

Vehicle-in-the-Loop am Prüfstand zur Validierung von ADAS/AD

Sehr wahrscheinlich werden virtuelle Testmethoden zentraler Bestandteil des Freigabeprozesses von ADAS- und AD-Funktionen. AVL und Cariad vergleichen das Potenzial einer Vehicle-in-the-Loop-Lösung für eine Adaptive-Cruise-Assist-Funktion mit Versuchsergebnissen aus der realen Welt. Die Funktion wurde in Serie mit geringstmöglichem Eingriff in interne Schnittstellen untersucht.

Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung von Advanced Driver Assistant Systems (ADAS) oder Automated Driving (AD) ist die freigaberelevante Systemvalidierung [1, 2]. Neben der Identifikation und Erarbeitung kritischer beziehungsweise relevanter Szenarien erfordert deren Ausführung neue und effizientere Methoden als die herkömmlichen Tests auf der Straße

oder auf dem Testgelände. Insbesondere sicherheitskritische oder komplexe Szenarien mit vielen Akteuren sind nur schwer oder gar nicht auf der Straße oder dem Testgelände durchzuführen. Der Testaufwand ist dort in den meisten Fällen sehr hoch und die Reproduzierbarkeit kaum gegeben. Ziel muss es daher sein, effizientere Methoden zu entwickeln.

Virtuelle Testmethoden werden aktuell intensiv diskutiert, unter anderem auch in der in Arbeit befindlichen UNECE R157 [3]. Während früher virtuelle Methoden eingesetzt wurden, um effizienter entwickeln zu können, werden diese im Bereich ADAS/AD sehr wahrscheinlich zentraler Bestandteil des Freigabeprozesses sein. Virtuelle Testmethoden kommen in unterschiedlichen Ausprägungen zum Einsatz:

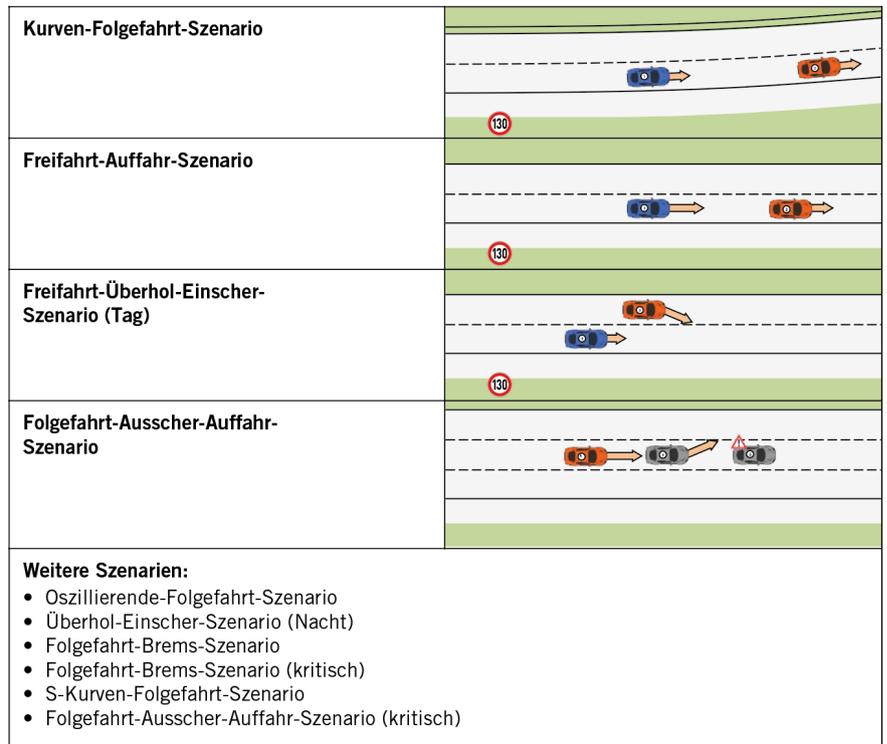


BILD 1 Auszug und Übersicht über die Szenarien (© Cariad)

beginnend bei Model-in-the-Loop (MiL) über Software-in-the-Loop (SiL), Hardware-in-the-Loop (HiL), Driver(Human)-in-the-Loop (DiL) bis hin zu Vehicle-in-the-Loop (ViL). Jede Ausprägung hat ihre Vor- und Nachteile. Während MiL und SiL sehr früh im Entwicklungsprozess zum Einsatz kommen können und je nach Anwendungsfall schneller als Echtzeit ausgeführt werden können, haben sie den Nachteil,

dass ein hoher Aufwand für die Modell- und Werkzeugkettenvalidierung entsteht. HiL-Systeme integrieren bereits Hardwarekomponenten wie Steuergeräte oder Sensoren, wobei der Modellbildungsaufwand reduziert wird. Ein großer Nachteil von HiL-Systemen ist jedoch der Wartungs- und Änderungsaufwand. Während DiL-Lösungen vorwiegend zum Einsatz kommen, um die Interaktion des Fahrzeuges mit dem Menschen zu evaluieren, bieten ViL-Systeme die Möglichkeit, das integrierte Gesamtfahrzeug in einer virtuellen Umgebung zu testen.

ViL kann dabei auf dem Testgelände oder am Prüfstand umgesetzt werden. Auf dem Testgelände wird das reale Fahrzeug etwa auf einer Freifläche betrieben und ein Abbild in die virtuelle Umgebung projiziert. Der Fahrer oder Passagier kann die reale Fahrzeugreaktion wie üblich bewerten, da er dabei die realen Beschleunigungen erfährt. Nachteil ist, dass es bei diesem Ansatz nicht möglich ist, das Feedback realer Sensorik mit zu betrachten (bis auf wenige Ausnahmen, wie zum Beispiel Ultraschallsensoren).

ViL am Prüfstand hingegen, wo das Fahrzeug ortsfest ist und beispielsweise Sensorstimulation einfach appliziert werden kann, ermöglicht es das Gesamt-

system inklusive Sensorik zu testen. Ein weiterer großer Vorteil ist die Reproduzierbarkeit und Unabhängigkeit von Wetterbedingungen. Szenarienkataloge können voll automatisiert sowie unter Laborbedingungen ausgeführt und bewertet werden.

VEHICLE-IN-THE-LOOP AM PRÜFSTAND

Gemeinsam mit AVL hat Cariad in einem Projekt die ViL-Lösung AVL Drivingcube eingesetzt. Ziel war es, das Potenzial der Lösung sowie die Vergleichbarkeit mit Versuchen in der realen Welt zu analysieren und zu bewerten. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand die Adaptive-Cruise-Assist(ACA)-Funktion eines Audi A8. Besonderer Schwerpunkt lag darauf, eine Funktion in Serie zu untersuchen und dabei in so wenig interne Schnittstellen wie möglich einzugreifen. Dabei war eine Anforderung, nicht nur die im Fahrzeug integrierte Fahrfunktion in Wechselwirkung mit der Fahrdynamik zu testen, sondern auch die komplette Wirkkette zur Umfelderkennung mit realen Sensoren. Basis für die Evaluierung war ein Szenarienkatalog mit zehn Autobahnszenarien, **BILD 1**,

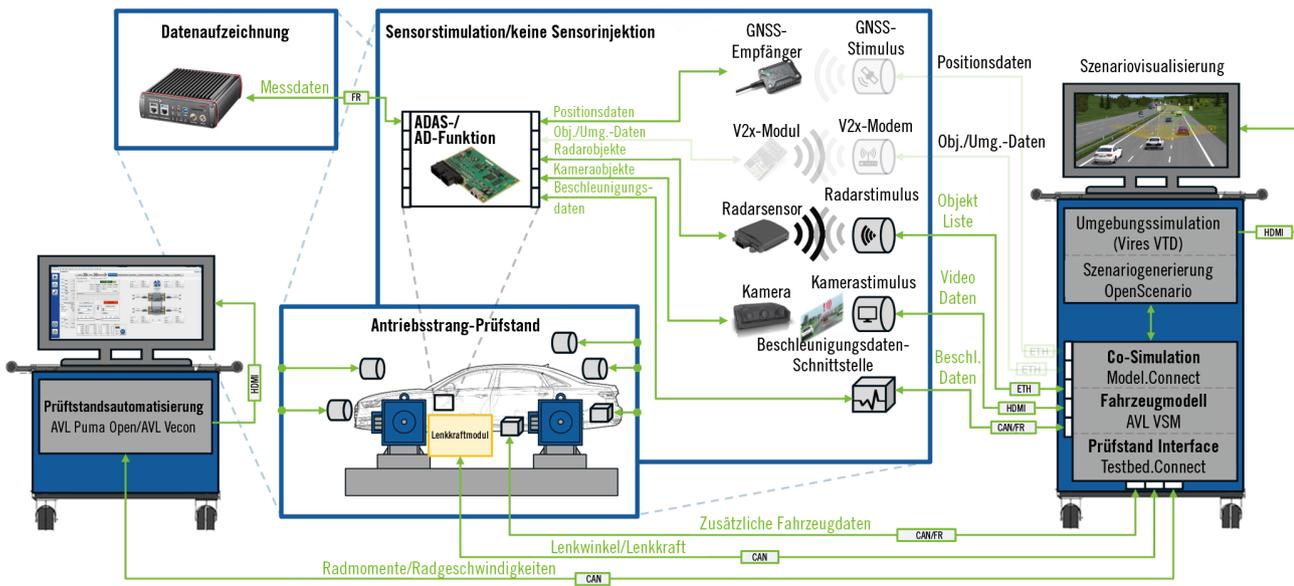


BILD 2 Systemarchitektur am Prüfstand (© AVL)

in denen auch NCAP AEB-Inhalt integriert wurde.

Umgesetzt wurde die ViL-Lösung an einem Antriebsstrangprüfstand mit hochdynamischen E-Maschinen für Gesamtfahrzeuge. Der Prüfstand ermöglicht durch die kurze Anbindung der Belastungsmaschinen an das Fahrzeug auch Fahrmanöver im dynamischen Grenzbereich inklusive der Abbildung von realistischem Reifenschlupf.

Fast alle neuen ADAS- und AD-Funktionen führen aktive Lenkeingriffe durch. Deswegen ist es essenziell, dass auch die Querdynamik sowie Lenken berücksichtigt werden. Da realistisches Lenkkräft-Feedback von der Straße eine wichtige Einflussgröße auf die Fahrfunktion ist, kam eine Lösung zum Einsatz, die es trotz des am Prüfstand blockierten Lenkeinschlags ermöglicht, das reale Lenksystem im Fahrzeug zu verwenden [4]. Der sogenannte Dynamic Steering Force Emulator wird am Fahrzeugunterboden montiert und aktuiert die bei der Kurvenfahrt auftretenden Lenkkräfte direkt an der Zahnstange der Lenkung. Es können Lenkkräfte bis 5 kN und eine Lenkgeschwindigkeit von 250 mm/s abgebildet werden. Damit lassen sich die meisten Fahrscenarien ohne Einschränkungen darstellen. Es wird gewährleistet, dass nicht nur eine Lenkbewegung erlaubt wird, sondern auch dass die Lenkung im Fahrzeug die gleichen Reaktionskräfte erfährt wie im Fahrversuch.

Durch die Kopplung des Prüfstands und des Lenkmoduls mit der dynamischen Fahrzeugsimulation AVL VSM können Fahrwiderstände und Reaktionskräfte für Längs- und Querdynamik präzise abgebildet werden. Insbesondere bei sicherheitskritischen ADAS- oder AD-Funktionen spielen Plausibilisierungsschecks während des Betriebs

eine wichtige Rolle. Daher ist es essenziell, dass das Fahrzeug beim ViL am Prüfstand die korrekten Reaktionskräfte erfährt. Die Fahrzeugsimulation ist auch dafür verantwortlich, dem Fahrzeug die am Prüfstand fehlenden Beschleunigungssignale bereitzustellen.

Das Bremssystem des Fahrzeuges kann auf verschiedene Arten betrieben

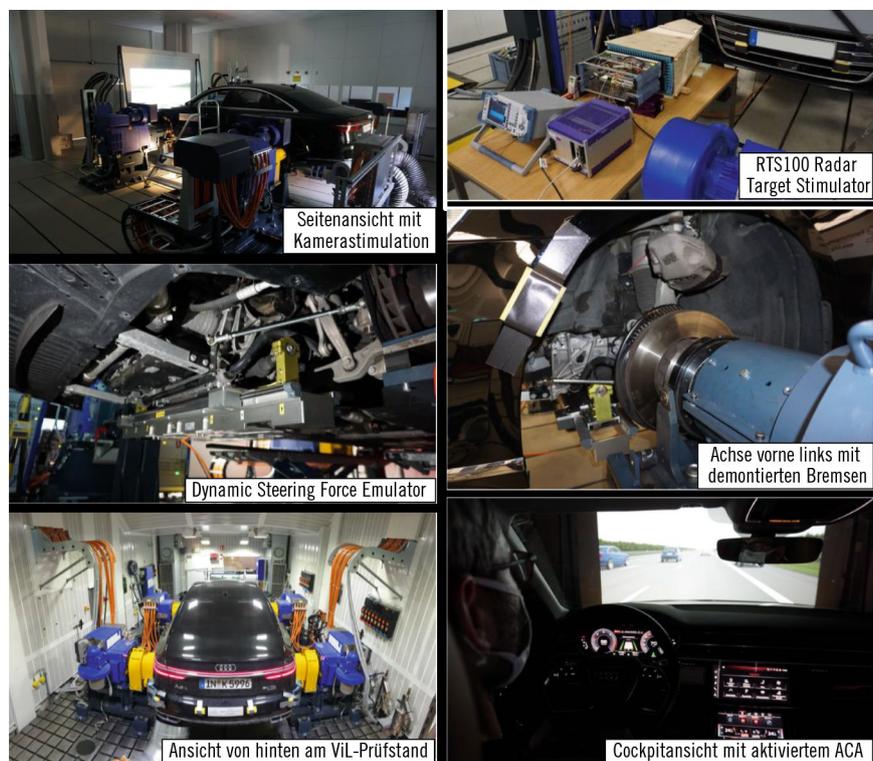


BILD 3 Aufbau des ViL-Prüfstands (© AVL)

werden. Grundsätzlich ist es möglich, die reale Bremse analog zum Fahrversuch einzusetzen. Eine weitere Möglichkeit, die hier zum Einsatz kam, ist die mechanische Entkopplung der Bremse in Kombination mit der Messung des Bremsdrucks und Abbildung der Bremskräfte in der Fahrzeugsimulation. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass kein Bremsstaub erzeugt wird, der aufwendig abgesaugt werden muss. Weiterer Bestandteil der Simulations-Toolkette ist die Umgebungs- und Sensorsimulation. Hier kam Vires Virtual Test Drive (VTD) zum Einsatz.

Eine der größten Herausforderungen bei einem solchen Aufbau ist die Interaktion zwischen realer Fahrzeugsensorik und der virtuellen Umgebung. In dem dargestellten Beispiel lag der Fokus auf der Frontkamera und dem Frontradar, deren Signale für die ACA-Funktion genutzt werden. Wie eingangs beschrieben zielt die Methodik darauf ab, möglichst wenig am Fahrzeug zu verändern und, soweit möglich, die reale Sensorik zu verwenden. Daher wurden sowohl für die Kamera als auch für den Radar eine Over-the-Air-Sensorstimulation eingesetzt.

Für die Kamerastimulation kam ein geeigneter Projektor mit zugehöriger Leinwand zum Einsatz. Die Leinwand ermöglicht einen großen Abstand zur Kamera und vermeidet Fokussierungsprobleme. Ein wesentlicher Schritt ist die korrekte Kalibrierung des Stimulators. Dafür wurde ein Kalibrierverfahren entwickelt, das ohne Zugriff auf das Rohbild der Kamera auskommt.

Der Radarsensor wurde mit dem von Rohde & Schwarz entwickelten Radar Zielsimulator RTS100 stimuliert. Insbesondere am Prüfstand sind die Anforderungen an einen Radarstimulator anspruchsvoll. Der RTS100 verfügt über eine Antennenarray-Technologie. Damit können komplexe, künstliche Objekte für den Radarsensor mit variabler Entfernung, Radialgeschwindigkeit, Größe und Azimutwinkel erzeugt werden, ohne dass sich Antennen oder Geräte physisch bewegen. Im Projekt wurde ausschließlich der Frontradar berücksichtigt. In weiteren Schritten sollen zusätzlich auch die Eckradare stimuliert werden. Die Lösung ist entsprechend modular, sodass auch dies möglich ist. Die Architektur sowie der reale Aufbau sind in **BILD 2** und **BILD 3** dargestellt.

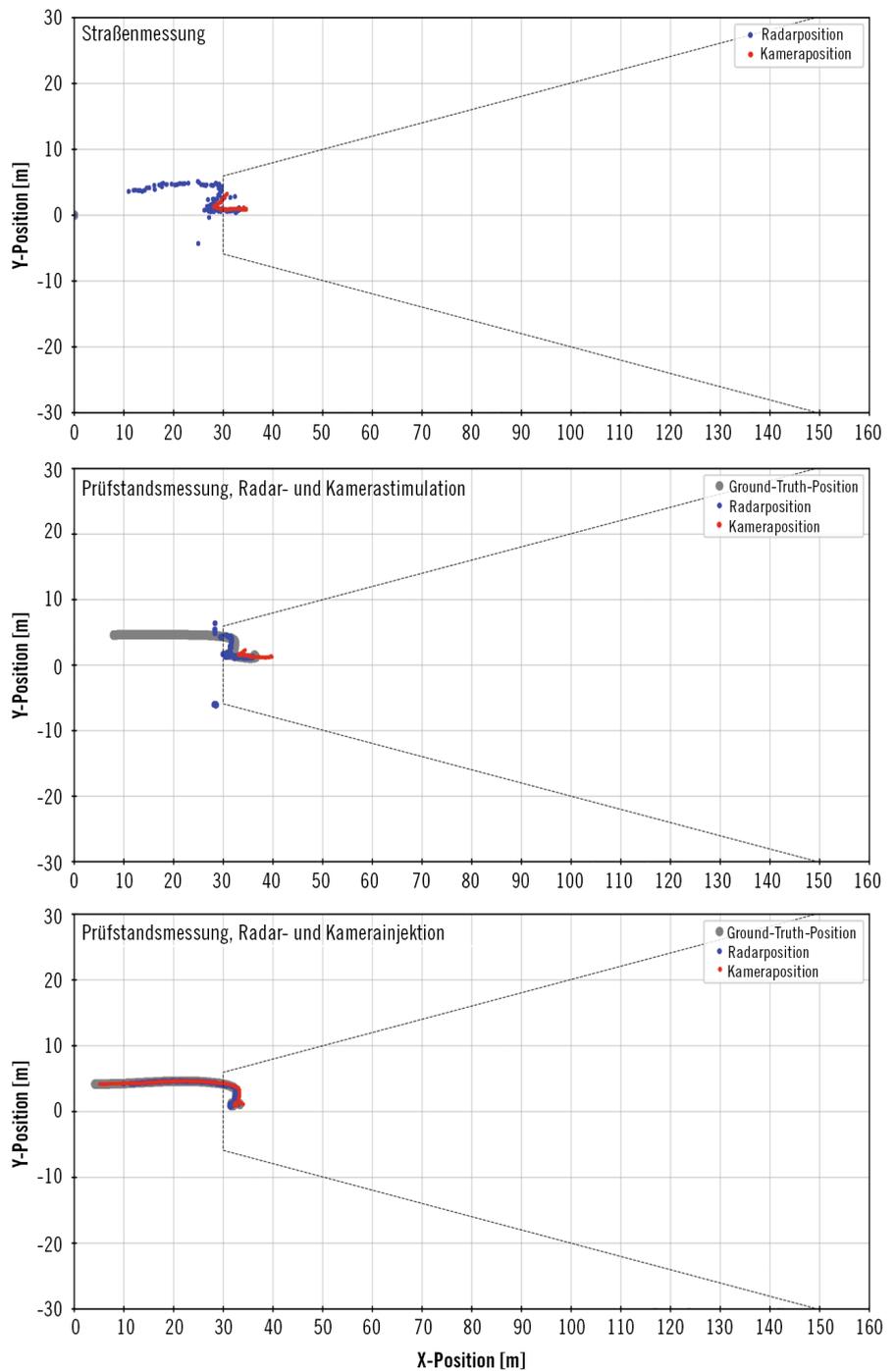


BILD 4 Vergleich der Ground-Truth- und der gemessenen Position (© AVL)

ERGEBNISSE UND KORRELATION

Die grundsätzliche Korrelation zwischen Antriebsstrangprüfstand und realer Welt, also der Straße oder dem Testgelände, wurde schon an mehreren Stellen nachgewiesen [5, 6, 7]. Daher lag der Schwerpunkt in diesem Projekt auf der Korrelation der Sensorstimulation mit dem realen Sensorverhalten. Wie ein-

gangs beschrieben wurden zehn unterschiedliche Szenarien mit jeweils mehreren Wiederholungen gefahren. Alle Tests wurden sowohl auf dem Testgelände als auch auf dem Drivingcube durchgeführt. Zusätzlich zur Over-the-Air-Stimulation wurden zu Vergleichszwecken die Daten von Radar und Camera-Over-the-Cable injiziert. Die Szenarien wurden vollständig closed-loop gefahren. Das heißt, es

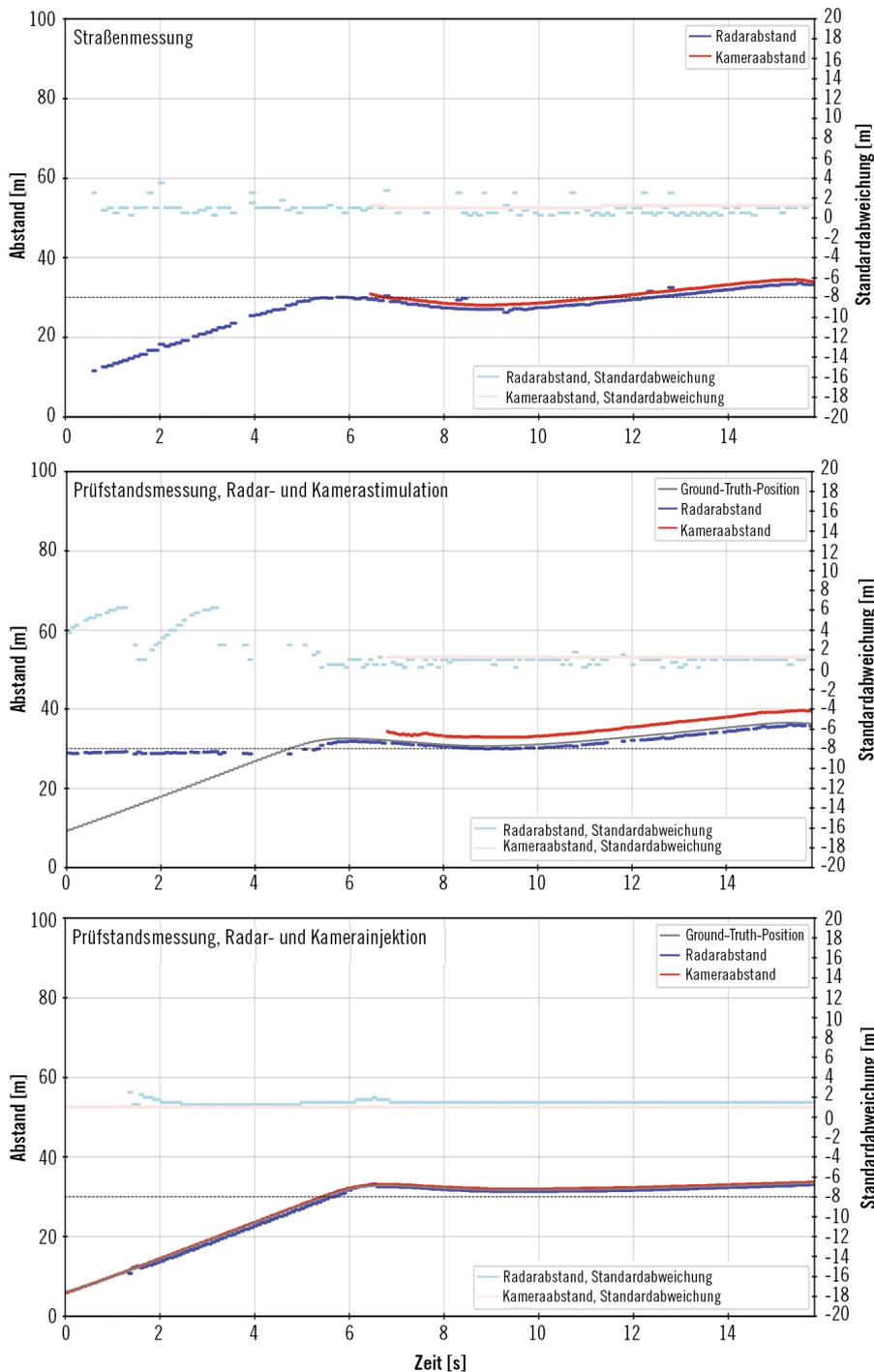


BILD 5 Vergleich des Ground-Truth- und des gemessenen Abstands (© AVL)

handelt sich nicht um ein einfaches Replay der aufgezeichneten Daten. Die ACA-Funktion war am Prüfstand aktiviert und voll funktionsfähig. Auf Basis der Sensorinformationen hat diese sowohl in Längsrichtung (Beschleunigung und Verzögerung) als auch in Querrichtung (Lenken) das Fahrzeug wie auf der realen Strecke im virtuellen Szenario aktuiert.

Im Folgenden sind beispielhaft für das Freifahr-Überhol-Einscher-Szenario die Ergebnisse dargestellt.

BILD 4 zeigt den Vergleich der Position des Zielfahrzeugs. Im ersten Diagramm sind als Referenz die Ergebnisse der Messungen auf dem Testgelände dargestellt. Diese waren die Basis für die Szenariogenerierung. Im zweiten und dritten Dia-

gramm ist der Vergleich zwischen virtuellem Ground Truth aus der Simulation und den mit Radar und Sensor gemessenen Positionen dargestellt – einmal mit Injektion und einmal mit der beschriebenen Over-the-Air-Stimulation. Es ist erkennbar, dass sowohl im realen Straßen- als auch im ViL-Versuch die Objektpositionen von Kamera und Radar gut korrelieren. Auf der Straße ist erkennbar, dass der Radar zufällige Treffer erkennt, die auf Leitpfosten und Fahrbahnunebenheiten zurückzuführen sind, die jedoch nicht szenariorelevant sind. Am ViL wurde ein Radarmodell gewählt, das keine zufälligen Treffer abbildet, was aber für andere Anwendungsfälle möglich ist. Bei der reinen Injektion passen die Zielpositionen perfekt zusammen, da auch hier perfekte Sensormodellen eingesetzt wurden. Weiterhin ist zu erkennen, dass am ViL Radartreffer erst ab einer Zielentfernung von etwa 30 m erfasst werden. Dies liegt an dem für diese Tests verwendeten Prototypen des RTS100, der final eine minimale Zielentfernung von wenigen Metern simulieren kann.

BILD 5 folgt demselben Prinzip. Hier ist anstatt der Position die Distanz zum Zielfahrzeug über der Zeit dargestellt. Weiterhin ist jeweils die Standardabweichung zum virtuellen Ground Truth aufgetragen. Auch hier ist die minimal darstellbare Zielentfernung von 30 m aufgrund der verwendeten Radar-Stimulator-Konfiguration zu erkennen. Weiterhin ist zu erkennen, dass es nur eine kleine Abweichung zwischen tatsächlichem und stimuliertem Abstand von unter 1 m gibt. Auf dieser Basis ist eine gute, wenig unterbrochene Zielverfolgung für die Fahrfunktion möglich.

In BILD 6 ist nochmals separat die Spurerkennung über die Kamera dargestellt. Hier ist zu sehen, dass die Fahrfunktion auch auf dem ViL-Prüfstand der Spur sehr gut folgen kann und dabei eine ähnliche Oszillation in den erlaubten Grenzen aufweist wie auf der Straße. Die Detektion der Spurmarkierungen erfolgte dabei im Schnitt mit weniger als 15 cm Abweichung von der tatsächlichen Position.

LITERATURHINWEISE

- [1] Koopman, P.; Wagner, M.: Challenges in Autonomous Vehicle Testing and Validation. SAE World Congress, Detroit, 2016
- [2] Düser, T.; Abdellatif, H.; Gutenkunst, C.; Gnan, C.: Ansätze für die Homologation automatisierter Fahrfunktionen. In: ATZelextronik (2019), Nr. 10, S. 54–60

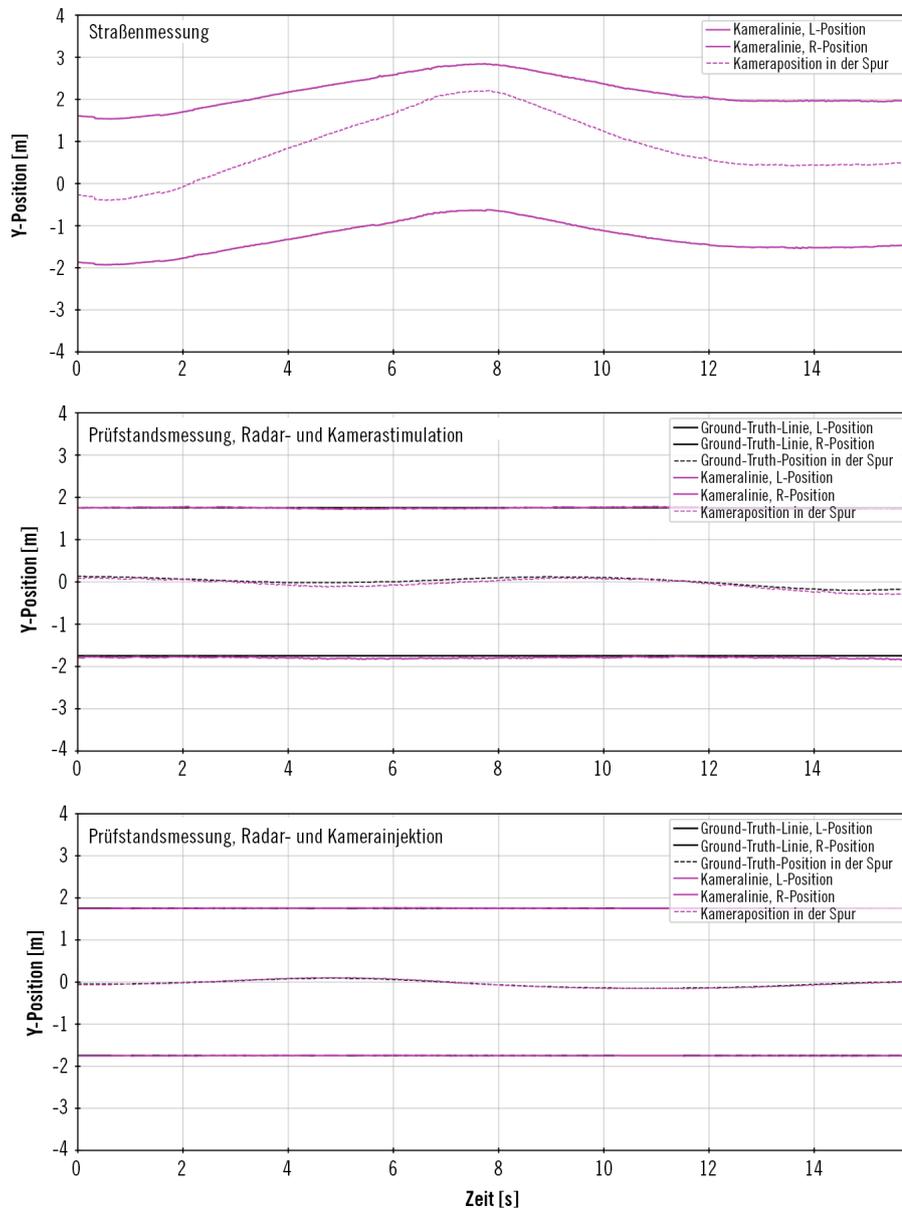


BILD 6 Vergleich der Ground-Truth-Linien- und der gemessenen Position (© AVL)

- [3] UNECE: Proposal for a new UN Regulation on uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to Automated Lane Keeping System. Online: <https://undocs.org/ECE/TRANS/WP.29/2020/81>, aufgerufen: 23. April 2021
- [4] Hartwecker, A.; Al-Saidi, O.; Müller, S.: Steering at the Powertrain Test Bench – A New Validation Method for Highly Automated Systems up to the Limits of Vehicle Dynamics. 8th International Symposium on Development Methodology, Wiesbaden, 2019
- [5] Mockeridge, T.; Dohman, H.; Phillips, D.: HIL Driveline Dyno. SAE Technical Paper 2014-01-1738, 2014
- [6] Brodbeck, P.; Pfeiffer, M.; Germann, S.; Schyr, C.; Ludemann, S.: Verbesserung der Simulationsgüte von Antriebsstrangprüfständen mittels Reifenschlupfsimulation. VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen, Friedrichshafen, 2001
- [7] Weck, T.; Sugiura, T.: Funktionale Prüfung des Allradantriebsstrangs im neuen XV Hybrid. CTI Symposium Fahrzeuggetriebe, HEV- und EV-Antriebe, Berlin, 2013

DANKE

Zum Erfolg des Projekts haben nicht nur die Autoren allein beigetragen. Allen Beteiligten sowohl in der Vorbereitung als auch in der Durchführung gilt der Dank der Autoren. Ein besonderer Dank gilt der Firma Rohde & Schwarz, insbesondere Steffen Neidhardt und Maximilian Bogner für die Bereitstellung und Unterstützung rund um den Radarstimulator, der Firma Stähle für die Zusammenarbeit im Bereich des Dynamik Steering Force Emulators, der Technischen Universität Berlin, insbesondere André Hartwecker und Denis Reduth, für Bereitstellung des Prüfstands und der tatkräftigen Unterstützung im Projekt sowie den Kolleginnen und Kollegen der Firma AVL, die im Hintergrund und vor Ort mitgearbeitet haben.