

Glaubwürdigkeit von Software-in-the-Loop-Testsystemen: Potentiale und Herausforderungen

Anne Kieneke^{1,2}, Philipp Schenkel³, Tobias Pett², Jacob Langner³, Okan Ecin¹, Ina Schaefer²

¹Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

²FZI Forschungszentrum Informatik

³Karlsruher Institut für Technologie

anne.kieneke@porsche.de, schenkel@fzi.de, tobias.pett@kit.edu,
langner@fzi.de, okan.ecin@porsche.de, ina.schaefer@kit.edu

Abstract: Software-in-the-Loop (SiL)-Testen ist eine Methode zum Testen von Software in einer Simulationsumgebung. Im Gegensatz zu den verbreiteteren Hardware-in-the-Loop (HiL) Testsystemen bieten SiL-Testsysteme einige Vorteile, wie z.B. einen frühzeitigeren Einsatz im Entwicklungsprozess von Steuergeräten, geringere Kosten, die Möglichkeit des Debuggings und die Skalierbarkeit. Dies führt, besonders im Bereich der Verifikation und Validierung von automatisierten Fahrfunktionen, zu einem vermehrten Einsatz von dieser Methode der virtuellen Absicherung. Um SiL-Tests zur Homologation und Freigabe von verteilten Funktionen nutzen zu können, muss gezeigt werden, dass die SiL-Testergebnisse mit den Ergebnissen von Fahrzeugtests übereinstimmen und somit glaubwürdig sind. Bisherige Arbeiten bewerten die Testergebnisse von SiLs bestehend aus einem Funktionsblock bzw. einer Komponente als Testobjekt. Dabei werden Aufzeichnungen der Signale des SiLs mit denen eines HiLs oder eines realen Fahrzeugs verglichen. Diese Methoden können nicht auf Testsysteme, die aus einem Verbund aus virtuellen Steuergeräten und Simulationsmodellen bestehen, übertragen werden. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Problemstellung, wie die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen mit einem Verbund an V-ECUs analysiert werden kann, und die Erarbeitung einer Forschungsmethodik zur Lösung der Problemstellung.

1 Einleitung

Immer mehr Funktionen eines Autos werden durch Software, die auf einem Steuergeräten (engl. electronic control units) (ECU) ausgeführt wird, realisiert [Sax08]. Sowohl zur Sicherstellung der Qualität und Sicherheit der Software als auch als Anforderung für die Homologation des Fahrzeugs muss die Software der ECUs ausführlich getestet werden. Beim Testen in einem Prototypen-Fahrzeug lässt sich die Software in Kombination mit der Hardware, den Sensoren und Aktoren, sowie in realen Umgebungen testen. Da Testen im Fahrzeug zeitaufwendig und kostenintensiv ist, hat sich die Hardware-in-the-loop (HiL)-Technologie als Vorstufe zum Fahrzeugtest und Methode zum Testen

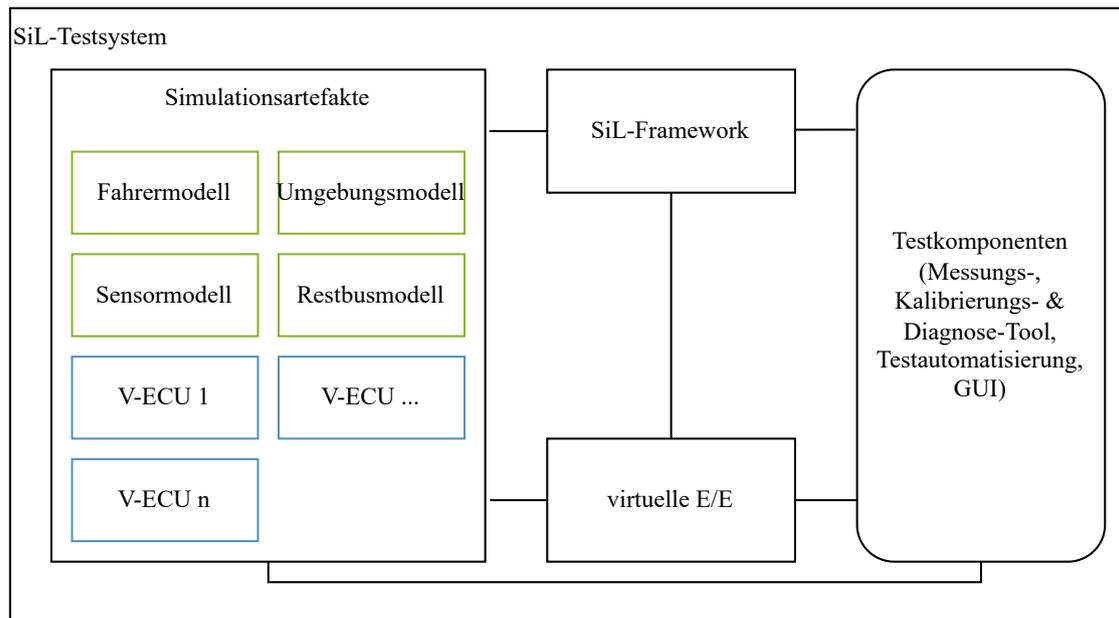


Figure 1: Architektur eines Software-in-the-loop (SiL)-Testsystem nach [VDA22]

von Steuergeräte-Software etabliert. Dabei werden die zu testenden ECUs mit einem Echtzeitrechner verbunden, auf dem verschiedene Simulationsmodelle, wie Fahrermodell, Umgebungsmodell oder Restbusmodell ausgeführt werden.

Eine Virtualisierung der HiL-Technologie ist die SiL-Technologie, bei der statt der realen ECU ein virtuelles Steuergerät (engl. virtual electronic control units) (V-ECU) verwendet wird. V-ECUs enthalten Software der realen Steuergeräte, je nach Level auf verschiedenen Abstraktionsebenen [iVi20]. Die Architektur eines SiL-Testsystems ist in Abbildung 1 dargestellt. Die V-ECUs und die verschiedenen Modelle werden im SiL-Framework ausgeführt. Die virtuelle E/E bildet das elektrische Boardnetz des Autos mit den Kommunikationsbussen und Versorgungsleitungen nach. Die Testkomponenten ermöglichen die automatisierte Bedienung des Testsystems von außen, sowie die Aufzeichnung der Messungen. Die Vorteile des SiL-Testens sind die Möglichkeit des frühzeitigen Einsatz im Entwicklungsprozess, die Hardwareunabhängigkeit, die daraus resultierenden geringeren Kosten und die einfache Skalierbarkeit.

Ein erstes Projekt versucht unter anderem SiL-Testsysteme zur Typgenehmigung zu nutzen¹. Damit dies möglich ist, muss gezeigt werden, dass die Testergebnisse eines SiL-Testsystem denen eines Tests im realen Fahrzeug entsprechen, d.h. dass das SiL-Testsystem bzw. die SiL-Testergebnisse glaubwürdig sind. Erste Arbeiten [SVGN24, RGA⁺19, OS23, JKL16, PS12, SFB⁺23, KPJ⁺18, RBB⁺20] untersuchen die Glaubwürdigkeit anhand von Expertenwissen oder Referenzsystemen basierend auf Signalverläufen für SiL-Testsysteme mit einer einstelligen Anzahl an Signalen und nur einer V-ECU. SiL-Testsysteme zur Freigabe von verteilten Funktionen bestehen jedoch aus allen an der Funktion beteiligten V-ECUs, einem sogenannten Verbund aus zwei bis 100 V-ECUs und einer Vielzahl an Signalen. Daher skalieren die Methoden zur Analyse von Glaubwürdigkeit nicht für SiL-Testsysteme zur Freigabe von verteilten Funktionen. Daher fehlt eine Methodik zur

¹Digital Loop: <https://www.digi-loop.com/>

Analyse der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen mit einer hohen Anzahl an Signalen bzw. der Testergebnisse von diesen über den gesamten Lebenszyklus, um SiL-Testsysteme für die Homologation oder die Freigabe von verteilten Funktionen nutzen zu können.

Um diese Herausforderung zu überwinden, muss (1) Glaubwürdigkeit für SiL-Testsysteme definiert, (2) eine Bewertungsmethode der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsysteme oder SiL-Testergebnissen erarbeitet und (3) ein Prozess zur Sicherstellung der Glaubwürdigkeit über den gesamten Lebenszyklus eines SiL-Testsystems ausgearbeitet werden. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Problemstellung, wie die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen mit einem Verbund an V-ECUs analysiert werden kann, und die Erarbeitung einer Forschungsmethodik zur Lösung der Problemstellung.

2 State of the Art

In diesem Abschnitt werden relevante Arbeiten zur Analyse der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen vorgestellt. Dazu betrachten wir (1) die Definition von Glaubwürdigkeit, (2) Methoden zur Analyse und Bewertung der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen und (3) Arbeiten zum Thema Glaubwürdigkeit über den Lebenszyklus von SiL-Testsystemen.

Definitionen von Glaubwürdigkeit. Der NASA Standard 7009b [NAS24] definiert Glaubwürdigkeit für Modelle und Simulation als Eigenschaft, Vertrauen in die Modell- und Simulationsergebnisse schaffen zu können. Dafür sind vor allem Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit der Simulation und der Simulationsergebnisse wichtig [HS21]. Liu et al. [FMZ05] definiert Glaubwürdigkeit als Vertrauen des Nutzers in das Modell oder die Simulation für den vorgesehenen Einsatz, wobei sich die Glaubwürdigkeit aus der Validität, der Korrektheit, der Verlässlichkeit, der Integrierbarkeit und der Benutzerfreundlichkeit zusammensetzt. Die bestehende Definition von Glaubwürdigkeit für Modelle und Simulation kann für SiL-Testsysteme nicht vollständig angewendet werden, da die Simulationsartefakte eines SiL-Testsystems gleichermaßen Modelle und V-ECUs sind [VDA22]. Anders als Modelle bilden V-ECUs ein Realsystem nicht nach, sondern enthalten die Software des realen Steuergeräts, je nach Level der V-ECUs in unterschiedlichen Ausprägungen [iVi20].

Analyse und Bewertung der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen. Wir identifizieren zwei wesentliche Ansätze für die Analyse und Bewertung der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen: (i) Analyse und Bewertung mit Hilfe von Expertenwissen [SVGN24, RGA⁺19, OS23, JKL16, PS12] und (ii) Bewertung anhand von Referenzsystemen [SFB⁺23, KPJ⁺18, OS23, PS12, RBB⁺20]

Bewertung mit Hilfe von Expertenwissen. In verschiedenen Arbeiten [SVGN24, RGA⁺19, OS23, JKL16, PS12] wird die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen mit Hilfe von Experten bewertet. Diese betrachten die Verläufe der einzelnen Signale oder bewerten die Reaktion des Testsystems auf ausgewählte Testszenarien. Für SiL-Testsysteme mit einem Verbund an V-ECUs zur Freigabe von verteilten Funktionen ist die Bewertung mit Hilfe von Expertenwissen nicht möglich, da die Anzahl der zu betrachtenden Testszenarien und die Komplexität der verteilten Funktionen zu groß ist.

Bewertung der Glaubwürdigkeit anhand von Referenzsystemen. Bei diesem Ansatz basiert die Bewertung auf einem Vergleich der Messdaten des SiL-Testsystems mit den Messdaten eines Referenzsystems. Als Referenzsystem dienen Versuchsfahrzeuge [SFB⁺23, KPJ⁺18], HiL-Testsysteme [OS23, PS12] oder Versuchsfahrzeuge und HiL-Testsysteme [RBB⁺20]. Dabei werden die Signale graphisch oder anhand von verschiedenen Metriken mit den Signalen des Referenzsystems verglichen. In diesen Arbeiten werden SiL-Systeme mit einer V-ECU und einer einstelligen Anzahl an Signalen betrachtet. Der manuelle Vergleich skaliert nicht für SiL-Testsysteme mit einem Verbund an V-ECUs aufgrund der hohen Anzahl an Signalen. Außerdem stehen nicht immer Referenzsysteme mit gleichem Softwarestand zur Verfügung, da die Lieferzeitpunkte der V-ECUs vor den Lieferzeitpunkten der entsprechenden ECUs liegen.

Glaubwürdigkeit über den Lebenszyklus von SiL-Testsystemen. Raghupatruni et al. [RKG⁺21] beschreibt eine Continuous-development, -integration, -testing und -deployment-Pipeline) (CX-Pipeline) für SiL-Testumgebungen aus Sicht eines ECU Lieferanten. Die CX-Pipeline beginnt mit der Änderung des Codes einer ECU. Darauf folgen Unit-Tests und Code-Reviews und anschließend die Generierung der V-ECU. Nach der Integration der neuen V-ECU in das SiL-Testsystem werden Smoke-Tests und eine Qualifizierung in Form eines Vergleichs mit einem Referenzsystems durchgeführt. Nach erfolgreicher Qualifizierung und somit Sicherstellung der Glaubwürdigkeit der V-ECU kann die V-ECU zum Testen verwendet werden. Wenn jede V-ECU und jedes Modell solch eine CX-Pipeline durchlaufen kann die Glaubwürdigkeit eines SiL-Testsystems über Updates von einzelnen V-ECUs und Modellen oder auch des gesamten Verbunds an V-ECUs im Verbund-Release sichergestellt werden. Für den Einsatz der CX-Pipeline bei einem Automobilhersteller muss diese angepasst werden, da die Hersteller die V-ECU oft als Black-Box erhalten und dadurch Unit-Tests und Code-Reviews nicht möglich sind.

3 Problem Statement

SiL-Testsysteme bilden die Realität durch den Einsatz von Modellen nach. Da Modelle stets eine Abstraktion der Realität darstellen [DGK07], entsteht eine Differenz in der Glaubwürdigkeit zwischen dem realen Fahrzeug und dem SiL-Testsystem, siehe Abbildung 2. Für den breiten Einsatz von SiL-Testsystemen ist eine sorgfältige Prüfung der Glaubwürdigkeit der mit den SiL-Testsystemen erzeugten Testergebnisse notwendig [RBB⁺20]. Als Ergebnis dieser Prüfung werden belastbare, quantitative Aussagen über die Glaubwürdigkeit des SiL-Testsystems oder der SiL-Testergebnisse bzw. quantitative Aussagen über die Abweichung vom Fahrzeugtest benötigt. Um diese Herausforderung zu überwinden und Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen sicherzustellen, wird (1) eine einheitliche Definition der Glaubwürdigkeit für SiL-Testsysteme, (2) eine Methode zur Bewertung von SiL-Testsystemen oder SiL-Testergebnissen mit quantitativen Aussagen über die Glaubwürdigkeit und (3) ein Prozess zur Sicherstellung der Glaubwürdigkeit über den gesamten Lebenszyklus eines SiL-Testsystems benötigt.

Die bestehenden Definitionen von Glaubwürdigkeit für Modelle und Simulationen [NAS24, HS21, FMZ05] kann auf SiL-Testsysteme nicht angewandt werden, da die im SiL-

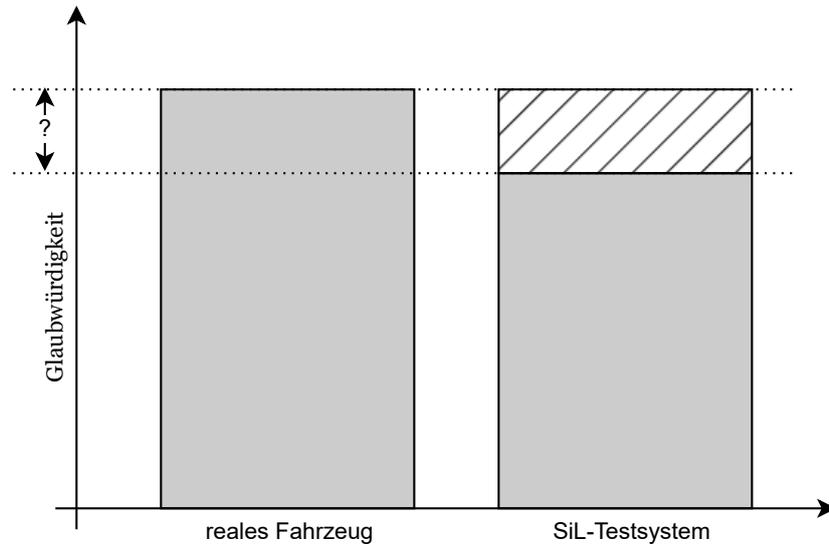


Figure 2: Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen

Testsystem enthaltenen V-ECUs keine Modelle sind. Daher fehlt eine Definition für Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen. Die verschiedenen Methoden zur Bewertung der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen [SVGN24, RGA⁺19, OS23, JKL16, PS12, SFB⁺23, KPJ⁺18, RBB⁺20] skalieren nicht für SiL-Testsystemen mit mehreren V-ECUs aufgrund der hohen Anzahl an Signalen, sodass eine Bewertungsmethode für SiL-Testsystemen mit einem Verbund an V-ECUs fehlt. Außerdem ist kein Prozess vorhanden, der die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen über deren gesamten Lebenszyklus betrachtet, von der die Erstellung des Testsystem über das Update von einzelnen V-ECUs und Modellen und das Update des gesamten Verbunds an V-ECUs im Verbund-Release. Um diese Herausforderungen zu lösen, wird die folgende zentrale Forschungsfrage (**MRQ**) aufgestellt:

MRQ: Wie kann die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen analysiert werden?

4 Forschungsmethodik

Zur Beantwortung der oben aufgestellten zentrale Forschungsfrage leiten wir drei Teilforschungsfragen (**RQ1-RQ3**) ab und beschreiben die Forschungsmethodik, um die drei Teilforschungsfragen zu bearbeiten:

RQ1: Was bedeutet Glaubwürdigkeit für SiL-Testsysteme?

Um die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen sicherzustellen zu können, muss zuerst Glaubwürdigkeit spezifisch für SiL-Testsysteme definiert werden. Teil der Definition sollen quantifizierbare Kriterien eines glaubwürdiges SiL-Testsystem sein. Dazu wird mit einer Literaturstudie in Form einer systematischen Literaturrecherche (SLR) nach der Leitlinie von Kitchenham [Kit04] der Stand der Technik ermittelt. Die Ergebnisse der Literaturstudie werden im Anschluss kategorisiert und darauf aufbauend eine Definition der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen erarbeitet.

RQ2: Wie kann die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen bewertet werden?

Anhand der Definition der Glaubwürdigkeit kann im nächsten Schritt eine Bewertungsmethode für die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen erarbeitet werden. Die Bewertungsmethode soll als Ergebnis quantitative Aussagen über die Glaubwürdigkeit eines SiL-Testsystem oder der SiL-Testergebnisse liefern. Grundlage der quantitativen Bewertung der Glaubwürdigkeit bildet eine Metrik basierend auf den Kriterien der ersten Teilforschungsfrage (**RQ1**). Teile der Bewertungsmethode müssen ohne Referenzsysteme anwendbar sein, da in frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung Prototypen-Fahrzeuge und HiL-Testsysteme als Referenz nicht zur Verfügung stehen. Basierend auf den Ergebnissen der Teilforschungsfrage (**RQ1**) wird eine quantitativen Bewertungsmethode Metrik erarbeitet. Diese wird an verschiedenen SiL-Testsystemen mit einem Verbund an V-ECUs empirisch evaluiert.

RQ3: Wie kann die Glaubwürdigkeit über den Lebenszyklus der SiL-Testsysteme sichergestellt werden?

Es wird ein Prozess erarbeitet, mit dem die Glaubwürdigkeit eines SiL-Testsystems über den gesamten Lebenszyklus sichergestellt werden kann. Teil dieses Prozesses ist eine ausführliche Bewertung der Glaubwürdigkeit des SiL-Testsystems mit den Ergebnissen der zweiten Teilforschungsfrage (**RQ2**) nach dem Aufbau des Testsystems, vor der ersten Verwendung. Außerdem enthält der Prozess erneute Bewertungen der Glaubwürdigkeit über den gesamten Lebenszyklus des Testsystems nach Änderungen in den Modellen oder bei Lieferungen von neuen V-ECUs. Dieser Prozess wird begleitend zu dem Aufbau eines SiL-Testsystem mit einem Verbund an V-ECUs erarbeitet und empirisch an verschiedenen SiL-Testsystemen evaluiert.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Problemstellung, wie die Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen mit einem Verbund an V-ECUs analysiert werden kann, untersucht und eine Forschungsmethodik zur Lösung der Problemstellung erarbeitet, damit SiL-Testsysteme zur Homologation oder Freigabe von verteilten Funktionen genutzt werden können. Dafür muss über den gesamten Lebenszyklus des Testsystems sichergestellt werden, dass das SiL-Testsysteme bzw. die SiL-Testergebnisse glaubwürdig sind. Es muss (1) eine einheitliche Definition der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen, (2) eine Methode zur Bewertung der Glaubwürdigkeit von SiL-Testsystemen mit einem Verbund an V-ECUs und (3) ein Prozess zur kontinuierlichen Überwachung der Glaubwürdigkeit über den gesamten Lebenszyklus eines SiL-Testsystems vorhanden sein. Aus den drei identifizierten Anforderungen wurden drei Teilforschungsfragen (**RQ1-RQ3**) für die Zukunft abgeleitet und die Forschungsmethodik beschrieben.

References

- [DGK07] Stephanie Demers, Praveen Gopalakrishnan, and Latha Kant. A Generic Solution to Software-in-the-Loop. In *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, pages 1–6, Orlando, FL, USA, October 2007. IEEE.
- [FMZ05] Fei Liu, Ming Yang, and Zicai Wang. Study on Simulation Credibility Metrics. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005.*, pages 2554–2560, Orlando, FL, USA, 2005. IEEE.
- [HS21] Hans-Martin Heinkel and Kim Steinkirchner. Credible Simulation Process, August 2021.
- [iVi20] ProSTEP iVip. Virtual Electronic Control Units: Smart Systems Engineering Requirements for the Standardization of Virtual Electronic Control Units (V-ECUs). Darmstadt, 2020.
- [JKL16] Sooyong Jeong, Yongsub Kwak, and Woo Jin Lee. Software-in-the-Loop simulation for early-stage testing of AUTOSAR software component. In *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 59–63, 2016.
- [Kit04] Barbara Kitchenham. Procedures for Performing Systematic Reviews. *Keele, UK, Keele Univ.*, 33, August 2004.
- [KPJ⁺18] Soon Kwon, Jaehyeong Park, Heechul Jung, Jihun Jung, Min-Kook Choi, Iman R. Tayibnapis, Jin-Hee Lee, Woong-Jae Won, Sung-Hoon Youn, Kwang-Hoe Kim, and Tae Hun Kim. Framework for Evaluating Vision-based Autonomous Steering Control Model. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1310–1316, 2018.
- [NAS24] Standard for Models and Simulations, 2024.
- [OS23] Parth Pankajbhai Oza and Dhaval Shah. Model-Based Software Development for Predictive Battery Temperature Estimation. In *2023 3rd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*, pages 1–7, 2023.
- [PS12] Em Poh Ping and Sim Kok Swee. Simulation and experiment of automatic steering control for lane keeping manoeuvre. In *2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012)*, volume 1, pages 105–110, 2012.
- [RBB⁺20] Indrasen Raghupatruni, S. Burton, M. Boumans, T. Huber, and A. Reiter. Credibility of software-in-the-loop environments for integrated vehicle function validation. In Michael Bargende, Hans-Christian Reuss, and Andreas Wagner, editors, *20. Internationales Stuttgarter Symposium*, pages 299–313. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020. Series Title: Proceedings.
- [RGA⁺19] Indrasen Raghupatruni, Thomas Goeppel, Muhammed Atak, Julien Bou, and Thomas Huber. Empirical Testing of Automotive Cyber-Physical Systems with Credible Software-in-the-Loop Environments. In *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pages 1–6, 2019.

- [RKG⁺21] Raghupatruni, Indrasen, Karjee, Sambuddha, Gupta, Anupam, Naik, Venkatesh, and Huber, Thomas. Towards Establishing Continuous-X Pipeline Using Modular Software-in-the-Loop Test Environments. In *Symposium on International Automotive Technology*. SAE International, September 2021. ISSN: 0148-7191.
- [Sax08] Eric Sax, editor. *Automatisiertes Testen eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie*. Hanser, München Wien, 2008.
- [SFB⁺23] L. Scialacqua, L.J. Foged, P. Berlt, B. Altinel, C. Bornkessel, M. A. Hein, R. Hoppe, T. Hager, and J. Soler Castany. Combination of Measurement and Simulation for Fast Virtual Drive Testing. In *2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI)*, pages 25–26, 2023.
- [SVGN24] Sajnani, Abhishek, Vernekar, Kiran, Gosavi, Rupesh, and Naik, Venkatesh. Electric Powertrain - Standardization of Adaptable Software in Loop System. In *Symposium on International Automotive Technology*. SAE International, January 2024. ISSN: 0148-7191.
- [VDA22] Software-in-the-Loop (SiL) Standardisierung, 2022.