

Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Jan Schenk

aus

Madrid / E

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Burkhard Corves
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Henning Wallentowitz

Tag der mündlichen Prüfung : Dienstag, 13. November 2007

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion

mit 128 Seiten, 53 Abbildungen und 5 Tabellen

Für die Dokumentation:

EU-Projekt SPARC / EU-Projekt PEIT / mechatronische Antriebstrangkomponenten / Drive-by-Wire / unfallvermeidendes Fahrzeug / virtueller Beifahrer / V-Prozess / (Fahrer-) Assistenzsysteme / Fahrzeugentwicklung / Fahrzeug(serien)produktion / Prüfverfahren / durchgängiges Prüfkonzept / Vehicle Hardware in the Loop (VeHiL) / Bandendeprüfung / Inline Prüfung / Fahrzeugprüfungen in der Montagelinie / Inline Function Tester (IFT) / Inline Driver Assistant Systems Alignment Rig (IDAS) / Inline Wheel Aligner (IWA)

Zusammenfassung:

In einer modernen Oberklasselimosine befinden sich heute 80 - 100 Steuergeräte und über 10 Kommunikationsbusse. Die wachsende Zahl miteinander in Verbindung stehender, elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen erzeugt eine hohe Systemkomplexität und damit einhergehend exponentiell wachsende Fehlerwahrscheinlichkeiten. Systemausfälle bis hin zu elektronisch komplett „kollabierenden“ Fahrzeugen sind der Automobilindustrie in den letzten Jahren nicht unbekannt und verursachen markenübergreifend Probleme. Teure Rückrufaktionen, verspätete Serienanläufe und Kundenunzufriedenheit sind nur einige der Folgen dieser fortschreitenden Entwicklung. Zuverlässigkeit ist daher heute ein viel verwendeter Begriff.

Gerade im Hinblick auf zunehmend in den Markt drängende Fahrerassistenzsysteme und dem damit in Zusammenhang stehenden Aufkommen präventiver Unfallvermeidungssysteme ist eine hohe Systemstabilität wichtiger denn je. Um die Zuverlässigkeit zukünftiger Fahrzeuggenerationen mit Komponenten auf mechatronischer Basis und softwarebasierten Regelungen sicher zu stellen, wird in dieser Arbeit eine von der frühen Entwicklung solcher Systeme bis in die Fahrzeugserienproduktion durchgängige Prüfplattform dargestellt. Darüber hinaus wird ein vollautomatisierbares Prüf- und Einstellkonzept für das Bandende der Fahrzeugserienproduktion vorgestellt.

Test Platform for Vehicles equipped with mechatronical Components within the Development and the Production Process

consisting of 128 pages, 53 pictures and 5 tables

For the Documentation:

EU-Project SPARC / EU-Project PEIT / Mechatronical Powertrain Components / Drive-by-Wire / accident-avoiding Vehicle / virtual Co-pilot / V-Prozess / (Driver-) Assistant Systems / Vehicle Development Process / Vehicle (Series) Production / Integrated Test Concept / Vehicle Hardware in the Loop (VeHiL) / End of Line Test / Inline Test / Vehicle Testing within the Production Line / Inline Function Tester (IFT) / Inline Driver Assistant Systems Alignment Rig (IDAS) / Inline Wheel Aligner (IWA)

Abstract:

In nowadays' upper-class vehicles more than 80 - 100 control devices and over 10 communication bus systems are integrated. The increasing number of electrical systems with the need of interactive communication generates a high system complexity and with this an exponential growing error possibility is emerging. Today, system failures up to complete electrical system breakdowns are well known to any original equipment manufacturer (OEM). This causes expensive recalls, belated series releases and a growing number of unsatisfied customers. Therefore, nowadays' reliability is a term getting more and more common.

Taking into consideration the increasing number of driver assistant systems rising into the market and owing to the fact that, with these systems, new accident avoiding preventive-active security systems are approaching a high system reliability is getting more and more important but cannot be guaranteed by now. At least not by following today's integration philosophies of almost any OEM. To increase the reliability of future vehicle generations equipped with mechatronical components and solely software based security and control algorithms, this thesis introduces an integrated test platform. This test platform is usable from the early stage of development through the overall process up to the vehicles "End of Line" test and alignment work scopes within the series production. Moreover, this document shows a complete new and fully automated and integrated End of Line test and alignment process.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner dreijährigen Tätigkeit am Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik (IGM) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen in enger Zusammenarbeit mit der Firma Dürr Assembly Products GmbH, Püttlingen, bei der ich während der gesamten Zeit als Mitarbeiter der Abteilung Entwicklung und Produktmanagement beschäftigt war. Die Arbeit wurde unter anderem auf den Erkenntnissen des im 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union teilfinanzierten Projekts SPARC - Secure Propulsion using Advanced Redundant Control - aufgebaut.

An dieser Stelle gilt mein großer Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, der sich bereit erklärte, den Vorsitz des Prüfungskomitees zu übernehmen. Überdies danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Burkhard Corves, Leiter des IGM / RWTH Aachen, für die Betreuung und fachliche Unterstützung der Arbeit sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Henning Wallentowitz, Leiter des Institutes für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen, für die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Gernot Spiegelberg für die große Unterstützung und die ständige Diskussionsbereitschaft sowie für die wertvollen Anregungen und Hinweise, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Ein besonderer Dank gilt den Herren Dr.-Ing. Rainer Müller, technischer Leiter der Firma Dürr AG und Dr. rer. nat. Thomas Tentrup, Leiter der Abteilung Entwicklung und Produktmanagement der Firma Dürr Assembly Products GmbH, ohne die diese Arbeit in diesem Rahmen nicht hätte zustande kommen können.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Armin A. Sulzmann von der Daimler Chrysler AG sowie bei den Herren Dipl.-Ing. Klaus Pozzi und Dipl.-Ing. (FH) Heiko Hell für die ständige Unterstützung und die nicht enden wollende Geduld bei allen meinen Fragen zum Thema Fahrzeugprüfung und Fahrzeugprüfständen bedanken. Hier habe ich sehr viel zum Thema „kostenbewusste Fahrzeugserienproduktion“ und „Prüfbarkeit“ erlernt.

Ein weiterer Dank gilt den Herren Dipl.-Ing. Heinz Kappel, Dipl.-Ing. Ismail Kurt, Dipl.-Ing. (FH) Timm Morawietz und Robert Syrnik für die Unterstützung und die wertvollen Beiträge zu dieser Arbeit sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Firma Dürr Assembly Products GmbH, der Abteilung TPE / VES der Daimler Chrysler AG und allen Mitgliedern des SPARC Konsortiums.

Weinstadt, 30. Jan. 2008

Jan Schenk

Never change your passion for glory.

Frei nach "Survivor"

1.	Einleitung.....	11
2.	Grundlagen und Grundgedanken der Arbeit.....	18
2.1.	Motivation und ethischer Ansatz.....	18
2.2.	Beschreibung der EU-Projekte PEIT und SPARC	19
2.3.	Das in SPARC vorgestellte Fahrzeugkonzept.....	21
2.3.1.	Grundgedanken des unfallvermeidenden Fahrens - Das EU-Projekt SPARC	21
2.4.	Funktionsweise und Kalibrierung heutiger und zukünftiger (Fahrer-) Assistenzsysteme.....	24
2.5.	Stand der Technik in Bezug auf die Fahrzeugserienproduktion	26
2.6.	Stand der Technik in Bezug auf die Fahrzeugentwicklung.....	33
2.7.	Themenübersicht und Ziel dieser Arbeit	34
3.	Integration einer Fehlervermeidungsstrategie	37
3.1.	Einleitende Informationen zur FMEA und FTA.....	37
3.2.	Herausforderungen heutiger Prüftechnik	39
3.3.	Der moderne Produktentwicklungsprozess.....	40
3.4.	Anwendung auf das in SPARC beschriebene Fahrzeugkonzept.....	42
4.	Prüfstandssystematik - eine Klassifizierung	45
4.1.	Simulation von dynamischen Fahrparametern und einer fiktiven Umgebung zur autonomen Fahrzeugprüfung	49
4.2.	Simulation relevanter Fahrparameter auf einem Vollfahrzeugprüfstand.....	51
4.3.	Zusätzliche Vorteile eines vollständig mechatronischen Fahrzeugs in der Produktion	56
5.	Der Vehicle in the Loop (ViL) Funktionstester	57
5.1.	Grundlagen des ViL-Prüfstands.....	57
5.2.	Der auf PKW optimierte sPC-ViL.....	61
5.2.1.	Die Vorderachs-Belastungseinheiten am sPC-ViL.....	64
5.2.2.	Prüf- und Kraftübertragung des ViL bei verschiedenen Fahrzeugtypen.....	72
5.2.2.1.	Bestimmung des notwendigen Massenträgheitsmoments.....	79
6.	Der InLine Function Tester - ein Produktionsprüfstand nach dem ViL-Prinzip ..	82
6.1.	Der Aufbau des InLine Function Testers (IFT).....	83
6.1.1.	Die Belastungseinheiten des IFT	84
6.2.	Der InLine Function Tester für höhenveränderliche Gehängeförderer	87
6.3.	Grundlegende Überlegungen zum Einsatz eines Fahrzeugprüfstandes in der Montagelinie.....	88
6.4.	Einbindung des IFT in eine Montagelinie	98
6.5.	Wirtschaftliche Betrachtungen der Integration von Prüfumfängen in die Montagelinie.....	101

6.5.1.	In der Studie bewertete Komponenten und Varianten	102
6.5.2.	Durchführung der Studie und Ergebnis der Bewertung	106
6.5.2.1.	Taktzeit 70 Sekunden.....	106
6.5.2.2.	Taktzeit > 210 Sekunden.....	107
6.6.	Das durchgängige InLine Prüf- und Einstellkonzept.....	107
6.6.1.	IWA - InLine Wheel Aligner	108
6.6.2.	IDAS - InLine Driver Assistent Systems Alignment Rig	110
6.6.3.	IFT - InLine Function Tester	111
6.7.	Ein vollautomatisierbares InLine-Adaptionskonzept.....	115
6.7.1.	Der Nullpunktspanner	118
6.7.2.	Das Gehäuse um den Nullpunktspanner	120
6.7.3.	Die Luftzufuhreinheit.....	122
6.7.4.	Der Radadapter / die Adapterscheibe	124
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	126
8.	Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	129
8.1.	Quellennachweis und Literaturverzeichnis.....	131

1. Einleitung

Seit langer Zeit denkt der Mensch mit wachsendem Erfolg darüber nach, wie er seine eigene Mobilität verbessern kann, um sich schneller und effektiver von einem Ort zu einem anderen zu bewegen. Auch der effektive Transport von Gütern, den eigenen und solchen zu Handelszwecken, spielt in diesen Überlegungen eine entscheidende Rolle.

Nach der Nutzung des Pferdes und der Erfindung der Kutsche wurden später erste Verbrennungsmotoren in „Fortbewegungsmaschinen“ integriert. Die Verfügbarkeit, die Transportgeschwindigkeit und die Menge der zu befördernden Güter stieg seitdem stetig an. Daraus resultierend wuchsen aber auch die Kollisionsgeschwindigkeit der Transportmittel und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Insassen selbst. Es wurde begonnen, über die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer nachzudenken. Diese wurde zuerst über die Erhöhung der Stabilität des Fahrzeuges und dessen sicherheitskritischer Komponenten (Lenkung, Reifen, Bremsen, Karosserie) selber gewährleistet /1/. Damit einhergehend konnte die Unfall- sowie die Ausfallhäufigkeit von Fahrzeugen aufgrund mechanischer Materialausfälle durch neue Entwicklungen (z. B. Achsen aus Metall usw.) drastisch gesenkt werden.

Seitdem viele Jahre später beispielsweise mit der automatischen Einstellung des Zündzeitpunktes und der Einspritzmenge erste „Fahrerassistenzsysteme“ in Form von einfachen „Motorsteuergeräten“ Einzug in den Automobilbau hielten, vereinfachte sich die eigentliche Fahraufgabe des Fahrzeugsteuerers immer weiter. Verbesserte, vorgeschriebene Fahrerausbildung, das Aufkommen des Tachographen sowie gesetzliche Regelungen für maximal erlaubte Fahrgeschwindigkeiten und ein Mindestmaß an passiver Sicherheit sowie vorgeschriebener Rückhaltesysteme (Kopfstützen, Gurte) erleichtern es seither dem Fahrer, sich zurechtzufinden und auf seine Fahraufgabe zu konzentrieren. Somit wird er in die Lage versetzt, sein Fahrzeug und sich selbst sicherer durch den Verkehr zu bewegen. Anzeigesysteme wie Bremsleuchten und Fahrtrichtungsanzeiger (Blinker) verdeutlichen überdies den Bewegungswunsch eines Fahrers für den allgemeinen Verkehr. Dies ist auch notwendig, da sich immer mehr Fahrzeuge mit zunehmend höheren Geschwindigkeiten über die bestehenden infrastrukturellen Strukturen bewegen. Die Verkehrsdichte nimmt gerade in den letzten Jahren beträchtlich zu (**Abbildung 1**, /2/).

In Verbindung mit immer höheren Fahrgeschwindigkeiten lässt sich leicht überlegen, dass die Zahl der Unfälle und damit die Anzahl der Verletzten sowie die Menge der Verkehrsstaues immer weiter ansteigen /3/. Wesentliche Gründe dafür werden trotz der beschriebenen „Fahrhilfen“ in menschlichem Versagen gesehen /4/.

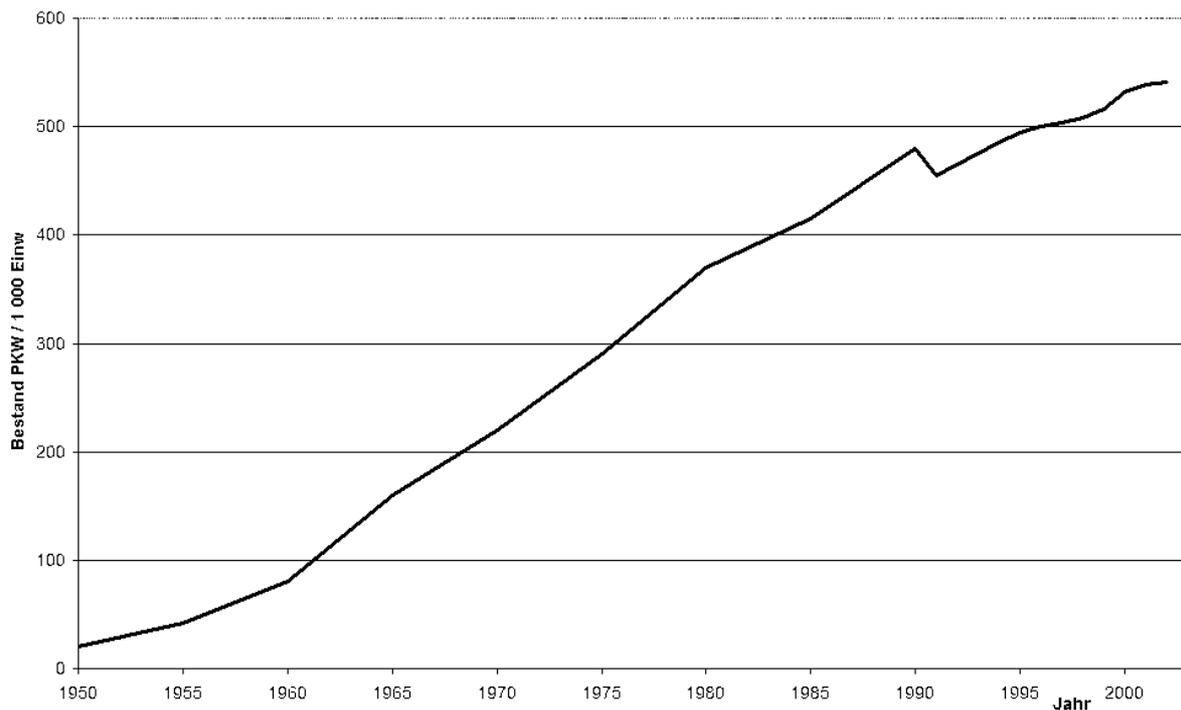


Abbildung 1 Entwicklung der PKW-Dichte in Deutschland /2/

Gegen die steigende Anzahl von Verletzten haben die Automobilhersteller nach und nach zuerst Rückhaltesysteme (Gurte mit Gurtstraffern) und dann passive, also erst nach dem eigentlichen Unfall wirksam werdende Sicherheitssysteme (Airbags, progressive Knautschzonen, etc.) entwickelt. Seit einigen Jahren mehrt sich zudem die Integration von reaktiv-aktiven Sicherheitssystemen (beispielsweise ABS, ESP oder Notbremsassistenten). Solche Systeme greifen dann ein, wenn das Fahrzeug aufgrund eines Fahrfehlers oder einer zu späten oder zu heftigen Reaktion des Fahrers in eine instabile oder fahrdynamisch kritische Fahrsituation gesteuert wurde. Sie versuchen durch Ausnutzung der Reibwerte bis an die gegebenen Grenzen der Physik die Fahrstabilität wieder herzustellen oder die Folgen eines drohenden Aufpralls bereits vor dem Aufprall zu minimieren. Dies geschieht, indem dem Fahrzeug vor dem eigentlichen Unfall soviel kinetische Energie wie möglich entzogen wird. Die Erfolge dieser Entwicklungen sprechen für sich, denn die Anzahl der Verletzten, bedingt durch Verkehrsunfälle, sinkt seit dem letzten Jahr wieder /2/.

Die Anzahl, Länge und Dauer der Verkehrsstaus sinkt jedoch nicht in damit vergleichbarem Maße und droht mit der wachsenden Menge an Fahrzeugen weiter anzusteigen. Dies führt zu nicht unerheblichen volkswirtschaftlichen Schäden und erhöhter Schadstoffbelastung; gerade in den Gebieten um die Ballungsräume.

Um dahingehend Abhilfe zu schaffen und um die Fahraufgabe weiter zu erleichtern, entwickeln viele Automobilhersteller (OEM), teilweise unterstützt durch finanzielle För-

derprogramme der Europäischen Kommission, in der neuesten Zeit Fahrerassistenzsysteme, die weit über Motor- und Getriebesteuerungen, ABS, ESP sowie hell leuchtende Xenon-Scheinwerfertechnologien hinausgehen. Solche Systeme verbessern neben der Sicherheit vor allem die Komfortsituation und damit die Konditionierung des Fahrers erheblich und senken somit nachweislich auch die Unfallzahlen und die Auswirkungen der Unfälle.

Auch GPS-Navigationssysteme sind inzwischen weithin bekannt. Sie helfen dem Fahrer bei der Fahraufgabe hinsichtlich der Navigation und der Zielfindung und sie sind zudem in der Lage, in bestimmten Grenzen frühzeitig gemeldete Verkehrsstörungen wirksam und mit vertretbarem Mehraufwand an Fahrstrecke und Zeit zu umfahren. In der Ober- und Luxusklasse sowie bei modernen Lastkraftwagen sind überdies Begriffe wie der eines ACC - Adaptive Cruise Control (also ein automatischer Abstandhalter) keine Fremdwörter mehr. Solche Systeme halten unter bestimmten Voraussetzungen den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug konstant und können als ACC „Stop&Go“ sogar eine Kriechfahrt in einem Stau mit Hilfe von automatischem Bremseneingriff bis hin zum kompletten Fahrzeugstillstand erheblich erleichtern.

Zur weitergehenden Vermeidung von Unfällen werden in modernen Fahrzeugen Fahrerassistenzsysteme wie beispielsweise LDW - Lane Departure Warning (ein Spurführungsassistent), SWA - Spur Wechsel Assistenten oder Nachtfahrassistenten „NightVision“ eingesetzt bzw. als Sonderzubehör angeboten. Diese Systeme verbessern die Sicht in für den Menschen ungünstigen Situationen (z.B. bei Dunkelheit) und helfen, Unfälle oder gefährliche Situationen aufgrund von eigener Unachtsamkeit weiter zu minimieren. Dies geschieht, indem der Fahrer beispielsweise bei offenkundig unabsichtlichem Verlassen der Fahrspur durch das System gewarnt wird (LDW) oder beim Spurwechsel auf sehr schnell rückwärtig herannahende oder sich im „toten Winkel“ befindliche Verkehrsteilnehmer aufmerksam gemacht wird (SWA).

Weitere (Fahrer-) Assistenzsysteme wie akustische Einparkhilfen, Rückfahrkameras oder Tempomaten können heute in nahezu jedes Fahrzeugmodell eingebaut werden. Sie sind bereits weit verbreitet und werden in den nächsten Jahren eine immer stärkere Marktdurchdringung aufweisen.

Um die Zahl der Unfälle aber signifikant und nachhaltig zu verringern zeigen heute einschlägig bekannte Statistiken und Studien, dass warnende Assistenzsysteme, wie oben beschrieben, diese Aufgabe nur zu einem gewissen Prozentsatz erfüllen können /1/. Daher arbeitet die Automobilindustrie verstärkt an so genannten prädiktiv-aktiven Sicherheitssystemen. Diese Systeme sind in der Lage, in das Fahrgeschehen dahingehend einzugreifen, dass es erst gar nicht zu einem Unfall kommt. Sie warnen

den Fahrer nicht nur vor einer gefährlichen Situation, sie können in einem weiteren Schritt auch in die Fahrdynamik bzw. in die Fahrstrategie eingreifen. Eine Voraussetzung hierfür ist die Integration von modernen Fahrerassistenzsystemen. Diese ermöglichen dem Fahrzeug das „Erkennen“ und „Bewerten“ der Umwelt. Weiterhin werden dazu intelligente Elektroniken benötigt, welche die gewonnenen Umfelddaten sinnvoll zusammenführen und daraus eine mögliche Bewegungsstrategie ableiten. Der Einsatz neuartiger, mechatronischer Systeme ist eine notwendige Folge daraus oder besser gesagt, eine Voraussetzung für eine wirtschaftlich und technisch sinnvolle Integration solcher vernetzter Assistenzsysteme.

Diverse Sonderforschungs-, Entwicklungs- und EU-Projekte befassen sich daher mit der Thematik eines „sehenden, fühlenden und denkenden“ Fahrzeugs. Beispiele sind hier das Sonderforschungsprojekt „kognitives Automobil“ /5/, Forschungsarbeiten wie „Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein fahrermodellbasierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven Fahrerassistenzsystemen“ /6/ oder die EU-Projekte PEIT - Powertrain Equipped with Intelligent Technologies - (2001 bis 2003) /7/ und SPARC - Secure Propulsion using Advanced Redundant Control - /7a/ in dessen Rahmen und basierend auf dessen Annahmen, Erkenntnissen und Entwicklungen die vorliegende Dissertation angefertigt wurde. Es soll jedoch ausdrücklich betont werden, dass die vorliegende Arbeit im Hinblick auf deren Aussagen in Bezug auf die Fahrzeugentwicklung und Fahrzeugserienproduktion nicht ausschließlich in SPARC verwendbar ist sondern deutlichen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhebt.

Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle ebenfalls das Projekt „Proreta“. Dieses von der Volkswagen AG geführte Projekt hat einen Prototypen eines „selbstaussweichenden Fahrzeuges“ entwickelt /7b/. Die in diesem Fall verwendeten Sensoren (Lidar und Kameras) werden im Gegensatz zu SPARC jedoch singulär ins Fahrzeug integriert und auf die vorhandene, klassische Infrastruktur aufgesetzt. Ebenso wird mit der verwendeten Aktuatorik verfahren, beispielsweise einer elektromotorischen Überlagerungslenkung zur Realisierung einer autonomen Ausweichfunktion.

Basierend auf der herkömmlichen Integrationsphilosophie der meisten OEM, nämlich elektrische und elektronische Systeme wie die oben genannten Fahrerassistenzsysteme singulär in die bestehende Fahrzeuginfrastruktur zu integrieren, sei die Frage nach der Systemstabilität erlaubt. In einer modernen Oberklasselimousine befinden sich heute etwa 80 - 100 Steuergeräte und über 10 Kommunikationsadern (z.B. CAN-Bus), über welche diese miteinander verbunden sind, kommunizieren und in mehr oder weniger direkter Interaktion stehen. Eine wachsende Anzahl miteinander in Verbindung stehender, elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen erzeugt aber eine hohe Systemkomplexität und damit einhergehend exponentiell wachsende Feh-

lerwahrscheinlichkeiten /8/, die es gilt, mit Hilfe neuer Methoden und Werkzeuge sehr schnell und effektiv wieder zu reduzieren.

Systemausfälle bis hin zu elektronisch komplett „kollabierenden“ Fahrzeugen sind der Automobilindustrie in den letzten Jahren nicht unbekannt und verursachen markenübergreifend Probleme. Teure Rückrufaktionen, verspätete Serienanläufe und wachsende Kundenunzufriedenheit sind nur einige der Folgen dieser fortschreitenden Entwicklung. Zuverlässigkeit ist daher in der heutigen Zeit ein in diesem Zusammenhang gerne verwendeter Begriff. In der Literatur wird er folgendermaßen definiert:

„Zuverlässigkeit (auch Verlässlichkeit) ist der Umfang, in dem von einem System erwartet werden kann, dass es die beabsichtigte Funktion mit der erforderlichen Genauigkeit über den Einsatzzeitraum ausführt. Sie umfasst Korrektheit, Robustheit und Ausfallsicherheit.“

Auch in der Automobilentwicklung spielt die Zuverlässigkeit eine immer bedeutendere Rolle. Kundenumfragen benennen die Zuverlässigkeit als die wichtigste Produkteigenschaft beim Kauf eines neuen Fahrzeugs (**Abbildung 2**, /9/).

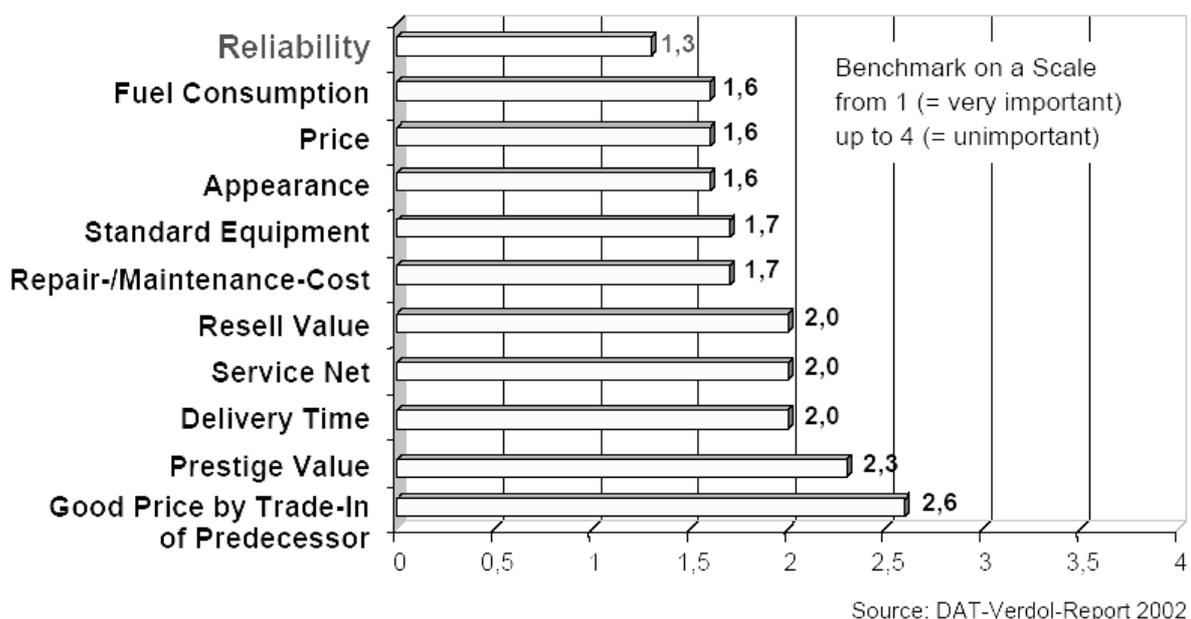


Abbildung 2 Kriterien beim PKW-Kauf /9/

Der verstärkte Einsatz moderner Technologien, also das zunehmende Aufkommen von elektronischen und elektrischen Komponenten sowie von immer stärker softwarebasierten Steuerungen und Regelungen der Systeme wird durch die damit einhergehende Zunahme der Komplexität und der Vernetzung der Systeme untereinander zu einem kritischen Faktor.

Die in der Vergangenheit demonstrierte Unterschätzung dieser Komplexität und das fehlende Qualitätsbewusstsein während der frühen Entwicklungsphasen kann nicht alleine durch die Ausweitung der im späteren Fahrzeug durchgeführten Tests kompensiert werden. Dies führte in der jüngsten Vergangenheit zu wachsenden Fehlerwahrscheinlichkeiten und daraus resultierend zu steigenden Qualitäts- bzw. Zuverlässigkeitsproblemen bei der Herstellung der Fahrzeuge /8/. Daraus resultierend ergibt sich ein langjähriger Trend steigender Zahlen der vom Kraftfahrtbundesamt unterstützten Rückrufaktionen, der sich auch im Jahr 2004 fortsetzte /2/. **Abbildung 3** verdeutlicht dies.

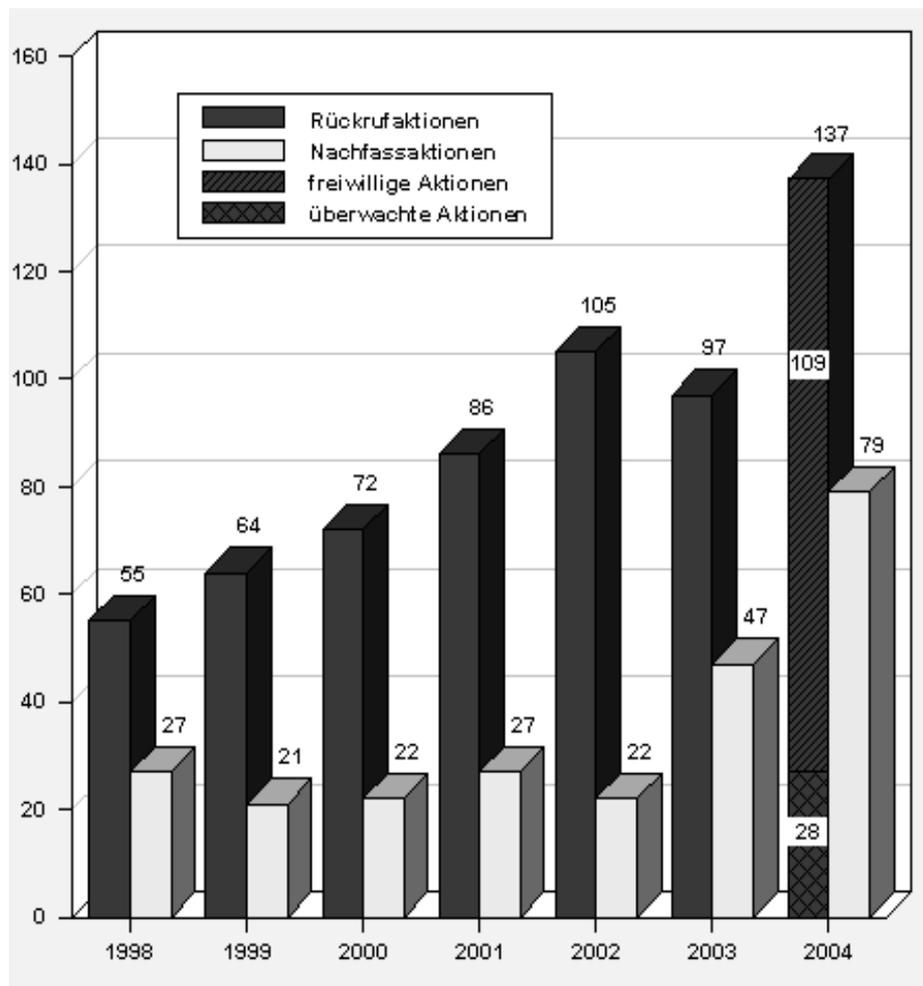


Abbildung 3 Entwicklung der Rückrufaktionen 1998 - 2004 /2/

Die damit unweigerlich verbundenen Gewährleistungs- und Kulanzkosten (G&K-Kosten¹) für die Hersteller liegen inzwischen in der Größenordnung des Gewinns und fordern somit etwa 8 - 12% des Umsatzes /10/. 137 Rückrufaktionen führten im Jahr 2004 zu einem Anstieg von 41% bei den Rückrufaktionen im Vergleich zum Vorjahr /11/.

¹ G&K Kosten sind Kosten, die im Hinblick auf Gewährleistung und Kulanz entstehen, also im Hinblick auf nachträglich durchgeführte Reparaturen an bereits an den Endkunden verkauften Fahrzeugen. Hier werden größtenteils solche Reparaturen durchgeführt, die nachweislich auf einen Fehler beim Hersteller zurückzuführen sind.

Um dieser Thematik sinnvoll Rechnung zu tragen, muss bereits im frühen Entwicklungsprozess angesetzt werden. Dafür müssen im Bereich der Fahrzeugprüfungen Prüfabläufe, welche die sichere Funktion der einzelnen Baugruppen der bis zu diesem Entwicklungszeitpunkt verfügbaren Gesamtfunktionalität überprüfen, so früh wie möglich in den Fahrzeugentwicklungsprozess integriert werden. Parallel dazu muss die in den Fahrzeugen vorherrschende Komplexität signifikant reduziert werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt Möglichkeiten auf, wie mit der Verwendung einer einheitlichen Prüfphilosophie der oben beschriebenen, negativ zu betrachtenden Entwicklung in Bezug auf Systemausfälle wirkungsvoll entgegen getreten werden kann. Diese Prüfphilosophie kann durchgängig von der frühen Entwicklung solcher Systeme bis hin zum Bandendetest und den dort durchgeführten Einstell- und Kalibrierprozessen in der Fahrzeugserienproduktion angewendet werden. Die Arbeit beschreibt den theoretischen Prozess einer frühen Integration von fehlererkennenden Tools in den (Software-)Entwicklungsprozess entlang des V-Prozesses (VDI 2206).

Als Schwerpunkt der Arbeit wird dabei der Aufbau eines neuartigen Prüfstandes (ViL - Vehicle in the Loop) für den Entwicklungsprozess beschrieben, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen wurde. Daraus direkt abgeleitet wird ein vollautomatisierbares InLine Prüf- und Einstellkonzept für die Fahrzeugserienproduktion und die dort durchgeführte Bandendekontrolle entwickelt. Ferner wird dessen Wirtschaftlichkeit nachgewiesen. Gemeinsam mit der schnellen Entwicklung innovativer Assistenzsysteme entsteht somit ein hocheffizientes Konzept zur Prüfung und Einstellung von Fahrzeugen und Fahrerassistenzsystemen von der frühen Entwicklung bis zum Bandende der Fahrzeugserienproduktion.

Mit dieser Arbeit wird also ein lückenloses und durchgängiges (Prüf-) Konzept für die Optimierung elektronischer und mechatronischer Fahrzeugkomponenten von deren frühen Entwicklung über deren entwicklungsbezogene Testabläufe bis hin zu deren Serieneinbau aufgezeigt. Gleichzeitig wird gezeigt, wie das neue InLine Prüf- und Einstellkonzept bereits heute die Serienfertigung über darin enthaltenen Prüf- und Einstellvorgänge erleichtern, verbessern und kostengünstiger gestalten kann. Die Entwicklung und Umsetzung dieses integrierten und durchgängigen Prüfkonzeptes, welches ebenfalls die Möglichkeit beinhaltet, heutige Belange in Bezug auf die Fahrzeugprüf- und Einstelltechnik abzudecken, ist das Ziel der durchgeführten Arbeit.

2. Grundlagen und Grundgedanken der Arbeit

2.1. Motivation und ethischer Ansatz

In Deutschland gibt laut Verdol Report 2002 jährlich etwa 60.000 verletzte, schwerverletzte und getötete Personen im Straßenverkehr. Lediglich 0,9% aller Unfälle mit Personenschäden werden dabei durch technisches Versagen der Fahrzeuge selber verursacht; die meisten davon sind dabei Reifenschäden. 97% dieser Unfälle werden auf menschliches Versagen zurückgeführt /2/. Mit dem Bestreben der EU-Kommission in Brüssel, die Zahl der Unfalltoten bis 2010 um 50% zu reduzieren, wird die Entwicklung unfallvermeidender Technologien durch entsprechend finanzierte EU-Projekte forciert. Die Aufgabe der Automobilhersteller soll in diesem Zusammenhang in der Vermeidung von Fahrfehlern durch optimale Fahrerunterstützung über intelligente Assistenz- und Anzeigesysteme bestehen.

Mit innovativen Technologien und neuen, auf Mechatronik basierenden Komponenten wird daher in den EU-Projekten PEIT und SPARC das Konzept eines unfallvermeidenden Fahrzeugs aufgebaut, welches den Fahrer bestmöglich bei seiner Fahraufgabe unterstützt. Dies kann einerseits durch Erhöhung des Fahrkomforts erfolgen, welcher die Konditionierung des Fahrers deutlich anhebt. Andererseits weist man den Fahrer mit neuen Technologien frühzeitig auf kritische Situationen hin und unterstützt ihn durch regelnde Systeme im Antriebstrang und in der Fahrstrategieebene bis hin zum unfallvermeidenden Eingriff in die Fahrdynamik.

Mechatronische Systeme im Kraftfahrzeug sind seit einiger Zeit im Einsatz und bewähren sich zunehmend in den verschiedensten Fahrzeugbereichen. Sie finden sich im Antriebsstrang sowie in der gesamten Systemarchitektur heutiger Fahrzeuge sowie in Fahrerassistenzsystemen. Es handelt sich dabei grundsätzlich um Systeme, die auf einer mechanischen Basis mit Hilfe von Elektronik zu einem Mehrwert geführt werden. Das bedeutet, dass durch elektronische Steuerungen mechanisch komplexe Systeme einfacher, zuverlässiger und funktioneller gestaltet werden.

Noch ist nicht allgemein anerkannt, welche Vorteile durch solche Drive-by-Wire Konzepte in der Fahrzeugtechnologie darstellbar sind und welche Sicherheitserhöhung realisierbar sein wird. Hier muss jedoch zukünftig die Frage gestellt werden, ob es vor dem Hintergrund der Anzahl von vermeidbaren Unfällen noch sicher sein wird, rein mechanisch gesteuerte Systeme in Kraftfahrzeuge einzubauen, wenn durch elektronisch unterstützende Systeme die Sicherheit signifikant erhöht werden kann /1,12/. Eine Antwort hierauf kann durch die konsequente Realisierung derartiger Sys-

teme gefunden und deren Akzeptanz durch entsprechende Demonstrationen angehoben werden.

Die beabsichtigte Senkung der Zahl der Unfallopfer kann hierbei prinzipiell über zwei Wege verfolgt werden: Erhöhung der passiven und der aktiven Sicherheit. Besonders Augenmerk wird auf die aktiv vermeidbaren Unfälle gelegt. Die konsequente Umsetzung der dahingehenden Ansätze bedingt die Integration umfangreicher mechatronischer Systeme ins Fahrzeug.

2.2. Beschreibung der EU-Projekte PEIT und SPARC

Zur Umsetzung dieser Gedanken wurden daher mit Beteiligung namhafter Lieferanten und Universitäten unter der Konsortialführerschaft der Daimler Chrysler AG die EU-geförderten Projekte PEIT und SPARC gestartet.

PEIT (Powertrain Equipped with Intelligent Technologies) wurde 2001 ins Leben gerufen und Ende 2004 erfolgreich abgeschlossen. Aufgabenstellung war die Entwicklung eines Antriebstrangs, der über eine definierte, digitale Schnittstelle mittels eines Bewegungsvektors rein elektronisch ansteuerbar ist (**Abbildung 4**, /7/).

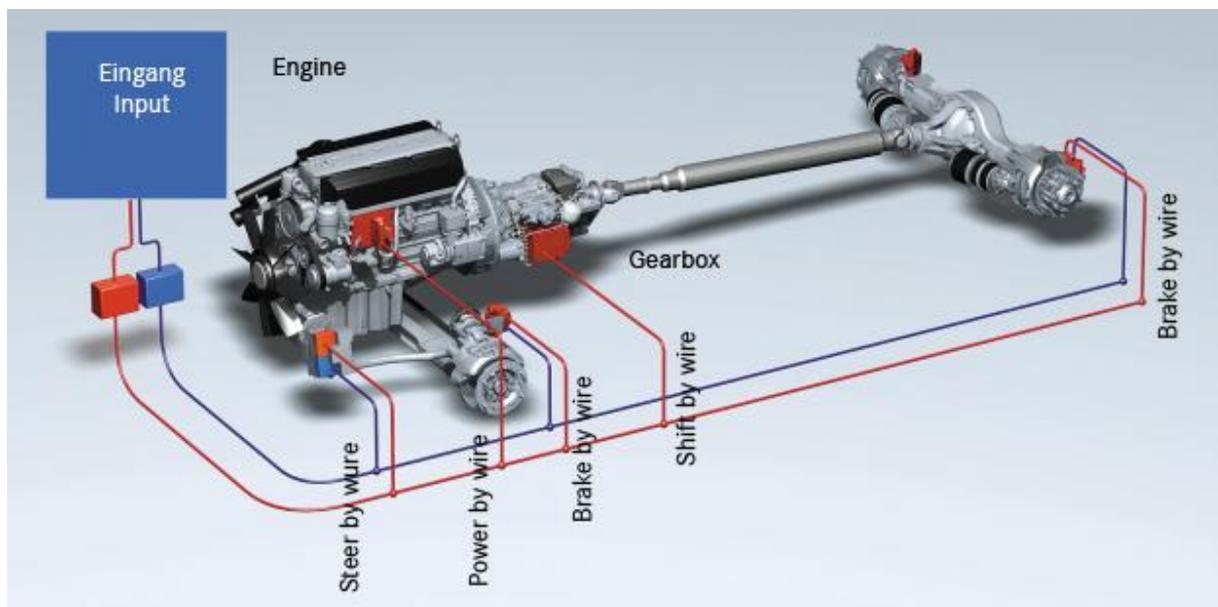


Abbildung 4 Doppelt redundant angelegte Powertrain Controller wandeln die Eingabebefehle in elektronische Impulse um, durch welche die einzelnen Komponenten des integrierten elektronischen Antriebstrangs direkt angesteuert werden /7/.

Ein Hauptziel von PEIT war die Schaffung einer Schnittstelle, auf die unabhängig vom darunter liegenden Antriebstrang Assistenzsysteme aufgesetzt werden können. Heutige Assistenzsysteme werden bis „hinab“ in die Aggregateebene entwickelt. Zur Einbindung eines Adaptive Cruise Control (ACC) ist heute die Abstimmung des Sys-

tems auf das Verhalten der Motorsteuerung und der Bremsensteuerung in das Fahrzeug notwendig. Aufgrund der digitalen Schnittstelle wird dies in PEIT stark vereinfacht. Hier muss das ACC dann nur den Bewegungsvektor variieren. Der Antriebsstrang setzt diesen dann durch koordinierte Ansteuerung der Aggregate Motor, Getriebe, Achsen mit Bremse und Lenkung eigenständig um.

Während das PEIT-Projekt im Wesentlichen den Aufbau des Antriebsstranges mit der Erhöhung der reaktiv-aktiven Sicherheit betraf, geht SPARC nun als Folgeprojekt seit Beginn 2004 in Richtung der Erhöhung der prädiktiv-aktiven Sicherheit über Assistenzsysteme für LKW (inklusive Anhänger) und PKW. SPARC steht für „Secure Propulsion using Advanced Redundant Control“, also sicherer (Fahrzeug-) Antrieb mit fortschrittlichen redundanten Regelungssystemen. Der zu Grunde liegende Aufbau wird anhand zweier Prototypen auf Basis eines Plattformkonzepts in einem LKW Mercedes Benz Actros und einem PKW MCC SMART zum Ende des Projekts im Jahre 2007 demonstriert.

Ziel ist es, die Synergieeffekte der Technologie so zu nutzen, dass teurere mechanische Elemente durch elektronische und informative Intelligenz ersetzt werden können. Weiter sollen Aufgaben und Technologien aus der Automobilforschung und der Vorentwicklung bezüglich Fahrerassistenz so zusammenzuführen, dass daraus serienentwicklungsfähige Systeme werden, die später ins Fahrzeug integriert werden können. Auf diese Art entstehen günstigere, weniger komplexe aber funktionellere Aggregate und Systeme. Bei SPARC geht es also um Assistenzsysteme, Umfeldbewertung und Sensoren, die in der späteren Serienproduktion wie bereits erwähnt skaliert, bzw. kalibriert und getestet werden müssen.

Durch den Einsatz solcher zusätzlichen Systeme im Fahrzeug wird dessen Komplexität jedoch zunächst einmal weiter erhöht. Dies bedeutet, es müssen innovative Testverfahren angewendet werden, um die auftretenden Fehlerwahrscheinlichkeiten weitgehend zu minimieren. Zudem werden heute bekannte Fahrerassistenzsysteme, die ausdrücklich den Komfort- oder Informationssystemen zugeordnet sind, durch die Verwendung als sichere Informationsquelle im „virtuellen Copiloten“ (→ Kapitel 2.3.1) in den Stand sicherheitstechnisch relevanter Systeme erhoben. Gerade im Hinblick darauf, dass diese Systeme weitgehend miteinander in Kommunikation stehen und aufgrund der ihnen zugeteilten Sicherheitsfunktionen im höchsten Maße gegen Fehlfunktion gesichert sein müssen, ist die Gewährleistung der Ausfallsicherheit eine zentrale und nicht zu unterschätzende Aufgabe.

Hier sollten bereits in der frühen Entwicklung Wege aufgezeigt werden, wie die Herausforderungen an die hohe Einstellgenauigkeit der Systeme unter produktionstechnischen Gesichtspunkten einfach und kostengünstig in Angriff genommen wer-

den können. Zusammen mit neuen Prüfverfahren und durchgängigen Strukturen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden, kann das gesetzte Ziel wirtschaftlich und zeitnah erreicht werden.

2.3. Das in SPARC vorgestellte Fahrzeugkonzept

Der vorliegende Abschnitt beschreibt kurz die Architektur des in SPARC vorgestellten, unfallvermeidenden Fahrzeugkonzeptes. Mit dem Themenaspekt der Sicherheit und der Verwendung mechatronischer Komponenten in sicherheitsrelevanten Fahrzeugsystemen muss jedoch über ihre Verfügbarkeit und damit im direkten logischen Schluss über die Notwendigkeit der Prüfung und Einstellung solcher Komponenten im systemübergreifenden Gesamtzusammenhang nachgedacht werden. Der nachfolgende Abschnitt 2.4 gibt also zudem Aufschluss darüber, wie singuläre Systeme heute in der Serienproduktion eingestellt werden und inwieweit an dieser Stelle zukünftig ein besonderes Augenmerk auf die Prüf- und Einstelltechnik integrierter Systeme gelegt werden muss.

2.3.1. Grundgedanken des unfallvermeidenden Fahrens - Das EU-Projekt SPARC

In Bezug auf den oben geschilderten Komplexitätszuwachs im Automobil ist aber leicht einzusehen, dass nur ein ganzheitlicher Ansatz bei der Integration der neuartigen Systeme eine gewünschte Verminderung der Komplexität und die Darstellbarkeit eines technischen Mehrwertes mit sich bringt. Zur Sicherstellung der in SPARC angestrebten Funktionalitäten des unfallvermeidenden Fahrzeuges ist unter anderem jedoch die Integration umfangreicher Assistenzsysteme in das Fahrzeug notwendig. Folgt man heute aktuellen Integrationsphilosophien, erhöht dies jedoch zuerst einmal theoretisch die Komplexität. Die Idee ist aber, eine Intelligenz durch die Vernetzung aller (Fahrer-) Assistenzsysteme darzustellen und somit einen virtuellen Beifahrer zu erzeugen, der dann rein informationstechnisch auf eine elektronisch redundant angelegte Infrastruktur aufgesetzt werden kann (**Abbildung 5**).

Die auf Basis von Kameras, Infrarot und Radar aufgebauten Assistenzsysteme, oder vielmehr deren Informationen auf digitaler, also informationstechnischer Basis, werden dabei fusioniert, digital aufeinander abgestimmt und weiter verarbeitet. Durch diese Zusammenführung aller Assistenzsysteme sollen dem Fahrzeug also „kognitive Fähigkeiten“ verliehen werden. Hierbei werden die Systemstufen Umfeldbeobachtung, Umfeldbewertung und Ermittlung der Bewegungsstrategie zu einem virtuellen Copiloten vereint. Dieser liefert parallel zum Fahrerwunschvektor, welchen der Fahrer über das Mensch-Maschine-Interface einsteuert, einen redundanten Bewegungsvektor.



Abbildung 5 Die in SPARC vorgestellte, integrale Struktur und die Aufteilung der Systeme im Fahrzeug sind durch klar definierte Schnittstellen und Strukturen gekennzeichnet. Die so begrenzte Ebenenarchitektur, in die der rein mechanische Antriebstrang mit eingebunden ist (unten), verringert im Vergleich zu heutigen Integrationsabläufen in starkem Maße die Komplexität des Gesamtfahrzeuges /7a/.

Beide Informationen werden nun einer nachgeschalteten Sicherheitsentscheidungsebene zugeführt. In Abhängigkeit der im virtuellen Copiloten integrierten Funktionen, der gesetzlichen Lage bezüglich deren genehmigter Funktionsbreite, der Fahrerconditionierung und der Fahrerakzeptanz wird ein abgesicherter Bewegungsvektor erzeugt.

Zukünftig werden zur Ergänzung und Erhöhung der Informationsdichte weitere Daten hinzukommen, die aus der elektronischen Kommunikation zwischen verschiedenen Fahrzeugen aus der direkten Umgebung (beispielsweise mit Hilfe von Telematik) oder der Kommunikation des Fahrzeuges mit der Infrastruktur („intelligente Infrastruktur“²) gewonnen werden können /13/. Somit ist der „virtuelle Copilot“ immer in der

² In Europa gibt es seit einigen Jahren diverse Forschungsprogramme zur Unterstützung der Unternehmen bei der Entwicklung und Erprobung systemintegrierter Telematikanwendungen im Verkehrssektor. Diese Programme beschäftigen sich mit dem Thema „intelligente Infrastruktur“. Hier geht es darum, dass Fahrzeuge über infrastrukturell vorhandene Einrichtungen (Leitplanken, Leitpfosten, Schilder, Ampeln etc.) über das aktuelle Geschehen in ihrer direkten Umgebung informiert werden. Die Infor-

Lage, einen im Vergleich zu seiner aktuellen Umwelt unfallvermeidenden, also sicheren Bewegungsvektor vorzuschlagen.

In SPARC werden dabei Systeme umgesetzt, die Fahrer- und Umfeldbeobachtungen vornehmen und bei Gefahr die Möglichkeit bieten, in die Situation einzugreifen oder in einem vorgelagerten Schritt den Fahrer über ein intelligentes Mensch-Maschine-Interface zu informieren bzw. zu warnen. In ihrer gesamten elektronischen Architektur doppelt ausgeführte, also redundante, Steuergeräte wandeln dazu die Befehle in elektronische Impulse um, welche die einzelnen Komponenten des in PEIT entwickelten, integrierten Antriebsstrangs direkt ansteuern. Der Antriebsstrang wird, dem SPARC-Konzept folgend, also lediglich durch einen Bewegungsvektor auf Basis von elektronischen Informationen gesteuert. Dieser Bewegungsvektor ist vom „mechatronischen Gesamtsystem Antriebsstrang“ auszuführen, und zwar so schnell wie möglich, so toleranzfrei wie möglich und so lange wie möglich. Der Triebstrang selber ist rein mechatronisch, also vollständig auf Drive-by-Wire-Basis, aufgebaut und seinerseits in klare Ebenen aufgeteilt (Abbildung 4). Diese Ebenen kommunizieren wiederum über definierte Schnittstellen. Diese sind von „oben“ nach „unten“:

- die Koordinationsebene
- die mechatronische Ebene, also die integrierten Funktionen und
- die Leistungsebene, also die Antriebsaggregate.

Dabei enthält die Koordinationsebene, auch „Powertrain Controller“ genannt, die Aufteilung des Bewegungsvektors in funktionsspezifische Befehle in Bezug auf die Längs- und Querdynamik sowie die zur optimalen Ausführung beider Bewegungsrichtungen optimale Vertikaldynamik. Diese wird aus der aktuellen Lageinformation des Fahrzeuges und anderen fahrdynamischen Parametern generiert. Die Koordinationsebene enthält also die Stabilitätsregelung für den aktuellen Fahrzustand und dient als „Dirigent“ der einzelnen mechatronischen Aggregate in der darunter liegenden Ebene.

Die mechatronische Ebene enthält die Aggregatekontrolle (Antriebsregelung) mit den integrierten Funktionen zur Steuerung der einzelnen Aggregate wie Motor, Getriebe, Achsen und Lenkung sowie beim LKW zusätzliche, produktspezifische Funktionen wie beispielsweise den Retarder. Die Leistungsebene setzt diese Befehle über die Aggregate um.

mation über dieses Geschehen wird dabei wiederum von Fahrzeugen, die kurz vorher an diesen Einrichtungen vorbeigefahren sind, sowie von übergeordneten Systemen (Verkehrsleitreechner etc.) zur Verfügung gestellt /13/. So ist es beispielsweise denkbar, dass ein erstes Fahrzeug die gemessene Information über den Reibwert in einer Kurve an die Leitplanke „funk“t. Die Information wird durch die Leitplanken (über die „50 m Pfosten“) zurückgeleitet. Einem nachfolgenden Fahrzeug steht diese Information dann bereits 300 m vor der Kurve zur Verfügung.

2.4. Funktionsweise und Kalibrierung heutiger und zukünftiger (Fahrer-) Assistenzsysteme

In „klassischen“ Fahrzeugen gibt der Fahrer über mechanische, teilweise regelungstechnisch unterstützte Bedienelemente (Lenkung, Pedale, usw.) einen Befehl an den Antriebsstrang. Dieser führt ihn aus, egal ob richtig oder falsch. Heutige Assistenzsysteme tragen bereits in gewissen Grenzen dazu bei, den Fahrer bei Unachtsamkeit oder Fehleinschätzung zu unterstützen. Solche Systeme, oder vielmehr deren Steuergeräte, kommunizieren dabei über einen so genannten CAN-Bus mit der Motorsteuerung, der Bremssteuerung und einem Dutzend anderer Systeme und Subsysteme. Alle Systeme dieser Art und sämtliche anderen, klassischen Fahrzeugsysteme (Airbag, Klimaanlage, Sitzheizung, ABS, ESP, ASR usw.) haben ihr eigenes Steuergerät.

Zukünftige Systeme werden zunehmend in die Lage versetzt, Umgebungsinformationen aufzunehmen und diese sinnvoll auszuwerten. Hierdurch können solchen Systemen mehr Informationen bereit stehen (z.B. durch Telematik) als der Fahrer selbst unmittelbar zur Verfügung hat. Kann somit über diese Assistenzsysteme die Entscheidungssituation zweifelsfrei beschrieben werden, beispielsweise in Situationen wie beim Bremsen vor einer Kurve, die zu schnell angefahren wird, sind Systeme denkbar, die dann intervenieren, wenn der Fahrer trotz aller Warnungen und Informationen bis zum „Point of no Return“ nicht selbstständig den Eingriff zur Vermeidung eines Unfalls vorgenommen hat.

Diese Technologie kann aber nur dann wirkungsvoll und vor allem ausfallsicher generiert und eingesetzt werden, wenn die Komplexität signifikant aus dem Gesamtsystem herausgenommen wird. Die Systeme müssen wieder übersichtlich und somit beherrschbar gemacht werden, sowohl von der Entwicklung als auch von der Produktion und vor allem von der Prüftechnik. Nur Systeme, die von Ihrer gesamten Struktur her und von der Kommunikationsinfrastruktur her übersichtlich gestaltet sind, können sicher eingesetzt und auf all Ihre „Schwachpunkte“ hin geprüft werden. Hinzu kommt, dass es in naher Zukunft Systeme geben wird, die durch die heutige Prüftechnik gar nicht beherrschbar sind. Das trifft umso mehr zu, je weiter in Richtung Produktion geschaut wird. Beispielsweise können Fahrdynamikunterstützungsfunktionen, die in die Querdynamik eingreifen, nicht auf modernen Rollenprüfständen getestet werden. Das Fahrzeug würde in wenigen Sekundenbruchteilen seitwärts aus dem Prüfstand ausbrechen. Heutige Lösungen bestehen darin, das Fahrzeug in einen Prüfmodus zu versetzen, der während der Prüfung diese unterstützenden Systeme ausschaltet. Sobald solche Systeme aber sicherheitsrelevant werden, müssen sie folglich am Bandende auf ihre sichere Funktion hin überprüft werden und dürfen während der Prüfung nicht mehr ausgeschaltet werden. Es muss zu jeder Zeit si-

chergestellt sein, dass der virtuelle Copilot immer eine eindeutig zuzuordnende Information erhält und diese jederzeit fehlerfrei umsetzen, also den Stellbefehl richtig in die Aggregatebene weiterleiten kann. Ein Ausfall oder eine Fehlfunktion eines der an der Datenfusion oder der Umsetzung des Stellbefehls beteiligten Systeme wäre also sicherheitskritisch und muss demnach sofort gemeldet werden. In der Zeit bis zur Instandsetzung oder bis zum Stillstand des Fahrzeuges, je nachdem, wie kritisch der Abbruch ist und welche Systeme beteiligt sind, übernimmt das redundante System die Aufgaben oder das Fahrzeug wird sicher angehalten und still gelegt. Diese Funktion muss sichergestellt sein.

Zur Einstellung von Fahrerassistenzsystemen in der Fahrzeugserienproduktion werden heute sogenannte FAS-Einstellstände in die Bandendesituation integriert. Eine solche Einstellung kann mitunter jedoch sehr lange dauern. Dies liegt darin begründet, dass diejenigen Fahrzeuge, die mit solchen Systemen ausgestattet werden (z. Zt. sind dies, je nach OEM, 15 - 27% der Oberklassefahrzeuge und 5 - 9% der Mittelklassefahrzeuge) über wenig exakte Führungsschienen, ähnlich wie bei einer Waschanlage, in die Einstellstände eingefahren werden. Das Fahrzeug kann also mitunter um einige Winkelgrade „schief“ im Prüfstand stehen. Dadurch bedingt wird der Messbereich der die Karosserie anmessenden Laser (→ Kapitel 2.5) größer gewählt als dies bei einer exakten Einbringung des Fahrzeuges in den Einstellstand notwendig wäre. Somit ist der Messbereich jedoch nicht mehr als hochgenau zu beschreiben. Die eingesetzten Messlaser sind Präzisionswerkzeuge mit einer hohen Genauigkeit. Wie aus der Messtechnik bekannt, ist es jedoch ein Widerspruch, ein Messgerät auf einen relativ großen Messbereich auszulegen und diesen Messbereich an jedem Punkt hochgenau und zudem linear bis an seine Grenzen zu gestalten.

Hinzu kommen die teilweise wenig durchdachten oder sehr aufwendigen Lösungen der Komponentenhersteller (Zulieferer) in Bezug auf die Einstellung und Kalibrierung der eingesetzten Assistenzsysteme. Für die aktuelle Verwendung von Fahrerassistenzsystemen als Komfortsysteme sind die zur Verfügung stehenden Einstellverfahren noch zufriedenstellend genau. Aufgrund der relativ geringen Verbaudichte in den Fahrzeugflotten können sich die Hersteller heute noch mit verhältnismäßig langen Einstellzeiten abfinden. Es ist jedoch absehbar, dass sich die Verbaudichte der Fahrerassistenzsysteme in den nächsten Jahren mehr als verdoppeln wird. Wird zudem ein flächendeckender Einsatz von Fahrerassistenzsystemen in allen Fahrzeugen einer Montagelinie angenommen (100% Verbaudichte) und wird zudem vorausgesetzt, dass diese Systeme in ein fahrzeugübergreifend vernetztes Sicherheitssystem integriert sind, genügen die heutigen Einstellbedingungen nicht mehr. An dieser Stelle kommen zwei Herausforderungen auf die Automobilindustrie zu:

Zum einen müssen bei jedem Fahrzeug alle vorhandenen Systeme taktzeitgerecht eingestellt werden. Das bedingt mindestens die Kalibrierung eines radarbasierten Abstandssystems, wenn nicht sogar eines kompletten „Radar-Rundum-Systems“, und einer Spurführungskamera sowie der Einstellung beider Systeme aufeinander (identisches Koordinatensystem) und auf die GPS-Information. Hinzu kommt, dass die Funktion sowie die Reaktionszeit des „Gesamtsystems“ überprüft werden muss.

Eine weitere Aufgabe wird in der Parametrierung, also im so genannten „Flashen“ des übergeordneten Systemsteuergerätes im taktzeitrelevanten Betrieb bestehen. Hinzu kommt die Dokumentation sowie die Archivierung der Einstelldaten, da diese Systeme nun, zumindest in SPARC, Sicherheitsrelevant sind.

2.5. Stand der Technik in Bezug auf die Fahrzeugserienproduktion

Laut Anhang 10 der Europäischen Rahmenrichtlinie 70/156/EWG ist im Automobilbau eine Baumusterkontrolle Vorschrift. Gemäß dieser Richtlinie müssen Fahrzeugprototypen bestimmten Tests, so genannten CoP (Conformity of Production) Maßnahmen, unterzogen werden /14/. Dazu werden Fahrzeugprototypen im letzten Stadium, also Vorserienfahrzeuge vor der ersten Kundenauslieferung, einem im Gesetztext definierten Prüfablauf unterzogen. Diese Fahrzeuge werden bereits über die eigentliche Produktionslinie hergestellt und montiert.

Alle Fahrzeughersteller führen zudem heute aus Gründen der Produkthaftung im Rahmen qualitätssichernder Maßnahmen eine umfangreiche Bandendequitätskontrolle der produzierten Fahrzeuge durch. Grundsätzlich werden hier wesentliche Funktionen des Fahrzeuges überprüft sowie der ordnungsgemäße Zusammenbau der einzelnen Fahrzeugkomponenten sichergestellt. Zu diesem Zweck werden Fahrzeuge nach erfolgter Montage auf sogenannte Multifunktions-Rollenprüfstände gefahren. Hier hat sich das Konzept mit vier unabhängigen Rollensätzen mit je einer eigenen Antriebs- und Belastungsmaschine durchgesetzt (**Abbildung 6**, /15/). Damit können an jedem Rad die Brems- und Antriebskräfte sowie die Raddrehzahlen individuell vorgegeben werden. Das ermöglicht dem OEM komplexe Prüfprozeduren durchzuführen.

Bevor ein Fahrzeug auf einen Rollenprüfstand gefahren wird, wird auf speziellen Fahrwerkgeometriemess- und Einstellständen (kurz: **Fahrwerkstand** oder FWS) das Fahrwerk eingestellt. Das Fahrzeug wird mittels kompakter Trommelmotoren und elektronisch gesteuerter Schwimmsplatten exakt im Fahrwerkstand positioniert. Auf Basis berührungsloser Lasermesstechnik wird mittels des Triangulationsprinzips³

³ Das Prinzip der Triangulation wird heute in vielen Bereichen angewendet. Nähere Informationen dazu können der einschlägigen Literatur, z.B. zur Fahrwerksvermessung /16/ oder zur Bildverarbeitung, entnommen werden.

über die Reifenflanke die Spur und der Sturz⁴ jedes Rades und damit auch jeder Achse vermessen sowie auf die optimalen Werte eingestellt.

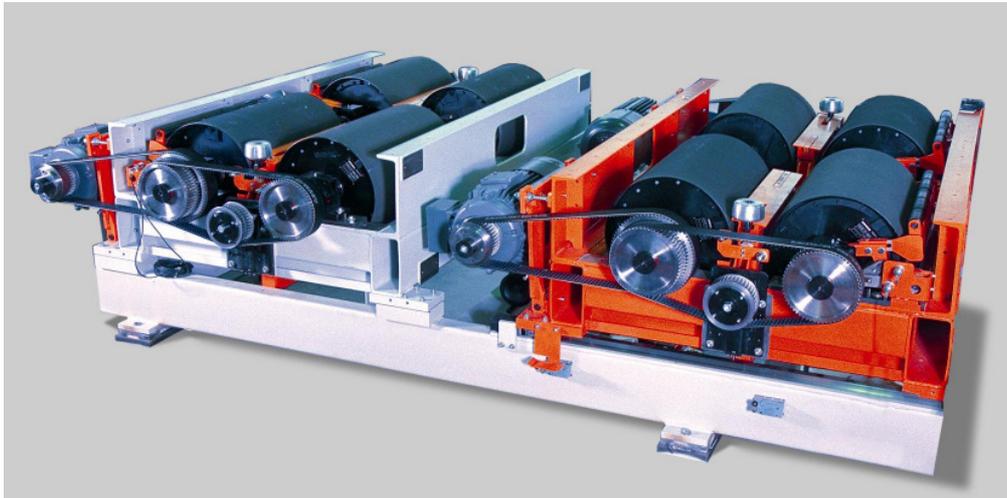


Abbildung 6 Vier-Motoren-Multifunktionsrollenprüfstand ‚x-road‘ ohne Abdeckung und Stahlunterbau sowie ohne Steuerungsrechner /15/

Die Messung erfolgt mit Hilfe dreier Laserlinien auf der Reifenflanke (**Abbildung 7**, rechts, /15/). Die Einstellung der Spur wird heute zum Teil schon ohne menschliche Hilfe mit Robotern durchgeführt, die kamerageführt ein speziell entwickeltes Spurwerkzeug von unten an die Spurstange heranfahren.

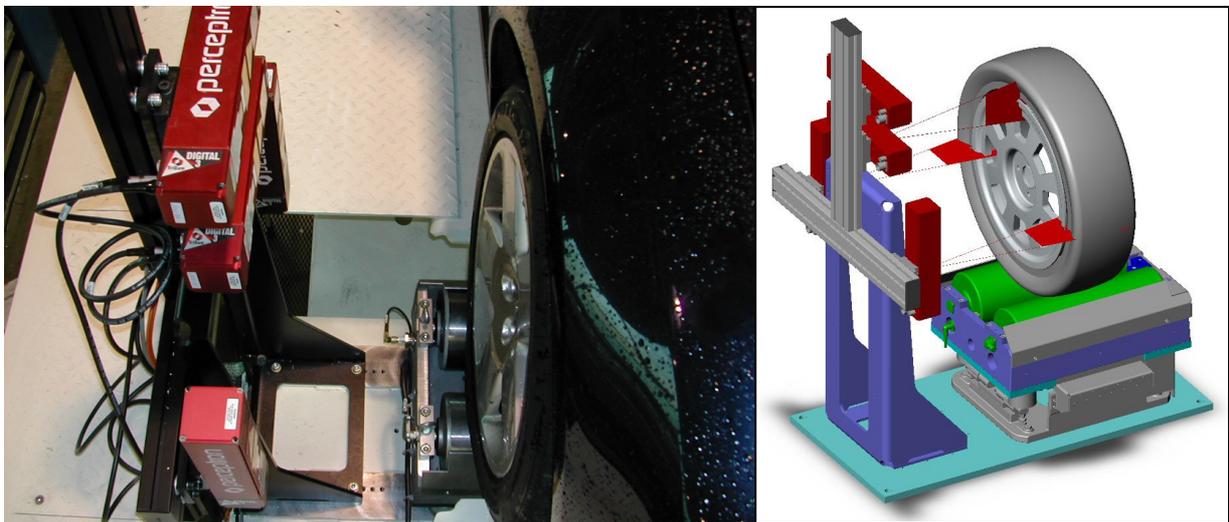


Abbildung 7 Teil eines ‚x-wheel‘ Fahrwerkstandes mit Lasermesseinheit (links, Prinzipbild rechts) zur Vermessung von Spur und Sturz sowie zur Ermittlung des Höhenstandes. Mittels je zweier Trommelmotoren auf elektronischen Schwimmsplatten wird das Fahrzeug exakt im FWS ausgerichtet /15/

Auf dem Fahrwerkstand wird zudem der so genannte Höhenstand der Fahrzeugkarosserie ermittelt. Je ein weiterer Zeilenlaser pro Rad misst dazu auf +/-1 mm genau

⁴ Spur und Sturz sind Daten der Fahrwerksgeometrie. Diese werden ausführlich in der einschlägigen Literatur beschrieben, beispielsweise in /16/.

die Lage der Karosserie im Fahrwerkstand in „Höhe und Breite“. Dies geschieht über die dreidimensionale Ermittlung der Lage des höchsten Punktes der Radkästen, also der Radhausoberkante. Der Höhenstand beschreibt den Abstand zwischen Radmittelpunkt und Radhausoberkante. Die exakte oder tatsächliche Fahrtrichtung des Fahrzeuges errechnet sich ferner aus der Mittelung der Spurwerte der beiden Räder der Hinterachse. Der Winkel zwischen der geometrischen Mittelnachse der Karosserie und der tatsächlichen Fahrtrichtung wird als ‚Dackelaufwinkel‘ bezeichnet. Er beträgt je nach Qualität des Karosserierohbaus und des Hochzeitsprozesses einige Winkelminuten bis hin zu einem viertel ($\frac{1}{4}$) Winkelgrad, also 15 Winkelminuten.

Neuste Entwicklungen auf dem Bereich der optischen Messverfahren sowie der Lasermesstechnik verwenden an Stelle von drei Linienlasern so genannte auf Laserlinienarrays basierende Messsonden (**Abbildung 8**, /15/) und optimieren damit die Fahrwerksmess- und Einstelltechnik weiter. Hierbei werden durch definierte Blenden mehrere Laserlinien in bestimmtem Abstand auf den zu messenden Bereich (Rad und Radhaus) projiziert. Mit zwei definiert zueinander angeordneten Kameras und einem integrierten, auf photogrammetrischen Verfahren basierenden Algorithmus werden die Linien aufgenommen und das Bild wird verarbeitet. Über das Prinzip der Photogrammetrie kann die Lage des Körpers im Raum genau erkannt und bestimmt werden.

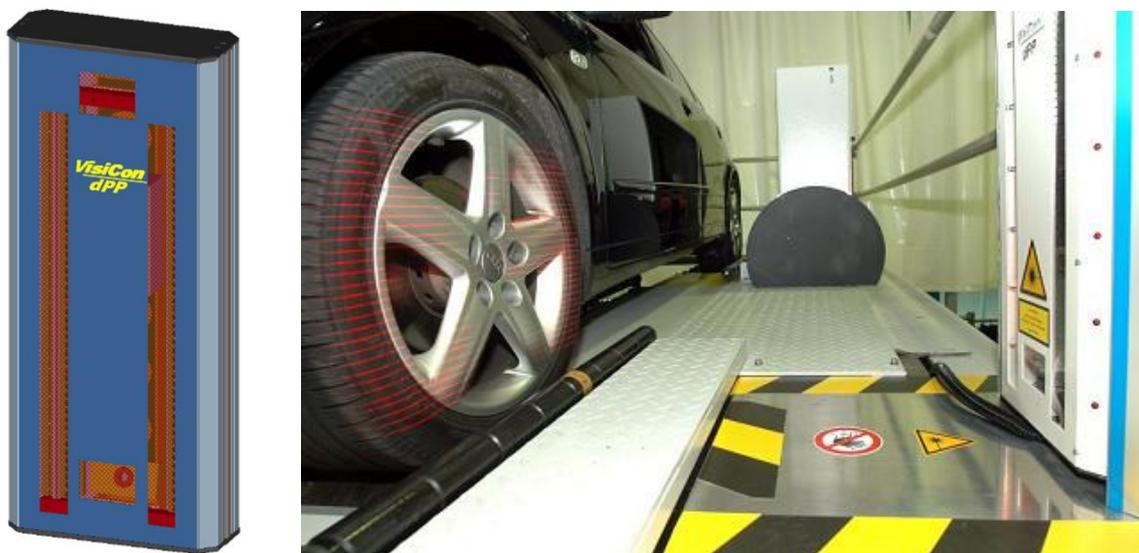


Abbildung 8 Die Messsonde für moderne Fahrwerksgeometrievermessung (dPP - dynamic Pattern Projection), links, und das durch diese Sonde erzeugte Laserstreifenbild auf dem Fahrzeug, rechts /15/

Parallel dazu oder direkt nach dem Fahrwerkstand wird das Fahrlicht, also die Hauptscheinwerfer des Fahrzeuges, sowie die Nebelscheinwerfer auf die „exakte Fahrtrichtung“ eingestellt (Azimutwinkel) und gemäß der gesetzlichen Vorschriften zur Karosserielage nivelliert, also in der Höhenlage eingestellt (Elevationswinkel). Wichtiger,

weil sicherheitskritischer (Blenden des Gegenverkehrs), ist hier die Elevationseinstellung. Dazu werden so genannte Lichtkästen in eine definierte Position vor die Hauptscheinwerfer gefahren. Die Scheinwerfer werden dann mit speziellen Einstellschrauben ausgerichtet. Hier existieren manuelle, halbautomatische und vollautomatisierte Lösungen. Scheinwerfereinstellstände existieren als integrale Portallösungen in moderne Fahrwerkstände oder als „stand alone“ Lösungen, die in der Produktion oft nach dem Fahrwerkstand angesiedelt sind. **Abbildung 9** /15/ zeigt das Portal eines ‚x-light‘ Scheinwerfereinstellstandes zur Integration vor einen Fahrwerkstand.



Abbildung 9 Portal eines Scheinwerfereinstellstandes ‚x-light‘ mit Lichtkasten und Einstellschrauben für Nebel- und Hauptscheinwerfer /15/

Das heutige Bandende ist bezüglich der Prüf- und Einstellstände also in zwei bis drei definierte Bereiche aufgeteilt (**Abbildung 10**): Fahrwerkstand (1) mit Scheinwerfereinstellstand (2) und Multifunktions-Rollenprüfstand (3).

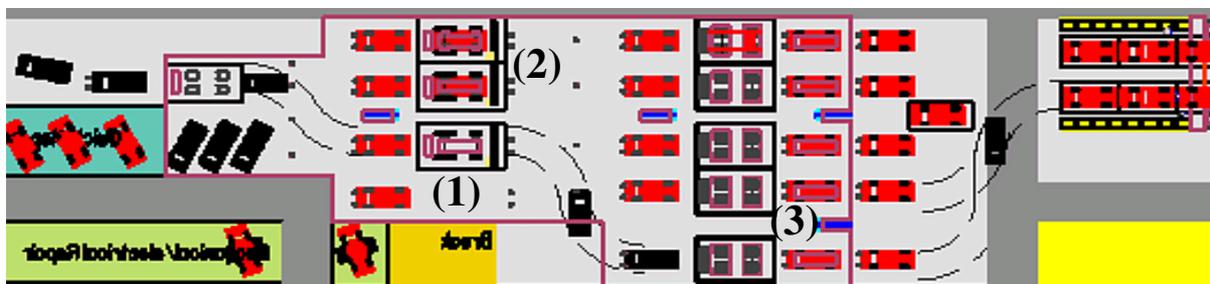


Abbildung 10 Beispiel für eine „klassische“ Aufteilung der Prüf- und Einstelltechnik am Bandende

In jüngster Vergangenheit haben sich aufgrund der Zunahme von elektronischen Systemen in modernen Fahrzeugen, z.B. kamera- oder radarbasierte Fahrerassistenzsysteme, die Anforderungen an Prüf- und Einstell- sowie Kalibrierumfänge am Bandende erhöht. Solche Systeme müssen hochgenau (max. $\pm 0,25^\circ = \pm 15'$) auf

die „tatsächliche Fahrtrichtung“ ausgerichtet werden (Azimutwinkel), da es sonst zu mitunter gefährlichen Fehlfunktionen kommen kann. Je nach System ist zudem eine Nivellierung, also eine Elevationseinstellung, erforderlich.

Ein Beispiel für ein solches Assistenzsystem stellen radarbasierte, autonome Abstandhaltesysteme (ACC) mit einer Reichweite von bis zu 150 m vor das Fahrzeug dar. Ein solches ACC-System hat die Aufgabe, das Fahrzeugvorfeld zu beobachten und den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug unter bestimmten Bedingungen auf einem eingestellten Wert zu halten. Wird die entsprechende Sender- und Empfängereinheit in der Fahrzeugproduktion nur um wenige Winkelgrade fehlerhaft ins Fahrzeug eingebaut, erscheint ein vorausfahrendes Fahrzeug auf der eignen Fahrspur fälschlicherweise wie ein Fahrzeug auf einem daneben gelegenen Fahrstreifen. Ein einfaches Rechenbeispiel bei zwei Winkelgrad Verbaufehler und einem 130 m entfernten Fahrzeug verdeutlicht diese Thematik:

$$130 \text{ m} \times \tan 2^\circ = 4,54 \text{ m}$$

Gl. 2.1

Ein vorausfahrendes Fahrzeug würde also bei nur zwei Winkelgrad Verbaufehler des Systems um über 4,5 m „fehlgeortet“ werden. Dies entspricht einem Seitenversatz von mehr als einer Fahrspur (**Abbildung 11**). Das ACC-System würde demzufolge nicht korrekt reagieren und zu schnell und zu nah auf das Fahrzeug auffahren. Es würde zu spät oder im schlimmsten Fall sogar gar nicht ansprechen, was zu einer Gefahrensituation führen kann.

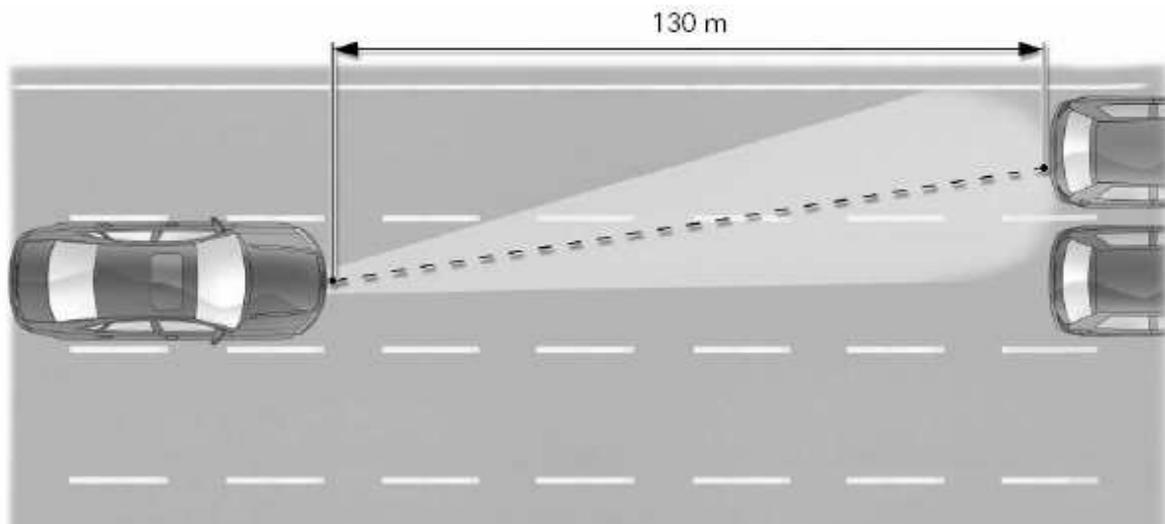


Abbildung 11 Fehllortung eines vermeintlich vorausfahrenden Fahrzeuges durch ein nicht korrekt eingestelltes ACC-System. Das nachfolgende, schnellere Fahrzeug sollte das direkt vor ihm fahrende Fahrzeug als potentielle Gefahr erkennen und nicht das auf der linken Spur befindliche.

ACC und andere Fahrerassistenzsysteme werden bei einigen Herstellern daher ebenfalls nach der Fahrwerkseinstellung und unter Zuhilfenahme von entsprechen-

den Kalibrierzielen, so genannten Targets, am Bandende auf die tatsächliche Fahrtrichtung eingestellt. Dazu wird entweder der Fahrwerkstand um eine weitere Einstellaufgabe erweitert oder die aus dem FWS bekannte Information über den Dackel­laufwinkel wird in einem speziellen „stand alone“ Einstellstand genutzt. Dies ist unter anderem abhängig von der zur Verfügung stehenden Taktzeit auf dem jeweiligen Einstellstand.

In einem solchen FAS (**F**ahrer**A**ssistenz**S**ysteme) Einstellstand wird dann, je nach OEM, mittels nur noch je einem Laser pro Radhaus noch einmal die Raumlage der Karosserie gemessen. Mit der Kenntnis der Winkelbeziehung zwischen der Symmetrieachse der Karosserie und der exakten Fahrtrichtung kann nun das ACC-System ausreichend genau eingemessen werden. Grundsätzlich ergibt sich bei kamera- oder infrarotgestützten (Assistenz-) Systemen wie Spurhalte- oder sichtverbessernden Nachfahrassistenten etc. eine äquivalente Aufgabenstellung bezüglich der Kalibrierung und Skalierung in der Final Assembly Line.

Solche, in **Abbildung 12** /15/ gezeigten FAS-Stände werden heute singulär in die Produktion eingebunden. Singulär bedeutet an dieser Stelle, dass diese Stände entweder im Nacharbeitsbereich aufgestellt werden oder aber an geeigneten Stellen in eine bestehende Produktion eingebunden werden. Das hängt neben taktzeit­technischen Überlegungen auch von der Durchdringung der FAS-Systeme ab, also vom prozentualen Anteil der mit FAS-Systemen ausgestatteten Fahrzeuge an der Gesamtproduktion. Die Targets zur Einstellung der verschiedenen FAS-Systeme können neben den Lichtkästen beispielsweise Dopplergeneratoren (für radarbasierte Systeme) oder spezielle Kalibrierplatten (für Kamerasysteme) sein. Sie werden an entsprechenden Stellen vor, hinter und neben dem einzufahrenden Fahrzeug am FAS-Einstellstand integriert. Teilweise müssen die Targets zur Prüfung bestimmter Systeme im FAS-Stand verfahren oder in diesen eingeschwenkt werden. Dieser Vorgang stellt hohe Anforderungen an Positioniergenauigkeit, Verfahrensgeschwindigkeiten und mechanische Systemstabilität (minimierte Vibration, kein Nachschwingen etc.).

Entscheidend ist jedoch immer die Kenntnis über die exakte Position des Targets (üblich sind $\pm 0,5$ mm) sowie die Raumlage des Fahrzeuges bzw. der Karosserie im Koordinatensystem des Einstellstandes. Dieses wird in den FAS-Ständen, ähnlich wie bei den Fahrwerksständen, immer mit Hilfe eines speziellen Einrichtmeisters eindeutig festgelegt. Weiterhin ist die Information bzgl. der Abweichung der dynamischen Fahrachse von der geometrischen Längsachse des Fahrzeuges, der Dackel­laufwinkel, notwendig.

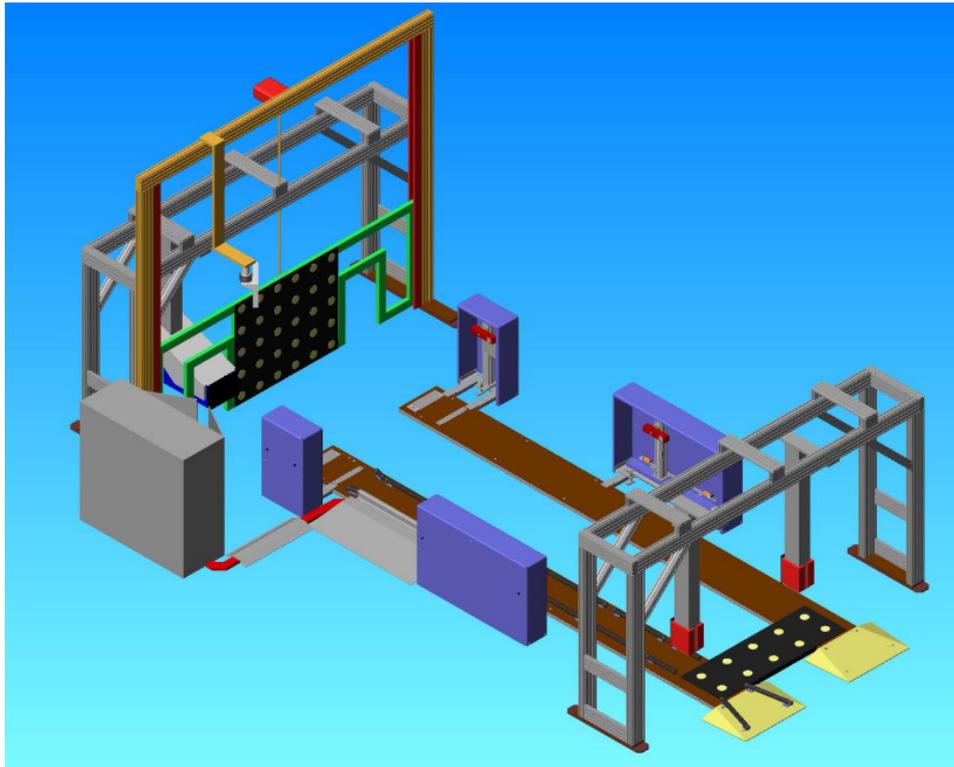


Abbildung 12 Darstellung eines singulären FAS Einstell- und Kalibrierstandes /15/

Die in Abbildung 10 gezeigte, klassische Bandendesituation wird also um einen weiteren Einstellstand ergänzt. Er befindet sich zweckmäßiger Weise nach dem Fahrwerkstand, kann aber je nach Linienstruktur eines OEM auch hinter dem Rollenprüfstand oder in einem speziellen Nacharbeitsbereich angesiedelt sein. Eine Integration von zusätzlichen Kalibriereinheiten in bereits bestehende Laserfahrwerkstände ist zwar grundsätzlich möglich, aber oft aus taktzeittechnischen Gründen nicht realisierbar. Zusätzliche Prüf- und Einstellumfänge sind bei den heute sekundengenau getakteten Prozessen nicht ohne weiteres integrierbar.

Durch die notwendige Einstellung und Kalibrierung von FAS-Systemen kommen also zuerst einmal zusätzliche Aufwendungen in die Produktionslinien der Fahrzeugindustrie und gestaltet diese daher unübersichtlicher. Komplex wird die Kalibrier- und Einstellaufgabe zudem dann, wenn mehrere dieser FAS-Systeme in einem Systemverbund zusammenarbeiten, aber nicht an ein und der selber Stelle im Fahrzeug selber eingebaut sind. Es muss dann eine exakte Einstellung aller Systeme auf ein einziges Koordinatensystem erfolgen. Hier müssen zukünftig Lösungen gefunden werden, diese Systeme softwaremäßig schon in der Entwicklungsphase so auszulegen, dass bei der späteren Produktion einfachste und somit hocheffektive Verfahren zur Einstellung der Systeme angewendet werden können. Gerade im Hinblick auf das Konzept des oben beschriebenen unfallvermeidenden Fahrzeuges mit komplett vernetzten Assistenzsystemen durch das gesamte Fahrzeug ist dies eine wichtige Voraussetzung.

2.6. Stand der Technik in Bezug auf die Fahrzeugentwicklung

Gerade im Hinblick auf moderne Technologien der näheren Zukunft ist noch stärker als bisher mit dem Einsatz von Software, Elektronik und elektrischen Komponenten sowie von immer stärker softwarebasierten Steuerungen und Regelungen der Systeme im Fahrzeug zu rechnen. Dabei ist an Systeme mit kombinierter Umfeldsensorik und damit verbundene (Fahrerassistenz-) Systeme wie Spurhalte- und Spurwechselassistenten, Regelungssysteme für mechatronische Komponenten, X-by-Wire Systeme zur präventiv-aktiven sowie reaktiv-aktiven Fahrerunterstützung, usw. zu denken. Folgt man heutigen Standards im Automobilbau, nehmen die Komplexität und die Vernetzung durch die fortschreitende, singuläre Integration einzelner Systeme immer weiter zu. Die Abhängigkeiten der einzelnen Systeme untereinander werden durch die steigende Vernetzung der Komponenten und der Funktionalitäten sowie durch fortschreitende Integrations- und Substitutionsbemühungen der OEM stärker.

Die zunehmende Baureihen- und Variantenvielfalt sowie immer weiter steigende Umfänge an Sonderausstattungen und Individualisierungen im Fahrzeug verringern diese Problematik ebenfalls nicht. Wird die bisher übliche, auf singulärer Systemintegration basierte Einbauphilosophie der OEM beibehalten, steht durch die daraus resultierende, anwachsende Komplexität bald eine Art „Systemoverload“ bevor, dem die Hersteller zum Teil schon heute nicht mehr Herr werden /17/. Dies führt zu wachsenden Fehlerwahrscheinlichkeiten und daraus resultierend zu steigenden Qualitätsproblemen bei der Herstellung der Fahrzeuge sowie unweigerlich zu anwachsenden Gewährleistungs- und Kulanzkosten für den Hersteller, beispielsweise durch Rückrufaktionen. Leider kommt hinzu, dass die Fehler an elektrischen und elektronischen Komponenten dem Kunden in letzter Zeit verstärkt auffallen, was mit der Zeit zu einer sinkenden Akzeptanz von neuartigen, auf Software und Elektronik basierenden Systemen führen kann. Zumindest sinkt das Vertrauen in solche Systeme, was sich auf die Markteinführung von neuartigen mechatronischen Komponenten erschwerend auswirken kann. Einer aktuellen Umfrage zufolge sind die deutschen Automobilbesitzer mit einheimischen Marken in Bezug auf die Qualität eher unzufrieden. Demnach steht BMW auf dem 12. Platz noch weit vor Audi (Platz 17), Mercedes Benz (Platz 31) und VW (Platz 32) /18/.

Ein Mangel besteht hier in der Akzeptanz durchgängiger Prüfmethode. Der fehlende Bestandteil in der gesamten Entwicklungskette ist eine in sinnvoller Weise automatisch ablaufende Testfallgenerierung bereits aus der Systemspezifikation heraus. Hier sind bis heute keine zusammenhängenden und durchgängigen Ansätze veröffentlicht worden.

2.7. Themenübersicht und Ziel dieser Arbeit

Aus den zuvor aufgeführten Gründen wird in dieser Arbeit ein durchgängiges Konzept für die Optimierung der Prüfungen elektronischer und mechatronischer Fahrzeugkomponenten aufgezeigt. Das Konzept umfasst die frühe Entwicklung, also die Systemspezifikation, über die entwicklungsbezogene Testabläufe bis hin zum Serieneinbau, also die Prüfung der Funktion am Bandende in Hardware und Software. Die vorliegende Arbeit behandelt die Umsetzung einer Prüfplattform für die moderne Fahrzeugentwicklung und ein durchgängiges Prüf- und Einstellkonzept für die Bandendeproduktion moderner Fahrzeuggenerationen. Dabei wird von den Belangen heutiger Fahrzeuge bis hin zu einem möglichen, zukünftigen Fahrzeugkonzept ausgegangen.

In **Kapitel 3** wird daher auf der Basis vorhandener Prozess theoretisch erläutert, welche Möglichkeiten existieren, durch geschickte Einbindung einer FMEA (**F**ehler **M**öglichkeiten- und **E**influss **A**nalyse) und einer Fehlerbaumanalyse (FTA) in den frühen Entwicklungsprozess, also auf Basis der reinen Funktionsspezifikationen, eine Prüfstrukturbasis für den weiteren Prozess zu generieren. Die Vorgehensweise wird in engem Zusammenhang mit dem in der VDI-Norm 2206 /19/ für den Softwareprozess gezeigten V-Prozess (**Abbildung 13**) geführt.

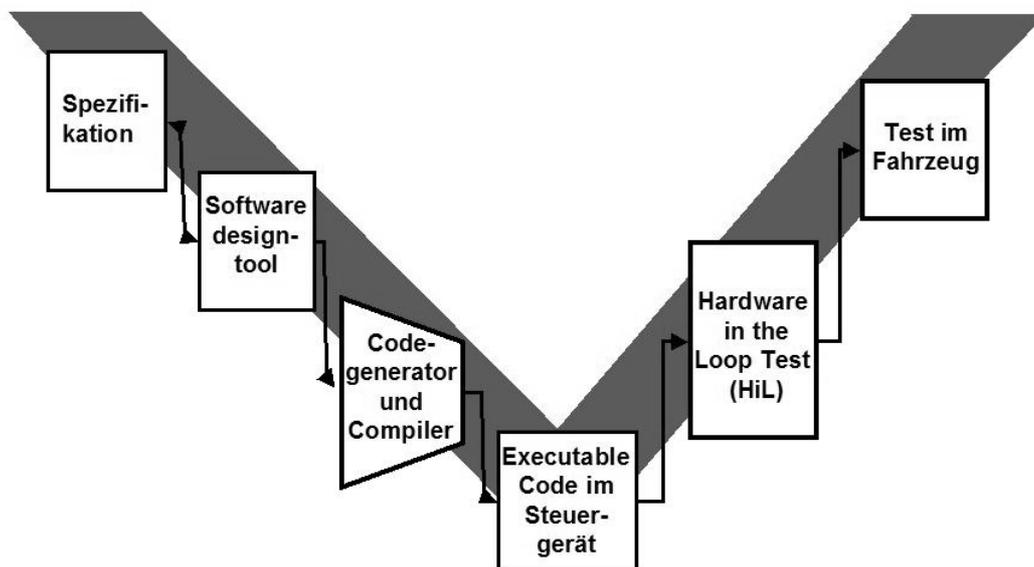


Abbildung 13 Der V-Prozess aus der Softwareentwicklung [VDI-Norm 2206] (nach /19/)

In **Kapitel 4** wird einleitend in den Hauptteil der Arbeit eine allgemeine Klassifizierung eines Prüfstandes erarbeitet. Es wird diskutiert, inwieweit es möglich ist, Prüfstände und Prüfverfahren, ausgehend von MiL- und SiL-Verfahren über herkömmliche HiL-Prüfstände und die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prüfplattform „ViL“ bis hin zu vollständig funktionsorientierten Prüfständen auf Basis der Prüfbelange in eine Matrix

einzuordnen. Dazu werden grundlegende Bausteine einer jeden Prüfung theoretisch definiert und der Umfang dieser Bausteine klassifiziert sowie skalierbar gemacht. Es wird eine ausführliche Beschreibung der Beziehung zwischen einem Prüfstand als reine Prüfmaschine, also der Prüfstandshardware, und der zur Steuerung und Regelung sowie zur Kommunikation mit dem Prüfling notwendigen Softwarebausteine vorgenommen. Hier wird besonderes Augenmerk auf ein sinnvolles Zusammenspiel dieser Komponenten im Hinblick auf die Durchgängigkeit einer Fahrzeugprüfung gelegt. Weiterhin wird die Sinnhaftigkeit der Einbindung einer Straßensimulation und eines Fahrzeugmodells in die Steuerungssoftware eines modernen Fahrzeugprüfstandes diskutiert. Im Schwerpunkt dieses Kapitels wird auf die Prüfbelange im Hinblick auf die Kommunikation zwischen Prüfstand und Fahrzeug eingegangen.

In **Kapitel 5** wird ausführlich die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Entwicklung eines neuartigen Fahrzeugprüfstandes für entwicklungstechnische Belange (ViL – **Vehicle in the Loop**) erläutert. Mit dem ViL ist ein Prüfstand für Gesamtfahrzeuge entstanden, der in hohem Maße auf die Prüfbelange zukünftiger, gesamtfahrzeugübergreifender Systeme ausgelegt ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde je ein ViL-Prüfstand für einen LKW und für einen PKW aufgebaut und in Betrieb genommen. Im EU-Projekt SPARC dient der Prüfstand den Projektpartnern als Entwicklungsplattform für moderne, mechatronische Systemkomponenten, die im Projekt vorgestellte Fahrzeugsysteminfrastruktur sowie die informationstechnologischen Bausteine zur Realisierung des virtuellen Copiloten und des unfallvermeidenden Fahrzeugs.

Der ViL-Prüfstand stellt dabei gleichzeitig die Basis für eine weitere Neuentwicklung aus dem Bereich der Fahrzeugprüftechnik dar, den InLine **F**unction **T**ester (IFT), der als Mehrwert im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit entstanden ist. Der IFT ist aus produktionstechnischer Sicht an moderne Fahrzeuggenerationen und die Prüfbelange neuer, elektronischer und mechatronischer Sicherheits- und Assistenzsysteme sowie der damit in Zusammenhang stehenden Fahrzeugkomponenten angepasst. Hier reicht das Spektrum über zukünftige Fahrerassistenzsysteme bis hin zu vollkommen mechatronisch aufgebauten gesamtheitlichen Fahrzeugkonzepten. Der IFT ist ein vollwertiger Funktionsprüfstand zur Integration von Fahrzeugprüfungen in die Montagelinie. In **Kapitel 6** werden daher die dadurch entstehenden Vorteile in der Serienproduktion erläutert. Des Weiteren wird der Aufbau des Prüfstands beschrieben. Eine in diesem Kapitel vorgestellte Studie, die ebenfalls im Rahmen der Arbeit durchgeführt wurde, beschreibt die wirtschaftlichen Vorteile der Integration des InLine Function Testers in eine bestehende Montagelinie. Daran anknüpfend erläutert der Abschnitt als weiteren Schritt die konsequente Weiterentwicklung auf ein durchgängiges, vollautomatisches InLine-Prüfkonzept bis hin zu einem gesamtheitlichen, integrierten Prüf- und Einstellkonzept in der Montagelinie. Das Spektrum reicht hier von

Fahrwerkseinstellungen, notwendigen Kalibriertätigkeiten für heutige Fahrerassistenzsysteme wie LDW und ACC bis hin zum abschließenden Fahrzeug InLine Test auf dem IFT. Es wird dargestellt, wie das integrierte InLine-Prüfkonzept die Serienproduktion positiv beeinflussen und deren Vorgänge optimieren kann. Ergänzend dazu befasst sich dieser Abschnitt mit einem an die neue InLine-Prüftechnik angepassten und speziell für diesen Ablauf in der Produktion einsetzbares vollautomatisierbares Adaptionkonzept zwischen Fahrzeug und allen zuvor vorgestellten Prüf- und Einstellständen. Mit diesem Konzept wird es ermöglicht, oben beschriebene Prüf- und Einstellarbeiten an modernen Fahrzeugen vollständig zu automatisieren und somit prozesssicherer, reproduzierbarer und frei von menschlichen Einflüssen zu gestalten.

Abschließend eröffnet **Kapitel 7** einen Ausblick in die Zukunft der neuen Prüftechnik und gibt neben einer Zusammenfassung der Arbeit Anregungen für weiterführende Themen in Bezug auf die vorliegende Dissertation.

3. Integration einer Fehlervermeidungsstrategie

3.1. Einleitende Informationen zur FMEA und FTA

Grundsätzlich wird angenommen, dass die Behebung eines Fehlers umso günstiger und effizienter ablaufen kann, je früher er im Gesamtprozess festgestellt werden kann. Je eher also ein Fehler gefunden wird, desto schneller und einfacher kann er behoben werden und desto kostengünstiger und wirtschaftlicher wird der gesamte Prozess. Zudem bestehen im frühen Entwicklungsstadium weniger Verbindungen zu anderen Systemen, auf die sich ein nicht entdeckter Fehler aufgrund einer nicht oder nicht vollständig durchgeführten Prüfung beziehen und somit fortpflanzen kann⁵. Entscheidend ist also eine im gesamten Prozess möglichst früh angesiedelte Prüfung, die so umfassend wie möglich ausfällt und die späteren Systemzusammenhänge so weit wie möglich (beispielsweise als Simulation) einbezieht. Komplex wird dies an den Stellen, wo aufgrund von im frühen Entwicklungsprozess fehlenden, exakten Schnittstellenbeschreibungen die Auswirkungen eines Fehlers, der erst aufgrund der Entstehung eben dieser Schnittstelle auftritt, gefunden bzw. bewertet werden muss.

Ein relativ hoher Prozentsatz an Fehlern wird erst dann ersichtlich, wenn eine bestimmte Anzahl verschiedener, eigentlich unabhängig voneinander agierender Systeme in einen Systemgesamtverbund zusammengeschlossen wird und die Kommunikation (Datenaustausch) zwischen diesen Systemen aktiviert wird. Solche Zusammenhänge werden während der frühen Prüfungen im Entwicklungsprozess oft nicht beachtet, da sie nicht offensichtlich sind und sich zudem über viele verschiedene Steuergeräte hinweg erstrecken, die teilweise in verschiedenen Ländern entwickelt oder programmiert werden.

Zur Reduzierung von Fehlern bereits in der Entwicklungsphase werden daher heute unterschiedlichste Verfahren und Methoden angewendet. Durchgesetzt hat sich jedoch vor allem die FMEA (**F**ehler **M**öglichkeit- und **E**influss **A**nalyse /20, 21/). Ein Nachteil der FMEA ist, dass sie erst zu einem Zeitpunkt angewendet werden kann, wenn das System bereits komplett oder wenigstens in seinen wichtigen Teilen zumindest konstruktiv existiert. Die FMEA ist eine induktive Methode zur systematischen Identifizierung potentieller Ausfälle eines Systems⁶, eines Teilsystems oder eines Bauteils. Durch die Untersuchung der sich daraus ergebenden Folgen für das System bzw. für das Bauteil und der Ermittlung der Ausfallursachen lässt sich eine Risikobewertung durchführen. Diese zeigt mittelbaren und unmittelbaren Verbesse-

⁵ Zur weiteren Vertiefung des Themas Fehlerfortpflanzung und Systemzuverlässigkeit stehen ausführliche Quellen in der Literatur zur Verfügung, beispielsweise /8, 20/.

⁶ System: Mit einem System ist im hier dargestellten Zusammenhang eine technische Komponente gemeint, z.B. eine Maschine, eine Anlage, ein Maschinenteil oder auch ein Prozess. Nach der Trennung von seiner Umgebung besitzt dieses System eigene Systemgrenzen und definierte Schnittstellen zu anderen Systemen / Komponenten.

rungs- bzw. Handlungsbedarf auf. Als Werkzeug der Risikoanalyse wird die FMEA präventiv zum frühest möglichen Zeitpunkt planungs- und entwicklungsbegleitend eingesetzt. Bei bereits erkannten Problemen oder bei besonderen Sicherheits- und Umweltaforderungen kann sie auch korrigierend, also zur Produkt- und Prozessoptimierung, eingesetzt werden.

Der Erfolg einer FMEA hängt in hohem Maße von der richtigen Vorbereitung ab. Als Werkzeug der Qualitätssicherung sollte sie nur dann eingesetzt werden, wenn besondere Veranlassung besteht. Während die fertige Analyse für einfache Bauteile schon mehrere hundert Seiten umfassen kann und dadurch ihre Übersichtlichkeit und ihren Nutzen verliert, ist eine vollständige FMEA bei komplexen Systemen gar nicht durchführbar. Daher wird die FMEA auch oft als eine selektive Methode bezeichnet.

Neben der FMEA stehen weitere Verfahren zur Fehlerdiagnose und damit zur Fehlervermeidung zur Verfügung. Die FTA oder Fehlerbaumanalyse (engl.: **Fault Tree Analysis**) beispielsweise kann zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Entwicklung neuer Funktionen angewendet werden, wenn das Basissystem bekannt ist. Die FTA ist somit eine ideale Ergänzung zur FMEA. Sie kann wesentlich früher einsetzen werden und der FMEA wertvolle Ergebnisse als Eingangsgrößen liefern. Die Analyse impliziert ein unerwünschtes Ereignis und sucht nach allen kritischen Pfaden, die dieses auslösen können. Als ihre Grundlage dienen alle möglichen Ursachen eines Fehlers. Diese Einzelfehler werden anhand der Booleschen Algebra logisch miteinander kombiniert.

Die FTA ist ein strukturiertes Standardverfahren für die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsuntersuchung eines Systems. Klassisch wird sie eingesetzt, um eine Antwort auf zwei Fragen zu geben:

- Welche Ursachen führen zu einem unerwünschten bzw. katastrophalen Zustand im betrachteten System?

und

- Mit welcher Wahrscheinlichkeit kann der Zustand eintreten?

Zunehmend wird die Methode aber auch verwendet, um eine abgesicherte Aussage über das Verhalten eines Systems bezüglich eines Ereignisses bzw. einer Eventualität (z.B. dem Auftreten eines Fehlers) zu erhalten. Im Unterschied zu der Fehler Möglichkeits- und Einfluss Analyse ist die FTA eine deduktive Methode, sie lässt also nicht nur allgemeine Formulierungen zu, sie hebt auch Besonderheiten und Ausnahmen deutlicher hervor. Allgemein lässt sich die grundlegende Idee der FTA als die Strukturierung eines physikalischen Systems in einem Logikdiagramm beschreiben. Die grundlegende Methodik der FTA ist in der DIN 25424-1 und DIN 25424-2

festgelegt. Das Logikdiagramm, auch Fehlerbaum (Fault Tree) genannt, unterteilt das System in Subsysteme und Komponenten.

Eine Schwäche der Methode ist ihre Wirtschaftlichkeit, da eine Durchführung der FTA schon für kleinere Systeme mehrere Monate dauern kann. Außerdem erfordert die Anwendung der FTA eine genaue Systemkenntnis, denn nur dann führt sie zu sinnvollen und verwendbaren Ergebnissen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers und damit die Qualität sowie die Zuverlässigkeit eines Systems oder Produktes entscheidend von der Prüfbarkeit abhängt. Lässt sich ein Produkt einfach und vor allen Dingen zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Produktentstehungsphase so umfassend wie möglich prüfen, steigt die Wahrscheinlichkeit für die Entdeckung eines Fehlers. Dazu trägt eine minimierte Komplexität und eine im frühen Entwicklungsstadium bereits eindeutige Schnittstellendefinition signifikant bei. Weiterhin ist die Verwendung einer bekannten und formalen Methode zur Beschreibung der Schnittstellen eine Voraussetzung für die Automatisierbarkeit der Prüfprozesse im frühen Entwicklungsstadium.

3.2. Herausforderungen heutiger Prüftechnik

Die Verwirklichung der Ziele der vorliegenden Untersuchung in Bezug auf die Erstellung neuer Prüfverfahren im Zusammenhang mit neuen Fahrzeugkonzepten kann in zwei Hauptherausforderungen eingeteilt werden /22/:

- Die automatische Synthese von Informationen aus vorliegenden Anforderungen
- Die methodische Gewichtung der Informationen durch Einbindung einer Zuverlässigkeitsmethode in das System

Für eine in dieser Arbeit geforderte, automatische Generierung einer Fehlermatrix aus Spezifikationen müssen die zumeist als reine Textdateien gespeicherten Informationen zuerst in eine Form gebracht werden, die automatisch einlesbar und auswertbar ist. Das neue Format muss es ermöglichen, dass alle Komponenten, Funktionen und die Beziehungen der Komponenten des Systems untereinander aus der Strukturarchitektur des Systems eindeutig identifiziert werden können. Die Verwendung von formalen Modellen, die eine definierte Syntax und Semantik besitzen, ermöglicht es, die erste der beiden Hauptherausforderungen elegant zu lösen. Ein Modell kann die Topologie des modellierten Systems mit allen Komponenten, hierarchischen Beziehungen und architektonischen Abhängigkeiten enthalten. Es bietet darüber hinaus, unter Einhaltung gewisser Regeln, die Möglichkeit, das beschriebene

System automatisch zu erkennen und seine Eigenschaften durch einen mathematischen Beweis nachzuweisen. Dieser Schritt wird als Verifikation bezeichnet⁷.

Da es sich bei den modernen Entwicklungsprozessen in der Automobilindustrie und insbesondere bei der Entwicklung von mechatronischen Systeme zunehmend um eine modellbasierte Entwicklung handelt, kann man direkt auf die im Rahmen der modellbasierten Entwicklung erstellten Modelle zugreifen und müsste so den Modellierungsaufwand nicht wiederholen. Darüber hinaus existiert ein zweiter, bedeutender Grund sich bei der Ausarbeitung von neuen, die herkömmliche Entwicklung unterstützenden Werkzeugen, nach den bereits in der Industrie angewendeten Vorgehensweisen zu richten. In Gesprächen mit zahlreichen Vertretern aus dem Bereich der Automobilindustrie /20/ gaben diese zu verstehen, dass ein Werkzeug bzw. ein Verfahren zur automatischen Erzeugung einer Fehlermatrix direkt auf die von der Industrie entwickelten Modelle anwendbar sein sollte. Somit würden die neu entwickelten Werkzeuge viel wahrscheinlicher in der Industrie Akzeptanz finden und zum Einsatz kommen können.

3.3. Der moderne Produktentwicklungsprozess

Der heutige Fahrzeugentwicklungsprozess wird durch immer kürzere Entwicklungszyklen und steigende Anforderungen bezüglich der Qualität und der Effizienz bei einer begrenzten Anzahl prototypischer Versuchsträger charakterisiert. Dabei steigt die Komplexität der Fahrzeugsysteme und damit verbunden auch der Applikationsaufwand. Wo in der Vergangenheit (90er Jahre) Steuerungen und Regelungen als autarke Komponenten Einzug ins Fahrzeug hielten, finden heute komplexe Steuergerätenetzwerke mit zahlreichen Schnittstellen und diversen Softwareversionen Verwendung. Schon eine einfache Funktionalität wie das Warnblinken wird durch das Zusammenspiel von bis zu sechs Steuergeräten umgesetzt, deren Software in drei verschiedenen Ländern angefertigt wird.

Um den geänderten Anforderungen in der Automobilentwicklung gerecht zu werden, sind die Fahrzeughersteller und Zulieferer gefordert, neue Prozesse und Technologien während der Entwicklung zu etablieren. Um eine hohe Systemsicherheit zu gewährleisten reicht dabei die alleinige Betrachtung der Hardware nicht mehr aus. Methoden zur Softwarequalitätsprüfung müssen parallel dazu zum Einsatz kommen und müssen schnellstmöglich in die vorhandenen Prozesse integriert werden. Eine gegenseitige Anpassung beider Schwerpunktthemen und eine lückenlose und verständliche Kommunikation ist dabei Voraussetzung.

⁷ Bei erhöhtem Interesse zu den Themen „modellbasierter Entwicklungsprozess“ sowie zu universellen Implementierungstools zur schnellen Umsetzbarkeit automatisch zu generierender Prüfprozesse und zu den heute verwendeten Programmiersprachen stehen in der Literatur diverse Quellen zur Verfügung. Im Literaturverzeichnis dieser Arbeit sind daher einige Quellen des an dieser Stelle sehr ergiebigen Angebotes für den interessierten Leser genannt /23/ bis /44/.

In Anlehnung an die VDI Richtlinie 2206 - „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ (Abbildung 13) verfolgt die Automobilindustrie seit einigen Jahren den Ansatz des modellbasierten Entwicklungsprozesses. Dieser weiterentwickelte „V-Prozess“ soll helfen, die ständig wachsende Komplexität neuer mechatronischer Systeme im Fahrzeug zu beherrschen. Dabei werden die Systementwickler durch formale Methoden unterstützt. Diese Methoden verfolgen das Ziel, ein interdisziplinäres Problem auf einfache, anschauliche und insbesondere auf eindeutige Art und Weise zu beheben.

Der „linke Ast“ des V-Prozesses beschreibt die Erstellung der Anforderungen sowie deren Umsetzung:

Nach einer vorangestellten Vorplanungsphase, in der einige Basisarbeiten wie die Aufstellung eines Terminplans oder die Festlegung der Verantwortlichkeiten erfolgen, werden die Systemanforderungen erarbeitet. Sie bilden den Ausgangspunkt für den V-Prozess. Die Systemanforderungen beschreiben die globale Systemfunktionalität aus Kundensicht und entsprechen damit dem Lastenheft. Sie werden meistens in reiner Textform (in Word Dokumenten oder Excel Tabellen) abgelegt. Daran anknüpfend werden die Kundenanforderungen durch den Entwickler hinsichtlich ihrer Funktionalität präzisiert. Somit werden die Systemspezifikationen, also das Lastenheft, erstellt. In der nächsten Phase werden aus den Spezifikationen die internen Soft- und Hardwareanforderungen erstellt. Als Beispiel kann hier eine Sensorgenauigkeit aufgeführt werden, die benötigt wird, um eine bestimmte Systemfunktionalität zu erlangen.

Mit Hilfe einer strukturierten Analyse, in der die Systemanforderungen in Funktionsgruppen unterteilt werden und anschließend im Rahmen eines strukturierten Designs eine Softwarearchitektur erarbeitet wird, entstehen in der nachfolgenden Modellierungsphase voneinander physikalisch getrennte Module und Subsysteme. Diese übernehmen jeweils spezielle Aufgaben. Die Identifikation „sinnvoller“ Module ist ein wichtiger Schritt für die Entwicklung einer Gesamtfunktionsarchitektur und für die Sinnhaftigkeit späterer Schnittstellen. Während dieser Entwicklungsstufe werden neben Erfahrungen und bewährten Techniken aus traditionellen Entwicklungsprozessen spezielle Werkzeuge genutzt, die den aktuellen Implementierungszustand durch geeignete Simulationen validieren und verifizieren können. Anschließend erfolgt die Codierung, also die Programmierung der Software. Festgelegte „Coding Standards“ müssen dabei von den Entwicklern genauestens befolgt werden. Die modellbasierte Entwicklung führt in den letzten Jahren zu einer Schwerpunktverlagerung von der Codierung zur Spezifikation und Modellbildung. Auf Basis von konstruktiven, ausführbaren Modellen existieren inzwischen Möglichkeiten, unter Verwendung von Co-

degeneratoren geeignet beschriebene Spezifikationen automatisch in maschinenlesbaren Code umzuwandeln.

Im „rechten Ast“ des V-Prozesses erfolgen die Integration und die Verifikation des Systems. Verglichen mit dem traditionellen Ansatz „Bauen und Testen“ bietet das modifizierte Vorgehen nach dem V-Modell zahlreiche neue Möglichkeiten und Vorteile. Sowohl die Erstellung von Spezifikationen und Designs, die Verifikation als auch die Implementierung von Software wird durch formale Techniken unterstützt.

Im Verlauf der Modul- und Softwareintegrationsphase werden die zuvor entwickelten Komponenten wieder zu Subsystemen und nachfolgend zu einem Gesamtsystem zusammengefügt. Dabei erfolgt die Eigenschaftsabsicherung, d.h. es wird überprüft, ob die Komponenten des Gesamtsystems die zuvor festgelegten Aufgaben richtig erfüllen. Abschließend erfolgt die Verifikation der Kundenanforderungen. Dies geschieht auf Elektronikprüfständen und schließlich im Fahrversuch. Dazwischen existieren bisher keine Lösungen, eine komplexe Prüfanordnung aufzubauen und die daraus gewonnenen Informationen frühzeitig in den Prozess zurückzuführen.

Jedoch muss nach Auffassung des Autors gerade zu diesem Zeitpunkt eine intensive Komponenten- und Funktionsprüfung eingeflochten werden, um das komplexe Zusammenspiel der diversen Systemkomponenten zu durchleuchten und Fehler zu entdecken, die in der vorgelagerten Software- und Systemprüfung nicht entdeckt wurden oder die erst bei deren Integration in das Gesamtsystem entstehen. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses das Bewusstsein dafür zu schaffen, welche Tests im späteren Verlauf der Wertschöpfungskette (Prototyp und vor allem in der Produktion) wie durchgeführt werden müssen, um ein fehlerfreies Endprodukt zu entwickeln. Wird in dieser frühen Phase die Prüfbarkeit des Systems am Bandende, also beim Einbau des Systems in ein Serienfahrzeug und der Test der Funktionalität, vernachlässigt, bedeutet dies einen hohen wirtschaftlichen Verlust in der gesamten Wertschöpfungskette des Gesamtproduktes.

3.4. Anwendung auf das in SPARC beschriebene Fahrzeugkonzept

Das im EU-Projekt SPARC vorgestellte Fahrzeugkonzept (→ Kapitel 2) ist in klaren Strukturen hinsichtlich des funktionalen Aufbaus geordnet. Es ist in Bezug auf die gesamte Systemarchitektur, von der Befehlseingabe durch den Fahrer bis hin zur Ausführung der Bewegung durch den Triebstrang, in definierte Ebenen aufgeteilt. Die Funktionalitäten des Gesamtfahrzeugs basieren größtenteils auf Software, die, wie oben erläutert, in einer sehr frühen Phase des V-Prozesses erarbeitet wird und somit auch sehr früh getestet werden kann. Eine umfangreiche Fehlererkennung ist somit

aufgrund niedrigerer Komplexität und hoher Strukturierung theoretisch als einfacher zu beurteilen, als dies in heutigen Automobilen der Fall ist. Es bleibt jedoch unbestritten, dass Systemprüfungen im Hinblick auf ein qualitativ hochwertiges Ergebnis notwendig sind, gerade bei allen sicherheitsrelevanten Systemen. Je früher diese Prüfungen im gesamten Entwicklungsprozess stattfinden, desto günstiger ist dieser Prozess und desto geringer sind eventuell auftretende Folgekosten zu bewerten. Im Fall des hier vorgestellten Entwicklungsprojektes bedeutet dies, dass zu einem früheren Zeitpunkt ein fertiges Prototypenfahrzeug zur Verfügung steht.

Die Entwicklung von neuen Sub-Systemen und softwarebasierten Funktionalitäten sowie von Bauteilen und Systemen sollte von Beginn an auf Fehlerfreiheit ausgerichtet sein. Neben der Kommunikations- und Komfortelektronik spielen die Sicherheitssysteme eines solchen Fahrzeugs eine große Rolle. Hier können zwei „Seiten“ unterschieden werden:

Zum einen ist dies die „ausführende Hardware des Fahrzeuges. Beispiele sind hier komplette Achsen (inkl. Lenkung und Bremsen), Motoren, Getriebe, usw. Alle diese Komponenten enthalten Subintelligenzen, welche die Befehle der übergeordneten Steuerung ausführen und einen Status zurückmelden. Solche Hardwarekomponenten sind heute bezüglich ihrer Ausfallwahrscheinlichkeiten und Fehleranfälligkeiten bestens bekannt. Auch mechanische Systemkomponenten eines mechatronischen Systems wie elektromotorische Stelleinheiten zählen hier dazu. Im Entwicklungsstadium solcher Komponenten wird der OEM oder der entsprechende Zulieferer zwar nicht darüber hinwegkommen, ausführliche Tests der mechanischen und mechatronischen Bauteile durchzuführen, jedoch sind die anzusetzenden Prüfungen hier eher hardwarebasiert und produkttypisch.

Weitere Tests sollten sich also größtenteils auf die Funktionalität der Schnittstelle zur übergeordneten Steuerung, die Funktionsfähigkeit und die Wirksamkeit der mechatronischen Bauteile und anderer Teilkomponenten sowie auf Ausfallsicherheiten dieser Systeme in „extremen“ Situationen beziehen. Dies können im Fall mechatronischer Komponenten beispielsweise ein plötzlicher Energieabfall, extreme Temperaturen, hohe Feuchtigkeit, Staub oder starke Schwingungen sein. Die eingesetzte Hardware, dazu zählen mechanische Bauteile wie Lagerkörper oder Achsen, aber auch Platinen und Gehäuse, sind hier als die anfälligen Bauteile zu bewerten und somit entsprechend zu prüfen. Dies kann jedoch nur dann geschehen, wenn das Bauteil physikalisch vorliegt, beispielsweise als Prototyp. Auf den Test der Hardware soll an dieser Stelle nicht vertiefend eingegangen werden.

Die andere „Seite“ ist die Software sowie die zentrale Entscheidungseinheit des unfallvermeidenden Fahrzeuges. Hier eingesetzte Algorithmen und Funktionalitäten

müssen ausfallsicher über die Entscheidungsebene an einen Powertrain Controller (PTC) und somit auf die Ausführungsebene übertragen werden können. Der Bedarf der Kommunikation autonomer, einzelner Systeme untereinander über komplexe Kabel- und Steckverbindungen besteht, wie einleitend beschrieben, nicht mehr oder zumindest nur noch marginal. Der Trend geht in SPARC zu einem zentralen, intelligenten „Antriebstrang-Dirigenten“. Die hier zu prüfende Hardware besteht aus der Prozessorplatine, dem Gehäuse selber sowie einiger weniger „Kommunikationsbahnen“. Die Stabilität und Zuverlässigkeit dieser Komponenten sind bekannt oder mit bekannten Testabläufen für solche Komponenten einfach zu erlernen. Mit Ausfallsicherheit ist an dieser Stelle viel mehr die Sicherheit gegen ein Versagen der Software und der damit angestoßenen Kommunikations- und Regelprozesse im Gesamtfahrzeug gemeint. Weiterhin muss die Software auf bestimmte Situationen, die der zentralen Steuerung aufgrund bestehender Algorithmen und programmierter Abläufe von den Fahrzeugsystemen zurückgemeldet werden, sicher, schnell und vor allem richtig reagieren. Sie muss als Antwort darauf die entsprechenden Prozesse im Gesamtsystem einleiten, um eine richtige Reaktion auf eine bestimmte Situation zu initialisieren. Dies muss ebenfalls unter für die Software und die Speicherkomponenten extremen Bedingungen, also bei Spannungsspitzen und Stromausfällen sowie bei „unsinnigen“ oder widersprüchlichen Informationen von über- oder untergeordneten Schnittstellen, sicher funktionieren.

Ein logische Schlussfolgerung daraus ist aber, dass die entscheidenden Komponenten des unfallvermeidenden Fahrzeuges, die lediglich aus Systemcode bestehen, aus entwicklungstechnischer und somit aus prüftechnischer Sicht weit nach vorne in den Entwicklungsprozess geschoben werden und zwar in die Softwareentwicklung, in die Modellphase oder die Codegenerierungsphase. Dies lässt die Frage zu, ob heutige Prüfverfahren für die resultierenden Anforderungen optimal sind.

In SPARC wurde daher eine neue Generation von Gesamtfahrzeugprüfständen parallel zu der Entwicklung der beschriebenen Sicherheits- und Systemkomponenten aufgesetzt. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte ViL-Teststand ermöglicht es in SPARC, ein komplett mechatronisches Fahrzeugkonzept mit richtungsweisender Sicherheitstechnik im Hinblick auf unfallvermeidendes Fahren in nur drei Jahren zur Prototypenreife aufzubauen und umzusetzen. Die vorgestellten Fahrzeuge (PKW und LKW) haben den Vergleich mit der Serie während der öffentlichen Abschlussveranstaltung⁸ angetreten und bestanden. Die im Folgenden beschriebene Prüftechnik und die Bemühungen, den oben beschriebenen Prozess lückenlos anzuwenden, sind der Schlüssel zu diesem Erfolg.

⁸ Das SPARC-Projekt wurde am 16./17. Juli 2007 in einer großen Abschlussveranstaltung der Öffentlichkeit präsentiert und damit erfolgreich abgeschlossen.

4. Prüfstandsystematik - eine Klassifizierung

In diesem Kapitel wird die These aufgestellt, dass alle Prüfstandsarten oder Prüfverfahren, zumindest in Bezug auf fahrzeugtechnische Belange, grundlegend eine identische Systematik aufweisen. Alle in den vorangegangenen Abschnitten erwähnten Prüfverfahren oder Prüfarten haben also identische Grundlagen, oder lassen sich somit in ein übergeordnetes Schema einfügen. Gemeint sind an dieser Stelle MiL-, SiL-, HiL-, ViL⁹- und auch Bandendepfstände bzw. Prüfverfahren. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese Prüfstände für Gesamtfahrzeuge, Motoren, Getriebe oder für sonstige Aggregate- und Komponentenprüfungen ausgelegt sind. Die Diskussion diesbezüglich, die in diesem Abschnitt geführt wird, wird auf Basis eines Vollfahrzeugprüfstandes oder besser von Prüfverfahren für fahrzeugtechnische Komponenten geführt.

Diesem Ansatz folgend besteht jeder Prüfstand (**Abbildung 14**) zuerst einmal aus dem Prüfling selber. Dies kann ein Modell (MiL), ein Stück Systemcode, also Software (SiL), ein Stück Hardware oder eine Kombination aus Hard- und Software (HiL) bis hin zum fertigen Gesamtfahrzeug (ViL, IFT, Rollenprüfstand) sein.

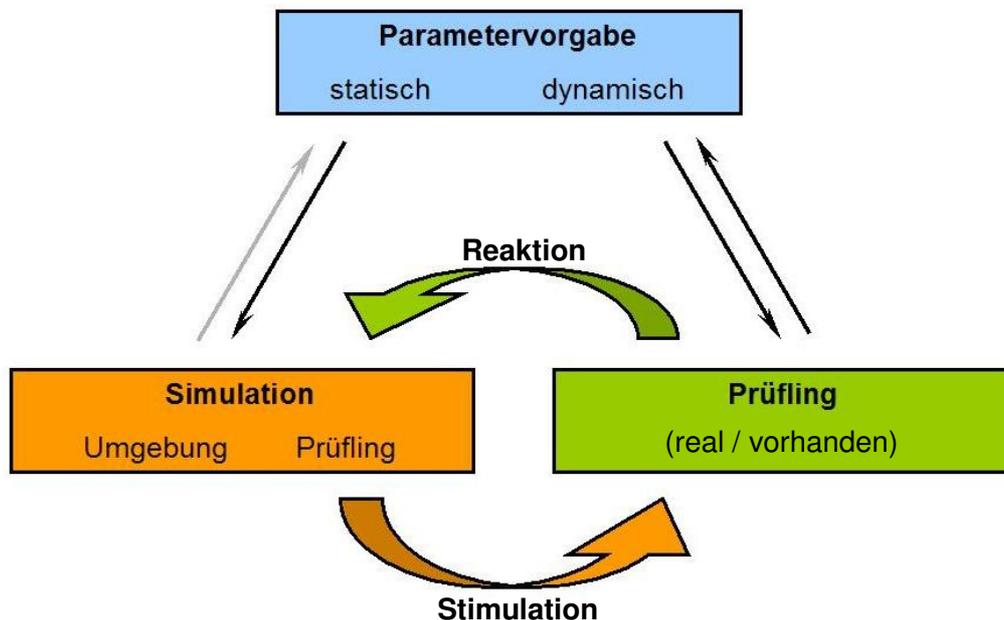


Abbildung 14 Grundsätzlicher Aufbau eines Prüfstandes

Der Prüfling muss bei jeder dieser Prüfarten zu Prüfzwecken mit einer Simulation stimuliert werden. Diese kann wiederum verschieden große Umfänge haben (**Abbildung 15**) und kann sowohl Daten zum Umfeld des Prüflings aufweisen als

⁹ Erklärung der Begrifflichkeiten siehe „Verzeichnis verwendeter Abkürzungen“

auch Daten zum Prüfling oder zum (Soll-) Verhalten des Prüflings selber. Der Prüfling und die Simulation stehen dabei in einem ständigen Kommunikationsloop.

	SIM	Prüfling / Real
Model in the Loop (MiL)	99 - 100 %	0 - 2 %
Software in the Loop (SiL)	95 %	5 %
Hardware in the Loop (HiL) oder Mehrkomponententest	85 %	15 %
	60 %	40 %
Vehicle Hardware in the Loop (VeHiL)	22 %	78 %
Versuchsfahrt / Prototyp	0 - 10 %	90 - 100 %
Bandendetest (x-road)	20 %	80 %

Abbildung 15 Schätzwerte der Anteile an Simulation bei verschiedenen Prüfarten in Bezug auf real vorhandene Hard- und Software am Prüfstand

Dabei können die Umgebungs- oder Umfelddaten sowohl aus tatsächlichen, simulierten Umfelddaten bestehen (beispielsweise aus einer realen Messung bei einer Prüffahrt) als auch aus künstlich generierten Umgebungsdaten. Die Umgebung eines Prüflings kann zudem auch ein Teil des Fahrzeuges sein, in den der Prüfling später integriert werden soll (z.B. bei der klassischen HiL-Prüfung). In diesem Fall besteht das Umfeld zusätzlich aus simulierten Teilen und Komponenten des übergeordneten Systems. Alle Daten und Informationen, die der Prüfling am Prüfstand erhält, sind aber grundsätzlich nur elektronische Impulse seiner Umgebung. Diese Impulse sind von anderen Systemen im Gesamtverbund generiert worden.

Weiterhin enthält ein Prüfstand grundsätzlich eine Parametervorgabe. Diese diktiert sowohl dem Prüfling als auch der darauf abgestimmten Simulation den Prüfhergang, also welcher Prüfablauf gefahren werden soll. Die Parametervorgabe kann ebenso aus realistischen Daten oder aus fiktiven Daten bestehen, die entweder korrekt oder (absichtlich) fehlerhaft sein können, um entsprechende Reaktionen des Prüflings zu testen. Die Parametervorgabe kann demnach aus rein regelungstechnischer Sicht als Eingangs- und / oder Störgröße des mitunter komplexen Regelkreises interpretiert werden.

Der Umfang und die Art der Daten der Parametervorgabe und der Simulation sind zu einem sehr hohen Anteil von der Prüfung und der Prüfaufgabe abhängig und vom Prüfer sorgfältig zu wählen und zu bestimmen. Es kommt dabei darauf an, welche Funktion des Prüflings geprüft werden soll und inwieweit die Art und die Tiefe eines

eventuell auftretenden Fehlers ermittelt werden sollen. Die Parametervorgabe muss dabei ständig sowohl mit dem Prüfling selber als auch mit der Simulation in Kommunikation stehen, um die entsprechenden Vorgaben zum richtigen Zeitpunkt tätigen zu können. Bei hochkomplexen Prüfaufgaben kommt der Prüfer dabei nicht immer um die Verwendung eines Echtzeitsystems herum. Gerade im Bereich der Hardware in the Loop Prüfstände ist das Wort „Echtzeit“ oder „echtzeitfähig“ ein viel diskutierter Begriff. Viele Hersteller von HiL-Prüfsystemen werben heute mit diesem Ausdruck. Jedoch ist hier grundsätzlich Vorsicht geboten. Der Prüfer sollte sich genau überlegen, ob die Angaben zur Echtzeitfähigkeit wirklich stimmen können und ob in der Tat ein echtzeitfähiges Prüfsystem benötigt wird. Bekannte Daten der Simulation können bei ebenfalls bekannten Totzeiten des Systems der laufenden Simulation zeitlich phasenverschoben angeboten werden, was oft genauer und stabiler ist als eine „Echtzeitsimulation“.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Parametervorgabe umso komplexer sein muss, je komplexer der Prüfling selber oder der Prüfablauf bzw. die Prüfaufgabe ist. Je mehr Systeme gleichzeitig, also zusammengeschlossen zu einem Prüfling, getestet werden, desto komplexer ist in den meisten Fällen der Prüfablauf. Daher muss die Parametervorgabe entsprechend umfangreich sein, um alle Abläufe zu testen. Die Ausnahme sind hier komplette Systemverbände zur Ausführung einer einfachen Aufgabe. Die im Gesamtverbund ablaufenden Operationen können an dieser Stelle viel komplexer sein als der zu prüfende Effekt.

Bei der Simulation verhält sich dies entgegengesetzt. Ist die gesamte Umgebung des Prüflings real vorhanden, muss diese nicht oder nur in minimalen Teilen simuliert werden. Diesen Ansatz verfolgt das hier vorgestellte ViL-Prüfkonzept. Auch bei einem Rollenprüfstand am heutigen Bandende wird lediglich mittels Laufrollen bestmöglich die Straße in längsdynamischer Richtung simuliert.

Zudem ist vor der Prüfung zu überlegen, ob die Parametervorgabe statisch oder dynamisch sein soll. Eine dynamische Parametervorgabe reagiert beispielsweise auf Abweichungen des Prüflings von der Normalität und bezieht diese in die weitere Parametervorgabe mit ein. Eine statische Parametervorgabe bleibt dahingegen von Reaktionen des Prüflings oder der Simulation unbeeindruckt. Welche Wahl hier getroffen wird, hängt vom angestrebten Prüfergebnis und vom gewünschten Prüfumfang ab. So kann bei einem Gesamtfahrzeugtest bereits ein einfaches Fahrermodell eine dynamische Parametervorgabe darstellen. Dieses Fahrermodell würde auf ein in einer kritischen Fahrsituation leicht untersteuerndes Fahrzeug entsprechend reagieren, beispielsweise durch „Wegnehmen von Gas“, durch heftiges Bremsen oder Gegenlenken. Dabei kann die Reaktion des simulierten Fahrers richtig im Sinne der Fahrdynamik oder auch falsch sein, um einen unsicheren oder ungeübten Fahrer zu

simulieren. Hier müssten dann die oben beschriebenen, prädiktiv-aktiven Fahrerassistenzsysteme entweder eher oder später eingreifen, je nach deren Voreinstellung und eigener „Wahrnehmung“. Auf Basis heutiger Systeme müsste in diesem Fall das ABS- und / oder das ESP-System eingreifen.

Diesem Ansatz entsprechend funktioniert auch ein heutiger Rollenprüfstand am Bandende der Fahrzeugserienproduktion (**Abbildung 16**), jedoch lediglich in längsdynamischer Ausprägung.

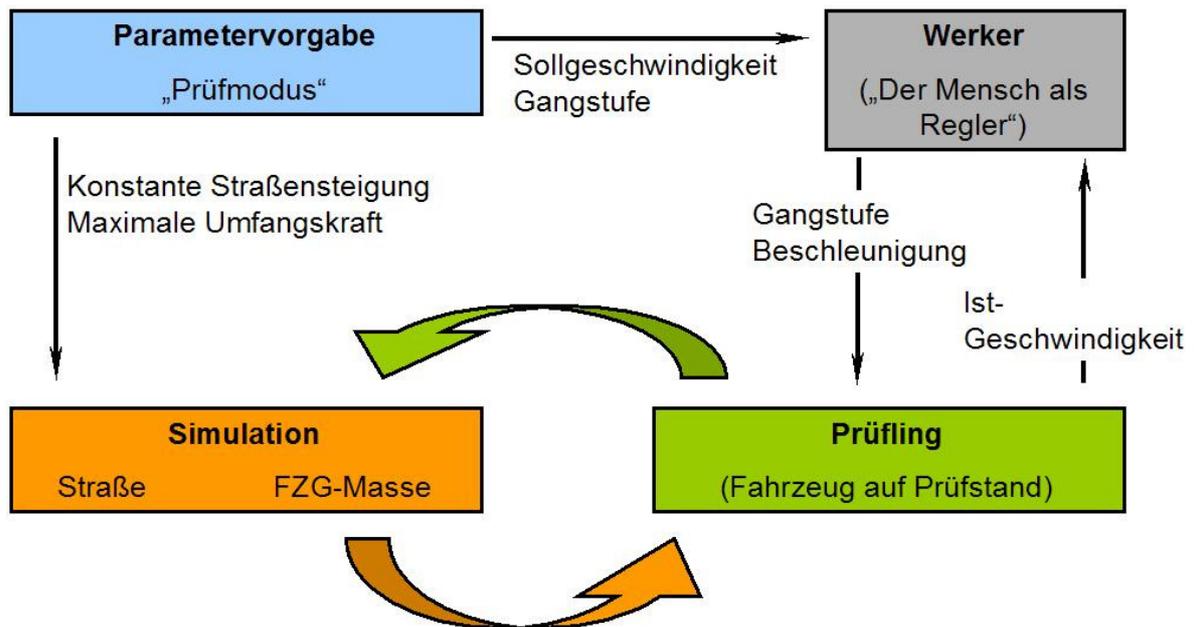


Abbildung 16 Schematischer Aufbau eines heutigen Bandendeprüfstandes

Der einzige Unterschied zwischen diesem „bemannten“ Prüfstandstypen und dem oben vorgestellten grundlegenden Ansatz ist, dass sich die Parametervorgabe in einen realen Fahrer und eine prüfstandsseitige Parametervorgabe, den so genannten Prüfmodus, aufteilt. Der Fahrer führt jedoch wiederum nur Befehle gemäß der Prüfstands-vorgabe aus. Dabei kann der Fahrer (Werker) als Regel- oder Stellglied der Parametervorgabe identifiziert werden. Er erhält, abhängig vom Prüfmodus, vom Prüfstand (z.B. über einen Monitor) die am Prüfling einzustellende Geschwindigkeit oder entsprechend die Vorgabe zum Bremsen oder Beschleunigen in einer bestimmten Größenordnung. Weiterhin übermittelt die Parametervorgabe dem Prüfstand die einzustellende Fahrzeugmasse, also die zu simulierende Trägheit, die zum momentanen Fahrzyklus passende Radumfangskraft und die Straßensteigung sowie die Antriebsart des Prüflings (front- oder heckgetriebenes Fahrzeug, Allradfahrzeug). Andere längsdynamische Parameter (z.B. Schlupf) können nicht ohne weiteres eingestellt werden. Vom Prüfling selber erhält die Simulation die Geschwindigkeit, die Beschleunigung sowie die Umfangskraft der angetriebenen Räder und setzt diese entsprechend des eingestellten Prüfmodus in vorprogrammierte Prüfschritte (z.B.

ABS-Test, „Rollprüfung“, etc.) um. Der Werker hält das Fahrzeug zudem gerade auf dem Rollenprüfstand und verhindert somit ein ungewolltes Herausfahren.

Genaugenommen ist somit der funktionale Unterschied zwischen einem Entwicklungsprüfstand des Typen „ViL“ (→Kapitel 5) und dem ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelten InLine Function Tester (Funktionsprüfstand in der Montagelinie → Kapitel 6) vernachlässigbar. Unterschieden wird hier lediglich in dem Punkt, dass auf einem Entwicklungsprüfstand die Testtiefe wesentlich höher ist, einzelne Komponenten also intensiver und wesentlich häufiger geprüft werden. Dies geschieht beispielsweise unter Verwendung immer anderer Parametersätze für ein und dieselbe Komponente. Die Tiefe der Auswertung ist zudem auf einem Entwicklungsstand größer, als dies in der Produktion unter extrem zeitkritischen Gesichtspunkten der Fall ist. Hier kann lediglich der „fehlerfreie Zusammenbau“ der einzelnen Serienkomponenten und die richtige, softwaremäßige Einstellung der sicherheitsrelevanten Systeme überprüft werden. Der Prüfablauf in der Produktion ist, abhängig von den verbauten Komponenten im Fahrzeug, fixiert und immer wieder identisch. Diese „Baugleichheit“ der in der Arbeit entstandenen Prüfstandstypen für die Entwicklung und die Produktion bedingt beispielsweise kostentechnische Vergünstigungen im Bereich der Entwicklungsprüfstände. Die Abdeckbarkeit der Zusammenhänge der funktionalen Prüfabläufe und die mögliche Identität in der Darstellbarkeit der Prüfergebnisse begünstigt zudem eine eindeutigere und flüssigere Konversation zwischen den in heutigen Zeiten doch eher getrennten „Lagern“ Entwicklung und Produktion. Diese Möglichkeiten könnten, wenn sie effektiv und ausschöpfend genutzt werden, in absehbarer Zeit eine signifikante Produktverbesserung hervorrufen, was eine intensive Verminderung der G&K-Kosten mit sich ziehen würde. Einhergehend können Entwicklungszeiten weiter gestrafft und somit weitere Kosten reduziert werden.

4.1. Simulation von dynamischen Fahrparametern und einer fiktiven Umgebung zur autonomen Fahrzeugprüfung

Zur vollständig autonomen Fahrzeugeinstellung und Prüfung am Bandende wird eine entsprechende Kommunikation zwischen Fahrzeug und Prüfstand notwendig, die exakt auf die Belange der Prüfung abgestimmt ist. Benötigt werden hier beispielsweise Eingriffe in die Regelung des elektronischen Gaspedals des Prüflings, in die Bremsensteuerung bis hinein in ABS-relevante Bereiche und in den Lenkaktuator¹⁰. Weiterhin wird es notwendig sein, in das zentrale Steuergerät des Fahrzeuges so

¹⁰ In einem rein mechatronisch ausgelegten Fahrzeug existiert keine mechanische Verbindung zwischen dem Lenkrad und der Achse / Lenkgestänge mehr. Der Lenkaktuator (Steer-by-Wire) ist ein rein mechatronisches System und kann über elektronische Impulse entweder singulär oder über die Steuerzentrale des Fahrzeuges, also über die Richtungsänderung des Bewegungsvektors) angesteuert werden. Dazu muss der Prüfstand lediglich über ein bestimmtes Kommunikationsprotokoll in die Lage versetzt werden, diese Veränderung in der Fahrzeugsteuerung vornehmen zu dürfen. Bei heutigen Fahrzeugen existieren solche Systeme noch nicht oder noch nicht ausreichend ausgereift. Hier ist es jedoch möglich, bedingt Lenkeinschläge über moderne, mit Hilfe von Elektromotoren unterstützte Überlagerungs- oder Superpositionlenkungen einzuleiten, wenn dies für die Prüfung gewünscht wird oder notwendig erscheint.

eingzugreifen oder es zumindest so anzusprechen, dass alle Fahrerassistenzsysteme dahingehend beeinflusst werden können, dass ihnen eine gesamtheitliche Umfeldsimulation „suggeriert“ werden kann. Unter der Voraussetzung des Vorhandenseins eines virtuellen Copiloten kann ein in einen gesicherten Prüfmodus versetztes Fahrzeug somit komplett über eine geeignete Umfeldsimulation gesteuert werden. Aus sicherheitstechnischen Überlegungen der Entwicklungsabteilungen der OEM ist ein direkter Eingriff in alle Regelsysteme des Fahrzeuges heute jedoch noch nicht freigegeben. Um dies zukünftig sicherzustellen, wird es beispielsweise eine spezielle Codierung oder einen sicheren Prüfmodus geben müssen, der nur dem Prüfstand Zugriff auf die Prüfsequenzen und speziellen Prüfabläufe erlaubt. An dieser Stelle sei die Überlegung gestattet, ob solche Prüfsequenzen nicht direkt als „Basisinformation“ in einem Fahrzeugsteuergerät hinterlegt sein könnten. Hier müssen Prüfungsspezialisten eng mit den Entwicklungsverantwortlichen der OEM zusammenarbeiten. Zurzeit bestehen bezüglich dieser tiefen Eingriffe in die Steuergeräte des Fahrzeuges Bedenken in die Richtung, dass werksfremde Chiptuner einen solchen Code entschlüsseln könnten. Somit könnten dem Endkunden gewisse Funktionen oder Funktionsänderungen zur Verfügung gestellt werden, welche die Sicherheit des Fahrzeuges eklatant gefährden könnte.

Die aus dem zurzeit noch existierenden Verbot in Bezug auf einen vollständigen Eingriff des Prüfstandes in heutige Fahrzeugsteuerungen resultierenden Einschränkungen können für heutige Prüfbelange größtenteils ausreichend abgefangen werden. Durch eine Stimulation von sekundären, singulär arbeitenden Systemen zur Erhöhung der aktiven Sicherheit oder des Komforts, wie „autonomen Abstandhaltern“ sowie Notbrems- und Spurhalteassistenten, können die primären Systeme Bremse, Gaspedal und Lenkung indirekt beeinflusst werden. Diese Beeinflussbarkeit endet bei den in diese Systeme einprogrammierten, vom Gesetzgeber vorgesehenen Grenzen in Bezug auf maximale Bremsbeschleunigung oder den maximalen Überlagerungswinkel bei der Lenkung.

In Zukunft wird dies jedoch nicht mehr ausreichend sein, zumindest nicht im Hinblick auf (voll-) automatisierte Fahrzeugprüfungen. Ein willkommener Zusatznutzen zukünftiger, horizontaler Infrastrukturen im unfallvermeidenden Fahrzeugkonzept besteht darin, dass die Systeme über die softwarebasierten Funktionalitäten durch automatische Testsysteme leichter ansprechbar sein werden. Hier wird lediglich mit einem zentralen Steuergerät gearbeitet und die Funktionen können gesamtheitlich stimuliert werden, wenn eine entsprechende Kommunikation zwischen Prüfstand und Fahrzeug vorausgesetzt werden kann. Ebenfalls muss dem Prüfsystem die komplette Kontrolle über den Prüfling gestattet werden. Dieser Vorteil sollte im Hinblick auf den steigenden Preis- und Effizienzdruck auf die OEM genutzt werden.

Die Steuerung des Prüflings muss also vollautomatisch über die Kommunikation des Testsystems oder der Testsoftware mit dem Fahrzeug und dessen implementierten Funktionen geschehen. So kann nach erfolgter Einstellung der Fahrerassistenzsysteme in einem InLine Fahrerassistenzsysteme Kalibrier- und Einstellstand (InLine FAS-Stand) beispielsweise durch Simulation eines anderen Verkehrsteilnehmers auf einer ebenfalls simulierten Fahrbahn im InLine Function Tester (IFT) eine entsprechende Reaktion der sicherheitsrelevanten Systeme erzeugt sowie direkt gemessen und somit beurteilt werden. Das Fahrzeug wird dabei über einen vom Prüfstand generierten oder beeinflussten Soll-Bewegungsvektor angesteuert. Dafür zwingend notwendige (Fahr-) Parameter müssen dem Fahrzeug aus der Simulation heraus „vorgespiegelt“ werden. Hierauf wird im nächsten Abschnitt explizit eingegangen. Jedoch nicht nur die Prüftechnik muss auf die kommenden Herausforderungen angepasst werden. Auch fahrzeugintern müssen die Steuergeräte in die Lage versetzt werden können, Steuerbefehle vom Prüfstand zuzulassen.

Weiterhin ist es denkbar, dass Prüfabläufe, also die Information darüber, welche Funktionen am jeweiligen Fahrzeug in welcher Weise auf korrekte Funktion geprüft werden, direkt auf dem zentralen Steuergerät des Fahrzeuges selber hinterlegt sind. Vorteile dieser Möglichkeit bestünden hier in einer später im Feld (TÜV) statt findenden Fahrzeugüberprüfungen. Somit wäre leichter festzustellen, ob das Fahrzeug und alle seine Funktionalitäten noch ordnungsgemäß funktionieren oder ob es seit der Produktion umprogrammiert oder andersartig manipuliert worden ist. Es müssen an dieser Stelle Lösungen erarbeitet werden, die eine solche Fremdmanipulation entweder unmöglich oder zumindest einfach nachweisbar machen. Eine weitere Möglichkeit der Prüfablaufsteuerung besteht in der klassischen Methode, dem Prüfstand die Informationen über das gerade zu prüfende Fahrzeug zu übermitteln. Diese Variante kann bereits heute zum Einsatz kommen. Nach der Identifikation des individuellen Prüflings fordert der Prüfstand über das zentrale Firmennetz die Prüfanweisung entsprechend an und prüft das Fahrzeug autonom, also auch hier komplett ohne menschliche Einflussfaktoren und somit sehr genau und taktzeitoptimiert. Das Thema bezüglich der Steuerbarkeit des Prüflings durch den Prüfstand besteht jedoch immer noch und muss gelöst werden. Hierzu ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den OEM, den Komponentenzulieferern und der Legislative sowie den TÜVs unabdingbar.

4.2. Simulation relevanter Fahrparameter auf einem Vollfahrzeugprüfstand

Ein möglicher, schematischer Prüfstandsaufbau, wie er auf Basis heute existierender Prüfstandstechnik vorstellbar wäre, ist in **Abbildung 17** dargestellt. Unter der Annahme, dass die oben beschriebene Kommunikation und die entsprechende Kontroll-

und Steuerfreigabe der fahrzeuginternen Funktionalitäten durch den Prüfstand in Zukunft ermöglicht wird, dass also das Fahrzeug während der Prüfsequenz nahezu uneingeschränkt vom Prüfstand kontrolliert werden kann, kann ein vollautomatischer InLine-Prüfablauf theoretisch wie folgt aussehen:

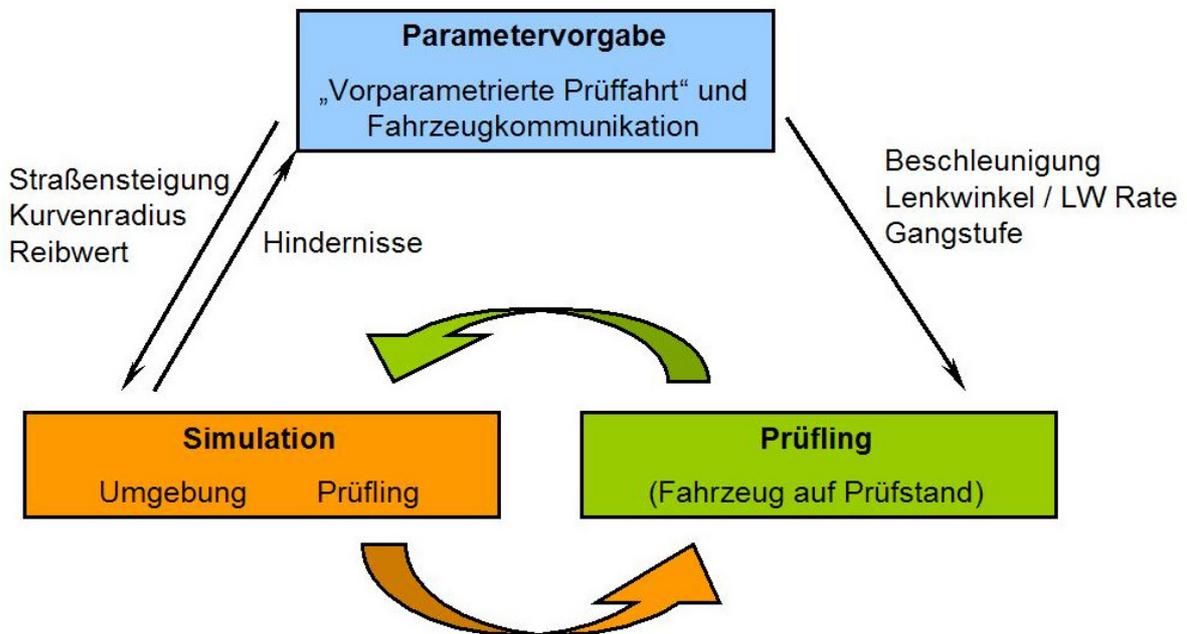


Abbildung 17 Möglicher Prüfaufbau in Bezug auf Kommunikation und Datenfluss

Es ist vorstellbar, dass alle dynamischen Prüfabläufe (Bremsen inkl. ABS, ESP, Lenkung, autonome Reaktionen etc.) in eine „simulierte Prüffahrt“ integriert sind. Auf dem in **Abbildung 18** dargestellten, grau umrandeten „Anlagenrechner“ läuft, dem Gedankengang der simulierten Prüffahrt folgend, neben der Anlagensteuerung auch ein Fahrzeugverhaltensmodell und weitere notwendige „Funktionalitätssimulationen“, welche dem Fahrzeug im Prüfstand parallel zu den Prüfstimulationen ein „reales Umfeld“ suggerieren.

Denkbar ist hier eine Straße oder „Teststrecke“ mit gezielt bewegten oder positionierten Hindernissen und anderen Verkehrsteilnehmern. Voraussetzung dabei ist, dass alle Systeme des Fahrzeuges parallel und zeitnah alle notwendigen Informationen (Umfeld und Fahrdynamik) erhalten. Diese müssen auf Basis einer Simulation und eines Fahrzeugverhaltensmodells generiert und dem Fahrzeug über die Kommunikation zugänglich gemacht werden. Somit kann den Umfelderkennungssystemen des Fahrzeuges ein quasireales Umfeld, beispielsweise ein oder mehrere anderer Verkehrsteilnehmer, auf reiner Datenbasis vermittelt werden.

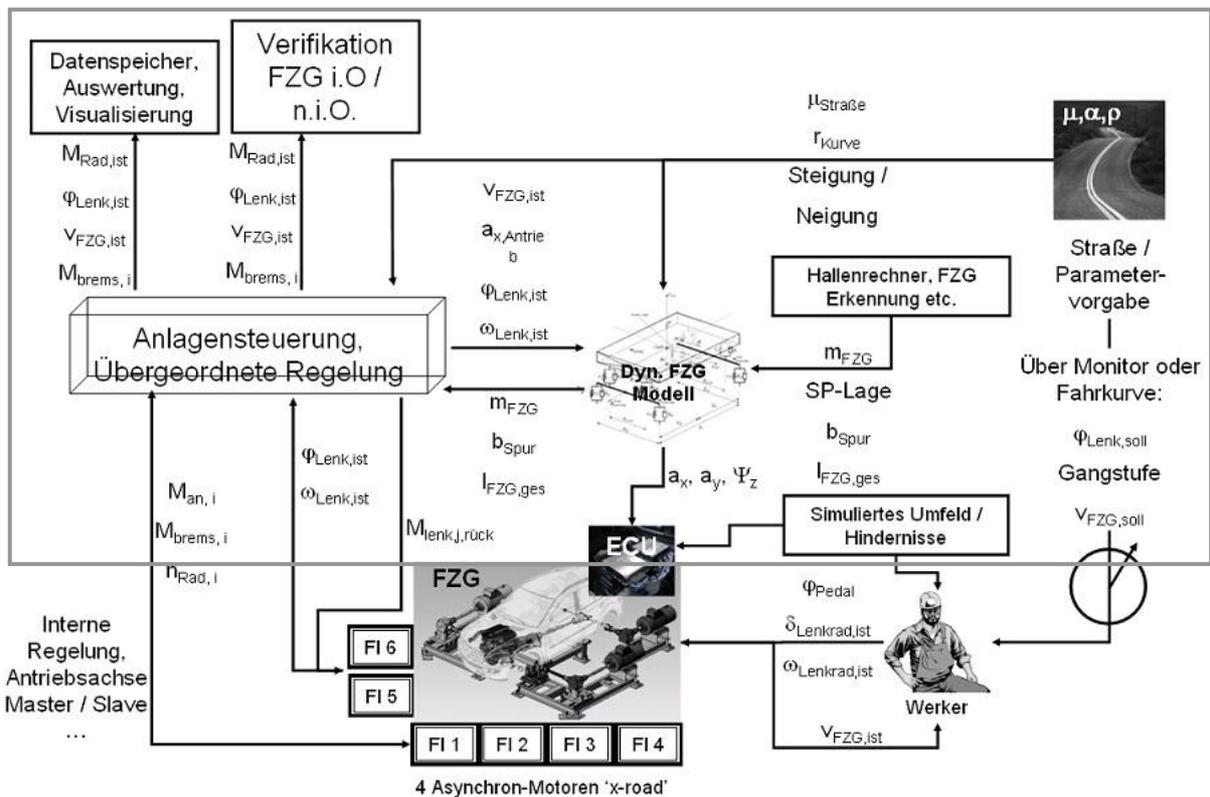


Abbildung 18 Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Fahrzeug, Werker und Prüfstand während einer Fahrzeugprüfung im IFT

In Abbildung 18 gelten folgende Bezeichnungen:

- M := Drehmoment (Antriebsmoment, Lenkmoment)
- n := Drehzahl (Raddrehzahl)
- m := Masse (Fahrzeugmasse)
- v := Geschwindigkeit
- a := Beschleunigung
- φ, δ := Winkel (Radlenkwinkel, Lenkradwinkel)
- ω := Winkelgeschwindigkeit / Drehrate
- b, l, r := geometrische Abmessungen (Breite, Länge, Radius)
- μ := Reibwert (zwischen Straße und Fahrzeugbereifung)
- ψ := Gierwinkel (Drehbewegung des Fahrzeuges um die Hochachse)
- FI 1-6 : Frequenzumrichter (Frequency Inverter) des jeweiligen E-Motors

Als Beispiel kann an dieser Stelle eine simulierte Fahrt über eine kurvige Landstraße bei Gegenverkehr und einem ruckartig bremsenden, vorausfahrenden Fahrzeug angeführt werden. Wenn der ebenfalls simulierte Fahrer (Fahrzeugsteuerung über Anlage anstelle eines Werkers) in diesem Moment nicht eingreift, sind die modernen prädiktiv-aktiven Fahrerassistenz- bzw. Sicherheitssysteme gefordert, in das Fahrgeschehen einzugreifen. Dies sollte, je nach Einstellung dieser Systeme, entsprechend rechtzeitig und gemäß der Vorgabe „informieren - warnen - eingreifen“ geschehen.

Die korrekte Funktion und Einstellung der auf Umfelderkennungssensorik basierenden prädiktiv-aktiven Sicherheits- und Assistenzsysteme muss selbstverständlich zuvor auf einem InLine FAS-Stand sichergestellt werden. Zusätzlich können durch simulierte Fehlreaktionen (z.B. Zufahren auf eine enge Kurve mit zu hoher Geschwindigkeit) die prädiktiv-aktiven Sicherheitssysteme auf korrektes Ansprech- bzw. Eingreifverhalten getestet werden. Aber nicht nur Hindernisse, weitere Verkehrsteilnehmer, bestimmte Straßenbeläge (Reibwerte) und andere „Situationen“ müssen dem Fahrzeug suggeriert werden. Es müssen darüber hinaus fahrdynamische Parameter an den Prüfling weitergeleitet werden - und zwar „just in time“ zum gerade stattfindenden Prüfablauf und zu der jeweiligen Reaktion des Fahrzeuges passend! Dies ist absolut notwendig da im Prüfstand selbst keine reale Querschleunigung und keine Gierwinkelgeschwindigkeit¹¹ vorhanden ist. Denn das Fahrzeug befindet sich weitestgehend fixiert in der Montage- oder Transportvorrichtung und nicht real auf der Straße.

Abbildung 18 zeigt schematisch die notwendigen Verknüpfungen und die vom Prüfstand bereitzustellenden Parameter für eine sinnvolle Simulation und Fahrzeugsteuerung. Das Szenario ist auf Basis heutiger Rollenprüfstandstechnik und einer Erweiterung mit zwei aktiven Lenkmotoren für die gelenkte Achse aufgebaut (→ Kapitel 5 und 6). Beim Einfördern des Fahrzeuges in den Prüfstand wird dieses vom Hallenrechner erkannt und dem Prüfstand werden die notwendigen Parameter für die (Verhaltens-) Simulation des Prüflings zur Verfügung gestellt. Weiterhin ist noch ein Werker dargestellt, der das Fahrzeug steuert. Der oben beschriebenen Logik eines Prüfablaufs folgend könnte dem Werker an bestimmten Stellen im Prüfablauf mitgeteilt werden, er möchte sich so verhalten, als könne er gerade nicht oder nicht richtig reagieren oder als würde er falsch reagieren (falsches Gegenlenken, Panikreaktion, ungeübter Fahrer etc.). Das simulierte Umfeld (andere Verkehrsteilnehmer) sowie der Verlauf der Straße würde dem Werker auf einer Leinwand (Monitor etc. - ähnlich wie bei einem Telespiel) präsentiert. Parallel dazu müssen sowohl der Verlauf der Straße als auch die simulierten Verkehrsteilnehmer über geeignete Schnittstellen an das Fahrzeug und dessen Steuersysteme gegeben werden.

Der Verlauf der Straße sowie die darauf bezogenen Randwerte müssen ebenfalls an die Steuerung der Prüfanlage übermittelt werden, damit diese entsprechende Reibwerte und Kurvenverläufe mitfahren und die Reaktion des Fahrzeuges auf diese Parameter mitschneiden, also messen, kann. Über die Messvorrichtungen an der Anlage, das sind wiederum die Elektromotoren, werden während der Prüffahrt alle notwendigen Daten (Lenkmomente, Lenkwinkel, Geschwindigkeiten und Brems- bzw.

¹¹ Die Gierwinkelgeschwindigkeit ist die Winkelgeschwindigkeit, die bei Kurvenfahrt durch die Drehung des Fahrzeuges um dessen Hochachse verursacht wird und die durch fahrzeuginterne Sensoren gemessen wird. Tiefergehende Literatur zum Thema Fahrdynamik wird beispielsweise mit /45/ und /46/ in verständlicher Form zur Verfügung gestellt.

Antriebsmomente der einzelnen Räder) gemessen und der Verifikation sowie einer Datenspeichereinheit mitgeteilt. Das Fahrzeugverhaltensmodell bekommt zudem „in the Loop“ das Istverhalten des Fahrzeuges zurückgemeldet. Nur so kann sicher geprüft werden, ob sich das Fahrzeug der Vorgabe gemäß verhält oder ob ein System defekt oder falsch eingestellt ist.

Unter der Annahme der vollständigen Automatisierung der Prüfung am Bandende entfällt der Mensch als Fahrer und Prüfer. Das Fahrzeug wird in Bezug auf Beschleunigungs- und Lenkbewegungen komplett vom Prüfstand gesteuert. Das simulierte Umfeld und die Hindernisse werden den Steuergeräten des Fahrzeuges, die für die Umfeldwahrnehmung verantwortlich sind, auf reiner Datenbasis übergeben (**Abbildung 19**). Die richtige oder falsche Reaktion des „Fahrers“ wird nicht mehr von einem Werker über die eigentliche Mensch-Maschine-Schnittstelle (also das Lenkrad, die Pedale oder einen Sidestick) an das Fahrzeug weitergegeben sondern ebenfalls über Datenprotokolle und eine geeignete Prüfstands-Prüflings-Kommunikation direkt an die Steuergeräte (oder an das zentrale Steuergerät) des Prüflings.

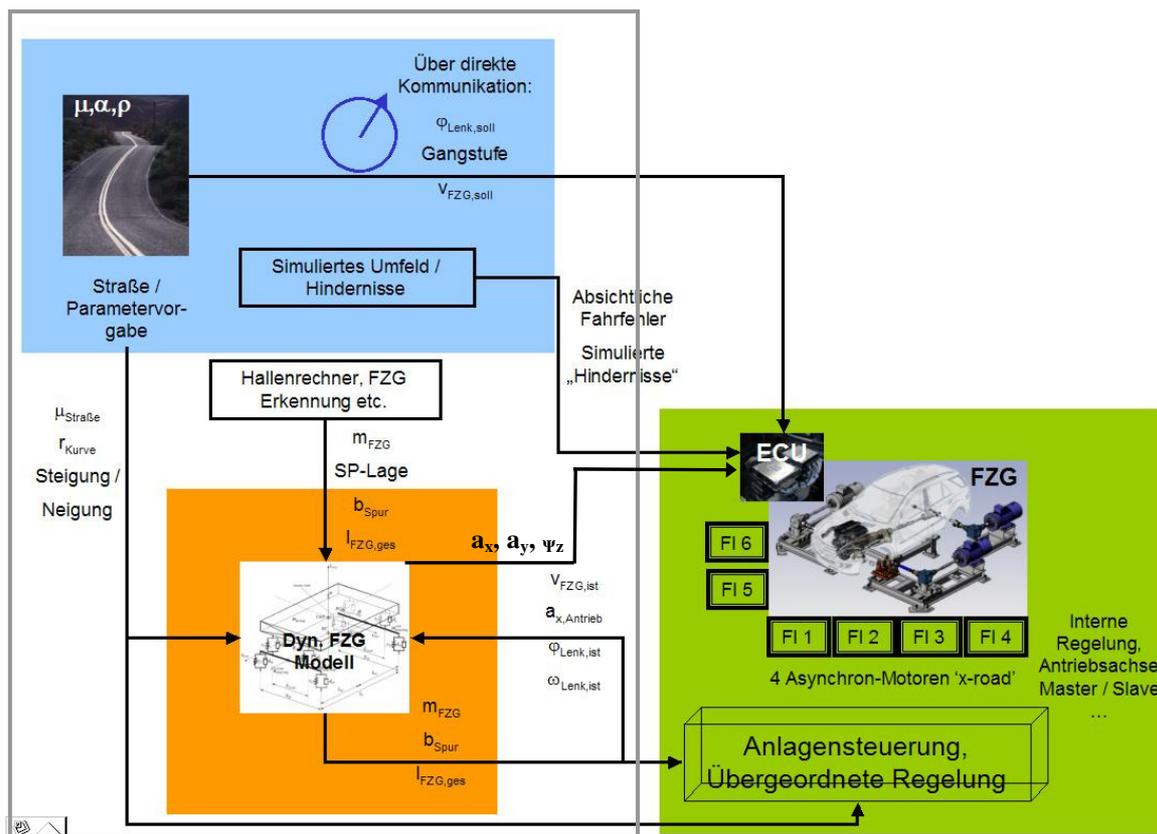


Abbildung 19 Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Prüfstand während einer vollautomatischen Fahrzeugprüfung

Die Steuerung des Fahrzeuges, oder vielmehr dessen Reaktion auf das Umfeld, läuft also in einem gesonderten, abgesicherten Prüfmodus ausschließlich über die zentralen Steuerungseinheiten des Fahrzeuges ab. Bezogen auf das vorgestellte, unfall-

vermeidende Fahrzeugkonzept wird der (Prüf-)Bewegungsvektor (Abbildung 18, rechts und im oberen Teil in Abbildung 19) dem Fahrzeug direkt über die zentrale ECU, also über den „Powertrain Controller“, eingesteuert und simuliert den Fahrerwunschvektor. Dieser kann zu Prüfzwecken entweder sinnvoll gemäß der simulierten Umgebung oder aber im übertragenen Sinne als gefährlich in Bezug auf die momentane Situation gewählt werden (unsicherer, nervöser Fahrer, der Fahrfehler macht). Im letzten Fall wäre wiederum der „virtuelle Copilot“ gefragt, die Situation zu analysieren und entsprechend der hinterlegten Strategie zu reagieren, also zu informieren, zu warnen oder sogar einzugreifen.

4.3. Zusätzliche Vorteile eines vollständig mechatronischen Fahrzeuges in der Produktion

Bei einem ausschließlich mit mechatronischen Komponenten ausgestatteten Fahrzeug (Fully-Drive-by-Wire) sind zukünftig weitere Optimierungsschritte der Mess- und Einstellverfahren am Bandende denkbar. In einem solchen Fahrzeug sind die Lenkung und alle die Lenkung beeinflussenden Systeme nicht mehr mechanisch ausgelegt und auch nicht mehr mechanisch mit der Mensch-Maschine-Schnittstelle, beispielsweise dem Lenkrad, verbunden. Sie ist durch spezielle Stellmotore umgesetzt. Ein Beispiel soll an dieser Stelle die Möglichkeiten aufzeigen, die sich bei der „Einstellung“ der Fahrwerksgeometrie¹² in einem solchen Fahrzeug bieten würden. Theoretisch würde es genügen, die Spurwerte bei einem solchen Fahrzeug nicht mehr durch zeitaufwendiges Öffnen, Einstellen und Kontern je einer Stell- und Kontermutter auf jeder Spurstange im Fahrwerk des Fahrzeuges selber an die Stellung des Lenkrades anzupassen. Es ist möglich, über den genannten Stellaktuator der Lenkung, einen Elektromotor, sowie über den Force-Feedback-Aktuator des Mensch-Maschine-Interfaces (z.B. des Lenkrades) und über dessen Ansteuersoftware das Lenkrad auf „Geradeausfahrt“ einzustellen. Dies ist ohnehin ein notwendiger Schritt, der auch später im Feld bei jedem „Neustart“ des Fahrzeuges erfolgen muss. Beide Systeme werden demnach bei jedem Start des Systems, etwa beim Anlassen des Fahrzeuges und beim damit einhergehenden Initialisieren aller Systeme, entsprechend eingestellt und aufeinander abgeglichen. Dies muss voll automatisch und sehr schnell geschehen. Voraussetzung dafür ist, dass die entsprechenden Werte (zumindest der exakte Nulldurchgang beim Lenken) dem zentralen Steuergerät des Fahrzeuges bekannt sind.

¹² Wie in Kapitel 2 beschrieben wird am Bandende die Fahrwerksgeometrie (Spur und Sturz) vermessen und zumindest die Spur eingestellt. Nähere Informationen zur Fahrwerksgeometrie enthalten beispielsweise /16/ und /46/.

5. Der Vehicle in the Loop (ViL) Funktionstester

5.1. Grundlagen des ViL-Prüfstands

Das Prinzip der ViL-Prüfstände ist eine Weiterentwicklung der in Kapitel 2 vorgestellten Multifunktions-Rollenprüfstände. Das hier entwickelte Prüfkonzept ist sowohl für die Prüfbelange der Serienproduktion (als InLine Function Tester - IFT) als auch für die Bedürfnisse der Automobilentwicklung entwickelt und aufgebaut worden. Der ViL-Prüfstand entstand mit dem Anspruch auf Optimierungen im Zusammenhang mit dem Entwicklungs- und Prüfprozess mechatronischer Fahrzeugkomponenten (Drive-by-Wire) und fahrzeugübergreifenden, vollständig vernetzten Fahrzeugumfeld- und Fahrerbeobachtungssystemen, also modernen sowie zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In erhöhtem Maße wurde dabei auf reproduzierbare Prüf- und Simulationsabläufe für mechatronische Komponenten wie Bremsen und Lenkungen sowie Shift-by-Wire- und Power-by-Wire-Aggregate im Gesamtzusammenhang, also im komplett aufgebauten Fahrzeug, Wert gelegt. Dies versetzt den Testingenieur in die Lage, die Auswirkungen seiner Änderungen am System exakt und direkt zu analysieren. Der Unsicherheitsfaktor, der dahingehend auf realen Testsrecken aufkommt, nämlich die Unwissenheit über die Beschaffenheit der Strecke bei jedem Test, entfällt dabei ebenso wie die Notwendigkeit des Anbringens diverser Sensoren zur Erfassung der tatsächlichen, fahrdynamischen Parameter am Fahrzeug.

Abweichend von dem Prinzip eines Rollenprüfstandes, welches dem Fahrzeug die Straße über die Laufrollen vermittelt, wird beim ViL-Prinzip das Fahrzeug einige Zentimeter vom Boden abgehoben und so im Prüfstand aufgenommen. Die Antriebsmotoren werden über spezielle Übertragungselemente an den Rädern bzw. an den Radnaben angeflanscht.

Die grundlegende Idee des ViL ist darüber hinaus, einen lenkbaren Funktionsprüfstand ohne schwere, mechanische Laufrollensätze zu entwickeln. Durch den Einzug aktiver Sicherheits- und Stabilitätssysteme in moderne Fahrzeuge, die neben einem gezielten Eingriff in die Bremsanlage (ESP) auch mit Hilfe der Lenkung agieren /7, 7b/, wird eine solche Funktion notwendig. Dazu werden Asynchronmaschinen, welche beim Rollenprüfstand die einzelnen Rollensätze antreiben, mit Hilfe spezieller Stützkonstruktionen lenkbar an die Vorderachse des Fahrzeuges angebunden. Die Antriebswelle wird dabei zentriert auf die Radnaben aufgesetzt (**Abbildung 20**, links zeigt ein mögliches Beispiel für LKW-Prüfstände). Die Regelung der vier Motoren sowie die komplette Prüfstandssteuerung stammen ebenfalls von klassischen Multifunktions-Rollenprüfständen. An der angetriebenen Achse werden dieselben Motoren parallel zur Hinterachse und mit Hilfe von je einer Zahnriemenübersetzung (ca.

$i_{ch}=1:3$) angebunden (Abbildung 20, rechts). Die rotatorischen Massenträgheiten der Rad-Reifen-Kombinationen sowie der Riemenscheiben werden an der Anlage belasten, um die empfindliche Regelung der hochdynamischen Elektroantriebe technisch zu erleichtern.

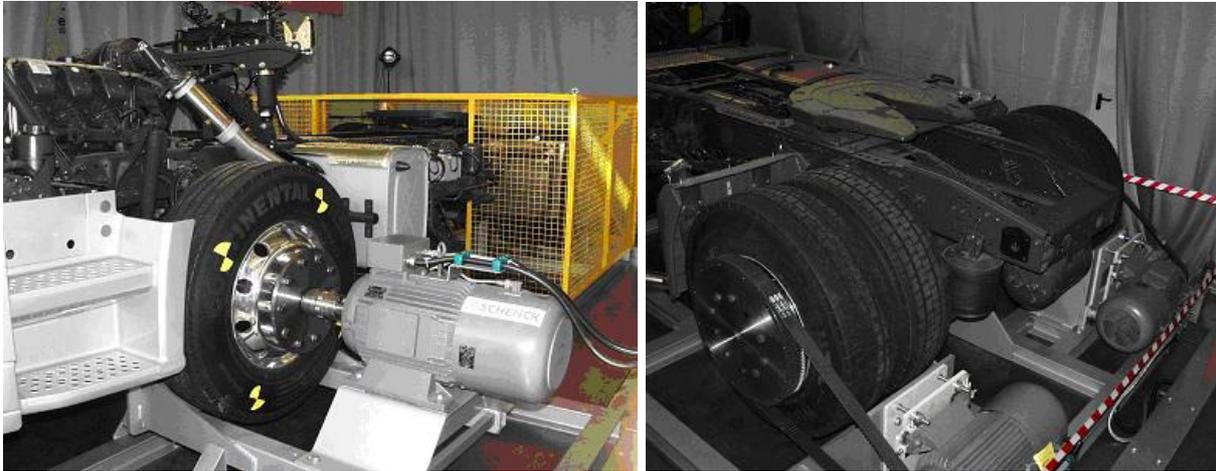


Abbildung 20 Der 1. ViL-Funktionstester für schwere LKW auf Basis eines MB Actros

Rotatorische Massen wirken an dieser Stelle als Schwungmassen (physikalisch vorhandene Rotationsschwingungsdämpfer) und haben somit regelungstechnisch einen differenzierenden Anteil in der Anlagenregelungskette. Diesen Anteil übernehmen im Falle eines Rollenprüfstands die Laufrollensätze, die in der Regel aus hohl gefertigten Stahlzylindern bestehen. Somit ergibt sich beim Rollenprüfstand pro Rollensatz, also pro Fahrzeugrad, eine auf das Rad reduzierte, rotatorische Massenträgheit, deren Wert produktionstechnisch individuell auf das eigentliche Fahrzeuggewicht angepasst werden kann. Diese physikalisch vorhandene Masse dient der Unterstützung der Massensimulation durch den Prüfstand. Sie „schleppt“ die Räder des Fahrzeuges auf dem Prüfstand bei schnellen, längsdynamischen Lastwechseln während der Prüffahrt, ähnlich wie dies die translatorisch bewegte Masse des Fahrzeuges selbst auf der Straße bewirkt. Dies ist beim ViL-Prüfstand nicht so, da es keine Laufrollensätze mehr gibt.

Im Fall des beschriebenen LKW-ViL können die Reifen des Actros natürlich nur einen kleinen Teil dieser üblichen Massenträgheit übernehmen, was aber aufgrund der vorliegenden Anforderung, reine und zudem hochdynamische Funktionsprüfungen durchzuführen, und der Flexibilität der Prüfstandssteuerung vollkommen ausreichend, ja sogar wünschenswert ist. Die kleineren Massen befähigen den Prüfstand zu deutlich höherer Dynamik, was sich für entwicklungsbezogene Untersuchungen an mechatronischen Stabilitätssystemen mit ABS- und ESP-Funktionalität und Lenkeingriff als eher willkommen erweist.

Folgende Beschreibung liefert einen allgemeinen Überblick über den Aufbau eines ViL-Prüfstandes (**Abbildung 21**):

Auf einem zentralen, übergeordneten Steuerrechner läuft ein nichtlineares Zweispurfahrzeugmodell, welches im Rahmen von /47/ entwickelt, parametrierbar und implementiert wurde und dort ausführlich beschrieben ist. Es ist parametrierbar ausgestaltet und lässt sich bezüglich der Massen (Chassis, Achsen, Aufbauten, Ladung etc.), der mechanischen Grunddaten wie Feder- und Dämpferparameter, Rahmensteifigkeiten usw. sowie geometrischer Parameter (Radstand, Spurweiten, Schwerpunktlage, ca. 50 Reifenparameter etc.) exakt an einen Prüfling anpassen.

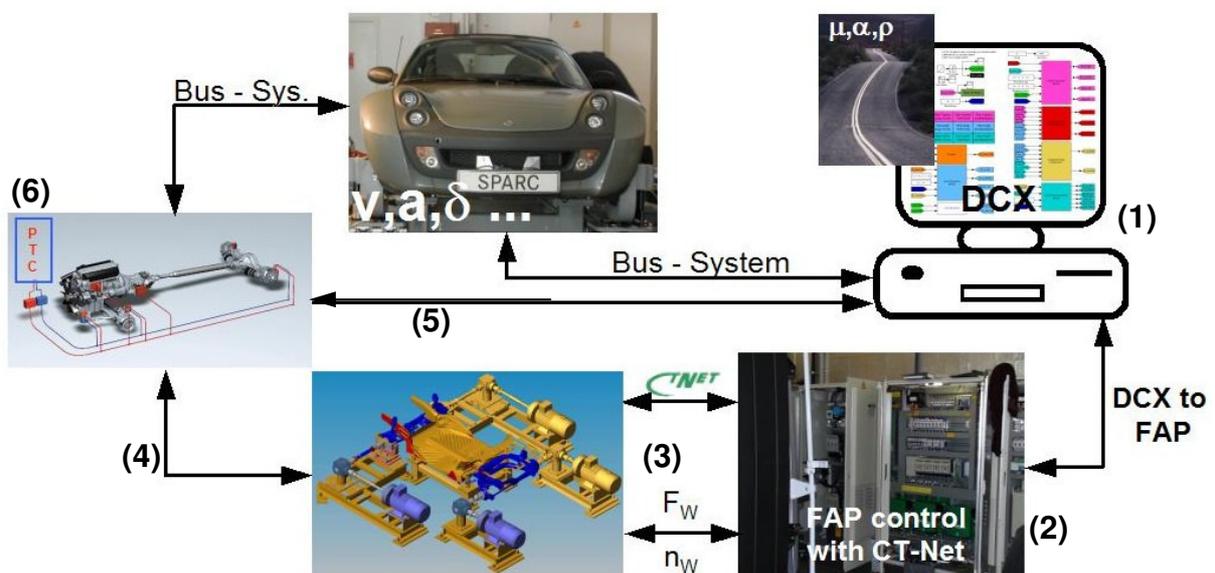


Abbildung 21 Grundsätzlicher Aufbau des ViL-Prüfstandes für PKW und LKW

Der Simulationsrechner (1) wird direkt mit dem Steuerschrank, der Kontrolleinheit (2) der Antriebs- und Messeinheiten des ViL-Prüfstandes, verbunden und kommuniziert über eine spezielle Schnittstelle (→ Anhang I) mit dieser. Der Steuerschrank ist über den Leistungsschrank und damit über Umrichtertechnik direkt mit den Asynchronmotoren verbunden (3). Hier werden auf den Radradius umgerechnete Radumfangskräfte sowie Raddrehzahlen direkt aus der Simulation über eine Übersetzung und die Anbindung an das Fahrzeug umgesetzt (4). Der zentrale Steuerrechner des Fahrzeuges (6) wird mit dem Simulationsrechner verbunden (5) und meldet relevante Daten zurück. Das Fahrzeug kann somit mit den zum reibungslosen Prüfablauf notwendigen Informationen aus der dynamischen Simulation versorgt werden. Im Weiteren besteht der Prüfstand aus dem eigentlichen Cockpit des Fahrzeuges sowie der Mensch-Maschine-Schnittstelle (Pedale / Lenkrad oder Sidestick). Hier kann ein Pilot einen Wunschbewegungsvektor an den Antriebstrang geben.

Wie zu Beginn dieser Arbeit bereits angedeutet unterscheidet sich der Aufbau eines ViL-Prüfstands vom Aufbau bekannter Hardware in the Loop (HiL) Prüfstände. Im Vergleich zu einem herkömmlichen HiL-Prüfstand stellt beim ViL-Konzept das gesamte, reale Fahrzeug den Prüfling dar. Bei konventionellen HiL-Prüfständen ist üblicherweise ein einziges Steuergerät, ein Steuergeräteverbund oder eine Teilkomponente als Prüfling an einen Simulationsrechner angeschlossen. Je nach Anforderung wird die Umgebung des Prüflings modellbasiert mit Hilfe eines Rechners simuliert. Diese fiktive Umgebung kann aus simulierter Elektronik wie den Steuergeräten eines Systemverbundes, aus Modellen elektrischer und mechanischer Komponenten wie Lampen und Leuchten, Fensterhebern, Motor, Getriebe, Kupplung und Wellen etc. bis hin zum kompletten, restlichen Fahrzeug bestehen. Diese Modelle haben jedoch bzgl. bestimmter Prüfbelange bestenfalls eine ausreichende Performance und genügen der Realität nur in bestimmten Grenzen. Hier kann der Stromverbrauch elektrischer Systeme aber auch Schwingungen im Antriebstrang als kritische Komponente genannt werden. Die beispielsweise beim Einkuppelvorgang von Schaltgetrieben mit Klauenkupplungen oder beim Öffnen von verspannten Differenzialgetrieben bei schweren LKW auftretenden Herausforderungen hinsichtlich kurzer Einkuppelzeiten, ruckfreier Betätigung (Fahrkomfort) usw. können mit Modellen oft nicht den Anforderungen gemäß präzise genug oder wirtschaftlich genug nachgebildet werden.

Mit Hilfe der ViL-Prüfstände ist es nun möglich, gesamtfahrzeugübergreifende Funktionstest mit sehr geringem Simulationsaufwand und hoher Anlehnung an die Realität durchzuführen und dabei auch Lenkaktivitäten des Prüflings in die Tests einzubinden. Die Prüfmöglichkeiten mit dem ViL sind bedingt durch den modularen Aufbau und die hohe Dynamik der eingesetzten Antriebsmaschinen, die sowohl zur dynamischen Belastung des Prüflings als auch zur Messung von Momenten und Drehzahlen verwendet werden können, äußerst vielfältig.

Dabei können von den Belastungseinheiten realistische Widerstandskräfte auf die antreibenden Räder aufgebracht werden. Diese setzen sich im vorliegenden Fall aus Reibkräften (zwischen simuliertem Reifen und der Fahrbahn), Windwiderstandkräften (abhängig von der gerade gefahrenen Geschwindigkeit sowie einer parametrierbaren Windrichtung), Beschleunigungswiderständen sowie Steigungswiderständen zusammen. Einer der Vorteile des ViL-Konzepts zeigt sich bereits hier. Teilweise umständlich zu berechnende und oft nur als Schätzwerte erzeugte, rotatorische Beschleunigungswiderstände im Triebstrang müssen nicht simuliert werden. Alle bewegten Teile (Motor, Getriebe, Achsen und Wellen, Kupplung und Differenzial) sind real am Prüfstand vorhanden. Lediglich die Massenträgheit der Rad-Reifen-Kombination muss nachgebildet werden, da das Fahrzeug am Prüfstand in der Regel ohne Räder betrieben wird. Die resultierenden Widerstandskräfte werden online, also „in the Loop“

berechnet und direkt an die Regelung für die Elektromotoren weitergegeben. Die Umrechnung erfolgt wiederum in Reifenumfangskräfte bezogen auf den Radradius. Somit können reale Straßensimulationen bis hin zu 100% Schlupf gefahren werden. Auch querdynamische Einflüsse können dank der Lenkbarkeit des Prüfstandes untersucht werden. Hier müssen jedoch weitere Berechnungen angestellt werden, die den Prüfling über eine geeignete Prüfstand-Prüflings-Kommunikation mit den in Kapitel 4 beschriebenen, querdynamischen Simulationsdaten versorgen.

Hieraus entstehende Möglichkeiten sind Simulationen auf einem Eissee oder Bremsmanöver auf einem „Schachbrettmuster“. Es können Situationen dargestellt werden, die für das fahrzeuginterne Stabilitätssystem äußerst ungünstig sind, die aber in der Realität durchaus auftreten können und bei konventionellen Tests nicht reproduzierbar darstellbar wären. Existiert erst einmal eine bestimmte Situation und wird das System damit getestet, kann es verbessert werden und noch einmal mit exakt der gleichen Stimulation laufen. Somit ist absolut sichergestellt, dass die Situation bezogen auf die Stimulation exakt reproduzierbar ist. In der Realität, beispielsweise bei Wintererprobungen auf einem Eissee, kann der Prüfer nie sicher sein, ob sich bei der zweiten Testfahrt nicht vielleicht der Untergrund oder andere Randbedingungen leicht geändert haben. So können Auswirkungen der Entwicklung eindeutig nachvollzogen werden, was im realen Test nicht der Fall ist. Dort zu ermitteln, was die eigentliche Ursache für die Änderung des Systemverhaltens ist, die geänderten Systemparameter oder eine vermeidlich andere Umgebung, ist oft unmöglich und ähnlich wie die Tests selber sehr zeitaufwändig. Die zeitlichen und körperlichen Belastungen für den Menschen, die bei solchen Wintertests auftreten, können in Zukunft also minimiert und unter Laborbedingungen am ViL-Prüfstand vorbereitet und optimiert werden. Als Mehrwert kann die Entwicklung schneller und effizienter voranschreiten.

5.2. Der auf PKW optimierte sPC-ViL

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei weitere ViL-Prüfstände aufgebaut. Davon jeweils einer für schwere Lastkraftwagen (äquivalent zum „LKW-ViL“) und einer für Personenkraftwagen (small Passenger Car - sPC-ViL, **Abbildung 22**) am Beispiel eines Smart Roadsters. Auf dem Grundprinzip des 1. LKW-ViL wurde in der vorliegenden Arbeit ein vollwertiger Fahrzeugprüfstand (für PKW und LKW) ohne Einschränkungen auf die mechanische Belastbarkeit der Fahrzeugkomponenten (Achsen, Lenkung - wie in **Abbildung 20** gezeigt) und ohne Einschränkung auf Funktionsprüfungen entwickelt und umgesetzt. Der sPC-ViL kann also als 2. Generation der ViL-Prüfstände bezeichnet werden. Hier wurde der komplette Steuerungsaufsatz, die Ansteuerungslogik, die Kommunikationsbedürfnisse zwischen Prüfstand und Prüfling im Zusammenhang mit heute üblichen Rollenprüfständen, eine produktionsgeeignete Schnelladaptionsvorrichtung sowie die Systematik der Einordnung erarbeitet. Aus

dem ViL wurde darüber hinaus ein leistungsfähiger Produktionsprüfstand moduliert und eine komplette Prüf- und Einstellumgebung für moderne Fahrzeuge in der Entwicklung sowie am Bandende erarbeitet. Beides wird hier ausführlich vorgestellt.

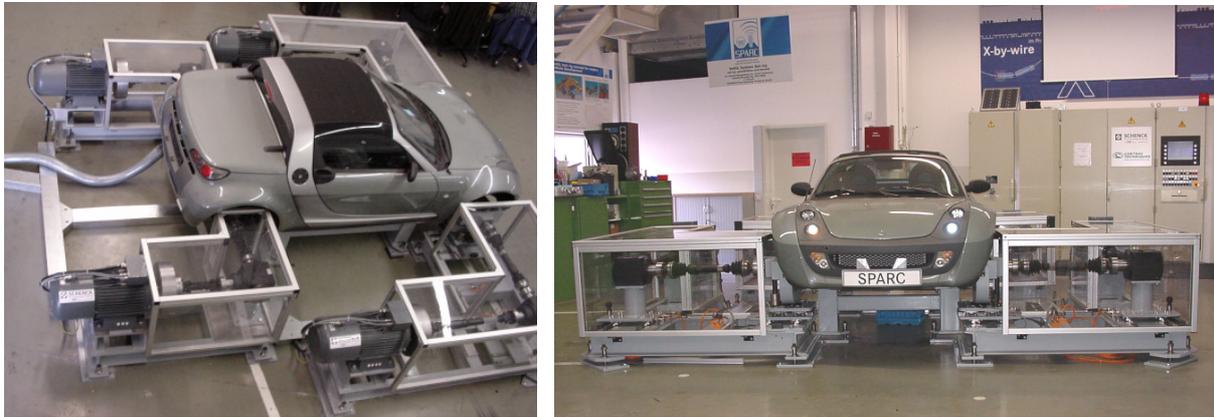


Abbildung 22 sPC-ViL Gesamtfunktionstester für PKW

Speziell entwickelte Belastungseinheiten werden beim sPC-ViL direkt über die Radflansche des Prüflings an dessen Radnaben angebunden. Diese enthalten neben einer Adaptionseinheit und geeigneten Komponenten zur Übertragung der Drehmomente und Drehzahlen (Wellen, Winkelgetriebe) auch die bereits erwähnten Antriebs- und Messeinheiten, die beim 1. LKW-Prüfstand noch direkt ans Rad angeflanscht waren (→ Abbildung 20).

Aufgrund des verglichen mit einem LKW wesentlich leichteren und daher mechanisch weniger stabilen Personenkraftwagens und des Anspruchs auf eine Weiterentwicklung des Prüfstands zur Serienreife für den Fahrzeugproduktionsprozess, müssen bei gleichbleibender oder verbesserter Anforderung in Bezug auf die Prüfumfänge diverse Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden, die im Zuge dieses Abschnittes ausführlich dokumentiert werden. Hier ist neben den dort geforderten Prüfumfängen die Abstützung der „hängenden“ Räder auf die sogenannte Konstruktionslage sowie eine wirtschaftliche, schnelle und sichere Adaption unter taktzeitrelevanten Gesichtspunkten zu nennen. Eine Herausforderung dabei stellt die Abstützung der Achsen und die integrierte Lenkbarkeit der Räder dar. Dies muss so geschehen, dass der vom Federbein des Fahrzeuges aus nach unten verlängerte Kraftvektor (Durchstoßpunkt durch die Radaufstandsfläche) realitätsgetreu dem Lenkrollradius des Prüflings entspricht.

Zur Ausprägung eines gewünschten dynamischen Verhaltens eines Fahrzeuges ist die Fahrwerksgeometrie von entscheidendem Interesse. Auf einem herkömmlichen Rollenprüfstand steht das Fahrzeug auf seinen eigenen Rädern und Reifen. Bei der Adaption des Fahrzeuges auf einem Prüfstand des Typs „ViL“ ist daher daran zu denken, eine äquivalente Abstützung zu erreichen um ein realitätsnahes Lenkverhal-

ten des Fahrzeuges bei dynamischen Prüfungen sicherzustellen. Ausführliche Informationen zur Fahrwerksgeometrie und zur dynamischen Auslegung von Fahrzeugen sind beispielsweise in /16/, /45/ und /46/ nachzulesen.

Am sPC-ViL erfüllen die im Vergleich zur 1. Generation neu entwickelten Fahrzeugadaptionskomponenten (**Abbildung 23**, Pos. (7)) der Belastungseinheiten die Aufgabe, die Räder des Prüflings auf die so genannte Konstruktionslage („K0“-Lage) abzustützen. Das ist die eingefederte Lage der Räder, die dann entsteht, wenn das Fahrzeug mit seinem Eigengewicht auf einer ebenen Fahrbahn steht. Zum anderen sind diese Belastungseinheiten mit Hilfe spezieller Übertragungskomponenten in der Lage, einen Lenkeinschlag der Vorderräder während des Prüfprozesses zuzulassen.

Dies geschieht so, dass die von den Asynchronmaschinen über die Übertragungswellen auf das Rad aufbrachten Drehmomente und Drehzahlen über den Lenkwinkel unverändert bleiben und sich nur gezielt über die Antriebstechnik verändern lassen. Die bei Kardanwellen bekannte Abhängigkeit zwischen dem Kosinus des Relativwinkels zwischen An- und Abtriebsflansch und der Ungleichförmigkeit der Drehbewegung wurde hier mit Hilfe des Einsatzes von Gleichlaufgelenkwellen weitgehend eliminiert. Die vordere linke Belastungseinheit ist detailliert in Abbildung 23 dargestellt und beschrieben.

Die Vorderachsbelastungseinheit besteht als Basis aus einem über Stellschrauben nivellierbaren und gegen die Aufstellunggebung mechanisch dämpfbaren Stahlunterbau (1).

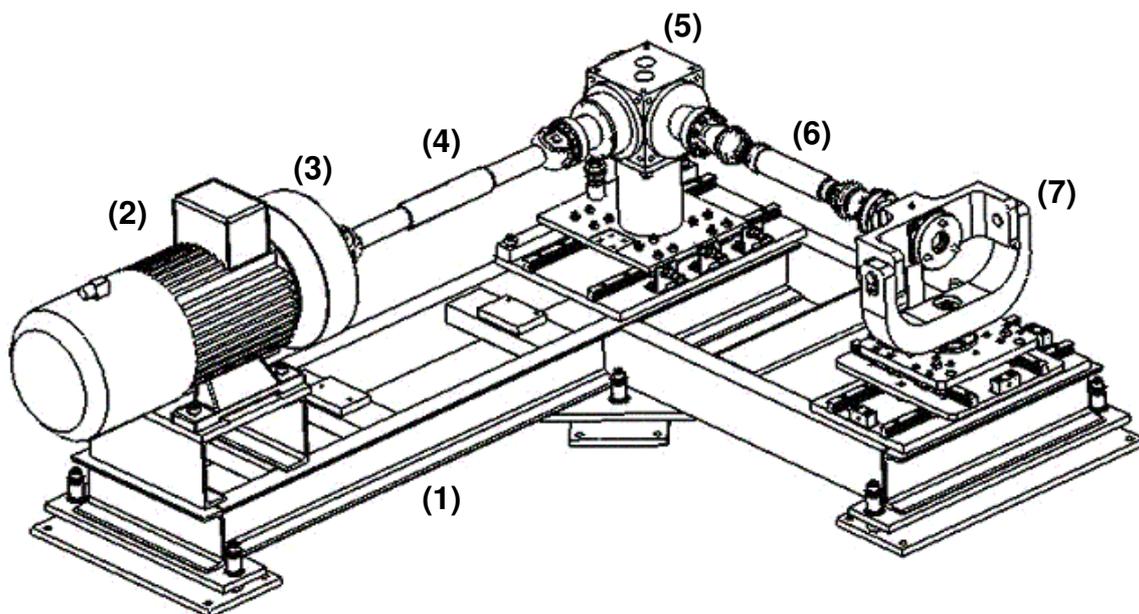


Abbildung 23 Darstellung einer Vorderachsbelastungseinheit des sPC-ViL

Weiterhin befinden sich die folgenden Komponenten auf diesem Unterbau:

- (2): Eine Antriebs- und Messmaschine (hier: 37 kW Asynchronmotor).
- (3): Eine Schwungscheibe zur Substitution des Massenträgheitsmomentes, welche mechanisch optimal an der schneller drehenden Seite der Getriebeeinheit montiert wurde.
- (4): Eine längenverschiebliche Kardanwelle zur Realisierung einer Verschiebung der Getriebeeinheit in Richtung des Elektromotors.
- (5): Ein extrem reibungsarmes Winkelgetriebe, 90° kegelradverzahnt mit einem hohen Wirkungsgrad von ~98% im Nennbetrieb, auf parallelen Längsschienen zur Verschiebung montiert.
- (6): Eine Gleichlaufgelenkwelle zur Eliminierung der Abhängigkeit der Drehzahlgleichförmigkeit zum Relativwinkel zwischen An- und Abtriebsseite.
- (7): Eine Lenk- und Adaptionseinheit.

Die beim Testfahrzeug un gelenkten Hinterräder werden lediglich über spur- und sturzausgleichende Gelenk- und Stützelemente in der Konstruktionslage gehalten. In einer Ausbaustufe des modularen ViL-Prüfstandes ist auch die Hinterachse lenkbar.

5.2.1. Die Vorderachs-Belastungseinheiten am sPC-ViL

Ein Zielkonflikt bei der Ermöglichung des Lenkeinschlages auf dem Prüfstand lag zwischen der Größe des maximal realisierbaren Radlenkwinkels und der Länge der Gleichlaufgelenkwelle. Dieser Wert geht direkt in die bauliche Breite des Prüfstandes ein und ist daher ein entscheidender Faktor.

Die Größe des umsetzbaren Radlenkwinkels hängt in erster Linie vom Fahrzeug (Radlenkkinematik) und vom maximal zugelassenen Knickwinkel der Gelenkwelle ab (typenabhängig). Dieser Knickwinkel ist wiederum abhängig von der gerade simulierten Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges (und somit von der Drehzahl n der Gelenkwelle) sowie geometrisch von der Länge der Gelenkwelle, oder genauer ausgedrückt von der Länge des Wellenschaftes zwischen den beiden Gelenken der Gelenkwelle. Der zugrundeliegende Zusammenhang für den maximal zuzulassenden Knickwinkel der einzelnen Gelenke der Welle im Betrieb und die damit in direkter Verbindung stehende, maximale Drehzahl der Welle lautet /48/:

$$n \text{ [1/min]} \cdot \beta \text{ [}^\circ\text{]} \leq 14.000; \text{ mit } \beta = \text{Knickwinkel} \quad \text{Gl. 5.1}$$

Allgemein bezieht sich der Hersteller bei seinen Angaben zum Knickwinkel auf die im Gelenk entstehende Temperatur aufgrund von Reibung. Diese wiederum ist abhängig von der Drehzahl und dem Beugewinkel und darf ~80 °C als Gelenkdauertempe-

ratur nicht überschreiten. Bei Kreuzgelenkwellen gibt es dahingegen grundsätzlich ein kinematisches Problem. Selbst wenn An- und Abtriebsflansch parallel zueinander sind, ist der mittlere Teil der Welle, der eigentliche Schaft, ständig einem ungleichförmigen Lauf aufgrund der ständigen Massenbeschleunigung ausgesetzt. Dabei wird dieser Teil der Welle zwei Mal pro Umdrehung periodisch beschleunigt und abgebremst (formelmäßiger Zusammenhang siehe /49/).

Konstruktiv leitet sich der Zusammenhang zwischen Radlenkgeometrie und Länge der Gelenkwelle wie folgt her:

An den Radflansch wird über die serienmäßige Radverschraubung eine Adapterscheibe montiert. An diese Adapterscheibe „koppelt“ ein Adapter an. An diesem Adapter ist die homokinetische Gelenkwelle fest angeflanscht. Der Abstand vom „Drehpunkt“ der Lenkbewegung im Prüfling bis zum ersten Gelenk der homokinetischen Gelenkwelle sei der Schwenkarm (l_F). Dieser ist unter anderem für die Bestimmung des Knickwinkels entscheidend und daraus folgend ein wichtiges Kriterium für die Entscheidung, ob das Übersetzungsgetriebe zur Realisierung eines größeren Lenkwinkels über eine translatorische Verstellung verfahren werden sollte oder ob der zur Verfügung stehende Lenkwinkel ausreicht und die Getriebeeinheit ortsfest gehalten werden kann (siehe **Abbildung 24**). Nachfolgend dargestellte, mathematische Zusammenhänge beschreiben den getriebeseitigen Knickwinkel und den benötigten Längenausgleich der Gelenkwelle wenn keine Verschiebung der Getriebeeinheit in Richtung des Elektromotors in Betracht gezogen wird. Der benötigte Längenausgleich der Gelenkwelle berechnet sich nach **Abbildung 24** aus dem Kosinussatz zu:

$$\Delta l_{Welle} = \sqrt{l_0^2 + 2 \cdot (l_F^2 + l_0 \cdot l_F) \cdot (1 - \cos \alpha)} - l_0 \quad \text{Gl. 5.2}$$

mit l_0 = Grundlänge der Welle zwischen den Gelenken (= Länge des Wellenschaftes)

l_F = Abstand zwischen Momentanpol des Lenkeinschlags und 1. Wellengelenk.
Für die hier angestellten Überlegungen ist es ausreichend, den Momentanpol als statisch über den betrachteten Lenkeinschlag anzunehmen.

α = Radlenkwinkel (im Punkt A in **Abbildung 24**)

Die sich ergebenden Knickwinkel β im Punkt B und γ im Punkt C lassen sich über den Sinussatz entsprechend bestimmen. Die Länge der Strecke $y(\alpha)$, die zu jedem Lenkwinkel passend den Abstand des radseitigen Gelenkpunktes (Punkt C) der homokinetischen Gelenkwelle zur Verschiebeebe der translatorischen x-Verschiebung darstellt, berechnet sich wie folgt:

$$y(\alpha) = l_0 + l_F \cdot (1 - \cos \alpha)$$

Gl. 5.3

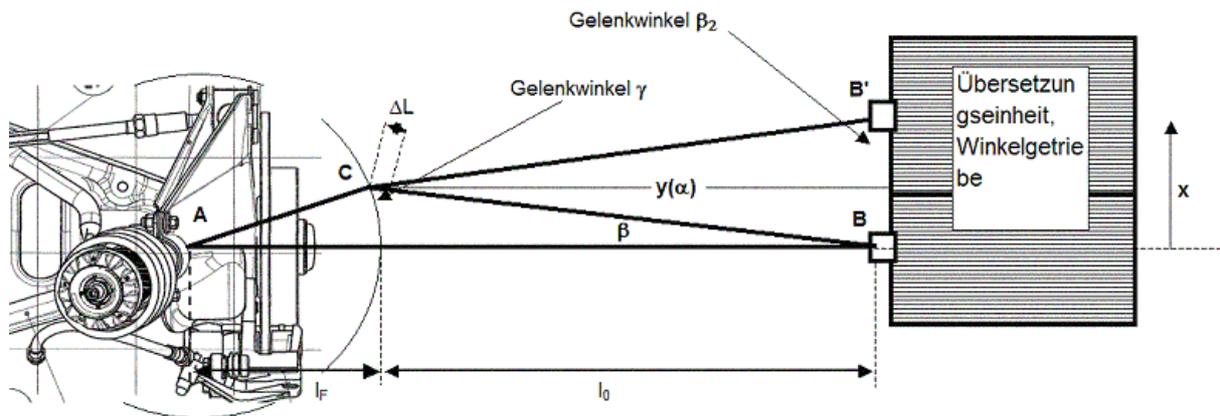


Abbildung 24 Skizze zur Verdeutlichung der geometrischen Zusammenhänge bei der Verschiebung in x-Richtung der Übersetzungseinheit (Getriebe) oder einer ihrer Komponenten

Die zur Herstellung dieses Zustandes nötige Verschiebung des Punktes B (zu B') errechnet sich zu:

$$x_0 = l_F \cdot \sin \alpha$$

Gl. 5.4

Die tatsächliche Länge zwischen den beiden Gelenkpunkten der homokinetischen Gelenkwelle, also die Ursprungslänge der Welle zwischen diesen Punkten, addiert zu der Längenschiebung und resultierend aus einer beliebigen x-Verschiebung, wird aus

$$l(x, \alpha) = \sqrt{(l_0 + l_F \cdot (1 - \cos \alpha))^2 + (x - l_F \cdot \sin \alpha)^2}$$

Gl. 5.5

berechnet. Der sich daraus ergebende Winkel zwischen einer Geraden, die parallel zu der Strecke $y(\alpha)$ verläuft, und der tatsächlichen Lage der Gelenkstange, also der Winkel β im Punkt B (oder bei stattfindender x-Verschiebung: Punkt B', Winkel β_2), errechnet sich zu:

$$\beta_2 = \arctan \frac{x - l_F \cdot \sin \alpha}{l_0 + l_F \cdot (1 - \cos \alpha)}$$

Gl. 5.6

Der aus der Lenkbewegung und der x-Verschiebung im radseitigen Gelenkpunkt auftretende Winkel γ errechnet sich demnach zu:

$$\gamma = \alpha - \beta_2; (\alpha = \text{Radlenkwinkel}, \beta_2 \text{ aus Gl. 5.6}).$$

Gl. 5.7

Die Länge l_F wird hierzu bestimmt zu (am Beispiel des Smart Roadsters):

$$l_F = l_{Fzg.Flansch} + l_{Adapterscheibe} + l_{Adapter} + l_{Gelenk} = 120\text{mm} + 10\text{mm} + 127\text{mm} + 23\text{mm} = 280\text{mm}$$

Dieser Wert stützt sich auf vorhandenen CAD Daten der Achse des Smart Roadsters und ist daher als ausreichend anzusehen. Zur Auswahl der verwendeten Gleichlaufgelenkwelle und zum Vergleich der verschiedenen Gelenkwellen untereinander wird **Tabelle 2** generiert. Sie umfasst jedoch lediglich eine bereits getroffene, sinnvolle Vorauswahl von Gleichlaufgelenkwellen. Um den Radlenkwinkel bei vertretbarer Länge der Gelenkwelle so groß wie möglich zu gestalten, wird die Möglichkeit zur Längsverschiebung des Übersetzungsgetriebes in Richtung der Asynchronmaschine vorgesehen. Für den ViL-Prüfstand wird der Wellentyp 116/21 verwendet.

Typ	l_{einb}	Δl_{max}	β_{max}	n_{max}	α_{oX}	α_{mX}	X_{erf}	l_F
105/21	210mm	48mm	10°	8000/min	3,7°	19,7°	122,5mm - 123,3mm	280mm
105/30	245mm	50mm	10°	5000/min	4,1°	19,9°	130,5mm - 130,9mm	281mm
116/21	610mm (650, ...)	80mm (120, 150, 200)	40°	2000/min	24,0°	41°	223mm - 230mm	337mm
116/21	650mm	120mm	40°	2000/min	25,3°	45°	283mm - 405mm	337mm
114/30	420mm	25mm	40°/18°	2000/min	15,7°	31,6°	146mm - 200mm	337mm

Tabelle 2 Auswahl verschiedener Typen von Gleichlaufgelenkwellen

In Tabelle 2 bedeuten die folgenden Abkürzungen:

l_{einb} : Einbaulänge der Gelenkwelle im Prüfstand

Δl_{max} : Maximaler Längenausgleich über die gesamte Welle

β_{max} : maximaler, statischer Knickwinkel in den Gelenken

n_{max} : maximal zugelassene Drehzahl der Gelenkwelle

α_{oX} : maximal möglicher Radlenkwinkel ohne x-Verschiebung der Getriebeeinheit

α_{mX} : maximal möglicher Radlenkwinkel mit x-Verschiebung der Getriebeeinheit

X_{erf} : Betrag der (mind.) erforderlichen x-Verschiebung der Getriebeeinheit

l_F : die zum jeweiligen Wellentyp bestimmte Länge vom Momentanpol der Lenkbewegung bis zum radseitigen Gelenkpunkt der homokinetischen Gelenkwelle. Die Länge differiert aufgrund verschiedener Flanschlängen der Welle.

Die Möglichkeiten der Wellen werden aus bauraumtechnischen Gründen jedoch nicht maximal ausgeschöpft. Die x-Verschiebung der Getriebeeinheit wird auf max. 300mm festgelegt und konstruktiv durch einen Anschlag begrenzt. Um die eigentliche Verschiebung der Getriebeeinheit zu realisieren wird ein Ansatz gewählt, der einen einfachen, einstufig geregelten Pneumatikzylinder verwendet (**Abbildung 25**).

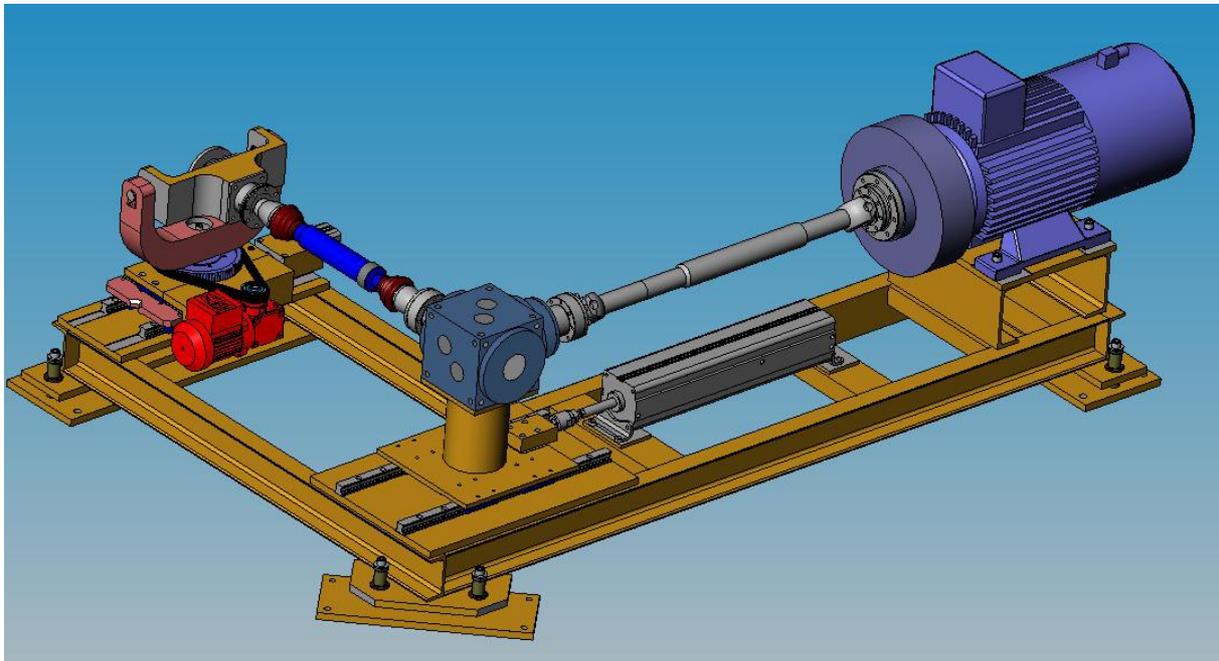


Abbildung 25 sPC-ViL Vorderachsbelastungseinheit mit pneumatischer Verstellung der Getriebeeinheit und aktiver Lenkeinheit

Um die Verschiebung während des Betriebes und unter voller Drehmomentenbelastung durchführen zu können wird eine längenverschiebliche Kardanwelle eingesetzt (Abbildung 23, Position 4). Eine Kardanwelle ist wegen der vorhandenen Parallelität der An- und Abtriebe von Motor und Getriebe eine ausreichend genaue Lösung zur Leistungsübertragung. Zur Auslegung der pneumatischen Verschiebeeinheit muss die bei der Verschiebung auftretende Reibung in der Kardanwelle und auf den parallelen Leichtlaufschienen unter der Getriebeeinheit betrachtet werden. Zudem müssen die notwendige Verschiebegeschwindigkeit und die aus der translatorischen Beschleunigung resultierende Massenträgheit in die Berechnung einfließen. Die Reibkräfte, die zur Verstellung des in der Kardanwelle integrierten Längenausgleichs notwendig sind, sind vom momentan auf die Welle wirkenden Torsionsmoment abhängig. Sie berechnen sich wie folgt /48/:

$$F_{ax} = T \cdot \frac{\mu}{r_{wirk}} \cdot \frac{1}{\cos \beta}$$

Gl. 5.8

In dieser Formel sind folgende Variablen / Formelzeichen zu nennen:

- T: Momentan in die Welle eingeleitetes Torsionsmoment
- μ : Reibwert in der Welle (Angabe laut /48/: $\mu = 0,11$)
- r_{wirk} : Wirksamer Wellenradius (Angabe laut /48/: $r_{\text{wirk}} = 0,026\text{m}$)
- β : Knickwinkel der Welle in den Gelenken

Damit ergibt sich bei maximaler Torsionsbelastung der Welle rein rechnerisch bei einem Zylinderinnendruck von 6 bar ein wirksamer Kolbendurchmesser von mindestens 72,8mm.

Zur Realisierung einer vollautomatischen Verschiebung der Getriebeeinheit wird darüber hinaus ein Signalgeber benötigt, welcher der Steuerung des pneumatischen Zylinders die Information übermittelt, wann eine Verschiebung eingeleitet werden soll und in welche Richtung verschoben werden soll. Die Verschiebung (+/- 300 mm) wird beim ViL grundsätzlich bis an einen mechanisch abgedämpften Anschlag gefahren. Die Getriebeeinheit sollte in einer Sekunde an diesen Anschlag gefahren werden können. Diese Forderung ergibt sich rechnerisch aus der maximalen Radlenkwinkelgeschwindigkeit des mechatronischen Lenkstellers im Fahrzeug.

Der zur Sensierung eines Überschreitens des Radlenkwinkels und damit zur Initialisierung der Längerverschiebung notwendige Signalgeber kann ein einfacher Initiator (Näherungsschalter) sein, aber auch eine aktive Messeinheit, beispielsweise in Form eines Elektromotors. Letztere Variante sensiert über einen Drehwinkelgeber an dem eingesetzten Elektromotor die aktuelle Lenkwinkelstellung und gibt über eine Logik ein Stellsignal an die Steuerung des Pneumatikzylinders, wenn ein bestimmter Radlenkwinkel überschritten wird.

Die aktive (Lenk-)Messeinheit (**Abbildung 26**) dient aber nicht nur als Messwertempfänger für den Radlenkwinkel und als Signalgeber für die pneumatische Verstelleinheit. Sie dient hauptsächlich zur Unterstützung der bereits beschriebenen Querdyamiksimulation für den ViL-Prüfstand in bezug auf mechatronische Lenksteller. Die exakte und zeitnah an die Prüfstandssteuerung übergebene Information über den aktuellen Radlenkwinkel, kombiniert mit der Information zur aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeuges, dient der Berechnung der so genannten ‚am Prüfstand nicht erzeugbaren, realen Daten‘ wie Querschleunigung und Gierrate durch das dynamische Fahrzeugmodell.

Diese Daten werden dann über eine geeignete ‚Fahrzeug-Prüfstands-Kommunikation‘ an den Prüfling übermittelt. Zudem ist das Maß des Radlenkwinkels eine wichtige Information zur Errechnung des momentanen Kurvenradius, z.B. aus der Bedin-

gung von Ackermann, und zur Bestimmung des Eigenlenkgradienten bei höheren Querbewegungen, der wiederum einen Einfluss auf die Gierrate im zweispurba-
sierten Simulationsmodell hat /45, 47/. Der von Ackermann beschriebene Formalis-
mus bezieht sich in der Fahrdynamik auf den Zusammenhang zwischen Lenkradein-
schlag (bzw. Radlenkwinkel), Kurvenradius und so genanntem Eigenlenkgradienten
des Fahrzeuges bei dynamischer Kurvenfahrt.

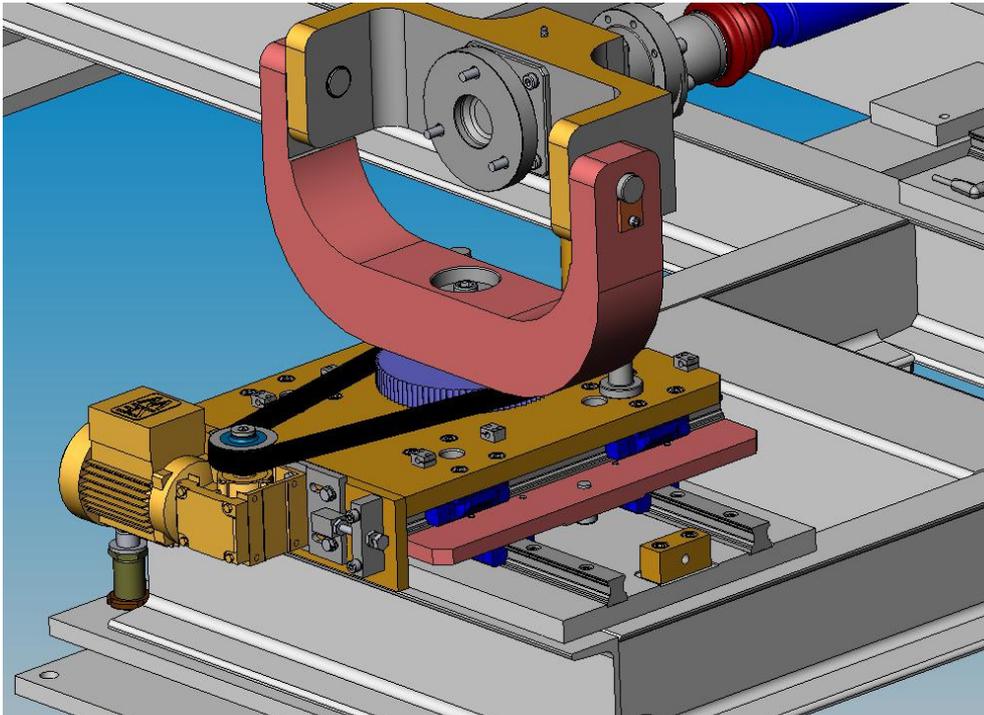


Abbildung 26 Prinzipielle Darstellung der aktiven (Lenk-)Messeinheit am sPC-ViL

Weiterhin dient die aktive Lenkeinheit zur Simulation von im Modell berechneten Lenkrückstellmomenten auf die Lenkung bei dynamischen Fahrmanövern sowie bei Kurvenfahrt. Solche Lenkrückstellmomente berechnen sich aufgrund des Lenkeinschlags und der dadurch hervorgerufenen Gierbewegung sowie aus dynamischen Radlastverschiebungen auftretenden Kräften am Reifen und der Hebelarme der Fahrwerksgeometrie /16/.

Somit können bei der Verwendung von mechatronischen Lenkstellern im Fahrzeug (Steer-by-Wire) am ViL beispielsweise Stromverbrauch sowie Überschwing- und Reaktionsverhalten dieser Komponenten unter realitätsnahen Bedingungen erprobt und getestet werden. Die Kenntnis des momentanen Stromverbrauchs ist bei der Umsetzung eines voll mechatronischen Fahrzeuges eines der wichtigsten Kriterien zur Auslegung von Energiespeichern und somit in höchstem Maße sicherheitsrelevant /7/.

Im bereits angesprochenen Serienproduktionsprüfstand IFT (InLine Function Tester) wird der aktive Lenksteller bei mechatronischen Lenksystemen ebenfalls benötigt. Hier dient er jedoch weniger der Messung des Stromverbrauchs als vielmehr der Sicherstellung der korrekten Funktion der mechatronischen Lenkung sowie der in Kapitel 4.3 erwähnten Einstellung des Lenkrades auf den Stand der Räder bei Fahrzeugstart (oder umgekehrt).

Die aktive Lenkeinheit besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- eine Zahnriemenübersetzung mit entsprechenden Zahnriemenscheiben und einem geeigneten Zahnriemen oder einer äquivalenten Kettenübersetzung (hier: Übersetzung $i_{LE} = 1:4$)
- einem Elektromotor mit einem entsprechenden Sinus-Kosinusgeber zur Winkel- und Drehgeschwindigkeitsmessung
- den benötigten Regelementen und Umrichtern zum Betrieb einer solchen Vorrichtung (in Abbildung 26 nicht dargestellt)

Bei der Dimensionierung der aktiven Lenkeinheit, im Speziellen des Elektromotors und der Zahnriemen- bzw. der Kettentriebübersetzung, muss berücksichtigt werden, dass das System nicht nur als Lenkwinkelsensor eingesetzt werden soll, sondern ebenfalls die oben beschriebenen Zusatzfunktionalitäten, z.B. die Simulation von Lenkrückstellmomenten abdecken soll. Vom Hersteller der Steer-by-Wire Lenkung im SPARC-Projekt sind folgende Randwerte des im Fahrzeug eingesetzten mechatronischen Lenkstellers bekannt:

- wirksamer Abstand des Lotfußpunktes auf der Lenkdrehachse zu der Wirkungslinie Krafteinleitung der Lenkstange: 140 mm
- maximale, translatorische Geschwindigkeit des Lenkstellers: 140 mm/s
- nominale Stellkraft: 1400 N
- maximale Überlastkraft: 4200 N
- daraus resultierendes, maximales Lenkmoment am Rad: 588 Nm

Aus diesen Daten sowie aus den genannten Gleichungen zur Bestimmung des Lenkrückstellmomentes und dem Wirkungsgrad ($\sim 90\%$ lt. Hersteller) der internen sowie externen Systemübersetzung (Getriebe und Kettenübersetzung) berechnen sich die benötigten Systemkomponenten der aktiven Lenkeinheit. Als geeignete Komponente stellt sich der folgende Getriebemotor heraus:

Getriebemotor mit 2,1 kW; $n_{\text{nenn}} = 120 \text{ min}^{-1}$; $M_{\text{nenn}} = 162,5 \text{ Nm}$.

Somit sind alle wichtigen Zusatzkomponenten der Belastungseinheit bestimmt und beschrieben. Im folgenden Abschnitt werden abschließend anhand mechanischer Grundgleichungen die Möglichkeiten des ViL-Prüfstands bei der Belastung verschiedener Fahrzeugtypen anhand zweier Beispiele hergeleitet und diskutiert.

5.2.2. Prüf- und Kraftübertragungsmöglichkeiten des ViL bei verschiedenen Fahrzeugtypen

Im vorliegenden Abschnitt werden die belastungstechnischen Möglichkeiten und die dynamischen Grenzen des ViL-Prüfstands aufgezeigt. Die Berechnungen stützen sich auf die Basisdaten der verbauten 37kW Elektromotoren sowie auf die eingesetzten Winkelgetriebe mit der Übersetzung $i_G = 1:2$.

In einem mit Laufrollensätzen aus Stahl ausgestatteten Rollenprüfstand, die einen festen Durchmesser vorweisen, werden die Belastungsdaten in den Einheiten Geschwindigkeit [km/h] und Kraft [N] am Umfang der Laufrollen, respektive der Fahrzeugreifen, angegeben (Tangential- oder Umfangskräfte am Fahrzeugrad). Alle Daten an diesem Prüfstand werden auf diese Werte bezogen bzw. zurückgerechnet. Beim ViL-Prüfstand bietet es sich an, diese Nomenklatur zu überdenken. Da die Adaption der Belastungseinheit direkt am Radflansch vorgesehen ist, hier also keine Reifen und keine Felgen montiert sind, ist es geschickt, bei der Nomenklatur auf die Einheiten Drehzahl [1/min] und Drehmomente [Nm] umzuschwenken. Es ist anzunehmen, dass in der Serienproduktion verschiedene Fahrzeuge mit verschiedenen Reifendurchmessern geprüft werden müssen. Aus diesem Grund könnte die oben erwähnte, ursprüngliche Nomenklatur zu Missverständnissen und Fehlmessungen bzw. vermeidbaren Fehlprüfungen führen, wenn nicht genau darauf geachtet wird, welche Raddimensionen später am aktuell auf dem Prüfstand befindlichen Fahrzeug vorgesehen sind. Um dies zu vermeiden ist die Angabe des an den Radflansch übertragenen Drehmomentes und der Drehzahl sinnvoller.

Die verwendeten Asynchronmaschinen haben aus **Abbildung 27** zu entnehmende Randdaten.

Durch die Übersetzung der eingesetzten Winkelgetriebe wird für die maximale Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges auf dem Prüfstand $v_{\max} = 200\text{km/h}$ festgelegt. Grundgedanke dabei ist die Schaffung einer breiten Basis in Bezug auf möglichst viele Fahrzeugtypen. Sollten Fahrzeuge mit höheren (Prüf-)Geschwindigkeiten getestet werden, ist der Einsatz anders übersetzender Getriebe oder stärkerer bzw. höher drehender Antriebseinheiten vorzusehen.

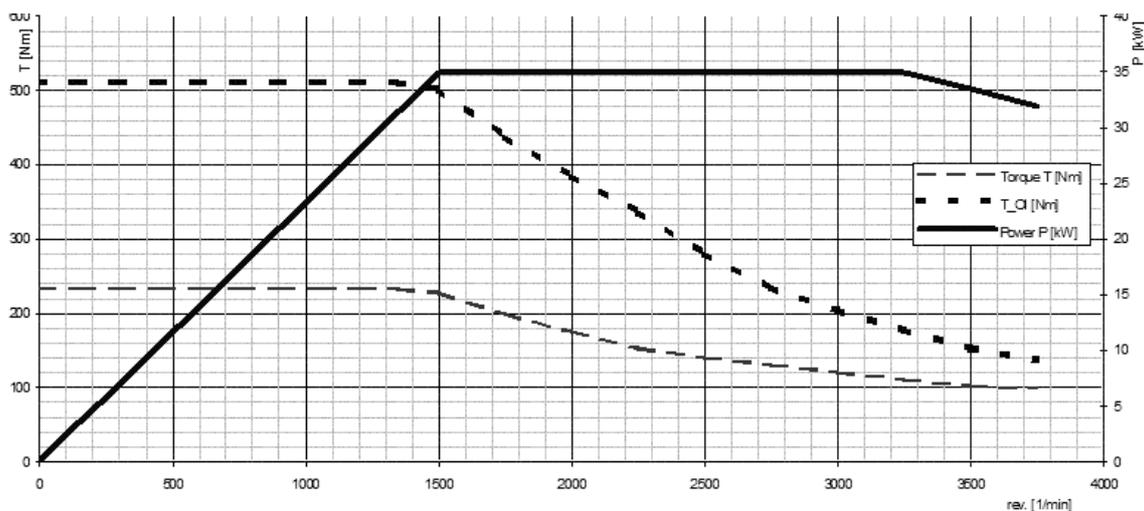


Abbildung 27 Motorkennlinie der am ViL eingesetzten 37 kW Asynchronmaschinen

Eine Änderung auf stärkere Antriebstechnik würde grundsätzlich nahezu alle Hauptkomponenten der Belastungseinheit (E-Motor, Wellen, Getriebe, Schwungrad) betreffen. Konstruktiv ist daher die Austauschbarkeit aller relevanten Komponenten aufgrund des modularen Aufbaus der Belastungseinheiten gegeben.

Weiterhin soll als Basis ein Großteil der produzierten Fahrzeugtypen mit den im Folgenden definierten Randdaten testbar sein. Diese beziehen sich sowohl auf einen Kleinwagen mit 13" Bereifung (diese kommt heute jedoch kaum noch vor, auch Toyota Yaris, Nissan Micra und Seat Arosa werden inzwischen standardmäßig mit 14" Bereifung ausgestattet) bis hin zu PKW mit 18" Bereifung.

Für diese Beispielrechnung werden zwei Fahrzeugtypen mit folgenden Rad/Reifen-Kombinationen gewählt:

- Fahrzeug 1: 235/50 R18 (Radius: 0,346 m) und
- Fahrzeug 2: 145/85 R13 (Radius: 0,288 m).

Die weiteren, als Basis für die Überlegungen verwendeten Fahrzeugdaten sind:

- $m_{Fzg1} = 1800$ kg für das 18" Fahrzeug
- $m_{Fzg2} = 1400$ kg für das 13" Fahrzeug

Zwar ist es eher unwahrscheinlich, ein Fahrzeug mit 13" Bereifung und einem Gewicht von 1400kg vorzufinden, jedoch befindet sich diese Annahme bei den vorliegenden Betrachtungen immer auf der „sicheren Seite“. Leichtere Fahrzeuge sind gleichbedeutend mit weniger einzusetzendem Drehmoment bei dynamischen Simulationen und stellen für den Prüfstand somit keine größere Herausforderung dar als beim ‚Fahrzeug 2‘.

Zur Umrechnung der Geschwindigkeit auf die Drehzahl gilt folgende Gleichung:

$$n[\text{1/min}] = \frac{v[\text{km/h}]}{r[\text{m}]} \cdot \frac{100}{12 \cdot \pi}; \text{ mit } r = \text{Radius des Rades.} \quad \text{Gl. 5.10}$$

Hieraus ergeben sich bei den verschiedenen Reifengrößen folgende, gerundete Raddrehzahlen zur Simulation von $v_{\text{Fzg}} = 200\text{km/h}$ (ohne Schlupf und ohne Bewertung des dynamischen Radhalbmessers). Der dynamische Radhalbmesser, also die Änderung des Raddurchmessers aufgrund von hohen Raddrehzahlen und Eigengewicht des Fahrzeuges spielt hierbei eine sekundäre Rolle und wird daher nicht betrachtet. Zudem ist es so, dass auf klassischen Laufrollensätzen die Deformation des Reifens nicht einmal annähernd der Deformation des Reifens auf der Straße entspricht. Hier werden also grundsätzlich kleinere Fehler gemacht, die am ViL bzw. am IFT auf Basis von Erfahrungswerten leichter herausgerechnet werden könnten. Hochpräzise Abgasuntersuchungen sind mit dem ViL also einfacher machbar, als mit den herkömmlich für diese Aufgabe verwendeten Rollenprüfständen. In dieser Phase genügt es jedoch, die gerundeten Werte grob zur Auslegung der Antriebstechnik des ViL zu bestimmen:

- bei Fahrzeug 1 (18“): ca. 1535 1/min
- bei Fahrzeug 2 (13“): ca. 1840 1/min

Die Übersetzung des Winkelgetriebes von $i_G = 1:2$ würde bei einer maximalen Drehzahl des Elektromotors von $n_{\text{max}} = 3600 \text{ 1/min}$ bei den Fahrzeugen mit 13“ Bereifung lediglich zu einer simulierten Geschwindigkeit von ca. 195km/h führen. Es sei jedoch erwähnt, dass es als unwahrscheinlich zu bewerten ist, dass Serienfahrzeuge mit 13“ Bereifung (z.B. Smart fortwo, Nissan Micra) Geschwindigkeiten von 200km/h erreichen. Weiterhin kann, wie bereits erwähnt, angenommen werden, dass aufgrund der nicht starr mit dem Stahlbau des Prüfstandes ausgeführten Anbindung der Asynchronmaschinen eine etwa 10% höhere Motordrehzahl der Asynchronmaschinen als Maximaldrehzahl angesetzt werden kann ($\rightarrow n_{\text{max}} = 4000 \text{ 1/min}$). Diesbezüglich durchgeführte Untersuchungen am ViL haben deutlich kleinere Schwinggeschwindigkeiten ergeben als beim ‚x-road‘. Hier kann von einer Schwingungsreduktion von über 40% ausgegangen werden. Die vorliegenden Berechnungen beziehen sich jedoch auf die Maximaldrehzahl von $n_{\text{max}} = 3600 \text{ 1/min}$.

Weiterhin ist das bei simulierter Maximalgeschwindigkeit noch zur Verfügung stehende Drehmoment (respektive die noch zur Verfügung stehende, simulierbare Radumfangskraft) von Interesse. Dieses „Überschussmoment“ wird beim ViL zur Simulation beispielsweise von Straßensteigungen oder Reib- und Luftwiderständen an den an-

getriebenen Rädern des Prüflings benötigt. Basis der Überlegung ist der Zusammenhang zwischen Motorleistung P_{Mot} , Motordrehmoment M_{Mot} und Motordrehzahl n_{Mot} :

$$P_{Mot} = M_{Mot} \cdot \omega_{Mot} = M_{Mot} \cdot 2\pi \cdot n_{Mot} \quad \text{Gl. 5.11}$$

Die Motorleistung wird für die vorliegende Rechnung exakt auf 35.000 Watt festgelegt. Der Elektromotor ist mit einem Überlastfaktor von $\ddot{U} = 2,1$ kurzzeitig (lt. Hersteller der Antriebstechnik für eine Minute in zehn Minuten) überlastbar. Damit kann bei einer maximalen Motordrehzahl von $n_{Mot} = 3600$ 1/min auf ein Rad des Testfahrzeuges, abhängig von dessen Raddurchmesser, in folgender **Tabelle 3** aufgeführte „Restkraft“ $F_{Rad,rest}$ übertragen werden:

Radgröße	v_{Fzg}	n_{Mot} ($i_G=2$)	$M_{Mot,rest}$	$M_{Mot,rest,\ddot{U}}$	$F_{Rad,rest}$	α_{Steig}
13"	195km/h	3592/min	98,4Nm	206,6Nm	1434N	12,1°
18"	200km/h	3067/min	109,0Nm	228,9Nm	662N	4,2°

Tabelle 3 Berechnungswerte für den ViL bei verschiedenen Fahrzeugtypen

In Tabelle 3 bedeuten die folgenden Abkürzungen:

- v_{Fzg} : Am Prüfstand simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit
- n_{Mot} : E-Motordrehzahl bei dieser Geschwindigkeit
- $M_{Mot,rest}$: Noch zur Verfügung stehendes E-Motordrehmoment (rechnerisch aus Gl. 6.12 oder zeichnerisch aus Abbildung 30)
- $M_{Mot,rest,\ddot{U}}$: Bei maximaler E-Motorüberlast zur Verfügung stehendes Drehmoment, bestimmt aus $M_{Mot,rest} \times 2,1$
- $F_{Rad,rest}$: Am Radumfang (rechnerisch) zur Verfügung stehende Kraft (pro Rad) ohne die Einbeziehung von Fahrwiderständen am Fahrzeug, berechnet aus $M_{Mot,rest,\ddot{U}} \times 2 / r_{Rad}$
- α_{Steig} : Mit $F_{Rad,rest}$ realisierbare Simulation der Straßensteigung bei der Annahme eines einachsgetriebenen Fahrzeuges ohne Einbeziehung von Luftwiderstand sowie von bei Beschleunigung auftretenden Kräften am Fahrzeug (Beispielrechnung bei Konstantfahrt) aus

$$\alpha_{Steig} = \frac{F_{Rad,rest}}{m_{Fzg} \cdot g} \cdot 2 \quad \text{Gl. 5.11a}$$

Wird der Luftwiderstand bei 200km/h, errechnet mit einem angenommenen c_w -Wert von 0,3 und einer angenommenen Querschnittsfläche von 2 m^2 einbezogen, ergibt sich ein zusätzlicher Kraftbedarf aus

$$F_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_L \cdot v_{Fzg}^2 \quad \text{Gl. 5.11b}$$

zu $F_{Luft} = 1.110 \text{ N}$.

Für eine Steigungssimulation bleibt also gerade bei dem 18“ FZG nicht viel Spielraum, gerade wenn weitere Fahrwiderstandskräfte (z.B. Rollreibung) in die Rechnung einbezogen werden. Bei schweren und leistungsstarken Fahrzeugen werden jedoch auch bei herkömmlichen Rollenprüfständen stärkere Asynchronmaschinen eingesetzt, die über ein deutlich höheres Spitzendrehmoment verfügen ($M_{Mot,Ü} = 550\text{Nm}$).

Diverse Prüfvorschriften, z.B. die des ‚dynamischen Bremstests‘, schreiben im realen Prüfbetrieb gewisse Verzögerungen bei Konstantfahrt von $v_{Test} = 80\text{km/h}$ vor. Nachfolgend wird daher die bei einer simulierten Fahrgeschwindigkeit von $v_{Fzg} = 80\text{km/h}$ zur Überprüfung der Einhaltung dieser Vorschriften noch zur Verfügung stehende Kraft an der Vorderachse der Prüflings bestimmt. Aus dieser Kraft wird im Folgenden, unter der Annahme, dass bei einer Vollbremsung 70% der Bremsleistung an der Vorderachse umgesetzt wird, ermittelt, welche maximale Bremsverzögerung am ViL / IFT realisiert werden kann. Aus Formel 5.10 folgt direkt, dass bei beiden Fahrzeugtypen (13“ und 18“ Bereifung) bei einer simulierten Geschwindigkeit von $v_{Fzg} = 80\text{km/h}$ immer noch das volle E-Motormoment von $M_{Mot} = 510\text{Nm}$ zur Verfügung steht, da die Nenndrehzahl von $n_{Mot,nenn} = 1500 \text{ 1/min}$ noch nicht anliegt.

Die zu erreichende Verzögerung wird linear nach Newton berechnet:

$$a_{Brems} = \frac{F_{Rad,rest}}{0,7 \cdot m_{Fzg}} \quad \text{Gl. 5.12}$$

Tabelle 4 stellt die Berechnungsergebnisse gegenüber.

FZG Nr.	FZG Masse	Reifengröße	$n_{Mot} (i_G=2)$	$M_{Mot,rest,Ü}$	$F_{Rad,rest}$	$a_{Brems,VA}$
1	1800 kg	18“	1227/min	510,0Nm	2950N	4,68m/s ²
2	1400 kg	13“	1474/min	510,0Nm	3544N	7,23m/s ²

Tabelle 4 Am ViL-Prüfstand simulierbare, translatorische Beschleunigung

In Tabelle 4 bedeuten die folgenden Abkürzungen:

- n_{Mot} : Motordrehzahl bei dieser Geschwindigkeit (Getriebeübersetzung $i_G=1:2$)
- $M_{Mot,rest,Ü}$: bei maximaler Motorüberlast zur Verfügung stehendes Drehmoment
- $F_{Rad,rest}$: am Radumfang zur Verfügung stehende Kraft (pro Rad)

$\alpha_{\text{Brems};VA}$: mit dieser Kraft zu realisierende Beschleunigung (Verzögerung) unter der Annahme, dass 70% der gesamten Bremsenergie durch die Vorderachse (VA) übertragen werden.

Die berechneten Werte sind ohne zusätzlich angeflanshtes Massenträgheitsmoment, also alleine durch die Leistung der E-Motoren, realisierbar. Bei herkömmlichen Rollenprüfständen, bei denen eine hohe, fest installierte Massenträgheit durch die Laufrollensätze gegeben ist, werden Radumfangskräfte von 3000N bei 80km/h simulierter Fahrzeuggeschwindigkeit auf der Laufrolle garantiert. Viele Automobilhersteller fordern für die Bandendeprüfung eine Bremsbeschleunigung von mindestens $a_{\text{Brems}} = 6\text{m/s}^2$ bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von $v_{\text{Fzg}} = 80\text{km/h}$, um einen so genannter dynamischen Bremstest durchführen zu können. Um diese Vorgabe zu erfüllen, ist beim ViL / IFT die Integration von entsprechendem Massenträgheitsmoment in die Belastungseinheiten unabdingbar, da es hier keine stählernen Laufrollensätze gibt. Im Folgenden wird das dazu benötigte Massenträgheitsmoment rechnerisch bestimmt.

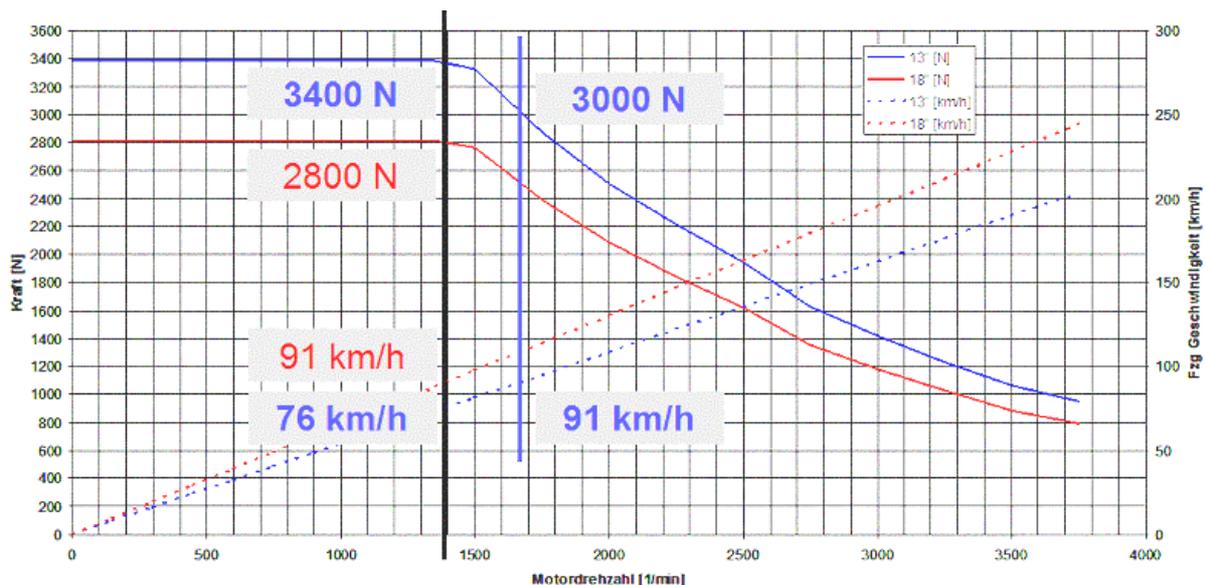


Abbildung 28 Umgerechnete Kraft am Radumfang und die entsprechenden Fahrzeuggeschwindigkeit für beide Beispielfahrzeuge

Abbildung 28 zeigt die möglichen, übertragbaren Kräfte auf das Fahrzeug und die realisierbaren Geschwindigkeiten aufgetragen über der dafür benötigten Drehzahl der Belastungseinheiten (ohne zusätzliches Massenträgheitsmoment). Die Daten werden auf zwei verschiedene Fahrzeugtypen, wie oben erwähnt, zurückgerechnet.

- Fahrzeugtyp 1 (untere Kurve, rot):
z. B. Oberklasselimousine mit 18" Bereifung, Masse: 1800 kg

- Fahrzeugtyp 2 (obere Kurve, blau):
Kleinwagen mit 13" Bereifung, Masse: 1400 kg.

In Abbildung 28 wird verdeutlicht, dass beim ViL / IFT im Vergleich zu einem Rollenprüfstand die zu garantierenden 3000 N Radumfangskraft auch noch bei 91km/h (Vorgabe min. 80km/h) zu erreichen sind (senkrechte, rechte Linie). Das bedeutet, dass beispielsweise dynamische Bremstests, die heute bis max. 80km/h durchgeführt werden können, beim ViL / IFT zu höhere Geschwindigkeiten hin verschoben werden können. Eine Ausnahme bilden wiederum 18" bereifte Fahrzeuge (und höher). Hier muss dann entweder mit großen Schwungmassen gearbeitet werden, was konstruktiv keine Probleme bereitet, oder es muss eine stärkere Antriebstechnik integriert werden.

Die Fläche zwischen der roten und der blauen Kurve stellt die zur Verfügung stehende, übertragbare Kraft bei allen Fahrzeugtypen zwischen den beiden Beispielfahrzeugen dar. Das Lot bei einer bestimmten Kraft (Beispiel in Abbildung 28; linke, schwarze Linie: 3400N beim 13" Fahrzeug) ermittelt bei dem entsprechenden Fahrzeug in der Geschwindigkeitsverlaufskurve die Prüfgeschwindigkeit, bei der diese Kraft gerade noch realisiert werden kann und auf der x-Achse kann die dazugehörige Drehzahl des E-Motors am Prüfstand abgelesen werden.

Abbildung 29 zeigt die dadurch möglichen Verzögerungen bei denselben Fahrzeugtypen bei einer Geschwindigkeit von 80km/h.

Für jeden der beiden Fahrzeugtypen sind nun zwei Kurven dargestellt. Die jeweils obere (etwas dicker dargestellte) Kurve zeigt die mögliche Verzögerungen über der Motordrehzahl der Asynchronmaschine mit beispielhaft zusätzlich angeflanschem Massenträgheitsmoment in Form *einer* Schwungscheibe (Abbildung 25, oben). Dadurch entsteht rein rechnerisch ein zusätzliches, auf das Rad reduziertes Massenträgheitsmoment von:

$$\Theta_{Rad,red,zus} = i_G^2 \cdot \Theta_{Scheibe} = i_G^2 \cdot \frac{\rho_s \cdot \pi \cdot r_s^4 \cdot h_s}{2} \quad \text{Gl. 5.13}$$

Wie sich das zusätzliche Massenträgheitsmoment auf die Zunahme der übertragbaren Kräfte im dynamischen Fall auswirkt bzw. wie das für bestimmte Anforderungen zu verwendende Massenträgheitsmoment rechnerisch bestimmt wird, verdeutlicht der nächste Abschnitt. Die untere der jeweiligen Kurven zeigt diesen Zusammenhang ohne zusätzliches Massenträgheitsmoment, also nur mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Leistung der Asynchronmaschinen und ist somit direkt vergleichbar mit den Kurven in Abbildung 28.

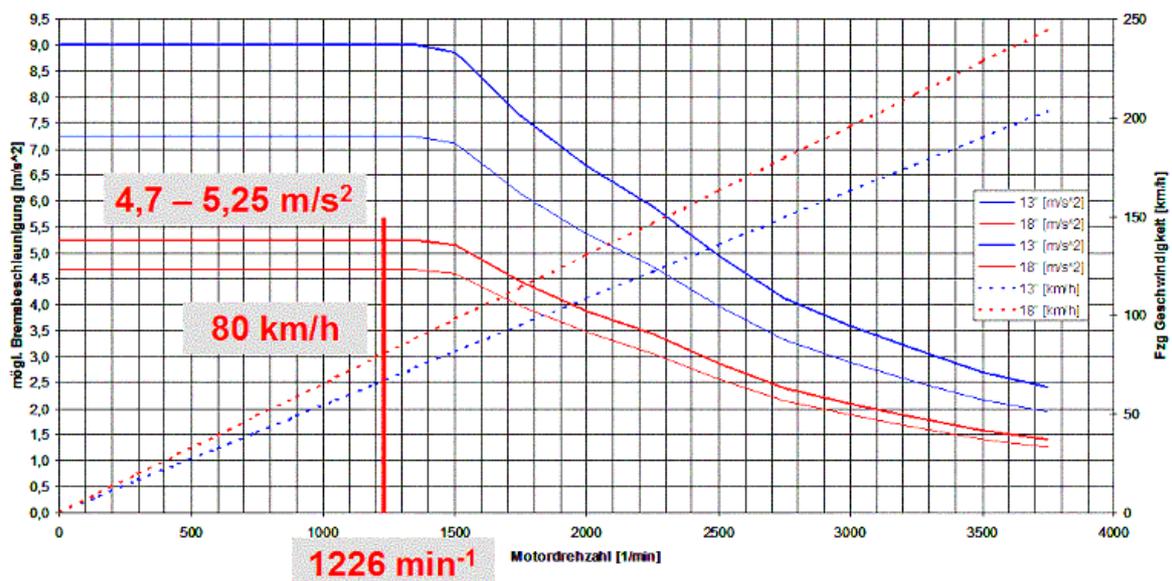


Abbildung 29 Mögliche zu simulierende Bremsbeschleunigung am Fahrzeuges

Es ist festzustellen, dass bei dem Fahrzeug mit 18“ Bereifung ein entsprechend höheres Massenträgheitsmoment zu installieren ist, um die Forderung von einer Verzögerung von 6 m/s^2 bei einer simulierten Geschwindigkeit von 80 km/h zu realisieren. Diese Erweiterung des Massenträgheitsmomentes stellt keine konstruktive Herausforderung dar. Es ist beispielsweise möglich, eine weitere der beschriebenen Schwungscheiben auf der antriebsseitigen Getriebeseite zu installieren. Weiterhin können die Schwungscheiben einen größeren Durchmesser oder eine stärkere Dicke haben. Ein Einblick in die Berechnungsgrundlagen für das zu installierende Massenträgheitsmoment wird im folgenden Abschnitt gegeben.

5.2.2.1. Bestimmung des notwendigen Massenträgheitsmoments

Um die benötigte, rechnerische Masse an der angetriebenen Achse des Fahrzeuges am Prüfstand zu installieren, wird, wie oben bereits beschrieben, ein rotatorischer Massekörper (Schwungscheibe) mit entsprechendem rotatorischen Massenträgheitsmoment (MTM) an der Belastungseinheit angebracht. Aufgrund der Gleichungen der klassischen Mechanik, die auf dieses Problem ohne Einschränkung anwendbar sind, kann das benötigte MTM einmal nur am angetriebenen Rad selber oder entsprechend anteilig an den angetriebenen Rädern und an den Elektromotoren, bzw. zwischen Elektromotor und Getriebeeinheit, installiert werden.

Rechnerisch und konstruktiv sinnvoller ist es, das gesamte MTM zwischen Getriebe und Elektromotor zu installieren. Hier befindet sich die schneller drehende Kardanwelle. Die zugrunde liegende Gleichung für das auf das Rad reduzierte, rechnerische Massenträgheitsmoment ist (vgl. auch Gl. 5.13):

$$\Theta_{Rad,red} = \Theta_{Rad} + \Theta_{Anbauteile} + i_G^2 \cdot (\Theta_{EMot,ges} + \Theta_{Anbauteile,EMot}) \quad \text{Gl. 5.14}$$

Der quadratische Ansatz der Übersetzung im Getriebe (i_G) ergibt sich rechnerisch aus der Gleichheit der kinetischen Energien für zwei verschiedene Systeme mit einer starren Übersetzung:

$$E_{kin}^{ges} = \frac{1}{2} \cdot \Theta_{red}^{ges} \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \Theta_{Rad,ges} \cdot \omega_{Rad}^2 + \frac{1}{2} \cdot \Theta_{Mot,ges} \cdot \omega_{Mot}^2 \Leftrightarrow \Theta_{Rad,ges} = i_G^2 \cdot \Theta_{Mot,ges} \quad \text{Gl. 5.15}$$

Daraus ergibt sich, dass das Massenträgheitsmoment, welches konstruktiv zwischen Asynchronmotor und Getriebe untergebracht werden kann, wegen der höheren Drehzahl dort bei gleicher Wirkung auf das Gesamtsystem mit dem Faktor der quadratischen Übersetzung geringer sein kann, als das MTM welches direkt am Rad angebracht werden muss bzw. welches durch den Radflansch und die entsprechenden Anbauteile (Adapterscheibe, homokinetische Gelenkwelle, usw.) vorhanden ist.

Aufgrund dieser Überlegungen hat jede dieser Scheiben eine Masse von etwa 55 kg und ein MTM von etwa $\Theta_S = 0,8 \text{ kgm}^2$. Um jedoch genügend MTM für Fahrzeugvariante 1 zu erhalten, ist eine Erweiterung der Scheiben auf $h_S = 150 \text{ mm}$ zu empfehlen. Dies stellt konstruktiv und auch belastungstechnisch kein Problem dar, wenn eine erweiterte Motorabtriebswelle zum Einsatz kommt. Weiterhin kann der Durchmesser der Scheibe vergrößert werden (z.B. auf $d_S = 350 \text{ mm}$), was rechnerisch einen größeren Vorteil bringen würde, als die Erhöhung der „Dicke“ der Scheibe. Ohne das MTM der verbindenden Welle, des Rotors des E-Motors und des antriebseitigen Zahnrades im Getriebe zu beachten, welches in Summe noch einmal $0,5 \text{ kgm}^2$ ausmacht, entspricht somit das motorseitige Massenträgheitsmoment in Summe mindestens $\Theta_{Mot} = 1,6 \text{ kgm}^2$, bei $d_S = 350 \text{ mm}$ Durchmesser bereits $\Theta_{Mot} = 2,2 \text{ kgm}^2$.

Auf das Rad reduziert ergibt sich mit dem hier verwendeten Schwungrad ein rechnerisches MTM von

$$\Theta_{Rad,red} = (0,5 + 0,8) \text{ kgm}^2 + 2^2 \cdot 1,6 \text{ kgm}^2 = 7,7 \text{ kgm}^2 \quad (\text{aus Gl. 5.14}).$$

Dieser Wert entspräche einer rechnerisch installierten Masse (m_{riM}) von

- bei Fahrzeug 1: 128,6 kg / Achse
- bei Fahrzeug 2: 185,7 kg / Achse

Diese Masse muss in der Berechnung für die maximal aufzubringende Beschleunigung im Nenner abgezogen werden, da sie das Fahrzeug quasi „leichter“ macht.

$$a_{Brems} = \frac{F_{Rad,rest}}{0,7 \cdot m_{Fzg} - m_{riM}} ; \text{ mit } m_{Fzg} = 1800 \text{ kg.} \quad \text{Gl. 5.16}$$

Damit ergibt sich eine maximale realisierbare Verzögerung von:

- bei Fahrzeug 1: 5,2 m/s²
- bei Fahrzeug 2: 6,6 m/s²

Es stellt sich also heraus, dass bei 18“ Bereifung (und darüber) tatsächlich über eine Vergrößerung der Schwungscheiben nachgedacht werden muss. Bei 350mm Durchmesser und einem MTM von 2,2kgm² ergibt sich immerhin schon ein reduziertes MTM von 10,1kgm², was wiederum etwa 170kg reduzierte Masse an der Achse zur Folge hätte und die rechnerische Bremsbeschleunigung bei Fahrzeugtyp 1 von 5,4m/s² bedingen würde. Alternativen zur Vergrößerung der Scheibe wären die Übersetzung des Getriebes oder die Leistung der Antriebsmaschine für die angestrebten Forderungen zu verändern. Hier sind jedoch konstruktiv nahezu keine Grenzen gesetzt.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass es grundsätzlich möglich ist, jede fahrdynamische Anforderung, die mit einem herkömmlichen Rollenprüfstand erfüllt werden kann ebenfalls mit dem ViL-Prüfstand zu erfüllen. Das aufgrund der schweren Laufrollensätzen auf das Rad zu reduzierende MTM kann unter zu Hilfe-nahme von Schwungrädern ersetzt werden. In Flexibilität und Dynamik kann der ViL einen herkömmlichen Rollenprüfstand also komplett ersetzen, ihn an einigen Stellen (Schlupfsimulation, schlupffreie Kraftübertragung, hohe Brems- und Beschleunigungskräfte etc.) sogar noch verbessern. Die hinzukommende Lenkbarkeit des Prüfstandes und die damit während der Prüfung unter Einbeziehung einer geschickten Parametersimulation integrierbare Querdynamiksimulation werten den ViL zudem auf. Inwieweit sich das Prinzip des ViL-Prüfstands auch in der Produktion und den dort vorhandenen Bedingungen in Bezug auf Prozesssicherheit und Taktzeit einsetzen lässt und inwieweit weiterführende Aspekte der Fahrzeugprüfung um diesen speziellen Prüfstand herum eine zusätzliche Verbesserung der Situation mit sich bringen können, wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

6. Der InLine Function Tester - ein Produktionsprüfstand nach dem ViL-Prinzip

Ziel bei der Weiterentwicklung des ViL zu einem serienproduktionstauglichen Multifunktionsprüfstand war es, einen Fahrzeugprüfstand auf Basis des ViL-Konzepts zu schaffen, der in die Montagelinie einer Fahrzeugserienproduktion integrierbar ist. Der InLine Function Tester sollte jedoch nicht, wie ein Rollenprüfstand, am eigentlichen Bandende angesiedelt sein, sondern einige Taktschritte davor. Zusätzliche Anforderung war die Realisierung identischer oder verbesserter Prüfmöglichkeiten und Funktionsumfänge im Vergleich zu einem Rollenprüfstand. Das bedeutet, der neue InLine Function Tester soll eine hohe Dynamik bei gleichzeitiger Funktionsvielfalt in Bezug auf die durchführbaren Prüfumfänge aufweisen. Ein weiteres Entwicklungsziel war die vollständige Automatisierbarkeit des Prüfablaufes bei synchroner Taktzeitneutralität in produktionsrelevanter Umgebung. Ein Großteil der Forderungen bezüglich hoher Dynamik sowie Prüftiefe kann mit der Verwendung der aus dem ViL bekannten und bewährten Antriebstechnik erfüllt werden.

In diesem Kapitel wird der Aufbau des InLine Function Testers (IFT) explizit beschrieben und die Unterschiede zum ViL-Prüfstand im Hinblick auf die Weiterentwicklung von einem Entwicklungsprüfstand zu einem serienproduktionsfähigen Fahrzeugprüfstand werden aufgezeigt. Hier wird auf die besonderen Anforderungen an den Teststand mit Bezug auf einen wirtschaftlichen Einsatz unter Serienproduktionsbedingungen eingegangen. Anschließend wird die Möglichkeit der Realisierung der Integration des Prüfstandes in eine beispielhafte Montagelinie der Fahrzeugserienproduktion beschrieben und es werden Vorschläge zur Umsetzung des Konzeptes aufgezeigt. In einem weiteren Abschnitt wird daran anknüpfend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der vorgeschlagenen Integrationsmöglichkeiten des IFT und der Planspiele bezüglich des damit in Zusammenhang stehenden Prüfablaufs durchgeführt.

Der IFT stellt jedoch nicht nur einen in Bezug auf moderne und zukünftige Fahrzeuge verbesserten Fahrzeugfunktionsprüfstand zur Integration in die Montagelinie dar. Er schafft darüber hinaus die Möglichkeit, richtungweisende Tendenzen im Hinblick auf moderne Prüf- und Einstellverfahren in die Montagelinie zu integrieren. Daher wird in einem weiteren Abschnitt ein gesamtheitlicher Prüf- und Einstellablauf für ein modernes Fahrzeug erarbeitet und präsentiert. Das daraus resultierende, gesamtheitliche InLine Prüf- und Einstellkonzept ist die direkte Konsequenz aus der Integration eines Funktionsprüfstandes in eine Montagelinie. Das Konzept besitzt das Potential, einen Grossteil der Aufwendungen in Bezug auf Prüfungen und Einstellungen am Fahrzeug am heutigen Bandende in der Montagelinie abzudecken und zu optimieren.

6.1. Der Aufbau des InLine Function Testers (IFT)

Das Prinzip des IFT und seine wichtigsten Komponenten sind in **Abbildung 30** dargestellt. Der gezeigte IFT für so genannte starre, also nicht höhenflexible Hängefördersysteme besteht als Basis aus einem über Stellschrauben nivellierbaren Stahlunterbau. Weiterhin befinden sich die nachfolgend einzeln dargestellten und beschriebenen Hauptkomponenten auf diesem Unterbau.

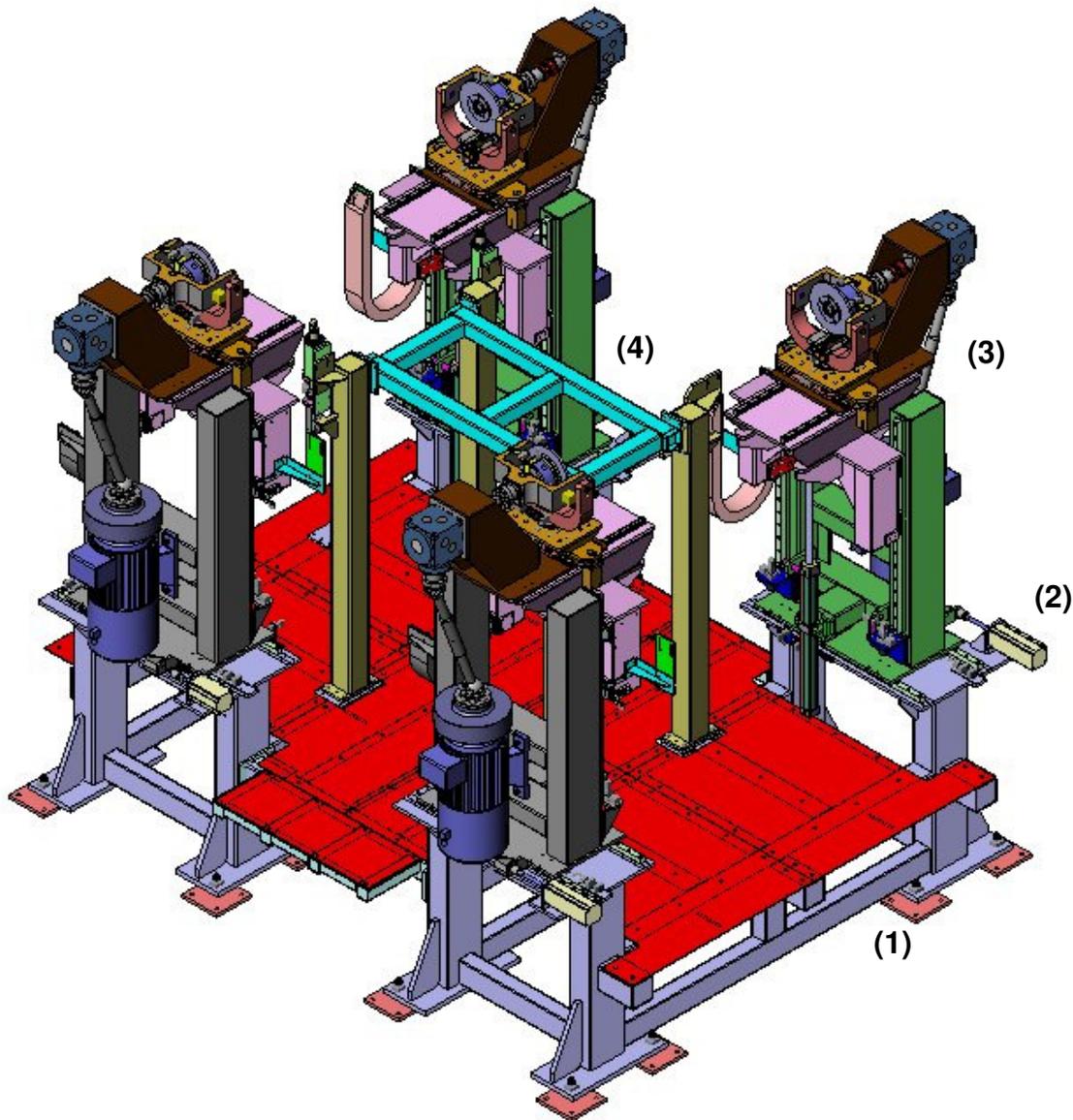


Abbildung 30 Der InLine Function Tester (für Hängefördersysteme ohne Höhenanpassung)

(1): nivellierbarer Stahlunterbau

(2): Stellmotor / Servomotor zur Radstandsanzpassung an den Prüfling (vorne und hinten)

- (3): Senkrechte Belastungs- und Messeinheiten auf speziellen Hubsäulen. Auf diesen Hubsäulen befinden sich gesonderte Stellmotore bzw. Pneumatikeinheiten (je nach Auslegung bzw. Kundenwunsch), die eine Spurweitenanpassung an das Fahrzeug gewährleisten. Dies ist bei so genanntem Mixbetrieb Voraussetzung. Diese Einheiten stellen weiterhin die Adaption der Belastungseinheiten über das speziell entwickelte Adaptionssystem an das Fahrzeug sicher. Die Elektromotoren der Belastungseinheiten sind dabei am Stahlbau fixiert und müssen nicht mitbewegt werden. Den notwendigen Bewegungsausgleich zwischen Elektromotor und Winkelgetriebe übernimmt, ähnlich wie beim sPC-ViL, eine in der Länge veränderliche Kardanwelle.
- (4): Aufnahmeeinheiten für die nicht höhenveränderliche Fördertechnik. Diese Einheiten verfügen wiederum über spezielle Adaptionseinheiten, die in das so genannte Gehänge einfädeln, nachdem es über dem Prüfstand definiert angehalten wurde. Dadurch wird das Gehänge und somit der Prüfling im Prüfstand fixiert, optimal positioniert und bezüglich der im Prüfbetrieb auftretenden Kräfte entlastet.

Grundlegend ist der vorgestellte ViL-Funktionstester die Basis für den IFT. Das verwendete Antriebs- und Messsystem ist weitgehend identisch. Das Kraftübertragungsprinzip mit Asynchronmaschinen, Kardanwellen, Winkelgetrieben und Gleichlaufgelenkwellen ist lediglich konstruktiv auf die besonderen Belange eines Serienproduktionsprüfstandes angepasst. Die Unterschiede bedingen sich auf rein konstruktiver Basis hauptsächlich aus der resultierenden Breite des Prüfstandes und aus weiteren Einschränkungen, die in den Unterschieden zwischen einem Entwicklungsprüfstand (sPC-ViL) und einem Produktionsprüfstand begründet liegen. Diese Einschränkungen beziehen sich in der Hauptsache auf die Adaption und den Betrag des zu realisierenden Lenkwinkels während der Prüfung. Weiterhin ist beim IFT der grundsätzliche Aufbau der Belastungseinheiten in Bezug auf deren Position zum Prüfstand überarbeitet worden. Im IFT sind diese Einheiten nicht waagrecht neben dem Prüfstand angeordnet sondern senkrecht zu diesem. Dies hat zum einen bauraumtechnische Gründe (Länge des IFT), zum anderen ist somit eine deutlich verbesserte Zugänglichkeit zum Fahrzeug (Türen und Hauben) während der Prüfung gewährleistet.

6.1.1. Die Belastungseinheiten des IFT

Im Folgenden werden die Unterschiede zu den in Kapitel 5 beschriebenen Belastungseinheiten des sPC-ViL zu den Belastungseinheiten des IFT (**Abbildung 31**) beschrieben. Die Antriebstechnik sowie das Aufbauprinzip der Belastungseinheiten können als identisch angesehen werden.

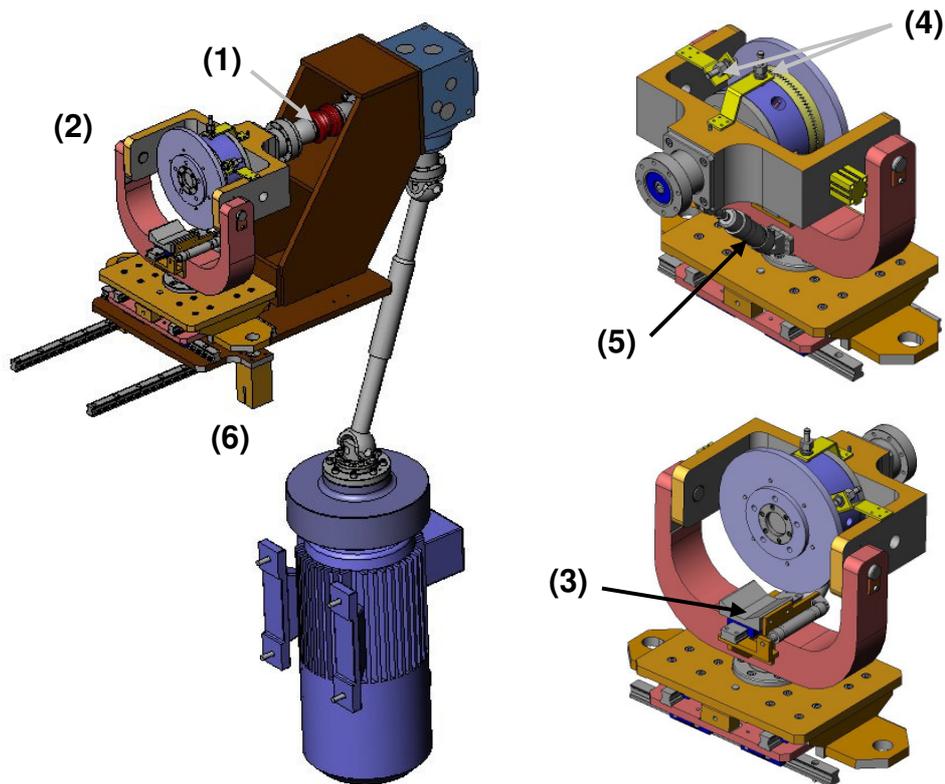


Abbildung 31 Die Belastungseinheit des InLine Function Testers (links) und die Adaptionseinheit (rechts)

Die Hauptunterschiede sind:

- der bereits erwähnte senkrechte Aufbau der Belastungs- und Messeinheiten
- eine geänderte Gleichlaufgelenkwelle im Vergleich zum sPC-ViL und ein damit verringerter, maximal möglicher Lenkwinkel der Einheit (1)
- Entfall der Linearverschiebung der Getriebeeinheit
- eine komplett überarbeitete und auf die Belange der Serienfertigung (Taktzeitbetrieb etc.) angepasste Adaptionstechnik (2)
- ein zusätzliches Aufnahmeprisma für die Adapterscheibe auf der Adaptionseinheit (3)
- diverse Messaufnehmer und Positionswertgeber zur Sicherstellung der korrekt durchgeführten Adaption (Prozessfähigkeit) (4)
- eine zusätzliche Pneumatikeinheit zur Sicherstellung des richtigen Adaptionswinkels (5) und
- Absteckeinheiten zur Sicherstellung der Ruheposition / Startposition aller wichtigen beweglichen Teile der Belastungseinheit. Aus Sicherheitsgründen muss jeder Prüfstand eine definierte Initialstellung anfahren können. Um diese prozesssicher abbilden zu können, werden die Belastungseinheiten in einer definierten Ruheposition durch pneumatische Absteckstifte fixiert.

Die Elektromotoren müssen bei senkrechtem Aufbau der Belastungseinheiten in der Lage sein, das Gewicht der Schwungscheibe sowohl axial (IFT) als auch radial (ViL) zur Abtriebswelle aufzunehmen. An dieser Stelle ergeben sich durch den Wegfall einer speziell verstärkten Wellenlagerung zum Motorgehäuse, die im Falle von radialer Belastung integriert ist, wirtschaftliche Vorteile. Ähnliches gilt für die Lüfterlagerung. Bei senkrechtem Aufbau der Elektromotoren kann diese weniger aufwändig ausgelegt werden.

Die in der Belastungseinheit des InLine Function Testers verbaute Gleichlaufgelenkwelle unterscheidet sich in besonderem Maße von der im sPC-ViL eingesetzten homokinetischen Gelenkwelle. Im IFT fällt diese deutlich kürzer aus. Dies wirkt sich positiv auf die Baubreite des Prüfstandes aus. Die deutliche Verkürzung dieser Welle auf ca. 250mm ergibt direkt eine starke Verkleinerung des maximal möglichen Lenkwinkels des Prüflings in der Produktion auf ca. +/- 6°.

Das auf die Lenkeinheit konstruierte Aufnahmeprisma (Abbildung 31, (3)) dient der Aufnahme der am Prüfling montierten Adapterscheibe vor und nach der Adaption. Das mit den Adapterscheiben bestückte Fahrzeug wird, der Prüfsequenz folgend, vom Fördersystem in den Prüfstand eingefördert und definiert angehalten. Der IFT stellt sich zeitlich parallel dazu auf den Radstand und die Spurweite des Prüflings ein (bei Mixbetrieb). Dies geschieht an den Aufnahmen für die Vorder- und die Hinterachse, da bei Mixbetrieb die Referenzposition des Fahrzeuges identisch mit den vorderen Absteckbolzen des Gehänges ist. Das Aufnahmeprisma wird parallel zur Spurweitereinstellung pneumatisch um den notwendigen Betrag nach vorne gefahren. Über die Hubeinheiten werden die Belastungseinheiten und die Gehängeabsteckung nun zum Fahrzeug bzw. zum Gehängeförderer herauf gefahren bis die Adapterscheibe auf den Aufnahmeprismen aufliegt. Über zusätzliche Pneumatikeinheiten (Abbildung 31, (5)) wird die Parallelität zwischen Adapterscheibe und Adapter am Prüfstand sichergestellt. Die Belastungseinheiten werden daraufhin pneumatisch oder elektromotorisch (je nach Kundenwunsch und Anforderung) an das Fahrzeug heran gefahren.

Ein „Findefenster“ in der Adaptionstechnik erlaubt es, dass durch den in dieser Arbeit noch näher beschriebenen Adaptionvorgang die Adapterscheibe einige Millimeter vom Aufnahmeprisma abgehoben wird und nun frei über diesem schwebt. Über spezielle Sensorik (Näherungsschalter, Abbildung 31, (4)) wird sichergestellt, dass die Adaption tatsächlich stattgefunden hat und der notwendige Formschluss für die Prüfung hergestellt ist. Nach beendeter Prüfung wird die Adaption wieder gelöst und die Adapterscheibe gleitet wiederum auf das Aufnahmeprisma. Die Belastungseinheiten werden abgesenkt und das Fahrzeug kann austransportiert werden.

6.2. Der InLine Function Tester für höhenveränderliche Gehängeförderer

Für höhenveränderliche Gehängeförderer ist es nicht notwendig, Hubsäulen in den InLine Function Tester zu integrieren. Das Fahrzeug kann in einem höhenveränderlichen Gehängesystem in den Prüfstand „herabgelassen“ werden. Das bedingt neben weiteren Vorteilen eine deutlich kompaktere und preisgünstigere Bauweise des IFT (**Abbildung 32**).

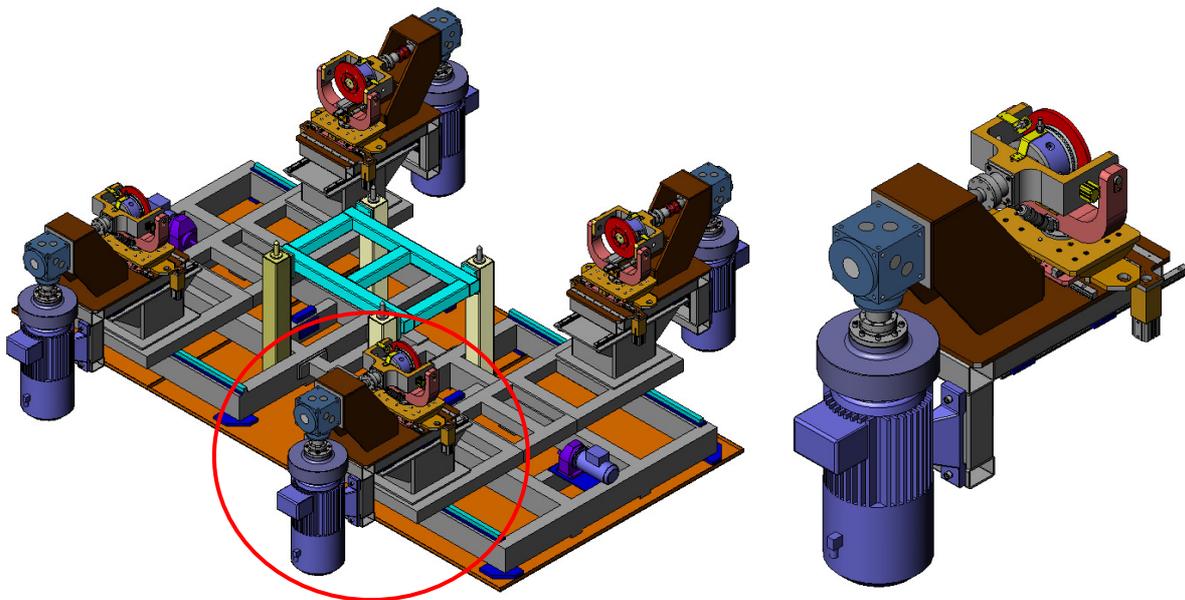


Abbildung 32 Der InLine Function Tester für höhenflexible Gehängefördersysteme (links) und eine seiner Belastungseinheiten (rechts)

Als weitere Vorteile dieser Variante können genannt werden:

- Wegfall der längenveränderlichen Kardanwelle zwischen Motor und Winkelgetriebe
- Entfall der Höhenveränderbarkeit der Absteckdorne für die Gehängeförderer. Diese kann in spezielle Absteckdorne abgesetzt werden und zentriert sich über diese ideal zum Prüfstand. Somit ist die Positionierung des Fahrzeuges innerhalb sehr kleiner Grenzen sichergestellt
- Elektromotorische Verfahrenseinheiten zum Einstellen des Prüfstands auf den Radstand des Fahrzeuges können achsweise zusammengelegt werden
- Der Prüfstand baut flacher und wesentlich kompakter

Hier muss lediglich darauf geachtet werden, dass die Höhe des Prüfstandes so gewählt wird, dass die Lüfter der senkrecht verbauten Elektromotoren einen ausreichend großen Abstand zum Boden aufweisen.

6.3. Grundüberlegungen zum Einsatz eines Fahrzeugprüfstandes in der Montagelinie

Es war ein grundlegendes Anliegen dieser Arbeit, herauszustellen, inwieweit es möglich ist, die Produktion von Fahrzeugen mit Hilfe von InLine-Prüfungen verbessern und optimieren zu können. Um diesbezüglich keine unnötigen Schritte in eine nicht zielführende Richtungen zu gehen, werden zu Beginn der Entwicklung Überlegungen dahingehend angestellt, welche Grundvoraussetzungen erfüllt sein müssen, um eine Integration von Prüfumfängen in eine heutige Montagelinie unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten zu realisieren.

Dazu gehört beispielsweise die Überlegung, welche der Prüfumfänge, die heute üblicherweise auf einem Multifunktionsrollenprüfstand durchgeführt werden, zur Automatisierung und somit zur Integration in die Montagelinie geeignet erscheinen. An dieser Stelle werden in einem ersten Schritt Vor- und Nachteile der Integration von Prüfumfängen in die Montagelinie erarbeitet (**Tabelle 5**).

Lfd.Nr.	Argument	Wertung
1	Zeitliche Verkürzung der End of Line Prüfungen	+
2	Automatisierungspotential, mehr automatische Abläufe	++
3	Prüfen zukünftiger Funktionen (X-by-Wire, kognitive Systeme, ...)	++
4	Mehr Prüfungen, um Q-Probleme des OEM zu reduzieren	+
5	Prüfort liegt näher am Einbauort	○
6	Mehr InLine-Operationen, Reduzierung der OffLine-Prüfungen	+
7	Reproduzierbarkeit der Prüfungen, Tests und Einstellungen	++
8	Warmprüfumfänge und Warmmontageumfänge	++
9	Trend zur Gesamtfahrzeugprüfung	○
10	Trend zur Verminderung von Straßenprüfungen, Testfahrten	+
11	Neue Prüfungen möglich	+
12	Linienerläuterung, Gesamtbilanz Fläche	+
13	Flexibilität im Hinblick auf Typenänderung	○
14	Flexibilität im Hinblick auf n.i.O.-Fahrzeuge	-
15	Nacharbeitsstrategie / Direktläuferquote	-
16	Verfügbarkeit (Gesamtprozess / Werk, technische Klärung)	-
17	Taktzeit (technische Prüfung)	○

Tabelle 5 Vor- und Nachteile der Integration von Funktionsprüfungen in die Montagelinie

Nachfolgend werden die einzelnen Bewertungskriterien näher beschrieben:

1. Zeitliche Verkürzung der End of Line Prüfungen
Durch eine verstärkte Integration von Prüfumfängen in die laufende, taktzeitgesteuerte Montagelinie und durch Verminderung von Werkerzeiten (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34) kann eine zeitliche Verkürzung der Prüf- und Einstellarbeiten, die heute am Bandende durchgeführt werden (→ Kapitel 2), erreicht werden. Die Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses werden am Ende dieses Kapitels erläutert.
2. Automatisierungspotential, mehr automatische Abläufe
InLine-Prüfstände haben ein hohes Potential, heute mit Hilfe eines Werkers durchgeführte Prüfungen zu automatisieren. Hier sind die Punkte Einfahren in den Prüfstand im Vergleich zum automatischen Eintransport im Gehängeförderer und automatische Adaption an den Prüfling sowie vollautomatischer Prüf- und Einstellablauf als die wichtigsten Argumente zu nennen.
3. Prüfen zukünftiger Funktionen (X-by-Wire, kognitive Systeme, ...)
Der gesamte InLine-Prüfablauf ist im Rahmen des SPARC-Projektes optimal auf die Prüfbelange mechatronischer Fahrzeugkomponenten im Gesamtzusammenhang „Fahrzeug“ ausgelegt worden. Als Beispiel kann hier die Prüfung einer mechatronischen Lenkung als Komponente eines präventiv-aktiven Sicherheits- und Stabilitätssystems angeführt werden.
4. Mehr Prüfungen, um Qualitätsprobleme des OEM zu reduzieren
Da Zeit zur Integration von mehr Prüfungen zur Verfügung steht, erhöht sich die Prüftiefe. Dies reduziert automatisch die Fehlerquote beim OEM. Mehr Prüfungen bedeuten direkt ein fehlerfreieres Produkt.
5. Prüfort liegt näher am Einbauort
Die Vorverlagerung der Prüfungen in die Montagelinie bringt den Prüfort näher an den eigentlichen Einbauort der Komponente. Die Komponente wird also früher geprüft, was eine Optimierung im Prozess darstellt, da gemäß den Überlegungen am V-Prozess eine frühere Prüfung bzw. eine frühere Fehlererkennung zu weniger Fehlerbehebungskosten führt. Dieser Aspekt ist in der Realität einer Montagelinie jedoch eher theoretischer Natur und daher neutral zu bewerten. Das Fahrzeug muss bei der Prüfung vollständig montiert sein, ebenso wie beim klassischen Prüfablauf.
6. Mehr InLine-Operationen, Reduzierung der OffLine-Prüfungen
Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit und zur Erhöhung der Strukturierungen in der Produktionsstraße ist es grundsätzlich ein Anliegen aller OEM, möglichst viele Arbeitsschritte in die Produktionslinie zu integrieren.

7. Reproduzierbarkeit der Prüfungen, Tests und Einstellungen
Je höher der Automatisierungsgrad einer Prüfung ist, desto geringer ist der menschliche Einfluss und desto höher demnach die Reproduzierbarkeit des Gesamtprozesses.
8. Warmprüfumsfänge und Warmmontageumfänge
Durch die Vorverlagerung der Prüfungen mit laufendem Motor (teilweise sogar unter Vollast) in die Montagelinie können anschließend durchzuführende Sicht- und Einstellprüfungen am „heißen“ Fahrzeug (Dichtigkeit, Leckageprüfung, Montage Unterbodenverkleidung) vorteilhaft noch im Gehängeförderer durchgeführt werden. An dieser Stelle entfallen dann aufwändige Gruben im Hallenboden und die teilweise sehr teure Untergrundlogistik.
9. Trend zur Gesamtfahrzeugprüfung
Dem Vorteil, dass das gesamte Fahrzeug in der Montagelinie eingestellt und geprüft werden kann, stehen eine abschließende Radmontage und die Demontage sowie der Rücktransport von Adaptern gegenüber. Die Bewertung ist daher neutral, zumal solche Transportsysteme einfach und preiswert sind.
10. Trend zur Verminderung von Straßenprüfungen, Testfahrten
Durch die InLine-Prüfung können mehr Fahrzustände der realen Fahrt nachgebildet werden (z.B. Kurvenfahrt). Daher können reale Fahrprüfungen teilweise oder komplett entfallen.
11. Neue Prüfungen werden möglich
Siehe Punkte 3., 4., 8. und 10.
12. Linienverlängerung, Gesamtbilanz Fläche
Bei der Aufstellung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Montagelinie wird ebenfalls der Flächen- sowie der Energiebedarf der gesamten Montagelinie bewertet. In der Gesamtflächenbilanz bringt die InLine-Prüfung entscheidende Vorteile mit sich.
13. Flexibilität im Hinblick auf Typenänderung
Wenn nachträglich ein neues Modell in eine vorhandene Produktion eingepflegt wird oder ein Typenmix gefahren werden soll, so bringt das InLine-Konzept im Vergleich zum herkömmlichen Bandendepflegkonzept keine Verbesserung, aber auch keine Verschlechterung der Situation in Bezug auf die zu tätigen Umstellarbeiten mit sich.

14. Flexibilität im Hinblick auf n.i.O.-Fahrzeuge

Im Hinblick auf die Flexibilität bei einem n.i.O.-Fahrzeug hat die InLine-Prüfung einen scheinbaren Nachteil im Vergleich zum Rollenprüfverfahren. Im ungetakteten Bandendebetrieb kann ein n.i.O.-Fahrzeug jederzeit aus der laufenden Prüfung entnommen und in die Nacharbeitslinie eingebunden werden. Beim InLine-Konzept muss das Fahrzeug zuerst alle weiteren Stationen (Radmontage, Unterbodenkontrolle etc.) durchlaufen, bevor es auf die Räder abgesetzt wird und manuell nachgearbeitet werden kann.

15. Nacharbeitsstrategie / Direktläuferquote

Siehe Punkt 14.

16. Verfügbarkeit (Gesamtprozess / Werk, technische Klärung)

Es wird in einem ersten Schritt angenommen, dass der Ausfall eines Prüf- oder Einstellstandes in der Linie die gesamte Linie kurzzeitig zum Stillstand bringen würde. Bei einem herkömmlichen Bandendeprüfstand ist dies nicht der Fall, es sei denn, es existiert nur eine Montage- und Prüflinie.

17. Taktzeit (technische Prüfung)

Die technische Prüfung (Schalter, Taster, Lampen, Leuchten, Signalhorn etc.) des Fahrzeuges muss nach wie vor nach den Prüf- und Einstellarbeiten durch einen Werker vorgenommen werden. Bei näherer Betrachtung dieser Prüfungen ist es jedoch denkbar, einen Großteil dieser Prüfungen beispielsweise durch den Einsatz von Kameratechnik und geeigneter Prüfstand-Prüflings-Kommunikation ebenfalls zu automatisieren. An dieser Stelle soll jedoch nur die Integration des InLine Prüfstandes bewertet werden, daher ist dieser Punkt neutral bewertet.

In einem weiteren Schritt wird die Art der Prüfumfänge, welche für einen „Umzug“ vom Bandende in die Montagelinie geeignet sind, erarbeitet und dargestellt. Diese sind zu einem großen Teil von deren Automatisierbarkeit abhängig. Wenn es möglich ist, Prüfungen zu identifizieren, die beim so genannten Rollentest verhältnismäßig viel Zeit in Anspruch nehmen, die aber nicht zwingend die Anwesenheit eines Werkers oder eines Testfahrers im Fahrzeug bedingen, so sind diese Testumfänge optimal für die InLine-Prüfung geeignet. Im Zuge dieser Überlegungen werden zwei „Prüftypen“ identifiziert. Dies sind zum einen Prüfungen, die hohe Kräfte bzw. Drehmomente sowie hohe Drehzahlen des Fahrzeugmotors bedingen. Diese so genannten „heavy“-Prüfumfänge definieren sich wie folgt:

- Hauptanteil: Der „Dynamikblock“ aus den herkömmlichen Rollenprüfungen
- Prüfungen unter zum Teil „Motorvollast“

- Prüfungen mit hohen Drehmomenten und / oder hohen Drehzahlen
- potentieller Automatisierungsgrad sehr hoch (bereits heute)

Solche Prüfungen sind abhängig vom OEM und umfassen beispielsweise:

- die so genannte OBD II Prüfungen (Kommunikation mit dem Motorsteuergerät, Einstellung der Motorenkennfelder auf reale Abgaszyklen etc.)
- den so genannten dynamischen und / oder statischen Bremstest
- automatische Getriebetests (bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe)
- fahrdynamische Tests und Warmfahrt des Motors bzw. des Antriebstranges
- Prüfungen im Schubbetrieb

Hier käme zudem eine Evaluierungsfahrt hinzu. Auf einer solchen Fahrt prüft heute ein Werker (Testfahrer) unter anderem die richtige Stellung des Lenkrades bei Geradeausfahrt. Bei diesen Prüfungen werden, je nach OEM, Geschwindigkeiten von 150km/h und mehr erreicht. Der Testfahrer achtet dabei auf die Leichtgängigkeit des Getriebes und auf ungewöhnliche Geräusche während des „Fahrbetriebs“ sowie darauf, ob das Fahrzeug beim Bremsen verzieht oder ob es sich unruhig verhält. Diese Evaluierungsfahrt lässt sich selbst nach modernem Stand der Technik nur schwer und vor allen Dingen nicht ohne unrealistisch hohen technischen und finanziellen Aufwand automatisieren.

Weiterhin wird ein „light“-Paket definiert, welches sich wie folgt darstellt:

- Tests bei „Motor im Leerlauf“ (oder bei leicht erhöhter Leerlaufdrehzahl)
- Tests, bei denen keine hohen Drehmomente erforderlich sind
- Prüfungen, die ohne Werker durchführbar sind / heute schon durchgeführt werden

Solche Prüfungen umfassen beispielsweise:

- Den ABS-Sensortest und Tests der Differentialsperre bei langsamen Geschwindigkeiten (Ventiltests)
- Auswuchtprüfungen (Kardanwelle, ...)
- Auswuchtprüfung der Räder (bei einigen OEM auf dem Prüfstand angestrebt)
- Prüfungen zur Kalibrierung des Lenkwinkelsensors

Es ist sinnvoll, die zeitlichen Aspekte der verschiedenen Prüfumfänge zu beurteilen, da das Ziel der Integration von Prüfungen in die Montagelinie nicht zuletzt eine sinnvolle Aufteilung zwischen getaktetem Linienbetrieb und einer signifikanten Verkürzung der Prüfzeit am Bandende ist.

Nach heutigen Prüfstandards differieren diese Zeiten teilweise stark unter den verschiedenen OEM. Es kommt vor, dass sich eine Montagelinie in bis zu sechs Bandendeprüflinien auffächert. Dies ergibt sich direkt aus einer Kombination von kurzen Taktzeiten (z.B. 70 sek.) in der Linienfertigung mit relativ langen Prüf- und Einstellzeiten (bis zu 6 min.) auf den klassischen Bandendeprüfständen.

Hieraus resultieren unter anderem ein großer Platz- und Energiebedarf sowie ein hoher Personaleinsatz an den Prüflinien. Für die anschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Integrationsbemühungen ist eine Optimierung in Richtung einer sinnvollen Aufteilung der Prüfabläufe entscheidend. So muss nicht nur auf technische Realisierbarkeit hin gearbeitet werden, sondern auch auf eine sinnvolle zeitliche Basis. Basierend auf den Daten verschiedener großer OEM wird daher eine quantitative Bewertung der Prüfzeiten am Bandende und der darin enthaltenen Prüfumfänge durchgeführt.

Beispielhaft zeigt Abbildung 33 jeweils ein Diagramm eines maximalen (links) und eines minimalen (rechts) Prüfablaufs im Hinblick auf die Prüfdauer und die Dauer der verschiedenen Prüfelemente in einer solchen Prüfung.

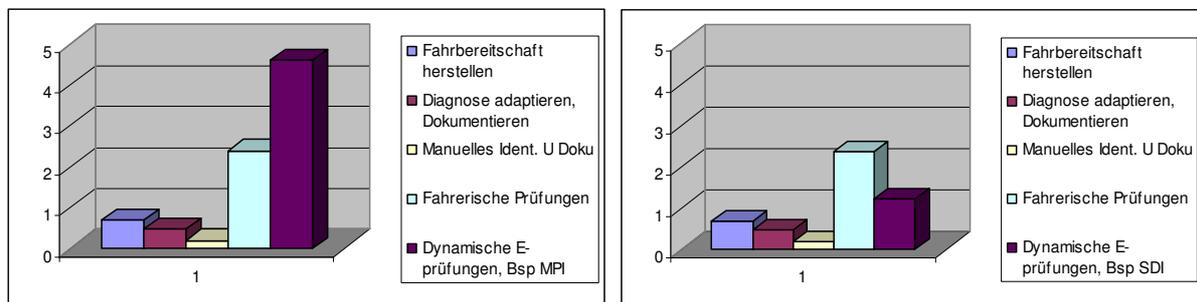


Abbildung 33 Maximale (links) und minimale (rechts) Prüfdauer bei den in der Studie näher betrachteten Prüfabläufen verschiedener Fahrzeughersteller

Aus diesen Daten wird durch Mittelung aller Prüfzeiten sowie durch einen Vergleich und eine Zuordnung der durchgeführten Prüfumfänge untereinander folgende Übersicht gebildet (Abbildung 34).

Bei einer solchen Betrachtung kommt es jedoch nicht nur darauf an, die eigentliche Prüfzeit in Augenschein zu nehmen. Über diese Prüfzeit, die so genannte Nettozeit, hinaus benötigt der Testfahrer eine gewisse Zeitspanne, um das Fahrzeug in den Prüfzustand zu versetzen. Dies beinhaltet das Einfahren in den Rollenprüfstand, die Adaption eines Diagnosekabels (z.B. den OBD-II-Stecker) und eine Registrierung des Fahrzeuges (Barcodeleser, Wagenprüfkarte etc.).

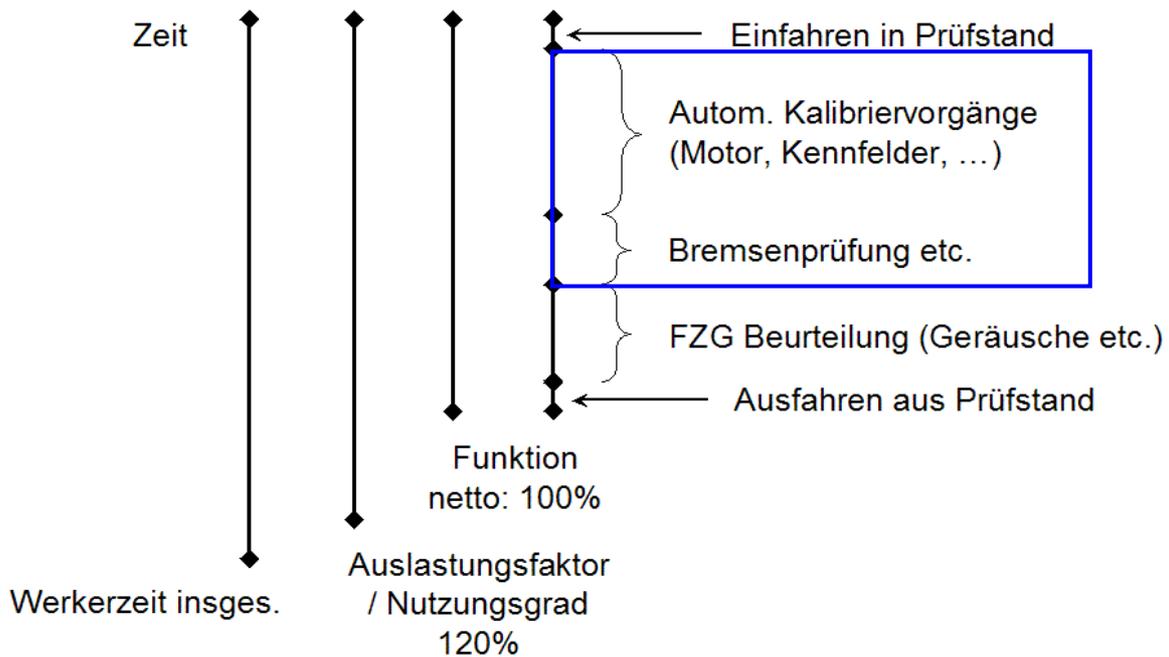


Abbildung 34 Allgemeine Aufteilung der Prüfzeiten bei der Bandendepfung

Weiterhin muss nach der Prüfung das Fahrzeug aus dem Prüfstand ausgefahren und an eine definierte Position abgestellt werden. Der Werker verlässt das Fahrzeug, geht zum nächsten Prüfling zurück und beginnt die Prozedur erneut. Hierzu wird ein prozentualer Auslastungsfaktor, in den auch Pausenzeiten etc. eingehen, addiert. Daraus ergibt sich eine Gesamtwerkerzeit. Bei dieser Bewertung stellt sich heraus, dass ein Grossteil der Prüfabläufe „auf der Rolle“ (Kasten in Abbildung 34) auf der einen Seite automatischen Diagnose- und Kalibriervorgängen dient, zum Beispiel von Steuergeräten für die Motorsteuerung. Dabei wird heute der Testfahrer angewiesen, beispielsweise in den vierten Fahrgang zu schalten und das Fahrzeug möglichst konstant auf 100 km/h zu halten. Dieser Teil der Prüfung dauert OEM-abhängig bis zu 150 Sekunden.

Auf der anderen Seite werden definierte Bremsprüfungen durchgeführt, um die im Gesetzestext oder vom OEM selber geforderten bzw. festgelegten Bremswirkungen und damit zusammenhängende Radumfangkräfte, Verzögerungswerte sowie Systemansprechzeiten zu prüfen. Eben diese Prüfumfänge sind gemäß der durchgeführten Untersuchungen automatisierbar und eignen sich auf Basis der erwähnten Kriterien zur Integration in die Montagelinie.

Nachdem festgestellt wurde, welche Vorteile die Integration von Prüfumfängen in die Montagelinie mit sich bringen, wird in einem weiteren Schritt untersucht, welche Voraussetzungen an den Prüfling, also an das Fahrzeug in der Montagelinie, gestellt werden, um eine solche Prüfung durchführen zu können. Ziel dieser Untersuchungen ist es, eine optimale Position in der Linie zu ermitteln, an die ein „InLine-Prüfstand“

integriert werden kann. Um die genannten Prüfumfänge in der Linie durchzuführen zu können, so das Ergebnis dieser Untersuchungen, muss das Fahrzeug nahezu komplett montiert sein. Um eine automatische Adaption des Prüfstandes an das Fahrzeug taktzeitgerecht zu gewährleisten, wird bereits in diesem frühen Stadium erkannt, dass es vorteilhaft wäre, das Fahrzeug ohne Reifen und Räder zu testen. Um die dazu angestellten Untersuchungen explizit beschreiben zu können und die Ergebnisse vorzustellen wird die automatische Adaption, die nicht nur für den InLine-Fahrzeugprüfstand (IFT) interessant ist, im späteren Verlauf dieser Arbeit explizit vorgestellt und erläutert.

Eine weitere, wichtige Voraussetzung an dieser Stelle ist, dass das Fahrzeug bis auf die Räder komplett montiert sowie vollständig befüllt (Öle, Treibstoff, Wasser etc.) ist. Weiterhin sollte es bereits über eine eigene Stromversorgung (Batterie) verfügen. Alternativ hierzu kann jedoch Hilfsenergie über das Fahrzeugfördersystem eingespeist werden. Diese Tatsache wird auch dann entscheidend, wenn über eine Erweiterung der InLine-Prüfung im Hinblick auf eine InLine-Fahrwerkeinstellung nachgedacht wird. Hier ist das Gewicht des Fahrzeuges bzw. eine realitätsäquivalente Einfederung des Fahrwerks entscheidend.

Die Transportstrategie des Fahrzeuges in der Montagelinie spielt bei einer vollautomatischen Prüfung ebenfalls eine wichtige Rolle. Das beim OEM vorhandene Förder- oder Transportsystem muss dabei in der Lage sein, das Fahrzeug in den Prüfstand einzufördern, im Rahmen bestimmter Grenzen definiert anzuhalten und nach erfolgter Prüfung wieder aus dem Prüfstand auszufördern. Hierbei kommen grundsätzlich verschiedene Förderverfahren in Frage, die im Rahmen der Arbeit untersucht und bewertet wurden. Da das Fahrzeug für die InLine-Prüfung zwar komplett montiert sein sollte, jedoch nicht über Räder und Reifen verfügen darf, ist die grundlegende Voraussetzung hier ein Transport des Fahrzeuges, welcher nicht auf dessen Eigenkraft (Verbrennungsmotor) beruht. Ein so genanntes Plattenband, auf dem das Fahrzeug auf seinen Rädern stehend gezogen wird, fällt ebenfalls aus der Betrachtung heraus.

Geeignete Transportsysteme sind beispielsweise im fahrzeugtechnischen Produktionsbetrieb bekannte, so genannte Hängefördersysteme. Als besonders geeignet stellt sich hier ein höhenveränderliches Gehänge heraus (**Abbildung 35**, links). Aber auch Schubplattformen (**Abbildung 35**, rechts) und nicht in der Höhe veränderliche Gehängeförderer sind zum Eintransport des Fahrzeuges in den InLine-Prüfstand geeignet.



Abbildung 35 Hubgehänge (links) und Beispiel einer Schubplattform (rechts)

Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass der Prüfstand bei einer nicht höhenveränderlichen Ausprägung des Transportsystems über entsprechende Anpassungsmechanismen, also Hubsäulen oder ähnliches, verfügt, um die Prüfeinheiten an das Fahrzeug heran zu heben und zu adaptieren. Dies wird im Laufe der vorliegenden Arbeit noch ausführlicher dargestellt.

Wie in Tabelle 5 zu Beginn dieses Abschnitts bereits vorgestellt, ergeben sich durch die InLine-Prüfungen grundlegende Vorteile für den OEM, die sich auf Taktzeitoptimierung und wirtschaftliche Gesichtspunkte beziehen. Zum anderen existieren weitere, rein auf technischen Fakten basierende Vorteile eines solchen Konzepts, die auf dem Unterschied zwischen IFT und einem herkömmlichen Rollenprüfstand fußen.

Ein Beispiel: In einem konventionellen Doppelrollenprüfstand wird das Fahrzeug zu Prüfzwecken pro Rad zwischen zwei Doppelrollen eingesenkt und somit axial im Prüfstand gehalten (→ Kapitel 2). Bereits daraus resultieren unter Umständen mehrere Prüfkongflikte. Bei Fahrzeugen mit sehr geringer Bodenfreiheit und leistungsstarkem Antrieb werden diese oft weit (also tief) zwischen die Doppelrollen eingesenkt, damit sie sicher im Prüfstand verbleiben und durch die auftretenden Reifenumfangskräfte nicht aus dem Prüfstand herausgetragen werden (beispielsweise bei starken Beschleunigungs- und Bremsvorgängen). Besitzt das Fahrzeug nun keine ausreichende Bodenfreiheit, um den Beschleunigungswerten entsprechend tief genug in den Prüfstand eingesenkt zu werden, müssen Kompromisse in der Prüftiefe gemacht werden. Das Fahrzeug auf dem Prüfstand zu fesseln, was früher zur üblichen Praxis bei solchen Tests zählte (**Abbildung 36**), ist heute aufgrund taktzeittechnischer Überlegungen ein Tabu.

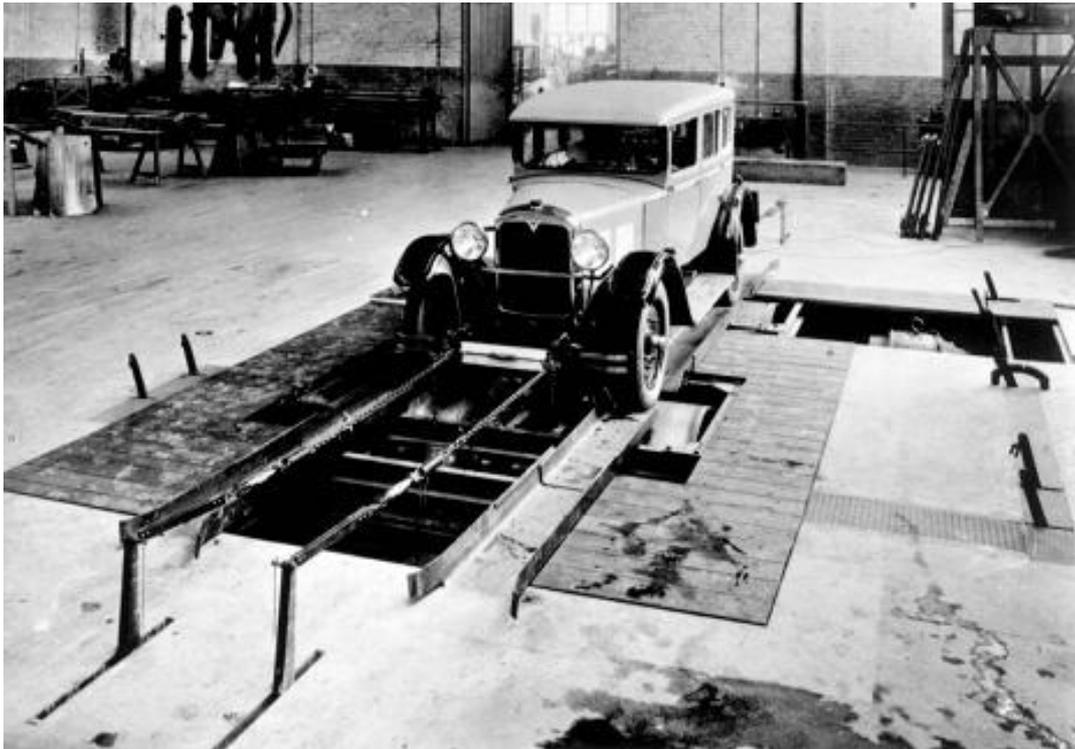


Abbildung 36 Fahrzeug-Rollenprüfung um das Jahr 1940 /15/

Bei Scheitelrollenprüfständen geschieht das Halten des Fahrzeuges mit Hilfe von speziellen, automatisch an das Rad herangefahrenen Halterollensystemen, auf die hier nicht genauer eingegangen wird. Der Reifen rollt also entweder zwischen oder auf den Laufrollen des Prüfstandes ab; ähnlich wie auf der Straße. Fahrzeuge mit Winterreifen dürfen dabei heute laut Deklaration des Wirtschaftsverbandes der Kautschukindustrie /50/ auf Doppelrollenprüfständen aus folgenden Gründen nicht oder nur eingeschränkt (eingeschränkter Geschwindigkeitsbereich etc.) getestet werden:

- Materialbeschaffenheit
- Reibung / Hitzeentwicklung
- Abrieb
- Beschädigung

Diese Einschränkungen beziehen sich ebenfalls auf Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, was wiederum zu einer Reduzierung der Prüfmöglichkeiten führt.

Im Gegensatz zu einem Rollenprüfstand wird der Prüfling beim IFT nicht auf seinen Rädern stehend geprüft. Das Fahrzeug wird ebenfalls nicht auf den Prüfstand aufgefahren. Es verbleibt im Prinzip im Transportsystem (z.B. im Gehänge) und wird an den Radflanschen über speziell entwickelte Adaptionssysteme, die zudem lenkbar ausgestaltet sind, mit dem Prüfstand verbunden.

Die sich daraus ergebenden technischen Vorteile des IFT sind:

- Kein ungewolltes „Herausfahren“ des Fahrzeuges aus dem Prüfstand
 - dies ist vor allem relevant bei leistungsstarken Allradfahrzeugen und Fahrzeugen mit stark eingeschränkter Bodenfreiheit
- Bessere Testmöglichkeiten bei Fahrzeugen mit geringer Bodenfreiheit
- Keine Begrenzung der Prüfmöglichkeiten durch Reifenbeanspruchung
 - keine Reifenbeschädigungen oder -beeinträchtigungen
 - kein Prüfausschluss bei Winterbereifung
 - Prüfungen bei hohen Geschwindigkeiten und mit hohen Kräften möglich
- Prüfungen von Lenkaktuatoren und korrespondierenden Systemen
 - heutige Überlagerungslenkung bis zum Steer-by-Wire Aktuator
 - Prüfungen zukünftiger Stabilitätssysteme, die zur Stabilisierung des Fahrzeuges in grenzbereichnahen Fahrsituationen sowohl Bremsen- als auch Lenkeingriff nutzen
- Prüfen von stabilisierenden Sicherheitssystemen durch die Möglichkeit, verschiedene Schlupfwerte am Prüfstand zu simulieren (μ -split Szenario etc.)
- Prüfungen von übergeordneten Sicherheitssystemen, die auf der Basis von Umfelderkennungssensorik im Zusammenhang mit „kognitiven Fähigkeiten“ arbeiten
- Vollautomatische Durchführung fahrdynamischer Prüfungen
 - keine Beeinflussung durch den Menschen
 - exakte Einhaltung der Prüfzeiten
 - bessere Reproduzierbarkeit, höhere Prozesssicherheit

Gerade der Aspekt der hohen Reproduzierbarkeit in Bezug auf die Vielzahl der Prüfungen ist ein wesentliches Argument für eine Automatisierung dieser Prüfumfänge. Weiterhin ist das Auftreten von Schlupf auf Rollenprüfständen messtechnisch schwer zu erfassen und erhöht zudem die Reifenbeanspruchung. Im Gegensatz zu Fahrprüfungen auf Rollenprüfständen gibt es bei einer rotatorisch starren Anbindung an den Radflansch keine Verfälschung der Prüfergebnisse durch Schlupf zwischen Reifen und Laufrolle.

6.4. Einbindung des IFT in eine Montagelinie

Im Rahmen der Entwicklung des IFT werden mehrere Planspiele durchgeführt, wie ein solcher Prüfstand in die Montagelinie zu integrieren ist. Dazu werden gedanklich und auf Basis eines klassischen Prüfablaufs (\rightarrow Kapitel 2) mehrere Integrationsvarianten in die Montagelinie vorgenommen. Ein Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass eine **singuläre** Integration des Fahrzeugprüfstandes weder technisch noch wirtschaftlich besonders sinnvoll ist. Um die beschriebenen Prüfumfänge sinnvoll in

den Linienfluss zu integrieren, ist es zweckdienlich, um einen solchen Prüfstand herum weitere Arbeitsumfänge in die Linie einzubinden. Diese ergeben sich daraus, dass vor den definierten „heavy“-Prüfumfängen und ebenfalls direkt nach diesen Prüfungen gewisse Arbeitsschritte am Fahrzeug durchgeführt werden müssen.

Diese Arbeitsschritte werden, bezogen auf die Nomenklatur eines heutigen Bandendetests auf einem Rollenprüfstand, als „Pre-Roll“ und „Post-Roll“ Arbeitsumfänge bezeichnet. Dabei definiert „Pre-Roll“ solche Tätigkeiten, die zur Vorbereitung des Prüflings auf den Bandendetest durchgeführt werden müssen. Hier kann beispielhaft eine Sichtprüfung angeführt werden, die den korrekten Verbau von Leitungen und Schläuchen sicherstellt, bevor das Fahrzeug unter Last gefahren wird. An dieser Stelle muss ein weiterer Takt in die Montagelinie eingebunden werden, der einem Werker die Zeit zur Durchführung solcher Arbeitsumfänge zur Verfügung stellt.

„Post-Roll“ Arbeitsumfänge sind etwas aufwändiger. Nachdem das Fahrzeug die sogenannten Heißprüfungen absolviert hat, wird eine weitere Sichtkontrolle, meistens des Unterbodens, durchgeführt. Hier wird geprüft, ob durch den erhöhten Druck im gesamten Leitungssystem und durch die gesteigerten Temperaturen im Motorraum Undichtigkeiten an Verbindungsstellen etc. aufgetreten sind. Diese sind jetzt bei einer sogenannten Leckageprüfung gut zu erkennen. Weiterhin wird in diesem Stadium die Unterbodenverkleidung montiert.

Ein weiterer Arbeitsschritt, der nun in der Linie durchgeführt werden muss, ist die Montage der Adapterscheibe. Dieser Schritt liegt vom technischen Ablauf her sehr nahe an der heutigen Montage der Räder und Reifen und muss vor den InLine-Einstellungen und der InLine-Prüfung durchgeführt werden. Die Montage der Räder wird heute oft als letzter Takt vor dem Absetzen des Fahrzeuges, beispielsweise auf ein Plattenband, durchgeführt. Hier müsste lediglich eine örtliche Verlagerung dieses Montageschrittes an das Ende der Linie, nach dem Abschluss der Prüfungen, stattfinden. Die Räder können optimalerweise dann montiert werden, wenn die Adapterscheibe wieder vom Fahrzeug demontiert wird. Es ist denkbar, dies in einem Arbeitstakt zu bewältigen. Die Adapterscheibe wird dann beispielsweise über ein Transportband zur Montagestation vor den InLine-Ständen zurücktransportiert.

Wird nun die Integration des IFT in die Montagelinie konsequent zu Ende gedacht, ist es sinnvoll, vor die beschriebenen Arbeitsumfänge und die InLine-Prüfung einen Fahrwerkeinstellstand in der Montagelinie zu integrieren. Somit wird im Prinzip die „klassische“ Bandendestruktur in die Montagelinie vorverlagert. Unter der Annahme, dass in eine beispielhafte Montagelinie ein InLine Fahrwerkeinstellstand und der neu entwickelte InLine Function Tester eingebunden werden, sollen in diesem abschließenden Abschnitt die daraus resultierenden technischen Vorteile beschrieben

und diskutiert werden. Darüber hinaus werden Lösungsvorschläge erarbeitet, die den zu Beginn des vorliegenden Kapitels (Tabelle 5) bemerkten Verlust an Flexibilität in Bezug auf so genannte „n.i.O.-Fahrzeuge“ bei einem liniengeführten Prüf- und Einstellprozess behandeln.

Abbildung 37 zeigt in Bezug auf die Position des Fahrwerkstandes in dem neuen Konzept beide Integrationsmöglichkeiten auf. Die Fahrwerkseinstellung in der Linie ist hier als Alternative zu der klassischen Fahrwerkseinstellung nach der Montage der Räder dargestellt. Einer der Schritte, die ergänzend durchgeführt werden sollten, ist eine Fahrzeugevaluierung auf einer später angesiedelten Dynamikrolle. Hier prüft ein Werker das Fahrzeug beispielsweise auf akustische Mängel und verifiziert den Geradeauslauf.

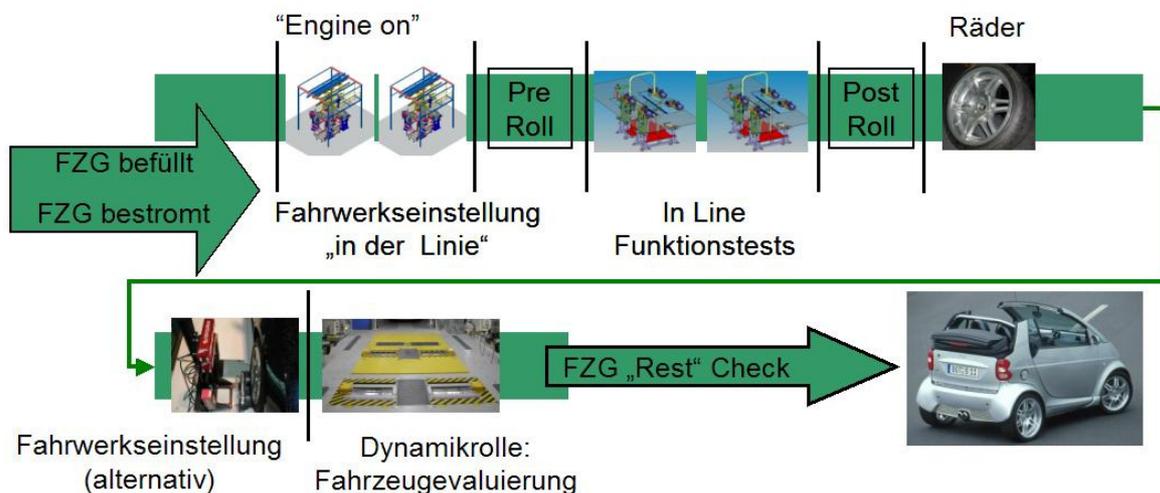


Abbildung 37 Einbindung des IFT sowie sinnvoller Arbeitsumfänge in eine Montagelinie

Der Startpunkt des Motors „Engine-On“ sollte zudem zu einem frühen Zeitpunkt stattfinden. Bevor das Fahrzeug unter Last gefahren wird ist es notwendig, dass der Verbrennungsmotor einige Minuten mit Leerlaufdrehzahl betrieben wird. Dadurch kann zum einen sichergestellt werden, dass das Fahrzeug auch wirklich anspringt. Zum anderen läuft der Motor über diese Zeit schon einmal „langsam warm“, damit er nicht direkt nach dem Start hochdynamisch bewegt werden muss, was einem neuen Motor erheblichen Schaden zufügen könnte, gerade wenn dieser über einen Abgasturbo-lader oder einen Kompressor verfügt. Sinnvollerweise wird dieser „Engine-On-Zeitpunkt“ also vor die Fahrwerkseinstellung gelegt. Es hat sich herausgestellt, dass es für die Fahrwerkseinstellung ohnehin geschickter ist, wenn der Motor des Fahrzeuges läuft. Ein Grund dafür ist, dass die Lenkübersetzung bei laufendem Motor eine andere ist, als bei ausgeschaltetem Fahrzeug, weil das Lenkübersetzungsgetriebe bei Motor- bzw. Servounterstützung spielfreier, also mit deutlich kleinerer Hysterese, gedreht werden kann. Somit sind also die Fahrwerkseinstellungen bei laufendem

Motor exakter, entspricht aber zumindest mehr dem tatsächlichen Betrieb des Fahrzeuges beim Endkunden.

Ein Argument gegen den hier vorgestellten InLine Prüf- und Einstellprozess war (Tabelle 5), dass die Flexibilität der Produktion in Bezug auf „n.i.O.-Fahrzeuge“ unter dem Konzept leidet. Ein Fahrzeug, welches heute als „n.i.O.“ geprüft wird, kann vom Fahrwerksstand oder vom Rollenprüfstand direkt an einen Nacharbeitsplatz gefahren werden und nach Erledigung der notwendigen Arbeiten ohne weitere Komplikationen wieder in den Prüfablauf eingeschleust werden. An dieser Stelle ist die InLine-Prüfung eindeutig als unflexibler zu bezeichnen. Bei dem hier vorgestellten Konzept ist es aber denkbar, einen so genannten Schleusentakt vor den Prüf- und Einstellbereich zu setzen. Ein negativ getestetes Fahrzeug müsste dann lediglich durch den Rest der Linie weitergeführt werden.

Nach dem das Fahrzeug mit Rädern bestückt, abgesetzt und nachgearbeitet wurde, kann es mit Hilfe des Schleusentaktes wieder in die Linie eingespeist werden. Voraussetzung ist dann eine vorherige Demontage der Räder. Denkbar wäre ebenfalls ein „Loop“ im Gehänge, also ohne Räder. Die sinnhaftigste Möglichkeit bestünde jedoch darin, dass es einen Nacharbeitsplatz oder eine klassische Nacharbeitslinie gibt, die für solche Fälle mit einem klassischen Prüfkonzept ausgestattet ist. Da dies bereits heute in einigen Automobilwerken so gehandhabt wird, um eine ungleichmäßig schwankende Anzahl von „n.i.O.-Fahrzeugen“ abzufedern, wird diese Möglichkeit die mit Sicherheit am häufigsten anzutreffende Kombination aus moderner InLine- und klassischer Prüftechnik sein. Diese Alternative ist als realistisch in Bezug auf eventuell durchzuführende Nacharbeitsschritte anzusehen.

6.5. Wirtschaftliche Betrachtungen der Integration von Prüfumfängen in die Montagelinie

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine ganzheitliche Betrachtung in Bezug auf die Integration von Prüf- und Einstellaufgaben in eine Montagelinie durchgeführt und es wurde eine Bewertung der technischen Vorteile erarbeitet. Grundsätzlich wird ein jedes System, also ebenfalls das Konzept der InLine-Prüfung, erst dann für einen potentiellen Kunden interessant, wenn es nicht nur besondere technische Möglichkeiten beinhaltet, sondern vor allem auch wirtschaftliche Vorteile bietet. Das Ergebnis der in dieser Arbeit durchgeführten Wirtschaftlichkeitsstudie wird in diesem Abschnitt vorgestellt und die zur Bewertung verwendeten wirtschaftlichen Aspekte werden beschrieben.

6.5.1. In der Studie bewertete Komponenten und Varianten

Bei der Betrachtung wurden neben der technischen Realisierbarkeit und der Möglichkeit der Einbindung bzw. der Nachrüstung der Integrationsschritte in eine existierende Montagelinie (sog. Brownfield) folgende Komponenten im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit in die Bewertung eingebunden:

- Taktzeitoptimierung und Prüfstandauslastung
- Werkerauslastung
- Platzbedarf für die Produktion / Prüfung (bei Neuaufbau)
 - Umbauter Raum der Halle etc.
- Energiebedarf (Absaugung von Abgasen und Abdampfungen, Heizung, Beleuchtung...)
- Entfall von Gruben / Montagegruben (bei Neuaufbau)
- Nacharbeitskonzept / Aufwand für Nacharbeit „offline“

Dazu kommen weitere, nicht wirtschaftlich bewertbare Aspekte, die für eine solche InLine-Prüfung sprechen. Dazu zählen beispielsweise Lärm- und Schmutzbelastung. Dynamische Prüfungen auf einem Rollenprüfstand verursachen eine hohe Lärmbelastung (z.B. Reifen auf der Rolle und Zahnriemen des ‚x-road‘ etc.) und durch den Reifenabrieb bedingt eine gewisse Schmutzbelastung. Diese Aspekte werden beim InLine-Prüfkonzept deutlich reduziert.

Als Basis für den Vergleich dient ein klassisches, konventionelles Bandendekonzert (**Abbildung 38**) und eine durchschnittliche Nutzungszeit der Anlage für 7 Jahre. Dies entspricht dem Durchschnitt des Nutzungszklus einer solchen Prüfanlage /53/.

Folgend werden drei Vergleichsvarianten mit verschiedenen Ausbaustufen und Integrationsschritten aus den betrachteten Varianten ausgewählt und anschließend deren Bewertung im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit erläutert.

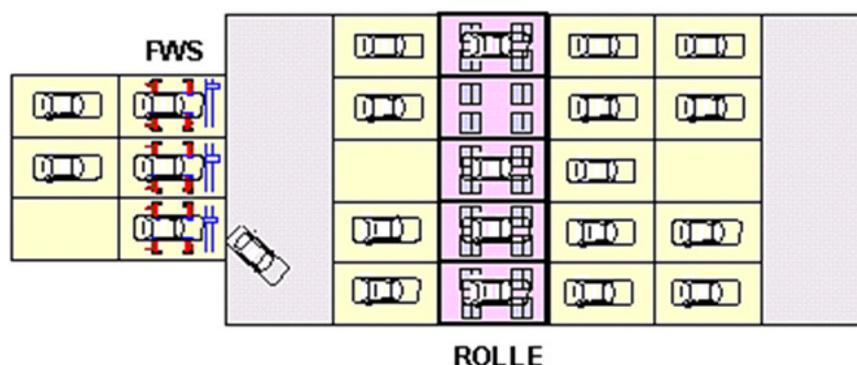


Abbildung 38 Schematischer Prüf- und Einstellablauf für ein heutiges Automobilwerk mit Fahrwerkeinstellstand (FWS) und Rollenprüfstand (Rolle)

Grundsätzlich ist jede der hier vorgestellten Varianten immer ein Kompromiss zwischen den oben erwähnten Aspekten und muss von OEM zu OEM differenziert bewertet werden. Die hier vorgestellte Bewertung kann daher lediglich als repräsentativer Durchschnitt angesehen werden.

Variante 1: Integriertes Bandende mit vier parallelen InLine Function Testern

Im Zuge der Betrachtung wird es als kritisch in Bezug auf Taktzeit, Ausfallsicherheit, Nacharbeit und die so genannte Notfallstrategie angesehen, einen einzigen Bandendeprüfstand in eine Linie zu integrieren. Sollte beispielsweise ein Fahrzeug in der Linie im Bereich der Bandendprüfung ein Blockieren des Produktionsflusses auslösen, würde die gesamte Linie angehalten.

Gründe für eine solche Blockade könnte beispielsweise ein Fehler beim Öffnen der Adaptionsspanner (Ausfall der pneumatischen Spannsysteme etc.) sein. Im Hinblick auf die Möglichkeit eines Anlagenausfalls bzw. eines Fehlers an der Anlage wird eine professionelle FMEA (→ Kapitel 3) der Anlage und der Prüflinie durchgeführt. Dabei werden als kritisch bewertete Komponenten mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit sowie mit einem Risikofaktor versehen. Je größer der bewertete Schaden, der durch den Ausfall der Komponente verursacht wird, desto größer ist dieser Faktor.

Für den IFT wurde eine Gesamtbewertung von 99,07% berechnet. Mit einem Ausfall ist daher nicht zu rechnen. Der Prüfstand ist tauglich für den Einsatz in einer Produktionslinie. Aus Gründen der Vollständigkeit der Studie ist ein solches „Worst-Case-Szenario“ jedoch in Betracht gezogen worden. Dazu wird angedacht, den Bereich der InLine-Prüfung wie in **Abbildung 39** gezeigt aufzufächern. Die Aufstellung von vier parallelen Linien bedeutet hier ein Maximum an Platzbedarf, Aufwand und Anschaffungskosten. Im Gegenzug dazu könnten mehrere Bandendeprüfstände entfallen, da die Taktzeit auf den IFT's länger sein kann und Prüfungen effektiver ablaufen können.

Wie oben bereits erwähnt, wird im unteren Teil der Abbildung 39 eine Nacharbeitslinie gezeigt, in der „n.i.O.-Fahrzeuge“ nachgearbeitet und vor allem nachgeprüft werden können. Das entlastet die eigentliche InLine-Prüfung weiter und schafft somit nicht den Bedarf einer umständlicheren Wiedereintaktung von Fehlerfahrzeugen über eine Weiche und eine Rückförderstrategie. Jedoch ist der Platzbedarf geringfügig größer.

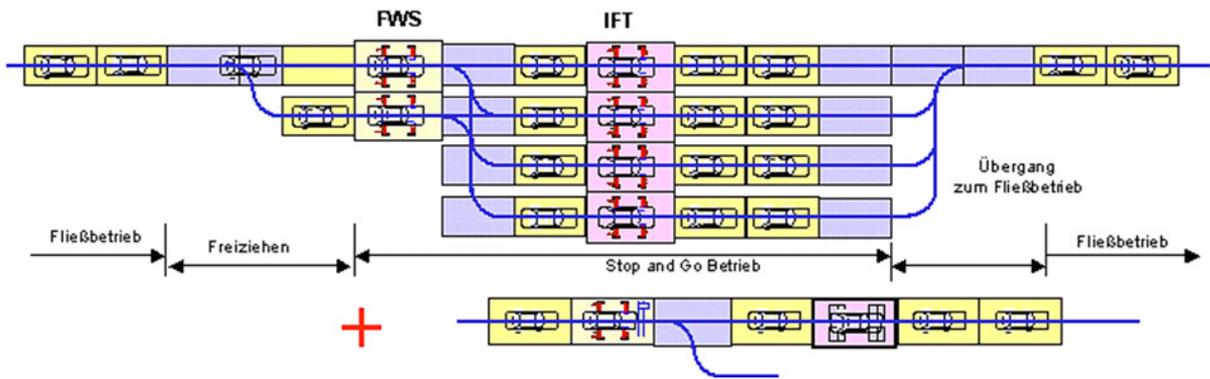


Abbildung 39 Schematische Darstellung des InLine-Konzepts mit vier parallelen Prüflinien (inklusive „Offline“ Nacharbeitskonzept)

Variante 2: Integriertes Bandende mit zwei parallelen InLine Funktion Testern

Dieses Szenario ist ein idealer Kompromiss zwischen den Gesichtspunkten Taktzeit, Linienauslastung, Platzbedarf und dem so genannten Mischungsfaktor („alte“ zu „neue“ Prüfstände) und wird daher als optimal bewertet (**Abbildung 40**).

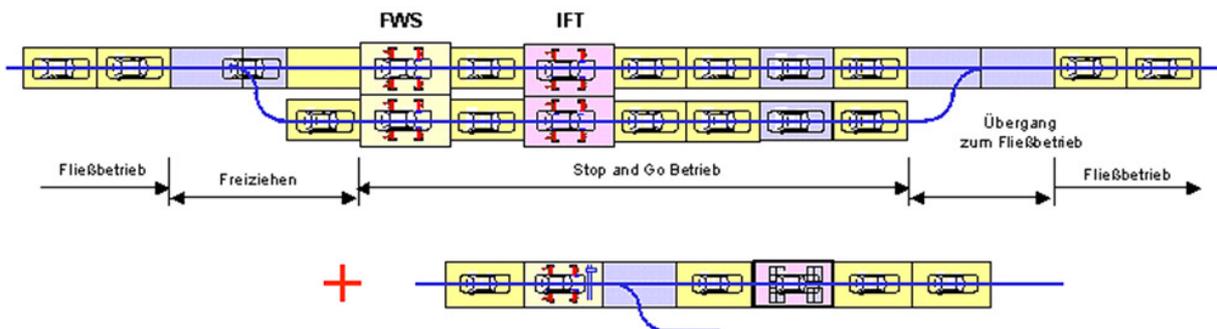


Abbildung 40 Schematische Darstellung des InLine-Konzepts mit zwei parallelen Prüflinien (inklusive „Offline“ Nacharbeitskonzept)

Variante 3: Nur InLine Fahrwerkseinstellstand in Kombination mit einer klassischen Rollenprüfung, ohne Integration eines IFT

In einem Kundenprojekt wurde im Jahre 2002 ein aufwändig gestalteter Fahrwerkstand in der Montagelinie entwickelt. Hier sollte gezeigt werden, dass Einstellvorgänge grundsätzlich automatisierbar sind. Dieser Fahrwerkstand wurde im Jahr 2002 in die Montagelinie des Kunden integriert und dient hier als Bewertungsvergleich (**Abbildung 41**).

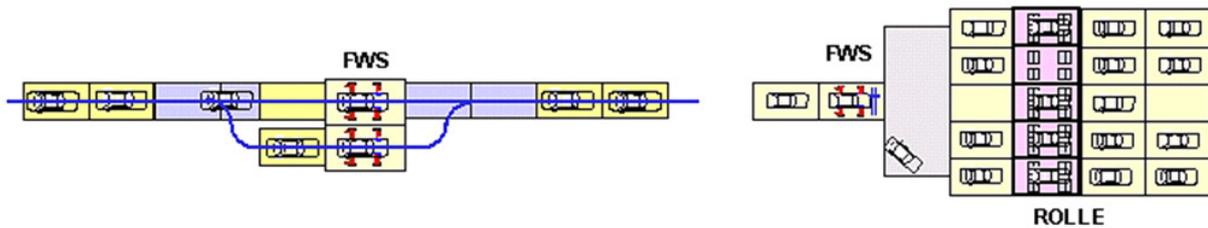


Abbildung 41 Schematische Darstellung des InLine Fahrwerkstands in Kombination mit klassischen Rollenprüfständen am Bandende

Zusätzlich zu den hier aufgeführten Varianten werden zwei verschiedene Taktzeiten in Bezug auf den gesamten InLine-Prüfprozess bewertet. Zum einen wird eine durchschnittliche Betrachtung auf Basis der Taktzeiten der großen deutschen OEM durchgeführt. Hier errechnet sich ein Wert von durchschnittlich 70 Sekunden pro Takt. Die oben dargestellten Varianten werden im Hinblick auf diesen Wert zusammengestellt. Da einige OEM in Bezug auf bestimmte Fahrzeugvarianten überdurchschnittlich lange Taktzeiten auf bestimmten Linien fahren, wird zur Vervollständigung der Studie eine zweite Taktzeitbetrachtung durchgeführt. Als Beispielprozess wird hier die etwa vierminütige Taktzeit eines großen deutschen OEM herangezogen. Bei dieser Betrachtung stellte sich heraus, dass die oben aufgeführten Varianten der Linienbesetzung für eine solch lange Taktzeit nicht sinnvoll sind. Aus dieser Erkenntnis heraus zeigt sich wiederum sehr deutlich, dass eine exakte Bewertung des InLine-Prüfkonzepts nicht allgemeingültig durchgeführt werden kann. Um hier detaillierte Aussagen treffen zu können, muss für jeden OEM, der an diesem Konzept interessiert ist, eine gesonderte Betrachtung, beispielsweise in Form einer Studie, durchgeführt werden. An dieser Stelle werden beispielhaft und speziell für lange Taktzeiten zwei weitere Varianten erarbeitet und bewertet, von der hier eine vorgestellt werden soll. Als Basis für die Bewertung wurde explizit der Prozess eines OEM herangezogen, um einen möglichst realitätsnahen Vergleichswert zu erzielen (**Abbildung 42**).

Abbildung 43 zeigt als Variante dazu den vergleichbaren InLine-Prüfprozess für lange Taktzeiten ab 240 Sekunden.

Basis: Konventionelles Bandende bei langer Taktzeit

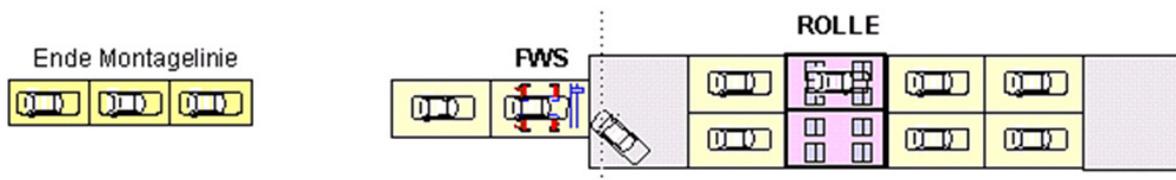


Abbildung 42 Schematisches Beispiel eines Prüf- und Einstellablaufs für lange Taktzeiten (ab 3,5 min) mit Fahrwerkeinstellstand (FWS) und Rollenprüfstand

Variante 4: Integriertes Bandende bei langer Taktzeit

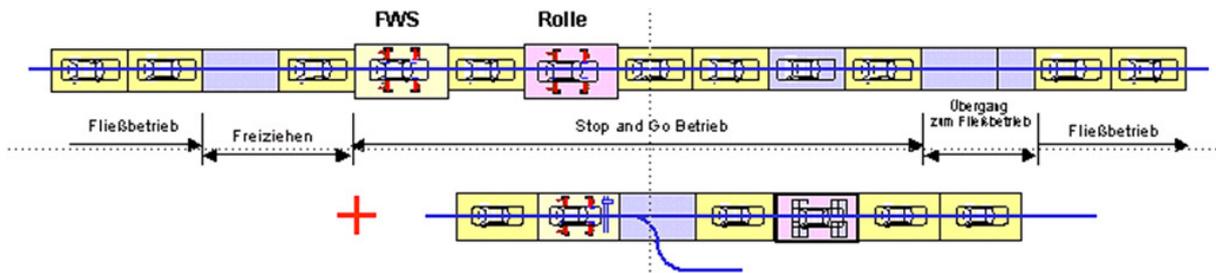


Abbildung 43 Schematische Darstellung des InLine-Konzepts für lange Taktzeiten (ab 3,5 min) mit klassischer Offline-Nacharbeitslinie

6.5.2. Durchführung der Studie und Ergebnis der Bewertung

Aus verständlichen Gründen ist es an dieser Stelle nicht möglich, die expliziten Zahlenwerte in Bezug auf Prüfstandskosten, Betriebskosten der OEM, Mitarbeiter- und Personalkosten usw. zu nennen. Es werden infolgedessen lediglich relative Bewertungsfaktoren angegeben, die sich, geordnet nach den beiden untersuchten Taktzyklen (70 Sekunden und > 210 Sekunden), jeweils an den beschriebenen Beispiellinien orientieren. Die Investitionen für die Anschaffung der für die Produktion relevanten Prüfstände und Fördertechniken etc., Personal und laufende Kosten (Energie etc.) für das „konventionelle Bandende“ werden dabei als Vergleichskriterium (100%) herangezogen.

6.5.2.1. Taktzeit 70 Sekunden

Variante 1: Bei konsequentem Einsatz der oben beschriebenen Variante 1 ergibt sich eine Gesamtersparnis von 7% in Bezug auf den ermittelten Durchschnitt der konventionellen Bandendestruktur. Bei dieser Variante wirkt der Invest aufgrund der hohen Anschaffungskosten für die Fördersysteme bei der Auffächerung auf vier „Prüflinien“ und die benötigten Prüfstände stark vermindernd auf die Wirtschaftlichkeit. An dieser Stelle wird der erwähnte Gewinn nur aufgrund der Betrachtung über 7 Jahre und der damit einhergehenden, hohen Ersparnis bzgl. Energie- und Werkerkosten erzielt. Die Rechnung wurde klassisch durchgeführt. Auftretende Verzinsungen des zu erwartenden Gewinns oder andere gewinnsteigernde Faktoren wurden dabei nicht berücksichtigt.

Variante 2: Diese Variante ist das als Optimum bezeichnete Szenario bei einer 70-sekündigen Taktzeit. Bei konsequentem Einsatz der Variante 2 errechnet sich eine Gesamtersparnis von 19% über den betrachteten Einsatzzeitraum. Hier sollte erwähnt werden, dass die Berechnung lediglich die

Bandendeprüfung in der Montagelinie bewertet und noch nicht das gesamte InLine-Konzept, welches im späteren Verlauf detailliert vorgestellt wird. Von dem integrierten und auf Ergonomie sowie Wirtschaftlichkeit hin optimierten Gesamtkonzept wird an dieser Stelle ein noch höheres Sparpotential erwartet.

Variante 3: Die bei dieser Studie außer Konkurrenz laufende Betrachtung auf Basis der singulären Fahrwerkseinstellung in der Montagelinie in Kombination mit einem herkömmlichen Rollenprüfstand als Bandendekontrolle erzielt rechnerisch einen Gewinn von 6% über die betrachtete Einsatzperiode.

6.5.2.2. *Taktzeit > 210 Sekunden*

Der Vergleichsprozess für die Variante 4 ist in diesem Falle die „konventionelle Bandendeführung mit langer Taktzeit“, die in der Variante 4 dargestellt ist. Diese wird auf 100% gesetzt. Bei Variante 5 wird aus oben beschriebenen Gründen der in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit optimale „Single-Line-Process“ in Kombination mit einer redundanten Prüflinie (z.B. für Nacharbeit bzw. für n.i.O. Fahrzeuge) abgebildet. Die InLine-Integration der Fahrwerkeinstellung und der Bandendeprüftechnik (InLine Function Tester) erreicht bei der betrachteten Einsatzperiode eine Ersparnis von 50% (klassisch). Bei Taktzeiten, die zwischen den betrachteten Perioden von 70 und 210 Sekunden liegen, wird also eine Wirtschaftlichkeitsoptimierung von über 20% bei der Integration des InLine-Bandendeprüfkonzepts erwartet.

Von dem nachfolgend vorgestellten, integrierten und auf Ergonomie sowie Wirtschaftlichkeit hin optimierten InLine-Gesamtkonzept wird an dieser Stelle ein noch höheres Sparpotential erwartet. Zum Abschluss dieser Arbeit liegen in Bezug auf das Gesamtkonzept noch keine Vergleichsdaten zu einer klassischen Linie vor.

6.6. Das durchgängige InLine Prüf- und Einstellkonzept

Aufbauend auf den zu Beginn des Kapitels beschriebenen, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten InLine Function Tester (IFT) wird im vorliegenden Abschnitt ein durchgängig integriertes InLine Prüf- und Einstellkonzept beschrieben. Unter Berücksichtigung der oben geführten Berechnungen und Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit ist ein solches Konzept die direkte, logische Schlussfolgerung und Weiterentwicklung hin zu einem optimierten Fahrzeugserienproduktionsprozess für die am Bandende durchzuführenden Aufgaben. Diese Aussage bezieht sich auf heutige Montage- und Produktionslinien sowie in besonderem Maße auf zukünftige Fahrzeuge.

Die klassischen Umfänge, also die Prüfungen und Einstellarbeiten am Bandende, wie sie in Kapitel 2 ausführlich erläutert werden, werden dabei nicht wesentlich verändert. Sie werden lediglich in den Linienfluss der Serienproduktion integriert. Dies geschieht, indem nahezu alle Prüf- und Einstellaufgaben, die an modernen Fahrzeugen durchgeführt werden müssen, in die Gehängeförderung (oder sonstige Fahrzeugtransportsysteme) eingebunden werden.

Bezogen auf moderne, auf mechatronischen Komponenten basierende Fahrzeugkonzepte und Funktionen sind bei einer zukünftigen Serienfertigung und einer damit in direktem Zusammenhang stehenden Fahrzeuggesamtprüfung weiterführende Prüf- und Einstellaspekte zu berücksichtigen. Diese machen eine herkömmliche Bandendeprüfung auf den beschriebenen Prüf- und Einstellständen sowie die beschriebenen Kalibrierarbeiten schwierig, wenig sinnvoll oder sogar unmöglich /51/. In jeder Hinsicht als optimal bezüglich der Kalibrierung zu bezeichnen wäre hier eine schnelle Einstellung aller Fahrerassistenzsysteme in einem vollautomatisierten Einstellstand direkt nach einem Laser-Fahrwerkstand.

Die korrekte Einstellung der Einzelsysteme kann dann als Systemzusammenschluss auf einem abschließenden Bandendeprüfstand überprüft werden. Dazu wird eine Prüfstands-Prüflings-Kommunikation zur vollkommen autonomen Steuerung des Fahrzeuges auf dem Prüfstand genutzt. Dazu wird idealer Weise eine Fördertechnik benötigt, die das Fahrzeug durchgängig über alle Prüfstationen hängend transportiert (**Abbildung 44** im nächsten Abschnitt). Das Fahrzeug der Zukunft kann also vollkommen autonom durch die gesamte Produktion bis hin zu abschließenden Einstell- und Prüfabläufen gefördert werden.

Die Prüf- und Einstellumfänge laufen dabei aus prozesstechnischer Sicht optimaler Weise ebenfalls vollständig autonom und ohne menschliche Einflüsse ab. Dies bietet neben der exakten Einhaltung der Taktzeiten in diesem Bereich als zusätzliches Potential große Vorteile in der Prozesssicherheit eines solchen Ablaufs. Es wird damit möglich, in drei klar voneinander trennbaren Schritten eine vollständige Einstellung und Prüfung des Fahrzeugs und dessen Systemen durchzuführen (Abbildung 44).

6.6.1. IWA - InLine Wheel Aligner

Fahrwerkseinstellungen in einem InLine-Fahrwerkstand. Durch die Vorteile der Verwendung einer Adapterscheibe können hier alle Einstellungen vollkommen autonom durchgeführt werden.

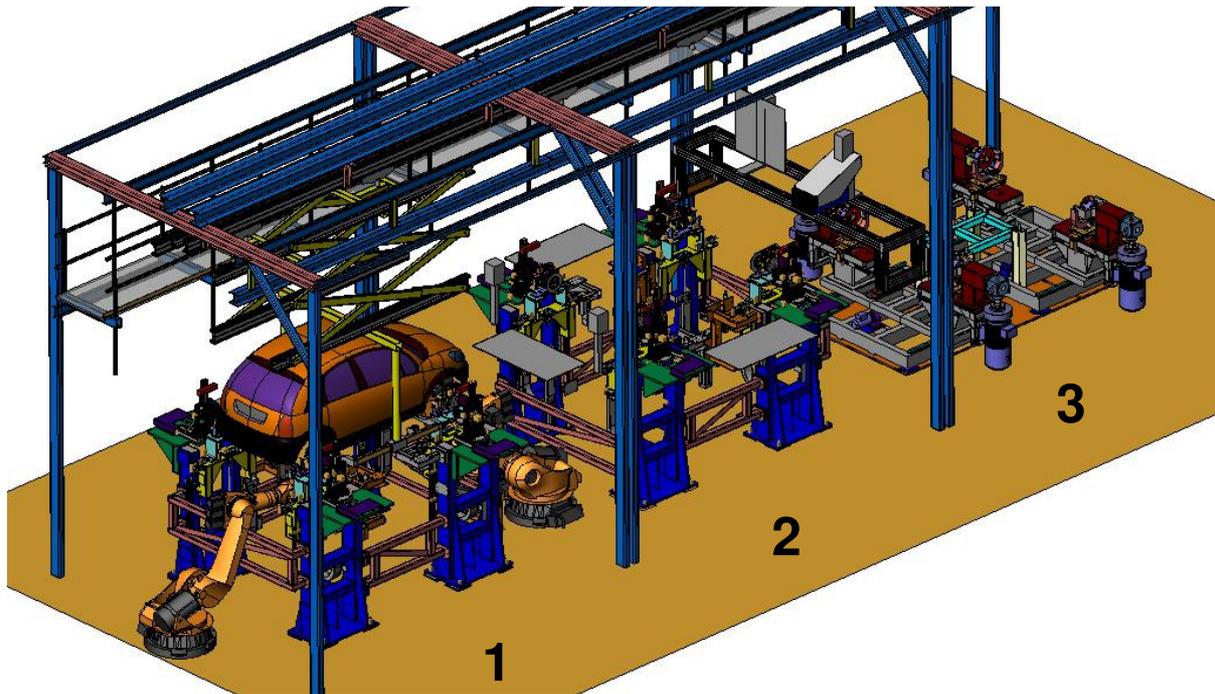


Abbildung 44 Gesamtheitliches InLine Einstell- und Prüfkonzept bestehend aus InLine Fahrwerkstand (1, links), InLine-Einstellungen von Fahrerassistenzsystemen (2, Mitte) und InLine Function Tester (3, rechts) im höhenveränderlichen Transportmodul FAST-plant®

Parallel dazu können als Variante zu dem hier vorgestellten Konzept erste Einstellungen von Fahrerassistenzsystemen, beispielsweise die Einstellung der Haupt- und / oder Nebelscheinwerfer, vorgenommen werden. Die Einstellung der Scheinwerfer bereits im IWA stellt eine kleine Abweichung vom klar gegliederten InLine-Konzept dar. Die Entscheidung über diese „Aufweichung“ ist in hohem Maße von der zur Verfügung stehenden Taktzeit abhängig und somit kundenspezifisch. Im IWA wird zudem die dynamische Fahrachse (Mittlung der beiden Spurwerte der Räder der Hinterachse) sowie der Dackellaufwinkel vermessen (→ Kapitel 2). Je exakter das Fahrzeug dabei im Stand positioniert wird, desto bessere Voraussetzungen bestehen für eine schnelle und präzise Einstellung.

Mit Hilfe exakt positionierender Absteckdorne kann das Fahrzeug über das Gehängesystem sorgfältig und in sehr kurzer Zeit positioniert werden. Dabei lassen diese speziell konstruierten Positionierungshilfen ebenfalls einen Freiheitsgrad des Fahrzeuges in z-Richtung zu. Dieser ist notwendig, damit das Fahrzeug durch sein Eigengewicht in die „eingefederte Lage“ zur realitätsnahen Einstellung des Fahrwerks gebracht werden kann. Das Gehängesystem selber wird dabei durch die Positionierdorne gehalten, also abgestützt.

6.6.2. IDAS - InLine Driver Assistant Systems Alignment Rig

Kalibrierung aller Fahrerassistenzsysteme (FAS – engl.: **D**river **A**ssistent **S**ystems, DAS) in einem InLine FAS-Einstellstand (**Abbildung 45**).

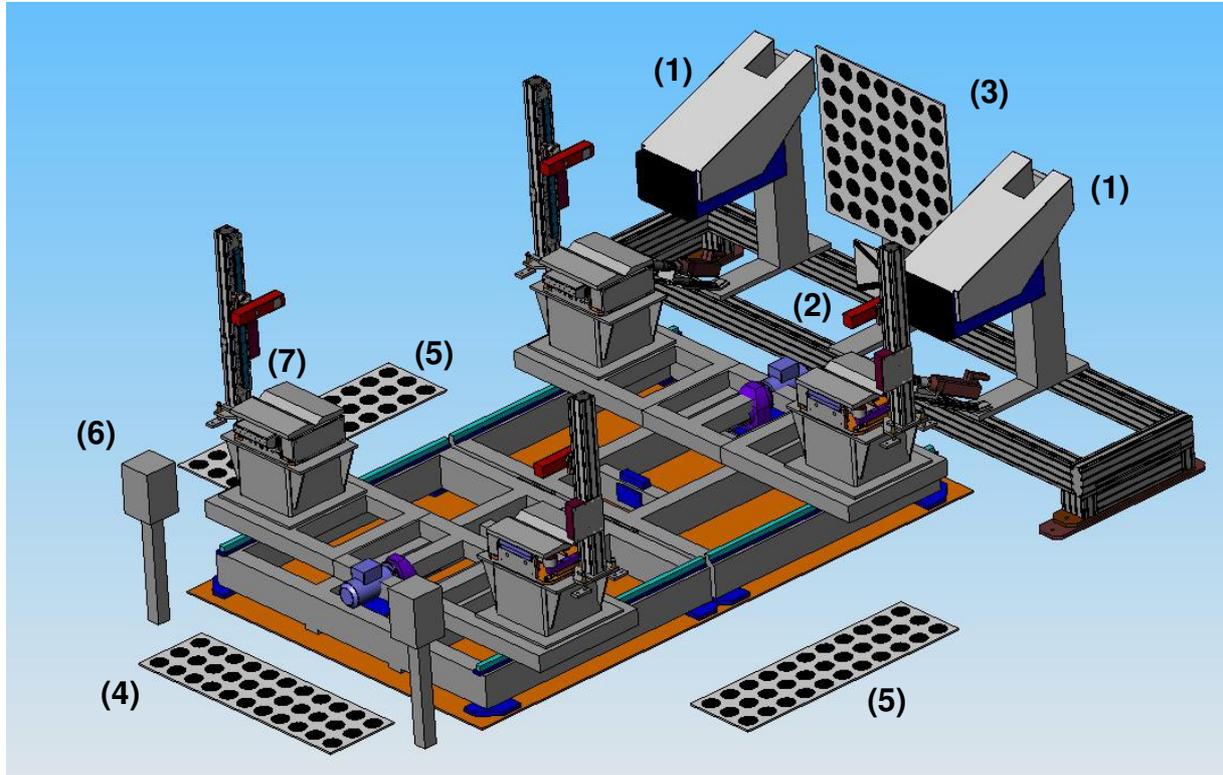


Abbildung 45 Darstellung des InLine Fahrerassistenzsysteme Mess- und Einstellstandes mit dem Elementen Lichtkasten (1) für Haupt- und Nebelscheinwerfer mit automatischen Einstellschrauben, mit Targets für ACC-Systeme und NightVision (2), mit Targets für kameragestützte Assistenzsysteme wie LDW (3), Rückfahrkameras (4) und in die Außenspiegel integrierte Kamerasysteme zur Rundumsicht (5) sowie radargestützte Dopplergeneratoren für Spurwechselassistenten (6). Deutlich zu erkennen sind zudem die Aufnahmeprismen (7) für die Adapterscheiben

Dazu müssen während der Kalibrierung dieser Systeme die einzelnen Signale bis zur Datenfusion vor der Entscheidungseinheit über eine prüforientierte Kommunikation überwacht werden. Das bedeutet, dass im ersten Schritt jedes Fahrerassistenzsystem, wie bereits beschrieben, im Prinzip singulär eingestellt wird. Das Einstellsignal wird dabei mit Hilfe der zur Einstellung benötigten Targets (Kalibrierziele → Kapitel 2) und Signale bis zu dessen Schnittstelle mit dem übergeordneten Fahrzeugsteuerungssystem verfolgt und gemessen. Stimmen die Signale in bestimmten Grenzen überein, ist das System entsprechend genau eingestellt. Dies setzt natürlich die exakte Positionierung des Fahrzeuges im IDAS (Inline **D**river **A**ssistent **S**ystems Einstellstand) sowie die Kenntnis der zuvor im IWA gewonnenen Informationen bzgl. der dynamischen Fahrachse voraus. Diese Daten werden dem IDAS übermittelt.

Als einer der Vorteile dieser Kommunikation zwischen den beiden InLine Ständen IDAS und IWA kann genannt werden, dass im IDAS lediglich eine erneute Vermessung der Karosserielage durchgeführt werden muss. Dazu sind lediglich vier Höhenstandslaser zur Anmessung der Position der Radhausoberkanten notwendig. Befindet sich das Fahrzeug in einem in der Transporthöhe anpassbaren Hängefördersystem, so können „Kalibriertargets“ und andere benötigte Komponenten zum Einstellen von FAS-Systemen bodengeführt optimal zur Position des Fahrzeugs ausgestaltet werden. Beispielsweise würden heute auf dem Hallenboden anzubringende Kalibrierplatten zur Kalibrierung von kameraunterstützten „Rear-View-Systemen“ nicht mehr durch das Fahrzeug „überfahren“ werden und könnten somit weniger kostenintensiv gestaltet werden. Andere Targets müssten nicht mehr in den Prüfstand „eingeschwenkt“ werden.

6.6.3. IFT - InLine Function Tester

Die Überprüfung der korrekten Funktion des Gesamtsystems findet auf dem beschriebenen InLine-Prüfstand in Zusammenhang mit den üblichen Fahrprüfungen wie Bremsentests sowie Schalt- und Fahrprüfungen statt. Auch hier ist eine umfangreiche Kommunikation zwischen Prüfstand und Fahrzeug zur Beaufschlagung moderner Sicherheits- und Assistenzsysteme mit simulierten Daten aus dem Prüfablauf notwendig.

Zukünftige Prüfabläufe ähneln somit einer simulierten Prüffahrt durch eine virtuelle Umgebung. Auf dem Anlagenrechner (oder aber im Steuergerät des Fahrzeuges selber, welches dazu jedoch zuvor in einen Prüfmodus versetzt werden müsste) läuft dazu ein Fahrzeugmodell und weitere notwendige Simulationen, welche dem Fahrzeug im Prüfstand parallel zu den Prüfstimulationen ein reales Umfeld „suggerieren“.

Dies ist notwendig, da, wie bereits erwähnt, im Prüfstand selber keine reale Gierwinkelgeschwindigkeit und Querschleunigung erzeugt werden können. Weiterhin kann so für die Kamera- und Radarsensoren des Fahrzeugs ein reales Umfeld, beispielsweise einer oder mehrere andere Verkehrsteilnehmer, generiert werden, um die korrekte Funktion von auf Umfelderkennungssensorik basierenden prädiktiv-aktiven Sicherheits- und Assistenzsystemen zu überprüfen. Aufgrund der Reaktionen des Fahrzeuges in Bremsen- und Lenkungseingriff und der Möglichkeit, diese Reaktionen auf dem Prüfstand exakt zu vermessen und auszuwerten, ist es nun möglich, das gesamtfahrzeugübergreifende Bewegungs- und Reaktionssystem sowie die korrekte Einstellung des Fahrwerkes und aller FAS-Systeme abschließend und gesamtheitlich zu überprüfen.

Nach den Prüfungen im IFT können, dem Gedanken des Linienflusses und des Transportes in einem höhenveränderlichen Gehängeförderer weiter folgend, optimal Sicht- und Montagearbeiten an dem auf die geeigneter Arbeitshöhe einstellbaren, „heißen“ Fahrzeug durchgeführt werden. Hier ist es dann im Vergleich zur klassischen Prüflinie nicht mehr notwendig, lange Gruben in den Hallenboden einzuziehen und sehr aufwendige Untergrundlogistik unter dem Hallenboden zu betreiben, um die zu montierenden Teile in der Grube zu verwalten. Einige OEM betreiben gerade an dieser Stelle aufwendige Untergrundlogistik zur Kommissionierung der bis zu 15 m langen Gruben im Hallenboden. Hier werden mit Hilfe unterirdischer Roboter- und Transportsysteme Unterbodenverkleidungen sowie anderes Material bereitgestellt und kommissioniert. Ein Entfall dieser Gruben und der damit in Verbindung stehenden Aufwendungen würde enorme Kosten einsparen. Das Fahrzeug wird mittels des Gehängeförderers einfach in die optimale Arbeitsposition gehoben. Dies spart weitere Kosten sowie Aufwand und Zeit.

Über den gesamten Prüf- und Einstellablauf kann weiterhin mittels geeigneter Fahrzeug-Prüfstand-Kommunikation nahezu taktzeitneutral eine Elektronikprüfung der Steuergeräte der Sub-Aggregate des Fahrzeuges erfolgen, das das Fahrzeug die gesamte Zeit direkten Kontakt zu den Prüfständen bzw. zum Gehängeförderer hat. Diese Prüfung kann exakt so ablaufen, wie sie heute bereits durchgeführt wird (z.B. ECOS-Testumfänge).

Um alle Prüf- und Einstellvorgänge wie beschrieben ohne Einfluss von Außen ablaufen lassen zu können, muss das Fahrzeug automatisch durch die Prüfstraße geführt werden und an jeder Prüf- und Einstellstation ebenfalls automatisch mit dem jeweiligen Stand verbunden werden. Das Führen des Fahrzeuges durch die einzelnen Prüf- und Einstellstände wird komplett vom FASplant[®] Gehängeförderer übernommen.

Um eine schnelle, einfache und exakte Adaption des Prüflings in allen drei Ständen zu gewährleisten, wird in einem dem InLine Wheel Aligner vorgelagerten Takt eine speziell konstruierte Adapterscheibe (**Abbildung 46**, rechts) über die vorhandene Radverschraubung direkt an die Radflansche des Fahrzeuges geschraubt. Die Adapterscheibe fungiert während des Prüf- und Einstellablaufes quasi anstelle der Räder und Reifen, hat aber im Gegensatz zu diesen einige Vorteile für den Prüfablauf, die im Folgenden näher diskutiert werden.

Diese Montagearbeiten können wahlweise von einem Werker, einem Roboter oder auch halbautomatisch mit Hilfe von Handlinggeräten und Automatikschraubern umgesetzt werden. In dieser „Aufrüststation“ vor dem IWA wird ebenfalls ein Abgaschlauch an den Auspuff des Prüflings adaptiert sowie, nach bisherigem Stand der Technik üblich, eine Lenkradwaage in das Fahrzeug eingelegt.

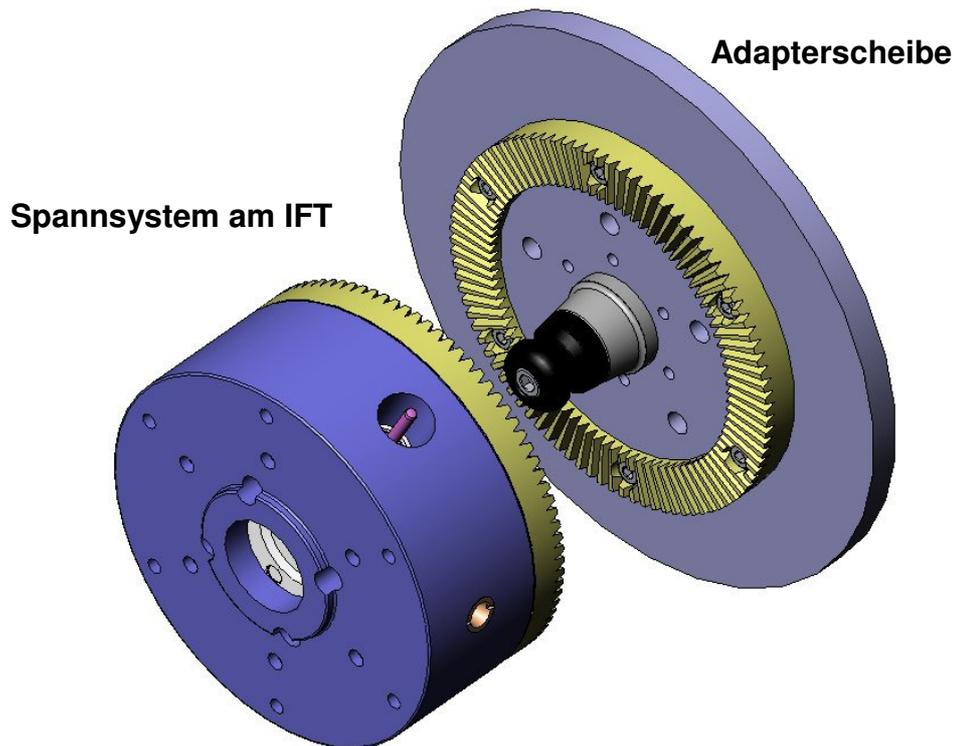


Abbildung 46 Nullpunktspanner (links) und speziell konstruierte Adapterscheibe (rechts) zur schnellen, effektiven und sicheren Verbindung des Fahrzeuges mit den InLine Prüf- und Einstellständen während der Prüfung

Die Lenkradwaage wird in einem klassischen Fahrwerkstand sowie auch hier im IWA in der InLine-Einstellung für „klassische Fahrzeugtypen“ benötigt, um eine exakte Fahrwerkseinstellung bei gerade stehendem Lenkrad zu gewährleisten. Weiterhin erfolgt der Erststart des Fahrzeuges, da dieser eine gewisse Zeit vor der Durchführung der dynamischen Prüfumfänge liegen muss. Der Fahrzeugmotor muss also einige Minuten im Leerlauf betrieben werden, um gewisse automatisch ablaufende Einstellumfänge der Motorsteuergeräte möglich zu machen. Ebenfalls wird der sog. OBD II Stecker an das Fahrzeug adaptiert, um die Kommunikation zwischen Fahrzeug und den Prüfständen zu gewährleisten.

Diese Adapterscheibe hat drei Aufgaben:

1. Sie dient der automatischen Adaption des Prüflings an die Prüf- und Einstellstände (IWA, IDAS, IFT)
2. Sie überträgt die notwendigen Drehmomente und Drehzahlen, vor allem im InLine Function Tester
3. Sie dient als ideale Messfläche für die Lasersysteme im InLine Fahrwerkstand (IWA) und im InLine Fahrerassistenzsysteme-Einstellstand (IDAS)

Im IWA und im IDAS wird das Fahrzeug vom Gehängeförderer auf die Adapterscheiben in spezielle Aufnahmeprismen (Abbildung 45, (7)) abgestellt, die auf Schwimmpfannen montiert sind. Damit steht das Fahrzeug auf optimale Weise kräftefrei im Stand. Die Differenz zwischen den Durchmessern der Adapterscheibe und der anschließend am Fahrzeug montierten Rädern kann rechnerisch leicht ausgeglichen werden.

Auf dieser Adapterscheibe kann im IWA eine exakt bearbeitete Messfläche von einem System aus drei Punktlasern (ähnlich wie beim Laserfahrwerkstand die Räder des Fahrzeuges → Kapitel 2) abgetastet werden. Die spezielle Oberfläche des Adapters bietet jedoch im Vergleich zu der im klassischen FWS mit drei Zeilenlasern angemessenen Radflanke den Vorteil, dass die aus Spur und Sturz gebildete Ebene im Raum¹³ durch drei Punktlaser schneller und weniger aufwendig bestimmt werden kann. Dadurch können die genauen Spur- und Sturzwerte jeder Adapterscheibe und somit jedes Rades erfasst werden, und das wesentlich einfacher als am Rad selber. Eine Umschlagsmessung, also das Drehen des Rades auf dem Fahrwerksstand mit Hilfe spezieller Trommelmotoren (→ Kapitel 2) zur Ermittlung der Rundlaufungenauigkeiten der Reifenflanke, so genannte Planschlagmessungen, sind somit unter bestimmten Bedingungen nicht mehr notwendig. Dies spart weitere Taktzeit.

Im IDAS dient die Adapterscheibe lediglich der Aufnahme des Fahrzeuges in den Stand und über die Prismen der kräftefreien Aufstellung.

Im InLine Function Tester kommt der Adapterscheibe jedoch eine ganz besondere Bedeutung zu. Sie dient zum einen der Aufnahme in den Stand, also der Adaption des Fahrzeuges, zum anderen findet sie in idealer Weise zur schlupffreien Übertragung von Drehmomenten und Drehzahlen Verwendung (weitere Vorteile der Adapterscheibe, z.B. in Bezug auf dynamische Prüfumfänge und die Verwendung von Winterreifen etc. sind bereits erläutert worden). Um dies prozesssicher zu gewährleisten ist die Adapterscheibe, wie in Abbildung 46 klar erkennbar, mit einer Stirnverzahnung an der Frontseite versehen.

Diese Verzahnung greift bei der Adaption in einen identischen Gegenpart am Spannadapter (Nullpunktspanner, Abbildung 46, links) des IFT. Die Adapterscheibe wird über einen speziellen Adaptionspin über ein Zentrierspannsystem, welches an den Adaptionseinheiten des IFT integriert ist, mit dem Prüfstand verbunden. Der exakte Aufbau des Spannsystems sowie der genaue Vorgang der Adaption werden gesondert im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

¹³ Zur Vertiefung dieser Thematik steht diverse Fachliteratur zur Verfügung, beispielsweise /16/.

Nach abgeschlossener Prüfung und Einstellung wird die Adapterscheibe in einem einzigen nachgeschalteten Takt durch das Rad ersetzt. Diese Aufgabe kann ebenfalls durch einen Roboter taktzeitneutral erfüllt werden, nachdem oder während durch einen Werker nach der so genannte „Heissprüfung“ des Fahrzeuges notwendige Unterbodensichtkontrollen durchgeführt oder Unterbodenverkleidungen montiert werden. Dies geschieht dann sinnvoller Weise noch im Hängetransportsystem, also in der Montagelinie selber.

Der gesamte, beschriebene Ablauf ist in **Abbildung 47** skizzenhaft dargestellt.

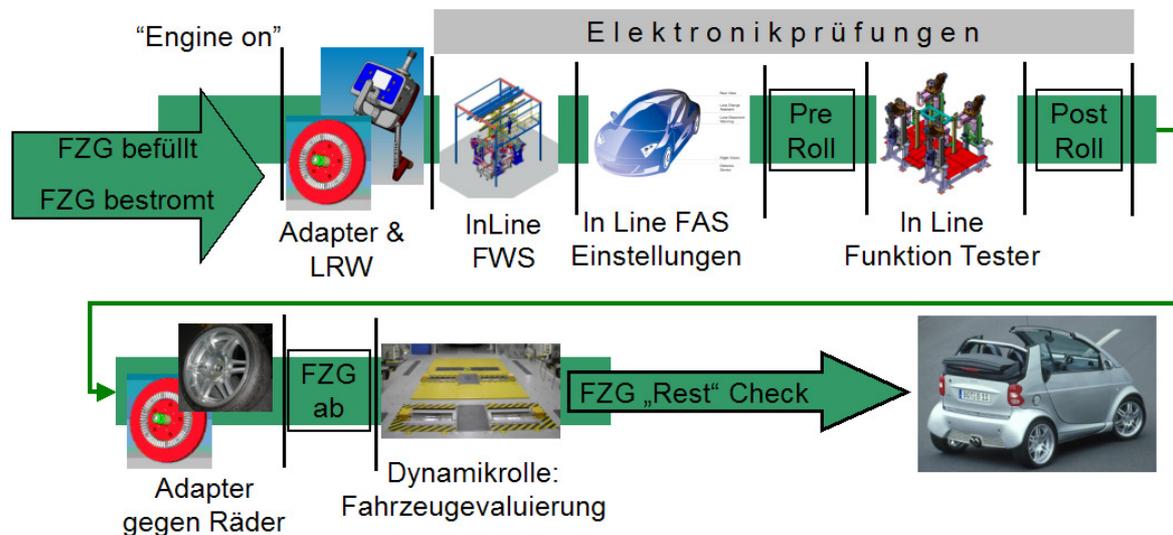


Abbildung 47 Skizzenhafte Darstellung des Einstell- und Prüfablaufes bei konsequenter Umsetzung des integrierten InLine-Gesamtkonzepts

Die von vielen Automobilherstellern bereits heute angestrebte (Voll-) Automatisierung von Prüfumfängen rund um die Bandendepfung aktueller Fahrzeuggenerationen kann mit diesem gesamtheitlichen InLine-Konzept wirkungsvoll und nachhaltig Rechnung getragen werden. Neben dem somit geschaffenen Vorteil eines geordneten, hoch strukturierten und zeitoptimierten Prüf- und Einstellprozess kommen weitere Vorteile bezüglich der Prozessgestaltung hinzu, wie oben diskutiert wurde.

6.7. Ein vollautomatisierbares InLine-Adaptionskonzept

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, wird eine universelle Adapterscheibe mit Hilfe der Radverschraubung anstelle der Räder an die Radflansche des Fahrzeuges befestigt, um alle Prüf- und Einstellvorgänge automatisiert, also ohne Einfluss von Außen, ablaufen lassen zu können. Die Adapterscheibe dient der prozesssicheren Prüflingsadaption in jedem der drei beschriebenen InLine Prüf- und Einstellstände. Das Führen des Fahrzeuges durch die einzelnen Prüf- und Einstellstände

wird dabei von einem Gehängeförderer oder einem anderen Fördersystem übernommen. Um eine schnelle, einfache und exakte Adaption des Prüflings in allen drei Ständen (IWA, IDAS und IFT) zu gewährleisten, wird in einem dem InLine Wheel Aligner vorgelagerten Takt eine speziell konstruierte Adapterscheibe über die vorhandene Radverschraubung direkt an die Radflansche des Fahrzeuges geschraubt.

Hier gelten besondere Anforderungen an die Adaption. Im IFT müssen hohe Drehzahlen sowie große Drehmomente über die Adaption übertragen werden, ohne diese auf Dauer zu beschädigen oder zu zerstören. Die Adaption muss zudem sehr schnell erfolgen und leicht wieder lösbar sein. Des Weiteren muss der Vorgang automatisiert ablaufen. Auf die im Gegensatz dazu als trivial zu bezeichnende Anforderung der Adaption an den anderen beiden Ständen wird nicht weiter eingegangen.

Im Rahmen der Entwicklung des Adaptionskonzeptes am IFT wurden verschiedene Adaptionsverfahren betrachtet und bewertet. Das im Folgenden näher beschriebene Konzept, wurde aufgrund eines quantitativen Bewertungsverfahrens, welches auf das vorliegende Problem zugeschnitten wurde /52/, weiterverfolgt. Im Folgenden werden der Entwurf beziehungsweise die einzelnen Baugruppen dieses Konzeptes erläutert. **Abbildung 48** zeigt die fertige Adaptionseinheit im eingebauten Zustand.

Eine der zentralen Herausforderungen ist die Übertragung von hohen Drehzahlen bis zu 2500 Umdr./min und großen Drehmomenten bis zu 1700Nm durch die Adaptionseinheit. Um diese Anforderungen wirtschaftlich und unter taktzeittechnischen Kriterien schnell genug zu erfüllen, bietet sich ein offener Formschluss an. Aus diesem Grund werden Stirnverzahnungen eingesetzt. Stirnverzahnungen werden beispielsweise in Fräsmaschinen verwendet und sind somit für hohe Drehzahlen- und Drehmomentübertragungen ausgelegt. Dabei handelt es sich immer um eine zweiteilige Verzahnung, die mit Hilfe der Adaptionstechnik zusammengeführt wird. Somit ist neben der eigentlichen Drehmomentenübertragung durch die Antriebstechnik (z.B. beim Beschleunigen oder beim Bremsen des Prüflings auf dem Prüfstand) auch die Aufnahme des Fahrzeuggewichts über diese Verzahnung gewährleistet.

Die Fahrzeuggewichtskraft wirkt als senkrechte Tangentialkraft auf die Verzahnung und begünstigt somit ein Auseinanderdrücken der beiden Hälften der Verzahnung bereits im statischen Zustand. Dieser Einfluss muss ebenfalls berücksichtigt werden, da das Fahrzeug mit seinem gesamten Eigengewicht in den Adaptionseinheiten des IFT aufgenommen wird. Sowohl das im dynamischen Fall aufgebaute Drehmoment als auch die Haltekräfte für das Fahrzeug bedingen eine Querkraft auf die einzelnen Zahnflanken der Verzahnung. Die Stirnverzahnung hat neben der Fähigkeit der Übertragung hoher Drehzahlen und Drehmomente auch den Vorteil, dass sie als

selbstzentrierendes Bauteil während des Adaptionprozesses die Mittigkeit von Adapter und Überträgerkranz sicherstellt.

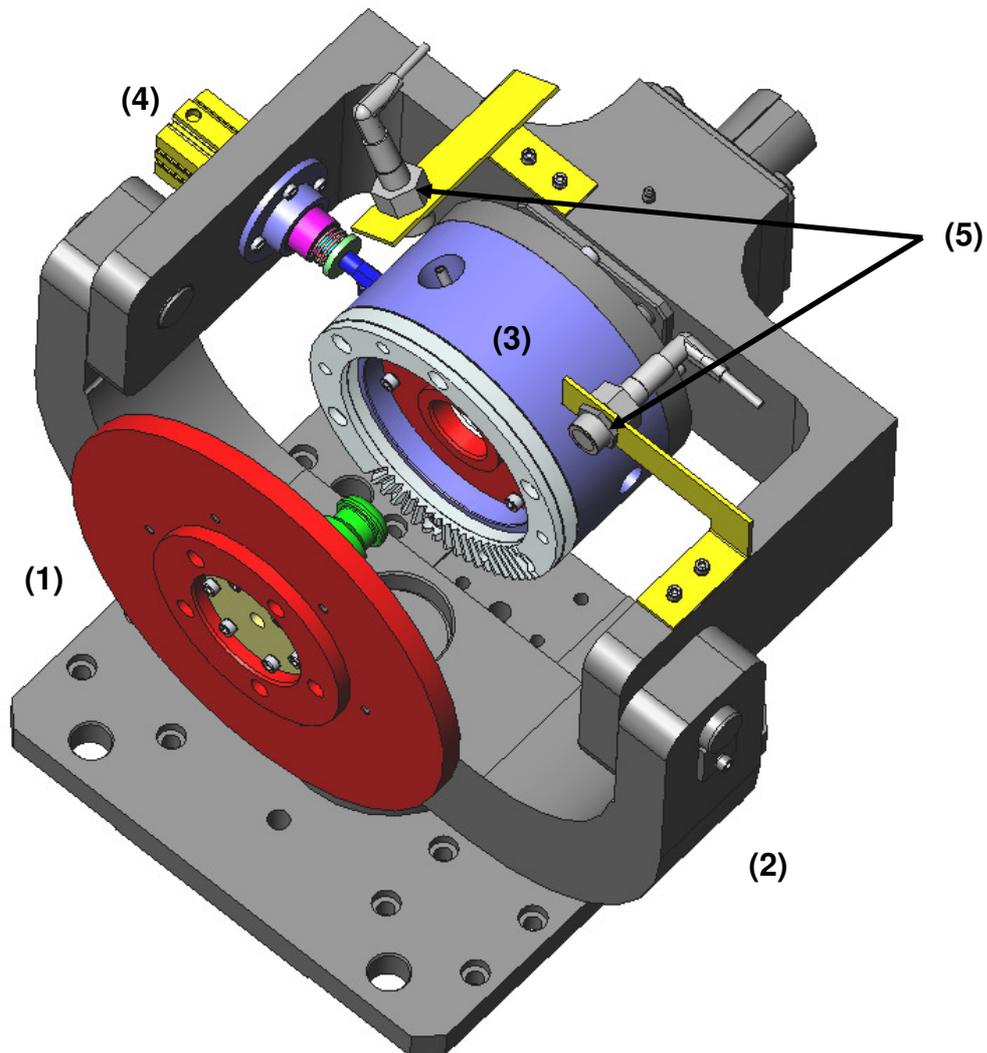


Abbildung 48 Die Baugruppen für die automatische Adaption zwischen Fahrzeug und InLine Function Tester: Radadapter / Adapterscheibe (1), das auf der Lenkeinheit (2) angebrachte Gegenstück (3) mit integrierter, selbstzentrierender Spannvorrichtung (Nullpunktspanner) und Hirth Stirnverzahnung (hier nur angedeutet), eine automatische Druckluftzufuhreinheit (4) sowie eine elektronische Abfragemöglichkeit (5) für vollständige Adaption

Nun muss die Stirnverzahnung aber nicht nur prozesssicher zusammengeführt werden. Sie muss während der Prüfung vor allem axial spielfrei gehalten werden. Sie darf sich also nicht während der Übertragung höherer Drehmomente gegen die Steigung der Zahnflanken auseinander drücken. Auch dann nicht, wenn beim Richtungswechsel der antreibenden Kräfte, beispielsweise bei einem ABS- oder ESP-Test, extreme Drehwinkelbeschleunigungen unter hohen Drehmomenten vorherrschen. Um die Haltekraft zur Vermeidung des „Auseinanderdrückens“ der Stirnverzahnungen aufzubringen, wird ein spezieller Nullpunktspannmechanismus eingesetzt (**Abbildung 49**).

Der im folgenden Abschnitt genauer beschriebene Nullpunktspanner wird mittels Pressluft geöffnet und schließt automatisch bei Entnahme der Pressluft. Um den Nullpunktspanner unter vollautomatischen Bedingungen einsetzen zu können ist also die Druckluftzufuhr zum Öffnen und Schließen unabdingbar.

6.7.1. Der Nullpunktspanner

Der in Abbildung 49 dargestellte Nullpunktspanner wird an die Adaptionseinheit montiert. Über die Bohrungen des Nullpunktspanners wird dieser in das Gehäuse geschraubt, welches ebenfalls eine Seite der Stirnverzahnung aufnimmt und als Drehmomentüberträger fungiert. Ein Vorteil des Nullpunktspanners ist der als Gegenstück einzusetzende, konisch ausgeführte Pin (in Abbildung 46 an der Adapterscheibe dargestellt). Sein „Findefenster“ zum Nullpunktspanner ist erheblich größer als das der beiden selbstzentrierenden Stirnverzahnungen, die lediglich eine kleine Toleranz (3 - 4 mm) beim Zusammenführen der beiden Teilverzahnungen zulassen. Somit kann die Vorzentrierung von Greifeinheit und Radadapter erleichtert werden, da diese nicht hochgenau auszuführen ist. Ferner ist der Nullpunktspanner in der Lage, einen Anpressdruck für die beiden Verzahnungen zu erzeugen. Beim Schließen des Nullpunktspanners wird der darin befindliche Pin nicht nur formschlüssig gehalten, sondern er wird durch die speziell geformten Querschieber weiter in den Spanner eingezogen (1 mm), der somit vorgespannt wird. Diese Querschieber fungieren parallel als Halte- und Klemmvorrichtung und garantiert eine formschlüssige Verbindung der Stirnverzahnung auch unter Belastung. Über diese Klemmkraft kann also die Anforderung der schlupffreien Drehmomentübertragung gesichert werden.

Der in Abbildung 46 dargestellte Pin und ebenfalls eine Stirnverzahnung werden quasi fahrzeugseitig an den Radadapter (die Adapterscheibe) angebracht. Beim Koppeln von Adaptionseinheit und Radadapter wird nun zuerst der Pin in den Nullpunktspanner eingeführt. Geringfügig später greift dann die Stirnverzahnung ineinander ein. Somit wird eine drehmomentstabile und formschlüssige Verbindung hergestellt. Beim Einrasten wird der Pin im Nullpunktspanner formschlüssig aufgenommen und kann so Zugkräfte bis 50.000 N aufnehmen.

Der Nullpunktspanner arbeitet mit einer Kombination aus einem pneumatischen und einem auf Tellerfedern beruhenden, gekoppelten Spannsystem. Dieser Spannmechanismus zieht die beiden Hälften der Verzahnung im adaptierten Zustand zusammen. Durch die Kombination aus Verzahnung und Nullpunktspanner ist es somit möglich, durch einfaches (pneumatisch oder elektromotorisch) Andrücken der Greifeinheit an den Radadapter eine prozesssichere Kopplung zu erzeugen.

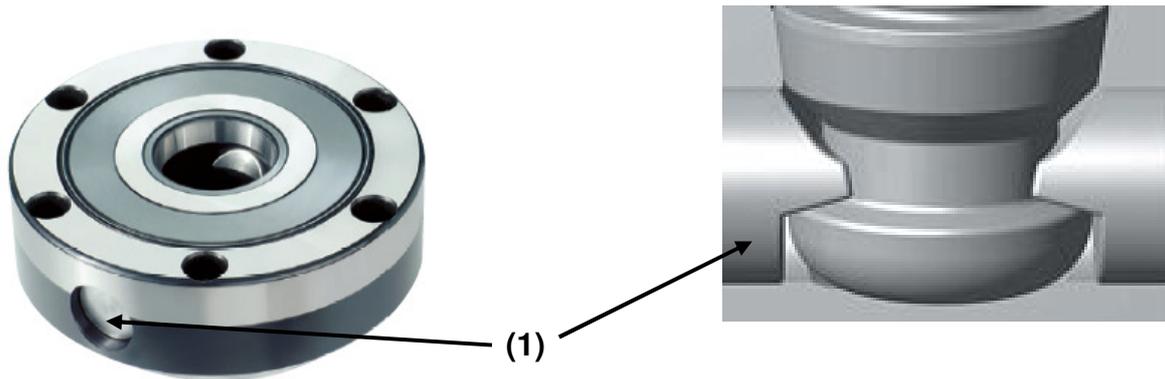


Abbildung 49 Nullpunktspanner (links) und Detail Pin (rechts) in gespanntem Zustand /52/

Der Pin wird über eine zentrale Schraube und über ein Distanzstück mit der Adapterplatte verbunden (**Abbildung 50**, im nächsten Abschnitt). Wenn der Nullpunktspanner mit dem Pin im Eingriff ist, zieht dieser mit einer Axialkraft von 10.000 N am Pin und der mit ihm verbundenen Schraube. Wird nun über den Radadapter beziehungsweise über die Stirnverzahnung ein Moment eingeleitet, beispielsweise bei einem Bremstest des Fahrzeuges auf dem Prüfstand, so drücken sich die beiden Stirnverzahnungen gegen die Zahnschrägen der Verzahnung (Zahnsteigung 30°) auseinander.

Es entsteht eine weitere Axialkraft, die entlang der Einzugskraft wirkt. Diese Kraft kann zum einen durch eingeleitete Prüfmomente und zum anderen bedingt durch das Fahrzeuggewicht bis zu 25.000 N betragen. Daher muss eine spezielle Schraube verwendet werden, die einer Zugbelastung von insgesamt mindestens 35.000 N auf Dauer stand hält, also Dauerfest ist.

Die Einzugskraft bewirkt also den Anpressdruck der beiden Verzahnungen. Wirkt nun die aus Drehmomenten und Querkräften entstehende Axialkraft, wird dieser Anpressdruck geringer. Ab dem Zeitpunkt des Überschreitens der Einzugskraft wird die Schraube als schwächstes Glied so verformt, dass sich dies als Spiel zwischen den Zahnrädern auswirkt. Die Vorspannkraft der Schraube spielt hierbei keine wesentliche Rolle. Dies beruht auf der anfänglich linearen Kennlinie der Schraube (σ - ϵ -Diagramm), so dass eine zusätzliche Vorspannung zu gleichen Längenänderungen führen würde. Diese Längenänderung darf 0,1 mm nicht überschreiten, da sonst beim Umschlag der Momente (Wechselbelastung, wie beispielsweise beim ABS-Test) eine zu starke Abnutzung der Stirnverzahnung die Folge wäre /56/.

6.7.2. Das Gehäuse um den Nullpunktspanner

Das in Abbildung 50 dargestellte Gehäuse nimmt die Stirnverzahnung, den Nullpunktspanner und den Luftzufuhradapter auf. Die Konstruktion eines Gehäuses, auf das die Stirnverzahnung montiert und in welches der Nullpunktspanner eingesetzt wird, ist notwendig, um die auftretenden Drehmomente nicht durch den Nullpunktspanner zu leiten. Die hohe Belastung wäre einem solchen Präzisionsteil nicht zuträglich.

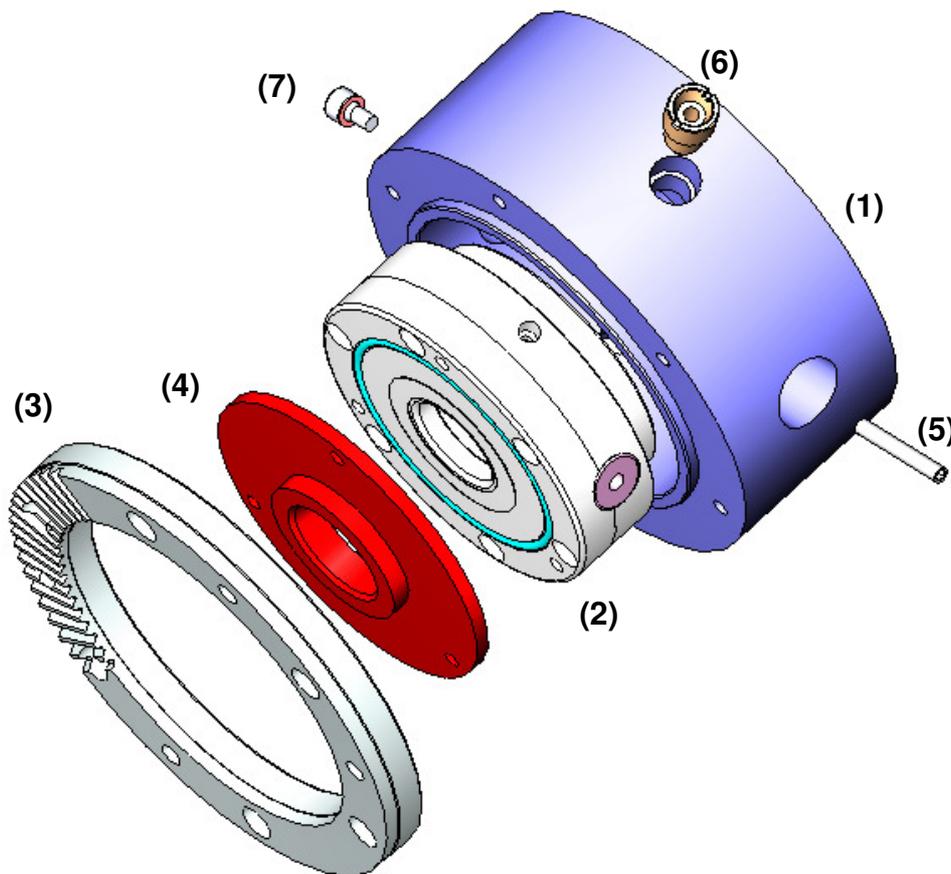


Abbildung 50 Explosionszeichnung des Gehäuses, welches ständig an der Adaptereinheit des IFT befestigt ist und der aufgenommenen Komponenten: Gehäuse (1), Nullpunktspanner (2), Gegenstück des Zahnkranzes (3) und Deckel (4) sowie weitere Anbauteile wie eine Schalfahne (5) zur Abfrage der Winkellage, die Aufnahme für den Pressluftadapter (6) und die Ausgleichsschraube (7) als Wuchtmasse

Das Gehäuse dient jedoch nicht nur der Aufnahme des Nullpunktspanners und der Drehmomentenübertragung. Aus Gründen der Prozesssicherheit ist eine Adaptionskontrolle in der Praxis absolut notwendig. Eine Kontrolle, ob die Verbindung zwischen Adapterscheibe (also Prüfling) und Prüfstand tatsächlich hergestellt wurde, wird daher über einen Initiator realisiert, der über das Sichtfenster die Stellung des Querschiebers des Nullpunktspanners abfragen kann. Zum Öffnen der Querschieber wird Druckluft benötigt um die Bolzen zu bewegen. Zu diesem Zweck verfügt der

Nullpunktspanner weiterhin über einen Pneumatikanschluss, der ebenfalls wie die Sichtfenster der Querschieber von Außen sichtbar am Umfang angeordnet ist und durch das Gehäuse zugänglich sein muss. Der Luftzufuhradapter stellt die Schnittstelle zwischen Luftzufuhreinheit und Nullpunktspanner dar. Eine Schraube wird in den zweiten Querschieber des Koppelteils geschraubt und gleicht durch ihr Eigengewicht und durch Verwendung von zusätzlichen Unterlegscheiben die vorhandene Unwucht aus. Der Deckel, welcher auf den Nullpunktspanner geschraubt wird, besitzt eine konische Bohrung, welche die Toleranz zum Einführen des Pins in den Nullpunktspanner (also das Findefenster) weiter vergrößert. Bei einem durch Positionsdifferenzen vorliegenden Axialversatz von Radadapter und Adaptionseinheit des IFT, wird das Fahrzeug bei der Adaptionbewegung also über den voreilenden Pin zentriert und ausgerichtet. Somit wird ein hochgenauer Rundlauf erreicht.

Um die Druckluftzufuhr und die Abfragemöglichkeit zu gewährleisten, muss der Nullpunktspanner bzw. das Gehäuse jedoch in einer definierten Stellung angehalten werden. Dazu wird ebenfalls am Gehäuse des Nullpunktspanners eine stählerne Markierung angeordnet (Schaltfahne), die von einem Initiator erkannt werden kann.

Ein weiterer Vorteil des konstruierten Gehäuses ist also die Möglichkeit einer einfachen elektronischen Abfrage des Koppelzustandes durch Einsatz von Näherungsschaltern an der Peripherie des Spannsystems. Eine komplizierte Integration von Adaptionssensorik ist somit nicht erforderlich. Die metallenen Querschieber, die sichtbar am Umfang des Gehäuses angeordnet sind, eignen sich im Besonderen zur Abfrage mittels externer Initiatoren (Näherungsschalter). Ein weiterer Initiator zur Sicherstellung der durchgeführten Adaption wird zur Spaltkontrolle zwischen Radadapter und Greifeinheit eingesetzt (Punkt (5) in Abbildung 48, oben). Er signalisiert, wenn die beiden Hälften der Stirnverzahnung so weit angenähert sind, dass die Adaption, also das Schließen des Spannsystems, fehlerfrei durchgeführt werden kann.

Parallel zum Einfördern des Fahrzeugs in den Prüfstand (also ohne Taktzeitverlust) kann zuvor durch Drehung der Adaptionseinheit mit Hilfe der Antriebstechnik die Position der Markierung gefunden und angefahren werden. Des Weiteren können über einen eingebauten Drehwinkelgeber am Motor zuvor „gemerkte“ Winkelstellungen exakt ($\pm 0,5^\circ$) angefahren werden. Die Schaltfahne ist demnach ein redundantes System, welches aber zum Erlangen einer sehr hohen Prozesssicherheit notwendig ist. Als Schaltfahne des Initiators dient ein einfacher Bolzen, der mit einem Querschieber des Nullpunktspanners verbunden ist. Neben der Positionsabfrage ist die Zufuhr von Druckluft eine weitere Herausforderung bei schnell drehenden Systemen. Zu diesem Zweck musste eine Zusatzeinrichtung konstruiert werden, die zwar Luft zuführt, die jedoch von den Drehbewegungen der übrigen Bauteile entkoppelt ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Druckluftversorgung mit Hilfe einer mitro-

tierenden Ringkopplung, wie sie beispielsweise bei Drehmaschinen eingesetzt wird, für die vorliegenden Anforderungen (hier: hohe Drehzahlen) nicht geeignet ist. Auch Standardkomponenten wie Drehverteiler oder Schwebringe (ebenfalls bei Drehmaschinen verwendet) konnten diese Anforderungen nicht erfüllen.

6.7.3. Die Luftzufuhreinheit

Mit der Luftzufuhreinheit (**Abbildung 51**) kann die notwendige Druckluft zum Öffnen des Nullpunktspanners bereitgestellt werden.

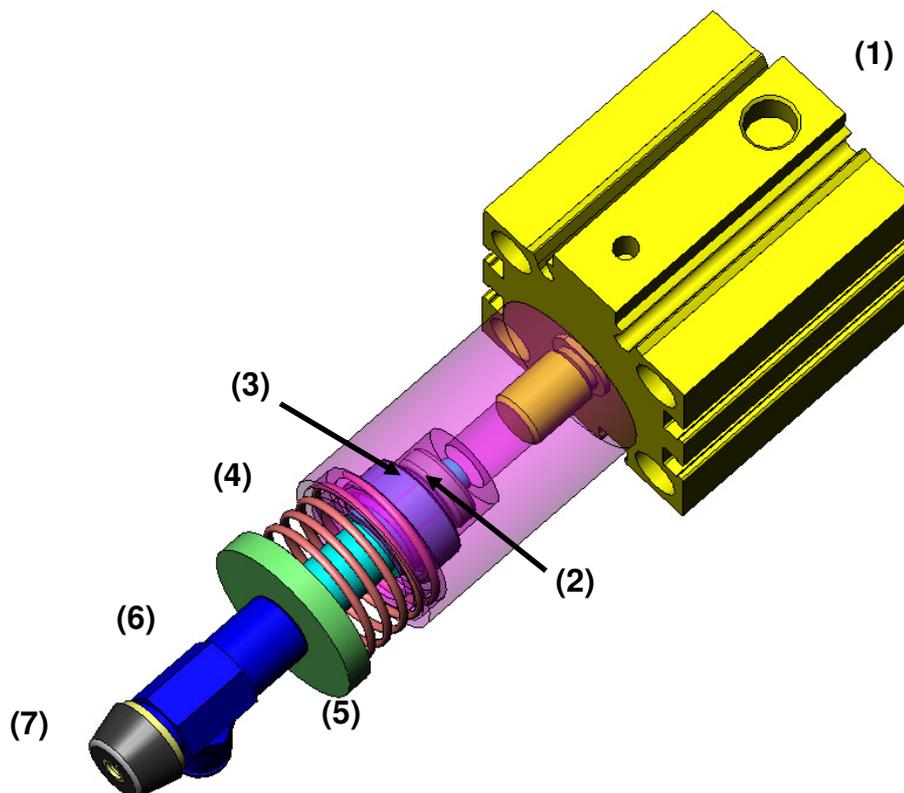


Abbildung 51 Luftzufuhreinheit, bestehend aus Pneumatikzylinder (1), Einstellmutter (2), Gelenklager (3), Druckfeder (4), Vorspannmutter (5), Pneumatikanschluss (6) und Gummikonus (7) zur Adaption; betrieben mit 6 bar, Winkelausgleich bis zu $2,5^\circ$; Vorschub 25mm

Über den Pneumatikzylinder (1) werden die Zustellbewegung und der Anpressdruck realisiert. Da die rotatorische Position des Nullpunktspanners bzw. des Gehäuses zur Luftversorgung nur in gewissen Toleranzen vordefiniert werden kann ($\pm 0,5^\circ$), ist es notwendig, eine Ausgleichbewegung bei gleichzeitigem Anpressdruck gewährleisten zu können. Dazu wird in der Aufnahme der Pressluftversorgungseinheit in die Lenkeinheit ein Gelenklager (3) einkonstruiert, welches über eine starre Welle mit dem Pneumatikanschluss (6) und somit auch mit dem Gummikonus (7) verbunden ist. Die Größe des möglichen Winkelausgleichs kann über den Außendurchmesser der Mut-

ter festgelegt werden. Zur Rückstellbewegung und zur Erzielung einer höheren Steifigkeit des Ausgleichssystems dient eine Druckfeder (4) deren Eigenschaften mittels einer Vorspannmutter (2) beeinflusst werden können.

Bei der Übertragung der Luft wird ein Gummikonus in den Luftzufuhradapter gedrückt und dichtet mit der Anpresskraft des Zylinders die Verbindung ab. Bei Entfernen des Luftdrucks schließen sich die Querschieber des Nullpunktspanners automatisch über integrierte Tellerfederpakete. Die Verbindung kann erst wieder durch erneute Zuführung von Druckluft geöffnet werden. Die Luftzufuhreinheit (**Abbildung 52**) wird in einem Gleitlager geführt um beim geneigten Andrücken keine Querkräfte in den Pneumatikzylinder zu leiten. Zum Übertragen des Luftdrucks bei winklig gegen den Adapter verdrehtem Nullpunktspanner kann der vordere Bereich der Luftdruckzufuhreinheit um den im Zentrum des Gelenklagers befindlichen Punkt „P“ schwenken.

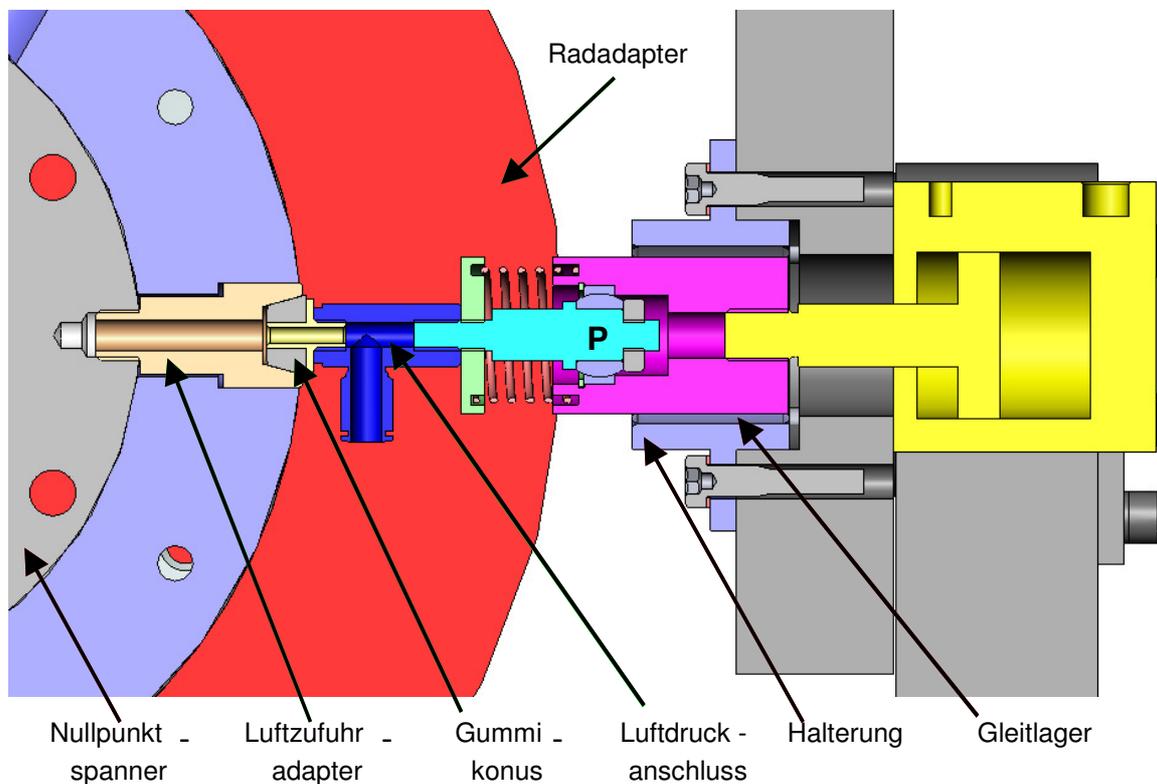


Abbildung 52 Schnittzeichnung durch die Pressluftversorgung / Luftzufuhreinheit

Der Luftzufuhradapter führt jedoch mit dem Gehäuse des Nullpunktspanners eine leichte Drehbewegung um den Gehäusemittelpunkt aus. Daraus folgend ist durch die gelenkige Lagerung keine absolute Konzentrität des Luftzufuhradapters im Gehäuse mit dem Gummikonus an der Zuführung möglich. Durch die geringen Auslenkungswinkel können jedoch die verbleibenden Positionsdifferenzen durch den Gummimantel des Gummipuffers ausgeglichen werden. Um auch im ausgelenkten Zustand eine Konzentrität der Achsen von Gummikonus und Luftzufuhradapter zu

gewährleisten müsste ein Kardangelenke, welches mit einer Feder verbunden ist, verwendet werden. Zur Realisieren des Anpressdrucks über ein solches System bestünde jedoch die Gefahr des Abknickens. Zudem ist ein Gummikonus kostengünstiger.

Um diese Abfrage und die Druckluftzufuhr überhaupt zu realisieren, ist das definierte Anhalten des Nullpunktspanners unabdingbar. Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil der eingesetzten Antriebstechnik. Mit deren Hilfe ist es möglich, sich die Position der Schaltfahne zur Adaptionabfrage und die Position der Adaptersbuchse für die Zuführung der Pressluft exakt (bis auf $\pm 0,5^\circ$ genau) zu merken und immer wieder anzufahren.

Die Zielvorgabe der Entwicklung, geeignete Kaufteile einzusetzen, um so die Kosten minimieren zu können, ist mit diesem Konzept ebenso gewährleistet. Lediglich die Herstellung der Adapterscheibe selber und der Bau eines geeigneten Gehäuses zur Unterbringung der Nullpunktspanntechnik sind notwendig.

6.7.4. Der Radadapter / die Adapterscheibe

Zum Abschluss der Beschreibung soll nun der zur Vollständigkeit das noch fehlende Teil, der Radadapter bzw. die Adapterscheibe selber, beschrieben werden. **Abbildung 53** zeigt daher den Aufbau des Radadapters, welcher in einem vorgelagerten Taktschritt an jeden einzelnen Radflansch des Fahrzeugs montiert wird. Die Funktionsträger hierbei sind die bereits vorgestellten Komponenten Stirnverzahnung (2) und „Pin“ (3). Die selbstzentrierende Verzahnung dient zur Übertragung des Drehmoments und nimmt Kräfte in x- und z-Richtung auf. Der Pin, als funktionales Gegenstück des eigentlichen Nullpunktspanners, dient der axialen Sicherung und zur Vorspannung nach der Adaption sowie zur prozesssicheren Verbindung der Anlage mit dem Prüfling während des gesamten Ablaufes der Prüfung.

Durch das Distanzstück (4) wird gewährleistet, dass beim Einrasten des Pins im Nullpunktspanner die beiden Stirnverzahnungen genau ineinander greifen und vorgespannt werden können. Dieses Bauteil muss also in seiner Länge genau dimensioniert und exakt hergestellt werden, da es die Prozesssicherheit der gesamten Anlage gewährleistet.

Die Grundplatte (also die eigentliche Adapterscheibe (1)) dient als Aufnahme der einzelnen Komponenten und fungiert über die Radschrauben als eigentlicher Adapter mit dem Fahrzeug bzw. mit dessen Radflansch, wobei durch die Geometrie eine Kollision des Radadapters auch bei Lenkeinschlag mit dem Radkasten vermieden wird. Die Bohrungen für die Radschrauben sind in Abbildung 66 nur andeutungsweise

dargestellt. Ebenfalls fehlt in der Darstellung die Schraube, die durch das Adapterstück (4) hindurch den Pin (5) mit der Adapterscheibe (1) verbindet.

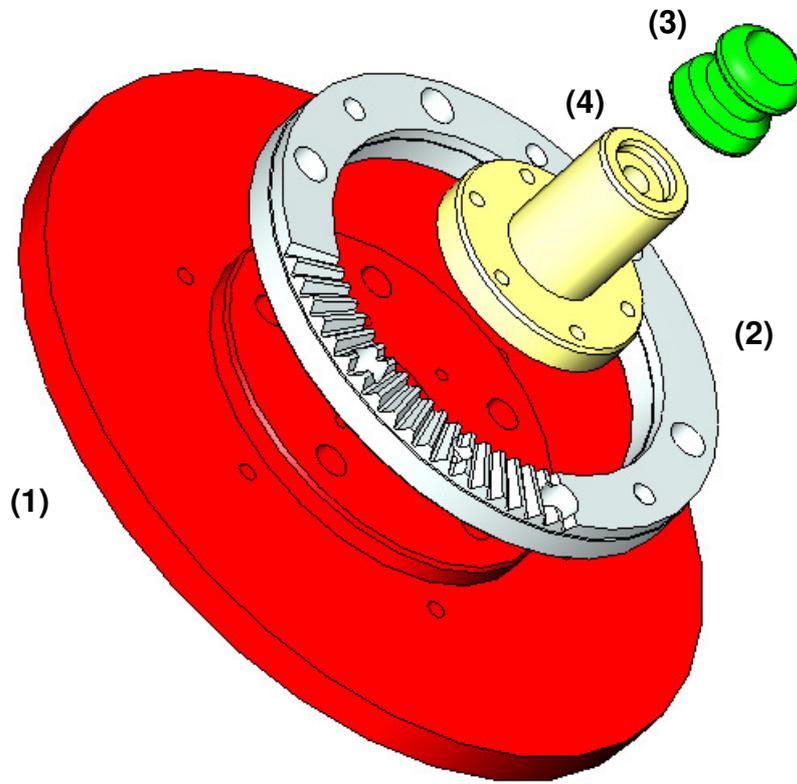


Abbildung 53 Explosionszeichnung des Radadapters, vor dem eigentlichen Prüfablaufes am Fahrzeug anstelle der Räder befestigt, Adapterscheibe (1): Grunddurchmesser 300 mm, Zahnkranz (2): 72 Zähne (hier nur teilweise dargestellt) und Pin (3) und Distanzstück (4), Gesamtgewicht < 15 kg

Der flexible Aufbau des Radadapters dient zur Modularisierung, um die verschiedenen Funktionskriterien erfüllen zu können. Diese sind, neben den Aufgaben im InLine Function Tester beispielsweise der optionale Einsatz im InLine Fahrwerkstand und im InLine Driver Assistant Systems Einstellstand. Hier ist es unter anderem notwendig, dass durch eine optimale Gestaltung der Oberfläche des Adapters eine gute Erkennbarkeit durch die dort eingesetzten Lasersensoren gewährleistet werden kann - und zwar bei einem möglichst weiten Spektrum an Umgebungslichtverhältnissen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde im Rahmen des Europaprojektes SPARC - **Secure Propulsion using Advanced Redundant Control** - eine durchgängige Prüfplattform für zukünftige Fahrzeuggenerationen mit vollständigem Drive-by-Wire Antrieb erarbeitet und vorgestellt. Die in der Prüfplattform dargestellten Prüftypen eignen sich ebenfalls für die Belange der heutigen Automobilentwicklung sowie der Produktion. Bezogen auf fahrzeugtechnische Belange und den heute üblichen Entstehungsprozess umfasst die vorliegende Dissertation dabei die frühe Entwicklung und ist vollständig bis zur so genannten Bandendprüfung für fertig montierten Fahrzeuge in der Serienproduktion anwendbar.

Ausgehend von der heutigen Situation im frühen Entwicklungsprozess moderner Fahrzeuge und deren Komponenten sowie Funktionen, also der Erarbeitung von Funktionsspezifikationen und gesamtfahrzeugübergreifenden Lastenheften, stellt die vorliegende Arbeit Ansätze in Bezug auf eine möglichst frühzeitig im Prozess angesetzte Testausarbeitung vor. Der Hauptaugenmerk liegt dabei auf einem stark fehlerreduzierten Entwicklungsprozess durch die Anwendung automatisierbarer Prüfsequenzen, schwerpunktmäßig basierend auf softwarebasierten Funktionalitäten des in SPARC vorgestellten Fahrzeuges. Parallel dazu werden immer wieder Verbindungen zu den heute bereits existierenden Funktionsgruppen, Fahrzeugkomponenten und Systemen gezogen. Daran anknüpfend zeigt die Arbeit Wege auf, wie Fehlfunktionen und Systemausfälle bis hin zu kostspieligen Rückrufaktionen durch frühzeitige Einbindung von fahrzeugübergreifend angesiedelten, durchgängigen Prüfungen vermieden werden können. Dabei werden bekannte Model-(MiL), Software-(SiL) und Hardware in the Loop (HiL) Testverfahren in die Prüfplattform eingebunden und es wird beschrieben, wie diese auf das vorliegende Problem bezogen sinnvoll angewendet werden können. Ab dem Moment, wo die Funktionen und Funktionalitäten (ABS, ESP, Fahrzeug-Bedienfunktionen wie Fensterheber, Spiegel, Schiebedach, Automatiklicht und Systemfunktionen wie LDW, SWA etc.) in physikalisch existierenden Steuergeräte integriert werden, können durch einen neuartigen, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten **Vehicle Hardware in the Loop (ViL)** Prüfstand gesamtfahrzeug-übergreifende Funktionstest bis hin zur realen Fahrzeugbelastung abgearbeitet werden. Mit Hilfe des ViL-Entwicklungsprüfstandes können Prüfungen an real existierenden Komponenten und mit realen Schnittstellen über das gesamte Fahrzeug hinweg durchgeführt werden. Dabei reicht das Spektrum des in hohem Maße reproduzierbaren Prüfportfolios am ViL von Softwareintegrationstest über Prüfungen des Energiekonsums moderner X-by-Wire Komponenten und über hochdynamische, realitätsnahe Komponentenprüfungen bis zur intensiven Vorbereitung von kostenintensiven Wintererprobungen im Labor.

Der ViL-Prüfstand ist zudem der Prototyp für zukünftige Fahrzeugprüfstände in Bezug auf die Serienproduktion in der Montagelinie, den InLine Function Tester (IFT). Bandendeprüfstände (so genannte Multifunktionsrollenprüfstände) werden heute bei jedem Fahrzeughersteller zur Sicherung der Qualität am Bandende der Serienproduktion eingesetzt. Diese Prüfstände basieren heute jedoch alle auf Basis von mechanischen Laufrollensätzen auf welche die Fahrzeuge zu Prüfzwecken von einem Werker aufgefahren und getestet werden. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit in enger Kooperation mit der Firma Dürr Assembly Products GmbH entwickelten InLine Function Tester können Fahrzeuge in der Produktion vollautomatisch den notwendigen Prüfabläufen unterzogen werden. Das bedingt eine sehr hohe Reproduzierbarkeit sowie erwähnenswerte wirtschaftliche Vorteile für den OEM. Weitere Vorteile liegen dabei neben der Integrationsmöglichkeit von Lenkprüfungen in den Bandendetest nicht zuletzt in der nahen technischen „Verwandtschaft“ des IFT zum ViL-Prüfstand. Zur Automatisierung der Prüfungen wurde ebenfalls ein hocheffizientes Schnell-Adaptionskonzept durchgängig für alle Prüf- und Einstellstände entwickelt, ausgearbeitet und angepasst.

Um den gesamten Fahrzeugprüf- und Einstellprozess am Bandende vollautomatisierbar gestalten zu können, wurde um den IFT herum ein vollständiges und durchgängiges Prüf- und Einstellkonzept entwickelt und dargestellt. Zu diesen Einstell- und Prüfumfängen in der Serienproduktion gehören geometrische Vermessungs- und Einstellarbeiten am Fahrwerk (Spur und Sturz), die darauf basierende Kalibrierung und Parametrierung von heutigen sowie zukünftigen Fahrerassistenzsystemen sowie die abschließende Bandendeprüfung. Basierend auf dem von der Firma Dürr aktuell entwickelten FASTplant[®] Gehänggefördersystem wurde also das heutige Bandende mit allen Prüf- und Einstellbelangen für die moderne und die zukünftige Fahrzeugserienproduktion vollständig und vollautomatisierbar in den Linienfluss integriert dargestellt. Der gesamte Prozess wurde zudem unter taktzeittechnischen sowie unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht, bewertet und mit heute üblichen Verfahren verglichen. Die für eine vollständig werkerlose Prüfung benötigte Kommunikation zwischen Prüfstand und Prüfling (Fahrzeug) wurde darüber hinaus ausführlich dargestellt und diskutiert. Dabei wurden auch dahingehend heute noch existierenden Schwachstellen aufgezeigt und Optimierungsvorschläge unterbreitet. Parallel zu den in SPARC dargestellten unfallvermeidenden Fahrzeugkonzept wird also ein ganzheitliches Prüfkonzept aufgebaut, welches gleichermaßen auf heute übliche sowie auf zukünftige Belange der Fahrzeugprüfung eingeht und von der Entwicklung bis in die Produktion durchgängig anwendbar ist. Gemeinsam mit dem schnellen Innovationszuwachs im Fahrzeug entsteht darauf aufbauend ein hocheffizientes Prüf- und Einstellkonzept für Fahrzeuge und Fahrerassistenzsysteme am Bandende.

Aus Sicht des Autors besteht über die in dieser Arbeit aufgezeigten technischen Möglichkeiten hinaus an dieser Stelle dringender Handlungsbedarf. In SPARC werden derzeit Systeme, Komponenten und Philosophien entwickelt, die in Bezug auf die Optimierung und Durchgängigkeit der Prüfabläufe sowie auf eine einfache und strukturierte Prüfbarkeit hin in eine richtige Richtung weisen. Es liegt in den Händen und in den Köpfen der Partner solch fortschrittlicher Projekte, an dieser Stelle sorgfältig und konzentriert an einer Optimierung nicht nur der technischen Herausforderungen solcher Konzepte, sondern auch an einer Verbesserung der momentanen Situation in Bezug auf die Produzierbarkeit und Prüfbarkeit und somit auf die Fahrzeugqualität zu arbeiten. Prüfspezialisten, Komponentenhersteller und OEM dürfen sich dazu nicht weiterhin einander verschließen und „wirre“ Systemverbände in Fahrzeuge integrieren, die nachher unmöglich zu kontrollieren und zu durchleuchten, geschweige denn durchgängig zu prüfen sind.

Die OEM und auch der Gesetzgeber müssen an dieser Stelle einsehen, dass es notwendig ist, dass zu Prüfzwecken gewisse Freigaben im Hinblick auf die autonome Fahrzeugsteuerung unabwendbar sind. Hier müssen schnellstens Möglichkeiten geschaffen werden, eine einfache Prüfkommunikation in neue Generation von Fahrzeugelektronik einzuarbeiten, ohne die Systeme dabei unsicher, durchschaubar für Dritte und somit angreifbar zu machen. Vorschläge dazu werden in der vorliegenden Arbeit bereitgestellt. Die Segmente Entwicklung und Produktion müssen zudem auf kommunikationstechnischer Ebene enger zusammenarbeiten. Dabei helfen einfache Absprachen wie beispielsweise eine konzernweite Einigung auf ein einheitliches Dokumentations- und Kommunikationstool. Dazu wird es mit Hinblick auf eine Weiterführung und Ergänzung der vorliegenden Arbeit notwendig sein, tiefer gehende Untersuchungen zur frühzeitigen und vor allem autonomen Erstellung von Prüfsequenzen aus den Funktionsspezifikationen heraus zu führen. Hierzu ist eine vertrauensvollere Zusammenarbeit zwischen OEM und Prüfspezialisten Voraussetzung. Weiterhin sollte es möglich sein, bei tiefer gehenden Systematisierungen der einzelnen Prüfbelange theoretisch ein „Baukastensystem“ zu generieren. Dieser Baukasten würde es auf Basis von Prüfanforderungen erlauben, in Bezug auf die in Kapitel 5 vorgestellten Überlegungen den richtigen Testtypus bzw. den richtigen Prüfstandstypen für ein vorliegendes Problem zu wählen.

Es bleibt zu wünschen, dass die Bedürfnisse und Belange der Zukunft zum richtigen Zeitpunkt erkannt und sinnvoll gedeutet werden. Das Ziel aller Beteiligten muss ein durchgängig verständlicher und sinngemäß dokumentierter Prüf- und Entwicklungsprozess sein, der jederzeit auch durch die Produktion dokumentiert und angepasst werden kann. Dadurch können in hohem Maße Kosten vermieden werden und die Qualität und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge kann nachhaltig und effizient gesteigert werden.

8. Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

ABS	Anti-Blockier-System - verhindert das blockieren der Räder bei starken Bremsungen
ACC	Adaptive Cruise Control - automatische Abstandshaltung zum vorausfahrenden Fahrzeug
ACC S&G	Erweitertes ACC mit der Möglichkeit, das Fahrzeug im Stau (bei Kriechfahrt) bis zum Stillstand abzubremsen
ASR	Anti Schlupf Regelung - ein System, welches beim Anfahren des Fahrzeugs durch Eingriffe in die Motorregelung und (je nach Hersteller) auch in die Bremsen der angetriebenen Achse ein Durchdrehen der Antriebsräder verhindert
CAN	Computer Aided Network - in modernen Fahrzeugen verwendete Kommunikationsadern zur Vernetzung verschiedener Systeme
CoP	Conformity of Production - Pflichtenkatalog in der Fahrzeugserienproduktion
dPP	Dynamic Pattern Projection - neuartiges Verfahren zur Verwendung der Photogrammetrie in Fahrwerksmess- und Einstellständen (Patentiert von der Firma Dürr Assembly Products GmbH im Jahre 2006)
ECU	Electronic Control Unit - Steuergerät
ESP	Elektronisches Stabilitäts-Programm - erhöht die Kurvenstabilität durch Abbremsen einzelner Räder und einen Eingriff in das Motormanagement unter maximaler Ausnutzung der physikalischen Grenzen
FAS	Fahrerassistenzsystem - Systeme zur Erleichterung / Vereinfachung der Fahraufgabe (z.B. ACC, GPS-Navigation, LDW, im weitesten Sinne auch Motorsteuergeräte, die Zündzeiten und Einspritzmengen automatisch regeln)
F&E	Forschung und Entwicklung
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse - leistungsstarkes Verfahren zur Rückverfolgung von Fehlern in einem vorhandenen System sowie zur Ermittlung der Einflüsse eines Fehlers auf das spätere Gesamtsystem
FTA	Fault Tree Analysis (Fehlerbaumanalyse) - Werkzeug zur Ermittlung der Folgen eines Fehlers in einem Gesamtsystem
FWS	Fahrwerkstand - Produktionsmaschine zum Messen der dynamischen Fahrwerksparameter wie Spur und Sturz sowie Nachlauf und Einstellen der Spur
GPS	Global Positioning System - weltweite, satellitengestützte Positionserkennung / Standorterkennung

HIL	Hardware in the Loop - leistungsfähiges Prüfverfahren von in Steuergeräten integrierte Software / Softwarekomponenten in der Entwicklungsphase
HMI / MMI	Human Machine Interface - Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI)
IFT	InLine Function Tester - dynamischer, lenkbarer Bandendepfstand zur Integration von Bandendepfufmängen in die Montagelinie
LDW	Lane Departure Warning - warnt den Fahrer beim Verlassen der eigenen Fahrspur wenn zuvor keine signifikante Lenkbewegung erwirkt und kein Blinker eingesetzt wurde
MIL	Model in the Loop - Prüfverfahren für Systeme in der Modellierungsphase (z.B. mit Matlab Simulink®)
MPI	Multi Point Injection - Kraftstoffeinspritzung an verschiedenen Stellen im Zylinder (meistens gleichzeitig)
OEM	Original Equipment Manufacturer - hier: Automobilhersteller
PEIT	Powertrain Equipped with Intelligent Technologies (EU-Projekt)
SDCS	Secure Decision Control System - eine in SPARC umgesetzte Entscheidungseinheit zur Verifikation der Richtigkeit der Fahrerentscheidung
SDI	Sequenced Direct Injection - Direkteinspritzverfahren von Volkswagen
SIL	Software in the Loop - Prüfverfahren für Systeme in der Softwareentstehungs- und Entwicklungsphase
SPARC	Secure Propulsion using Advanced Redundant Control (EU-Projekt)
SWA	Spur Wechsel Assistent - radargestütztes Fahrerassistenzsystem, welches beim Spurwechsel den toten Winkel sowie das Umfeld hinter dem Auto überwacht
ViL	Vehicle in the Loop - erweiterter HIL-Prüfstand für Gesamtfahrzeuge (nicht nur für einzelne Steuergeräte oder Steuergeräteverbunde) mit vielen Vorteilen aufgrund des Vorhandenseins des Gesamtfahrzeuges im Prüfstand

8.1. Quellennachweis und Literaturverzeichnis

- /1/ Spiegelberg, G.: Ein Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Funktionalität von Fahrzeugen unter Einbindung des Antriebstrangmoduls MotionX-ACT®; Göttingen; Cuvillier Verlag 2002
- /2/ Kraftfahrtbundesamt, Verkehr in Zahlen / DIW; 2006
- /3/ Allenbach, R.; Müller, W.: Das Unfallgeschehen im Jahr 2010: Unfallprognosen im Straßenverkehr als Grundlage für schwerpunktorientierte Unfallprävention. Zeitschrift Verkehrssicherheit, 44.1998, 2; S. 60 - 66, TÜV Media GmbH
- /4/ Piper, H. P.: Staus und Unfälle auf Autobahnen: Ursachen und Abhilfen. Internationales Verkehrswesen: Fachzeitschrift für Information und Kommunikation im Verkehr, 46.1994, 7 / 8; S. 407 - 410; Organ der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V., DVWG. - Frankfurt, Main
- /5/ Sonderforschungsprojekt „kognitives Automobil“; Onlinequelle: www.iaim.ira.uka.de/users/vacek/projekte/kogauto/kogauto_start.html
- /6/ Bemimoun, A.: „Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein fahrermodellbasierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven Fahrerassistenzsystemen“; IGM, RWTH Aachen, 2004
- /7/ PEIT - Powertrain Equipped with Intelligent Technologies - EU-Forschungsprojekt im 5. Rahmenprogramm der Europäischen Union (01.01.2001 - 31.12.2003); Konsortialführung: DaimlerChrysler AG, Stuttgart; Projektleiter: Dr. Ansgar Maisch
- /7a/ SPARC - Secure Propulsion using Advanced Redundant Control - EU-Forschungsprojekt im 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union (01.01.2004 - 31.06.2007); Konsortialführung: Daimler Chrysler AG, Stuttgart; Projektleiter: Dr. Armin A. Sulzmann
- /7b/ Badenstübner, J.: Fachbeitrag AI - Automobil Industrie: Sensibelchen auf vier Rädern; AI 06/ 2006, S. 62 - 65; Verlag Moderne Industrie AG & Co.KG, Landsberg;
- /8/ Bertsche, B. u. Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau; 3. überarbeitete Auflage; Stuttgart; Springer Verlag 2004
- /9/ DAT-Verdol-Report 2002;
Onlinequelle: www.iapsam.org/PSAM7/Presentation_Bertsche-Brand.pdf
- /10/ Kovacevic, S.; Habermeier, M.; Schmitt, A.; Belke, R.: Einbettung von Tests in den modellbasierten Entwicklungsprozess für Automobilelektronik, aus: Gühmann, C.; Theiß-Magnus, W.: Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobilelektronik; Expert Verlag, 2005

- /11/ Conrad, M.; Dörr, H.; Fey, I.; Pohlheim, H.; Stürmer, I.: Guidelines und Reviews in einer modellbasierten Entwicklung von Steuergeräte-Software; SAE Berlin; 2005
- /12/ Schenk, J.; Tentrup, T.; Spiegelberg G.: Unfallvermeidendes Fahrzeugkonzept SPARC und neue Prüfanlage ViL; ATZ 03/2006 Jahrgang 108; S. 182 - 189; Vieweg Verlag /GWV Fachverlage; Wiesbaden, 2006
- /13/ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
http://www.bmvit.gv.at/innovation/verkehrstechnologie/i2intell_infra/
- /14/ Europäische Rahmenrichtlinie 70/156/EWG; Anhang 10
- /15/ Dürr Assembly Products GmbH, Köllner Straße 122-128, 66346 Püttlingen
- /16/ Reimpell, J.; Betzler, J. W.: Fahrwerktechnik: Grundlagen; Vogel Fachbuch Verlag; Würzburg, 2002
- /17/ Fachbeitrag AP - Automobil Produktion: Zusammenspiel auf dem Prüfstand; AUTOMOBIL ELEKTRONIK - Sonderausgabe: Best Practice 2005; S.24 f.; Verlag Moderne Industrie AG & Co. KG, Landsberg, Nov. 2005
- /18/ Allgemeiner Deutscher Automobil Club - ADAC, Umfrage Kundenzufriedenheit Fahrzeuge, 2005
- /19/ VDI Norm 2206: „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“; VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, 2004
- /20/ Syrnik, R.: Analyse der Möglichkeiten der Anwendung einer Fehlerbaumanalyse auf eine Funktionsspezifikation zur automatischen Generierung einer Prüfmatrix im Entwicklungsprozess der Automobilindustrie; Studienarbeit; IGM, RWTH Aachen; 2006
- Weiterführende Literatur und Beispiele für Bewertungskataloge zur Erleichterung der Auswahl der Bedeutung der Fehlerfolge (B): VDA 96 System-FMEA, Standard- oder QS 9000 Prozess FMEA; ib seteq GmbH, Frankfurt
- /21/ MIL-STD-1629A: Procedures for Performing a Failure-Mode-Effects-and-Critically-Analysis. United States Department of Defence, 24 November 1980, Washington DC
- /23/ Vemuri, K.K.; Dugan, J.B.; Sullivan, K.J.: A Design Language for Automatic Synthesis of Fault Trees“; Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium 1999; University of Virginia
- /22/ Vemuri, K.K.; Dugan, J.B.; Sullivan, K.J.: A Design Language for Automatic Synthesis of Fault Trees“; Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium 1999; University of Virginia

- /24/ Offer, T.; Siedel, R.; von Räden, K.; Birkner, C.; Östereicher, W.: Simulation und Test bei der Entwicklung von Regelstrategien, aus: Gühmann, C.; Theiß-Magnus, W.: Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobilelektronik; Expert Verlag, 2005
- /25/ Brost, M.; Baumann, G.; Reuss, H.C.: P.A.T.E.: Eine offene Plattform für automatisierte Steuergeräte-Tests, aus: Gühmann, C.; Theiß-Magnus, W.: Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobilelektronik; Expert Verlag, 2005
- /26/ Angermann, A.; Beuschel, M.; Rau, M.; Wohlfarth, U.: MATLAB - SIMULINK - STATEFLOW Grundlagen, Toolboxes, Beispiele; Oldenbourg Verlag, München, 2005
- /27/ Sadeghipour, S.: „Einsatz automatischer Testdatengenerierung im modellbasierten Test“; IT Power Consultants, Gustav-Meyer-Allee 25 /Geb. 12, Berlin
- /28/ IAV GmbH - Ingenieurgesellschaft Automobil und Verkehr, Carnotstraße 1, 10587 Berlin; Kontakt: oliver.predelli@iav.de
- /29/ Reactive Systems, Inc., 120-B East Broad St., Falls Church; VA 22046, USA
- /29a/ Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Prof. Dr. Holger Schlingloff, Seminar "Spezifikationsbasierter Softwaretest", 2006; Reactive Systems Report 2003-1
- /30/ Henry, J.: Automated Testing & Quantitative Evaluation of Real -Time System Source Code; The University of Montana; 2001 - 2003
- /31/ Bitsch, F.; Canver, E.; Moik, A.: Strukturierte Erstellung von Sicherheitspezifikationen in UML mit Hilfe der FMEA; FORMS - Workshop 12/99, Braunschweig
- /32/ Moik, A.: Strukturierte Erstellung von formalen Sicherheitsmodellen für Automatisierungssysteme mit Sicherheitsverantwortung; Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik der Universität Stuttgart, 1999
- /33/ Grochtmann, M., Grimm, K.: Classification Trees for Partition testing, Software testing, Verification & Reliability, Volume 3, Number 2, June 1993, Wiley, Seiten 63 - 82.
- /33a/ Grimm, Klaus: Systematisches Testen von Software: Eine neue Methode und eine effektive Teststrategie. München, Wien, Oldenburg, 1995. GMD-Berichte Nr. 251.
- /33b/ Lützkendorf, S., Bothe, K.: Attributierte Klassifikationsbäume zur Testdatenbestimmung. Softwaretechnik-Trends 23(1): (2003)
- /33c/ Dai, Deussen, Busch, Lacmene, Ngwangwen: Automatic Test Data Generation for TTCN-3 using CTE. <http://www.testingtech.de/download/ICSSEA-2005-CTE.pdf>

- /33d/ Ostrand, Balcer: The category-partition method for specifying and generating functional tests. Communications of the ACM, Juni 1988, Vol. 31, Nummer 6, Seiten 676 ff.
- /34/ Software-Produkte der PLATO AG (SCIO FMEA); Breite Straße, Lübeck, www.plato-ag.com
- /35/ APIS IQ-FMEA / FTA, Software-Produkte von APIS Informationstechnologien GmbH;
- /36/ FaultTree+ ist ein Software-Produkt der Isograph GmbH; Newport Beach, California, USA; www.isograph-software.com
- /37/ Gumm, H. P.; Sommer, M.: Einführung in die Informatik; Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2002
- /38/ Andresen, A.: Komponentenbasierte Software- Entwicklung; Hanser- Verlag; 2004
- /39/ W3C Germany and Austria Office; Fraunhofer Institute für Mediacommunications, Schloss Birlinghoven, Skt. Augustin;
- /40/ Benoit Marchal, Pineapplesoft
Working XML UML, XMI, and Code Generation Part 1-3
<http://www-128.ibm.com/developerworks/library/x-wxxm23>
- /41/ XML- Toolbox, Geodise Project, University of Southampton, 2004
- /42/ Grose, T.- J.; Doney, G. C.; Brodsky, S- A.: Mastering XMI; OMG Press, 2002
- /43/ Katz, S.; Eberhardt, A.: XML Metadata Interchange - Herstellerunabhängiges Transferformat; Seminar - Fachhochschule Stuttgart
- /44/ Henke, J.: IPA- Ansatz zur Absicherung von mechatronischen Systemen durch systematische Generierung von Prüfsequenzen; Vortrag im Rahmen des Fraunhofer IPA Seminars zur „Erhöhung von Zuverlässigkeit in mechatronischen Systemen“; November 2004
- /45/ Wallentowitz, H.: Vertikal- / Querdynamik von Kraftfahrzeugen; Vorlesungsskript IKA, RWTH Aachen; Verlag Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka); Aachen, 2000
- /46/ Wallentowitz, H.: Längsdynamik von Kraftfahrzeugen; Vorlesungsskript IKA, RWTH Aachen; Verlag Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka); Aachen, 1998
- /47/ Schenk, J.: Nonlinear two track model for heavy goods vehicles with X-by-Wire-Propulsion; Diplomarbeit IKA, RWTH Aachen, 2003
- /48/ Firma GKN Driveline; Ottensener Straße 150, Hamburg

- /49/ Seher-Toss, H.-Ch. Graf von; Schmelz, F.; Aucktor, E.: Gelenke und Gelenkwellen – Berechnung, Gestaltung, Anwendung; 2. Auflage, S132 ff; Springer Verlag
- /50/ Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V. - WDK, WDK Leitlinien Teil 1 bis 5; www.wdl.de/publikationen.aspx
- /51/ *Schenk, J.; Corves, B.; Müller, R.; Tentrup, T.; Spiegelberg, G.:* Optimierung und Kostenreduktion im Entwicklungs- und Produktionsprozess mechatronischer Fahrzeugkomponenten durch einen ViL- Teststand. In: VDI- Berichte Nr. 1892, 1892.2, S. 809-832; Juni 2005
- /52/ Morawietz, T.: Mechanische Ankopplung an Radträger von Fahrzeugen im Zusammenhang mit Bandendeprüfungen in der Endmontagelinie; Diplomarbeit FH Trier, 2005

Lebenslauf

Name: Jan Schenk
Adresse: Im Röthels 9,
69518 Unter-Abtsteinach
Geburtsdatum: 19. April 1975
Geburtsort: Madrid / E
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig



Werdegang

1981 - 1985 Julius Priestersbach Grundschule Remscheid

1985 - 1991 Alexander von Humboldt Realschule Remscheid; Abschluss: „Mittlere Reife mit Qualifikation“

1991 - 1994 Ernst Moritz Arndt Gymnasium Remscheid; Abschluss: Abitur

1994 - 1995 Grundwehrdienst bei der Luftwaffe (Köln/Bonn)

1995 - 2003 Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen
Vertiefungsrichtung: Fahrzeugtechnik, Abschluss: gut (2.0)

2003 Diplomarbeit zum Thema „Nichtlineare Querdynamik- Simulation für schwere Nutzfahrzeuge mit Drive by Wire Antrieb“ im Rahmen des EU- Projektes PEIT bei der Firma Daimler Chrysler SIM Technology Co.,Ltd. in Shanghai / PR China; Diplomarbeit in englischer Sprache verfasst; Bewertung: sehr gut (1.0)

2004 - 2007 Promotion zum Thema „Prüfplattform für zukünftige Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion“ im Rahmen des EU-Projektes SPARC an der RWTH Aachen, abgestellt als Mitarbeiter der Abteilung „Entwicklung und Produktmanagement“ der Firma DÜRR Assembly Products GmbH, Püttlingen; Abschluß: Cum Laude

Ab Jan. 2007 Aufnahme einer selbständigen, freiberuflichen Tätigkeit (Ingenieurbüro) mit den Schwerpunkten Systemintegration, Fahrzeug und Komponententest, ProjektManagementConsulting in Weinstadt-Beutelsbach – Referenzprojekt: SPARC (www.sparc-eu.net)

Berufserfahrung / Praktika / Schulungen

Juli 1990 Dreiwöchiges Betriebspraktikum bei der Firma AEG-Elotherm in Remscheid, Schwerpunkt: Elektronische Platinen

Sept. 1992 Zweiwöchiges Betriebspraktikum bei der Firma Ising Steuerungstechniken in Wermelskirchen

- Juli - Sept. 1994 Dreimonatige Ferientätigkeit zw. Abitur und Wehrdienst bei der Firma Robert Röntgen Remscheid, Metallsägen; Schwerpunkt: CNC- Betreuung
- Juli - Sept. 1996 achtwöchiges Betriebspraktikum bei der Firma Deutsche Fibrit GmbH (jetzt Johnson Controls); Schwerpunkt: Metallverarbeitung
- Aug. 1997 Dreiwöchiges Betriebspraktikum bei der Firma Walter Tuma Gießereitechniken in Mönchengladbach
- Apr. - Sept.1998 6 Monate Praktikum bei der Firma Dr. h. c. Ferdinand Porsche AG in Stuttgart-Zuffenhausen, Schwerpunkt: Qualitätssicherung Gesamtfahrzeug
- Okt. 02 - März 03 6 Monate freiwilliges Praktikum bei der Firma Daimler Chrysler AG, Abteilung Powersystems (jetzt TPE / VES). Schwerpunkt: Aufbau eines neuartigen Gesamtfahrzeug Hardware in the Loop (VeHiL) Prüfstandes für schwere Nutzfahrzeuge (Actros); In diesem Rahmen: Anmeldung eines Patents
- 2000 - 2004 Vierjährige Tätigkeit im Institut für Allgemeine Mechanik der RWTH Aachen im Bereich Lehre (Statik, Dynamik, Festigkeitslehre), Übungsausarbeitung, Administration und Organisation
- 2004 Teilnahme an der Entwicklung eines Kalibrier- und Einstellkonzeptes für Fahrerassistenzsysteme in der Fahrzeugserienproduktion für die Firma DÜRR Assembly Products GmbH, Püttlingen im Rahmen einer Kundenstudie (Patent)
- Feb. - Mai 2006 Gesamtorganisation der Messe „Automotive Testing Expo Europe 2006“ für die Firma DÜRR Assembly Products GmbH, Püttlingen
- Feb. - Okt. 2006 Übernahme des Postens des Produktmanagers für die Produktpalette Scheinwerfereinstellstände „x-light“ und „Einstellstände für Fahrer-assistenzsysteme“ für die Firma DÜRR Assembly Products GmbH, Püttlingen
- Nov. 2006 Projektbedingter Wechsel des Einsatzgebietes zur Daimler Chrysler AG nach Stuttgart, Abteilung TPE/VES. Aufgabe: Leitung der Systemintegration mechatronischer Komponenten in den Antriebstrang und in das Gesamtfahrzeug im EU-Projekt SPARC
- Nov. 2007 Projektbedingter Wechsel des Einsatzgebietes zur Fa. PROdesign GmbH, Medizintechnische Produktentwicklung. Aufgaben: Mechatronische Entwicklung sicherheitsrelevanter, redundanter Systeme und Maschinen im medizintechnischen Bereich.

Besondere Kenntnisse

Ausgeprägte Kenntnisse im Bezug auf Fahrzeugprüftechniken in der Entwicklung von Einzelsteuergeräten über die Gesamtfahrzeugprüfung bis hin zu Prüf- und Einstellverfahren in der Serienproduktion. Aufbauend auf der Diplomarbeit wurde im Rahmen der Promotion ein weiterer VeHiL Prüfstand für PKW entwickelt (Patent). Ergänzend wurde ein neuartiges, integriertes Inline Prüf- und Einstellkonzept für die PKW Serienproduktion entwickelt (vier weitere Patente). Dieses Konzept umfasst eine vollautomatische Inline Fahrwerksvermessung und Einstellung, eine autonome Inline Kalibrierung und Einstellung von Fahrerassistenzsystemen sowie Haupt- und Nebelscheinwerfern und eine vollständige, autonome Bandendprüfung in einem Fahrzeugfördersystem (Gehängeförderer).

Fundierte Kenntnisse in Matlab Simulink aufgrund oben erwähnter Diplomarbeit

Gute Kenntnisse in LaTeX für Linux aufgrund vierjähriger Tätigkeit im Bereich der Lehre sowie der Übungsgestaltung und Übungsausarbeitung für Studenten des Grundstudiums Maschinenbau und technische Redaktion an der RWTH Aachen

Fundierte CAD-Kenntnisse

- (IDEAS 3D) aufgrund einer Studienarbeit zum Thema „Hüftkopfbestimmende Kraft des Tractus Iliotibialis bei verschiedenen Schenkelhalswinkeln“ in Kooperation mit dem Klinikum Aachen
- 3-tägigen Intensivschulung (PRO Engineer Wildfire 2.0) im November 2007

Studienarbeit zum Thema „Experimentelle Modalanalyse“; Schwingungs- und Resonanzuntersuchungen an Rohkarosserien des Audi A2, VW Lupo 3L sowie Fiat Multipia (Software: CADA PC, Modalanalyse)

80-stündiger EDV Anwenderlehrgang (Windows, MS Office, Word, Excel) per Abendschule während des Grundwehrdienstes bei der Industrie- und Handelskammer zu Köln (1994)

Teilnahme am Kurs „Intermediate Technical English I“ der RWTH Aachen; Bewertung: gut

Fremdsprachen

Englisch	fließend
Französisch	Grundkenntnisse

Veröffentlichungen (Auszug)

Juni 2005 Schenk, J.; Corves, B.; Müller, R.; Tentrup, T.; Spiegelberg, G.:
Optimierung und Kostenreduktion im Entwicklungs- und Produkti-

onsprozess mechatronischer Fahrzeugkomponenten durch einen VeHiL-Teststand. In: VDI - Berichte Nr. 1892, 1892.2; S 809 - 832

Nov. 2005 Schenk, J.; Pyper, M.: Zusammenspiel auf dem Prüfstand. In: Automobil Produktion, Automobil Elektronik, Sonderausgabe Best Practice 2005, November 2005

März 2006 Schenk, J.; Tentrup, T.; Spiegelberg, G.: Unfallvermeidendes Fahrzeugkonzept SPARC und neue Prüfanlage VeHiL. In: ATZ 03/2006, Page 182 - 189, Vieweg Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Redaktion ATZ / MTZ, Wiesbaden, März 2006

Sept. 2006 Schenk, J.; Müller, R.; Tentrup, T.: Vorstellung eines durchgängigen InLine Prüfkonzeptes - Optimierung von Prüf- und Einstellprozessen in der Serienfertigung, VDI/IFAC Mechatroniktagung Wiesloch

Sept. 2006 Schenk, J.; Tentrup, T.: Introduction of the New integrated InLine Concept for Vehicle Testing and Adjusting within the Automotive Series Production, IABC Congress, Detroit MI, USA

Darüber hinaus diverse internationale Projektpräsentationen auf Fachtagungen und Projektmeetings (weltweit)

Hobbies

Fitness, Badminton (Wettkampferfahrung), Laufen (Wettkampferfahrung), Snowboard, Kraftfahrzeuge, Kochen, Schach, Poolbillard

1996 Beitritt bei einer couleurstudentischen Vereinigung (von 1996 - 2002 mehrfach Inhaber des Postens Schriftführer sowie Kassierer im Verbindungsvorstand)

Anhang 1: Kommunikationsprotokoll zwischen Vehicle in the Loop PC (ViL Master) und X-Line PC

Die Kommunikation erfolgt über die schon vorhandene Ethernetschnittstelle und UDP/IP Protokoll. Die verwendeten Ports können frei definiert werden
 Da UDP ein ungesichertes Protokoll ist, sind Sicherungsmechanismen (Telegrammzähler, Prüfsumme) in die übertragenen Daten eingebettet. Zyklischer Telegrammaustausch alle 100 ms.
 Beide Seiten übertragen UDP-Pakete mit 230 Bytes Länge. Korrespondierende Informationen befinden sich meist an der gleichen Position im Telegramm.
 Da die Funktionalität zwischen verschiedenen Prüfständen häufig etwas abweicht, sind in größeren Umfang Reservebereiche vorhanden.

Da mir derzeit noch keine detaillierten Informationen über die im Prüfstand anzusprechende Funktionalität vorliegt, sind Zusätze und Streichungen von Telegramminhalten höchstwahrscheinlich notwendig

Kann so übernommen werden
geändert
Neuer Eintrag ins Telegramm
Kann nicht benutzt werden bzw nicht bekannt wie und warum es benutzt werden soll
Nicht benötigt

Adr.	HIL -> XLine	XLine -> HIL	Einheit	Typ	Beschreibung
HIL<->XLine Verbindungskoordination und Kontrolle Teil 1					
0	Startkennung 02Hex	Startkennung 02Hex		WORD	feste Startkennung
2	gespiegelte Versionsnummer	Versionsnummer		WORD	Versionsnummer der Schnittstelle (beginnt mit 1.0)
4	gespiegelter Telegrammzähler von XLine	Telegrammzähler XLine		WORD	Zähler der von der XLine gesendeten Telegramme (beginnt mit 0)
6	Telegrammzähler vom HIL	gespiegelter Telegrammzähler vom HIL		WORD	Zähler der vom HIL gesendeten Telegramme (beginnt mit 0)
8	Reserve	Reserve		WORD	
10	Reserve	Reserve		DWORD	
14,0	Reserve	zyklisches Telegramm im Zeitraster	0/1	BOOL	Das Telegramm ist ein zyklisches Telegramm. Es wird ohne Anforderung zyklisch von des XLine gesendet
14,1	Anforderungstelegramm	Anforderungstelegramm	0/1	BOOL	Das Telegramm ist ein Anforderung an die Gegenseite.
14,2	Antworttelegramm	Antworttelegramm	0/1	BOOL	Das Telegramm ist eine Antwort auf die Anforderung von der Gegenseite.
14,3	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
14,4	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
14,5	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
14,6	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
14,7	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
15	Reserve	Reserve		ARRAY[1..5]of BYTE	
20	Reserve	relative Uhrzeit	ms	DWORD	Uhrzeit der Daten in Millisekunden. Der Startzeitpunkt ist NICHT relevant. Der HIL kann diese Zeit nutzen um Differenzenquotienten für Geschwindigkeit und Drehmoment zu berechnen. Zeit beim Abschicken des Telegramms. Nicht gleich der Zeit wann Geschwindigkeit/Kräfte in Telegram eingetragten werden.
Steuersignale für Rollenprüfstand					
24,0	Grundstellung herstellen	Prüfstand ist in Grundstellung	0/1	BOOL	
24,1	Prüfbereitschaft herstellen	Prüfstand ist prüfbereit	0/1	BOOL	
24,2	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
24,3	Reserve	Prüfstand ist ausfahrbereit	0/1	BOOL	
24,4	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
24,5	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
24,6	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
24,7	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,0	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,1	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,2	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,3	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,4	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,5	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,6	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
25,7	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
26	Reserve	Reserve		BYTE	
27,0	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
27,1	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
27,2	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
27,3	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
27,4	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
27,5	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
27,6	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
27,7	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
28,0	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
28,1	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
29	Reserve	Reserve		BYTE	
30	Reserve	Reserve		ARRAY[1..14] OF BYTE	
Betriebsüberwachung/Störung etc.					
44	Reserve	Reserve		WORD	
46	Reserve	Reserve		WORD	
48	Reserve	Reserve		WORD	
50,0	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
50,1	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
50,2	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
50,3	Reserve	Prüfstand betriebsbereit für HIL	0/1	BOOL	Automatikbetrieb EIN
50,4	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
50,5	Reserve	Not-Aus Prüfstand	0/1	BOOL	
50,6	Reserve	Störung Prüfstand	0/1	BOOL	
50,7	Reserve	Reserve	0/1	BOOL	
52	Reserve	Reserve		WORD	
54	Reserve	Reserve		WORD	
56	Reserve	Reserve		WORD	
58	Reserve	Reserve		WORD	
Soll-/Istwerte für Prüfablauf					
60	Soll-Geschwindigkeit Laufrolle vorne links	Ist-Geschwindigkeit Laufrolle vorne links	1/10 km/h	INT	
62	Soll-Geschwindigkeit Laufrolle vorne rechts	Ist-Geschwindigkeit Laufrolle vorne rechts	1/10 km/h	INT	
64	Soll-Geschwindigkeit Laufrolle hinten links	Ist-Geschwindigkeit Laufrolle hinten links	1/10 km/h	INT	
66	Soll-Geschwindigkeit Laufrolle hinten rechts	Ist-Geschwindigkeit Laufrolle hinten rechts	1/10 km/h	INT	
68	Soll-Zugkraft Laufrolle vorne links	Ist-Zugkraft Laufrolle vorne links	N	INT	
70	Soll-Zugkraft Laufrolle vorne rechts	Ist-Zugkraft Laufrolle vorne rechts	N	INT	
72	Soll-Zugkraft Laufrolle hinten links	Ist-Zugkraft Laufrolle hinten links	N	INT	
74	Soll-Zugkraft Laufrolle hinten rechts	Ist-Zugkraft Laufrolle hinten rechts	N	INT	
76	Soll 4 Motoren Modus	Ist 4 Motoren Modus	N	INT	0=Ausrollen, 1=VA Antrieb, 2=HA Antrieb, 3=Allradantrieb, 4=Statischer Bremstest, 5=Dynamischer Bremstest, 7=Freilauf
KFZ-Daten					
144	Radstand	Reserve	mm	WORD	
146	Gesamtgewicht KFZ	Reserve	kg	WORD	als simulierte Masse verwenden
148	Reserve	Reserve	mm	WORD	
150	Reserve	Reserve		WORD	
152	Bremskraftverteilung (Anteil der Vorderachse)	Reserve	%	WORD	
154	Schubtriebverteilung (Anteil der Vorderachse)	Reserve	%	WORD	
156	Beschleunigungsverteilung (Anteil der Vorderachse)	Reserve	%	WORD	
Straßendaten					
204	Reserve	Reserve		WORD	
206	Reserve	Reserve		ARRAY[1..20]of BYTE	
HIL<->XLine Verbindungskoordination und Kontrolle Teil 2					
226	32-bit XOR Prüfsumme	32-bit XOR Prüfsumme		DWORD	

Datentyp	Beschreibung	Wertebereich
BOOL	1-bit	0 ... 1
BYTE	8-bit unsigned integer:	0 ... +255
CHAR	8-bit signed integer:	-128 ... +127
WORD	16-bit unsigned integer:	0 ... +65535
INT	16-bit signed integer:	-32768 ... +32767
DWORD	32-bit unsigned integer:	0 ... 4294967295
LONG	32-bit signed integer:	-2147483648 ... +2147483647