

Level 3 am HiL-Prüfstand, Absicherung von hochautomatisiertem Fahren am Fahrerassistenz Hardware-in-the-Loop Prüfstand der Mercedes-Benz-AG

Christopher Kober, Christoph Wohlfahrt, Jan Lier, Markus Schniertshauer

Mercedes-Benz AG
E/E Testing Prüfstand & Pre-Integration Body (RD/AEB)
Werk 059 , HPC X844
71063 Sindelfingen
christopher.kober@mercedes-benz.com

Abstract: Das Kraftfahrzeugbundesamt hat der Mercedes-Benz-AG, als erstem Fahrzeughersteller weltweit, die Freigabe für ein SAE-Level-3 [SAE] System erteilt. Dies war nur möglich aufgrund intensiver Absicherungsarbeit mehrerer Testinstanzen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Arbeit am Fahrerassistenz Hardware-in-the-Loop Prüfstand, bei dem reale, vernetzte Komponenten in simulierten Umgebungen getestet werden. Die Herausforderung besteht dabei in der konsistenten Bereitstellung der Sensordaten. Das System beinhaltet mehrere Kameras mit unterschiedlichen Sichtweiten, zwei Radarsysteme für Fern- und Nahbereich, sowie einen Lidar Sensor. Die Daten der 3-D Umgebung werden über verschiedene Wege eingespeist und führen am Ende in der Fusion des FAS-Steuergerätes zu einem Bild, das es dem Fahrzeug ermöglicht, den Fahrer aus der Verantwortung zu entlassen. Ausgiebige HiL-Tests haben es möglich gemacht, die Funktionsweise des Systems zu aufzuzeigen, Fehlerstrategien zu überprüfen und den sicheren Betrieb in den geforderten Anwendungsfällen zu bestätigen. Die Vorteile der HiL-Technik kamen dabei besonders zum Tragen. Die freie Verfügbarkeit jedweder Wetter-Situation innerhalb der Simulation. Die definierten und vollständig reproduzierbaren Testmöglichkeiten, sowie die effiziente Möglichkeit, Fehler und Ausfälle einzubauen, haben entscheidend mitgewirkt, das Ziel der Freigabe in der gegebenen Zeit einzuhalten.

1 Einleitung

Ein Fahrassistenzsystem, bei dem es dem Fahrer erlaubt ist, die Hände vom Lenkrad zu nehmen und effektiv die Verantwortung abzugeben erfordert einen enormen Absicherungsaufwand. Bei der Mercedes-Benz AG geschieht dies in mehreren Testinstanzen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, aufzuzeigen, welchen Beitrag die Systemabsicherung am Cluster-HiL liefert, welche Methoden dafür umgesetzt werden und worin die Vorteile dabei liegen.

2 Systemabsicherung an HiL Prüfständen der Mercedes-Benz AG

Bei der Testmethodik Hardware-in-the-Loop oder kurz HiL werden, wie der Name schon sagt, reale Elektrik/Elektronik (E/E) Komponenten in einem Regelkreis geprüft. In dieser Arbeit beziehen wir uns auf die Systemabsicherung an HiL-Prüfständen. Die Systemabsicherung folgt im E/E-Entwicklungsprozess, angelehnt an ein klassisches V-Modell [DRO] auf die Komponentenabsicherung. Das heißt, in der Systemabsicherung werden Komponenten integriert, deren Funktion bereits jeweils für sich abgesichert wurde, um das Wirken auf Systemebene zu untersuchen. Auf die Systemabsicherung folgt die Fahrzeugerprobung bei der die Systeme dann in der kompletten Fahrzeug-E/E agieren.

Bei der Mercedes-Benz AG hat sich in der Systemabsicherung das Konzept der Cluster-HiLs durchgesetzt. Dabei werden mehrere Komponenten, die zusammen für die Funktion von Systemen in einer bestimmten Domäne verantwortlich sind, integriert. Beispiele für Cluster-HiLs sind dabei Innenlicht, Klimatisierung, Telematik, und der Cluster auf dem in dieser Arbeit der Fokus liegt, die Fahrassistenz. Die Funktionsweise ist dabei immer gleich. Die einzelnen Komponenten werden an HiL-Prüfstände angeschlossen, die es ermöglichen, die komplette Buskommunikation zu analysieren. Darüber hinaus können Signale, die nicht von real angeschlossenen Komponenten stammen simuliert werden. Dies sind insbesondere jene Komponenten, die nicht für die eigentliche Domäne relevant sind, aber deren Signale dennoch für den störungsfreien Betrieb notwendig sind. Ziel des Konzeptes ist es, eine End-to-End-Absicherung zu erreichen, das heißt, dass von der Stimulation bis zur Aktion eines Systems nur reale Komponenten beteiligt sind. Der Vorteil des Cluster-HiL Konzeptes ist es, dass durch die Auswahl an beteiligten Komponenten die Komplexität reduziert wird, gleichzeitig aber der Verlust an Aussagekraft minimal gehalten wird.

3 Aufbau Fahrassistenz-Cluster-HiL

Der Fahrassistenz-Cluster-HiL basiert auf dem oben erwähnten Konzept, hat aber dennoch Eigenheiten, die ihn stark von den Cluster-HiLs der Body-Comfort Domäne unterscheiden. In erster Linie aufgrund der virtuellen Welt und der Tatsache, dass sich das Fahrzeug, das der HiL-Prüfstand darstellt, darin bewegt. Im Folgenden soll der Datenfluss am Fahrassistenz Cluster-HiL erklärt werden (Abb. 1). Ausgangspunkt jedes Testszenarios ist ein Straßenmodell. Hier wird die virtuelle Umgebung des Fahrzeugs definiert. Mercedes-Benz nutzt dabei das OpenDrive¹ Kartenformat mit einer dazugehörigen 3D-Datenbasis. Für Assistenzsysteme der neuen Generation, wie es auch die in dieser Arbeit getestete Level-3 Fahrfunktion ist, kam der Bedarf nach georeferenzierten Strecken auf. Dabei muss die simulierte Strecke eine Repräsentation in der realen Welt besitzen, da Kartendaten herangezogen werden um den Input der Sensoren zu plausibilisieren. Wenn das Fahrzeug also keine valide GPS-Position hat, werden viele Assistenzfunktionen degradiert.

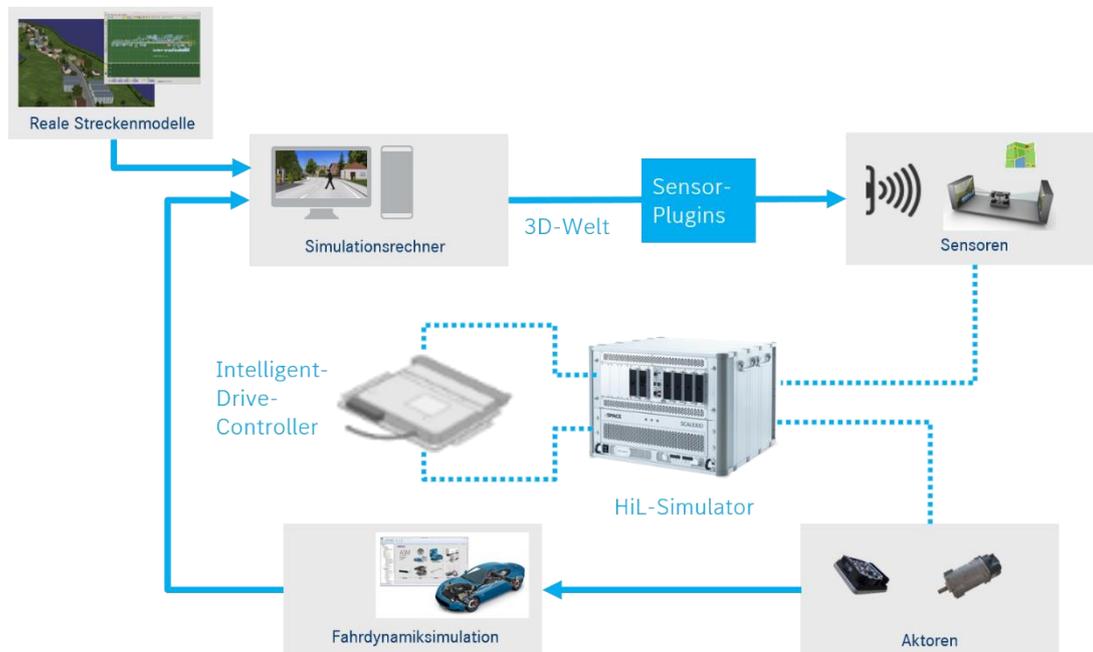


Abbildung 1: Datenfluss Fahrassistenz-Cluster-HiL

Die Straßendaten inklusive der Radkontaktpunkte des virtuellen Fahrzeugs gehen dann in den Simulationsrechner. Hier wird das Fahrzeug in der virtuellen Welt positioniert und das Testszenario gestellt. Anhand der Position der verschiedenen Sensoren am Fahrzeug wird in sogenannten Sensor-Plugins deren Input berechnet. Die Sensoren sind reale Fahrzeugkomponenten, an die die Sensor-Plugins mit Design-for-Test (DfT) Schnittstellen angebunden werden. Anhand der Daten aus der virtuellen Welt legen die Sensoren Signale auf den Fahrzeugbus. Diese werden durch den HiL-Simulator zum zentralen Fahrassistenzsteuergerät geleitet, das daraus die Aktionen berechnet.

¹ <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/>

Auch die Output-Signale vom Steuergerät werden am HiL-Simulator analysiert und dann zu den Aktoren weitergeleitet. Die Aktoren sind mit einer Fahrdynamiksimulation gekoppelt, die in jedem Simulationsschritt neue Positionen für das virtuelle Fahrzeug, auch Ego-Fahrzeug genannt, in die virtuelle Welt einspeist und somit den Regelkreis schließt.

Der geschlossene Regelkreis erfordert es, dass die Daten der virtuellen Welt und damit der Input in die Sensoren zu jedem Simulationsschritt neu berechnet wird. Da der Input der Sensoren direkt die Aktionen des Level-3-Systems beeinflusst und dieses dann über die Ausrichtung des Fahrzeugs wieder den Input aus der Welt verändert, ist ein Abspielen von Messdaten oder auch Replay-to-Simulation nicht valide.

4 Umgebungssimulation

Im folgenden Kapitel sollen die für die Level-3-Funktion erforderlichen Sensoren und deren Einspeisung aus der Simulation heraus aufgezeigt werden

4.1 Stereokamera

Da es sich bei der Stereokamera um eine kombinierte Komponente handelt, die sowohl die Bildaufnahme, als auch eine erste Verarbeitung beinhaltet, kann der Video-Input nicht einfach eingespeist werden. Seit mehreren Fahrzeugbaureihen wird daher am Cluster-HiL ein Kameraaufbau verwendet, bei dem die Komponente in einem geschlossenen Kasten zwei Monitore abfilmt, auf denen die virtuelle Welt gerendert wird. Die Positionen zum Rendern des Bildes entsprechen dabei den exakten Positionen der Linsen der Kamera im realen Fahrzeug.

4.2 Parkkameras

Im Gegensatz zur Stereokamera handelt es sich bei den Parkkameras lediglich um Kameraköpfe, die einen Videostream zum eigentlichen Park-Steuergerät liefern. Deshalb kann hier der Videostream, direkt aus der virtuellen Welt gerendert, eingespeist werden. Es muss jedoch die optische Krümmung, die durch die Linsen der Parkkameras entsteht im gerenderten Bild berücksichtigt werden. Das Bild wird im Fahrzeug als redundante Information zur Spurposition herangezogen.

4.3 Radarsimulation

Die Radarsimulation im Labor wird über DfT-Schnittstellen an den Radar-Komponenten gelöst. In den Fernbereichsradar werden Objektlisten der virtuellen Welt eingespeist, also Fahrzeuge mit ihren direkten Positionen und Ausmaßen. Die 4 Nahbereichsradare werden mit sogenannten Detektionsclustern versorgt, bei denen beispielsweise ein Fahrzeug immer aus 6 Detektionspunkten besteht.

4.4 Hochauflösende Karte

Eine wichtige Information für die Level-3-Funktionalität liefert die hochauflösende Karte oder auch HD-Map genannt. Diese wird, wie in Kapitel 3 schon erwähnt, aus Abbildungen von realen Straßenstücken gebildet. Die simulierte Welt muss dabei genau mit der hochgenauen Karte übereinstimmen, die im Fahrzeug hinterlegt ist, da die Funktion sonst degradiert. Die GPS-Position des Ego-Fahrzeugs wird aus der virtuellen Welt über eine transverse Mercator-Projektion bestimmt und über mehrere Schnittstellen in den HiL-Prüfstand eingespeist.

4.5 Laserscanner

Der Laserscanner oder auch Lidar wird im Zuge der hier aufgezeigten Level-3-Funktion zum ersten Mal verwendet. Die Einspeisung der virtuellen Welt erfolgt über sogenannte Raytracing-Algorithmen auf der Grafikkarte eines Simulationsrechners. Dabei wird der Weg von Strahlen berechnet, die von der Position des Sensors losgeschickt werden und dann an den jeweiligen Hindernissen reflektiert werden. Dabei entsteht eine Punktwolke aus Tiefenwahrnehmungen (Abb. 2), die über eine DfT-Schnittstelle in die Komponente eingespeist werden kann.

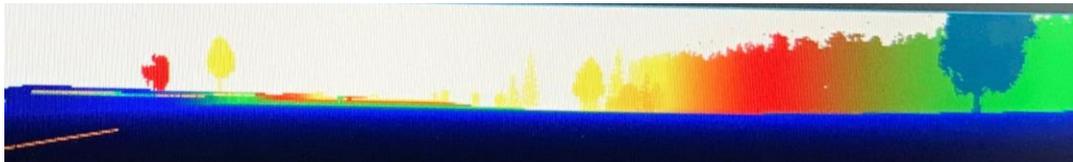


Abbildung 2: Tiefenwahrnehmung durch Lidar-Sensormodell

4.6 Fahrdynamik

Die Fahrdynamikanbindung gehört nur bedingt zur Umgebungssimulation, dennoch sei sie hier erwähnt, da sie die Rückkopplung des Fahrzeuges zur virtuellen Welt ermöglicht. Am Prüfstand sind ein reales ESP-Steuergerät und ein reales redundantes Bremssystem verbaut. Die Ansteuerung des ESP-Steuergerätes zum Beschleunigen oder Bremsen wird von Messfühlern abgegriffen und über eine Fahrdynamiksimulation wieder zurück in die virtuelle Welt gespielt. Die Lenkung ist ebenfalls real am Prüfstand vorhanden, dazu ist sie mit einem Motor verbunden, der die Lenkwiderstände simuliert. Auch deren Position wird über einen Messabgriff zurück in die Simulation gespielt, wodurch sich das Ego-Fahrzeug in der Simulation korrekt bewegt.

5 Testmethodik

In diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, wie der oben beschriebene Prüfstand mit seinen Komponenten effektiv zur Absicherung eingesetzt wird.

5.1 Anforderungsbasiertes Testen

Den wichtigsten und größten Teil der Systemabsicherung am Cluster-HiL macht das anforderungsbasierte oder systematische Testen. Ausgangspunkt ist dabei eine vom Fachbereich erarbeitete Testspezifikation, die am Cluster-HiL umgesetzt wird. Der Ablauf ist dabei wie bei anderen Testskripten geprägt von der sequentiellen Durchführung von Aktionen und der Prüfung der Reaktionen des Systems darauf. Ein klassisches Beispiel für einen solchen Test ist im Fahrassistentenbereich ein querender Fußgänger. Das Fahrzeug fährt dabei auf einer Autobahn, aktiviert das Level-3-System und ein Fußgänger überquert die Fahrbahn. Die Sensoren erkennen den Fußgänger und die Funktion leitet die spezifizierten Schritte ein um mit der Situation umzugehen.

Die Vorteile die der HiL-Prüfstand dabei bietet sind enorm.

- Der Testablauf inklusive Vorbedingungen ist für jeden Durchlauf gleich und reproduzierbar.
- Das Verhalten des Fußgängers und dessen Position kann punktgenau eingestellt werden.
- Das Szenario zu Wetter und Straße ist nahezu frei bestimmbar.
- Jedwede Buskommunikation kann während dem Test überwacht werden.
- Fehler können zeitlich genau eingespeist werden.

All diese Vorteile führen dazu, dass einige Tests, z.B. für das Verhalten beim Ausfall von Komponenten, effektiv nur an dieser Testinstanz überprüft werden können.

5.2 Digitale Erprobungsfahrt

Die Digitale Erprobungsfahrt als Testmethodik am Cluster-HiL wurde bereits in [WOH] vorgestellt. Das Konzept dahinter ist, dass kein starres Testszenario abgefahren wird, sondern ein simulierter Fahrer den HiL-Prüfstand als Fahrzeug in der virtuellen Welt anhand einer Route bewegt. Dabei bewegt er sich auf real nachgebildeten Straßennetzwerken und durch komplex modellierten Umgebungsverkehr aus [KOB]. Da die hier getestete Level-3-Funktion nur für Staufahrten auf Autobahnen freigegeben ist, werden auch solche Fahrten in der Digitalen Erprobungsfahrt aufgesetzt (Abb. 3). Die allgemeine Fahrzeugdichte wird dabei stark erhöht, wodurch sich stauähnliche Zustände bilden. Während der Fahrt sind Überwachungsmechanismen aktiv, die in [KIN] beschrieben sind. Diese analysieren die gegenwärtige Fahrsituation und schalten daraufhin vorab definierte Prüfungen scharf, die eine Aussage zur Funktion erlauben. Ergebnis dieser Fahrten ist ein Protokoll, das detailliert Auffälligkeiten auflistet, die dann im weiteren Prozess vom Tester validiert werden und als Fehler in den Entwicklungsprozess eingespeist werden. Im Fokus dieser Testmethode sind Langzeitstabilität und sporadische Fehler. Aber auch zur schnellen Aussage für einen neuen Softwarestand ist diese Methode gut geeignet.



Abbildung 3: Staufahrt am HiL-Prüfstand

6 Fazit

Insgesamt konnte aufgezeigt werden, dass die Systemabsicherung am Fahrassistenz-Cluster-HiL ein wichtiges Werkzeug zur Freigabe des Mercedes-Benz Drive-Pilot war und immer noch ist. Die flexiblen Stimulations- und Analysemöglichkeiten in Verbindung mit der hohen Reproduzierbarkeit bei gleichzeitig hoher Aussagekraft machen diese Testinstanz für den Entwicklungsprozess komplexer Assistenzsysteme nahezu unverzichtbar.

7 Literaturverzeichnis

- [SAE] Society of Automotive Engineers: Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems 2014.
- [DRO] Dröschel, Wolfgang, and Manuela Wiemers, eds. Das V-Modell 97: der Standard für die Entwicklung von IT-Systemen mit Anleitung für den Praxiseinsatz. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2015.
- [WOH] Wohlfahrt, Christoph "Von systematischer Absicherung zur Digitalen Erprobungsfahrt," Autotest Stuttgart, 2016.
- [KOB] Kober, Christopher. Stochastische Verkehrsflusssimulation auf Basis von Fahrerverhaltensmodellen zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen. Springer-Verlag, 2019.
- [KIN] King, Christian, et al. "A taxonomy and survey on validation approaches for automated driving systems." 2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE, 2020.