

# Konzept eines ganzheitlichen, hochflexibel konfigurierbaren HiL-Prüfsystems für den Test autonomer Fahrfunktionen

Xiaobo Liu-Henke<sup>1\*</sup>, Marian Göllner<sup>1</sup>, Sven Jacobitz<sup>1</sup>, Jie Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Mechatronik Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Salzdahlumer Str. 46/48, 38302 Wolfenbüttel, Deutschland; \*x.liu-henke@ostfalia.de

**Kurzfassung.** Autonomes Fahren und vernetzte cyber-physische Verkehrssysteme stellen immer größer werdende Herausforderungen an die Entwicklung und Absicherung erweiterter Fahrerassistenzsysteme und autonomer Fahrfunktionen. Insbesondere Echtzeitoptimierung und Test sind hierbei mit enormem Aufwand und Risiko verbunden. Ein ganzheitlicher, flexibel konfigurierbarer, echtzeitfähiger Prüfstand für das gesamte Fahrzeug würde hier Abhilfe schaffen. Der folgende Beitrag beschreibt das Konzept des ganzheitlichen, hochflexibel konfigurierbaren Echtzeit-Prüfsystems für intelligente Fahrzeuge in kooperierenden cyber-physischen Verkehrssystemen (ERAGON), welches gerade an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften aufgebaut wird.

## Einleitung

Die Mobilität befindet sich durch die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung von Fahrzeugen in einem disruptiven Wandel. Der autonome Fahrbetrieb von Elektro-Hybridfahrzeugen in hochvernetzten cyber-physischen Systemen (CPS) ist eine der Kerntechnologien im digitalen Transformationsprozess der Mobilität. Die Nutzungsvielfalt autonomer Fahrzeuge erfordert dabei immer vielfältigere Sensorik sowie immer komplexere und intelligentere Algorithmen aus den Bereichen der modernen Regelungstechnik und der Künstliche Intelligenz (KI). Daraus resultieren Systeme, die noch umfangreicher und komplexer sind als die bereits vorhandenen hochgradig vernetzten elektronischen Fahrzeugfunktionen [1].

Die Entwicklung solcher Systeme ist hoch komplex und erfordert fachübergreifende, interdisziplinäre Entwurfsprozesse wie die bewährte Rapid Control Prototyping (RCP-)Methodik aus der Mechatronik-Forschung. In einem Top-Down-Verfahren wird hierbei zunächst die Systemkomplexität durch Strukturierung unter Anwendung von Modularisierung und Hierarchisierung reduziert. Auf den oberen Hierarchieebenen des vernetzten mechatronischen Systems (VMS) sowie des autonomen mechatronischen Systems (AMS) sind hierbei zunehmend intelligente autonome Fahrfunktionen und Fahrerassistenzsysteme (engl. ADAS) wie das elektronische

Fahrzeugmanagement und eine intelligente, kooperative Zielführung verortet. Anschließend erfolgt in einem Bottom-Up-Prozess der modellbasierte Entwurf jedes einzelnen Teilsystems mit den Absicherungsprozessen Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL). Solch ein strukturiertes Vorgehen ist unabdingbar zur Auslegung und Absicherung vernetzter mechatronischer Systeme [2]. Um die integrierte Gesamtfunktionalität autonomer, vernetzter Fahrzeuge zu untersuchen ist daher ein Gesamtfahrzeugprüfstand, welcher das Gesamtsystem aus Fahrbahn, vernetzten Fahrzeugen und vernetzter Fahrumgebung genauestens abbildet und gleichzeitig die Sensorik des Fahrzeugs anregt unabdingbar.

Eine Auswertung des nachfolgenden Standes des Wissens und Forschung ergibt, dass zwar sehr viele Teillösungen zur zuverlässigen Absicherung für ADAS, hochautomatisierte und autonome Fahrfunktionen auf AMS- und VMS-Ebene existieren und diese auch kontinuierlich weiterentwickelt werden. Was allerdings fehlt, ist ein ganzheitliches Prüfsystem, welches eine flexible Konfiguration sowohl des Prüflings als auch der Prüfumgebung unter realistischen und reproduzierbaren Bedingungen auf allen Ebenen der mechatronischen Strukturierung ermöglicht.

Im vorliegenden Beitrag wird daher das Konzept des ganzheitliche, hochflexibel konfigurierbare Echtzeit-Prüfsystems für intelligente Fahrzeuge in kooperierenden cyber-physischen Verkehrssystemen (ERAGON) vorgestellt. Dieses befindet sich aktuell an der Ostfalia Hochschule im Aufbau.

## 1 Stand des Wissens

Nach [3] ist die valide Funktionsabsicherung eine große Herausforderung auf dem Weg zum autonomen Fahren. Es muss gewährleistet werden, dass die ausgelegten Funktionen im Gesamtsystem nachweislich in Hinblick

auf Ausgangsgüte und Missinterpretationswahrscheinlichkeit sicher sind [4]. Es ist notwendig möglichst viele Situationen, mit denen das Fahrzeug konfrontiert werden könnte, reproduzierbar zu testen. Möchte man diese Aufgabe unter Realbedingungen im Straßenverkehr vollziehen, so werden hunderte Millionen Testkilometer notwendig [5]. Es ist also sinnvoll, den Test unter Realbedingungen mit simulationsgestützten Verfahren zu ergänzen, sodass bestimmte, seltene Situationen trotzdem gefahrlos und reproduzierbar getestet werden können. Dazu ist ein komplexes echtzeitfähiges Prüfsystem notwendig, welches durch eine Mischform aus realen und simulativen System und Umgebungskomponenten möglichst realistische Prüfbedingungen erzeugt.

Zu diesem Zweck setzen Chen et. al. [6] eine integrierte Simulations- und Testplattform für selbstfahrende Fahrzeuge ein. Deren Plattform bietet die Möglichkeit ein reales Fahrzeug auf einem abgesperrten Testgelände zu testen. Die Besonderheit an deren Ansatz ist, dass die Sensorsignale (GPS, IMU, Lidar und Kamera) aus einem hochgenauen virtuellen Simulationsszenario stammen und von einem realen Steuergerät im Fahrzeug zu realen Fahrbefehlen verarbeitet werden. Im Testverlauf wird die Sensorik also vollständig virtuell abgebildet, wodurch ungewollte Aggregationseffekte auftreten können, obwohl ein reales Fahrzeug vorhanden ist [7]. Die entwickelten Fahrfunktionen lassen sich vorab auch ohne die realen Komponenten in der Simulationsumgebung in Offline- und Online-Simulationen testen. Die in Chen et. al. vorgestellte Plattform ist hardwareseitig nicht flexibel gestaltet. Sie ist an ein spezifisches Forschungsfahrzeug mit einem prototypischen Steuergerät mit festen Schnittstellen gebunden. Somit lassen sich mit diesem Aufbau weder unterlagerte noch auf V2X-Kommunikation basierende Funktionen absichern. Aufgrund der Hardware-Architektur ist die Plattform ebenso wenig dazu geeignet KI-Algorithmen zu berücksichtigen.

Die Vehicle-in-the-Loop Methodik zur Bewertung automatisierter Fahrfunktionen im virtuellen Verkehr aus Solmaz [8] beruht auf einem ganz ähnlichen Aufbau wie Chen. Auch hier wird ein reales Fahrzeug auf einem abgesperrten Testgelände in einer simulierten Umgebung eingesetzt. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch in der Ausführung des Steuergeräts für die Fahrfunktionen. Im Gegensatz zu dem Steuergerät aus Chen, lässt die MicroAutoBox II aus Solmaz eine flexible Modifikation des Systems unter Test durch RCP zu. Dies ist jedoch auf die AMS-Ebene beschränkt. So sind verschiedene Al-

gorithmen, auch aus dem Bereich der KI, implementierbar sowie theoretisch auch zusätzliche Signale z. B. aus der V2X-Kommunikation integrierbar. Das Prüfsystem selbst ist jedoch weder flexibel konfigurierbar noch frei von Aggregationseffekten. Die Reproduzierbarkeit der Testszenarien ist bei Prüfsystemen auf realen Teststrecken stets fragwürdig, da sich trotz simulierter Sensorsignale beispielsweise das Reifenverhalten witterungs- und temperaturabhängig ändert.

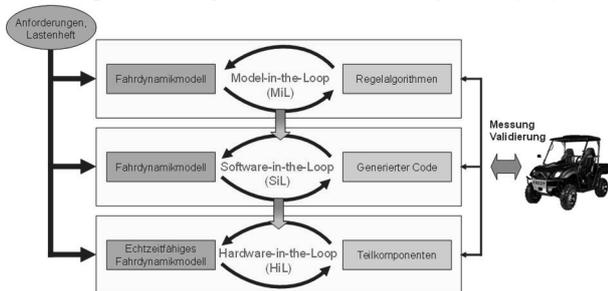
In Kanchwala [9] wird ein Echtzeit HiL-Fahrzeugsimulator vorgestellt, der ein reales Fahrzeug in einen stationären Versuchsaufbau einspannt. Hier werden Fahrwiderstände über vier Elektromotoren simuliert, die direkt mit den Rädern gekoppelt werden. Die zugehörigen Soll-Drehmomente werden von einem Simulationsrechner bestimmt, auf dem eine Simulation des Testszenarios erfolgt. Der Fokus dieses Systems liegt jedoch auf einer Untersuchung der längsdynamischen Fahreigenschaften, z.B. in virtuellen Offroad-Umgebungen. Untersuchungen des Lenkverhaltens oder Berücksichtigung von Sensor und Kommunikationssystemen sind nicht möglich. Die Flexibilität des Fahrzeugsimulators beschränkt sich auf den Test verschiedener Fahrzeuge. Eine flexible Konfiguration des Prüfaufbaus ist nicht vorgesehen.

Ying et al. [10] setzen zur Funktionsabsicherung autonomer Fahrzeuge eine Vehicle-in-the-Loop Simulations- und Testplattform ein. Der dazugehörige Gesamtfahrzeugprüfstand besitzt vier individuelle Anregungseinheiten, welche die Abbildung von drei Freiheitsgraden auf ein reales Fahrzeug ermöglicht. Die Sensoren des Fahrzeugs (Kamera, Lidar und Radar) werden mit Signalen stimuliert, die auf Basis virtueller Verkehrsszenarien generiert werden. Dadurch ermöglicht die Prüfumgebung reproduzierbare und vollständig kontrollierbare Testszenarien. Die Simulationsumgebung erlaubt die Einbindung von virtueller V2X-Kommunikation. Diese ist jedoch nicht in der Realität abgebildet. Somit ist keine vollständige Absicherung der Fahrfunktionen auf der VMS-Ebene möglich. Das zu prüfende Fahrzeug ist zudem nicht modifizierbar. Es ermöglicht zwar eine Absicherung verschiedener Fahrfunktionen in unterschiedlichen Prüfstands-Konfigurationen, jedoch kein Prototyping frei definierbarer Funktionen.

## 2 Methodik

Für die Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme wird die durchgängig modellbasierte, verifikations-

orientierte RCP-Methodik eingesetzt. Mittels der mechatronischen Strukturierung wird das vernetzte CPS durch Modularisierung und Hierarchisierung in hierarchisch angeordnete Teilsysteme mit vier Hierarchieebenen geteilt: mechatronische Funktionsmodule (MFM), mechatronische Funktionsgruppen (MFG), autonome mechatronische Systeme (AMS) und vernetzte mechatronische Systeme (VMS) [11]. Ergebnis der Strukturierung ist eine funktionale Zergliederung des Gesamtsystems in gekapselte Module. Die hierarchisch angeordneten Module mit ihren Teilfunktionen besitzen eindeutig definierte physikalische und informationstechnische Schnittstellen in horizontaler und vertikaler Richtung und bilden die Basis für die spätere Integration zum Gesamtsystem. [12].



**Abbildung 1:** Durchgängig modellgestützter Funktionsentwicklungs- und Absicherungsprozess.

Nach der hierarchischen Strukturierung und Definition aller Schnittstellen erfolgt in einem Bottom-Up-Prozess die modellbasierte und funktionsorientierte Auslegung jedes einzelnen Moduls. Beginnend mit der untersten und zugleich vitalsten Ebene MFM erfolgt auf allen Hierarchieebenen anschließend die Integration zu höherwertigen Funktionen. Der Entwurf sowie deren Integration zum Gesamtsystem (mechatronische Komposition) erfolgt unter Anwendung des modellbasierten mechatronischen Entwicklungskreislaufs. Es folgen Model-in-the-Loop-Simulationen (MiL), in welchen Regelalgorithmen und Künstliche Intelligenz auf Basis eines physikalischen bzw. mathematischen Ersatzmodells entwickelt und an einem Fahrzeugmodell erprobt werden. Aus den simulativ erprobten Algorithmen wird im Rahmen der Software-in-the-Loop-Simulation (SiL) mittels automatischer Codegenerierung ein ausführbarer Programmcode erzeugt und in einem Virtuellen Prüfstand offline getestet. Anschließend erfolgt die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiL), bei welcher ein um physische Teilkomponenten ergänztes echtzeitfähiges Fahrzeugmodell zur Funktionsabsicherung und -optimierung der Algorithmen und intelligenten

Funktionen unter realistischen Echtzeitbedingungen online verwendet wird [13]. Abbildung 1 illustriert den Prozess.

### 3 Konzeption des Prüfstands

Das Echtzeit-Prüfsystem für intelligente Fahrzeuge in kooperierenden cyber-physischen Verkehrssystemen „ERAGON“ besteht hauptsächlich aus vier Modulen: Prüfstandsmodul, Echtzeitinformationsverarbeitung, Software- und MMI-Kommunikationsmodul. Hierdurch ist das System flexibel konfigurierbar und für verschiedene Prüflinge einsetzbar. Abbildung 2 verdeutlicht das Zusammenspiel.

Alle unterlagerten Prüfsysteme sind über definierte Schnittstellen hierarchisch angeordnet. Somit ist das „ERAGON“ in der Lage für unterschiedliche Untersuchungszwecke in verschiedenen Varianten flexibel verwendet werden zu können.

#### 3.1 Prüfstandsmodul

Das Prüfstandsmodul besteht im Wesentlichen aus einer komplexen Anregungseinheit zur Simulation und Stimulation eines Prüflings durch das simulierte Umfeld. Eine umfangreiche Umgebungssimulation dient zur Erzeugung einer virtuellen 3D-Welt und zur Repräsentation der realen Objekte in der Umgebung des Fahrzeugs. Die Sensoren können auf unterschiedliche Weise mit den Daten aus der Simulation angeregt werden. Eine Möglichkeit ist Over-The-Air mittels physikalischen Anregungsgrößen die errechneten Hindernisse einzuprägen, z.B. bei Ultraschallsystemen mittels Ultraschallwellen über eine Schwingmembran. Ein weiterer Kanal zur Einspeisung von Umfeldsignalen ist eine zusätzliche V2X-Entwicklungsplattform für einfachen Zugang zur V2X-Kommunikation, sodass keine Implementierung der spezifischen Kommunikationsprotokolle und Softwareschichten erforderlich sind.

Mit o. g. Systemen wird eine umfangreiche Grundlage der Implementierung und Ankopplung einer umfassenden Verkehrssimulation gewährleistet. Das Kernmodul kann damit ein vollständiges Verkehrsszenario reproduzierbar und realitätsgetreu simulieren. Diese hohe Augmentation von Realität und Simulation ist für das Testen von höherwertigen autonomen und vernetzten Funktionen auf der Strukturebene AMS und VMS unablässig und macht einen umfassenden Test der Fahrfunktion in einer CPS-Verkehrsumgebung in den Strukturebenen AMS / VMS erst möglich.

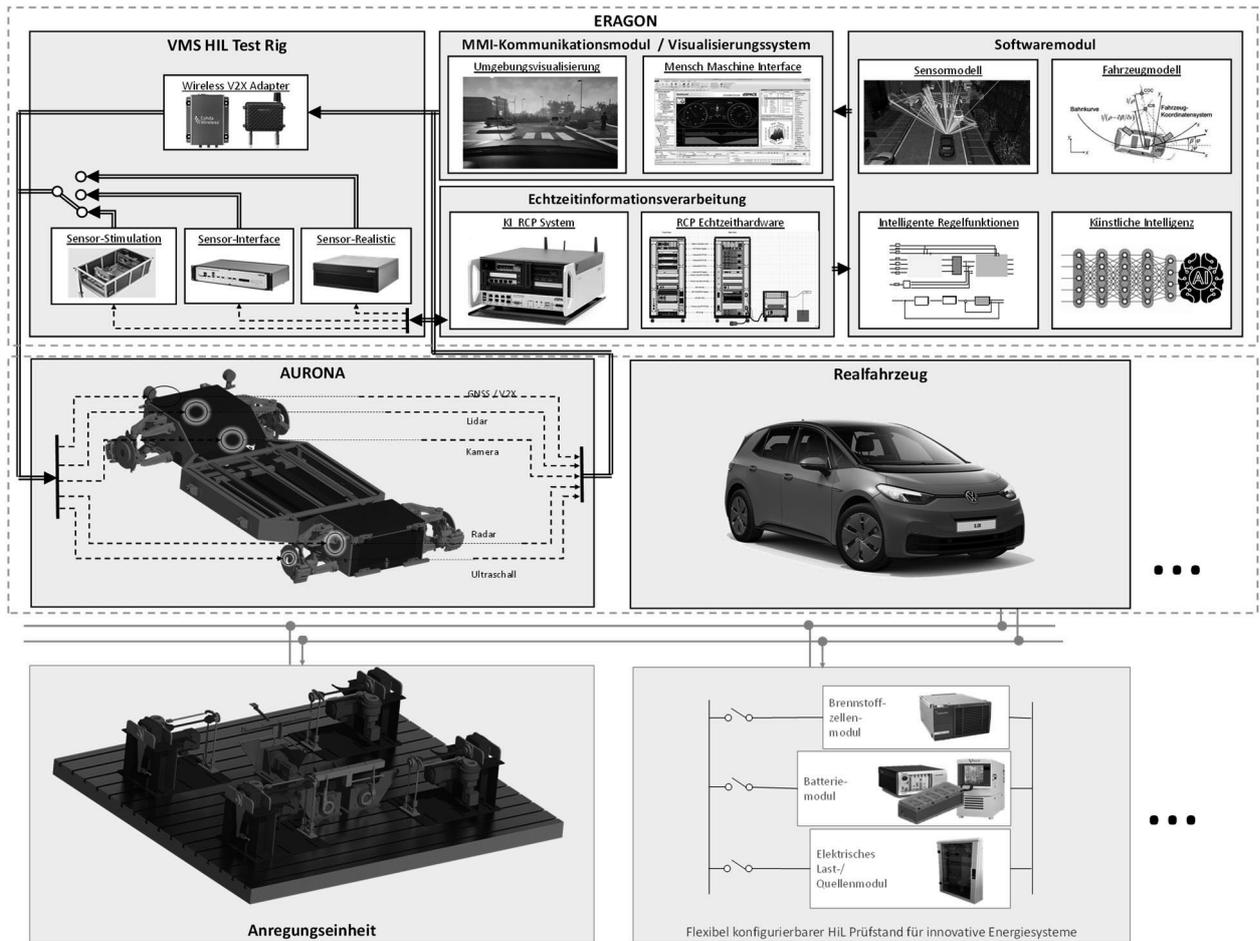


Abbildung 2: Konzept des ganzheitlichen Prüfsystems ERAGON.

### 3.2 Softwaremodul und MMI

Das Softwaremodul beinhaltet sämtliche zu testende Regelfunktionen und virtuellen Systeme wie die Sensor- und Fahrzeugmodelle. Zusätzlich erfolgt hier die Kalibrierung, Skalierung und Signalkonditionierung. Das Softwaremodul wird als verteilte Berechnung auf mehreren Prozessoren des Echtzeitinformationsverarbeitungsmoduls unter Echtzeitbedingungen digital berechnet und verarbeitet. Zur Applikation und Kommunikation dient das Kommunikationsmodul mit Mensch-Maschine-Interface, welches auch zur Visualisierung dient. Hierfür sind entsprechende Benutzeroberflächen (GUIs) vorgesehen. Über das RTI (Real-Time Interface) der Target-Hardware erfolgt die Ansteuerung bzw. Automatisierung des Prüfstands.

### 3.3 Echtzeitinformationsverarbeitung

Das Modul der Echtzeitinformationsverarbeitung mit seinen RCP-Systemen stellt die Informationsverarbeitung sicher. Das Modul ist mit RCP-Systemen einschließlich

KI-RCP-System zum schnellen Prototyping von intelligenten Regelfunktionen, zum maschinellen Lernen von Künstlicher Intelligenz mittels leistungsfähiger Prozessortechnologie für anspruchsvolle Echtzeit-anforderungen ausgerüstet und verfügt über ein schnelles Datenverarbeitungs- und Speichersystem zum Speichern und Verwalten großer Datenmengen.

### 3.4 Prüflinge und Versuchsfahrzeug

Der Prüfstand ist für einen flexiblen Einsatz konzipiert. Hierfür sind definierte Schnittstellen zu verschiedenen Prüflingen vorgesehen. Hier können beispielsweise reale Fahrzeuge, Funktionsträger oder spezielle Versuchsaufbauten wie ein Einspurmodell eingesetzt werden. Initial wird ein Autonomer rekonfigurierbarer Funktionsträger für nachhaltige Mobilität (AURONA) als Prüfling vorgesehen. Als ein RCP-Funktionsträger ist AURONA mit allen aktuellen für die hochautomatisierten bzw. autonomen Fahrfunktionen notwendigen Umfeldsensoren (Kamera, Radar, Ultraschall, Lidar, etc.) ausgestattet, deren Schnittstellen an verschiedenen Stellen geöffnet werden.

So können Hardwarebestandteile des sensorischen Systems über Bypassing umgangen werden. Die Schnittstellen sind so konfiguriert, dass eine flexibel konfigurierbare Anregung der Sensoren über den „ERAGON“ gewählt werden kann. Es ist sowohl möglich über die Sensorstimulation den physikalischen Sensoreingang anzuregen als auch direkt die Elektronik desselben Sensors mit Rohdaten zu bespielen.

Weiterhin ist AURONA mit einer 5G-basierten V2X Kommunikationseinheit ausgestattet über die es mit der V2X-Entwicklungsplattform des „ERAGON“ angeregt, aber auch mit anderen V2X-Einheiten bidirektional kommunizieren kann. Somit können auch kooperative Fahrfunktionen untersucht werden. Das „AURONA“ verfügt zudem über ein Antriebs- und Lenksystem, welches ein Testen des Einflusses der aktorischen Elemente eines autonomen Fahrzeugs ermöglicht. Es ist somit in der Lage Stellbefehle vollumfänglich realistisch umzusetzen. Diese werden über die Anregungseinheit des „ERAGON“ gegenaktuiert, wodurch sich ein realistisches und geschlossenes Fahrverhalten des „AURONA“ oder auch eines anderen Prüflings ergibt.

## 4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde das Konzept eines ganzheitlichen, hochflexibel konfigurierbaren HiL-Prüfsystems „ERAGON“ für den Test autonomer Fahrfunktionen vorgestellt. Dieses ist in einer Closed-Loop zusammen mit dem Funktionsträger „AURONA“ dazu in der Lage die gesamte Wirkkette eines autonomen Fahrzeugs ausgehend von der Infusion von Sensorrohdaten über das Entwickeln und Testen von KI-Funktionen bis zur Anregung von realistischen Fahrsituationen zu simulieren und zu stimulieren.

### Danksagung

Gefördert als Teil der Reaktion der EU auf die Covid-19-Pandemie. Die Finanzierung erfolgte aus REACT-EU Mitteln des EFRE unter dem Förderkennzeichen ZW 7-85195402. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.



Als Teil der Reaktion  
der EU auf die  
Covid-19-Pandemie  
finanziert



## Literatur

- [1] Liu-Henke, X.; Yarom, O.; Scherler, S.: *Virtual Development and Validation of a Function for an Automated Lateral Control using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*. 91st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, May 25 - 28, 2020
- [2] Liu-Henke, X.; Jacobitz, S.; Scherler, S.; Göllner, M.; Yarom, O.; Zhang, J.: *A Holistic Methodology for Model-Based Design of Mechatronic Systems in Digitized and Connected System Environments*. 16th International Conference on Software Technologies (ICSOFT), Online, July 6-8, 2021
- [3] Aeberhard, M.; et al., *Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany's Highways*, in IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 42-57, 2015.
- [4] Mitsch, S.; Ghorbal, K.; Platzer, A.: *On Provably Safe Obstacle Avoidance for Autonomous Robotic Ground Vehicles*. Robotics Science and Systems (RSS), 2013.
- [5] Wachenfeld, W.; Winner H.: *Die Freigabe des autonomen Fahrens*. Technische Universität Darmstadt. in M. Maurer et al. (Hrsg.), *Autonomes Fahren*, 2015, DOI 10.1007/978-3-662-45854-9\_28
- [6] Chen, S.; Chen, Y.; Zhang S.; Zheng, N.: *A Novel Integrated Simulation and Testing Platform for Self-Driving Cars with Hardware in the Loop*. in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 4, no. 3, pp. 425-436, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIV.2019.2919470
- [7] Jacobitz, S.; Göllner, M; Zhang, J; Yarom, O. A.; Liu-Henke, X.: *Seamless Validation of Cyber-Physical Systems Under Real-Time Conditions by Using a Cyber-Physical Laboratory Test Field*. IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE), Online, December 12-14, 2021.
- [8] Solmaz, S.; Rudigier, M.; Mischinger, M.: *A Vehicle-in-the-Loop Methodology for Evaluating Automated Driving Functions in Virtual Traffic*. 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2020, pp. 1465-1471, doi: 10.1109/IV47402.2020.9304811.
- [9] Kanchwala, H.; Dhillon, J. S.: *A real-time hardware-in-the-loop vehicle simulator*. 2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2020, pp. 182-187, DOI: 10.1109/INDIN45582.2020.9442138
- [10] Ying, G.; Zhao, X.; Xu, Z.; Cheng J.; Wang, W.: *An Indoor Vehicle-in-the-Loop Simulation Platform Testing Method for Autonomous Emergency Braking*. April 2021, Journal of Advanced Transportation 2021(3):1-12, DOI: 10.1155/2021/8872889
- [11] Liu-Henke, S.; Scherler, S.; Göllner, M.: *System Architecture of a full active Autonomous Electric Vehicle*. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, June 22 - 24, 2017
- [12] Liu-Henke, X.: *Mechatronische Entwicklung der aktiven*

*Feder-/Neigetechnik für das Schienenfahrzeug RailCab.*  
VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 589, VDI-Ver-  
lage. Düsseldorf, 2004

- [13] Jacobitz, S.; Liu-Henke, X.: *A Real-Time Interface for Xcos – Demonstrated on a Battery-management System.* 2nd Scilab Conference, Berlin, Germany, October 14, 2019.