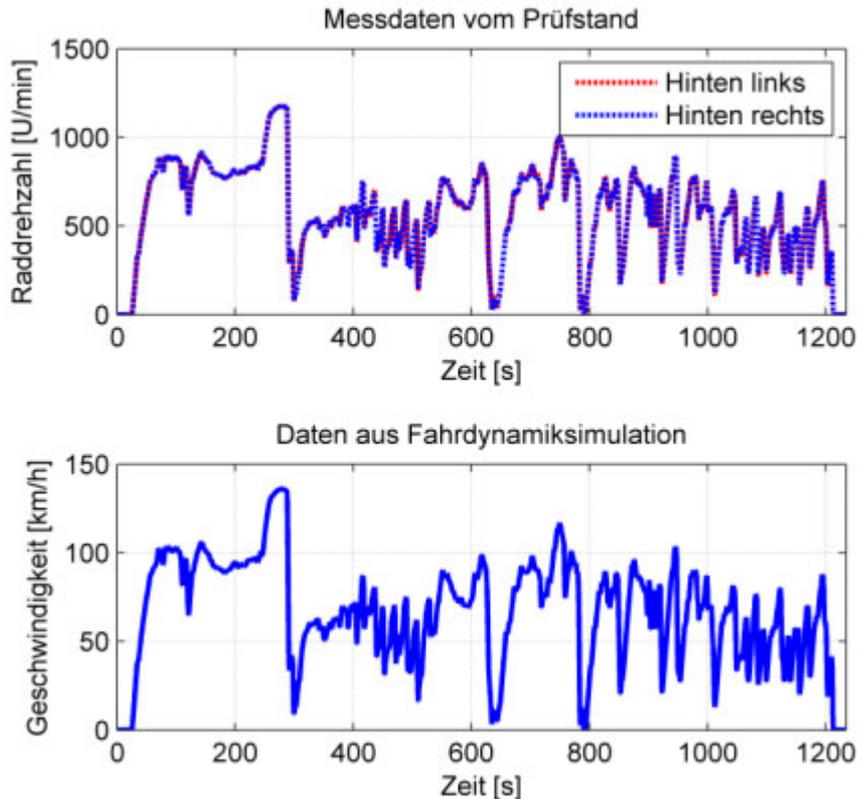


Abbildung 51: Verlauf der Raddrehzahlen und der Geschwindigkeit während einer Fahrt im Koppelbetrieb

Bei der Simulation der Akustik des Gesamtsystems Fahrzeug müssen mehrere Übertragungspfade betrachtet werden. Sowohl im realen Fahrzeug wie auch im Fahrsimulator liegen die meisten Schwingungs- bzw. Geräuschquellen außerhalb der Fahrerkabine, wobei sich die Immission am Ort des Fahrers in der Simulation letztlich nicht von der im Realfahrzeug unterscheiden soll. Insbesondere bei der Echtzeitdatenübertragung von Schwingungsmessdaten vom Antriebstrangprüfstand zum Fahrsimulator muss neben der Übertragungsfunktion im realen Fahrzeug u. a. die Übertragungsfunktion vom Ort der Schwingungsanregung im Fahrsimulator zum Fahrer betrachtet werden.

Im Straßenfahrzeug können die Anregung am Antrieb sowie entsprechende Signalantwort am Fahrersitz gemessen und daraus die Übertragungsfunktion des Transferpfads bestimmt werden. Diese kann auf die am Prüfstand gemessenen Signale angewendet werden, um das zu erzielende Signal für die Anregung am Fahrersitz im Fahrsimulator zu erhalten. Dabei muss aber zunächst berücksichtigt werden, dass der Antrieb auf dem Prüfstand anders gelagert ist als im Fahrzeug, was z. B. die Steifheit der Lageraufnahme betrifft, wodurch die Messung der Beschleunigungswerte an den Lagerstellen beeinflusst wird. Durch Vergleich der Messungen eines Antriebs am Prüfstand und im Fahrzeug kann bei Annahme der Prüfstandsdaten als Eingangs- und der Fahrzeugdaten als Ausgangssignal eine Übertragungsfunktion H_{PF} (s. Abbildung 52) zur Abbildung der Prüfstandsmessungen auf den Zustand in einem Straßenfahrzeug bestimmt werden. Die anschließende Übertragung der Prüfstandsdaten in die Fahrerkabine im Simulator muss somit der im Straßenfahrzeug errechneten Übertragungsfunktion zwischen Antrieb und Fahrersitz H_F entspre-

chen. Im Mock-up des Fahrsimulators erfolgt allerdings die Krafteinleitung zur Schwingungsanregung nicht direkt am Fahrersitz bzw. der Messstelle zur Aufzeichnung der Beschleunigungen am Fahrersitz, weswegen hier ein weiterer Transferpfad H_{SS} betrachtet werden muss. Dieser beschreibt die physische Verbindung zwischen dem Krafteinleitungspunkt des Shakers und dem Beschleunigungssensor an der Sitzschiene des Fahrersitzes. Um die Übertragungsfunktion aus der Messung im Straßenfahrzeug mit dem Transferpfad H_{SS} im Mock-up in Übereinstimmung zu bringen, wird eine weitere Übertragungsfunktion H_{FS} benötigt, die multipliziert mit H_{SS} eine virtuelle Krafteinleitung am Antriebslager darstellt:

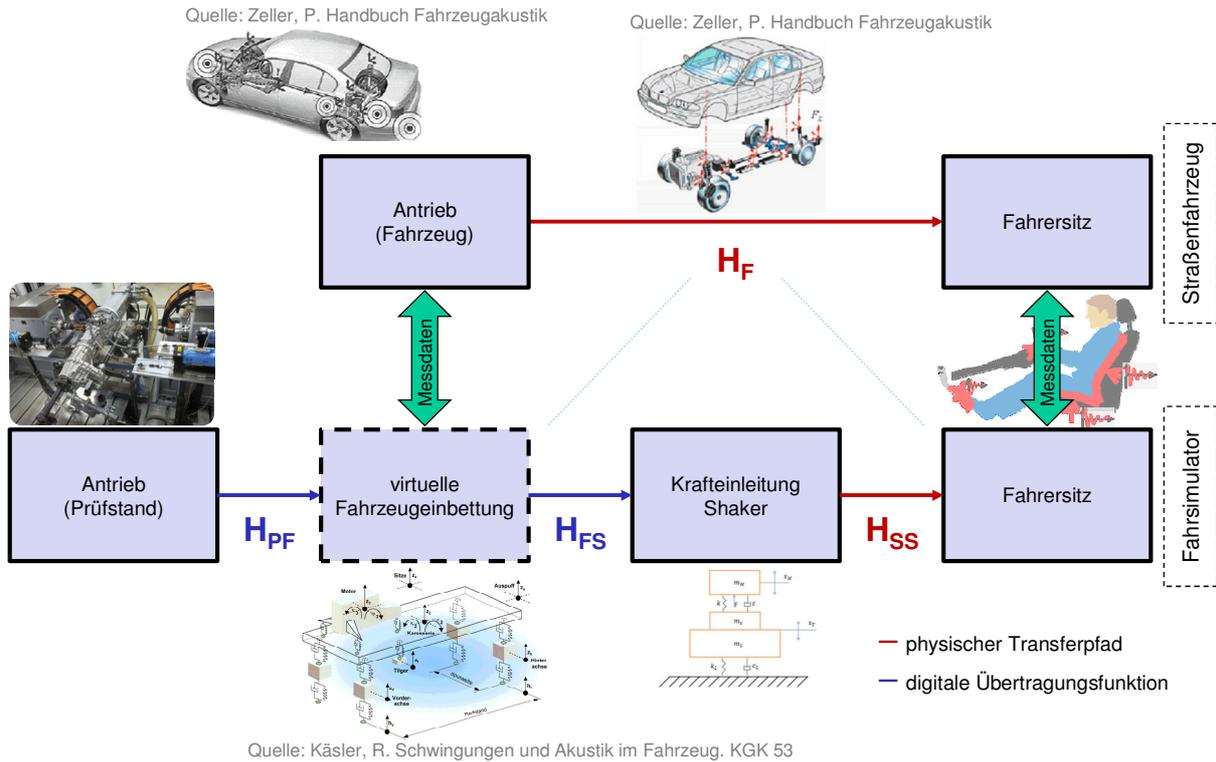


Abbildung 52: Reale (H_F , H_{SS}) und virtuelle (H_{PF} , H_{FS}) Transferpfade in Messfahrzeug und Prüfstand/Fahrsimulator

6.5 Beispielhafte Umsetzung im Fahrsimulator

Für die Fahrsimulatorstudie werden Probanden nach einer demografischen Verteilung zwischen 20 und 70 Jahren ausgewählt. Als Grundlage für die Verteilung wird das statistische Jahrbuch 2011 herangezogen und fünf Altersgruppen gebildet.

In der Untersuchung sollen eine Eingewöhnungsfahrt sowie drei Parametrierungen der in AP4.3 und AP 4.4 entwickelten Assistenzfunktion (siehe unten) untersucht werden. Darüber hinaus werden zwei Motion Cueing Algorithmen in die Untersuchung einbezogen. Weiterhin sollte eine Simulatorfahrt ca. 30 min Fahrdauer nicht überschreiten, um die Aufmerksamkeit der Probanden zu gewährleisten.

Daraus ergibt sich für das Streckenlayout der in Abbildung 53 dargestellte Rundkurs, der an zwei Versuchstagen jeweils zwei Mal durchfahren wird. In diesem Rundkurs sind verschiedene Streckentypen, wie Autobahnen, Landstraßen und Stadtgebiete enthalten. Dies führt zu Variationen in der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Weiterhin werden in den Ortshaften Bereiche mit potentiell hoher Gefährdung eingefügt.



Abbildung 53: Rundkurs für Fahrstudie

Ziel der Probandenstudie im Fahrstudie ist es, unter anderem den Nutzen des Fahrerassistenzsystems sowie dessen Akzeptanz durch den Fahrer nachzuweisen. Hierfür bekam jeder Proband zunächst eine theoretische Einführung in die Funktionsweise des Fahrerassistenzsystems. Anschließend absolvierten die Probanden zunächst eine Runde mit deaktiviertem Assistenzsystem als Eingewöhnungsfahrt auf dem virtuellen Rundkurs. In den darauffolgenden drei Runden fuhr der Proband mit aktiviertem Assistenzsystem. Zu Beginn jeder Runde wurde die Eingriffsintensität des Systems variiert. Die drei Parametrierungen wurden in kleineren Vorabstudien identifiziert und haben folgende Ausprägungen: Eine Parametrierung mit sehr schwachem Eingriff (an der Schwelle zum Wahrnehmbaren), eine Parametrierung mit mittlerer Eingriffsintensität sowie eine Parametrierung mit sehr starker Eingriffsintensität. Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der gefahrenen Parametrierungen permutiert.

Um den Nutzen der im System enthaltenen Notbremsfunktionalität zu Testen wurde am Ende der letzten Testrunde ein Notbremsmanöver initiiert. Die Notbremsung wird durch einen Fußgänger ausgelöst, der an einem Fußgängerüberweg unvermittelt die Straße quert. Der Fußgänger kann von Fahrer (Proband) und System zur selben Zeit erkannt werden.

Die Fahrerakzeptanz wurde mithilfe von Fragebögen nach van der Laan erhoben (Abbildung 54). Der Fragebogen setzt sich aus 9 Fragen zur Bewertung des Systems zusammen. Durch Wertung, Aufteilung und Mittelwertbildung ergibt sich jeweils eine Akzeptanzscore zum Nutzen und zur Zufriedenheit.

Wie schätzen Sie das System SOL bezüglich folgender Kriterien ein? Vor der Fahrt:	
Nützlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Nutzlos
Angenehm	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Unangenehm
Schlecht	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Gut
Nett	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Nervig
Effizient	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Unnötig
Ärgerlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Erfreulich
Hilfreich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Wertlos
Nicht Wünschenswert	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Wünschenswert
Aktivierend	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Einschläfernd

- Fragen 1, 2, 4, 5, 7, 9: $r_{\{-1,2,4,5,7,9\}} = \{-2, -2\}$
- Fragen 3, 6, 8: $r_{\{-3,6,8\}} = \{-2, +2\}$
- **Usefulness:** $\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}{5}$
- **Satisfying:** $\frac{r_2 + r_4 - r_3 + r_1}{4}$

Abbildung 54: Erhebung der Fahrerakzeptanz nach van der Laan

Zunächst wurde vor der Fahrt ein Fragebogen ausgefüllt um die Erwartungen des Probanden an das Fahrerassistenzsystem zu erheben. Um für jede Parametrierung des Systems eine Akzeptanzscore zu erhalten, wurde der Fragebogen nach jeder mit aktivem System gefahrenen Runde vom Probanden ausgefüllt. So kann zum einen überprüft werden, ob die Erwartungen der Fahrer an das System erfüllt werden und für welche Ausprägungen die höchste Akzeptanz vorliegt.

Die Auswertung der Probandenversuche wird in zwei Abschnitte gegliedert: Zunächst wird das Geschwindigkeitsverhalten der Probanden unter Vorliegen unterschiedlicher Eingriffsintensitäten qualitativ und quantitativ bewertet. Anschließend werden die per Fragebogen erhobenen subjektiven Eindrücke ausgewertet und die Fahrerakzeptanz bewertet. In Abbildung 55 und 56 sind die Geschwindigkeitsprofile aller Fahrer in Streckenabschnitten mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{max} von 30km/h bzw. 50km/h für die Fahrt ohne Assistenzsystem (oben), sowie bei aktiviertem Assistenzsystem mit den Parametrierungen $SV=\{1,5,10\}$ (ansteigende Eingriffsintensität) dargestellt.

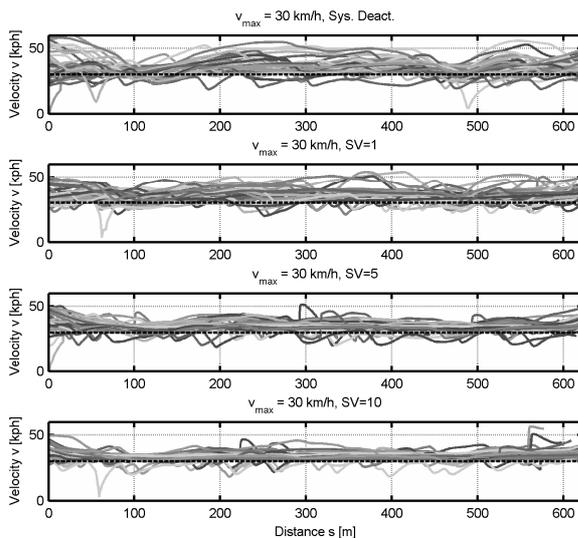


Abbildung 55: Geschwindigkeitsprofile in Bereichen mit $v_{max} = 30\text{km/h}$ bei verschiedenen Gewichtungen

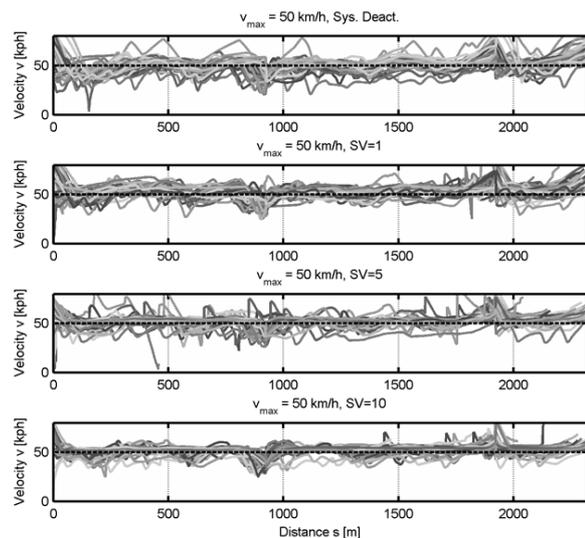


Abbildung 56: Geschwindigkeitsprofile in Bereichen mit $v_{max} = 50\text{km/h}$ bei verschiedenen Gewichtungen

Mit zunehmender Eingriffsintensität kann ein Rückgang der Geschwindigkeitsüberschreitungen beobachtet werden. Vor allem im Streckenabschnitt mit $v_{\max}=30\text{km/h}$ können lange anhaltende Geschwindigkeitsüberschreitungen verhindert oder betragsmäßig gemindert werden. Das Geschwindigkeitsprofil wird durch den Eingriff der Assistenzfunktion „homogenisiert“. Auch in Bereichen mit $v_{\max}=50\text{km/h}$ kann ein mit zunehmender Eingriffsintensität ein Rückgang der Geschwindigkeitsüberschreitungen beobachtet werden, jedoch sind bei der mittleren Eingriffsintensität (SV=5) noch kurzzeitige Ausreiser nach oben hin zu verzeichnen. Bei einer starken Eingriffsintensität (SV=10) werden auch diese weitgehend verhindert. In Abbildung 57 und Abbildung 58 sind zusammenfassend die Durchschnittsgeschwindigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen dargestellt. Weiterhin wird die Schiefe (Skew) als Maß zur Bewertung von Ausreisern herangezogen (Abbildung 59). Eine Schiefe > 0 bedeutet „rechtsschief“ und damit ein Abflachen der Normalverteilungskurve nach rechts. Diese Abflachung entsteht durch das Auftreten von Ausreisern nach oben hin. Im Gegensatz dazu bedeutet eine Schiefe < 0 „linksschief“ und damit das verstärkte Auftreten von Ausreisern nach unten hin. Analog zu den Beobachtungen bei der Betrachtung der Geschwindigkeitsprofile, nimmt bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h die Durchschnittsgeschwindigkeit mit einer Zunahme der Eingriffsintensität ab. Bei einer leichten Eingriffsintensität (SV=1) ist jedoch noch kein Absinken der Durchschnittsgeschwindigkeit erkennbar. Die Schiefe befindet sich bei allen Parametrierungen ungefähr bei einem Wert von 0, somit entspricht die Verteilung der Durchschnittsgeschwindigkeit in etwa der Normalverteilung. Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50km/h kann ebenfalls eine Absenkung der Durchschnittsgeschwindigkeit mit ansteigender Eingriffsintensität bei aktiviertem Assistenzsystem festgestellt werden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit bei deaktiviertem System liegt etwas unter dem Niveau bei aktiviertem System mit SV=1. Allerdings sind bei deaktiviertem System viele Ausreiser mit überhöhter Geschwindigkeit erkennbar (starke Rechtsschiefe). Mit steigender Eingriffsintensität nimmt die Schiefe ab und nähert sich der Normalverteilung. Mit steigender Eingriffsintensität werden also Ausreiser (Schnellfahrer) verhindert.

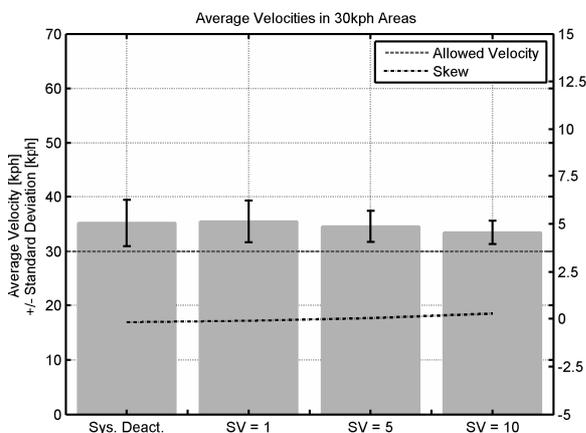


Abbildung 57: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe in Bereichen mit $v_{\max} = 30\text{km/h}$

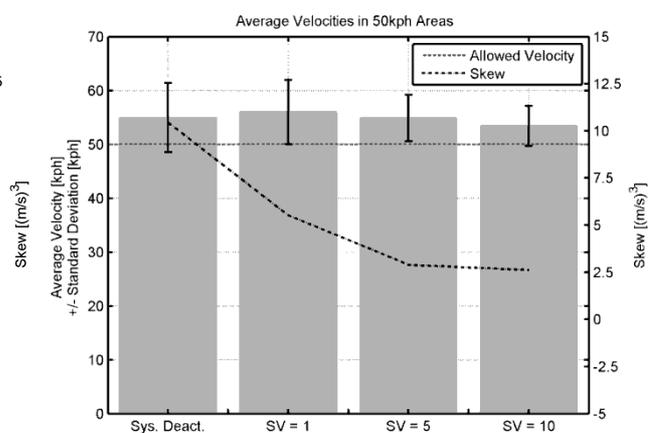


Abbildung 58: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe in Bereichen mit $v_{\max} = 50\text{km/h}$

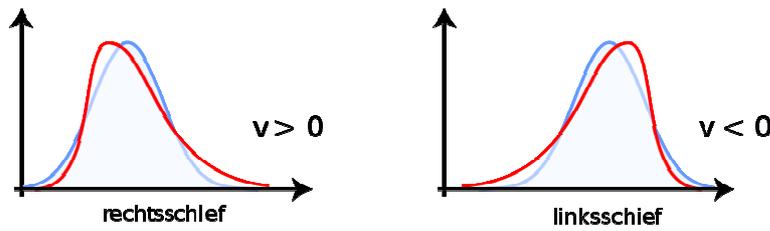


Abbildung 59: Darstellung der Schiefe

Neben der Durchschnittsgeschwindigkeit in Bereichen mit konstanten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten wurden auch Geschwindigkeitsübergänge von 50km/h auf 30km/h und von 100km/h auf 50km/h betrachtet. Die Ergebnisse für Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe sind in Abbildung 60 sowie Abbildung 61 dargestellt.

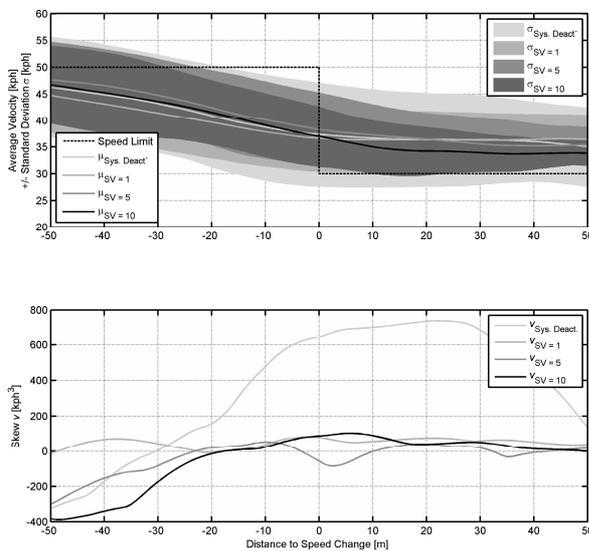


Abbildung 60: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe bei Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50km/h auf 30km/h

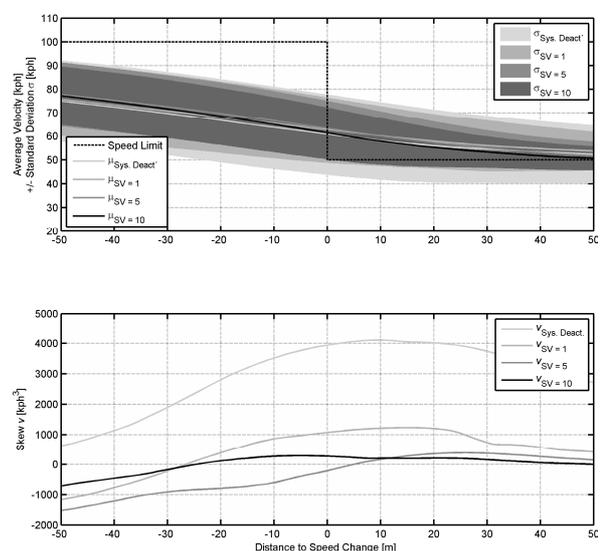


Abbildung 61: Durchschnittsgeschwindigkeit, Standardabweichung und Schiefe bei Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100km/h auf 50km/h

An beiden Geschwindigkeitsübergängen ist mit steigender Eingriffsintensität eine etwas schnellere Absenkung der Durchschnittsgeschwindigkeit zu erkennen. Weiterhin werden bei aktiviertem Assistenzsystem auch die Standardabweichung und insbesondere die Schiefe im Bereich der neuen zulässigen Höchstgeschwindigkeit deutlich reduziert. Dies spricht für ein Verhindern von Ausreisern und damit einem zu späten Abbremsen einzelner Fahrer bei Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Neben der allgemeinen Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeiten in Bereichen mit erhöhtem Gefährdungspotential soll das Fahrzeug auch in akuten Gefahrensituationen rechtzeitig zum Stehen kommen. Dafür wurden Messungen der Notbremssituationen ausgewertet. Eine Beispielmessung mit den entsprechenden Bewertungsgrößen ist in Abbildung 62 dargestellt. Im oberen Plot sind die drei Fahrzeugzustände Fahrzeuggeschwindigkeit v_x , Time To Collision (TTC) sowie die Dis-

tanz zum Fußgänger $dist_x$ dargestellt. Im mittleren Plot sind die vom Fahrer geforderte Fahrpedalstellung β_{req} , die optimierte Fahrpedalstellung β_{opt} sowie der geforderte Bremsdruck $P_{br,req}$ und der optimierte Bremsdruck $P_{br,opt}$ dargestellt. Im unteren Plot ist der Warning level dargestellt. Dabei bedeutet ein Wert von 1 eine Kollisionsgefahr falls nicht eingegriffen wird ($TTC=1,6s$). Ab hier wird der Fahrer akustisch und optisch über das HMI sowie haptisch über eine Anbremsung gewarnt. Bei Warning Level 2 kann eine Kollision ohne sofortigen Bremsen Eingriff nicht mehr verhindert werden.

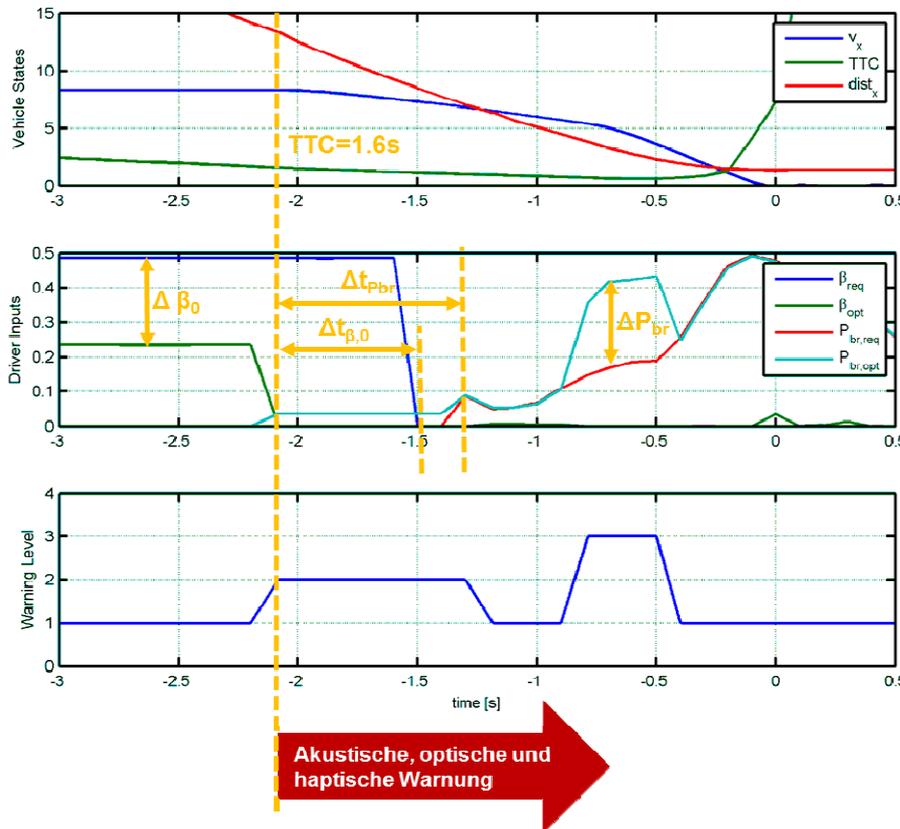


Abbildung 62: Messsequenz eines Notbremsmanövers mit den relevanten Bewertungsgrößen

Als Bewertungskriterien werden herangezogen:

1. Der Eingriff in die geforderte Fahrpedalstellung vor dem Notbremsmanöver $\Delta\beta_0$. Sie gibt den initialen Eingriff durch die Geschwindigkeitsassistentzfunktion bei Beginn des Notbremsmanövers an.
2. Die Zeit die der Fahrer benötigt um nach der Warnung die Fahrpedalanforderung zurückzunehmen $\Delta t_{\beta,0}$. Diese Größe wird zur Bewertung der initialen Reaktionszeit herangezogen.
3. Die Zeit die der Fahrer für den ersten eigenen Bremsen Eingriff benötigt $\Delta t_{P_{br}}$. Wird als effektive Reaktionszeit gewertet die der Fahrer benötigt um eine Verzögerung auslösen zu können.
4. Die maximale Bremsdruckdifferenz zwischen gefordertem und optimiertem Bremsdruck ΔP_{br} . Die maximale Bremsdruckdifferenz wird für die Bewertung der Bremsqualität des Fahrers herangezogen. Ist die Bremsdruckdifferenz groß, muss Funktion den Bremsen Eingriff des Fahrers stark korrigieren um ein rechtzeitiges Anhalten zu ermöglichen.

In Tabelle 2 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen von 24 Ausgewerteten Notbremsmanövern dargestellt.

Tabelle 2: Auswertung Bewertungskriterien Notbremsmanöver

	Mittelwert	Std.-Abw
$\Delta \beta_0$	0,25	0,24
$\Delta t_{\beta,0}$	0,33 s	0,19 s
Δt_{Pbr}	0,53 s	0,39 s
ΔP_b	0,31	0,13

Im Durchschnitt liegt bei Eintritt der Notbremssituation eine Reduzierung des Fahrpedaleinganges von 0,25 vor. Durch diesen relativ starken Eingriff ist davon auszugehen, dass in den meisten Fällen schon bei Eintritt in die Gefahrensituation eine Drosselung der Geschwindigkeit vorliegt. Aus dieser Absenkung der Geschwindigkeit resultieren erhebliche Verkürzungen im Bremsweg. Nach dem ersten Bremsingriff (mit Warnung des Fahrers) vergehen durchschnittlich 0,33s bis zur ersten Reaktion des Fahrers (Wegnahme Fahrpedalanforderung). Ab diesem Zeitpunkt würde bei alleiniger Berücksichtigung der Fahrereingaben lediglich eine Verzögerung per Rekuperation erfolgen. Bis zum ersten Bremsingriff durch den Fahrer vergehen durchschnittlich 0,53s. Während des eigentlichen Bremsmanövers beträgt die Differenz zwischen optimierten und vom Fahrer geforderten normierten Bremsdruck ΔP_{br} durchschnittlich 0,31. Diese Differenz zeigt deutlich, dass das vom Fahrer geforderte Bremsmoment häufig zu gering ist, um das Fahrzeug rechtzeitig zum Stillstand zu bringen.

Neben der Auswertung der Versuchsmessdaten werden auch subjektive Fahrereindrücke betrachtet. Mithilfe einer Bewertungsmethode nach van der Laan (siehe Kapitelanfang) wird dabei vor allem die Fahrerakzeptanz für verschiedene Eingriffsintensitäten bewertet. Jedem Proband wurde vor der ersten Simulatorfahrt die Wirkung der sicherheitsoptimierten Längsführungsassistenz (SOL) und der intelligenten Geschwindigkeitsassistenz (ISA) erläutert. Anschließend sollten die Probanden basierend auf ihrer Einschätzung zum jeweiligen System den Akzeptanzfragebogen ausfüllen. Anschließend wurden die Probanden nach jeder Parametrierung erneut aufgefordert den Akzeptanzfragebogen auszufüllen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 63 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass sowohl der Nutzen als auch die Zufriedenheit mit dem System bei einer mittleren Eingriffsintensität am höchsten bewertet wurden. Weiterhin liegen die Werte oberhalb der im Vorhinein erhobenen Akzeptanzbewertung für die SOL. Dies spricht dafür, dass der Eindruck vom System nach der Fahrt besser ist, als vom Probanden zuvor gedacht. Bei einer niedrigen Eingriffsintensität ist eine deutliche Absenkung der Fahrerakzeptanz zu erkennen. Diese niedrigen Akzeptanzwerte sind durch das mit der niedrigen Eingriffsintensität einhergehenden indifferenten Feedback am Fahrpedal und der geringen Drosselung der Geschwindigkeit zu begründen. Bei starker Eingriffsintensität wird der Nutzen zwar noch relativ hoch eingeschätzt, jedoch geht die Fahrerzufriedenheit deutlich zurück.

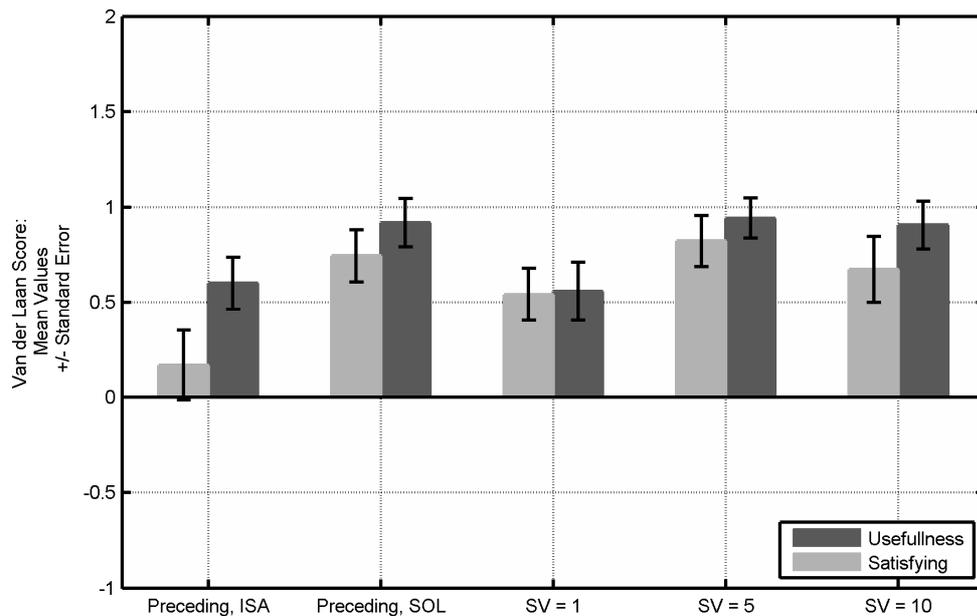


Abbildung 63: Ergebnisse Fahrerakzeptanz nach van der Laan für verschiedene Eingriffsintensitäten.

Die Auswertung der Studie hat gezeigt, dass im Rahmen von AP4 entwickelte und implementierte sicherheitsoptimierte Längsführungsassistenten den Fahrer dabei unterstützt eine situationsgerechte Geschwindigkeit zu wählen. Vor allem an Ortseingängen und innerorts wird entweder die durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit reduziert oder einzelne Fahrer mit überhöhter Geschwindigkeit dazu gebracht die Geschwindigkeit zu reduzieren. Das daraus resultierende niedrigere Geschwindigkeitsniveau führt zu niedrigeren Initialgeschwindigkeiten bei Eintritt in eine akute Gefahrensituation (Notbremsung). Weiterhin entstehen durch den Systemeingriff in diesen Gefahrensituationen Vorteile in der Reaktionszeit sowie bei der Korrektur des vom Fahrer geforderten Bremsdruckes. Diese Eigenschaften führen zu einer deutlichen Verringerung des Bremsweges. Bei einer mittleren Eingriffsintensität ist bei der objektiven Bewertung ein großer Nutzen erkennbar, ebenso wurde für diese Parametrierung das höchste Akzeptanzmaß für das System ermittelt. Der Stuttgarter Fahrsimulator hat sich für die Bewertung der Assistenzfunktion als geeignetes Hilfsmittel zur Ermittlung der vorgestellten Ergebnisse erwiesen. Mit ihm konnte die Funktion im Prototypenstadium an einer Zielgruppe aus Normalfahrern unter realitätsnahen Umständen reproduzierbar getestet, und Aussagen zum Nutzen und der Akzeptanz für das System getroffen werden.

Motion Cueing Algorithmen lassen sich grundlegend in situationsabhängige und situationsunabhängige Ansätze unterscheiden. Situationsunabhängige Algorithmen beruhen meist auf dem Prinzip des „Classical Washout“. Dabei werden die Beschleunigungssignale in mehrere Frequenzbänder aufgeteilt und durch translatorische und rotatorische Bewegungen der Kuppel und des Schlittensystems dargestellt. Durch entsprechende Parametrierung dieser Algorithmen können verschiedene Fahrmanöver (bspw. Autobahn- und Landstraßenfahrt) mit einem Parametersatz realisiert werden. Um dem Fahrer Freiheiten bei der Fahrt zu ermöglichen, müssen entsprechende Reserven bei der Parametrierung vorgesehen werden. Da-

her ist es offensichtlich, dass bei dieser Methode praktisch nie die gesamte Leistungsfähigkeit des Simulators ausgenutzt werden kann.

Dem gegenüber stehen situationsabhängige Algorithmen. Hier werden möglichst viele Informationen über das zu befahrende Szenario im Algorithmus berücksichtigt. Um ein gutes Ergebnis zu erhalten, muss sich der Fahrer exakt an die Vorgaben für das Szenario halten. Für bestimmte Manöver, wie bspw. einem Doppelspurwechsel, ist ein solcher Ansatz sinnvoll, da die Leistungsfähigkeit des Simulators optimal ausgenutzt werden kann. Beide Ansätze sind geeignet, um sie an dem 8-DOF-Bewegungssystem des Stuttgarter Fahrsimulators zu implementieren.

Die Möglichkeiten zur Darstellung von Beschleunigungen durch einen Fahrsimulator sind durch dynamische und statische Grenzen limitiert. Diese müssen unter allen auftretenden Bedingungen eingehalten werden.

Eine Herausforderung stellen dabei die Grenzen des Bewegungsraumes des Hexapods dar. Hier haben Bewegungen eines Freiheitsgrades (bspw. Rollbewegung) Einfluss auf den möglichen Verfahrensweg eines anderen Freiheitsgrades (bspw. Querversatz). Um die Grenzen des Hexapods einhalten zu können, müssen die aktuellen Aktuatorpositionen bekannt sein. Dazu werden die Vorgaben für die Freiheitsgrade in Aktuatorlängen umgerechnet. Das Modell dieser inversen Kinematik kann dazu eingesetzt werden, einen Motion Cueing Algorithmus zu parametrieren.

Die direkte Kinematik dient im Anschluss dazu, die nun begrenzten Aktuatorlängen wieder in die Freiheitsgraddarstellung umzurechnen und damit die tatsächliche Plattformposition zu berechnen. Beide Modelle wurden in Matlab/SIMULINK umgesetzt und können für die Simulation des Bewegungssystems verwendet werden. Die inverse Kinematik kann darüber hinaus auf einer Echtzeitplattform verwendet werden [Scheck16].

Neben den statischen Grenzen des Bewegungsraumes des Simulators stellt das dynamische Verhalten des Bewegungssystems eine zentrale Rolle für die Beschleunigungsdarstellung dar. Das dynamische Verhalten soll einen möglichst geringen Einfluss auf die Bewegungsdarstellung haben, d.h. der Unterschied zwischen Sollsignal und erzeugter Beschleunigung soll möglichst gering sein.

Um das dynamische Verhalten analysieren und gegebenenfalls optimieren zu können, muss dieses zunächst bestimmt werden. Die Erzeugung des Sollsignals für den Simulator findet im Serverraum auf einem Echtzeitsystem statt. Die vom Simulator erzeugte Beschleunigung wird von der Versuchsperson in der Kuppel wahrgenommen. Daher wird hier eine Messplattform sowie ein Echtzeitmesssystem eingebaut. Um den Soll- und Istverlauf vergleichen zu können, ist eine einheitliche Zeitbasis notwendig. Um das Sollsignal auf dem Messsystem aufzeichnen zu können, wird daher eine latenzfreie Analogverbindung vom Serverraum in die Simulatorkuppel verwendet. [Pitz14]

Da das dynamische Verhalten für alle sechs Bewegungsmöglichkeiten untersucht werden soll, wird eine Inertialmessplattform, wie sie auch in Fahrzeugen verwendet wird, eingesetzt. Die Stimulation des Systems erfolgt für jeden Freiheitsgrad getrennt mit einer Sinusfunktion mit ansteigender Frequenz. Dadurch ist es möglich, die auf-

genommenen Daten im Frequenzbereich zu analysieren und mittels geeigneter Filterfunktionen Korrekturen vorzunehmen.

Nach der Analyse der Messdaten werden Vorsteuerungen implementiert, die ein lineares Verhalten des Bewegungssystems sicherstellen und keine Frequenzbereiche durch das Systemverhalten verstärkt oder abgeschwächt werden. Abbildung 21 zeigt einen Vergleich zwischen dem Originalverhalten der Amplitude und dem durch eine Vorsteuerung optimierten Verhalten beispielhaft für die Rollbewegung.

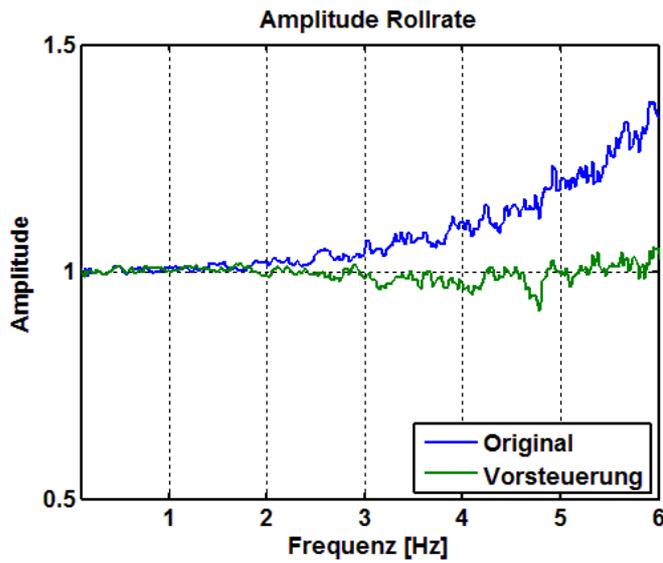


Abbildung 64: Amplitude Rollrate

Der Stuttgarter Fahrsimulator weist auf Grund seiner Bauart mit acht Freiheitsgraden je zwei Freiheitsgrade in lateraler und longitudinaler Richtung auf. Das Schlittensystem ermöglicht in diesen Bewegungsrichtungen einen größeren linearen Weg. Diese Freiheitsgrade können auf unterschiedliche Weise gekoppelt werden.

Für die Simulation einer Gefahrensituation mit hohen auftretenden Beschleunigungen beim Ausweichen ist es wünschenswert, dass dieses Manöver wiederum ohne Einflüsse aus dem Motion Cueing Algorithmus simuliert wird. Bei einem klassischen Washout-Algorithmus wird für die Kopplung eine Frequenzweiche verwendet. Das Signal wird also auf Schlitten und Hexapod aufgeteilt. Die resultierende Bewegung wird jedoch wiederum durch die Dynamik des Bewegungssystems beeinflusst. Ideal ist es, den großen Bewegungsraum mit der hohen Dynamik des Hexapod ideal zu kombinieren. D.h. das Hexapod gleicht lediglich die auftretende Abweichung zwischen Sollsignal und Schlittenposition aus.

Für dieses Verfahren muss die Schlittenposition bekannt sein. Das Bewegungssystem stellt diese Position zur Verfügung, jedoch aufgrund der Netzwerkkommunikation mit einer zeitlichen Verzögerung.

Da das dynamische Verhalten des Schlittensystems wie oben beschrieben bestimmt wurde, kann dieses Verhalten mit einer geeigneten Übertragungsfunktion beschrieben und simuliert werden. Somit entsteht praktisch eine „ideale“, für den Stuttgarter Fahrsimulator angepasste, Frequenzweiche.

Die Absicherung der implementierten Vorsteuerungen und Frequenzweichen erfolgt mit einem in der Fahrdynamik etablierten Manöver. Dazu wird bei einer Geradeausfahrt eine sinusförmige Lenkbewegung mit ansteigender Frequenz durchgeführt. Mit Hilfe einer Inertialmessplattform kann dann die Fahrzeugreaktion mit den Lenkbewegungen korreliert werden. Im Fahrsimulator kann ein solches Manöver ebenfalls durchgeführt werden. Daraufhin kann die simulierte Fahrzeugreaktion mit den tatsächlich in der Kuppel gemessenen Bewegungen verglichen werden. Abbildung 22 zeigt dieses Manöver sowie den Vergleich für die Fahrzeugquerrichtung und die Gierreaktion. [Pitz14, Pitz17]

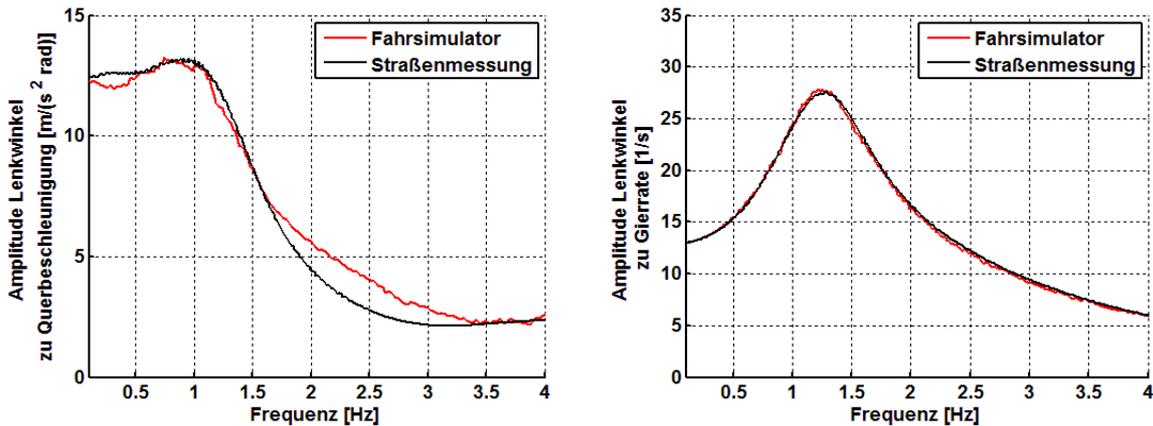


Abbildung 65: Vergleich von Fahrzeug- und Simulatorreaktion [Pitz14, Pitz17]

Es ist zu erkennen, dass der Fahrsimulator die Fahrzeugbewegungen exakt nachbildet. Mit diesem Verfahren ist sichergestellt, dass die Beschleunigungen, wie sie von der Fahrdynamiksimulation berechnet werden, für den Fahrer realitätsnah dargestellt werden. Es stellt die Grundlage für darauf aufbauende Motion Cueing Algorithmen dar.

Um dem Probanden im Simulator einen möglichst realitätsnahen Fahreindruck zu bieten, sollten die Fahrzeugbewegungen ohne zeitliche Verzögerung und entsprechend ihres Niveaus nachgebildet werden. Gerade als Reaktion auf Gefahrensituationen treten dabei hohe Beschleunigungen auf und dem Fahrer sollte eine zeitlich wenig versetzte Rückmeldung gegeben werden.

In einem Simulatorexperiment ist die befahrene Strecke a priori festgelegt. D. h. auch die auftretende Gefahrensituation ist bekannt. In dieser Situation ist mit einem Abbremsen des Fahrzeugs zu rechnen. Eine weitere Beschleunigung ist auf Grund der verwendeten Assistenzfunktion praktisch ausgeschlossen. Daher kann der Simulator entsprechend Vorpositioniert werden, um einen größeren linearen Bewegungsraum zur Verfügung zu haben. Dies ist für die Bewegungsdarstellung hilfreich, da die Fahrzeugbewegungen ebenfalls primär linear stattfinden.

In Abbildung 66 ist ein Bremsvorgang aus 70 km/h dargestellt. Dabei wird der Fahrsimulator in einem Fall Vorpositioniert, im anderen Fall wird darauf verzichtet. Es zeigt sich, dass ein deutlich höheres Beschleunigungsniveau erreicht werden kann, und der Realismusgrad der Reproduktion einer starken Bremsung steigt.

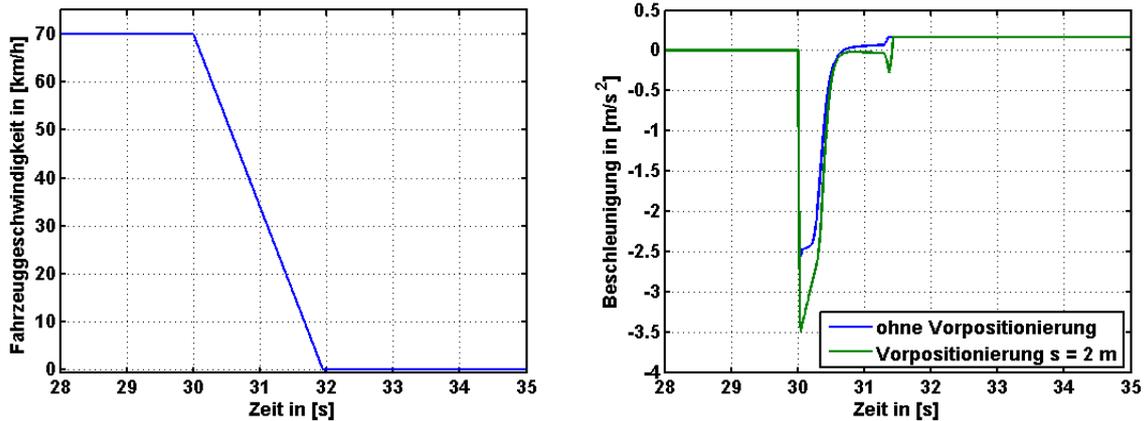


Abbildung 66: Bremsvorgang mit und ohne Vorpositionierung

Für die Vorpositionierung werden 2 m gewählt. Ein größerer Weg würde das Niveau weiter erhöhen. Da die Ausrichtung der neuen Position für den Fahrer nicht wahrnehmbar erfolgen muss, ist ein gewisser Zeitbedarf notwendig. Daher ist ein größeres Offset zur Vorpositionierung nicht praktikabel. Auch für die Simulation der Querdynamik wird dieses Verfahren angewandt und der lineare Bewegungsraum vor einer Kurvenfahrt erhöht. [Pitz17]

Der Algorithmus wird entsprechend der Grenzen des Stuttgarter Fahrsimulators parametrisiert und implementiert. Um die Potentiale des Ansatzes erheben zu können, wird ebenfalls ein Classical-Washout-Algorithmus entsprechend der Anforderungen parametrisiert. Dieser dient als Referenzalgorithmus. Beide Algorithmen werden in der oben beschriebenen Studie eingesetzt. Damit stehen 43 Fahrten mit jedem der Ansätze zur Verfügung. Neben der Erhebung von Messdaten werden die Probanden bei jedem Versuch befragt, um auch eine subjektive Einschätzung zu erhalten. [Pitz16, Pitz17]

Da ein Simulator häufig das Befinden der Probanden beeinflusst, ist das Auftreten von Symptomen der Simulatorkrankheit ein Indiz für die Güte des verwendeten Algorithmus. Zur Messung dieser wird der Simulator Sickness Questionnaire verwendet, der sich seit seiner Entwicklung 1993 etabliert hat und in vielen Studien eingesetzt wird. Der Fragebogen ist in Abbildung 67 dargestellt. Er wird von den Probanden vor und nach jeder Fahrt ausgefüllt. [Ken93]

Fragen zu Ihrem allgemeinen Wohlbefinden: Bitte kreuzen Sie an, ob und wenn ja wie stark, die folgenden Symptome auf Ihren aktuellen Zustand zutreffen.					
		gar nicht	etwas	mittel	stark
1	Allgemeines Unwohlsein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Ermüdung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	angestrengte Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Schwierigkeiten scharf zu sehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	erhöhte Speichelbildung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Schwitzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Übelkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Konzentrationsschwierigkeiten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Kopfdruck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	verschwommenes Sehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Schwindel (geöffnete Augen)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Schwindel (geschlossene Augen)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Gleichgewichtsstörungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Magenbeschwerden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Aufstoßen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 67: Simulator Sickness Questionnaire [Ken93, Pitz17]

Die Auswertung des Fragebogens erfolgt anhand der Kriterien Unwohlsein (Nausea), visuelle Wahrnehmung (Oculomotor) und Schwierigkeiten bei der Orientierung (Disorientation). Außerdem wird ein Gesamtwert über alle Kategorien gebildet. Je höher der ermittelte Wert ausfällt, desto stärker ist eines der Symptome aufgetreten. In Abbildung 68 sind die Ergebnisse der Befragung aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der auf Strecke und Szenario angepasste Algorithmus bessere Ergebnisse erzielt, als der klassische Ansatz. Die zeigt sich auch bei der Auswertung der Messdaten. Wie in Abbildung 67 dargestellt können die auftretenden Fahrsituationen besser wiedergegeben werden.

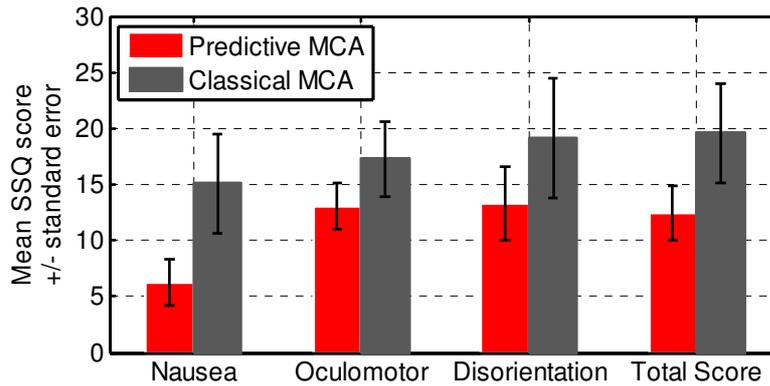


Abbildung 68: Ergebnisse des SSQ [Pitz16, Pitz17]

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises wird auf den diesem Abschlussbericht beiliegenden Verwendungsnachweis verwiesen.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Alle geleisteten Arbeiten waren für den Projekterfolg notwendig und wurden entsprechend den Richtlinien der Universität Stuttgart und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung geprüft.

9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen der Realfahrtenstudie erhobenen Daten bieten die Möglichkeit weitere Arbeiten zu unterstützen. Dies gilt vor allem für die Ergebnisse bezüglich des Fahrerhaltens. Aufgrund des Umfangs der Studie können hier statistisch belastbare Daten verwendet werden. Ausgehend von der Studie wurde die Kompetenz aufgebaut, einen durchgängigen Prozess von solchen Studien bis zu Akzeptanz- und Funktionstests im Simulator zu realisieren. Dieser Prozess wird auch auf andere, den Fahrer unterstützenden, Systeme angewandt und für hochautomatisierte Fahrfunktionen übertragen.

Die entwickelte und prototypisch umgesetzte Assistenzfunktion liefert Ergebnisse, wie durch eine Unterstützung des Fahrers die Sicherheit von Elektrofahrzeugen und deren Umgebung gesteigert werden kann. Neben der Funktionalität wurden auch Daten erhoben, wie die Akzeptanz durch den Fahrer für eine solche Funktion gesteigert werden kann. Diese Kenntnisse bezüglich der Probandenbefragung stehen auch für andere Untersuchungen zur Verfügung.

Um die Entwicklung von interaktiven Systemen für ein Elektrofahrzeug zu unterstützen wurde der Fahrsimulator dahingehend erweitert. Er bietet nun die Möglichkeit elektrisch betriebene Fahrzeuge vollständig zu simulieren und dem Fahrer ein realistischen Fahrgefühl zu vermitteln. Aktuell zeichnet sich ab, dass hochautomatisierte

Fahrzeuge vorwiegend über einen elektrischen Antriebsstrang verfügen werden. Somit wurde dieser europaweit einzigartige Prüfstand für diese zukünftigen Herausforderungen erweitert.

Im Projekt wurden verschiedene Möglichkeiten zur Warnung bzw. zur Information des Fahrers mit dem Fokus auf sicherheitsrelevanten Daten eines Elektrofahrzeugs betrachtet. In mehreren Probandenstudien zeigte sich, dass solche haptischen und akustischen Hinweise den Fahrer zu unterschiedlichen Handlungen animieren. Für hochautomatisierte Fahrfunktionen ist dies ebenfalls ein wichtiger Bestandteil, um dem Fahrer bspw. die Fahrzeugführung wieder zu übertragen. Der Fahrsimulator verfügt auf Grund des Projektes ZuSE nun über diverse Möglichkeiten zur Information des Fahrers, die auch in diesem Kontext eingesetzt werden können.

Der entwickelte Prüfstand zur Einbindung optischer Umfeldsensorik ist in der Lage, verschiedene Systeme aufzunehmen und in die Simulationsumgebung des Fahrsimulators einzubinden. Somit wird dieser auch zukünftig für die Integration von Hardware in die virtuelle Realität eingesetzt.

Durch die allgemeine Optimierung der Reproduktion der Fahrzeugeigenschaften (Akustik, Haptik, Motion Cueing) wurde der im Projekt VALIDATE durch Förderung des BMBF gebaute Stuttgarter Fahrsimulator erheblich weiterentwickelt. Diese Optimierungen ermöglichen eine Nutzung der Anlage auch über dem geplanten Einsatz mit Normalfahrern hinaus. Die exakte Wiedergabe der Fahrzeugbewegungen ermöglicht auch Untersuchungen fahrdynamischer Fragestellungen.

Im Rahmen der Arbeiten wurde ein Modell für die Simulation des Rollgeräusches entwickelt, welches eine Simulation des Geräusches basierend auf wenigen messbaren Parametern ermöglicht. Damit besteht die Möglichkeit, Simulationen am Fahrsimulator realistischer bezüglich der Fahrbahneigenschaften zu gestalten. Darüber hinaus bietet es die Möglichkeit, die Geräuschenstehung von Fahrbahnoberflächen in Abhängigkeit bestimmter Texturausprägungen modellmäßig nachzubilden. Dies ist auch im Rahmen von möglichen Modellvergleichen zum Reifen-Fahrbahn-Geräusch ein wissenschaftlicher Fortschritt. Die Projektarbeit im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bildet zusätzlich die Grundlage einer Promotion.

Durch die Weiterentwicklung des Messfahrzeugs zur Straßenerfassung, steht am Institut für Straßen- und Verkehrswesen ein Werkzeug zur Verfügung, das nicht nur für die Straßenmodellierung genutzt werden kann, sondern auch im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben sowie in der Lehre (z. B. auch Ausbildung/Heranführung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen studentischer Arbeiten, siehe beispielhaft auch Kapitel 11). Dies bezieht sich auch auf die Integration neuer Erkenntnisse in die Lehre.

10 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die im Rahmen des Projekts erlangten wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden bei folgenden Tagungen und Konferenzen vorgestellt:



- Liedecke C., Baumann G, Reuss H.-C.: *Capability and usability of haptic signals for braking – investigated with the new dynamic driving simulator of the University of Stuttgart*; 8th Intelligent Braking, Frankfurt; 2013
- Liedecke C., Baumann G, Reuss H.-C.: *Untersuchung zur Anwendung haptischer Signale am Fahrerfuß für Aufgaben der Fahrzeugsteuerung*; 6. Wissenschaftsforum Mobilität, Duisburg; 2014
- Liedecke C., Baumann G, Reuss H.-C.: *Potential of the foot as a haptic interface for future communication and vehicle controlling*; 10th ITS European Congress, Helsinki, Finland; 2014
- Pitz J., Nguyen M.-T., Baumann G., Reuss H.-C.: *Combined Motion of a Hexapod with a XY-Table System for Lateral Movements*; Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris; 2014
- Rothermel T., Pitz J., Baumann G., Reuss H.-C.: *Untersuchung einer interaktiven Fahrerassistenzfunktion zur sicherheitsoptimierten Längsführung von E-Fahrzeugen im Stuttgarter Fahrsimulator*; 5. AutoTest, Stuttgart; 2014
- Liedecke C., Baumann G, Reuss H.-C.: *Application of haptic signals for driver to car communication during autonomous driving*; 15. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart; 2015
- Rothermel, T.; Pitz, J.; Reuss, H.-C.: *Abschätzung der Fahrerakzeptanz und Online-Parameteradaption für eine Semi-autonome Längsführungsassistenz mithilfe von Fuzzy-Inferenz*; 7. VDI/VDE Fachtagung AUTOREG - Auf dem Weg zum automatisierten Fahren, Baden-Baden; 2015
- Manuel Sánchez, M.; Ressel, W.; Tejkl, K.: *Dynamic measurements and simulation of road surface characteristics*. 15. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart; 2015
- Manuel Sánchez, M.; Ressel, W.: *Semi-empirical simulation of tire-road noise based on surface texture, speed and contact forces*. 44th Inter-Noise Congress, San Francisco (CA), 2015
- Pitz J., Rothermel T., Kehrer M., Reuss H.-C.: *Predictive Motion Cueing Algorithm for Development of Interactive Assistance Systems*; 16. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart; 2016
- Rothermel, T.; Pitz, J.; Reuss, H.-C.: *Semi-Autonomous Longitudinal Guidance for Pedestrian Protection in Electric Vehicles by Means of Optimal Control*; SAE World Congress, Detroit (MI), USA; 2016

Die folgenden Dissertationen basieren zum Teil auf den Ergebnissen des Projektes:

- Schmidt A.: *Modellierung von Fahrzeugantrieben anhand von Messdaten aus dem Koppelbetrieb zwischen Fahrsimulator und Antriebsstrangprüfstand*; 2016
- Liedecke C.: *Haptische Signale am Fahrerfuß für Aufgaben der Fahrzeugsteuerung*; 2016

Für die 2017 erscheinende Dissertation „Vorausschauender Motion-Cueing-Algorithmus für den Stuttgarter Fahrsimulator“ wurden ebenfalls Ergebnisse aus dem Projekt ZuSE verwendet. Es ist zu erwarten, dass Ergebnisse in weiteren Dissertationen verwendet werden.

11 Referenzen

- [Aktiv10] BMWi-Forschungsinitiative AKTIV stellt Ergebnisse für sicheren und störungsfreien Straßenverkehr vor. Pressemeldung des BMWi, 23.6.2010
- [Alber13] Alber, S: Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Dissertation, 2013.
- [Anf07] Anfosso-Lédée, F.; Pichaud, Y.: Temperature effect on tyre–road noise. In: Applied Acoustics, Vol. 68, S. 1–16. Elsevier, 2007
- [Baum12] Baumann, G.; Riemer, T.; Rumbolz, P.; Schmidt, A.; Liedecke, C.; Piegsa, A.: The New Driving Simulator of Stuttgart University. 12th Stuttgart International Symposium "Automotive and Engine Technology", 2012.
- [Bec08] Beckenbauer, T.: Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche: Geräuschenstehung, Wirkungsmechanismen und akustische Wirkung unter dem Einfluss von Bautechnik und Straßenbetrieb. In: 4. Informationstage "Geräuschkindernde Fahrbahneläge in der Praxis - Lärmaktionsplanung 11./12.6.2008,,. Müller-BBM (Hrsg.). Planegg, 2008
- [Bue11] Bueno, M.; Luong, J.; Viñuela, U.; Terán, F.; Paje, S.: Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise. In: Applied Acoustics, Vol. 72, S. 829–835, Elsevier, 2011
- [Büh13] Bühlmann, E.; Ziegler, T.: Temperature effects on tyre/road noise measurements and the main reasons for their variation. In: Inter-Noise 2013: 15.-18. September. Innsbruck (Austria), 2013
- [Böhm11] Böhm, M.; Baumann, G.; Reuss, H.-C.: Comparison of Simulation, Test Bench and Road Test regarding a Hybrid Electric Power Train. 11th Stuttgart International Symposium "Automotive and Engine Technology", 2011.
- [Böhm12] Böhm, M.: Steuerung und Regelung des Antriebsstrangs eines Erdgashybridfahrzeugs. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.
- [DIN02] DIN EN ISO 11819-1: Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche: Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren, Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [DIN84] DIN ISO 5128: Innengeräuschemessungen in Kraftfahrzeugen, Beuth Verlag, Berlin, 1984
- [Freu12] Freuer, A.; Reuss, H.-C.; Grimm, M.: Studierenden-Projekt E-Smart. 6th Euroforum "Elektronik-Systeme im Automobil", München 14.02.2012.
- [Fer15] Ferraro, P.: Analyse der Zusammenhänge zwischen Längsunebenheiten der Straßenoberfläche und den Auswirkungen auf das Fahrzeug. Masterarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015

- [Fis14] Fischer, M.: Analyse von Schallpegelmessungen bei verschiedenen Fahrbahnoberflächen, Bachelorarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014
- [Fis16] Fischer, M.: Analyse und Vergleich von Nah- und Fernfeldmethode (CPX und CPB) zur Messung von Verkehrslärmemissionen, Masterarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016
- [For13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Arbeitspapier – Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken. Köln, 2013
- [Hei13] Heißing, B.; Ersoy, M.; Gies, S. (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch – Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. 4. Auflage, Springer Vieweg. Wiesbaden, 2013
- [Herm07] Herrmann, S.R.: Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Dissertation, 2007.
- [Hein08] Hein, S.: Zusammenhang zwischen Textur und Lärmemission von offenporigen Fahrbahndecken. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Diplomarbeit, 2008.
- [ISO12] ISO/DIS 11819-2: Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close-proximity method, Geneva 2012
- [Ken93] Kennedy R. S., Lane N. E., Berbaum K. S., Lilienthal M. G.: Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness; 3; In: The International Journal of Aviation Psychology 3, 203-220; Taylor & Francis; 1993
- [Knoll99] Knoll, E.; Roos, R.; Ressel, W.; Ditter, M.: Funktionsbauverträge, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 780. Bonn-Bad Godesberg : Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 1999.
- [Mio14] Mioduszewski, P.; Taryma, S.; Wozniak, R.: Temperature influence on tyre/road noise of selected tyres. In: Inter-Noise 2014: 16.-19. November. Melbourne (Australia), 2014
- [Mio15] Mioduszewski, P.; Ejsmont, J.; Taryma, S.; Wóznia, R.: Temperature influence on tire/road noise evaluated by the drum method. In: Inter-Noise 2015: 9.-12. August. San Francisco (USA), 2015
- [Pieg11] Piegsa, A.; Rumbolz, P.; Schmidt, A.; Liedecke, C.; Baumann, G.; Reuss, H.-C.: VALIDATE – Basis for New Sophisticated Research Platform for Virtual Development of Vehicle Systems. 2011 SAE World Congress, Detroit, 2011.
- [Pitz14] Pitz J., Nguyen M.-T., Baumann G., Reuss H.-C.: Combined Motion of a Hexapod with a XY-Table System for Lateral Movements; In: Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris; 2014
- [Pitz16] Pitz J., Rothermel T., Kehrer M., Reuss H.-C.: Predictive Motion Cueing Algorithm for Development of Interactive Assistance Systems; In: 16. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart; 2016

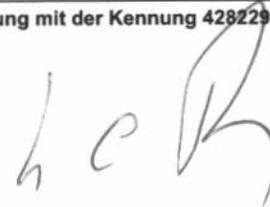
- [Pitz17] Pitz, J.: Vorausschauender Motion-Cueing-Algorithmus für den Stuttgarter Fahrsimulator; Dissertation; Springer Vieweg; voraussichtlich 2017
- [Rumb11] Rumbolz, P.; Baumann, G.; Reuss, H.-C: Messung der fahrzeuginternen Leistungsflüsse im Realverkehr. ATZ 05/2011, S. 416-421.
- [Ress07a]: Ressel, W.; Tejkl, K.; Rübensam, J.; Schwiethal, S.: Methodenstudie zur Life-Cycle Bewertung von Straßenbefestigungen. Zwischenbericht FE 09.140/2005 im Auftrag der BAST. Stuttgart, 2007.
- [Ress07b]: Ressel, W. Alber, S. et al.: Asphalttechnologische Möglichkeiten zur dauerhaften Reduzierung der Lärmpegel in offenporigen Asphalten. Beitrag zur DAGA 2007, 19.-22.3.07, Stuttgart, 2007.
- [Ress08a]: Ressel, W.; Herrmann, S.: Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 997. Bonn, 2008.
- [Ress10]: Ressel, W.; Benner, A. et al.: Entwurfshinweise zum sicheren sechsstreifigen Ausbau von Autobahnen. Schlußbericht FE 02.269/2006 im Auftrag der BAST. Dresden, 2010.
- [Ress08b] Ressel, W.; Weise, M.: Anwendung des objektorientierten Modellkatalogs und Verfahren für die Zusammenführung von Straßen- und Umweltinformationen in der Praxis. Endbericht zu ZSU III im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart, 2008
- [Riem12] Riemer, T.: Vorausschauende Betriebsstrategie für ein Erdgas Hybridfahrzeug. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.
- [Rec15] Reck, S.: Messung und Analyse des Einflusses der Geschwindigkeit auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Bachelorarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015
- [Röh15] Röhm, D.: Messung und Analyse des Einflusses der Lufttemperatur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Bachelorarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015
- [San02] Sandberg, U.; Ejsmont, J.A.: Tyre/Road Noise Reference Book, Kisa (Sweden): INFORMEX Ejsmont & Sandberg Handelsbolag, 2002
- [Scheck13] Scheckenbach P.: Modellierung der Kinematik eines Hexapoden; Bachelorarbeit; Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart, Stuttgart; 2013
- [Wolff13] Wolff, A.: Simulation of pavement surface runoff using the depth-averaged shallow water equations. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Dissertation, 2013.
- [Wie14] Wienen, K.: Analyse von Schallpegelmessungen anhand verschiedener Fahrzeugtypen, Bachelorarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen – Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014
- [Zel12] Zeller, P. (Hrsg.): Handbuch Fahrzeugakustik – Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch, 2. überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2012

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel ZuSE – Zuverlässigkeit und Sicherheit von Elektrofahrzeugen		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr.-Ing. H.-C. Reuss Dipl.-Ing. Jürgen Pitz Dipl.-Ing. Thomas Rothermel Dipl.-Ing. Martin Kehrer Dipl.-Ing. Christian Holzapfel Dipl.-Ing. Marcos Manuel Sanchez	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2016	
	6. Veröffentlichungsdatum	
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Stuttgart - Fakultät 7 Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik (Maschinenbau) - Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Institut für Straßen- und Verkehrswesen	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 16N12548K	
	11. Seitenzahl 78	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMBF	13. Literaturangaben 42	
	14. Tabellen 2	
	15. Abbildungen 68	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Die Aufgabe des Projektes ZuSE war die interaktive Simulation sicherheitsrelevanter Systeme für Elektrofahrzeuge, insbesondere die Untersuchung der Beherrschbarkeit von Gefahrensituationen durch den Fahrer und die Untersuchung von kollisionsvermeidenden Assistenzsystemen im urbanen Raum mit besonderer Berücksichtigung der Gefährdung von Fußgängern, Radfahrern und Kindern. Dazu wurde das Projekt in die drei Schritte Analyse, Synthese und Validation eingeteilt. Im ersten Schritt wurden in einer Realfahrtenstudie grundlegende Daten erhoben. Dabei wurden sowohl Messungen am Fahrzeug als auch Daten bezüglich des Fahrers und dessen Verhaltens ermittelt. Um ein Elektrofahrzeug und sicherheitsrelevante Assistenzfunktionen virtuell untersuchen zu können, muss neben der Simulation des Systems oder des Fahrzeugs selbst auch dem Fahrer eine entsprechende Rückmeldung über das Fahrzeugverhalten vermittelt werden. Dazu wurde der Fahrsimulator der Universität Stuttgart um relevante Wiedergabesysteme erweitert. Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Probandenstudien im Fahrsimulator durchgeführt, um die Funktionalität, Akzeptanz sowie die Interaktion des Systems mit dem Fahrer zu untersuchen. Dabei konnte die Kritikalität von Fehlern im Antriebsstrang klassifiziert werden. Weiterhin wurde der Aspekt der Akzeptanz von Systemen durch den Fahrer untersucht und das Gewicht dieses Faktors bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen zum Fußgängerschutz evaluiert. Mit dem Abschluss des Projektes steht ein Verbund aus Prüfstand und Simulationsumgebung zur Verfügung, der es ermöglicht interaktiv ein virtuelles Elektrofahrzeug zu steuern sowie mit dessen Systemen zu interagieren. Darüber hinaus wurde ein Prozess implementiert, um die Entwicklung von sicherheitskritischen Assistenzfunktionen von Realfahrtenuntersuchungen bis hin zum Prototyp im Fahrsimulator zu unterstützen.		
19. Schlagwörter Fahrsimulator, Interaktive Assistenzsysteme, Virtuelle Realität, Simulation von Elektrofahrzeugen, Sicherheit im Antriebsstrang		
20. Verlag	21. Preis	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 428229-16

Institut für Verbrennungs-
motoren u. Kraftfahrwesen
 Universität Stuttgart
 Pfaffenwaldring 12
 70569 Stuttgart



Document control sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title ZuSE - Reliability and safety of electric vehicles		
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr.-Ing. H.-C. Reuss Dipl.-Ing. Jürgen Pitz Dipl.-Ing. Thomas Rothermel Dipl.-Ing. Martin Kehrer Dipl.-Ing. Christian Holzapfel Dipl.-Ing. Marcos Manuel Sanchez	5. end of project 30.06.2016	
	6. publication date	
	7. form of publication Document Control Sheet	
8. performing organization(s) name, address Universität Stuttgart - Fakultät 7 Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik (Maschinenbau) - Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Institut für Straßen- und Verkehrswesen	9. originators report no.	
	10. reference no. 16N12548K	
	11. no. of pages 78	
12. sponsoring agency (name, address) BMBF	13. no. of references 42	
	14. no. of tables 2	
	15. no. of figures 68	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract Interactive simulation of safety-relevant systems for electric vehicles was the major task in the project ZuSE. Especially the investigation of controllability of the vehicle by the driver in dangerous situations and investigation of collision avoiding assistance systems for electric vehicles in an urban area with pedestrians, cyclists and children were focused. The project was divided into the three steps analyses, synthesis and validation. In the first step fundamental data was collected in an on-road study. Therefore information of the vehicle was measured and driver's behavior was considered. To investigate safety-relevant driver assistance systems, the system and vehicle itself have to be modeled and the driver needs information about the vehicle behavior. In order to realize the representation of an electric vehicle, the driving simulator of University of Stuttgart was expanded with systems to simulate acoustic and haptic feedback. Within the project several studies with normal drivers were performed in the driving simulator to examine the functionality of the driver assistance system as well as the acceptance by the driver and interaction with the driver. The criticality of errors in the drive train was classified. The acceptance of the assistance system by the driver is an important factor for the use of an assistance system. The weight of this factor for the benefit of a collision avoidance system was estimated within this project. After project completion a cluster of test bench and simulation environment is available which enables the driver to pilot the virtual electric vehicle and to interact with systems of the vehicle. This cluster is accompanied by a development process which includes all steps between on road measurements and the implementation of a prototype in the virtual environment. The modified driving simulator is now used in several other projects and is available for the automotive sector to carry out studies with electric vehicles.		
19. keywords Driving Simulator, Interactive Assistance Systems, Virtual Reality, Simulation of Electric Vehicle, Security in the Drive Train		
20. publisher	21. price	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 428230-5

Institut für Verbrennungs-
motoren u. Kraftfahrwesen
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 12
70569 Stuttgart

