

Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Funktionsprüfstand mit „lenkbaren“ Radaufnahmen zur Validierung automatisierter bzw. autonom fahrender Fahrzeuge für das Bandende einer Fahrzeugendmontage

Validation of partly or complete Autonomous Driving Vehicles by a Function Test rig with „Steerable Wheel Supports“ at the End of Line

Dr. rer. nat. Thomas Tentrup *), thomas.tentrup@durr.com, Dipl.-Ing. Jörg Neumann *) joerg.neumann@durr.com, Dipl.-Ing. Werner Krass*), werner.krass@durr.com, Dipl.-Ing. Martin Wagner*), martin.wagner@durr.com, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves **), corves@igm.rwth-aachen.de, M. Sc. Jascha Paris **), paris@igm.rwth-aachen.de,
*) Dürr Assembly Products GmbH, Köllner Str. 122-128, 66346 Püttlingen, www.durr-ap.com
**) Inst. für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen, Steinbachstr. 53B, 52074 Aachen

Kurzfassung

Bei der Prüfung auf einem klassischen Funktionsprüfstand muss das fahrende Fahrzeug durch einen Fahrer über die Lenkung durch Geradeausfahrt in der Mitte des Prüfstandes gehalten werden, um ein seitliches Wegdriften zu verhindern. Somit ist die fahrerlose Prüfung eines Fahrzeugs auf einem klassischen Funktionsprüfstand nur möglich, wenn die Lenkung das Fahrzeug autonom in der Geradeausfahrt hält, oder das Fahrzeug trotz anstehendem Lenkwinkel $\neq 0^\circ$ in der Mitte des Standes gehalten wird. Weiterhin ist bei der Prüfung bzw. Validierung autonom fahrender Fahrzeuge die Funktionalität des Lenkens z.B. bei der Simulation eines Ausweichmanövers von Interesse. Daher wurde ein klassischer Funktionsprüfstand (Dürr Markenname: „x-road“) an der Vorderachse derart modifiziert, dass sich die als Doppelrollen ausgeprägten drehbaren vorderen Radaufnahmen der Orientierung und Lage der Vorderräder - erfasst über Lasermesstechnik - aktiv über eine hochdynamische Regelung anpassen. Damit bleibt das fahrende Fahrzeug unabhängig von der Lenkradstellung und ohne ein Eingreifen der Lenkung des Fahrzeugs in der Mitte des Funktionsprüfstandes positioniert. Mit diesem neuen „lenkbaren Funktionsprüfstand“ (Dürr Markenname: „x-road curve“), ausgestattet mit Bildschirmen zur Einspielung einer virtuellen Realität über die ADAS Sensoren, kann ein fahrbereites autonom fahrendes Fahrzeug ohne aufwendige mechanische Adaptionen in Bezug auf die Reaktionen eingespielter Verkehrssituationen über den Vergleich der Ist-Bewegung zur Soll-Bewegung des Fahrzeugs geprüft werden.

Dürr Assembly Products (Dürr AP) ist einer der weltweit führenden Hersteller u.a. von FAS-Einstellständen für die Produktion von PKW und LKW.

Abstract

When testing on a classical function test stand, the moving vehicle must be held in the middle of the stand by a driver via the straight-ahead steering in order to prevent lateral drifting. This means that driverless testing of a vehicle on a typical function test stand is only possible if the steering autonomously holds the vehicle in a straight line or if the vehicle is held in the middle of the stand despite the steering angle $\neq 0^\circ$. Furthermore, the functionality of steering is of interest in the testing and validation of autonomous vehicles, e.g. in the simulation of an evasive maneuver. Therefore, a typical function test stand (Dürr brand name: "x-road") was modified on the front axle in such a way that the rotating front wheel supports, which are designed as double rollers, actively adapt to the orientation and position of the front wheels - recorded using laser measurement technology - via a highly dynamic control system. This means that the moving vehicle remains positioned in the middle of the function test stand regardless of the steering wheel position and without any intervention by the vehicle's steering. With this new "steerable function test stand" (Dürr brand name: "x-road curve"), equipped with screens for recording a virtual reality via the ADAS sensors, it is possible to test a drivable, autonomously driving vehicle without complex mechanical adaptations with regard to the reactions of traffic situations by comparing the actual movement with the target movement of the vehicle.

Dürr Assembly Products is one of the worldwide leading suppliers for DAS test rigs for passenger cars and commercial vehicles.

1 Einleitung

Die zukünftige Produktion von automatisiert bzw. autonom fahrenden Fahrzeugen wird die Einstellung (Inbetriebnahme) und Prüfung der Fahrzeuge am Bandende der Automobilproduktion stark verändern. Dies bezieht sich insbesondere auf die Technologie der Prüfstände (Fahrwerkstand, Fahrerassistenz (ADAS)-Einstellstand und Roll-, Brems-, ABS-Prüfstand – kurz: Funktionsprüfstand) des Bandendes und bedingt neue Prüfstände. Diese Veränderungen setzen sich aus vier Punkten zusammen:

- 1.: Fahrerloser Transport der Fahrzeuge im Bandende-Bereich,
- 2.: Automatische Einstellung und Fahrerlose Prüfung der Fahrzeuge in den Ständen,
- 3.: Flexible und hochgenaue Kalibrierung einer Vielzahl von ADAS-Sensoren
- 4.: Neue Prüfumfänge zur Validierung der Funktion „automatisiertes bzw. autonomes Fahren“.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Funktionsprüfstandes hinsichtlich der Anforderungen 2.: „Fahrerloses Prüfen“ und 4.: „Neue Prüfungen in Bezug auf die Funktionalität automatisiertes bzw. autonomes Fahren“ vorgestellt.

2. Lenkbare Funktionsprüfstände in der Fahrzeugentwicklung

Lenkbare Funktionsprüfstände sind aus der Fahrzeugentwicklung bekannt. Im Rahmen des EU-Projekts SPARC 2004-2007 hat Dürr AP einen Funktionsprüfstand „VeHiL“ (Dürr Produktname: „x-dynodrive“, Abb.1a,b) entwickelt (Ref.1), bei dem die Motoren des Funktionsprüfstandes an den Radnaben des Fahrzeugs ohne Räder gekoppelt wurden. Mit Hilfe einer Kardanwelle vorne wurden auch Lenkbewegungen des Fahrzeugs ermöglicht. Somit konnte das Versuchsfahrzeug in seiner kompletten Funktion inklusive Lenkung getestet werden.



Abb. 1a: VeHiL Funktionsprüfstand mit Fahrzeug im EU-Projekt SPARC

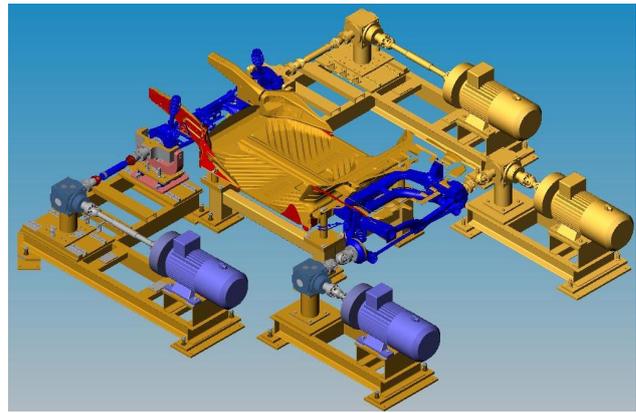


Abb. 1b: Konzept des VeHiL Funktionsprüfstandes

Weiterhin werden in der Entwicklung Fahrzeuge inklusive Lenkradbewegungen auf klassischen Funktionsprüfständen, d.h. mit festen Doppelrollen getestet, indem das Lenkgetriebe von den Rädern mechanisch entkoppelt und diese in Geradauslauf fixiert sind.

Für die Prüfung von Fahrzeugen *am Bandende* einer Fahrzeugendmontage sind diese Verfahren und Prüfstände ungeeignet, da die Fahrzeuge in diesem Bereich fahrbereit und mit Reifen ausgestattet sind. Allerdings wurden die Bandendeprüfstände Fahrwerkstand IWA, ADAS-Einstellstand IDAS und Funktionsprüfstand IFT mit Fahrzeugen im Gehänge (siehe Abb. 2a,b) und mit Radadaption bereits angedacht bzw. realisiert (Ref.2, 3).

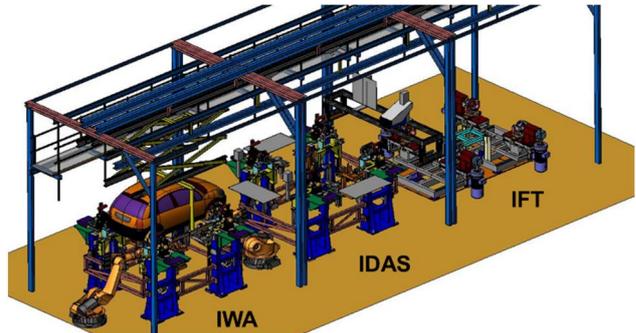


Abb. 2a: Bandendeprüfstände in der Montagelinie mit einem Inline Function Tester (IFT)



Abb. 2b: Darstellung des Inline Function Tester (IFT)

3. Klassischer Funktionsprüfstand in der Fahrzeugproduktion

Ein fester Bestandteil der Fahrzeugprüfung am Bandende einer Fahrzeugendmontage ist ein kombinierter Roll-/Brems-/ABS-Prüfstand (kurz: klassischer Funktionsprüfstand, siehe Abb. 3a). Mit diesem Prüfstand werden fahrdynamische Prüfungen (Getriebe, Bremsen, ...), Parametrierung von Steuergeräten und Sensortests im Fahrzeug durchgeführt. Er besteht im Wesentlichen aus vier Doppelrollen, die jeweils durch einen Motor angetrieben werden.



Abb. 3a: klassischer Funktionsprüfstand (Dürr Produktname: x-road)

Der klassische Funktionsprüfstand ist in der Produktion mit einer Kabine, die Abgasabsaugung beinhaltet, eingehaust (siehe Abb. 3b). Die Prüfzeiten liegen je nach Prüfumfang zwischen 2 und 3 Minuten.

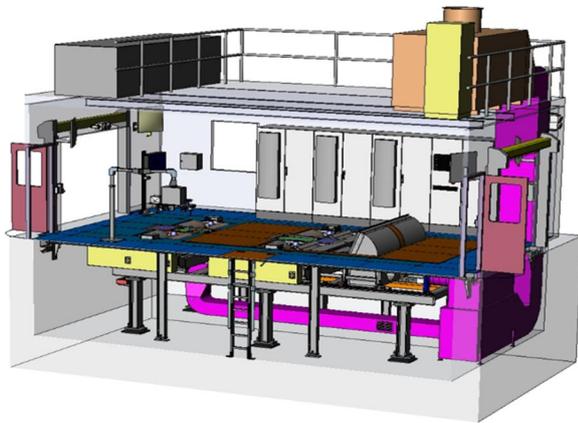


Abb. 3b: Klassischer Funktionsprüfstand mit Kabine und Abdeckungen

Der Werker, der das Fahrzeug im Prüfstand fährt, hat im wesentlichen drei Aufgaben:

1. Fahrzeug im Geradeauslauf halten und in der Mitte des Prüfstandes positionieren
2. Schalten, Beschleunigen und Bremsen gemäß Prüfvorgaben
3. Ein- und Ausfahren

Zur Umsetzung einer Funktionsprüfung ohne Fahrer auf einem klassischen Funktionsprüfstand werden zwei Konzepte in Betracht gezogen:

1. Lenken mit einer Vorrichtung, die am Lenkrad adaptiert wird und Fahren über kabelgebundene Steuergerätekommunikation (siehe Abb. 4, Ref. 4a,b).
2. Lenken so, dass das Fahrzeug im Geradeauslauf in der Mitte des Prüfstandes positioniert ist, und Fahren über kabellose Steuergerätekommunikation.

Gemäß Konzept 2, das schon umgesetzt wird, muss das Fahrzeug über seine Lenkung mit Hilfe schneller kabelloser Steuergerätekommunikation bei der dynamischen Funktionsprüfung in der Mitte des Prüfstandes gehalten werden.

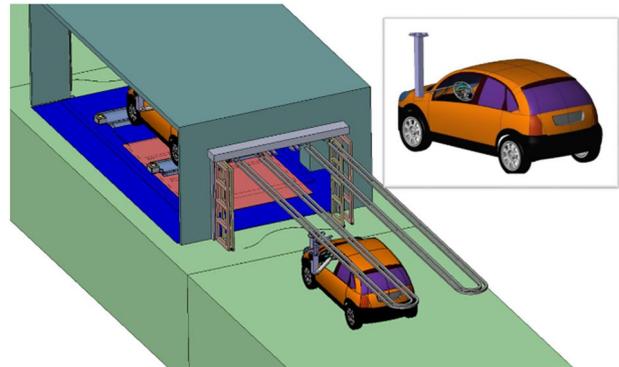


Abb. 4: Lenkradadaption gemäß Konzept 1

Beide oben angerissenen Konzepte ermöglichen nicht, dass das Fahrzeug auch bei einem anstehenden Lenkeinschlag in der Mitte des klassischen Funktionsprüfstandes verbleibt.

Daher haben wir uns das Ziel gesetzt, einen Funktionsprüfstand zu entwickeln, auf dem ein Fahrzeug mit Lenkwinkeln α im Bereich von $\pm 10^\circ$ gemessen am Rad zu den Drehachsen der Doppelrollen und bis zu einer Geschwindigkeit von 130 km/h geprüft werden kann, ohne seitlich vom Prüfstand zu driften.

3. Physikalische Grundlagen und Prinzipien der Regelungstechnik

Die Ursache des seitlichen Wegdriftens eines mit konstanter Geschwindigkeit v fahrenden Fahrzeugs mit einem Lenkwinkel α auf einem Funktionsprüfstand ist die Seitenkraft F^S . Zur Herleitung dieser Kraft betrachten wir eine Fahrzeugvorderachse, deren Räder links und rechts auf jeweils einer Doppelrolle (Rollenpaar) stehen in folgender Situation (siehe Abb. 5):

- Beide Rollenpaare sind fixiert und drehen gleichförmig mit der Geschwindigkeit v . Das linke Rad der Achse ist um den Winkel α_l zu den Rollen gedreht, das rechte um den Winkel α_r .
- Beide Räder drehen gleichförmig mit v_x und der Schwerpunkt der Achse ist in e_y -Richtung frei beweglich.

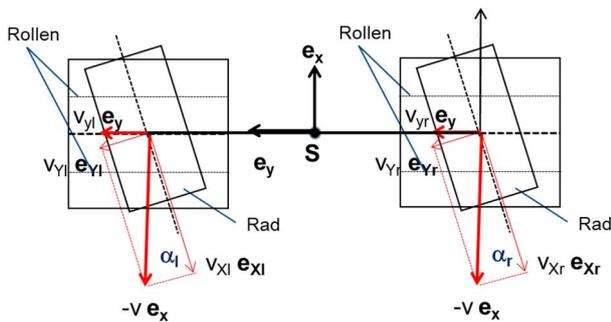


Abb. 5: Schematische Darstellung einer Vorderachse auf einem Funktionsprüfstand

Die resultierende Seitenkraft auf den Schwerpunkt der Achse ist:

$$F_{s_y} = \text{sign}(v) 2 C \left\{ \frac{\alpha_l + \alpha_r}{2} - \arcsin\left(\frac{v_y}{v}\right) \right\} \quad (1)$$

mit C – Reifenschräglauftiefe und v_y seitliche Geschwindigkeit des Schwerpunkts der Achse.

Mit $v > 0$, $v(t) = v_y(t)$ und m als Achsmasse ergibt sich die Differentialgleichung:

$$\frac{dv(t)}{dt} = a - b v(t) \quad \text{mit} \quad a = \frac{C (\alpha_l + \alpha_r)}{m}$$

$$\text{und} \quad b = \frac{2c \cdot 180^\circ \cdot 3,6}{\pi v} \quad (2)$$

Die Lösung der Differentialgleichung für die Randbedingung $v(t=0)$ ist das Weg-Zeit-Gesetz (siehe Abb. 6):

$$s(t) = vG \cdot t - \left(\frac{a}{b^2}\right) \{1 - \exp(-bt)\} \quad (3)$$

Für die seitliche Grenzgeschwindigkeit vG des Schwerpunkts der Achse gilt:

$$v(t) = v_y(t) = vG = \sin\left(\frac{\alpha_l + \alpha_r}{2}\right) \cdot v \quad (4)$$

Aus den Gleichungen (1) und (3) folgt, dass wir zunächst eine beschleunigte Seitenbewegung der Achse erhalten, bis die seitliche Grenzgeschwindigkeit der Achse vG erreicht ist. Danach bewegt sich die Achse mit dieser Seitengeschwindigkeit vG gleichförmig weiter.

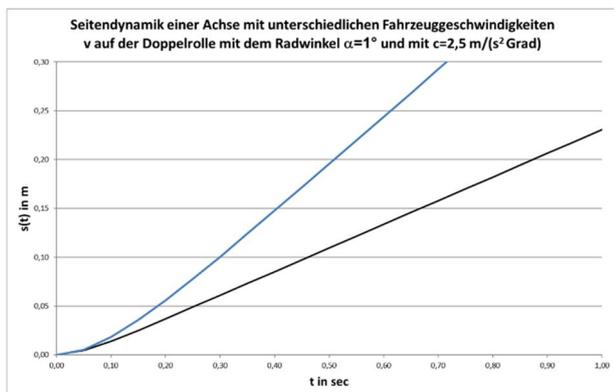


Abb. 6: Darstellung von $s(t)$ für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Lenkwinkel

Aus diesen Erkenntnissen ist die Idee entstanden, die beiden vorderen Radaufnahmen mit den Doppelrollen eines Funktionsprüfstandes auf einer Schwimmpfanne mit einem Drehpunkt zu lagern und mit einem Linearmotor zu drehen. Somit werden die Lenkwinkel α_l und α_r zwischen Rollenachsen und den Rädern hochdynamisch so eingestellt, dass die Stärke der Seitenkraft regelbar ist (Ref. 5a). Der Lenkwinkel der Räder wird dabei über zwei Lasersensoren auf jeder Seite, die fest mit der Radaufnahme verbunden sind, gemessen. Das System wird auf eine Radlast von 1000 kg ausgelegt und soll so geregelt werden, dass seitliche Bewegungen der Achse auf eine Länge von ± 200 mm bei einer Rollenbreite von 800 mm unabhängig von den Lenkwinkeln der Räder im Bereich von $\pm 10^\circ$ beschränkt sind.

Mit Hilfe der Experten des IGMR der RWTH Aachen wurde für das oben beschriebene System eine Regelung entworfen (siehe Abb.7) und in Matlab Simulink implementiert. Diese Simulation auf der Basis der bekannten Physik zeigte schnell, dass es möglich ist, mit einer entsprechenden Regelung auf der Basis einer Zykluszeit von 0,1 s das System zu beherrschen und alle gesetzten Ziele zu erreichen. Daher konnte die Regelung auf PC basiert mit dem Dürr AP Automatisierungssystem „x-line“ umgesetzt werden.

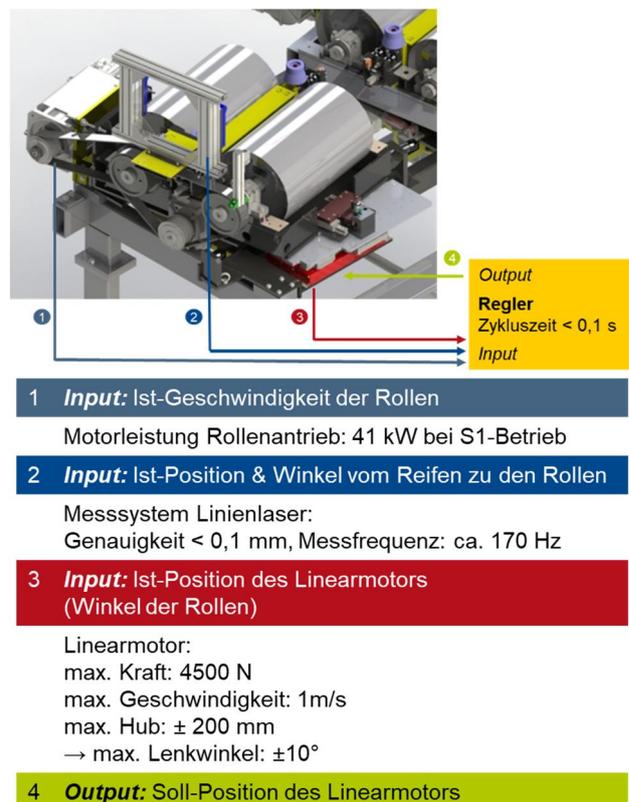


Abb. 7: Funktions- und Regungsprinzip der lenkbaren Radaufnahme

4. Mechanischer Aufbau des lenkbaren Funktionsprüfstandes

Nach dem Nachweis der technischen Machbarkeit wurde 2017 der Prototyp des lenkbaren Funktionsprüfstandes (Dürr Markenname: „x-road curve“) gebaut (siehe Abb. 8a,b), wobei die hinteren Radaufnahmen identisch zu dem klassischen Funktionsprüfstand sind und die vorderen Radaufnahmen gelenkt (Ref. 5b).

Der Prototyp des lenkbaren Funktionsprüfstandes wurde Ende 2017 nach einer nur dreiwöchigen Inbetriebnahme fertiggestellt. Dies war in so kurzer Zeit nur möglich, weil alle Teilkomponenten vorab getestet wurden und die Software für die Regelung inklusive Parametrierung in der Simulation getestet zur Verfügung stand. Nach einer ausgiebigen Validierungsphase wurde der lenkbare Funktionsprüfstand im September 2018 während eines Kundentages 100 Kunden von Automobilherstellern aus aller Welt vorgestellt.

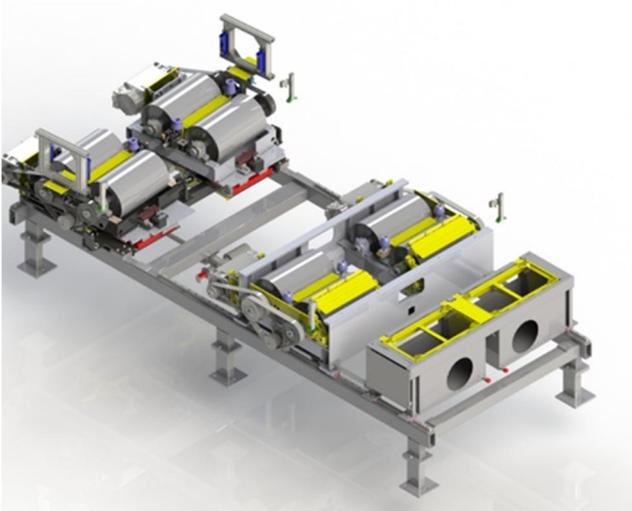
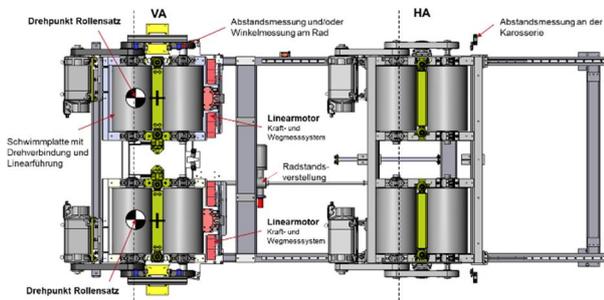


Abb.8a,b: Darstellungen des lenkbaren Funktionsprüfstandes "x-road curve"

Die kundenrelevanten Eigenschaften des lenkbaren Funktionsprüfstandes in Bezug auf die aktuellen Fahrzeuge sind:

- Automatische Positionierung des Fahrzeugs in die Mitte des Prüfstandes
- Befahren mit Lenkeinschlägen
- Fahrer unabhängige Prüfung

- Nachrüstbarkeit vorhandener klassischer Funktionsprüfstände zum lenkbaren Funktionsprüfstand

4. Dynamische Validierung der Funktionalität des „Autonomen Fahrens“

Mehrere Fahrzeughersteller haben angekündigt 2025 Level 4 autonom fahrende Fahrzeuge auf den Markt zu bringen. Zu diesem Zeitpunkt kann man davon ausgehen, dass die Fahrzeughersteller diese Fahrzeuge ohne Fahrer durch die Prüf- und Einstellstände des Bandendes einer Fahrzeugmontage fahren und vollautomatisch einstellen und prüfen wollen. Einer der Prüfstände, mit dem das dann möglich ist, ist der lenkbare Funktionsprüfstand.

Weiterhin möchte der Fahrzeughersteller, weil er für die korrekte Funktion des autonomen Fahrens verantwortlich ist, dass diese nach der Produktion korrekt und unfallfrei funktioniert. Auf Grund der Toleranzketten bei dem Verbau von Komponenten, der Varianz von Komponenten innerhalb der vorgegebenen Spezifikation, fehlerhaften Komponenten und ggf. Produktionsproblemen kann nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass die Funktionalität „autonomes Fahren“ fehlerfrei funktioniert.

Eine Validierung des autonomen Fahrens am Bandende könnte aufgetretene Produktionsprobleme und Fehler in Hardware und Software (z.B. falsche Version) aufdecken.

Ein mögliches Konzept zur Validierung des „autonomen Fahrens“ ist die Einspielung einer virtuellen Realität mit Hilfe eines Bildschirms über die ADAS Sensoren in ein autonom fahrendes Fahrzeug, das auf einem lenkbaren Funktionsprüfstand fährt (siehe Abb. 9 & 10). Diese virtuelle Realität umfasst typische Szenen (z.B. auftauchende Hindernisse), auf die ein autonom fahrendes Fahrzeug in definierter Art und Weise reagieren soll. Die virtuelle Realität wird von einem Fahrzeugsimulationsmodell gesteuert und über die Informationen Geschwindigkeit und Lenkwinkel kontinuierlich der simulierten Fahrt des Fahrzeugs angepasst. Weiterhin werden die Quer- und Längsbeschleunigungssensoren von der Fahrzeugsimulation mit den korrekten Werten gemäß der simulierten Fahrt versorgt. Wird das Fahrzeug über die virtuelle Realität animiert, eine bestimmte Reaktion zu zeigen (z.B. eine Ausweichfahrt), so kann die vom Prüfstand gemessene Ist-Trajektorie mit der vorgegebenen Soll-Trajektorie aus der Fahrzeugsimulation verglichen werden. Liegt die Differenz zwischen Soll und Ist in einer gegebenen Toleranz, hat das Fahrzeug die Prüfung bestanden.

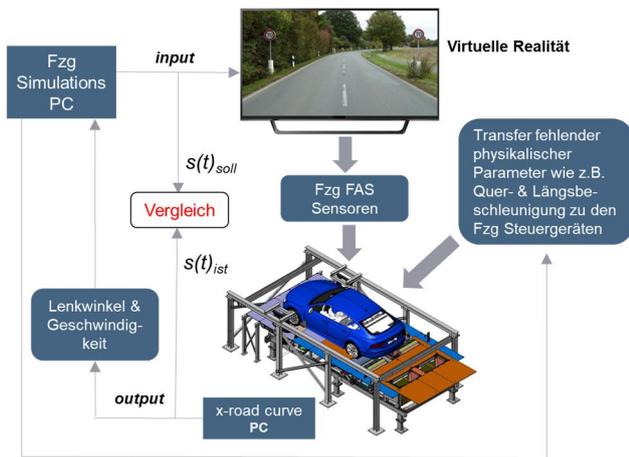


Abb. 9: Konzept zur Validierung des "Autonomen Fahrens"

schon werkerlose Prüfungen, die zu einer höheren Qualität bei geringeren Kosten führt.

Das Projekt ist ein Musterbeispiel für die Zusammenarbeit zwischen Universität (IGMR der RWTH Aachen) und der Industrie.

6. Referenzen

- Ref. 1: Patent EP 1 596 179
- Ref. 2: Patent EP 1 818 748
- Ref. 3: Patent EP 1 760 446
- Ref. 4a: Patent DE 10 2008 009 378
- Ref. 4b: Tentrup & al., VDI Mechatroniktagung 2009
- Ref. 5a: Patente EP 1 143 219
- Ref. 5b: DE 10 2015 115 607.5 A1



Abb. 10: Lenkbare Funktionsprüfstand „x-road curve“ mit Fahrzeug und Bildschirm

5. Zusammenfassung



Zum ersten Mal ist es gelungen, einen lenkbaren Funktionsprüfstand zu entwickeln, auf dem nicht nur die Funktionalität im Geradeauslauf, sondern auch bei unterschiedlichen Lenkwinkeln im Bereich von $\pm 10^\circ$ und bei Geschwindigkeiten bis zu 130 km/h geprüft werden kann.

Somit stellt der lenkbare Funktionsprüfstand nicht nur ein wertvolles Werkzeug zur Validierung des „autonomen Fahrens“ in der Zukunft dar, sondern ermöglicht jetzt