

Gestaltung eines Prüffelds für die Fahrwerksentwicklung unter Berücksichtigung der virtuellen Produktentwicklung

Matthias Deuschl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.-R. Hhn

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Heißing
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. H.-H. Braess

Die Dissertation wurde am 07.07.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.09.2006 angenommen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Menschen herzlich bedanken, die mich bei der Fertigstellung meiner Dissertation unterstützt haben.

Zuerst möchte ich die Herren Johann Mitterer und Dr.-Ing. Reinhard Drews nennen, die das Projekt in Auftrag gegeben haben. Herrn Dr. Drews danke ich besonders für sein persönliches Engagement und seine vielen konstruktiven Impulse.

Meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing, und Herrn Dr.-Ing. Josef Fink vom Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik München danke ich sowohl für die Möglichkeit, mich am Lehrstuhl mit diesem spannenden Thema beschäftigen zu dürfen, als auch ganz besonders für die fachlichen Diskussionen und Anregungen, die wesentlichen Anteil am Erfolg dieser Arbeit hatten.

Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Hans-Hermann Braess danke ich für die spontane und zielstrebige Übernahme des Korreferats sowie für seine weitsichtigen Kommentare und Inspirationen. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn sei für den Vorsitz des Prüfungsausschusses gedankt.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik München, sowie in der Automobilindustrie danke ich für die freundliche und kollegiale Zusammenarbeit. Besonders aus der Industrie habe ich viele wertvolle Informationen erhalten, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Weiterhin danke ich allen Studierenden der TU München, die mich im Rahmen von Diplom- und Semesterarbeiten tatkräftig unterstützt haben.

Abschließend gilt mein spezieller Dank meinen Eltern und meiner Liebsten Maria für die anerkennenswerte private Unterstützung.

München, im November 2006

gez. M. Deuschl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Vorgehensweise	3
2	Historische Entwicklung von Versuch, Berechnung und Simulation in der Automobilindustrie	5
3	Stand der Technik in der Fahrwerksentwicklung: Versuch und Simulation....	15
3.1	Funktionsprüfstände	15
3.1.1	Repräsentatives Prüffeld der Fahrwerksentwicklung	15
3.1.2	Kriterien zur Klassifikation und Bewertung von Prüfständen.....	17
3.1.3	Erreichbare Genauigkeit der Prüfstandstechnik.....	19
3.1.4	Stärken der Prüfstandstechnik.....	26
3.1.5	Grenzen der Prüfstandstechnik	27
3.2	Simulationsmethoden	30
3.2.1	Übersicht.....	30
3.2.2	Genauigkeit der Simulation	34
3.2.3	Stärken der Simulation	39
3.2.4	Grenzen der Simulation.....	41
3.3	Hardware in the Loop (HiL)	42
3.3.1	Übersicht.....	42
3.3.2	Stärken der HiL Technologie	43
3.3.3	Grenzen der HiL Technologie.....	44
3.4	Vergleich von Versuch und Simulation.....	45
4	Zukünftige Veränderungen von Prüffeld und Simulation.....	54
4.1	Veränderungen von Markt und Produkt.....	54
4.1.1	Individualisierung.....	55
4.1.2	Emotionalisierung.....	56
4.1.3	Globalisierung	57
4.1.4	Rationalisierung	58
4.1.5	Time to Market	59
4.2	Veränderungen der Entwicklungsprozesse	60
4.2.1	Produktmodularisierung.....	60
4.2.2	Funktionsorientierung.....	61
4.2.3	Ausrichtung auf Elektrik/Elektronikentwicklung.....	61
4.2.4	Entwicklung in Partnernetzwerken.....	62
4.2.5	Frontloading	65
4.3	Veränderungen der Entwicklungsmethoden und -werkzeuge.....	68
4.3.1	Weiterentwicklung der Prüfstandstechnik	69
4.3.2	Weiterentwicklung Simulationsmethoden	73
4.3.3	Ausweitung HiL Technologie	74
4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	75

5	Szenario: „Fortgeschrittene Simulation“ – Das Prüffeld der Zukunft	79
5.1	Weiterentwicklung des Prüffelds zum Szenario „Fortgeschrittene Simulation“	80
5.1.1	Prüfstände zur Funktionsabsicherung von Innovationen.....	80
5.1.2	Prüfstände für Regelsysteme und aktive Komponenten	81
5.1.3	Reproduktion kundenrelevanter Betriebszustände	84
5.1.4	Steigerung des Automatisierungsgrads und der Flexibilität.....	87
5.1.5	Verbesserung der Prüfstandsauftbauten und neue Prüftechniken	87
5.1.6	Erweiterungen des Prüffelds.....	90
5.2	Weiterentwicklung der Simulation zum Szenario „Fortgeschrittene Simulation“	90
5.2.1	Aussagefähigkeit der Simulation	90
5.2.2	Ausweitung der Fahrdynamiksimulation	91
5.3	Zusammenwirken von Prüffeld und Simulation.....	92
5.3.1	Modellparametrierung.....	93
5.3.2	Prüfstandsversuche zur Modellerstellung	95
5.3.3	Beispiele für das Zusammenwirken von Simulation und Versuch	96
5.4	Prüffeldkonzept bei „Fortgeschrittener Simulation“	104
5.4.1	Flächenbedarfe der Prüfstände	105
5.4.2	Weitere zu berücksichtigende Flächenbedarfe und Einflussfaktoren	107
5.5	Räumliche und organisatorische Aufstellung.....	107
5.5.1	Strukturelle Gestaltung	108
5.5.2	Groblayout des Entwicklungszentrums.....	109
5.5.3	Feinlayout des Prüffelds	110
6	Vision: „Vollständige Simulation“	112
6.1	Entwicklungsprozess bei „Vollständiger Simulation“.....	113
6.1.1	Virtuelle Produktentwicklung bis zur Produktvorfreigabe	113
6.1.2	Produktfreigabe durch Hardwareversuche.....	115
6.2	Prüffeldkonzept	116
6.3	Räumliche und organisatorische Aufstellung.....	119
7	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse, Empfehlung	120
7.1	Vergleich der Entwicklungsprozesse	120
7.2	Vergleich der Chancen und Risiken	121
7.3	Empfehlung.....	123
8	Zusammenfassung	125
9	Anhang	129
9.1	Literaturverzeichnis	129
9.2	Abbildungsverzeichnis	141
9.3	Tabellenverzeichnis	142
9.4	Klassifizierungskriterien für Prüfstände	143

1 Einleitung

Durch die ständig wachsenden Fähigkeiten der elektronischen Datenverarbeitung und der darauf aufbauenden mechatronischen Komponenten sowie durch die stärkere Durchdringung aller Entwicklungsprozesse mit Tools der virtuellen Produktentwicklung unterliegen die Technologien des Automobils und deren Entwicklungsprozesse gegenwärtig dramatischen Veränderungen. Gleichzeitig wachsen die Ansprüche der Kunden nach begeisternden, kostengünstigen, sicheren und komfortablen Fahrzeugen, die sich darüber hinaus dem zunehmenden Wettbewerb durch ein immer größeres Angebot auf dem Weltmarkt stellen müssen. Für die Produktentwicklung in der Automobilindustrie bedeutet das einen zunehmenden Entwicklungsaufwand einerseits und andererseits den Zwang, konsequent Entwicklungs- und Herstellungskosten zu reduzieren.

Ein möglicher Ausweg aus diesem Zielkonflikt ist die Neugestaltung der Entwicklungsprozesse, um die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Produktentwicklung unter Verwendung neuester Technologien zu steigern. Dabei spielt die virtuelle Produktentwicklung eine entscheidende Rolle: mit modernen Simulationsmethoden lassen sich viele Produkteigenschaften am Computer berechnen, bevor kosten- und zeitaufwendige Prototypen gebaut und untersucht worden sind. Somit werden Fehlentwicklungen früher erkannt, Kosten und Entwicklungszeit eingespart.

Wie Bild 1 für die Fahrdynamikentwicklung zeigt, unterstützt die Simulation in den frühen Phasen der Fahrzeugprojekte erste Auslegungen und Grundabstimmungen, hier durch Simulation von Bremsscheibentemperaturen oder von Spur-/Sturzkurven bei virtuellen Fahrmanövern. Die Berechnungsergebnisse von elementaren „Handformeln“ werden dadurch bestätigt und detailliert. In späteren Projektphasen trägt die Simulation durch Variantenberechnungen und Sensitivitätsanalysen auf Basis gemessener Größen zur Alternativenbewertung bei, beispielsweise bei der Kinematikoptimierung hinsichtlich Fahrverhalten und Fahrkomfort.

Die Ausgangsdaten für diese Variationsrechnungen werden heute überwiegend durch Prüfstands- und Fahrversuche ermittelt. Dazu zählen beispielsweise die Messung von Komponenteneigenschaften (z. B. Reibwert der Betriebsbremse) sowie die Beurteilung des Systemverhaltens unter veränderlichen Bedingungen (elastokinematische Kennlinien unter Brems-, Antriebs- oder Seitenkraft) auf Prüfständen. Genauso zählen subjektive und objektive Bewertungen der Fahrdynamik im Straßenversuch (Bremswegermittlung, Anlenkverhalten, ...) dazu.

Ergebnisse von Prüfstands- und Fahrversuchen sind heute die hauptsächliche Grundlage für den positiven Abschluss von Entwicklungsprojekten in einer Produktionsfreigabe.

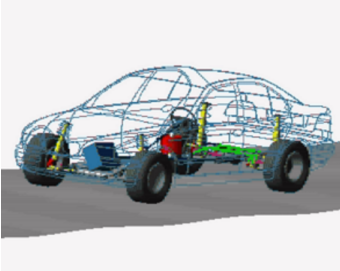


Simulation	Prüfstand	Fahrversuch
		
<p>Aufgaben</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Auslegung, Grundabstimmung ▪ Varianten-, Sensitivitätsanalysen ▪ Objektive Fahrdynamikbewertung <p>Beispiele</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatur bei Bremsvorgängen ▪ Berechnung von Spur-/Sturz-/Schräglauferkurven etc. ▪ Optimierung der Kinematik bzw. Elastokinematik bezüglich Fahrverhalten/Fahrkomfort 	<p>Aufgaben</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Messung von Komponenteneigenschaften ▪ Beurteilung des Systemverhaltens <p>Beispiele</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reibwert der Betriebsbremse ▪ Lenkgetriebeübersetzung über Zahnstangenhub ▪ Kennlinien der Elastokinematik ▪ Bewertung von Anzeige-/Bedienkonzepten (Fahr Simulator) 	<p>Aufgaben</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Feinabstimmung des Fahrwerks ▪ Gesamtfahrzeugverhalten ▪ Subjektive, objektive Fahrdynamik <p>Beispiele</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bremsweg aus v_{max} ▪ Anlenkverhalten ▪ Parkierkraftmessung ▪ Betriebslastenmessung

Bild 1: Aufgaben für Simulation, Prüfstände und Fahrversuch bei der Fahrdynamikentwicklung

Für die Zukunft verspricht die ständige Verbesserung der Simulationswerkzeuge und -modelle eine Ausdehnung der virtuellen Produktentwicklung. Ergebnisqualität und die Anzahl gesichert simulierbarer Effekte steigen kontinuierlich, woraus sich Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess ableiten lassen: die für die Entwicklung benötigten Prototypen, Erprobungsfahrten und Prüfstandsversuche sollen zunehmend durch Simulationsläufe ersetzt werden. Um den Entwicklungsprozess vor dem Hintergrund der sich verändernden Entwicklungsmethoden fortlaufend effektiv zu erhalten, muss das Prüffeld kontinuierlich angepasst werden und die Verteilung der Entwicklungsaufgaben zwischen Simulation und Versuch neu überdacht werden.

1.1 Zielsetzung

Ziel dieser Ausarbeitung ist die Gestaltung eines detaillierten Prüffeldkonzepts für die Fahrwerksentwicklung der Zukunft unter dem Einfluss der virtuellen Produktentwicklung. Dazu ist, ausgehend von der Ist-Situation, die optimale Verteilung der Entwicklungsaufgaben zwischen Simulation und Prüffeld der Zukunft zu definieren, um ein Höchstmaß an Effektivität und Effizienz in der Produktentwicklung zu erreichen. Darauf aufbauend ist ein Prüffeldkonzept zu erstellen, das den gestellten Anforderungen gerecht wird. Im Vergleich mit der Ist-Situation ist zu definieren, welche Prüfstände zum Einsatz kommen und welche Anforderungen sie erfüllen müssen. Für das Prüffeld ist eine räumliche und organisatorische Aufstellung auf der „grünen Wiese“ zu erarbeiten.

Zusätzlich sind die Auswirkungen weitergehender Leistungssteigerungen der Simulation abzuschätzen und ein darauf angepasstes Prüffeld zu generieren.

Dabei ist hauptsächlich die Funktionsentwicklung bezüglich Fahrdynamik (Fahrverhalten und Fahrkomfort) maßgebend. Andere Aspekte der Fahrwerkstechnik wie Herstellbarkeit, Package, Akustik, Betriebsfestigkeit, Missbrauch oder Crash stehen nicht im Vordergrund der Betrachtung. Genauso sind primär Prüfstandstechnik und rechnergestützte Simulationsmethoden zu berücksichtigen, während die Weiterentwicklung des Fahrversuchs sekundär einbezogen wird.

1.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise gliedert sich in fünf Abschnitte:

- Betrachtung der historischen Entwicklung von Versuch, Berechnung und Simulation in der Automobilindustrie
- Analyse des Stands der Technik von Versuch und Simulation in der Fahrwerksentwicklung
- Analyse der zukünftigen Veränderungen in der Automobilindustrie, der Entwicklungsmethoden und der resultierenden Auswirkungen auf Prüffeld bzw. Simulation
- Konzeption des Prüffelds der Zukunft bei „Fortgeschrittener Simulation“
- Konzeption eines Prüffelds bei „Vollständiger Simulation“

Bei der Analyse des Stands der Technik werden sowohl die Prüfstandstechnik als auch die Simulation betrachtet. Das Ziel ist, die jeweiligen Stärken und Grenzen zu bestimmen, sowie die heutige Aufgabenverteilung und den daraus resultierenden Produktentwicklungsprozess zu erfassen. Dazu dienen auf Seiten der Prüfstandstechnik Analysen einschlägiger Fachliteratur und Prüffeldern der Fahrwerksentwicklung sowie das Einbringen des Wissens von Prüfstands-Experten aus Automobil- und Prüftechnikindustrie.. Auf Seiten der Simulation gestaltet sich das Vorgehen gleichermaßen: auch hier gilt es, die eingesetzten Simulationstools sowie die Fachliteratur zu analysieren und Expertenwissen einzubeziehen.

Aus den in der Literatur aufgezeigten globalen Trends der Automobilindustrie werden die zukünftigen Veränderungen der Fahrwerkstechnik und ihre Auswirkungen auf Prüffeld bzw. Simulation abgeleitet.

Das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ beschreibt darauf aufbauend die zu erwartenden Leistungssteigerungen der Fahrwerksentwicklung der nächsten 10 bis 15 Jahre. Die in diesem Szenario optimale Aufgabenverteilung zwischen Simulation und Prüffeld wird geklärt und die dementsprechend erforderlichen Prüfmethode mit ihren Anwendungen abgeleitet. Das Prüffeld

im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ wird exemplarisch, ohne Berücksichtigung bestehender Rahmenbedingungen, aufgestellt und in ein imaginäres Entwicklungszentrum integriert.

Zur Untersuchung der maximalen, theoretisch erreichbaren Leistungsfähigkeit der Simulation wird schließlich die Vision „Vollständige Simulation“ entwickelt, die die Gleichwertigkeit der Aussagen von Versuch und Simulation postuliert. Entsprechend der nun geltenden Rahmenbedingungen wird die Aufgabenverteilung zwischen Simulation und Prüffeld abgewandelt und ein verändertes Prüffeld konzipiert. Das veränderte Prüffeld wird ebenfalls ohne Berücksichtigung bestehender Rahmenbedingungen exemplarisch aufgestellt und in das Entwicklungszentrum integriert.

2 Historische Entwicklung von Versuch, Berechnung und Simulation in der Automobilindustrie

Die ersten Automobile, die Ende des 19. Jahrhunderts gebaut wurden, waren Einzelanfertigungen, deren Bauteile während der Montage aneinander angepasst wurden. Einige Schwachstellen des Fahrzeugs konnten auch noch nach Fertigstellung ausgebessert werden. Das änderte sich, als Henry Ford im Jahre 1908 die Fließbandfertigung einführte und mit dem T-Modell hohe Stückzahlen erreichte. Voraussetzung dafür waren detaillierte und erprobte Konstruktionen sowie wiederholgenaue Fertigungseinrichtungen zur Einhaltung aller Bauteiltoleranzen.

Bis in die 30er Jahre arbeiteten die Konstrukteure weitgehend empirisch [19]. Sie führten zur Auslegung ihrer Konstruktionen diverse Berechnungen durch, so zum Beispiel die Berechnung der Knicklast eines Pleuels aus Länge, Flächenträgheitsmoment und Elastizitätsmodul. Dafür standen ihnen lediglich Rechenschieber, numerische Funktionstafeln und mechanische Hilfsmittel zur Verfügung. Die erste mechanische Rechenmaschine mit Programmsteuerung wurde zwar bereits 1822 durch Babbage vorgestellt. Es folgte die erste elektromechanische Zählmaschine mit Lochkarten 1890. Den Durchbruch der Rechnertechnik leitete aber erst 1942 die Vorstellung der ersten betriebsfähigen relaisbasierten Rechenanlage mit Programmsteuerung durch Konrad Zuse ein [49].

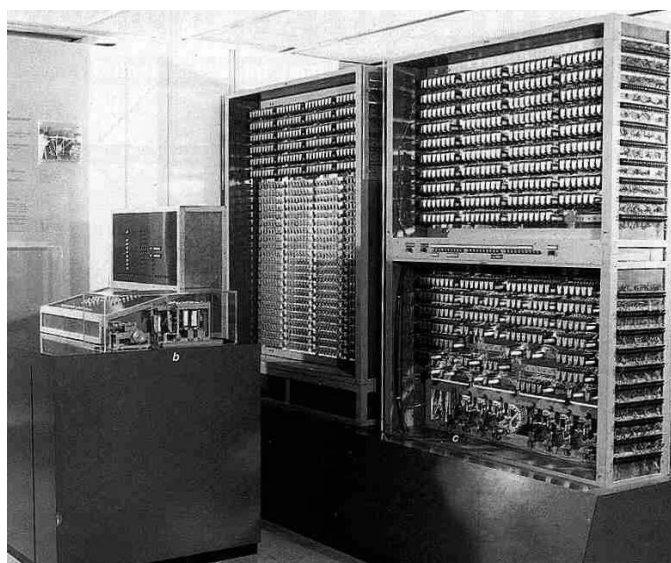


Bild 2: Rechenmaschine Zuse Z3 [200]

In der Zwischenzeit entwickelte sich das Automobil weiter: Karosserien wurden teil- bzw. selbsttragend ausgeführt und ihr Strömungswiderstand gesenkt, Synchron- und Automatikgetriebe sowie Aufladung, Einspritzung und Luftkühlung verbesserten den Antriebsstrang während Einzerradaufhängung und Gummi-Metall-Elemente die aktive Sicherheit und den Fahrkomfort steigerten.

Während des zweiten Weltkrieges erlangte der Treibstoffverbrauch einen hohen Stellenwert – besonders in Deutschland. Alternative Antriebe wurden erprobt. Parallel zur ersten Theorie der Fahrdynamik [147] kamen systematische Messungen auf [19]. Wichtiges Versuchsziel war die Wirkungsgradsteigerung, wie zum Beispiel bei der Messung des Reifenrollwiderstands auf einem Prüfstand mit ebener Fahrbahn im Jahre 1942 [197].

Nach dem zweiten Weltkrieg erlebte unter anderen auch die deutsche Automobilindustrie einen Aufschwung durch Massenproduktion technisch hochwertiger Fahrzeuge.

In den U.S.A. wurde 1946 der erste mit Elektronenröhren als Schaltelement ausgestattete Großrechner in Betrieb genommen, die erste Generation der Supercomputer.

„Die [...] Entwicklung [von Berechnungsverfahren bis ca. 1950] fand in der Praxis durch mangelnde numerische Auswertbarkeit enge Grenzen. [...] Nur Vorgänge und Zustände hoher Gleichförmigkeit (Symmetrie, Periodizität, Linearität) einfacher Geometrie und kleiner Parameterzahl ließen sich auswerten. Grundsätzliche Zusammenhänge konnten damit aufgezeigt werden. Die konkrete praktische Aufgabe blieb jedoch weiter der Erfahrung und dem Gefühl des Konstrukteurs sowie experimenteller Simulation überlassen.“ [139]

Die Computer der zweiten Generation (1957) wiesen statt Röhren Transistoren und magnetische Speicher auf. Die Entwicklung maschinenunabhängiger Programmiersprachen (COBOL, BASIC, FORTRAN, PASCAL) begann. Leistungsfähige Betriebssysteme für Multi-Task- und Multi-User-Umgebungen entstanden und Differenzen- und Zeitschrittverfahren (Finite-Element-, Finite-Volumen- und Boundary-Element-Verfahren) lösten die funktionsanalytischen Berechnungsverfahren ab und ermöglichten die ersten Simulationsmodelle [132]. Parallel dazu entstand die analog-elektronische Berechnung [26]. Sie kam in der Messsignalverarbeitung sowie in der Modellierung schwingungsfähiger Systeme zum Einsatz, konnte aber schließlich nicht mit den immer leistungsfähigeren Digitalrechnern Schritt halten. Eine weitere Steigerung der Aussagefähigkeit der Simulation wurde durch das „qualitative Erfassen und die Auslegung [Interpretation] der Rechenmaschinen-Resultate“ mittels „kinematographischer Aufnahmen“ [26] in Aussicht gestellt.

Zu dieser Zeit galten Stoßdämpferprüfmaschinen für einzelne Stoßdämpfer und Achsschwingungsprüfmaschinen für Gesamtfahrzeuge von Beissbarth [16] sowie mit Schlagleisten versehene Rollenprüfstände [67] als Stand der Technik in der Fahrwerksentwicklung.

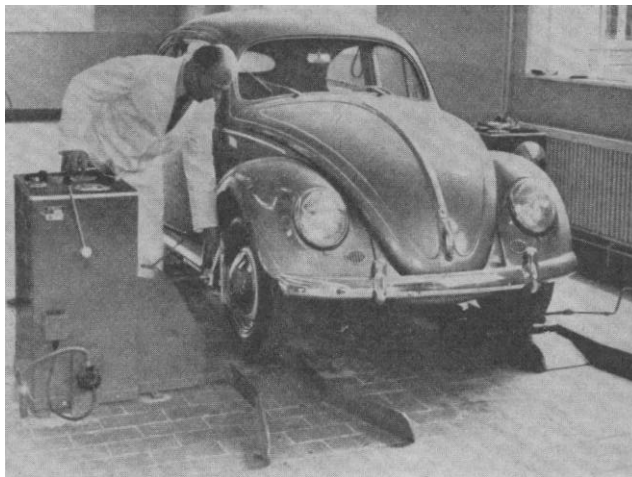


Bild 3: Achsschwingungsprüfmaschinen für Gesamtfahrzeuge von Beissbarth [16]

Rollen- bzw. Trommelprüfstände fanden generell vielfältige Verwendung, zum Beispiel zur Untersuchung von Kraft- und Schmierstoffen in Verbindung mit einer Klimakammer [21], zur Darstellung von Bremsvorgängen [57], [95] oder Reifenprüfungen [150]. Schwierigkeiten stellten die exakte Messung der einwirkenden Längskraft, die Regelung der Antriebsleistung sowie die korrekte Simulation von Roll- und Luftwiderstand bzw. Massenträgheit dar. Wurden 1963 noch Kurvenblätter zur Abschätzung der Abweichungen [95] vorgeschlagen, waren die Schwierigkeiten 1968 weitgehend gelöst: die Zugkraftmessung erfolgte über vorgespannte Kraftmeseinrichtungen oder Drehmoment-Messnaben, die Drosselklappe des Fahrzeugmotors bzw. elektrische Maschinen steuerten das Antriebsmoment. Der Rollwiderstand wurde über den Reifendruck angepasst, den Luftwiderstand regelte ein an die Laufrollen gekoppeltes Gebläse und Schwungmassen bzw. regelbare Elektromotore simulierten die Massenträgheit [37], [57], [69].

Für Bremsenprüfungen wurden neben Rollenprüfständen ab Anfang der 60er Plattenbremsprüfstände für Bremsungen aus bis zu 25km/h [57] eingesetzt, bei denen das Fahrzeug auf über Druckdosen abgestützte Platten auffährt und abbrems. Gegen Ende der 60er wurde die Prüfung von Bremsanlagen getrennt vom restlichen Fahrzeug auf Schwungmassenbremsenprüfständen [42], [150] zum Stand der Technik.

Ein besonders aufwändiger Gesamtfahrzeugprüfstand zur Untersuchung von Lenkungseigenschaften wurde 1968 von Hirao et. al. vorgestellt [64], [151]. Wie Bild 4 zeigt, steht das Fahrzeug mit seinen Rädern auf je einer angetriebenen Trommel (Durchmesser 1,5 m, Maximalge-

schwindigkeit 250 km/h) und ist in Längsrichtung mit zwei Halteseilen an der Hinterachse gefesselt. Die Quorfesselung des Fahrzeugs ist über einen Seilmechanismus realisiert, der den Lenkradwinkel stets proportional zur seitlichen Kursabweichung des Fahrzeugs einstellt.

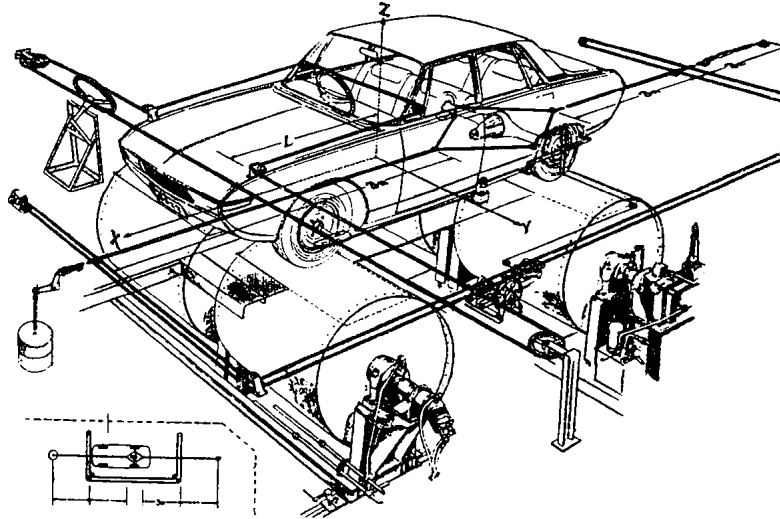


Bild 4: Prüfstand zur Untersuchung des Lenkverhaltens eines Kraftfahrzeugs

Mit dem Prüfstand wurden Lenkeigenschaften, Fahrstabilität und das menschliche Lenkverhalten untersucht. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Prüfstands- und Straßenversuch zu gewährleisten mussten folgende Veränderungen am Prüfstand vorgenommen werden:

- Anpassung des Luftdrucks zur Einstellung der Reifeneigenschaften auf der Trommel.
- Seitliche Teilung des vorderen bzw. hinteren Halteseils, um ein negatives Geradstellmoment beim Gieren (aus Trommelkrümmung und Schwerkraft) an der Hinterachse auszugleichen.
- Einbau einer Feder in den Lenkungsstrang, um das negative Geradstellmoment beim Gieren an der Vorderachse auszugleichen.
- Durch eine zusätzliche Vorrichtung werden die Fixpunkte der Halteseile stets so parallel verschoben, dass die seitliche Versetzung des Fahrzeugs auf den Rollen nicht zu einer Seitenkraft führt.

Trotz der aufwändigen Prüfstandsgestaltung waren die so ermittelten Prüfstandsergebnisse nur mit umfassender Nachbearbeitung auf Fahrversuche übertragbar.

Im Jahre 1965 wurde die Korrelation objektiver Kenngrößen des Fahrverhaltens mit der subjektiven Bewertung erfahrener Testfahrer vorgestellt [19], gleichzeitig kamen Computer der dritten Generation mit integrierten Schaltungen (Chips) auf den Markt und stellten eine bis dahin unbekannte Rechenleistung zur Verfügung. In der Automobilentwicklung wurde die FEM erstmals im

Rahmen eigenentwickelter Spezialprogramme (wie zum Beispiel ESEM bei Daimler-Benz [132]) eingesetzt. An der University of Michigan wurde 1969 das Programm DRAM zur Analyse zweidimensionaler mechanischer Systeme mit beliebig vielen Freiheitsgraden im Zeitbereich veröffentlicht, der Vorläufer von ADAMS [9].

Anfang der 70er geriet der Automobilmarkt aufgrund der zunehmenden Verkehrsdichte unter Druck durch marktexterne Kräfte, u. a.:

- Gesetzliche Begrenzung schädlicher Abgasbestandteile und Einführung des Katalysators wegen vermehrter Abgasbelastung
- Geschwindigkeitsbeschränkungen und „Sicherheitsautos“ wegen steigender Anzahl von Verkehrsoffern

Gleichzeitig brachte die Kommerzialisierung der Finite Element Verfahren mit Universal-systemen (NASTRAN, ANSYS) den Durchbruch der rechnerischen Simulation in der Automobilindustrie. Im Bereich der Karosserie konnten Steifigkeiten, Eigenfrequenzen und Spannungen unter Betriebslasten erstmals mit vertretbarem Aufwand rechnerisch ermittelt werden. Für schwingfähige und regelbare Mehrkörpersysteme mit großen Verschiebungen entwickelten sich leistungsfähigere Programme wie NEWEUL und das 1973 veröffentlichte ADAMS, die den weiten Bereich der Fahrdynamik abdecken.

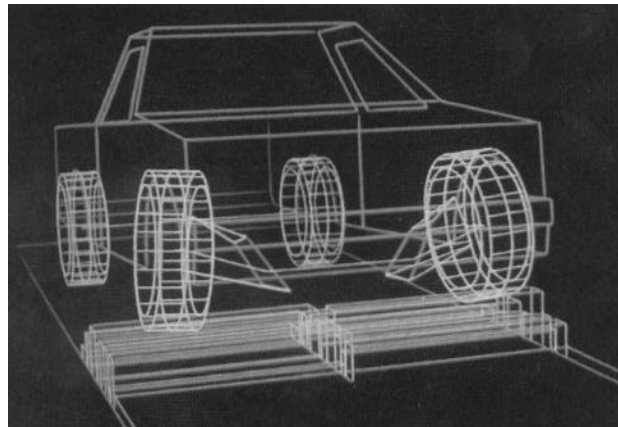


Bild 5: Simulation der Überfahrt eines Fahrzeugs über ein großes Hindernis mit ADAMS [9]

Beim Bau des neuen Porsche Entwicklungszentrums wurden 1973 ein Klima-Blaskanal, der eine Klimakammer mit einem Trommelprüfstand mit elektrisch simulierten Fahrwiderständen kombiniert, und eine Hydropulsanlage für Schwingungsuntersuchungen an Fahrwerk und Aufbau installiert. Für Reifenuntersuchungen fanden zu der Zeit verstärkt Trommelprüfstände mit Innen- bzw. Außenfahrbahn [20], [22], [150] Verwendung. Dabei wurden Trommeldurchmesser

bis zu 4,5m und Höchstgeschwindigkeiten bis zu 250km/h realisiert. Die bereits 1942 eingesetzte Flachbahntechnik [197] fand kaum Beachtung. Nach Bröder et. al. eigneten sich Flachbahnprüfstände „mehr für die Übertragung von Kräften über das drehende Rad auf das Fahrgestell als für die Untersuchung der zwischen Rad und Fahrbahn auftretenden Kräfte“ [22]. In neuerer Zeit wird diese Technik anders bewertet (vgl. Kapitel 3.1.5).

Die Erdölverknappungen von 1973/74 und 1979 hatten Wirkungsgradverbesserungen und die Erprobung alternativer Antriebsenergien zur Folge. Bis zu Beginn der 80er Jahre hielten technische Verbesserungen wie

- Raumlagerachsen
- Antiblockiersystem
- Allradantrieb
- automatische Antriebsschlupfregelung

zur Verbesserung der Fahrdynamik und der aktiven Sicherheit Einzug.

Auf den Tagungen des VDI zum Thema Berechnung im Automobilbau [178], [179] und in anderen Veröffentlichungen wurden neueste Details und Berechnungsmethoden vorgestellt, so zum Beispiel ein „Fahrdynamikmodell, das durch ein Differentialgleichungssystem mit bis zu 30 Unbekannten [...] beschrieben wird“ [137]. Die relevanten Parameter des Systems sind als Eingangsgrößen zuvor gemessene oder abgeschätzte Fahrzeugdaten wie Massen, Elastizitäten, Dämpfungs-, Lenkungs- und Kinematikdaten der Radaufhängung. Besondere Beachtung findet das Reifenmodell, da es das Verhalten des Gesamtmodells stark beeinflusst.

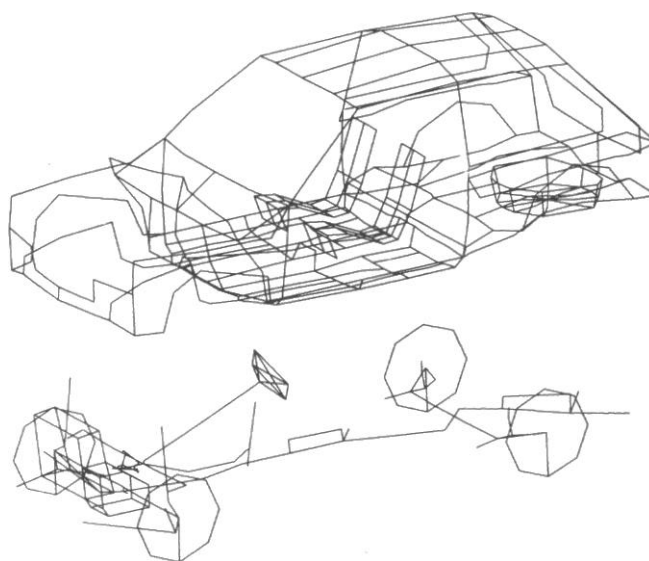


Bild 6: Drahtmodell Darstellung eines Fahrdynamikmodells [137]

Ein weiteres Beispiel ist das „Forschungsauto 2000“ der VW Forschung, mit dem unter anderem die Eignung der FEM für die statische Karosserieanalyse nachgewiesen werden sollte. Das Karosseriemodell wurde vollständig aus Schalenelementen aufgebaut und besaß 19.000 Knotenpunkte und 114.000 Freiheitsgrade. „Die Berechnung der statischen Lastfälle Torsion und Biegung zeigten gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen des Versuchs“ [164]. Weiterhin wurde ein auf FEM basierendes Verfahren entwickelt, das die Berechnung der durch Motoranregung über die Karosserie erzeugten Schalldruckverteilung in der Fahrgastzelle gestattet. Zur Berechnung des Einflusses veränderter Dämpferabstimmung auf Aufbaubeschleunigung und Radlastschwankung diente ein 5000-Freiheitsgrad-FE-Modell bzw. ein 16-Freiheitsgrad-Mehrkörpermodell mit gemessenen Feder- und Dämpferkennlinien, wobei die nichtlinearen Frequenz- und Amplitudenabhängigkeiten besondere Berücksichtigung fanden. Neuartige Berechnungsverfahren und -anwendungen waren damals das Bremsenquietschen sowie die Strömungssimulation nach Navier-Stokes bzw. Euler mit dem Zeitschritt-Finite Volumen Verfahren – begünstigt durch die Einführung leistungsfähiger Vektorrechner [139].

Über die Fahrdynamiksimulationsprogramme AUTDYN [177] und ADAMS [9] wurde 1984 berichtet und dabei ein Ausblick auf zu erwartende Neuerungen gegeben: graphischer Preprozessor, Schnittstellen zu CAD Systemen (Ziel: Austausch von geometrisch-mechanischen Daten, wie Schwerpunkte, Massen und Massenträgheitsmomente) und FEM Programmen (Übergabe der statisch oder dynamisch wirkenden Kräfte an das FEM Programm bzw. der Berücksichtigung elastischer Bauteileigenschaften in ADAMS).

Die Rechnertechnik hielt ebenfalls verstärkt Einzug in den Prüfbetrieb: der Computer übernahm immer mehr Aufgaben wie Prozessführung, aktuelle Darstellung von Messdaten, graphische Ausgabe zur Versuchsauswertung sowie Datenbankanbindung zur Speicherung der Versuchsergebnisse [164]. Die Programmierbarkeit des Rechners ermöglichte dabei einen hohen Automatisierungsgrad sowie die spezielle Anpassung der Prüfung an die jeweiligen Anforderungen [186]. Der Ausschluss von Bedien- und Ablesefehlern gewährleistete erhöhte Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit [99]. Das Fernziel der in der Automobilindustrie angewendeten Rechnertechnik wurde in [137] dargestellt als die „Kopplung von Konstruktion, Versuch, Berechnung und weiteren Bereichen über gemeinsame, interaktiv ansprechbare Datenbanken (CAE)“ zur weiteren Steigerung von Effektivität und Effizienz im Produktentwicklungsprozess [19].

Beispiele für technologische Weiterentwicklung der Prüftechnik für Luftreifen waren die 1982 fertiggestellte Prüfanlage des IKK in Hamburg [157], der Flachbahnprüfstand der TU Berlin, der

1986 seinen Betrieb aufnahm [168] und die von Daimler-Benz und der Dornier-System GmbH entwickelte Flachbahneinheit, über die 1989 berichtet wurde [158].

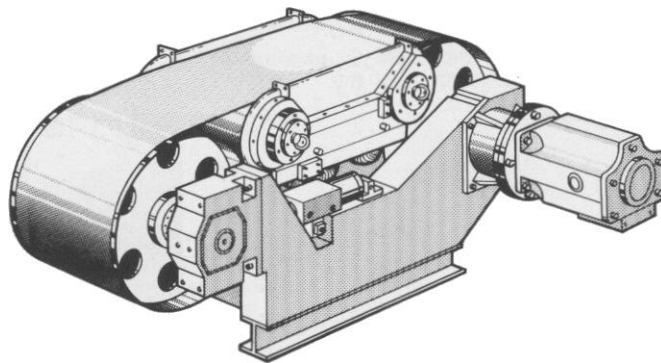


Bild 7: Flachbahneinheit [158]

Die Besonderheit der IKK-Reifenprüfanlage bestand in der Möglichkeit, an einer Trommel bis zu 4 Reifen dynamisch, d.h. instationär zu prüfen. Dafür waren pro Rad drei Hydropulszylinder vorgesehen, die Radlast, Schräglaufwinkel und Sturz mit Frequenzen bis zu 30Hz regelten. Die so gewonnenen Reifenmessdaten sollten in einem parallel laufenden Echtzeit-Fahrdynamikmodell verwendet werden, das einen Fahr Simulator bediente. Der Flachbahnprüfstand des Instituts für Maschinenkonstruktion – Bereich Landtechnik der TU Berlin war für Reifen bis zu 2m Durchmesser und Radaufstandskräfte bis 30 kN bei geringen Seitenkräften ausgelegt. Gleichzeitig bot der Prüfstand die Möglichkeit der vertikalen Anregung des Flachbandes, was realistischere Prüfbedingungen und damit bessere Versuchsergebnisse bedeutete. Das Flachbahnmodul von Daimler-Benz wurde auf Einsetzbarkeit in verschiedenen Prüfständen ausgelegt. Der Grund für die Verwendung einer Flachbahneinheit lag in dem Bestreben, Radkräfte wie auf der Straße über das gelenkte, abrollende Rad in die Achse einleiten zu können. Andere Technologien schienen dafür nicht geeignet.

Auf Seiten der Bremsenprüftechnik wurde 1988 ein Rollenprüfstand zur Darstellung der Bremsung auf Eis vorgestellt [170]. Da konventionelle Reifenprüfstände unzureichend waren, wurde ein neuartiges Konzept realisiert: den in der Realität zwischen Reifen und Fahrbahn auftretenden Schlupf brachte auf dem Prüfstand ein Asynchronmotor auf, während Reifen und Rolle ohne Schlupf abrollten. Dazu musste das Kennfeld des Elektromotors genau auf den bei einer Glatt-eisbremsung vorherrschenden Reibwertverlauf angepasst werden.

Anfang der 90er bestand die Aufgabe von CAE nach [165] darin, das Austesten eines Konstruktionsentwurfs in der Versuchsphase durch Simulationen im Rechner bereits in der Vorentwicklungsphase abzusichern. Dazu braucht man außer schnellen Rechnern physikalisch präzise und

numerisch stabile Computerprogramme sowie eine integrierte und verzögerungsfreie Datenvor- und -nachbereitung.

Mitte der 90er Jahre hielt eine neue Technologie verstärkt Einzug: Hardware in the Loop (HiL), sozusagen die Kombination aus Simulation und Versuch. Ein Beispiel ist der bei BMW realisierte ABS HiL-Prüfstand [45], der das reale ABS-System in den Simulationskreislauf einbezieht.

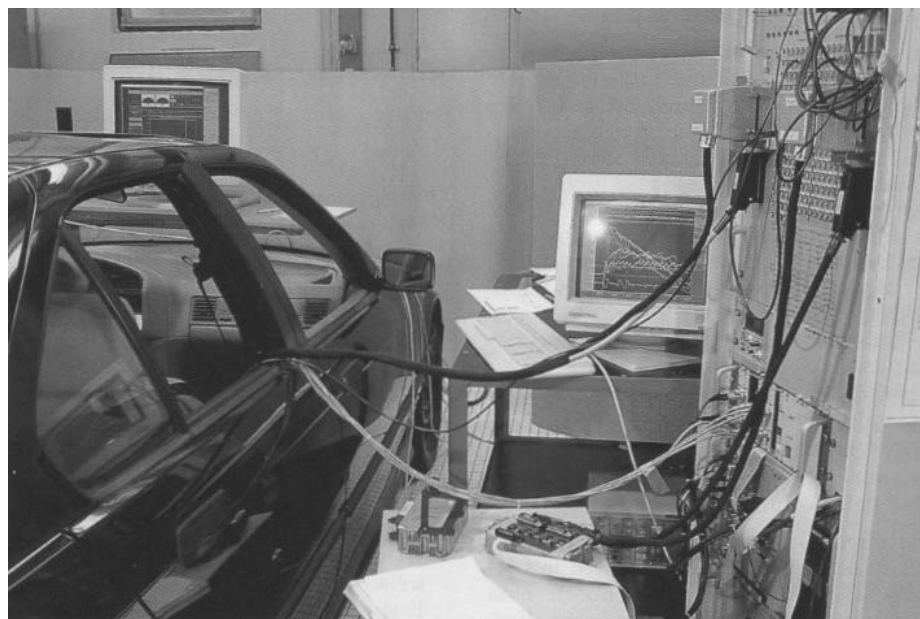


Bild 8: ABS HiL-Prüfstand [45]

Das reale ABS-System erhält Raddrehzahlssignale von einem Simulationsrechner und verarbeitet sie zu Ventilansteuersignalen. Die dadurch modulierten Radbremsdrücke werden gemessen und an den Simulationsrechner weitergeleitet, der sie als ständig aktualisierte Eingangsvariablen in die Fahrdynamiksimulation zurückführt. Die Motivation für die Anwendung von HiL war in diesem Fall der unverhältnismäßig hohe Aufwand, der für die Übertragung der jeweils aktuellen ABS Logik in das Simulationssystem und Modellierung des kompletten Bremssystems mit Betätigung, Hydraulikaggregat etc. entstanden wäre. Die HiL Technologie steigert somit den Realitätsgrad der Simulation bei verhältnismäßig geringem Aufwand für Modellbildung.

*

Wie der geschichtliche Abriss zeigt, zieht sich die Steigerung des Realitätsgrades bzw. der Aussagesicherheit durch die gesamte Chronologie von Versuch, Berechnung und Simulation. Die Automobilindustrie selbst war in der Vergangenheit geprägt von Wachstum und Innovation, ausgelöst durch Forderungen von Markt, Wettbewerb, Politik, Sicherheit und Umweltschutz. Begleitet wurde sie von einem vielseitigen und qualifizierten Angebot an Berechnungsverfahren,

so dass sich Eigenaktivitäten der Automobilindustrie weitgehend auf Verfahrensanpassung, Modellbildung und Berechnungsdurchführung konzentrieren konnten. Die Verfahrensentwicklung ist derzeit fokussiert auf die Verbesserung und experimentelle Absicherung der Modelle, auf die Kombination der unterschiedlichen Verfahren zur selben Aufgabenstellung sowie auf die Integration in umfassendere CAD-, PDM¹- und Informationssysteme. Diese Entwicklung wurde hauptsächlich durch die Einführung leistungsfähiger Computer möglich gemacht. Waren bis etwa 1965 noch die Rechenhilfsmittel als Engpass zu bezeichnen, liegt heute der Engpass vielmehr bei der „qualifizierten Modellentwicklung für numerische Simulation.“ [139].

Auch die Fortschritte der Prüftechnik sind auf zunehmende Verbesserung der Prüfbedingungen zurückzuführen. Wurden früher Gesamtfahrzeugprüfstände für die Prüfung von Komponenten verwendet, entstanden in der Folge vermehrt Prüfstände für Einzelkomponenten, die den Spezialisierungsgrad der Prüfung steigerten und gleichzeitig den Aufwand reduzierten. Ebenso fand eine Steigerung der Gesamtaussagefähigkeit durch den Ausbau von System- und Gesamtfahrzeugprüfständen statt. Ein Beispiel dafür sind Achsmessstände, die, um hydraulische Kräfteinheiten erweitert, heute in der Lage sind, die Elastokinematik kompletter Fahrzeuge unter dynamischer Belastung zu analysieren [1]. Ein weiteres Beispiel ist die Abbildung vernetzter Fahrwerkregelsysteme durch die Koppelung spezialisierter Prüfmodule in einem HiL Systemverbund.

Die Fortschritte der Versuchstechnik wären ohne die Möglichkeiten der Elektronik bzw. Rechner-technik nicht möglich gewesen, genauso wie die Weiterentwicklungen von Berechnung und Simulation. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass der positive Einfluss weiter anhält, insbesondere in der Simulationstechnik. Die Abschätzung der konkreten Ausprägungen sowie die Organisation des optimalen Zusammenspiels von Versuch, Berechnung und Simulation ist Gegenstand der folgenden Kapitel.

¹ PDM = Produkt Daten Management; allg. Informationssystem, das alle entwicklungsrelevanten Daten verwaltet und im Netzwerk zugänglich macht.

3 Stand der Technik in der Fahrwerksentwicklung: Versuch und Simulation

In der Fahrwerkstechnik werden verschiedene Entwicklungswerkzeuge verwendet, wenn Konzepte bzw. Konstruktionen nach ihrer Funktionsfähigkeit zu bewerten und auszuwählen sind. Zur Anwendung kommen Versuchsfahrten, Prüfstände, rechnergestützte Simulationen und Hardware in the Loop. Da der Fahrversuch aufgrund der thematischen Eingrenzung dieser Arbeit nicht explizit betrachtet wird, untersucht die folgende Analyse des Stands der Technik die Themengebiete Prüfstandstechnik, Simulationsmethoden und Hardware in the Loop.

3.1 Funktionsprüfstände

3.1.1 Repräsentatives Prüffeld der Fahrwerksentwicklung

Eine Übersicht über den Stand der Prüfstandstechnik lässt sich anhand eines repräsentativen Beispiels aus der Automobilindustrie ableiten. Das betrachtete Prüffeld umfasst die in Bild 9 zusammengefassten Prüfstände:

- Bremsenprüfstände für Betriebs- bzw. Feststellbremsen, zur Prüfung von Bremsscheiben, -belägen und -satteln
- Prüfstände für Federn, Dämpfer, Stabilisatoren, Fahrwerk- und Aggregatelager zur Ermittlung spezifischer Kennlinien wie Federrate über Einfederung oder Dämpfungskraft über Federweg
- Pedalwerk und- Bremsbetätigungsprüfstände zur Beurteilung der Brems- und Kupplungsbetätigung sowie des Bremskraftverstärkers
- Lenkungsprüfstände zur Beurteilung von Komponenten des Lenksystems
- Reifenprüfstände zur Bestimmung von Reifeneigenschaften in Form von Kennwerten und Kennlinien sowie zur Beurteilung des Verschleißverhaltens
- Gesamtfahrzeugprüfstände zur Ermittlung integrierter Eigenschaften wie Fahrzeugschwerpunktlage und Massenträgheitsmomente, Kenngrößen der Achskinematik (Rad-erhebungskurven) sowie Tieftemperaturverhalten

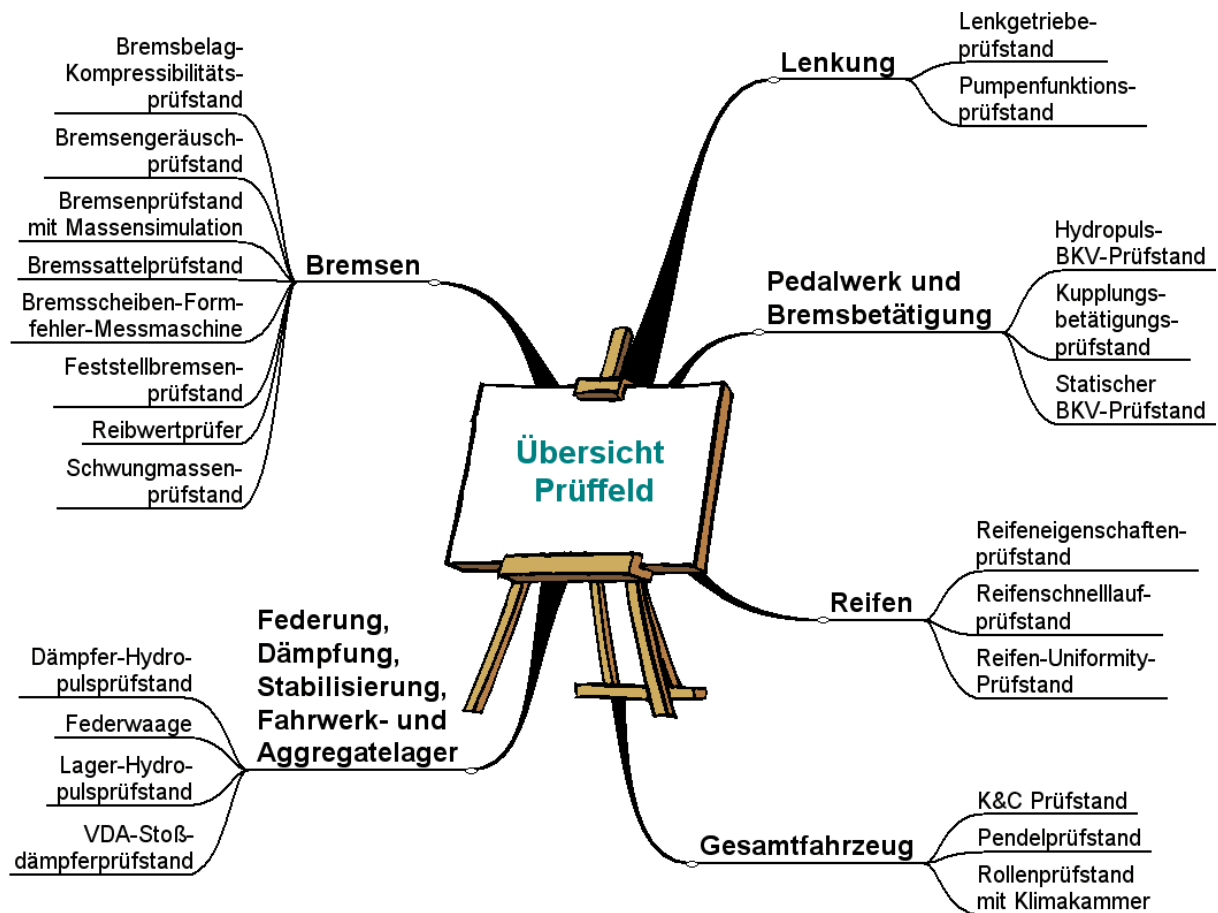


Bild 9: Übersicht eines repräsentativen Prüffelds der Automobilindustrie

Weiterführende Details zu den einzelnen Prüfständen sind in Kapitel 3.1.3 dargestellt. Zusätzlich bieten namhafte Prüfstandshersteller wie MTS [208] und IST [202] weitere interessante Prüfstandskonzepte an:

- Dynamischer K&C Prüfstand² [1]
Ein dynamischer K&C Prüfstand ist im Vergleich zu „herkömmlichen“ quasistatischen K&C Prüfständen auch in der Lage, dynamische Betriebszustände (bis 35 Hz) zu prüfen.
- Halbachkinematikprüfstand [214]
Einleitung von Kräften und Momenten in die Radaufhängung über Radersatzsysteme.
- Reifenflachbahnprüfstand
Bildet die Fahrbahn im Vergleich zu Trommelprüfständen deutlich realitätsnäher ab.
- Vertikaldynamikprüfstand
Einleitung von Vertikalschwingungen in die stehenden Räder eines frei schwingenden Fahrzeugs mit vier senkrecht stehenden Hydropulszylindern.

² K&C = Kinematics and Compliance; Prüfstand zur Analyse der Fahrwerkskinematik. Vgl. [97]

3.1.2 Kriterien zur Klassifikation und Bewertung von Prüfständen

Neben der oben skizzierten, gängigen Einteilung von Prüfständen nach dem Versuchsobjekt ist eine Klassifikation bzw. Bewertung nach weiteren, in Bild 10 dargestellten Kriterien möglich.

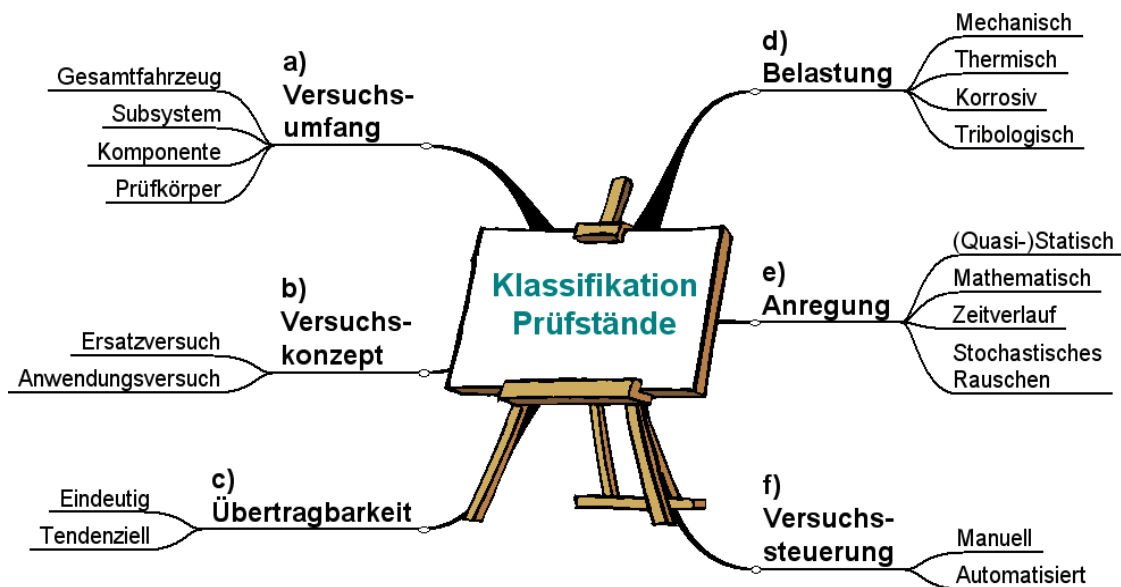


Bild 10: Klassifikation von Prüfständen

Im Folgenden werden die Kriterien erläutert und Beispiele aufgezeigt. Genaue Definitionen der Kriterien sind im Anhang, Kapitel 9.4, nachzulesen.

zu a) Versuchsumfang

Gesamtfahrzeugprüfstände prüfen komplette Fahrzeuge. Beispiele dafür sind Achsmesststände [97], Rollenprüfstände [62], [183], Betriebsfestigkeitsprüfstände wie in [27], [40], [152] sowie der in [44] erläuterte Akustikprüfstand.

Ein (Sub)System ist ein Verbund mehrerer Komponenten, zum Beispiel eine Vorderachse oder eine Bremsanlage. Als *Systemprüfstände* sind dementsprechend die Bremsengeräuschprüfstände [134], [190], sowie die kombinierten Motor- und Getriebeproofstände [58], [62], [183] und die Achs- bzw. Halbachsprüfstände [7] zu betrachten.

Als *Komponenten* werden Einzelbauteile oder abgeschlossene Baugruppen bezeichnet, zum Beispiel Stossdämpfer, Fahrwerkslager oder Reifen. Diesen einzelnen Komponenten zugeordnete Prüfstände sind VDA-Stoßdämpferprüfstände [25], [34], Hydropulsprüfstände für Fahrwerkslager und Reifentrommel- oder -flachbahnprüfstände [7], [196].

Prüfkörper sind Gegenstände, die eine andere Form als das eigentliche Bauteil haben. Prüfstände für Prüfkörper werden in der Fahrdynamikentwicklung nicht eingesetzt. Ihr Einsatzgebiet ist zum Beispiel die Werkstoffentwicklung, bei der u. a. Zugproben zu untersuchen sind.

zu b) Versuchskonzept

Bei einem synthetischen *Ersatzversuch* wird Wert auf einen möglichst einfachen Aufbau gelegt. Zur bestmöglichen Komplexitätsreduktion werden beim Ersatzversuch meist isolierte Eigenschaften des Prüflings geprüft. Beispiele sind K&C Prüfstände und Achsmessstände [7], [97], die synthetische Eigenschaften der Achskinematik (Spur- und Sturzkurven) messen, mit deren Hilfe das Fahrverhalten des Fahrzeugs indirekt bewertet wird.

Bei einem *Anwendungsversuch* liegt der Fokus auf einer möglichst exakten Wiedergabe der Prüflingsumgebung im Realbetrieb, um direkt das Verhalten nachzustellen und zu bewerten. Beispiele sind Bremsen- oder Reifenflachbandprüfstände, bei denen Funktionseigenschaften und Kennwerte bei verschiedenen realitätsnahen Betriebszuständen gemessen werden, sowie Betriebsfestigkeitsversuche wie [27], [40], [152], bei denen reproduzierte Straßenbelastungen auf das Fahrzeug wirken.

zu c) Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse

Bei *eindeutiger* Übertragbarkeit kann aus den Prüfstandsergebnissen direkt auf das Einsatzverhalten des Prüflings im realen Betrieb geschlossen werden. Bei *tendenzieller* Übertragbarkeit sind Erfahrungswerte nötig, um die Bedeutung der Prüfstandsergebnisse für das Straßenverhalten interpretieren zu können. Zum Beispiel erzeugen die Bremsengeräuschprüfstände [134], [190] eindeutig übertragbare Eigenschwingungen des Bremssystems. Die Schwingungseigenschaften der übrigen Achsbauteile sowie der Karosserie werden an diesen Prüfständen nicht dargestellt, daher sind nur tendenzielle Aussagen möglich. Durch Integration zusätzlicher Fahrwerksbauteile (insbesondere Achskinematik und Elastomerlager) lassen sich weitergehende eindeutige Aussagen erreichen.

zu d) Belastung

Die verschiedenen, in der Fahrwerksentwicklung üblicherweise auftretenden Belastungsarten sind: *mechanisch*, *thermisch*, *korrosiv* und *tribologisch*. Prinzipiell sind weitere Belastungen denkbar, die allerdings in der Fahrwerksentwicklung nicht eingesetzt werden. Beispielhaft seien elektrische, magnetische und erosive Belastung genannt.

zu e) Anregung

„Anregung“ beschreibt die Signalcharakteristik der Prüfungen. *Quasistatische* Prüfungen werden eingesetzt, um statische Kennlinien aufzuzeichnen. Signale *mathematischer* Funktionen (zum Bei-

spiel Sprung-, Rampen- oder Sinusfunktion) bzw. *stochastisches Rauschen* dienen der Bestimmung des dynamischen Verhaltens. *Zeitfunktionen* finden Verwendung bei Nachfahrversuchen [27], [62].

zu e) Versuchssteuerung

Die Prozesssteuerung des Versuchsablaufs geschieht entweder durch *manuellen Eingriff* oder *automatisiert* – je nach Anwendung als Steuerung oder Regelung.

3.1.3 Erreichbare Genauigkeit der Prüfstandstechnik

In den folgenden Tabellen sind die Eigenschaften der Prüfstände des oben angesprochenen repräsentativen Prüffelds zusammengestellt. Tabelle 1 nennt zu jedem Prüfstand die realisierten Stell- und Messgrößen, wobei Stellgrößen durch Fettdruck gekennzeichnet werden. Zu den Stell- und Messgrößen sind die korrespondierenden Wertebereiche und die maximal mögliche Dynamik angegeben. Tabelle 2 erfolgt eine Bewertung der Prüfstände nach den wichtigsten Klassifikationskriterien aus Kapitel 3.1.2: Versuchsumfang, Versuchskonzept und Ergebnisübertragbarkeit. Die Spalte „PEP Phasen“ gibt an, in welchen Abschnitten des Entwicklungsprozesses die Prüfstände eingesetzt werden, während die Spalte „Ergebnisverwendung“ die Weiterverarbeitung der Prüfstandsergebnisse aufzeigt. Unter der Überschrift „PDM“ ist angegeben, in wieweit die Prüfstände an das unternehmensweite PDM System des Fahrzeugherstellers gekoppelt sind.

Zur besseren Übersicht ist die Tabelle nach den in Kapitel 3.1.1 eingeführten Themengebieten gegliedert.

Prüfstand	Stell- und Messgrößen	Stell- und Messbereich	Auflösung +/-	Dynamik
Themengebiet Bremsen				
Bremsbelag-Kompressibilitätsprüfstand	Druck Temperatur Verformungsweg	0,2 - 100 kN 600 °C 10 mm	200 N 2 °C 2 µm	70 kN/s 20 - 400 °C ~ 10 min -
Bremsengeräuschprüfstand	Bremsdruck Brems- bzw. Antriebsmoment Raddrehzahl Radaufstandskraft Umgebungstemperatur Belagtemperatur Frequenz der Schallentwicklung Pegelhöhe der Schallentwicklung Luftfeuchtigkeit	200 bar 2000 Nm 2200 Upm 6 kN 250 °C 650 °C 800 - 1600 Hz 120 dB 100 % r. F.	0,5 bar 50 Nm 0,1 Upm 6 N 0,5 °C 2 °C 0,1 Hz 0,1 dB 2 % r. F.	~ 600 bar/s ~ 3600 Nm/s 196 kW quasistatisch quasistatisch - - - quasistatisch
Bremsenprüfstand mit Massensimulation	Drehzahl Bremsdruck Bremsmoment Massensimulation Brems Scheibentemperatur Bremsdauer	2500 Upm 200 bar 4000 Nm 10 - 120 kgm ² 650 °C unbegrenzt	0,1 Upm 0,5 bar 100 Nm 0,1 kgm ² 5 °C 0,01 s	315 kW ~ 600 bar/s ~ 3600 Nm/s stationär - 0,01 s
Bremssattelprüfstand	Bremsdruck Umfangskraft Volumenaufnahme Aufweitung	200 bar 2 kN 20 cm ³ 20 mm	0,01 bar 2 N 0,01 cm ³ 0,01 mm	quasistatisch quasistatisch - -
Brems Scheiben-Formfehler-Messmaschine	Drehwinkel Oberflächenrauigkeit Ebenheit, Rechtwinkligkeit	360 ° 0,1 - 50 µm 5 mm	0,1 ° 1 µm 1 µm/0,1 m	quasistatisch - -
Feststellbremsenprüfstand	Bremsscheibendrehzahl Hangabtriebs- / Bremsmoment Anzugskraft Feststellbremse Bremsdrücke Hand- und Seilkräfte Brems Scheibentemperatur	2600 Upm 5200 Nm 8 kN 120 bar 3,2 kN 650 °C	0,1 Upm 160 Nm 8 N 0,1 bar 32 N 5 °C	140 kW ~ 3600 Nm/s 0 - 3,2 kN ~ 2 s ~ 600 bar/s - -
Reibwertprüfer (RWP 1 - 3)	Bremsscheibendrehzahl Bremsdruck Bremsmoment Kammertemperatur Reibwert Temperatur Bremsflüssigkeit	660 Upm 100 bar 1000 Nm -10 - 200 °C unbegrenzt 300 °C	0,1 Upm 0,1 bar 25 Nm 0,5 °C 0,01 5 °C	stationär ~ 600 bar/s ~ 3600 Nm/s stationär - -
Reibwertprüfer (RWP 4, 5)	Bremsscheibendrehzahl Bremsdruck Bremsmoment Massensimulation Kammertemperatur Reibwert Brems Scheibentemperatur Temperatur Bremsflüssigkeit	2400 Upm 100 bar 3000 Nm 10 - 80kgm ² -10 - 200 °C unbegrenzt 650 °C 300 °C	0,1 Upm 0,1 bar 75 N m 0,1 kgm ² 0,5 °C 0,01 5 °C 5 °C	256 kW ~ 600 bar/s ~ 3600 Nm/s stationär stationär - - -
Schwungmassenprüfstand	Drehzahl Bremsmoment Bremsdruck Massensimulation Reibwert Temperaturen Dickenänderung Brems Scheibe	2000 Upm 4000 Nm 180 bar 10 - 120 kgm ² unbegrenzt 500 °C 5 mm	0,1 Upm 100 Nm 0,1 bar 0,1 kgm ² 0,01 5 °C 10 µm	336 kW ~ 3600 Nm/s ~ 600 bar/s stationär - - -

Tabelle 1/Teil 1: Eigenschaften eines repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung

Prüfstand	Stell- und Messgrößen	Stell- und Messbereich	Auflösung +/-	Dynamik
Themengebiet Federung, Dämpfung, Stabilisierung Fahrwerk- und Aggregatelager				
Federwaage	Federweg Federkraft	1200 mm 20 kN	0,25 mm 20 N	500 mm/min -
Dämpfer-Hydropuls- prüfstand (HP2)	Weg Kraft	250 mm 25 kN	0,25 mm 5 N	2,5 m/s 20 Hz
Lager-Hydropuls- prüfstand (HP1)	Kraft Weg Kammertemperatur Steifigkeit Verlustwinkel	25 kN 25 mm 80 °C unbegrenzt unbegrenzt	50 N 0,025 mm 0,5 °C 7,5 N/mm 1 °	400 Hz 400 Hz 20 - 80 °C ~ 20 min - -
VDA-Stoßdämpfer- prüfstand	Dämpferweg Drehzahl Dämpfergeschwindigkeit Dämpferkraft	5 - 100 mm 0,5 - 400 Upm 2,0 m/s 10 kN	25 / 50 / 75 / 100 1 Upm 0,01 m/s 2 N	stationär 0,5 - 400 Upm stationär -
Themengebiet Lenkung				
Lenktriebeprüfstand	Lenkwinkel Zahnstangenweg Zahnstangenkraft Lenkmoment Hydrauliköldruck Hydraulikölvolumenstrom Hydrauliköltemperatur	unbegrenzt +/- 200 mm 10 kN 50 Nm 180 bar 17 l/min 10 - 90 °C	0,1 ° 1 µm 0,3 N 1 mNm 5 mbar 0,1 l/min 3 °C	90 °/s 30 Hz - 30 Hz 900 Hz (Messung) stationär stationär
Pumpenfunktions- prüfstand	Drehmoment Pumpendrehzahl Leitungsdruck Öltemperatur Volumenstrom	50 Nm 8500 Upm 200 bar 40 - 130 °C 63 l/min	1 Nm 1 Ump 0,3 bar 0,3 °C 0,02 l/min	quasistatisch stationär quasistatisch stationär -
Themengebiet Pedalwerk und Bremsbetätigung				
Hydropuls BKV- Prüfstand	Weg Kraft Unterdruck Temperatur Hydraulische Drücke	50 / 250 mm 10 kN 300 bar -40 - 150 °C 200 bar	0,5 / 2,5 mm 20 N 0,3 bar 3 °C 0,3 bar	20 Hz 20 Hz stationär stationär -
Kupplungsbetätigungs- prüfstand	Pedalweg Pedalkraft Ausrückweg der Kupplung	300 mm 1 kN 300 mm	3 mm 20 N 3 mm	quasistatisch - -
Statischer BKV- Prüfstand	Bremspedalweg Unterdruck Bremspedalkraft Drücke in Druckstangen- und Schwimmkreis	300 mm 140 bar 1 kN 140 bar	3 mm 0,3 bar 20 N 0,3 bar	quasistatisch stationär - -

Tabelle 1/Teil 2: Eigenschaften eines repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung

Prüfstand	Stell- und Messgrößen	Stell- und Messbereich	Auflösung +/-	Dynamik
Themengebiet Reifen				
Reifeneigen-schaften-prüfstand	Raddrehzahl Radaufstandskraft Sturz- und Schräglaufwinkel Brems-/Antriebsleistung Längskraft Seitenkraft Sturzmoment Rückstellmoment	360 km/h 15 kN +/- 10 / 15 ° 200 / 170 kW 10 kN 10 kN 1000 Nm 320 Nm	5 km/h 75 N 0,1 ° 5 kW 4 N 4 N 10 Nm 3,2 Nm	stationär 1 Hz 1 Hz 200 / 170 kW - - - -
Reifenschnell-laufprüfstand	Geschwindigkeit Radaufstandskraft Sturz Reifeninnentemperatur	320 km/h 20 kN +/- 10 ° 150 °C	5 km/h 0,2 kN 0,1 ° 5 °C	quasistatisch stationär stationär -
Reifen-Uniformity-Prüfstand	Raddrehzahl Radialkraft Lateralkraft Beulen, Seiten- und Höhengschlag	400 Upm 8,9 kN 8,9 kN 5 mm	1 Upm 10 N 10 N 0,01 mm	stationär quasistatisch - -
Themengebiet Gesamtfahrzeug und Systeme				
K&C Prüfstand	4x Radkräfte (x / y / z) 4x Spur- / Sturz- / Rollmomente Lenkradwinkel und -moment 4x Rad-Translationen (x / y / z) 4x Rad-Rotationen (d / ? / ?)	14 / 14 / 30 kN 2,25 / 4 / 4 kNm +/- 1080 ° / 30 Nm 75 / 75 / 200 mm +/- 12 / 12 / 50 °	20 / 20 / 60 N 1 / 1 / 1 Nm 1 ° 0,4 / 0,4 / 0,4 mm 0,1 / 0,1 / 0,02 °	quasistatisch quasistatisch 45 °/s 86 / 86 / 37 mm/s 69 / 6 / 6 °
Pendel-prüfstand	Schwerpunktlage (x, y) Schwerpunkthöhe (z) Massenträgheit (x, y, z)	unbegrenzt unbegrenzt unbegrenzt	2,5 mm 5 mm 100 kgm ²	statisch statisch statisch
Rollen-prüfstand mit Klimakammer	Raddrehzahlen (einzeln regelbar) Zugkraft (pro Rolle) Antriebsleistung (pro Rolle) Massensimulation Kammertemperatur Fahrtwindgebläse	220 km/h 3 kN 66 kW 700 - 2200 kgm ² -40 - 70 °C 60 km/h	0,1 km/h 0,5 % 1 kW 2 kgm ² +/- 2 °C 5 km/h	0 - 100 km/h ~ 19 s 0 - 200 km/h ~ 25 s 66 kW stationär 20 - -40 °C ~ 40 min stationär

Tabelle 1/Teil 3: Eigenschaften eines repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung

Prüfstand	Versuchsumfang	Versuchskonzept	Übertragbarkeit	PEP Phasen	Ergebnisverwendung	PDM
Themengebiet Bremsen						
Bremsbelag-Kompressibilitätsprüfstand	Komponente	Ersatzversuch	Eindeutig	Konzeptphase Serienentwicklung	Bestimmung von Komponenteneigenschaften; Auswertung von Fahr- und Prüfstandsversuchen	Nein
Bremsengeräuschprüfstand	System	Ersatzversuch Anwendungsversuch	Eindeutig Tendenziell	Abstimm- und Reifephase	Reproduktion und Analyse akustisch relevanter Fahrsituationen Unterdrückung der Geräuschenstehung (durch Geometrie- bzw. Masseänderungen)	Nein
Bremsenprüfstand mit Massensimulation	Komponente	Ersatzversuch Anwendungsversuch	Eindeutig	Vorentwicklung bis Serienanlauf	Bestimmung von Komponenteneigenschaften von Brems scheiben (Verzugsverhalten, Verschleiß bei Niedriglast-Bedingungen und Rissbeständigkeit)	Nein
Bremssattelprüfstand	Komponente	Ersatzversuch	Eindeutig	Vorentwicklung bis Serienanlauf	Bestimmung von Komponenteneigenschaften: Dichtigkeit, Steifigkeit	Nein
Bremsscheiben-Formfehler-Messmaschine	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Vorentwicklung bis Serienanlauf	Versuchsvor- und -nachbereitung	Nein
Feststellbremsenprüfstand	System Komponente	Anwendungsversuch	Eindeutig	Abstimm- und Reifephase, vor Fahrzeugverfügbarkeit	Absicherung gesetzlicher Anforderungen Bestimmung von Komponenteneigenschaften Ermittlung von Einbremsparametern für Serienproduktion	Nein
Reibwertprüfer (RWP 1-3)	Komponente	Ersatzversuch	Eindeutig	Vorentwicklung bis Serienanlauf, zusätzlich Serienüberprüfung	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Prinzipversuche zu neuen Materialien Erarbeitung von Zeichnungsvorgaben (Toleranzen) Parametrierung von Simulationsmodellen	Nein
Reibwertprüfer (RWP 4, 5)	Komponente	Anwendungsversuch	Eindeutig	Vorentwicklung bis Serienanlauf	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Prinzipversuche zu neuen Materialien Erarbeitung von Zeichnungsvorgaben (Toleranzen) Parametrierung von Simulationsmodellen	Nein
Schwungmassenprüfstand	System Komponente	Anwendungsversuch	Eindeutig Tendenziell	Vorentwicklung bis Serienanlauf	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Analyse von Entwicklungsmustern Ergebnisabgleich mit der FEM Berechnung	Nein

Tabelle 2/Teil 1: Weitere Eigenschaften des repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung

Prüfstand	Versuchsumfang	Versuchskonzept	Übertragbarkeit	PEP Phasen	Ergebnisverwendung	PDM
Themengebiet Federung, Dämpfung, Stabilisierung Fahrwerk- und Aggregatelager						
Federwaage	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Versuchsteilverfügbarkeit bis Serienbetreuung	Bestimmung von Komponenteneigenschaften; Parametrierung von Simulationsmodellen; Berechnung von Höhenstand und Schwingzahl	Nein
Dämpfer-Hydropulsprüfstand (HP2)	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Abstimm-, Reife- und Bestätigungsphase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Parametrierung von Simulationsmodellen	Nein
Lager-Hydropulsprüfstand (HP1)	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Abstimm- und Reifephase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Absicherung der Qualitätsvorschriften Parametrierung von Simulationsmodellen	Ja
VDA-Stoßdämpferprüfstand	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Abstimm-, Reife- und Bestätigungsphase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften; Festlegung von Dämpfungsabstimmungen; Unterstützung der Qualitätssicherung; Parametrierung von Simulationsmodellen	Ja
Themengebiet Lenkung						
Lenkgetriebeprüfstand	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Abstimm-, Reife- und Bestätigungsphase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften, Korrelation subjektiver Fahreindrücke mit objektiven Messungen, Validierung von Simulationsmodellen	Nein
Pumpenfunktionsprüfstand	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Abstimm-, Reife- und Bestätigungsphase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften, Korrelation subjektiver Fahreindrücke mit objektiven Messungen, Parametrierung von Simulationsmodellen	Nein
Themengebiet Pedalwerk						
Hydropuls BKV-Prüfstand	System Komponente	Anwendungsversuch	Tendenziell	Abstimm- und Reifephase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften	Nein
Kupplungsbetätigungsprüfstand	System	Anwendungsversuch	Eindeutig	Abstimm- und Reifephase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften	Nein
Statischer BKV-Prüfstand	System	Ersatzversuch Anwendungsversuch	Eindeutig Tendenziell	Abstimm- und Reifephase	Bestimmung von Komponenteneigenschaften	Nein

Tabelle 2/Teil 2: Weitere Eigenschaften des repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung

Prüfstand	Versuchsumfang	Versuchskonzept	Übertragbarkeit	PEP Phasen	Ergebnisverwendung	PDM
Themengebiet Reifen						
Reifeneigenschaftenprüfstand	Komponente	Anwendungsversuch	Indirekt	Ab Reifenverfügbarkeit	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Ausschluss Der Fehlerquelle „Rad“ bei ungewünschten Anregungen im Fahrversuch. Parametrierung von Simulationsmodellen	Nein
Reifenschnelllaufprüfstand	Komponente	Anwendungsversuch	Direkt	Abgekoppelt vom PEP	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Freigabe des Reifens (Sicherheit)	Nein
Reifen-Uniformity-Prüfstand	Komponente	Ersatzversuch	Tendenziell	Abgekoppelt vom PEP	Bestimmung von Komponenteneigenschaften Ermittlung von Grenzwerten (Qualitätskriterien)	Nein
Themengebiet Gesamtfahrzeug und Systeme						
K&C Prüfstand	Gesamtfahrzeug System	Ersatzversuch Anwendungsversuch	Eindeutig Tendenziell	Alle Phasen des PEP	Objektive Beurteilung der Fahrwerkskonstruktion und -kinematik Parametrierung von Simulationsmodellen Validierung von Simulationsmodellen	Ja
Pendelprüfstand	Gesamtfahrzeug	Ersatzversuch	Eindeutig	Ab Fahrzeugverfügbarkeit	Parametrierung von Simulationsmodellen	Ja
Rollenprüfstand mit Klimakammer	Gesamtfahrzeug System	Anwendungsversuch	Eindeutig Tendenziell	Abgekoppelt vom PEP	Beurteilung der Auswirkungen tiefer Temperaturen auf mechanische, elektrische und hydraulische Systeme	Nein

Tabelle 2/Teil 3: Weitere Eigenschaften des repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung

3.1.4 Stärken der Prüfstandstechnik

Transparenz der Versuchsbedingungen und -ergebnisse

Die messtechnische Zugänglichkeit der Schnittstellen zwischen Prüfstand und Prüfling erzeugt eine hohe Transparenz der Versuchsbedingungen. Zusätzlich zu den bereits vorhandenen, prüfstandsinternen Sensoren können weitere Messstellen realisiert werden, um die Versuchsbedingungen exakt zu kontrollieren. So können zum Beispiel an einem Reifenflachbahnprüfstand [196] sämtliche Winkel, Wege, Kräfte und Momente durch prüfstandsinterne Messkanäle gemessen werden, während für Reifen-, Umgebungs- und Fahrbahntemperatur zusätzliche Kanäle eingesetzt werden.

Im Vergleich dazu sind Messungen auf der Teststrecke mit deutlich mehr Aufwand verbunden [108], denn bei der Messtechnikadaption sind stets die vorgegebenen Bauraumverhältnisse und die Besonderheiten der mobilen Messtechnik zu berücksichtigen.



Bild 11: Messung von Reifeneigenschaften auf der Teststrecke [201]

Exakte Einstellung von Betriebszuständen

Eine weitere Stärke der Prüfstandstechnik ist die Möglichkeit, Betriebszustände des Prüflings exakt einzustellen und zu halten. Das ermöglicht tiefgreifende Analysen, die auf einer Teststrecke nicht oder mit großem Aufwand durchführbar wären. So können zum Beispiel bei der Untersuchung von Bremsanlagen am Prüfstand die Fahrzeuggeschwindigkeit und das Bremsmoment konstant gehalten werden, um das Schwingungsverhalten des Bremssattels in diesem Fahrzustand detailliert analysieren zu können [190].

Ausschalten von Störeinflüssen

Durch Prüfstandsversuche lassen sich Störeinflüsse vermeiden. Bei der Bewertung von Vorbeifahrgeräuschen unter Laborbedingungen [44] beispielsweise fallen keinerlei Umgebungsgeräusche an. Gleiches gilt für mechanische Prüfstände wie zum Beispiel eine VDA-Stoßdämpfer-Prüfmaschine, bei der synthetische Wegsignale ohne überlagerte Störungen (unvermeidbare Boden-

unebenheiten) aufgebracht werden. Dadurch ergibt sich bei exakter Steuerung der Eingangssignale und deterministisch reagierenden Prüflingen stets ein im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbares Ergebnis.

Nachvollziehbare, objektive Ergebnisse

Prüfstände liefern in der Regel quantitativ gemessene, objektive Ergebnisse. Dies ist als Vorteil anzusehen, da die Ergebnisbewertung anhand zahlenmäßiger Grenzwerte geschieht und nicht von personellen Fähigkeiten bzw. Präferenzen abhängt. Die Ergebnisse sind auch für Außenstehende nachvollziehbar. In besonderen Fällen ist auch eine subjektive Bewertung des Prüflings auf einem Prüfstand möglich – zum Beispiel die Bewertung des akustischen Verhaltens eines Motors auf einem Motorenprüfstand [62].

Günstige Kostensituation

Für die Durchführung von Prüfstandsversuchen werden nur die unmittelbar zu untersuchenden Teile sowie geeignete Vorrichtungen zur Prüflingsadaption benötigt. Somit stehen den im Vergleich zum Fahrversuch relativ hohen Investitionskosten verhältnismäßig niedrige Proportionalkosten gegenüber. Um die Fixkostenanteile zu senken werden längere Prüfzyklen im 24h-Betrieb gefahren; bei Installation einer geeigneten Prüfstandsüberwachung ist sogar unbeaufsichtigter Betrieb möglich. Im Vergleich zum Fahrversuch ist daher ein gleichwertiger Prüfstandsversuch generell kostengünstiger.

3.1.5 Grenzen der Prüfstandstechnik

Eingeschränkte Abbildung der Realität

Die Grenzen der Prüfstandstechnik liegen hauptsächlich in der eingeschränkten Abbildung der Realität. Prüfstände spiegeln nie exakt die Realität wider – ungeachtet, ob sie Ersatzversuche oder Anwendungsversuche ausführen. Selbst wenn die absolute Reproduktion der Realität mit allen Umgebungsbedingungen technisch möglich wäre, wäre der Aufwand für Bau und Betrieb des Prüfstands wirtschaftlich nicht rentabel. Bei Prüfständen ist daher prinzipiell eine gewisse, gerade noch tolerierbare Abweichung von der Realität in Kauf zu nehmen.

Trotz der Einführung mehraxialer Prüfstände mit Hydropulstechnik ist z. B. die Vermessung von Elastomerlagern nicht ausreichend genau. Am Markt sind Prüfstände mit maximal vier Freiheitsgraden verfügbar [83] während zur korrekten Abbildung des Fahrzeugbetriebs bis zu sechs Freiheitsgrade erforderlich wären. Weiterhin stellen kleine, hochfrequente Anregungen eine Herausforderung für Mess- und Steuerungstechnik dar.

Ein weiteres Thema ungenügender Realitätsabbildung ist die Reifenprüfung. Durch die Einführung von Flachbahnprüfständen [196] konnte eine beträchtliche Steigerung der Realitätsnähe im

Vergleich zu Trommelprüfständen [7] erreicht werden. Die Aufstandsfläche eines Reifens auf dem Flachband kommt der ebenen Straße deutlich näher als die gekrümmte Aufstandsfläche auf einer Trommel. Allerdings bringt die Flachbahntechnologie keine prinzipiellen Verbesserungen für Abbildung der Themen Fahrbahnbelag und –zustand sowie Reifen- und Fahrbahntemperatur. Nach wie vor finden am Prüfstand Korund oder das so genannte Safety-Walk als Oberfläche Verwendung, die nur eingeschränkt mit Asphalt oder Betonfahrbahnen vergleichbar sind. Versuche mit nassem oder gar vereistem Fahrbahnbelag sind mit einem Flachbahnprüfstand schwierig darstellbar. An modernen Flachbandprüfständen werden zwar während des Versuchs Reifen- und Bandtemperatur gemessen, allerdings sind auch hier teilweise starke Abweichungen von der Realität festzustellen, die auf die veränderte konvektive Wärmeableitung zurückzuführen sind.

Auch das Problem einer dem tatsächlichen Fahrbetrieb entsprechenden Fahrzeugfesselung für quer- bzw. längsdynamische Untersuchungen des Gesamtfahrzeugs ist bis heute nicht gelöst. Die Simulation von Querbeschleunigungen von über 1g mit frei beweglichen Massen ist wegen des großen Platzbedarfs am Prüfstand nicht durchführbar. Daher muss häufig der Ansatz einer speziell angepassten Fesselung verfolgt werden, zum Beispiel im Schwerpunkt [1]. Dadurch lassen sich alle Kräfte und Momente realitätsgetreu in das Fahrzeug einbringen. Allerdings ist die Einspannung am Schwerpunkt nicht direkt (der Schwerpunkt liegt nicht an einer gut zugänglichen Stelle der Karosserie) sondern nur über Hilfsrahmen möglich. Hilfsrahmen verändern die Steifigkeit der Karosserie und verursachen somit nicht vernachlässigbare Abweichungen von der Realität, besonders im Bereich Elastokinematik. Für den Einzelfall sind die Vor- und Nachteile des ausgewählten Fesselungskonzepts unter Berücksichtigung des Versuchsziels abzuwägen.

Rückschluss von Komponenten-Prüfergebnissen auf das Gesamtfahrzeugverhalten

Auch bei gesicherter Übertragbarkeit der Prüfstandsergebnisse auf das reale Betriebsverhalten des Prüflings im Gesamtfahrzeug sind unter Umständen Schwierigkeiten zu erwarten. Es existiert zum Beispiel eine VDA-Norm für die Prüfung von Stoßdämpfern [25], die allerdings nicht immer mit der Fahrdynamik des Gesamtfahrzeugs korreliert. Obwohl die genormte Prüfung in den meisten Fällen verlässliche Ergebnisse produziert, zeigen Stoßdämpfer mit identischen Kennlinien unter Umständen unterschiedliches Fahrverhalten. Auch der umgekehrte Fall kann eintreten: unterschiedliche Prüfstandsergebnisse führen zu dennoch identischem Fahrverhalten.

Signaldynamik, Nachfahrgüte

Weitere Grenzen der Prüfstandstechnik sind Signaldynamik und Nachfahrgüte. Bei dynamischen Prüfungen ist es unerlässlich, die vorgegebenen Kraft- oder Wegverläufe exakt zu reproduzieren. Gerade die Kraftregelung dynamischer Prüfstände ist ein Thema, wenn sie durch Iteration darge-

stellt wird: prüfstandsintern wird weggeregelt gefahren und die korrespondierenden Kräfte gemessen. Im Vergleich zu den Sollwerten werden die Wegvorgaben angepasst. Eine solche iterative Ermittlung der Stellsignale ist bei konventionellen, passiven Fahrwerkselementen praktikabel [175], wenn auch die Ansteuerung wegen ungenügender Signaldynamik die gewünschte Nachfahrgröße nicht ganz erreicht. Bei aktiven Komponenten wie zum Beispiel magneto-rheologischen Lagern [55] hat diese Vorgehensweise keinen Erfolg: die beiden Regelsysteme (Prüfstandsregelung und Lagerregelung) würden sich gegenseitig so beeinflussen, dass die Einstellung der gewünschten Stellsignale fehlschlägt. Hier sind Kraftregelkreise erforderlich, die nicht auf Iteration angewiesen sind [46].

Prüfung von Regelsystemen mit statischen Prüfständen

Die Aufzeichnung statischer bzw. quasistatischer Kennlinien ist in der Automobilindustrie weit verbreitet. Erst in jüngster Zeit werden fast ausschließlich Prüfstände mit dynamischen Fähigkeiten aufgestellt. Die Prüfung von Fahrzeugen bzw. Baugruppen mit Regelsystemen ist auf Prüfständen, die für quasistatischen Betrieb ausgelegt sind, problematisch. Beispielsweise können auf dem K&C Prüfstand weder Schaltvorgänge einer elektronischen Dämpferregelung noch die Regellogik einer aktiven Stabilisierung bewertet werden. Die gängige Abhilfemaßnahme ist, das Regelsystem stillzulegen oder in einen Betriebszustand zu versetzen, bei dem keine Eigenschaftsänderung während des Testlaufs stattfindet. Für jeden einzelnen Betriebszustand ist somit ein gesonderter Prüflauf erforderlich.

Teileverfügbarkeit

Obwohl für einen Prüfstandsversuch nur die unmittelbar zu untersuchenden Teile und geeignete Vorrichtungen nötig sind, stellt die Verfügbarkeit der Teile am Prüfstand häufig ein Problem dar – gerade in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses, wenn Versuchsteile mit Vorserienwerkzeugen individuell angefertigt werden und somit hohe Kosten und Vorlaufzeiten verursachen. Bis Versuchsteile angeliefert sind und ihren Prüflauf absolvieren können, haben sich unter Umständen die Spezifikationen geändert, sodass ein „alter Stand“ geprüft wird, dessen Ergebnisse nur bedingte Aussagekraft haben.

Besonderes Augenmerk verdient das Thema Teileverfügbarkeit, wenn es um Reihenuntersuchungen geht, zum Beispiel zur Generierung von Trendaussagen. Die erforderliche größere Teilezahl hat negativen Einfluss auf die Versuchsdurchführung, da Rüst- und Inbetriebnahmezeiten zu berücksichtigen sind. Die technischen bzw. physikalischen Randbedingungen bei der Herstellung der Versuchsteile begrenzen die Variierbarkeit der Versuchsteile.

3.2 Simulationsmethoden

3.2.1 Übersicht

Die in der Fahrwerksentwicklung eingesetzten funktionsorientierten Simulationsmethoden sind:

- Mehrkörpersystem-Simulation (MKS)
- Finite Elemente Methode (FEM)
- Computational Fluid Dynamics (CFD)
- Kombinierte Simulationsmethoden

Zusätzlich verwenden die Automobilhersteller Eigenentwicklungen für spezielle Anwendungen.

Mehrkörpersystem-Simulation (MKS)

Mehrkörpersysteme dienen der Modellierung, Visualisierung, Analyse und Bewertung der Kinematik mechanischer Systeme. Die Systeme bestehen nach [162], [135] aus Körpern, Kraftelementen und Gelenken. Körper haben räumliche Ausdehnung und träge Masse. Kraftelemente sind masselos modelliert und üben über verschiedene Mechanismen Kräfte auf die verbundenen Elemente aus. Beispiele für Kraftelemente sind ideale Federn und Dämpfer oder benutzerdefinierte Stellglieder. Bei Federn hängt die ausgeübte Kraft vom Abstand der verbundenen Elemente ab, bei Dämpfern von der Relativgeschwindigkeit und bei Stellgliedern von Zustandsvariablen des Stellglieds³. Gelenke sind ebenfalls masselos und schränken die Relativbewegung zwischen den angeschlossenen Elementen ein. Dabei können alle sechs Freiheitsgrade unabhängig voneinander eingeschränkt oder freigegeben werden. Die so aufgebauten Systeme werden in die Umgebung eingebettet, die als bewegtes oder unbewegtes Koordinatensystem modelliert wird. Fokus der Untersuchungen ist die Reaktion (Bewegungen, innere Kräfte) des Systems auf eingeprägte innere und äußere Kräfte⁴.

Der Aufbau eines Fahrzeugmodells beinhaltet die Modellierung der Achskinematik durch die Definition der Kinematikpunkte im Fahrzeugkoordinatensystem, die Festlegung der Schwerpunkte, Massen und Trägheitsmomente aller Einzelkörper sowie die Modellierung der verbindenden Gelenke bzw. Lager. Dazu werden unter anderem folgende speziell auf die Anwendung in der Fahrzeugtechnik zugeschnittene Modelle verwendet:

- Elastomer- und Hydrolager: [65], [89], [140], [172], [173], [185], [187]
- Stoßdämpfer: [8], [105], [106], [120], [142], [169], [185]
- Reifen: [52], [53], [128], [140], [148], [176]

³ Durch Stellglieder können zum Beispiel wegababhängige Veränderungen einer Dämpferkennlinie modelliert werden.

⁴ Es wird bei der Modellierung vorausgesetzt, dass die Bewegung der Umgebung vorgegeben ist und innere Kräfte des Systems keinen Einfluss darauf haben.

Für einen Simulationslauf ist zusätzlich die Fahraufgabe als Zusammenspiel von Fahrerverhalten und Streckenführung zu definieren. Dazu stehen weitere Modelle zur Verfügung:

- Fahrer: [136], [194]
- Straßen/Strecken: [117], [193]

In den gängigen MKS Simulationsprogrammen können nahezu beliebig viele Systemfreiheitsgrade modelliert werden. Je größer die Zahl der Freiheitsgrade, desto mehr Aufwand erfordert dementsprechend die Modellierung.

Ein Sonderfall der MKS Simulation mit vergleichsweise wenigen Freiheitsgraden ist ein Zweispur Modell, ein kennlinienbasiertes Gesamtfahrzeugmodell für die Fahrdynamiksimulation in frühen Entwicklungsphasen. Im Folgenden wird in Anlehnung an [14] ein kurzer Überblick über Funktionsumfang und Modellierung gegeben.

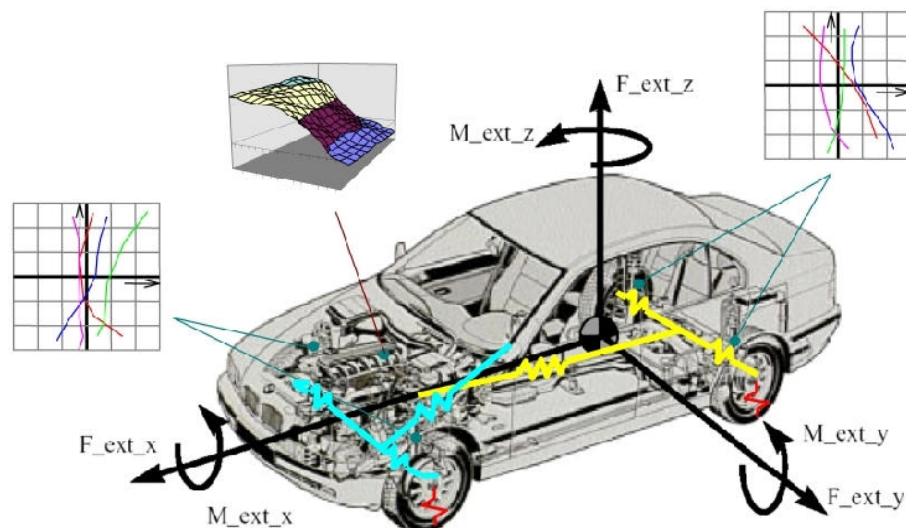


Bild 12: Zweispurmodell [14]

Der Fahrzeugaufbau ist im Zweispur Modell durch eine starre Masse im Schwerpunkt mit Trägheitsmomenten um Hoch-, Längs- und Querachse repräsentiert. Des Weiteren enthält das Modell vier Räder, die jeweils über die Radaufhängung mit dem Aufbau verbunden sind. Die Radaufhängung leitet Kräfte und Momente in den Aufbau ein, die auf den Aufbauswerpunkt bezogen werden. Die durch die Radaufhängung eingeleiteten Kräfte und Momente berechnen sich aus den Summen verschiedener Teilkräfte: die vertikalen Kräfte setzen sich aus Feder-, Dämpfer-, Stabilisator- und Stützkraften zusammen, die horizontalen Kräfte aus Reifenlängs- und Reifenquerkräften. Diese Einzelkräfte werden über Kennwerte und -linien verschiedener Fahrzeug- und Komponentenparameter berechnet. Zusätzlich sind äußere (externe) Kräfte und Momente

(Aerodynamik, Fahrbahnneigung) modelliert. Bild 12 zeigt eine graphische Darstellung des Zweispurmodells.

Finite Elemente Methode (FEM)

Die Finite Elemente Methode (FEM) wird generell zur numerischen Berechnung strukturmechanischer Aufgabenstellungen wie Spannungs- und Steifigkeitsanalysen angewendet. Die FEM kommt hauptsächlich bei komplexen Strukturen zum Einsatz, wenn die Berechnung mit einem mathematisch-analytischen Ansatz nicht zielführend ist. Grundgedanke der FEM ist, den zu untersuchenden Körper in ein Netz aus finiten Elementen zu unterteilen und diese Elemente über Knoten zu koppeln. Die Elemente werden so gewählt, dass für jedes einzelne ein analytischer Ansatz lösbar ist. Bei den meisten technischen Fragestellungen sind diese Ansätze Differentialgleichungen. Die Art der Differentialgleichungen richtet sich im Wesentlichen nach der zugrundeliegenden Anwendung. Im konkreten Fall der Steifigkeitsberechnung ist dies z. B. das Prinzip der virtuellen Verschiebung bzw. der virtuellen Arbeit [10].

Die Generierung des Netzes aus CAD-Daten wird als Preprocessing bezeichnet, was bei Verwendung entsprechender Softwarepakete (z. B. MSC.Patran, [207]) weitgehend automatisiert geschieht. Dazu stehen verschiedene Elemente (Stab, Seil, Balken, Platten, Schalen, Tetraeder, Hexaeder, ...) zur Verfügung. Zusätzlich zu den Geometrieinformationen werden Materialeigenschaften und Randbedingungen (Lagerungen, eingeprägte Kräfte, ...) modelliert. Die Lösung der Differentialgleichungen übernimmt der sogenannte Solver (z. B. MSC.Nastran, [206]). Anschließend bereitet der Postprozessor die Ergebnisse für den Anwender in Diagrammen, Tabellen oder Form eingefärbter 3D-Modelle auf.

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) hat nach [127] das Ziel, das Verhalten von Gasen, Flüssigkeiten oder Gemischen unterschiedlicher Fluide vorher zu bestimmen. CFD basiert auf den Erhaltungssätzen für Masse, Impuls und Energie. Insgesamt ist ein Gleichungssystem mit fünf partiellen Differentialgleichungen zu lösen: die Kontinuitätsgleichung der Massenströme, die drei Navier-Stokes Gleichungen (Impuls) und die Energiegleichung. Zur Lösung der partiellen Differentialgleichung werden die Differentiale durch finite Approximationen ersetzt. Dabei unterscheidet man das Finite Elemente Verfahren (FEM, siehe oben), das Finite Differenzen Verfahren (FDV) und das Finite Volumen Verfahren (FVV).

Das Finite Differenzen Verfahren ersetzt die Differentiale in der partiellen Differentialgleichung durch Differenzenquotienten. Die Herleitung üblicher Differenzformeln erfolgt unter Voraussetzung konstanter Schrittweiten mit Hilfe der Taylor-Entwicklung. Beim Finite Volumen Verfahren wird über ein differentiell kleines Volumenelement dV im 3D-Fall, bzw. über ein Flächen-

element im 2D-Fall integriert. Die finite Approximation erfolgt erst nach der mathematischen Integration mit Hilfe des Satzes von Gauß – weshalb mit Finite Volumen Verfahren eine höhere Genauigkeit als mit Finite Differenzen Verfahren erreicht wird.

Für die Modellierung der zu berechnenden Geometrien stehen, ähnlich der FEM, verschiedene Elementtypen zur Verfügung: geometrische Grundfiguren (Tetraeder, Pentaeder, Hexaeder) sowie, je nach Simulationsprogramm, abgewandelte Figuren – zum Beispiel „Trimmzellen“ (an Ecken oder Kanten abgeschnittene Tetraeder) in StarCD [211]. Die Modellierung erfolgt üblicherweise zunächst automatisch aus CAD-Daten; in den meisten Fällen wird allerdings das generierte Netz an kritischen Stellen „von Hand“ verfeinert bzw. nachgebessert. Zusätzlich sind die Randbedingungen (Geschwindigkeiten, Drücke an Ein- und Auslass, Rauigkeit, Temperatur, Wärmeübergang an Rändern, ...) und das richtige Turbulenzmodell festzulegen. Die Ergebnisse des Solvers werden zur Aufbereitung bzw. Visualisierung an den Postprozessor weitergegeben.

Kombinationen

Um eine Erhöhung der Aussagegenauigkeit von Simulationsergebnissen zu erreichen, ist es vielfach erforderlich, verschiedene Methoden miteinander zu kombinieren. Dabei soll der hohe Detaillierungsgrad der einzelnen Tools erhalten bleiben, ohne die durch Spezialisierung erreichte Effizienz zu verlieren. Dies ist besonders bei vernetzten Aufgabenstellungen wichtig, zum Beispiel bei

- Kinematikuntersuchungen von luftgefederten Radaufhängungen [102]
- Kinematikuntersuchungen von Radaufhängungen mit nachgiebigen Strukturen [116]
- Fahrdynamikuntersuchungen unter Seitenwindeinfluss [155]
- Simulation der Bremsenkühlung [70]

Spezialprogramme

Zusätzlich werden in der Automobilindustrie Eigenentwicklungen eingesetzt, in denen häufig benötigte Berechnungen programmiert sind. Beispiele sind:

- Bremskraftverteilung (BKV)
- Bremsscheibentemperatur (BST)
- Bremsgerätsimulation

Die Auslegung der Bremskraftverteilung wird mittels eines Fortranprogramms durchgeführt. Voraussetzung ist die Eingabe technischer Daten des Gesamtfahrzeugs (statische Achslasten, Schwerpunktshöhe, Radstand, ...) und des Bremssystems (Reibradius, Reibwert, ...). Daraus errechnet sich in stationären Lastfällen (Geradeausbremsung mit verschiedenen Bremsdrücken auf verschiedenen Fahrbahnreibwerten), ob es mit einer angenommenen Bremskraftverteilung

zum Überbremsen der Hinterachse kommt. Die optimale Auslegung ermöglicht ein Abbremsen mit maximaler Verzögerung ohne Überbremsen der Hinterachse.

Die Bremsscheibentemperatur wird mit einem erweiterten Einspurmodell berechnet. Grundlage ist die Annahme, dass die Abführung des Energieeintrags in eine Bremsscheibe über drei physikalische Effekte geschieht: Strahlung, Konvektion und Speicherung innerhalb der Bremsscheibe. Die Wärmeübergangskoeffizienten ergeben sich über halbempirische Formeln. Aus Gesamtfahrzeug- (Fahrzeuggewicht, Reifenrollwiderstand, Motor- bzw. Fahrleistungen, ...) und Bremsanlagendaten (Bremskraftverteilung, Bremsenbelüftung, ...) berechnet sich damit der Verlauf der Bremsscheibentemperatur über definierte Lastkollektive (z. B. Hochgeschwindigkeits-Fadingtest, Großglockner-Abfahrt, Stilsfer-Joch-Abfahrt, ...).

Die Bremsgerätsimulation dient der Dimensionierung von Bremsgeräten, um ein optimales Verhältnis von Pedalwegbedarf und Pedalkraft beim Bremsen zu erreichen. Dazu werden fahrzeugspezifische Daten (z. B. Verstärkermembranfläche, Durchmesser des Hauptbremszylinders, Pedalübersetzung, Fahrzeugmasse, ...) eingegeben. Das Ergebnis eines Simulationslaufs sind die nötige Pedalkraft, der anliegende Unterdruck im Verstärker und der entstehende Leitungsdruck, die sich bei vorgegebener Pedalbetätigung ergeben. Die Ausgabe erfolgt über Diagramme, bei denen der Leitungsdruck über einer der Simulationsgrößen (Pedalweg, Pedalkraft, oder Verstärkerunterdruck) aufgetragen ist. Durch Variation der fahrzeugspezifischen Eingabedaten werden Parameterstudien durchgeführt.

3.2.2 Genauigkeit der Simulation

In der folgenden Tabelle 3 sind einige Simulationsmodelle zusammengestellt, über die Aussagen zur erreichbaren Genauigkeit vorliegen. In der Tabelle ist für die einzelnen Simulationsmodelle aufgelistet, welche Modellierungsmethode jeweils Verwendung findet. Dabei sind zu unterscheiden:

- Physikalische Modelle, die von relativ wenigen Elementen bzw. Subsystemen mit systemweit gültigen physikalischen Zusammenhängen ausgehen – in den Tabellen als „physikalisch“ gekennzeichnet.
- Empirische Modelle, die empirisch gemessene Daten wie zum Beispiel Kennlinien und Kennfelder durch mathematische Formeln wiedergeben.
- Methoden wie FEM, CFD oder MKS, die den Untersuchungsgegenstand in eine Vielzahl von Elementen diskretisieren, für jedes Einzelelement physikalische oder empirische Modelle verwenden und durch deren Kombination die Gesamtsystemeigenschaften integrieren – in den Tabellen mit „diskretisiert“ bezeichnet.

Weiterhin ist angegeben, auf welcher Datengrundlage die Modelle parametriert werden und ob sie durch Messungen validiert sind.

Die letzte Spalte zeigt die mit den Modellen berechenbaren physikalischen Größen mit der maximalen Abweichung von Simulationsergebnis und Validierungsversuch. Zusätzlich sind die validierten Gültigkeitsbereiche mit physikalischer Größe und Wertebereich genannt.

Für jede Quelle ist die jeweils beste erreichte Genauigkeit, gegebenenfalls bei verschiedenen Gültigkeitsbereichen, angegeben.

Titel	Quelle	Modellierung	Datenherkunft	Validiert	Berechenbare Größen: Genauigkeit @ Gültigkeitsbereich
Themengebiet Bremsen					
Experimental and Theoretical Work on the Viscoelastic Behavior of Friction Materials	[41]	empirisch	Materialdaten Messungen	ja	Belagtemperatur: 25 °C Belagsetzverhalten: 10 µm
Numerical Prediction of Brake Fluid Temperature Rise During Braking and Heat Soaking	[107]	mathematisch	Konstruktionsdaten Materialdaten	ja	Belagtemperatur: 15 °C Bremsscheibentemperatur: 15 °C
Experimental and Numerical Modeling of Friction Induced Noise in Disc Brakes	[63]	diskretisiert	Konstruktionsdaten Materialdaten Messungen	ja	Resonanzfrequenz: +/- 100 Hz
Simulation eines Unterdruckbremsverstärkers im Verbund mit dem Gesamtsystem und dem Fahrzeug	[87]	physikalisch	Konstruktionsdaten Materialdaten	ja	Bremsdruck: 7bar Pedalkraft: 7 N
Schnelle und kostengünstige Entwicklung eines Vorderachs-Radbremskonzepts unter konsequenter Anwendung von CAE-Analysewerkzeugen und innovativen Optimierungsmethoden	[189]	diskretisiert	Konstruktionsdaten Materialdaten	ja	Sattelaufweitung: 0,02 mm @ p = 0 - 160 bar
Themengebiet Fahrwerkslager					
Hydraulische Fahrwerkslager - Wirkungsweise, Einfluss und rechnergestützte Auslegung bei Freudenberg	[17]	physikalisch diskretisiert	Konstruktionsdaten Materialdaten	ja	Steifigkeit: 100 N/mm @ f = 2 - 50 Hz Verlustwinkel: 3 ° @ f = 2 - 50 Hz
Experiment-Based Modeling of Cylindrical Rubber Bushings for the Simulation of Wheel Suspension Dynamic Behavior	[36]	physikalisch	Messung	ja	Steifigkeit: 250 N/mm @ f = 10 Hz; ? x = 0,6 - 2 mm Sprungantwort: 200 N @ ? x = 0,6 - 1,5 mm
Anwendung von CAE in der Fahrkomfortentwicklung	[90]	physikalisch	Berechnungen Konstruktionsdaten Materialdaten	ja	Steifigkeit: 5 N/mm @ f = 1 - 20 Hz; s = 0,5 mm Verlustwinkel: 1 ° @ f = 1 - 20 Hz; s = 0,5 mm Steifigkeit: 10 N/mm @ f = 1 - 20 Hz; s = 1 mm Verlustwinkel: 3 ° @ f = 1 - 20 Hz; s = 1 mm
Examination of High Frequency Characterization Methods for Mounts	[91]	physikalisch	Messung	ja	Steifigkeit: 20 N/mm @ f = 0 - 1 kHz Verlustwinkel: 20 ° @ f = 0 - 1 kHz
Abschlussbericht EU Projekt INVEC	[125]	physikalisch	Konstruktionsdaten Materialdaten	ja	Steifigkeit: 80 N/mm @ f = 0 - 100 Hz statische Kraft: 500 N @ s = +/- 8 mm
Zum Stand von Komponentenmodellen im Rahmen der Fahrzeugsimulation Zum Stand von Komponentenmodellen im Rahmen der Fahrzeugsimulation.	[185]	physikalisch	Konstruktionsdaten Materialdaten Messungen	ja	Steifigkeit: 50 N/mm @ f = 0 - 50 Hz Steifigkeit: 150 N/mm @ f = 15 Hz; s = 1 mm statische Kraft: 20 N @ s = +/- 4 mm
FEM Berechnung von Elastomerbauteilen	[191]	diskretisiert	Materialdaten	ja	Steifigkeit: 0 N/mm @ e = 0 - 0,8%; v = 1 - 50 mm/min

Tabelle 3/Teil 1: Eigenschaften, berechenbare Größen und erreichbare Genauigkeiten von Simulationsmodellen

Titel	Quelle	Modellierung	Datenherkunft	Validiert	Berechenbare Größen, Genauigkeit @ Gültigkeitsbereich
Themengebiet Lenkung					
Front Wheel Vibrations: A Hydraulic Point of View - Models and First Results	[4]	physikalisch	keine Angabe	nein	Lenkmoment/Lenkwinkel: Trendaussagen @ $f = 0 - 1$ kHz
Effiziente Simulation der Gesamtdynamik Reifen-Achse-Fahrwerk	[5]	physikalisch	Messungen	nein ⁵	Lenkradbeschleunigung: $30 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
Interner Bericht: Simulation hydraulischer Systeme	[18]	physikalisch empirisch	Konstruktionsdaten Messungen	ja	Spurstangenkraft/Lenkwinkel: 5 % Volumenstrom: 5 % Hydraulik Druck: 5 %
Interner Bericht: Simulation dynamischer Lenkungseigenschaften	[56]	physikalisch	keine Angabe	ja	Spurstangenkraft/Lenkwinkel: 5 dB @ $f = 2 - 20$ Hz
Vehicle Dynamics Simulation with Inclusion of Freeplay and Dry Friction in Steering System	[113]	physikalisch	Generisch	nein ⁵	Trendaussagen
Themengebiet Reifen					
Simulation von Abrieb und von Reifenkennwerten für Handling mit einem stationär rollenden FE-Reifenmodell	[11]	diskretisiert	Berechnungen, Konstruktionsdaten, Materialdaten	ja	Seitenkraft: 1 kN @ $a = +/- 2^\circ$ Fliehkraftkontur: 0,5 mm Rückstellmoment: 15 Nm @ $a = +/- 2^\circ$
Reifenmodelle für Komfort- und Schlechtwegsimulationen	[52]	physikalisch diskretisiert	BRIT: Berechnungen, Materialdaten, Messungen CTIRE: Berechnungen, Materialdaten DTIRE: Konstruktionsdaten	ja	Normalkraft (Stufe): BRIT: 1200 N CTIRE: 800 N DTIRE: 300 N Umfangskraft (Stufe) BRIT: 1800 N CTIRE: 1200 N DTIRE: 1300 N
Vorhersage von Reifenkennlinien mit FEM Simulation	[66]	diskretisiert	Konstruktionsdaten, Materialdaten	ja	Seitenkraft: 0,4 kN @ $a = +/- 8^\circ$; $F_N = 2, 4, 6$ kN Schräglauftiefe: 50 N @ $F_N = 2 - 8$ kN Kraftschlussbeiwert: 0,07 @ Schlupf = 0 - 0,2 %
TIME, Tire Measurements - Eine neue Standardprüfprozedur für stationäre Reifen-Seitenkraftmessungen	[94]	empirisch	Messungen	ja	Seitenkraft: 0,9 kN @ $a = 0 - 10^\circ$; $F_N = 4,7$ kN
Das Reifenmodell RMOD-K	[126]	physikalisch	Berechnungen Messungen	ja	Seitenkraft: 0,4 kN @ $a = 0 - 10^\circ$; $F_N = 2 - 8$ kN Normalkraft (Stufe): 200 N Umfangskraft (Stufe): 400 N

Tabelle 3/Teil 2: Eigenschaften, berechenbare Größen, erreichbare Genauigkeiten und Gültigkeitsbereiche von Simulationsmodellen

⁵ Validierung im Gesamtfahrzeugmodell

Titel	Quelle	Modellierung	Datenherkunft	Validiert	Berechenbare Größen, Genauigkeit @ Gültigkeitsbereich
Themengebiet Stoßdämpfer- und Luftfedern					
Was macht der Stoßdämpfer mit dem Abrollkomfort?	[6]	physikalisch	Konstruktionsdaten, Materialdaten, Messungen	ja	Dämpfung: 40 N @ $f = 5 - 40$ Hz Steifigkeit: 250 N @ $f = 5 - 40$ Hz
Simulation eines Luft-Feder-Dämpfers (LFD)	[130]	physikalisch	Berechnungen, Konstruktionsdaten, Materialdaten	ja	Dämpfung: 0 - 0,5 kN @ $f = 1 - 10$ Hz
Bestimmung komfortoptimaler Designparameter eines Luft-Feder-Dämpfers im Fahrzeugmodell - Vergleich mit konventioneller hydraulischer Dämpfung	[131]	physikalisch	Konstruktionsdaten, Materialdaten	ja	Dämpfung: 0 - 1 kN @ $f = 1 - 4$ Hz
A Non Linear Parametric Model of an Automotive Shock Absorber	[143]	physikalisch	Konstruktionsdaten, Materialdaten	ja	Dämpfung: 400 N @ $f = 0 - 15$ Hz Steifigkeit: 250 N @ $f = 0 - 15$ Hz Dämpfergeschwindigkeit : 0,1 m/s
Vier unterschiedliche Ansätze zur Simulation von Stoßdämpfern in der ZF Sachs AG.	[169]	empirisch physikalisch	Berechnungen, Konstruktionsdaten, Materialdaten, Messungen	ja	Dämpfung: 400 N @ $v = -5 - 1$ m/s
An Experimentally Validated Physical Model of a High-Performance Mono-Tube Damper	[174]	physikalisch	Konstruktionsdaten, Materialdaten, Messungen	ja	Dämpfung: 0 - 100 lb @ $f = 1.6$ Hz Dämpfergeschwindigkeit: 10 in/s
Themengebiet Gesamtfahrzeug und Systeme					
Approximation der Gesamtfahrzeugparameter Masse, Schwerpunktlage und Massenträgheitsmomente in der frühen Konzeptphase	[153]	diskretisiert	Konstruktionsdaten, Materialdaten	ja	Schwerpunktlage (x): 2 % Schwerpunktlage (y): 60 % Schwerpunkthöhe (z): 20 % Massenträgheitsmoment: 20 % Masse: 2 %
Validierung eines virtuellen Fahrzeugmodells	[159]	diskretisiert	Konstruktionsdaten, Materialdaten	ja	Spur: 2' @ $h_R = -80 - 40$ mm; LW = 0° Spur: 3' @ $F_{Br} = 0 - 3$ kN; $h_R = -60 / 60$ mm; LW = 0 / 90° Spur: 3' @ $F_S = -1,5 - 1,5$ kN; $h_R = 60$ mm; LW = 0 / 90° Sturz: < 1' @ $h_R = -80 - 50$ mm; LW = 0° Sturz: 18' @ $F_{Br} = 0 - 3$ kN; $h_R = 0$ mm; LW = 0°; Spur: 15' @ $F_S = -2 - 2$ kN; $h_R = 0$ mm; LW = 0° Radlast: 100 N @ $h_R = -80 - 50$ mm; LW = 0°

Tabelle 3/Teil 3: Eigenschaften, berechenbare Größen, erreichbare Genauigkeiten und Gültigkeitsbereiche von Simulationsmodellen

3.2.3 Stärken der Simulation

Transparenz

Die wesentliche Stärke der Simulation ist die sehr gute Transparenz. Innerhalb des Simulationsmodells sind alle berechneten Größen zugänglich und können visualisiert werden. Dadurch entsteht ein Mehrwert gegenüber der Realität: es lassen sich Größen visualisieren, die nicht direkt sichtbar bzw. schwierig zu messen sind. In der MKS Simulation sind es zum Beispiel Schnittkräfte in Gelenken [145], bei der FEM Simulation beispielsweise Spannungs- oder Schädigungsverteilungen [23].

Schnelle Austauschbarkeit der Simulationsmodelle

System- und Komponentenmodelle lassen sich aufgrund des modularen Aufbaus der Simulations-Tools schnell austauschen. Der Aufwand zur Untersuchung verschiedener Varianten – zum Beispiel verschiedene Elastomerlager – ist relativ gering. Besonders deutlich wird diese Stärke bei der MKS Simulation [88]. Voraussetzung ist allerdings die prinzipielle Erarbeitung und Validierung der Modelle, sowie die Verfügbarkeit von Parametersätzen.

Keine Bindung an physikalische oder technische Zwänge

Die Simulation ist im Allgemeinen nicht an physikalische oder technische Zwänge gebunden. Modellparameter wie Masse, Steifigkeit, usw. sind unabhängig voneinander variierbar, um zum Beispiel Trendaussagen treffen zu können. Dadurch entsteht Freiraum für die Erarbeitung von Zielvorgaben [161]. Zusätzlich wird das Simulationsergebnis wegen des rein virtuellen Datenabgriffs nicht durch unerwünschte Einflüsse der Messtechnik (beispielsweise zusätzliche Massen oder Wärmekapazitäten) verfälscht. Verschiedene Betriebszustände der zu untersuchenden Bauteile lassen sich direkt einstellen, auch die Aufbringung bzw. Entfernung von Störeinflüssen ist lediglich eine Frage der Modellierung.

Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalysen, eine besondere Stärke der Simulation, zielen in eine ähnliche Richtung. Die Parameter eines Modells werden dabei einzeln variiert und ihr Einfluss auf die Zielgröße bestimmt. Somit ergeben sich die Einflussfaktoren, deren Optimierung den größten Effekt erzielt. Bei der LDS Simulation [119] zum Beispiel wurde eine Vielzahl von Parametern an Lenkung, Achskinematik und Rädern verändert, um die größten Einflussfaktoren zu identifizieren. Ergebnis der Sensitivitätsanalyse war die Erkenntnis, dass die Optimierung von Querlenker- und Querlenkerlagersteifigkeit den größten Effekt haben wird. Diese Aussage hat sich im Hardwareversuch bestätigt.

Weiteres Einsatzgebiet von Sensitivitätsanalysen ist die Bewertung veränderlicher Bauteileigenschaften, zum Beispiel durch Toleranzschwankungen (Grenzmuster) oder Alterungerscheinungen (beispielsweise veränderte Steifigkeitskennlinien von Elastomerlagern).

Automatische Optimierungen

Die Simulation bietet die Möglichkeit, Optimierungen automatisch durchzuführen. Dazu sind feste und veränderbare Parameter sowie die Zielfunktion festzulegen. Die veränderbaren Parameter werden durch zugehörige Variationsräume definiert; die Zielfunktion setzt sich aus verschiedenen, gewichteten Zielgrößen mit korrespondierenden Zielwertkorridoren zusammen. Optimierungswerkzeuge [38] berechnen, ausgehend von einem Startpunkt, die Auswirkung von Parameterveränderungen auf die Zielgrößen. Daraufhin erfolgt eine geeignete Anpassung des Parametersatzes und eine erneute Berechnung des Zielsystems. Diese Iterationsschleife wird fortgeführt, bis ein Optimum erreicht ist, oder die Optimierung abgebrochen wird. Ein Beispiel für angewandte Optimierung ist die Variation von Achsgelenkpunkten unter Beachtung verschiedener Optimierungsziele [145]. Kommerzielle Anbieter von automatischen Optimierern sind zum Beispiel LMS International [204] oder The MathWorks [212].

Die Simulation ist weiterhin in der Lage, Optimierungen für verschiedene Lastfälle durchzuführen. Der Aufwand für die Anpassung der Simulationsmodelle an die verschiedenen Lastfälle ist dabei – ähnlich der Austauschbarkeit von Komponenten – relativ gering. Auch hier lassen sich Eingangsgrößen mit nur wenigen Mausklicks ersetzen. Das Resultat sind dann jeweils Zielvorgaben, die für die einzelnen Lastfälle ein Optimum darstellen. Diese Zielvorgaben können miteinander im Konflikt stehen, wie das Beispiel LDS Simulation [119] gezeigt hat: hier ist für den freirollenden Lastfall eine besonders niedrige Querlenkerlagersteifigkeit optimal, während beim gebremsten Fall eine hohe Steifigkeit gefordert wird.

Kostenvorteile

Wie bei allen unternehmerischen Entscheidungen stehen auch bei der Simulation Kosten und Nutzen einander gegenüber. Während die Kosten weitgehend transparent sind (Hardwarekosten, Softwarekosten für Lizenzen, Wartung und Anpassung, Mitarbeiteraus- und -weiterbildung sowie Arbeitszeit zur Durchführung der Simulationen), ist die Bewertung des Nutzens weitaus schwieriger [31]. Es können zwar Einsparungen durch Leichtbau bzw. Prototypenentfall direkt bewertet werden, vermiedene Werkzeugänderungskosten oder der geldwerte Vorteil einer Entwicklungszeitverkürzung lassen sich dagegen nicht direkt bewerten. Ähnlich verhält es sich bei der Einsparung von Ressourcen (Arbeitskapazität in den Konstruktions- und Versuchsabteilungen).

3.2.4 Grenzen der Simulation

Subjektive Beurteilung

Die bis heute besonders in den späten Phasen der Fahrwerksentwicklung unverzichtbare subjektive Bewertung von Entwicklungsständen [60] ist in der Simulation nur sehr stark eingeschränkt möglich. Für viele Bewertungskriterien sind bisher keine zuverlässigen objektiven Messverfahren entwickelt worden [101], [154], [144], daher ist eine Aussage zum Fahrverhalten in diesen Fällen nicht möglich.

Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle

Eine weitere, prinzipielle Grenze der Simulation ist die Beschränkung der Ergebnisgültigkeit durch den Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle. Nur die modellierten Zusammenhänge sind der Berechnung zugänglich. Hieraus ergibt sich der Zielkonflikt der Modellierung: je höher die geforderte Ergebnisqualität, desto mehr Aufwand ist bei der Modellierung nötig und desto komplexer und langwieriger werden die Berechnungen.

Die angestrebte Reduktion des Modellierungsaufwands birgt das Risiko unvollständiger Simulationsmodelle, das zwar durch eine Expertenabschätzung vorab bewertet werden kann, der Nachweis ist allerdings nur durch eine gründliche Modellvalidierung zu erbringen. Dazu sind Vergleichsversuche mit Hardware notwendig.

Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit von Simulationsmodellen

Abschließend ist die Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit von Simulationsmodellen zu nennen. Gespräche mit Simulationsexperten aus der Automobilindustrie haben ergeben, dass für einige Bauteile des Fahrwerks keine zufriedenstellenden Simulationsmodelle verfügbar sind:

- Reifen (kombinierte Schlupfzustände oder veränderliche Radaufstandskräfte)
- Luftfederung (in der Komfortsimulation)
- Dämpfung (Komfort)
- Elastomerlager (hochdynamische bzw. mehraxiale Belastungen)
- Aerodynamik (instationär)
- Fahrzeugführende bzw. bewertende Fahrermodelle (Kurswahl, subjektive Bewertung)

Die Berücksichtigung von Regelsystemen ist in der Simulation prinzipiell möglich. Die relevanten Algorithmen müssen allerdings implementiert werden. Hierzu ist unter Umständen ein beträchtlicher Modellierungs- und Pflegeaufwand nötig, damit stets der aktuelle Stand der Regelalgorithmen zur Verfügung steht.

3.3 Hardware in the Loop (HiL)

3.3.1 Übersicht

Hardware-in-the-Loop-Simulation ist in [104] folgendermaßen definiert:

„Bei der Hardware-in-the-Loop-Simulation wird das Verhalten eines Fahrzeugs unter Einsatz von Software- und Hardware-Modellen simuliert. Dazu werden reale Bauteile des Fahrzeugs (Realteile) über ihre elektrische Schnittstelle mit einem Simulationssystem verbunden, welches das Verhalten der Realteilumgebung in Echtzeit nachbildet.“

Üblicherweise wird Hardware-in-the-Loop (HiL) in der Fahrzeugtechnik für die Entwicklung von Steuergeräten [45], [84] bzw. die Entwicklung aktiver Fahrwerksysteme [123], [146] verwendet⁶. Dabei sind verschiedene Aufbauten möglich, die sich durch die Wahl der Systemgrenze zwischen virtueller und physischer Welt unterscheiden.

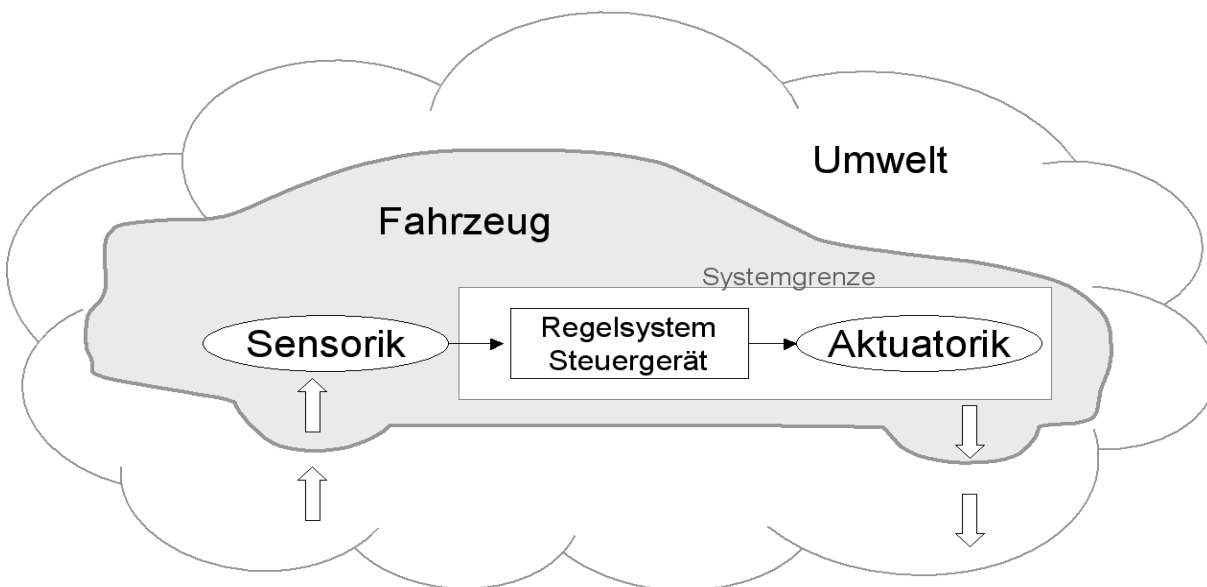


Bild 13: Modell einer HiL-Simulation

Bei der Überprüfung eines Regelsystems wird zum Beispiel das betreffende Steuergerät mit der zugehörigen Aktuatorik real aufgebaut während Sensorik, Fahrzeug und Umwelt vom Rechner simuliert werden. In diesem Fall ist die virtuell-physische Systemgrenze wie in Bild 13 zu ziehen. Sind hingegen reale Sensoren und Aktuatoren zu prüfen so wird die Grenze zwischen virtueller und physischer Welt üblicherweise so gewählt, dass Steuergerät, Fahrzeug und Umwelt durch das HiL Simulationssystem nachgebildet werden und nicht als Realteil vorhanden sind.

⁶ Weiteres Einsatzgebiet von HiL-Prüfständen sind moderne automatisierte Testsysteme für E/E-Systeme, insbesondere als Qualitätssicherungsprüfung in der Serienfertigung.

Unabhängig von der Wahl der virtuell-physischen Systemgrenze beziehen alle Ansätze jedes entscheidende Element des Gesamtsystems (Sensoren, Regelsystem mit Steuergerät, Aktuatoren, Fahrzeug und Umwelt) in den Versuch mit ein – sei es als Realteil oder als virtuelles Modell.

Wird der Begriff Hardware etwas weiter gefasst, zählen auch Fahrsimulatoren zu den HiL-Simulationen [47], [68], [133]. Hier steht der Mensch im Regelkreis (Regelsystem), greift über Lenkrad, Pedalerie etc. (Aktuatorik) in den simulierten Fahrzustand ein und erhält über seine Sinne Rückmeldungen des Fahrzeugs (Sensorik).

Die bei HiL-Simulationen verwendeten Modelle sind vielfältig und speziell an die Aufgabenstellung angepasst. In der Fahrwerksentwicklung finden hauptsächlich Fahrdynamikuntersuchungen statt, die auf Mehrkörpersystem-Simulation basieren. Die häufig verwendete Software ve-DYNA [209] zum Beispiel folgt dem Prinzip der Mehrkörpersimulation, trifft aber an einigen Stellen vereinfachende Annahmen, wie im Bereich der Achskinematik.

Um Realteile einbeziehen zu können, ist Echtzeitfähigkeit der Simulationsmodelle gefordert, und daher bereits bei der Modellierung zu berücksichtigen. Weiterhin müssen die Schnittstellen zu den (unter Umständen flexibel austauschbaren) Hardwarekomponenten definiert und implementiert werden.

3.3.2 Stärken der HiL Technologie

Höhere Prüftiefe und Aussagekraft

Die wesentliche Stärke der HiL Technologie gegenüber traditionellen Prüfstandsversuchen sowie gegenüber der rein virtuellen Simulation ist die Kombination von realen Bauteilen (Prototypen, Serienteilen, ...) mit simulierten Umgebungsbedingungen, durch die eine bestmögliche Abbildung der Bauteilumwelt bei geringem Aufwand gewährleistet wird. Eine deutlich höhere Prüftiefe und stärkere Aussagekraft sind die Folge [84]. Dabei bleiben die Transparenz der Versuchsbedingungen sowie die Möglichkeiten der Einstellung von Betriebszuständen und die Vermeidung bzw. Erzeugung von Störeinflüssen erhalten, wie oben für Prüfstände bzw. Simulation allgemein dargestellt.

Freie Variierbarkeit der virtuellen Versuchsumfänge

Die Möglichkeiten der Testgestaltung vervielfältigen sich durch die freie Variierbarkeit der simulierten Anteile [84] – ähnlich wie bei „rein virtueller“ Simulation. Für die Realteile im Regelkreis bleiben die in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Einschränkungen bestehen. Somit ergibt sich eine differenzierte Eignung für Reihenuntersuchungen bzw. Sensitivitätsanalysen: die simulierten Anteile sind weitgehend variabel, die Realteile beschränkt variierbar.

Reduzierung des Modellierungsaufwands durch Integration realer Bauteile

Weiterhin kann durch Integration realer Bauteile in die Simulation der Modellierungsaufwand deutlich gesenkt werden. Diese Vorgehensweise findet heute Anwendung bei der Entwicklung von Steuergeräten [45], [96], denn die Modellierung des Fehlerverhaltens bzw. des Verbundverhaltens ist praktisch nicht möglich. Eine Ausdehnung auf weitere Anwendungen wie zum Beispiel Fahrdynamiksimulation unter Einbeziehung von Reifenprüfständen oder die Abstimmung regelbarer Stoßdämpfer ist denkbar [34].

3.3.3 Grenzen der HiL Technologie

Ergebnisgültigkeit limitiert durch Echtzeitfähigkeit des Simulationssystems

Die Ergebnisgültigkeit hängt wie bei der „rein virtuellen“ Simulation direkt vom Detaillierungsgrad der Modelle ab. In Fall der HiL Simulation kommen die limitierenden Faktoren der Echtzeitfähigkeit hinzu: der Detaillierungsgrad der Simulation ist im wesentlichen durch die verfügbare Rechenleistung vorgegeben und lässt sich – im Gegensatz zur Offline Simulation, bei der unter Umständen längere Rechenzeiten in Kauf genommen werden – nicht beliebig verfeinern.

Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit von Simulationsmodellen

Für die Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit der Simulationsmodelle gelten die Ausführungen aus Kapitel 3.2.4 sinngemäß. Zusätzlich ist das Echtzeitverhalten der Simulationsumgebung zu validieren.

Schwierigkeit der subjektiven Beurteilung

Auch bei der HiL-Simulation sind die Möglichkeiten der subjektiven Beurteilung eingeschränkt, wengleich die Integration des Menschen mittels eines Fahrsimulators sie in Teilbereichen erweitert. Die subjektive Beurteilung bestimmter Themen, wie zum Beispiel des Fahrverhaltens, mit HiL-Simulation bleibt eine Herausforderung. Insbesondere die realitätsnahe Darstellung längs- und querdynamischer Bewegungen erscheint aufgrund des enormen Platzbedarfs äußerst fraglich.

Die Erarbeitung objektiver Aussagen ist, wie bei traditioneller Prüfstandstechnik, mit HiL-Simulation sehr gut möglich.

Versuchskosten

Die HiL Versuchskosten sind im Allgemeinen höher als bei Prüfständen bzw. rein virtuellen Simulationsmethoden. Zu den in Kapitel 3.2.4 genannten Simulationskosten kommen neben den Bauteilkosten der Prüflinge, die Investitionskosten der Prüfeinrichtungen (Sensoren, Aktuatoren, Messverstärker, Betriebsmittelversorgung, Aggregate, Fläche, ...) und des Echtzeitrechners hinzu, der meist an die spezielle Aufgabenstellung angepasst ist und nicht universell eingesetzt werden kann.

3.4 Vergleich von Versuch und Simulation

Die folgende Tabelle 4 vergleicht die in den vorangegangenen Tabellen zusammengetragenen Informationen über Prüfstände und Simulationsmethoden. Zu den in der Fahrwerksentwicklung relevanten Funktionseigenschaften sind jeweils die in Kapitel 3.1.3 genannten Prüfstände mit ihren Messgrößen⁷, Messbereichen und Auflösungen aufgelistet. Dem stehen die dazu korrespondierenden Simulationsmethoden mit den erreichbaren Genauigkeiten und betreffenden Randbedingungen gegenüber. In allen Fällen ist die maximale Genauigkeit und der größte Gültigkeitsbereich genannt.

Es zeigt sich ein weitgehend inhomogenes Bild des Status Quo: für einige Anwendungen erreichen die Simulationsergebnisse bereits die Prüfstandsgenauigkeit, andere sind der Simulation noch gar nicht zugänglich. Für die meisten Anwendungen liefert die Simulation brauchbare Ansätze, die aber nicht an die Qualität der Prüfstandsergebnisse heranreichen.

Anwendungen mit qualitativ überzeugenden Simulationsergebnissen sind:

- Bremsattelauflage, bei der allerdings die resultierende Volumenaufnahme nicht berechnet wird.
- Statische und dynamische Steifigkeit von Elastomer- und Hydrolagern, wobei die Berechnung der Sprungantwort noch der Weiterentwicklung bedarf.
- Pedalkraft und Hydraulikdruck des Bremskraftverstärkers, der allerdings ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses berechnet wird.
- Quasistatische Kennlinien der Achskinematik (Radlast, Spur und Sturz über Einfederung, Brems- und Seitenkraft), wobei Spur-, Sturz-, Roll- und Lenkradmoment nicht ausreichend genau verfügbar sind.

Für folgende Themen existieren Ansätze brauchbarer Simulationsmodelle:

- Bremsbelagsteifigkeit und -durchwärmung
- Frequenz der Betriebsschwingungen von Bremsscheiben (Einfluss von Bremsbelag-, Bremsscheiben- und Umgebungstemperatur, Luftfeuchte sowie mechanischer Vorspannungen sind nicht berücksichtigt, die Pegelhöhe der Betriebsschwingung ist nicht berechenbar.)
- Volumenstrom, Druck und Temperatur von Hydrauliksystemen
- Steifigkeit und Dämpfung von Stoßdämpfern und Luftfedern

⁷ Im Vergleich zu Tabelle 1 sind hier nur die Messgrößen aufgelistet, um einen Vergleich der erreichbaren Aussagegenauigkeiten bei gleichen Randbedingungen herzustellen.

- Fliehkraftkontur von Reifen
- Reifenkennlinien. Simulationen zu Seitenkräften und Rückstellmoment unter Schräglauf sowie Radaufstands- und Längs Kräften bei Schlagleistenüberrollen sind brauchbare Ansätze, jedoch sind keine Temperatur- oder Fahrbahnbelageinflüsse abgebildet. Aussagen zum Sturzmoment sowie bei kombinierten Längs- und Querschlupfzuständen sind ebenfalls nicht möglich.

Heute mit Simulation nicht bearbeitbare Themenfelder sind:

- Durch Bremsvorgänge hervorgerufene Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit (Rauhigkeit, geometrische Abweichungen) von Bremsscheiben
- Reibwert von Betriebs- und Feststellbremse
- Pedalkraft und Ausrückweg der Kupplung bei Kupplungsbetätigung
- Reifenrestlaufstrecke
- Tieftemperaturverhalten der Kraftstoffversorgungsanlage und anderer Komponenten

Wie die Zusammenfassung zeigt, sind bei vielen Simulationsmethoden nicht alle wesentlichen Randbedingungen erfasst. Häufig fehlen die Einflüsse von Temperatur, Luftfeuchte, die am Prüfstand mit Klima- oder Temperaturkammer realisierbar sind. Folglich kann die Aussagequalität einer Fahrverhaltens- oder Fahrkomfortsimulation auf Gesamtfahrzeugebene (zum Beispiel ISO-Spurwechsel oder Abrollkomfort) aus den Einzelqualitäten der jeweils ausschlaggebenden Komponenten bzw. Betriebsbedingungen [60] abgeschätzt werden. Im Beispiel ISO-Spurwechsel sind also die Kennwerte der Achskinematik einschließlich Elastokinematik mit hoher Qualität simulierbar, wobei der Einfluss der Stoßdämpfer bzw. der Luftfedern nicht einwandfrei aufgelöst werden kann. Die Reifeneigenschaften können ebenfalls nur mit verminderter Genauigkeit berücksichtigt werden, solange der Längsschlupf vernachlässigbar bleibt. Bei gleichzeitigem Längs- und Querschlupf kommen die Reifenmodelle, wie oben beschrieben, an ihre Grenzen. Aus diesem Grund ist gegenwärtig einiger Validierungsaufwand zu betreiben, um die Simulationsmodelle für konkrete Aufgabenstellungen und spezielle Fahrzeugkonfigurationen zu optimieren. Die so validierten Fahrzeugmodelle bilden heute die Grundlage für weitergehende Variantenbewertungen und Sensitivitätsanalysen.

Funktionseigenschaften	Prüfstand	Messgrößen	Messbereich	Auflösung +/-	Simulation	Genauigkeit	Randbedingungen
Themengebiet Bremsen							
Bremsbelagsteifigkeit, -durchwärmung	Bremsbelag Kompressibilitätsprüfstand	Temperatur Verformungsweg	600 °C 10 mm	5 °C 2 µm	[41] [41]	25 °C 10 µm	-
Betriebsschwingformen der Bremsscheibe bzw. des Bremssystems	Bremsengeräuschprüfstand	Frequenz der Schallentwicklung Pegelhöhe der Schallentwicklung Luftfeuchtigkeit	800 – 1600 Hz 120 dB 100 % r. F.	0,1 Hz 0,1 dB 2 % r. F.	[63] nicht verfügbar nicht verfügbar	100 Hz - -	-
Volumenaufnahme des Bremssattels Bremssattelaufweitung	Bremssattelprüfstand	Volumenaufnahme Aufweitung	20 cm ³ 20 mm	0,01 cm ³ 0,01 mm	nicht verfügbar [189]	- 0,02 mm	p = 0 – 160 bar
Oberflächenbeschaffenheit	Bremsscheiben- Formfehler- Messmaschine	Oberflächenrauigkeit Ebenheit, Rechtwinkligkeit	- -	1 µm 1 µm	nicht verfügbar nicht verfügbar	- -	-
Funktion der Feststellbremse	Feststellbremsenprüfstand	Temperatur der Bremsflüssigkeit Temperatur der Bremsscheibe	250 °C 650 °C	5 °C 5 °C	[107] [107]	15 °C 15 °C	-
Reibwert Temperaturverhalten der Bremsscheibe	Reibwertprüfer (RWP 1-3)	Reibwert Temperatur der Bremsflüssigkeit Temperatur der Bremsscheibe	unbegrenzt 250 °C 650 °C	0,01 5 °C 5 °C	nicht verfügbar [107] [107]	- 15 °C 15 °C	-
Themengebiet Federung, Dämpfung, Stabilisierung, Fahrwerk- und Aggregatelagerung							
Federsteifigkeit	Federwaage	Federkraft	20 kN	20 N	[185] / [125]	20 / 500 N	s = 4 / 8 mm
Dämpfung und Steifigkeit von Luftfedern und Stoßdämpfern	Dämpfer-Hydropulsprüfstand (HP2) VDA-Stoßdämpferprüfstand	Kraft Dämpfergeschwindigkeit	25 kN 2,0 m/s	2 N 0,1 mm/s	[169] [143] [6] [143]	400 N 250 N 40 N 0,1 m/s	v = -5 – 1 m/s f = 0 – 15 Hz f = 5 – 40 Hz -
Steifigkeit von Elastomer- und Hydrolagern	Lager-Hydropulsprüfstand (HP1)	Kraft Kammertemperatur Steifigkeit	25 kN 80 °C unbegrenzt	50 N 0,5 °C 7,5 N/mm	[36] nicht verfügbar [90] [91]	200 N - 5 N/mm 20 N/mm	? x = 0,6 – 1,5 mm - f = 1 – 20 Hz; s = 0,5 mm f = 1000 Hz

Tabelle 4/Teil 1: Vergleich der mit Prüfständen und Simulationstools erreichbaren Genauigkeiten

Funktionseigenschaften	Prüfstand	Messgrößen	Messbereich	Auflösung +/-	Simulation	Genauigkeit	Randbedingungen
Themengebiet Lenkung							
Lenkgetriebeübersetzung Lenkhilfeunterstützung	Lenkgetriebe- prüfstand	Hydraulikölvolumenstrom	17 l/min	0,1 l/min	[18]	1 l/min	-
		Hydrauliköltemperatur	10 – 90 °C	3 °C	[18]	5 °C	-
		Zahnstangenkraft	10 kN	0,3 N	[18]	500 N	-
Druck- und Volumen- stromversorgung	Pumpenfunktions- prüfstand	Leitungsdruck	200 bar	0,3 bar	[18]	10 bar	-
		Öltemperatur	40 – 130 °C	0,3 °C	[18]	5 °C	-
		Volumenstrom	63 l/min	0,02 l/min	[18]	3 l/min	-
Themengebiet Pedalwerk und Bremsbetätigung							
Dynamische Brems- pedalwege und -kräfte	Hydropuls BKV- Prüfstand	Kraft	10 kN	20 N	[87]	7 N	-
		Temperatur	-40 – 150 °C	3 °C	nicht verfügbar	-	-
		Hydraulische Drücke	200 bar	0,3 bar	[87]	7 bar	-
Statische Kupplungs- pedalwege und -kräfte	Kupplungsbetäti- gungsprüfstand	Pedalkraft	1 kN	20 N	nicht verfügbar	-	-
		Ausrückweg der Kupplung	300 mm	3 mm	nicht verfügbar	-	-
Statische Bremspedal- wege und -kräfte	Statischer BKV- Prüfstand	Bremspedalkraft	1 kN	20 N	[87]	7 N	-
		Hydraulikdruck	200 bar	0,3 bar	[87]	7 bar	-
Themengebiet Reifen							
Reifenkennlinien	Reifeneigenschaften- prüfstand	Radaufstandskraft	15 kN	75 N	[126]	400 N	(Stufenüberfahrt)
		Längskraft	10 kN	4 N	[126]	200 N	(Stufenüberfahrt)
		Seitenkraft	10 kN	4 N	[126]	400 N	$F_N = 2 - 8 \text{ kN};$
		Sturzmoment	1000 Nm	10 Nm	nicht verfügbar	-	$a = +/- 10^\circ$
		Rückstellmoment	320 Nm	3,2 Nm	[11]	15 Nm	$a = +/- 2^\circ$
Reifenrestlaufstrecke	Reifenschnellauf- prüfstand	Geschwindigkeit	320 km/h	5 km/h	nicht verfügbar	-	-
		Radaufstandskraft	20 kN	0,2 kN	nicht verfügbar	-	-
		Sturz	$+/- 10^\circ$	0,1 °	nicht verfügbar	-	-
		Reifeninnentemperatur	150 °C	5 °C	nicht verfügbar	-	-
Reifenungleichförmigkeit	Reifen-Uniformity- Prüfstand	Beulen, Seiten- und Höhenschlag	5 mm	0,01 mm	[11]	0,5 mm	-

Tabelle 4/Teil 2: Vergleich der mit Prüfständen und Simulationstools erreichbaren Genauigkeiten

Funktionseigenschaften	Prüfstand	Messgrößen	Messbereich	Auflösung +/-	Simulation	Genauigkeit	Randbedingungen
Themengebiet Gesamtfahrzeug und Systeme							
Statische Kinematik- und Elastokinematik	K&C Prüfstand	4x Radkräfte (x / y / z) 4x Radmomente (d / ? / ?) Lenkradmoment Rotation (d) Rotation (?) Rotation (?)	14 / 14 / 30 kN 2,25 / 4 / 4 kNm 30 Nm +/- 12 ° +/- 12 ° +/- 50 °	20 / 20 / 60 N 1 / 1 / 1 Nm 0,03 Nm 0,1 ° 0,1 ° 0,02 °	n. v. / n. v. / [159] nicht verfügbar nicht verfügbar [159] [159] nicht verfügbar	100 N - - 3 ' 18 ' -	$h_R = -08 - 50 \text{ mm}; LW = 0^\circ$ - - $h_R = -80 - 50 \text{ mm}; LW = 0^\circ;$ $F_{Br} = 0 - 3 \text{ kN};$ $F_S = -2 - 2 \text{ kN}$
Massenschwerpunktlage Massenträgheit	Pendelprüfstand	Schwerpunktlage (x, y) Schwerpunkthöhe (z) Massenträgheit (x, y, z)	- - -	2,5 mm 5 mm 100 kgm ²	[153] [153] [153]	10 / 200 mm 200 mm 2 %	- - -
Tiefemperaturverhalten der Kraftstoffver- sorgungsanlage und anderer Komponenten	Rollenprüfstand mit Klimakammer	Raddrehzahlen Zugkraft (pro Rolle) Antriebsleistung Massensimulation Kammertemperatur Fahrtwindgebläse	220 km/h 3 kN 66 kW 700 - 2200 kg -40 - 70 °C -	0,1 km/h 0,5 % - - +/- 2 °C -	nicht verfügbar - - - -	- - - - -	- - - - -

Tabelle 4/Teil 3: Vergleich der mit Prüfständen und Simulationstools erreichbaren Genauigkeiten

Neben den in Tabelle 4 quantifizierten Eigenschaften „Aussagegenauigkeit“ und „berücksichtigte Randbedingungen“ sind bei der Gestaltung eines Prüffelds folgende weitere Eigenschaften zu berücksichtigen:

- Ergebnistransparenz
- Verfügbarkeit und Variierbarkeit von Bauteilen bzw. Modellen
- Kostensituation

Ergebnistransparenz

An Prüfständen lassen sich eine Vielzahl an Messstellen realisieren, die mit Hilfe der Prüfstandssoftware parallel zum Versuch physikalische Größen und deren Werteverlauf aufzeichnen. Bei virtuellen Experimenten sind die Messstellen a priori in den Modellen implementiert, die Aufzeichnung muss lediglich vor der Berechnung aktiviert werden. In beiden Fällen lassen sich die Messstellen zu abgeleiteten Größen weiterverrechnen und als Tabellen oder Diagramme ausgeben.

Die Simulation bietet zusätzlich die Möglichkeit, Zeitverläufe der Messstellen in dreidimensionalen Vektor- oder Falschfarbendarstellungen zu visualisieren, was die Anschaulichkeit der Ergebnisse weiter steigert. Reproduzierbarkeit ist bei Prüfstandsversuchen und Simulationen gegeben. Die Vergleichbarkeit der Prüfstands- und Simulationsergebnisse mit dem Fahrversuch hängt vom speziellen Untersuchungsgegenstand ab. Insbesondere bei subjektiv geprägten Aussagen des Fahrversuchs (z. B. Anlenkverhalten) ist eine Korrelation von Mess- oder Simulationsergebnissen schwierig. Objektive Kriterien (beispielsweise Bremsweg) sind im Gegenteil gut zu korrelieren.

Verfügbarkeit und Variierbarkeit von Bauteilen bzw. Modellen

Prüfstandsversuche sind aufgrund von Prototypenfertigungszeiten und -kosten für Optimierungen und Variantenuntersuchungen nur in Ausnahmefällen geeignet. Insbesondere sind beim Tausch von Komponenten neue Bauteile zu fertigen und zu beschaffen sowie gegebenenfalls Adaptionen anzupassen. Somit sind Optimierungen oder Sensitivitätsanalysen mit Prüfstandsversuchen äußerst aufwendig und langwierig. Zudem müssen bei Bauteilherstellung und Versuchsdurchführung physikalische und technische Zwänge berücksichtigt werden.

Die Simulation kann bei diesen Punkten ihre wesentlichen Stärken ausspielen: Modelle lassen sich unabhängig von technischen Zwängen schnell variieren und automatisch optimieren, Sensitivitätsanalysen sind hauptsächlich eine Frage der Rechenleistung. Die erforderlichen Modelle müssen jedoch unter Umständen eigens erzeugt und validiert werden.

Kostensituation

Die Simulation bietet klare Kostenvorteile, hauptsächlich durch den Entfall von Prototypenprüfungen in frühen Projektphasen. Durch konsequente Weiterentwicklung der Simulationenmethoden und ihren produktiven Einsatz in der Fahrzeugentwicklung lassen sich die erforderlichen Prüfkosten (Material und Personalkapazität) deutlich senken. Wie in Kapitel 4.2.5 gezeigt wird, reduzierten sich die Prüfkosten in den letzten 8 Jahren durch verstärkten Simulationseinsatz um ca. 40%. Dazu kommen noch vermiedene Werkzeugänderungskosten und der geldwerte Vorteil der Entwicklungszeitverkürzung, die sich allerdings nicht direkt bewerten lassen.

*

Entsprechend ihrer spezifischen Stärken und Grenzen sind Prüfstandsversuch und Simulation für die verschiedenen Phasen der Produktentwicklung unterschiedlich gut geeignet. Um sie zuzuordnen werden zunächst die Phasen eines typischen Produktentwicklungsprozesses in der Automobilindustrie sowie die Aufgaben der Fahrwerksentwicklung in den einzelnen Prozessphasen vorgestellt.

Ein typischer Entwicklungsprozess lässt sich, wie in Bild 14 dargestellt, in sechs Prozessphasen einteilen:

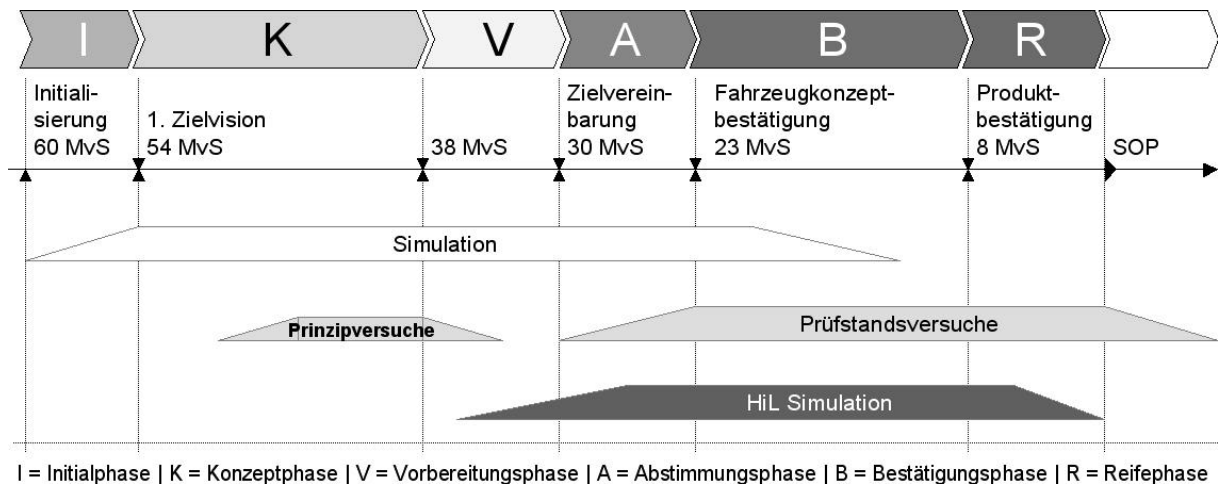


Bild 14: Zuordnung Prüfstandsversuche, Simulation und HiL zu Entwicklungsphasen

Die Entwicklung eines neuen Fahrzeugs beginnt 60 Monate vor Produktionsstart (Start of Production, SOP) mit der *Initialisierung* des Projekts. Bis zum Meilenstein -1. Zielvision- 54 Monate vor Start of Production (MvS) wird das Produktzielsystem aufgestellt und grob abgestimmt. In der Konzeptphase werden die Produktziele weiter detailliert und ausgeplant. Die Vorbereitungsphase dient der Abstimmung und Vereinbarung der Detailziele. 30 MvS ist die Zielvereinbarung

abgeschlossen. Zu diesem Zeitpunkt beginnt die Serienentwicklung mit der Abstimmphase, während der die geometrische, funktionale und produktionstechnische Integration des Fahrzeugs realisiert wird. Ab dem Meilenstein Fahrzeugkonzeptbestätigung (23 MvS) beginnt die Bestätigungsphase, in der die einzelnen Produkteigenschaften (Funktionsbestätigung) sowie die Lebensdauer abzusichern sind.

Ab dem Meilenstein Produktbestätigung (8 MvS) beginnt in der Reifephase die Einarbeitung und Optimierung der Serienwerkzeuge. Die Anlaufproduktion bestätigt die Prozesssicherheit der Fertigungsabläufe.

Die Fahrwerksentwicklung setzt in der *Konzeptphase* mit der Auslegung des Fahrwerks ein, bei der beispielsweise verschiedene mögliche Achskonzepte oder Anforderungen an die Bremssysteme aus dem Produktzielsystem abgeleitet werden. Dazu werden unter anderem Last-Zeit-Reihen von Vorgängermodellen skaliert und auf das aktuelle Projekt angewendet.

In der *Vorbereitungsphase* folgen grundsätzliche Konzeptbestätigungen, zum Beispiel die Bestätigung der thermischen, mechanischen und hydraulischen Dimensionierung der Bremsenkomponenten oder die prinzipielle Funktionsbestätigung der Achskomponenten im Gesamtfahrzeug. In der *Abstimmphase* erfolgt die Anpassung der einzelnen Komponenten aneinander. So werden zum Beispiel Bremsbelag, -scheibe, -sattel und -betätigung festgelegt. Die Erprobungsergebnisse sind Grundlage für die Erteilung der Produktionsfreigabe. Die Elastokinematik der Achsen wird ebenfalls so weit abgeschlossen, dass weitere eventuell nötige Änderungen ohne Modifikationen an den Produktionswerkzeugen darstellbar sind.

In *Bestätigungs-* und *Reifephase* finden Feinabstimmungen statt: so werden Bremsenbauteile aus seriennahen Werkzeugen zum Beispiel bezüglich Rubbeln und Bremsengeräusch überprüft und abgestimmt. Auf Seiten der Achskinematik ist unter anderem die Systemqualität unter Berücksichtigung aller Toleranzen zu bestätigen bzw. zu korrigieren.

Während der Anlaufproduktion wird die Qualität der produzierten Fahrwerke überprüft.

Die Stärke der Simulation bei Variantenrechnungen, Sensitivitätsanalysen und Optimierungen prädestiniert sie trotz relativ geringer Aussagesicherheit bzw. Trennschärfe für den Einsatz in frühen Projektphasen, wenn viele Konzeptvarianten zu bewerten und Tendenzen bzw. Unterschiede herauszuarbeiten sind (Konzeptprüfung).

Prüfstandsversuche sowie HiL-Simulationen sind dagegen auf reale Bauteile angewiesen. Sie finden meist in späteren Projektphasen Anwendung, wenn Detailentscheidungen anstehen (Entwicklungsprüfungen, Freigabeprüfungen). Reproduzierbare Versuche mit realen, möglichst seriennah gefertigten Bauteilen liefern dann Aussagen mit der geforderten Trennschärfe bzw.

Aussagesicherheit, die mit rein virtueller Simulation nicht darstellbar sind. Qualitätsprüfungen nach QV (Qualitätsvorschrift) sind nur mit realen Bauteilen durchführbar. Es werden meist einfache Prüfstände verwendet. HiL Prüfungen zur Qualitätskontrolle wären theoretisch möglich aber nicht wirtschaftlich rentabel.

Die Simulation setzt bereits vor der Konzeptphase ein und hat in der Bestätigungsphase ihren Zenit überschritten. Prüfstandsversuche werden, allerdings mit geringer Intensität, bereits in der Konzeptphase eingesetzt, zum Beispiel um Prinzipversuche mit Prüfstandsmessungen belegen zu können. Das Haupteinsatzgebiet von Prüfstandsversuchen ist die Bestätigungs- und Reifephase. Qualitätskontrollen werden während der Bestätigungsphase erarbeitet und nach SOP regelmäßig von Zulieferern sowie den Qualitätsstellen in den Werken durchgeführt. Die HiL-Simulation kann bereits in der Abstimmphase eingesetzt werden und ist zum SOP weitgehend abgeschlossen.

4 Zukünftige Veränderungen von Prüffeld und Simulation

Das folgende Kapitel leitet die zukünftig zu erwartenden Veränderungen von Prüffeld und Simulation aus den globalen Trends des Automobilmarkts („Markt und Produkt“), der Entwicklungsprozesse sowie der Entwicklungsmethoden und -werkzeuge ab.

4.1 Veränderungen von Markt und Produkt

Der globale Automobilmarkt ist, wie in der Einleitung angedeutet, geprägt von steigendem Wettbewerbsdruck. Daraus ergeben sich für die Automobilindustrie die in Bild 15 skizzieren fünf Handlungsfelder, deren Einflüsse auf Simulation und Prüffeld im Folgenden analysiert werden:



Bild 15: Veränderungen von Markt und Produkt

Es gilt, dem Kunden ein auf seine individuellen Wünsche zugeschnittenes Fahrzeug (Individualisierung) anzubieten, mit dem er sich identifiziert (Emotionalisierung). Gleichzeitig finden die Globalisierung des Weltmarkts (weltweite Ausrichtung von Entwicklung, Einkauf, Produktion und Vertrieb) und die Rationalisierung insbesondere in Entwicklung und Produktion (Kosteneinsparungen) statt. Überlagert sind diese Trends vom Zwang, einen zeitlichen Vorsprung vor dem Wettbewerb zu erlangen (Time to Market). Die Erfüllung sämtlicher gesetzlicher Anforderungen wird vorausgesetzt.

4.1.1 Individualisierung

Kundenindividuelle Fahrzeuge erhöhen die Absatzzahlen, wenn den Wünschen der Kunden jeweils passende Angebote gegenüberstehen. Das Bestreben der Automobilindustrie nach Individualisierung hat eine Erweiterung der Modellpalette zur Folge und äußert sich durch auffälliges Wachstum der traditionell kleineren Marktsegmente, wie Marktübersichten des VDA belegen:

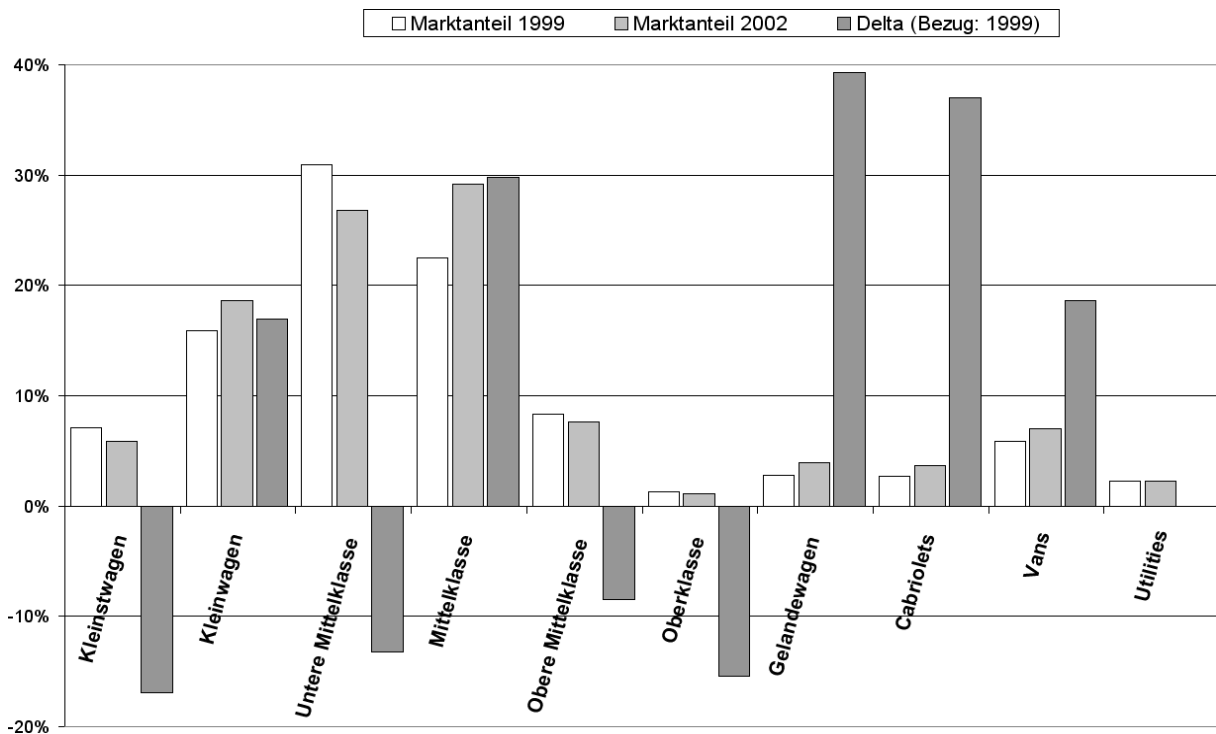


Bild 16: Pkw-Neuzulassungen nach Segmenten der Jahre 1999-2002 [181], [182]

In Bild 16 sind die Marktanteile der einzelnen Bereiche der Jahre 1999 bzw. 2002 dargestellt, sowie die Veränderungen (Delta), bezogen auf den Marktanteil 1999. Die Grafik zeigt, dass neben Kleinwagen und Mittelklasse vor allem die kleineren Fahrzeugsegmente Geländewagen, Cabriolets und Vans deutlich gewachsen sind, und zwar hauptsächlich auf Kosten der unteren Mittelklasse. Aufgrund fehlender Daten sind Fahrzeugvarianten (wie Limousine, Coupé, Touring) sowie weitere Segmente (Roadster, Sportwagen), die einen weiteren wesentlichen Beitrag zur Individualisierung der Produktpalette leisten, nicht dargestellt. Die reale Diversifizierung des Marktes ist effektiv höher anzusehen.

Zusätzlich zur Individualisierung versucht die Automobilindustrie, gerade im Premiumbereich, die Kunden von der Innovationsführerschaft und somit der Einzigartigkeit des Produkts zu überzeugen. Dabei gewinnen Fahrwerkregelsysteme (ESP/DSC, ARS/ABC, AFS) und Fahrerassistenzsysteme (ACC, NightVision) sowie Informations- bzw. Kommunikationssysteme

(iDrive) immer mehr an Bedeutung, wie Bild 17 illustriert. Der zukünftige Zusammenschluss aller Fahrwerkregelsysteme zu einem Integrated-Chassis-Management (ICM) verstärkt diesen Trend.

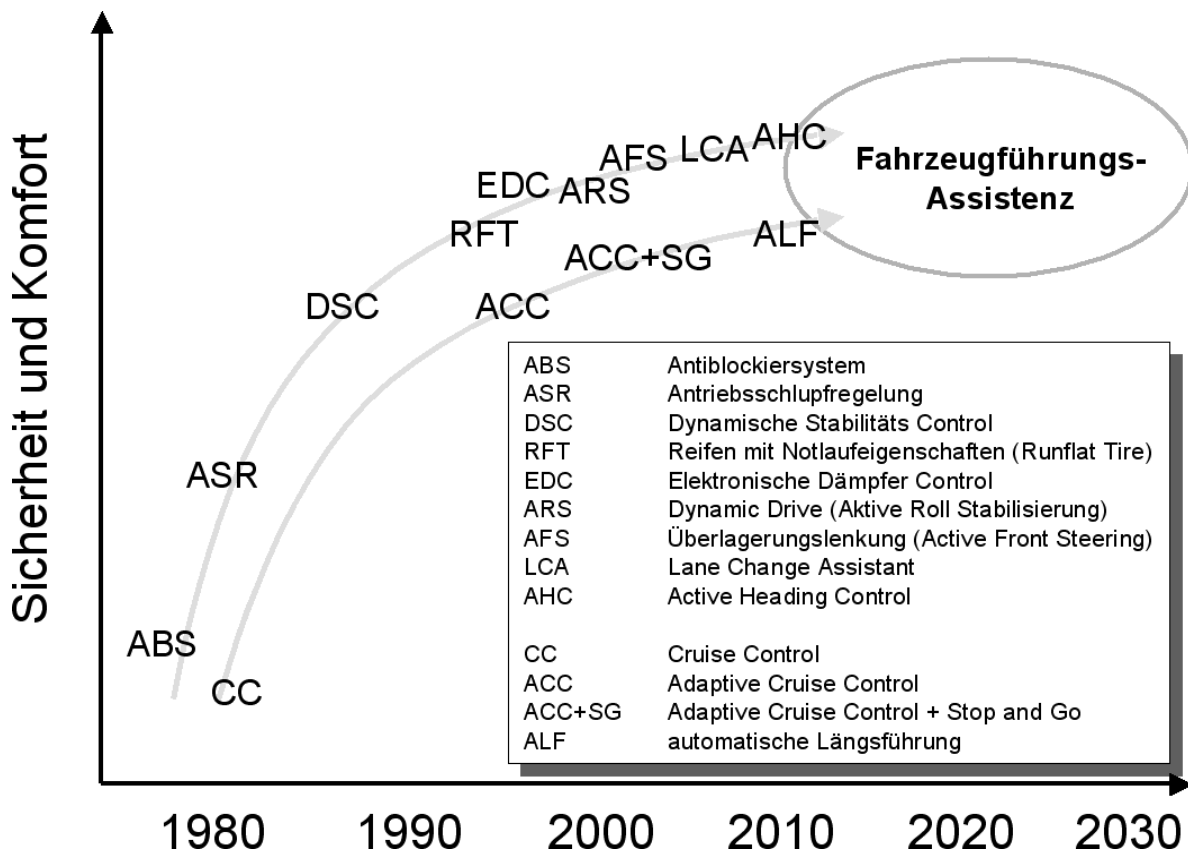


Bild 17: Markteinführung und Beitrag zur aktiven Sicherheit bedeutender Innovationen [61]

Im Gegensatz dazu werden Innovationen im unregelmäßig, mechanischen Fahrwerk wie Leichtbaubremsscheiben oder Reifen mit Notlaufeigenschaften immer weniger stark herausgestellt.

4.1.2 Emotionalisierung

Die emotionale Bindung des Kunden an sein Fahrzeug bzw. an die Marke („Freude am Fahren“, „Vorsprung durch Technik“) ist ein Garant für Wiederverkäufe. Um eine langfristige Kundenbindung zu erreichen, rückt das Fahrerlebnis in den Mittelpunkt der Fahrwerks- bzw. Fahrdynamikentwicklung. Die Produktqualität wird wichtiger denn je und das Markenmanagement erlangt einen neuen Stellenwert in der Unternehmensstrategie.

Das Fahrerlebnis wird hauptsächlich durch Fahrleistungen, aktive und passive Sicherheit sowie Akustik und Komfort beeinflusst. Diese Kriterien sind traditionell Gegenstand der Fahrwerksentwicklung, müssen aber weiterentwickelt und verstärkt aus Sicht der Kunden bewertet werden. Neben den oben angesprochenen Innovationen sind dazu Leistungssteigerungen in allen

Bereichen erforderlich. Die Produktqualität ist ebenso verstärkt aus Sicht des Kunden zu bewerten, denn die Toleranz der Kunden gegenüber komfortmindernden Geräuschen, Systemausfällen und Pannen nimmt stetig ab.

Auf den Grundstock aus Fahrerlebnis und Produktqualität baut das Markenmanagement auf. Das Ziel ist, authentische und eigenständige Marken von hohem Wert aufzubauen bzw. zu pflegen. Um einen hohen Markenwert zu erreichen gehören neben der Sicherstellung stimmiger Produkteigenschaften ein umfangreiches Angebot an Serviceleistungen (Finanzierung, Versicherung, Kundendienst, Mobilitätsgarantie) und eine gesamthafte, positive Wahrnehmung der Marke durch Kunden, Mitarbeiter, Investoren und Presse.

4.1.3 Globalisierung

Ein Aspekt der Globalisierung ist die Erschließung neuer Absatzmärkte (insbesondere Indien und China) um stetig steigende Absatzzahlen zu garantieren und Marktanteile zu sichern. Bild 18 zeigt die Entwicklung der aus Deutschland in den Jahren 1998 – 2003 exportierten Fahrzeuge. Der Absatz ins europäische Ausland sank um 10%. Im Vergleich dazu stiegen die Ausfuhren nach Asien von 4% auf 6%, in die USA von 12% auf 15% und in die nicht näher spezifizierten „sonstigen“ Staaten von 8% auf 13%.

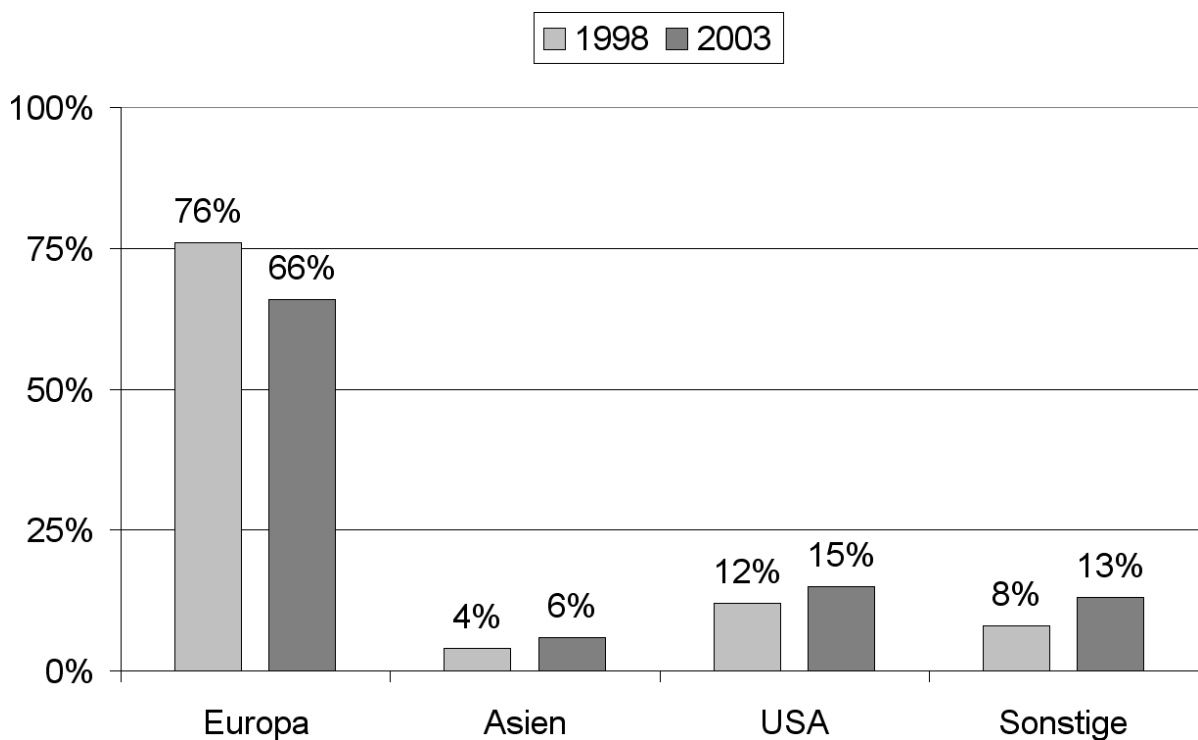


Bild 18: Entwicklung der Pkw-Exporte aus Deutschland 1998 bis 2003 [180] [182]

Allein im Jahr 2003 stiegen die Exporte von Deutschland nach Asien um 31 Prozent und China wurde für Deutschland mit einem Anstieg um 138 Prozent wichtigster Ausfuhrmarkt in Asien, noch vor Japan [182].

Für die Automobilindustrie bedeutet dies die Forcierung der Markenpräsenz vor Ort, die sich durch die Errichtung umfassender Vertriebs- und Servicenetze in den Absatzländern erreichen lässt. Die Diversifizierung der Produktpalette durch angepasste Ländervarianten ist die Folge.

Weitere Aspekte der Globalisierung sind die Errichtung internationaler Entwicklungs-, Beschaffungs- und Produktionsnetzwerke, um Standortvorteile wie Ausbildungs- oder Lohnkostenniveau zu nutzen.

4.1.4 Rationalisierung

Um mit attraktiven Preisen am Markt operieren zu können müssen in allen Bereichen Kosten eingespart werden, insbesondere in Entwicklung und Produktion. Geeignete Maßnahmen sind:

Produktmodularisierung bzw. Standardisierung

Komponenten und Systeme, die nicht die primäre Kundenwertigkeit des Fahrzeugs betreffen (zum Beispiel Klimakompressor, Ölfilter), sollen als Baukasten, Gleich- oder Synergieteile möglichst über alle Baureihen und Varianten Verwendung finden. Dadurch wird die Teilevielfalt in der Produktion reduziert, die Stückzahlen der betreffenden Teile steigen; Kosten sinken.

Entwicklung in Partnernetzwerken

Durch den Aufbau von Entwicklungsnetzwerken können Synergien durch Spezialisierung ausgenutzt und somit Kosten gespart werden. Ziel ist die Ausnutzung der jeweiligen Stärken aller Entwicklungspartner, vom Fahrzeughersteller über Systemlieferanten bis zum Rohteilhersteller; Entwicklungsdienstleister und unabhängige Prüfinstitute eingeschlossen.

Funktionsorientiertes Innovationsmanagement

Durch frühzeitige, kundennahe Bewertung der Funktionalität des Gesamtfahrzeugs (Funktionsorientierung) werden verstärkt solche Innovationen vorangetrieben, die von den Kunden als besonders wichtig erachtet werden und damit den höchsten Markterfolg versprechen. Innovationen mit geringen Absatzchancen erfahren eine niedrigere Priorisierung.

Wissensmanagement

Wissensmanagement ist die Bereitstellung des bereits im Unternehmen erarbeiteten Wissens durch geeignete Systeme. Dadurch gelingt es, Doppelarbeit bzw. Fehlentscheidungen zu vermeiden und so die Effizienz der Produktentwicklung zu steigern.

Frontloading

Die Verschiebung von Entwicklungsinhalten und Konzeptentscheidungen in frühe Projektphasen wird allgemein als „Frontloading“ bezeichnet. In der Vergangenheit wurde die für eine Entwicklungsentscheidung erforderliche Aussagesicherheit nur durch Versuche erreicht. Dadurch konnte die Entscheidung erst relativ spät im Produktentwicklungsprozess gefällt werden und Alternativen mussten über längere Zeiträume parallel entwickelt werden. Durch die zunehmende Aussagesicherheit der virtuellen Produktentwicklung wird es möglich, die konzeptentscheidenden Eigenschaften der Alternativen früher im Prozess zu ermitteln, und dadurch kostenintensive Parallelentwicklungen zu vermeiden.

4.1.5 Time to Market

Je mehr Zeit von Produktidee bis Markteinführung („Time to Market“) verstreicht, desto eher sind Wettbewerber in der Lage, vergleichbare Entwicklungen auf dem Markt zu platzieren. Daher ist Time to Market entscheidend für die Einzigartigkeit auf dem Markt („Unique Selling Proposition“) und somit für die Verkaufszahlen und den Produkterfolg.

Um Produktideen und Innovationen schneller serienreif entwickeln zu können müssen allgemein die Entwicklungsprozesse verkürzt werden. Die zahlreichen Komponenten und Systeme eines Fahrzeugs werden deswegen simultan entwickelt („Simultaneous Engineering“). Das erhöht zwar den Abstimmungsaufwand, führt aber insgesamt zu einem deutlichen Zeitgewinn gegenüber rein sequenzieller Entwicklung.

Weitere Verkürzungen der Entwicklungsprozesse lassen sich durch die Vermeidung von Fehlentwicklungen (durch verlässliche Konzeptentscheidungen in frühen Prozessphasen) sowie durch das angesprochene Frontloading erreichen.

4.2 Veränderungen der Entwicklungsprozesse

Tabelle 5 fasst die oben dargestellten Trends des internationalen Automobilmarkts und deren Folgen für die Fahrzeugentwicklung zusammen.

Trend	Folgen für die Fahrzeugentwicklung
Wettbewerbsdruck	Individualisierung Emotionalisierung Rationalisierungen Time-to-Market Globalisierung (Erschließung neuer Märkte)
Individualisierung	Innovationen (Unique Selling Proposition) Variantenzahl steigt (Neue Marktsegmente)
Emotionalisierung	Leistungssteigerung des Produkts Funktionsorientierung („Fahrerlebnis“) Innovationen (Markenattraktivität) Qualitätsansprüche der Kunden steigen Markenmanagement
Globalisierung	Variantenzahl steigt (Ländervarianten) Entwicklung in Partnernetzwerken Ausbau Einkaufs- und Produktionsnetzwerke Ausbau Vertriebs- und Servicenetzwerke
Rationalisierungen	Modularisierung bzw. Standardisierung Entwicklung in Partnernetzwerken Senkung der Entwicklungskosten Steigerung der Flexibilität Innovationsmanagement Wissensmanagement Frontloading
Time-to-Market	Verkürzung der Entwicklungsprozesse Simultaneous Engineering Fehlentwicklungen vermeiden

Tabelle 5: Trends des internationalen Automobilmarkts und Folgen für die Fahrzeugentwicklung

Um auf die diese Trends reagieren zu können sind Anpassungen der Entwicklungsprozesse durch folgende strategische Vorgehensweisen nötig:

- Produktmodularisierung (Kap. 4.2.1)
- Funktionsorientierung (Kap. 4.2.2)
- Ausrichtung auf Elektrik/Elektronikentwicklung (Kap. 4.2.3)
- Entwicklung in Partnernetzwerken (Kap. 4.2.4)
- Frontloading (Kap. 4.2.5)

4.2.1 Produktmodularisierung

Für die Entwicklung besteht die Chance, den Gesamtaufwand zu reduzieren, indem auf bereits entwickelte und abgesicherte Bauteile zurückgegriffen wird. Zur Realisierung dieses Potenzials

müssen die Entwicklungsprozesse auf die Produktmodularisierung ausgerichtet sein und die Belange bezüglich Anforderungs-, Gleichteile- und Schnittstellenmanagement berücksichtigen.

4.2.2 Funktionsorientierung

Die angesprochene kundennahe Funktionsorientierung bedeutet für die Entwicklungsprozesse, dass zuerst die Anforderungen der Kunden zu definieren sind, bevor technische Umsetzungen beginnen. Um Fehlentwicklungen zu vermeiden, Entwicklungskosten und -zeit einzusparen muss das kundenorientierte Innovationsmanagement Konzeptentscheidungen sicher und früh im Entwicklungsprozess herbeiführen. Dafür müssen Detail- und Beurteilungskompetenz aus- bzw. aufgebaut werden, insbesondere auf Seiten der virtuellen Produktentwicklung.

4.2.3 Ausrichtung auf Elektrik/Elektronikentwicklung

Darüber hinaus sind die Entwicklungsprozesse an die Anforderungen der Elektronik- bzw. Softwareentwicklung anzupassen. Tabelle 6 zeigt Beispiele für Innovationen der näheren Zukunft, die bis auf wenige Ausnahmen auf Elektronik- bzw. Softwarebasis entwickelt und im Fahrzeug durch gemeinsame Bussysteme vernetzt werden.

<p>Infotainment</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitales TV ▪ Internet ▪ Vernetzte Spielekonsolen ▪ „Smarteres“ Navigationssystem ▪ ... 	<p>Sicherheit</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktive Crashesicherheit ▪ Rückfahrkamera ▪ Head-Up-Display ▪ Aktiver Fußgängerschutz ▪ ...
<p>Antrieb</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Niedrigemissionsautos ▪ Kleine Motoren mit hoher Leistung ▪ 4l-Auto als Großserie ▪ Alternative Antriebe ▪ ... 	<p>Komfort</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Selbstreinigende Lacke ▪ Physiologisch geregelte Klimaanlage ▪ Intuitive Sitzverstellung ▪ Software-adaptierbares Fahrverhalten ▪ ...

Tabelle 6: Beispiele für Innovationen des nächsten Jahrzehnts [182]

Durch die hohe Zahl der vernetzten Steuergeräte nimmt die Zahl der möglichen Systemzustände exponentiell zu. Die Systeme sind nach herkömmlichen Methoden nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand abzusichern. Für die Zukunft sind Konfigurations- und Kompatibilitätsmanagement, aber auch zielorientierte und effiziente Test- bzw. Absicherungsstrategien notwen-

dig. Speziell für den Bereich der Fahrwerkstechnik bieten sich in diesem Zusammenhang HiL-Simulationen an.

4.2.4 Entwicklung in Partnernetzwerken

Das geschickte Agieren in Entwicklungs- und Produktionsnetzwerken gewinnt in Zukunft für Automobilfirmen immer mehr an Bedeutung, wie oben bereits geschildert. Bild 19 zeigt zehn Trends, die zu Veränderungen der Hersteller (OEM)-Lieferanten Beziehung führen.

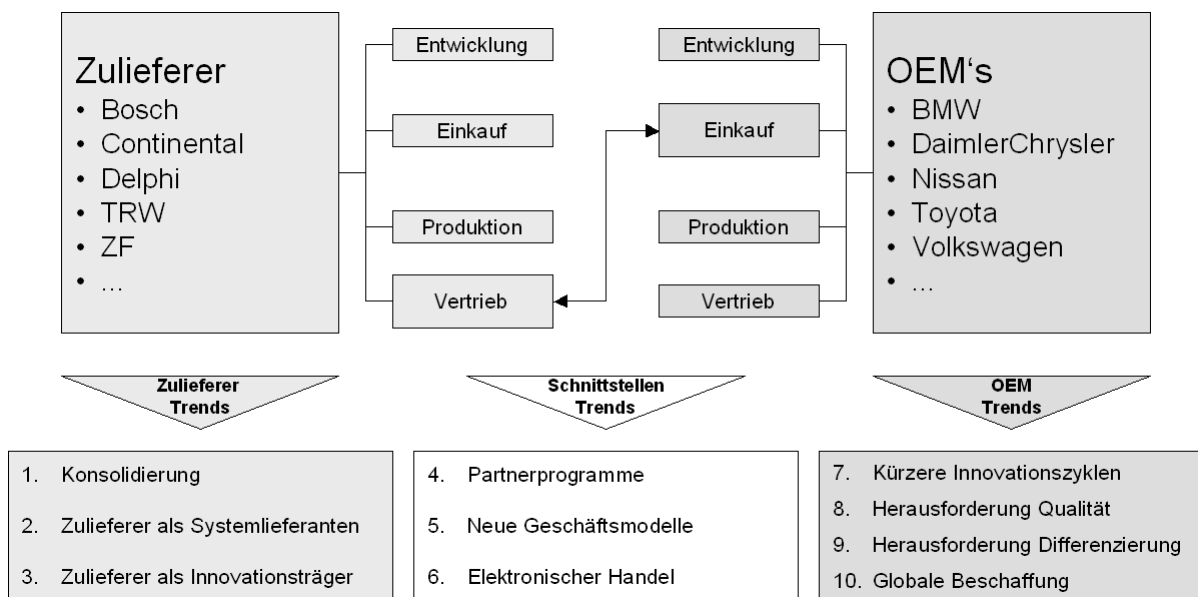


Bild 19: 10 Trends, die zur Veränderung der Lieferantenbeziehungen führen [114]

Für die Fahrwerksentwicklung ist entscheidend, dass Lieferanten sich vom reinen Fertigungsbetrieb zu Innovationsträgern und spezialisierten Systemanbietern entwickeln. Der VDA [181] prognostiziert in diesem Zusammenhang ein starkes Wachstum der Zulieferindustrie, wie Bild 20 belegt.

Interessant wird dieser Trend, wenn sich die Markenwerte von Automobilherstellern und Zulieferern gegensätzlich entwickeln, wie das Beispiel der Computerindustrie gezeigt hat: kaufentscheidend ist nicht mehr allein der Name des Rechnerherstellers (IBM, Siemens, ...) sondern vielmehr die Marken der Komponentenhersteller, wie Prozessor („Intel inside“), Festplatte oder Hauptspeicher. In seinem Buch „Clock Speed“ [43] prognostiziert C. H. Fine eine ähnliche Entwicklung auch in der Automobilindustrie: in Zukunft könnten Kunden bei ihrer Kaufentscheidung zum Beispiel Wert legen auf Fahrwerkregelsysteme eines bestimmten Zulieferers.

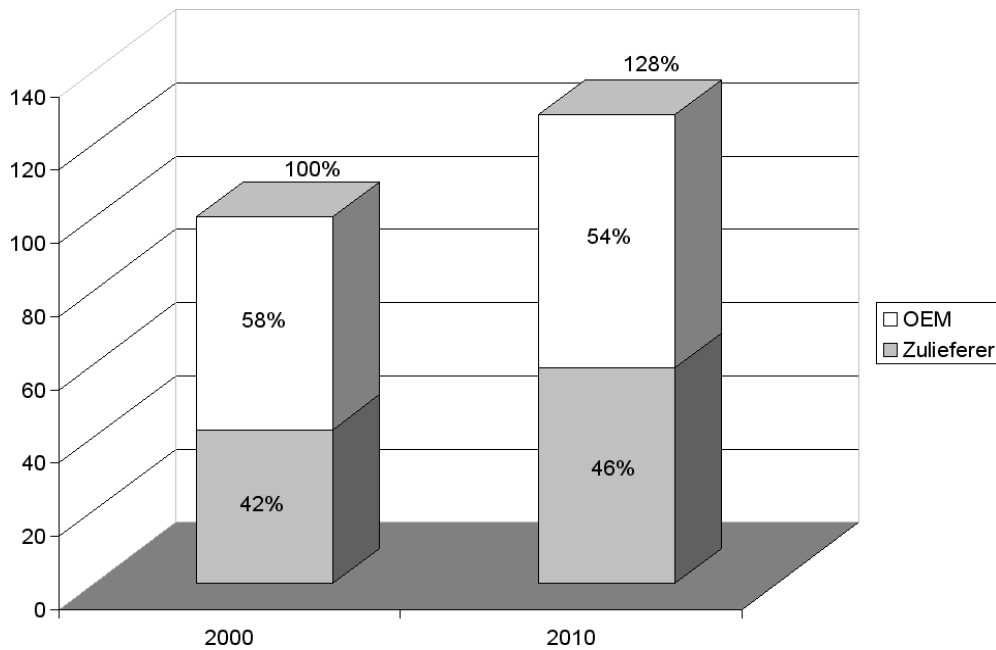


Bild 20: Wachstumsmarkt Zulieferindustrie [181]

Das prognostizierte Wachstum erreichen Zulieferer durch Kompetenzaufbau in ihrem Fachgebiet (zum Beispiel Achsen oder Lenksysteme). Sie entwickeln sich dadurch zu verlässlichen Entwicklungspartnern, die im Rahmen neuer Geschäftsmodelle in Partnernetzwerke integriert werden, wie Bild 21 darstellt.

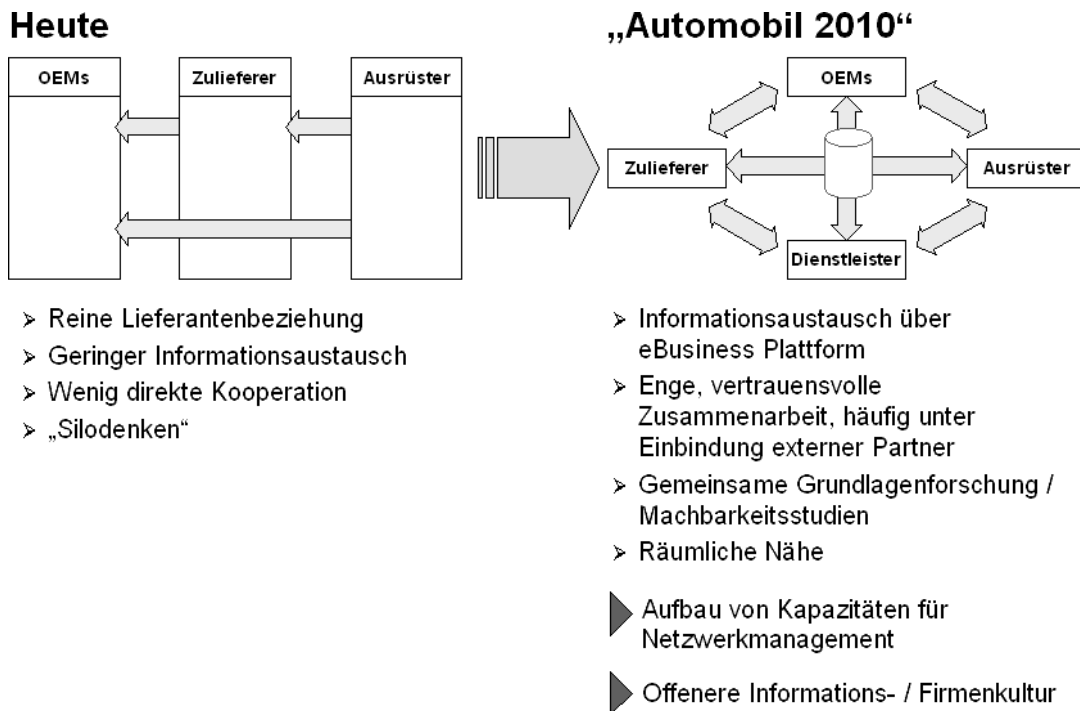


Bild 21: Veränderung der Lieferantenbeziehung [30]

Zukünftig entstehen demnach Netzwerke aus Herstellern, Zulieferern, Ausrüstern und weiteren Partnern⁸, die – ähnlich dem Supply Chain Management in der Produktion – auf Kooperation entlang der Entwicklungsprozesse ausgerichtet sind. Das gemeinsame Ziel der Entwicklung erfolgreicher Produkte steht im Mittelpunkt der langfristig angelegten Zusammenarbeit [114].

Aufgabe der Zulieferer ist dann, mit ihrer Fachkompetenz und Kreativität Innovationen zu entwickeln und in serienreifen Produktmodulen zu realisieren. Die Aufgaben der Automobilhersteller sind Anforderungsdefinition zu Beginn der Entwicklung und Beurteilung der entwickelten Innovationen nach den vorher definierten kundennahen Maßstäben. Bei der Beurteilung der Entwicklungsstände unterstützen unter Umständen externe Partner, beispielsweise Prüfdienstleister durch Tests und Messungen, wobei die letztendliche Bewertung der Ergebnisse vom OEM abgegeben werden sollte. Die Integration der einzelnen Module in das Gesamtfahrzeug ist gemeinsame Aufgabe von Lieferanten und Fahrzeugherstellern, wobei letztere die Leitung übernehmen. Schnittstellenmanagement begleitet den Prozess [149].

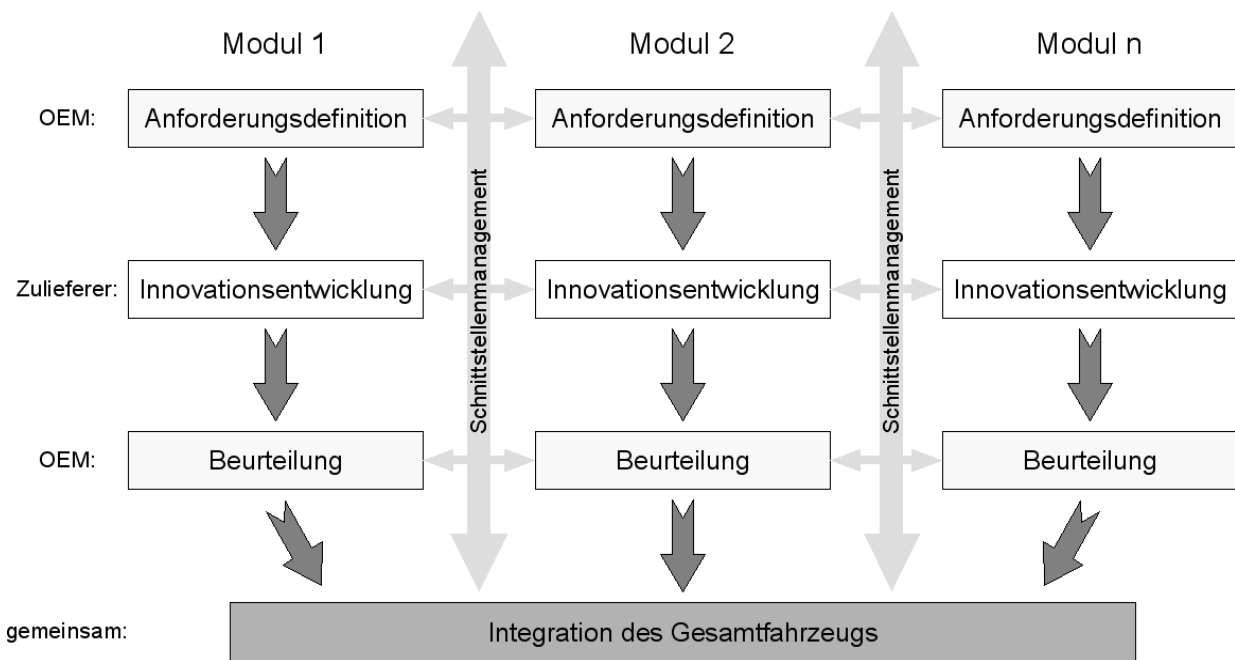


Bild 22: Entwicklungsablauf und Schnittstellenmanagement

Bild 22 zeigt den erläuterten Entwicklungsablauf. Durch die Definition der Anforderungen zu Beginn des Prozesses und die Beurteilung der Entwicklungsleistung bleibt der Fahrzeughersteller in der Pflicht, sein Knowhow bzw. seine Beurteilungskompetenz zu erhalten bzw. aufzubauen. Die Eigenständigkeit des OEMs bleibt erhalten; Abhängigkeiten von einzelnen Lieferanten wer-

⁸ zum Beispiel Personal- und Prüfdienstleister: Arbeitnehmerüberlassung, Werkverträge, verlängerte Werkbank, usw.

den vermieden. Dazu sind nennenswerte Aufwendungen zum Beispiel für Mitarbeiterqualifizierungen oder die Befähigung externer Partner nötig. Weiterhin erfordert das Schnittstellenmanagement einen Ausbau der elektronischen Vernetzung, insbesondere der PDM Systeme, in denen sämtliche Konstruktions-, Simulations- und Messdaten für die berechtigten Entwicklungspartner zugänglich sind.

4.2.5 Frontloading

Die Auswirkungen von „Frontloading“ wurden in einer Fallstudie bewertet, deren Ergebnisse hier wiedergegeben sind. Die Fallstudie hat die Entwicklung der passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen zum Inhalt, die seit einigen Jahren mit Simulationsmethoden unterstützt wird. Die im Folgenden dargestellten Aussagen werden durch weitere durchgeführte Studien (Missbrauch- und Fahrdynamiksimulation) bestätigt, sind also als allgemeingültig anzusehen.

Die Studie vergleicht die Entwicklungsprozesse zweier Fahrzeugtypen einer Baureihe: Typ T1 (Markteinführung 1995) und Typ T2 (Markteinführung 2003). Die jeweils durchgeführten Crashversuche bzw. Simulationsrechnungen sind in Bild 23 und Bild 24 über den Entwicklungszeitraum aufgetragen. Die Anzahlen sind in prozentualer Form dargestellt wobei die Gesamtversuchszahl (virtuelle und reale Versuche über alle Jahre) des T1 auf 100% normiert ist. Beiden Diagrammen liegt der selbe Maßstab zugrunde, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Zeitachse ist jeweils auf das Jahr des Start of Production (SOP) ausgerichtet.

Die hohen Versuchszahlen nach der Markteinführung des T1 sind auf den ersten Blick verwunderlich, aber durch die Absicherung später eingeführter Motor- und Länderausstattungen erklärbar. Ebenso bedürfen die Versuchszahlen des T2 im Jahr nach der Markteinführung einer besonderen Erläuterung: zum Zeitpunkt der Datenerhebung war die konkrete Zahl der Hardwareversuche noch nicht bekannt, es bestand eine Planungsunsicherheit von 6% aufgrund sich ändernder gesetzlicher Vorschriften, die in der Grafik eigens angeführt ist.

Der Vergleich der Diagramme zeigt, dass die Entwicklung der passiven Sicherheit durch den verstärkten Einsatz der Simulationsmethoden früher im PEP beginnen kann, während die Hardwarephase später einsetzt. Insgesamt nimmt die Versuchszahl ab, besonders gegen Ende des PEP. Das ist auf einen überproportionalen Rückgang der Hardwareversuche zurückzuführen, der durch die Vermeidung von Fehlentwicklungen als Folge der verstärkten frühen virtuellen Absicherung zu begründen ist.

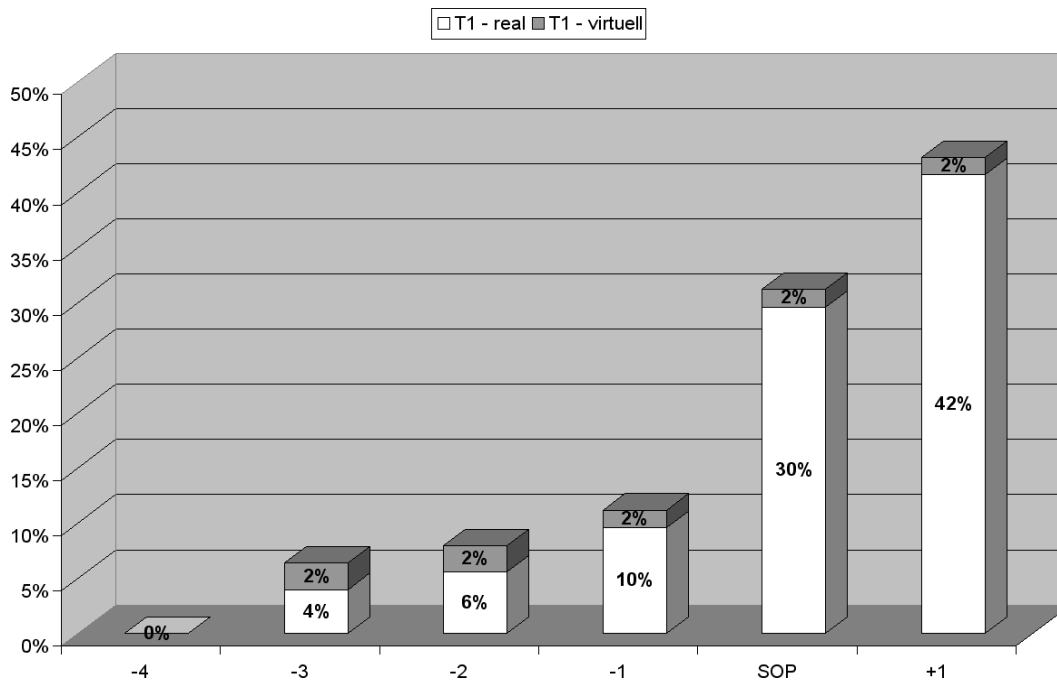


Bild 23: Anzahl virtueller und realer Crashversuche bei der Entwicklung des T1

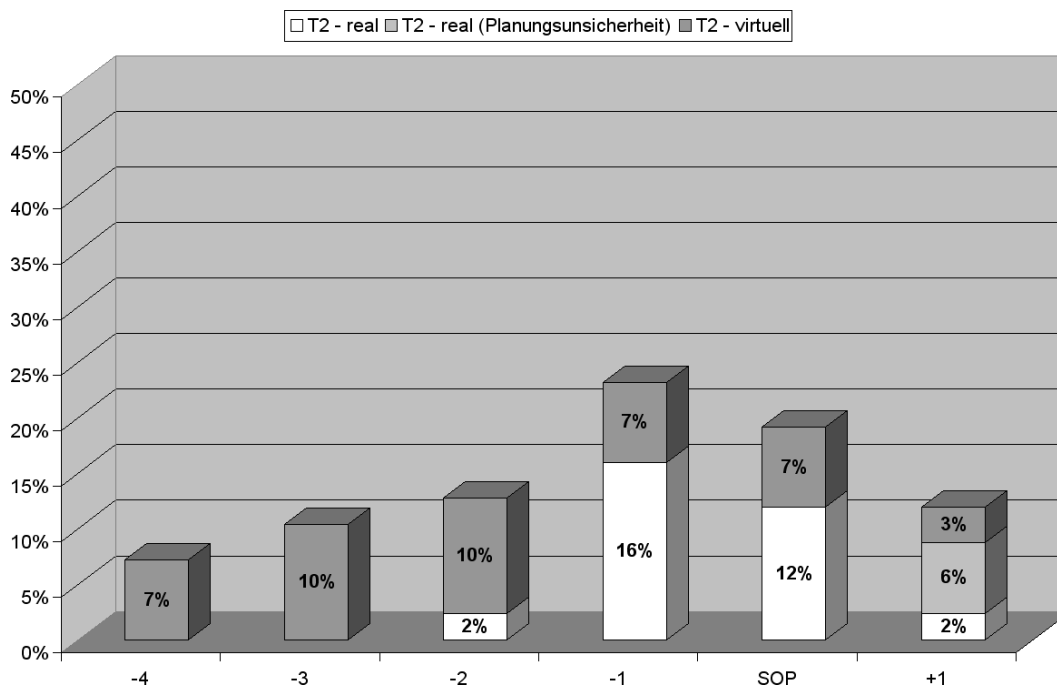


Bild 24: Anzahl virtueller und realer Crashversuche bei der Entwicklung des T2

Ferner stellt sich eine wesentliche Prozessverbesserung durch virtuelle Vorversuche mit Teilsystemen ein. Der geplante Versuchsaufbau (zum Beispiel Stauchverhalten eines Längsträgers) wird zuerst im Simulationssystem modelliert, virtuell durchgeführt und mit der Gesamtfahrzeugsimulation verglichen. Die Optimierung des Versuchsaufbaus geschieht mit dem Ziel möglichst

guter Übereinstimmung von Gesamtfahrzeug- und Teilsystemverhalten. Erst nach der virtuellen Optimierung findet der reale Versuchsaufbau statt. Dadurch werden Fehlschläge vermieden und somit Prototypenteile eingespart.

Beim Vergleich der Diagramme ist zu berücksichtigen, dass der T1 im Vergleich zum T1 deutlich höhere Anforderungen an die passive Sicherheit erfüllt, unter anderem: SINCAP Seitenschutzanforderungen, IIHS-Bumper-Test-Anforderung, Fußgängerschutz. Gleichzeitig weist der T2 eine Reihe von Innovationen auf, die ebenfalls zusätzlich abgesichert werden mussten, wie zum Beispiel Stoßfänger-Schaum-System, Knieschutz, Multifunktionsaufroller, aktive Kopfstützen, Unfallschwere Sensorik, Out-Of-Position-Erkennung, etc..

Um diesem Mehraufwand Rechnung zu tragen, wurde der T1REE ("Re-engineering") in der Fallstudie betrachtet. Der T1REE ist eine theoretische Betrachtung, die allein den Fortschritt der Entwicklungsmethoden darstellen soll. Dazu wird die Annahme getroffen, dass zur Entwicklung des T1 mit dem damaligen Ausrüstungsstand die Simulations- und Testmöglichkeiten von heute bestanden hätten. Das Ergebnis ist der Verlauf der Versuchszahlen über den PEP, wie in Bild 25 abgebildet. Auch hier liegt wieder der selbe Maßstab wie oben zugrunde.

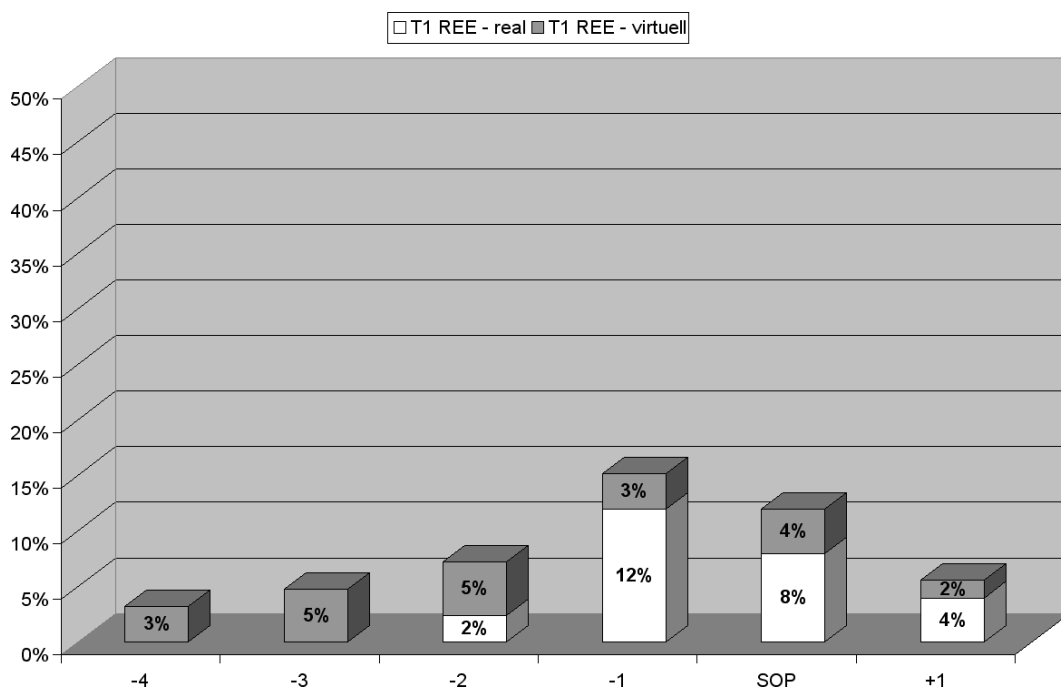


Bild 25: Anzahl virtueller und realer Crashversuche bei der Entwicklung des E39REE

Bild 24 und Bild 25 zeigen den selben qualitativen Verlauf. Der wesentliche Unterschied ist der Rückgang der Gesamtversuchszahl um ca. 37%, der auf die zusätzlichen Innovationen und Anforderungen zurückzuführen ist, die für den T2 zu berücksichtigen waren. Dieser Sachverhalt

wird ebenfalls in Bild 26 deutlich, in dem die Versuchskosten (für den gesamten Entwicklungsprozess) dargestellt sind, aufgeteilt in Versuchsfahrzeuge, Material (Betriebsstoffe, Vorrichtungen, Werkstücke, ...) und Personalkapazität. Auch hier wurde eine prozentuale Skalierung gewählt, bei der die Gesamtkosten der Entwicklung der passiven Sicherheit des T1 zu 100% normiert wurden.

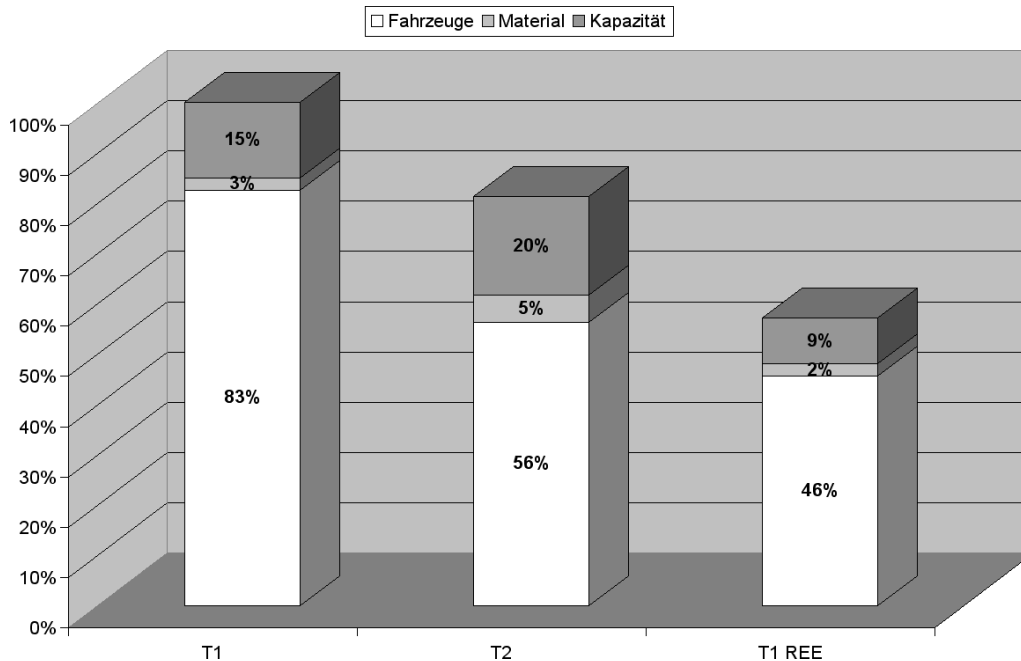


Bild 26: Vergleich der Crashversuchskosten bei T1, T1REE und T2

Der Vergleich von T1 mit T2 zeigt eine Kosteneinsparung von ca. 19% - begründet durch den Einsatz virtueller Techniken bei gleichzeitigem Mehraufwand durch Innovationen und gesteigerten Anforderungen. Beim T1REE würde gegenüber dem T2 eine weitere Senkung von 24%, gegenüber dem T1 sogar 43%, auftreten – begründet allein durch Fortschritte der virtuellen Produktentwicklung.

4.3 Veränderungen der Entwicklungsmethoden und -werkzeuge

Parallel zu den steigenden Anforderungen des Automobilmarkts und den daraus abzuleitenden Anpassungen der Entwicklungsprozesse erfahren auch die Entwicklungsmethoden und -werkzeuge einen stetigen Wandel. Im Folgenden werden die erkennbaren Trends beschrieben, denen Prüfstandstechnik und (HiL-)Simulationsmethoden ausgesetzt sind.

4.3.1 Weiterentwicklung der Prüfstandstechnik

Die Weiterentwicklung der Prüfmethode lässt sich auf zwei Weisen aus den Anforderungen des Automobilmarktes ableiten, wie Bild 27 zeigt. Einerseits erfordert die Entwicklung von Produktinnovationen (a) spezielle, an die neuen Funktionsprinzipien angepasste Prüftechniken, andererseits müssen die Prüfmethode stetig an Optimierungen bzw. Potenzialausschöpfungen auf Seiten der Prüflinge angepasst werden (b). Dazu kommt häufig der Zwang zur Aufrüstung der vorhandenen Prüftechnik, um die geforderte Trennschärfe bzw. Aussagesicherheit zu erreichen.

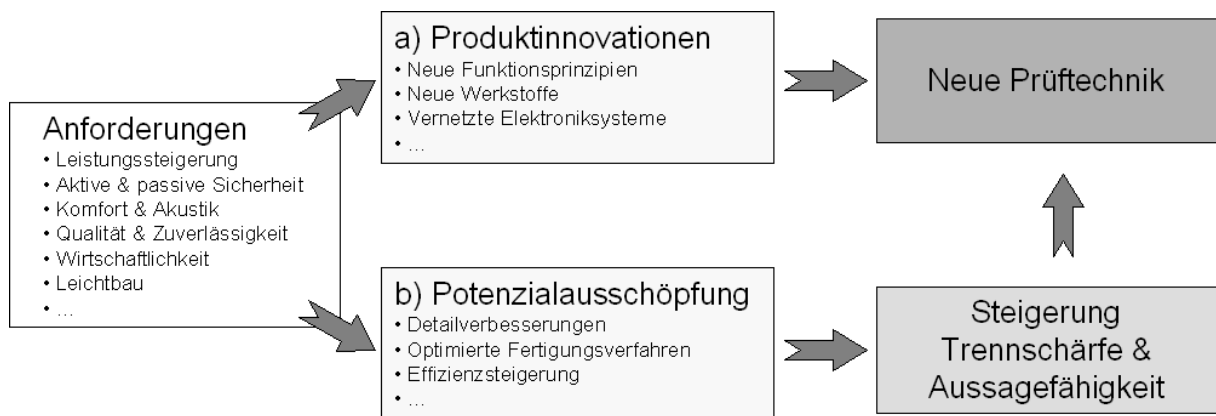


Bild 27: Mechanismen der Entstehung neuer Prüfstände

zu a) Produktinnovationen erfordern neue Prüftechnik

Die in Kapitel 4.1.1 angesprochenen Innovationen -insbesondere die sicherheitsrelevante Aktuatorik im Fahrzeug- muss vor einer Serienproduktion speziell abgesichert werden. Dazu sind während der verschiedenen Entwicklungsstadien unterschiedliche Prüfungen erforderlich, wie Bild 28 darstellt.

Während der Konzeptentwicklung sind Prinzipprüfungen durchzuführen, um Systemverständnis aufzubauen. Im Rahmen der folgenden Serienentwicklung sind weitere Optimierungen und Prüfungen zu leisten, um die Potenziale der betreffenden Innovation und mögliche Wechselwirkungen zwischen den Komponenten bzw. mit anderen Systemen aufzuzeigen und auszuschließen. Die Serienentwicklung findet durch Freigabeprüfungen, die die Erfüllung aller geforderten Ziele bestätigen, ihren Abschluss. Parallel werden für jede Innovation Prüfungen im Rahmen einer Qualitätsvorschrift entwickelt, die serienbegleitend eine konstante Produktqualität sicherstellen.

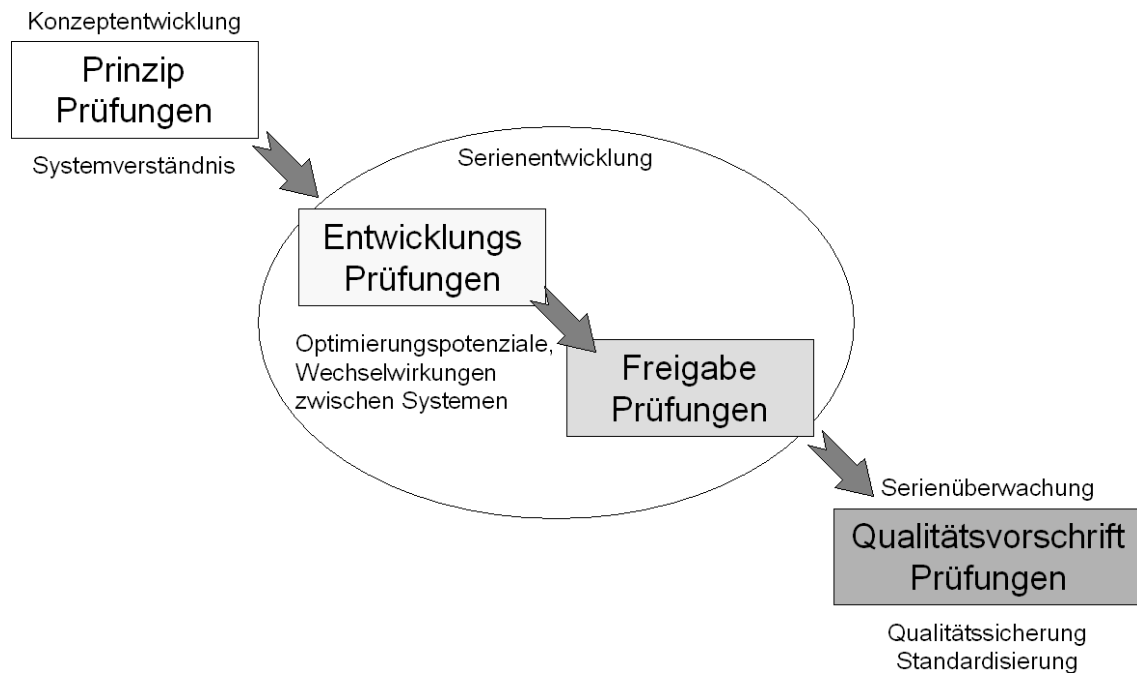


Bild 28: Prüfungen zur Innovationsentwicklung

Je nach Vergleichbarkeit der Innovation mit bekannten Systemen kann unter Umständen auf vorhandene Prüftechnik zurückgegriffen werden. Im Allgemeinen stellt die Absicherung neuer Prinzipien allerdings auch höhere Anforderungen an die Prüftechnik, und somit einen Zwang zu Ertüchtigungen bzw. Neuanschaffungen dar.

zu b) Potenzialausschöpfung führt zu neuer Prüftechnik

Steigerungen der Produktleistungsfähigkeit bzw. Ausschöpfung der vorhandenen Produktpotenziale erfordern die Ertüchtigung der Prüftechnik, wenn Schwachstellen der Prüfung erkennbar sind und die neuen Anforderungen nicht mehr erfüllt werden. Der Ertüchtigungsprozess sowie die zur Verbesserung der Prüftechnik führenden Veränderungen sind in Bild 29 gezeigt.

Die Ertüchtigung der Prüftechnik wird durch technische Verbesserungen bzw. durch neue Prüfprinzipien erreicht.

Technische Verbesserungen der letzten Jahrzehnte sind:

- Die Verwendung von Hydropulszylindern anstelle von Spindel- oder Exzenterantrieb
- Die elektronische Messdatenaufzeichnung statt elektromechanischer x-y-Schreiber
- Der Einsatz elektronischer bzw. computergesteuerter Ansteuerungen, die unter anderem die mechanische Fahrwiderstandssimulation von Rollenprüfständen unterstützt

Beispiele für neue Prüfprinzipien sind:

- Flachbahn ersetzt Rolle bei der Reifenprüfung
- Mehraxiale statt einaxiale Prüfung bei der Elastomerlagerprüfung
- Nachfahren von Last-Zeit-Reihen anstelle synthetischer Signale, zum Beispiel bei Stoßdämpfern, Brems Scheiben, ...

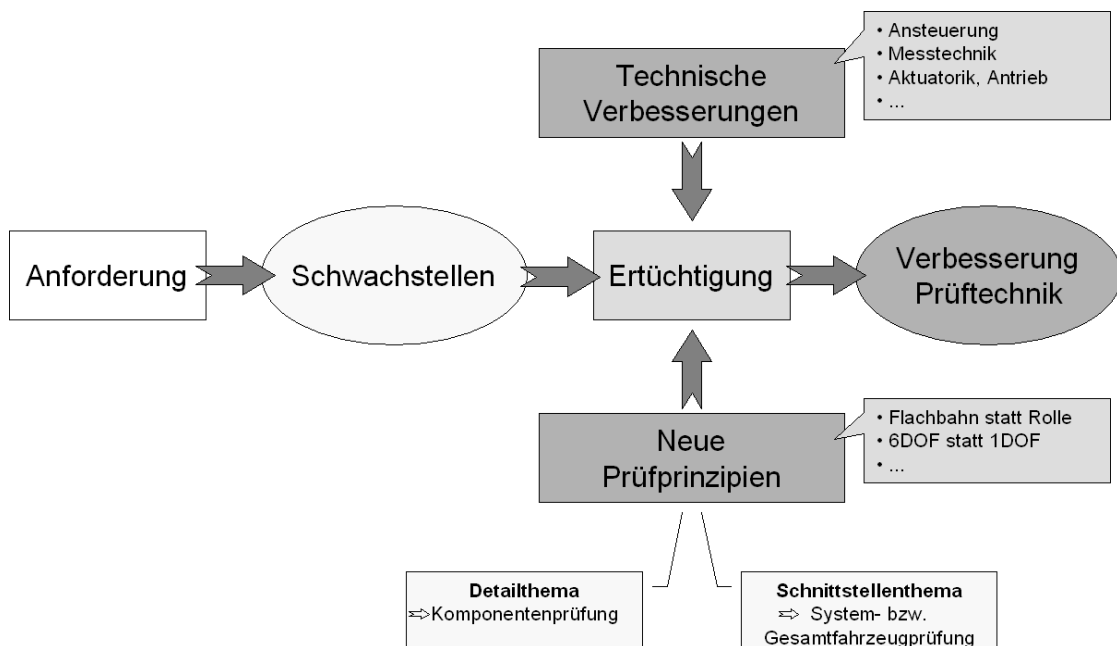


Bild 29: Ertüchtigung durch technische Verbesserungen bzw. neue Prüfprinzipien

Bei der Entwicklung neuer Prüfprinzipien ist auf den erforderlichen Versuchsumfang zu achten. Zur genaueren Analyse des Einzelteils bzw. zur Aufwandsreduzierung bei der Teilebereitstellung sind Komponentenprüfstände ideal. Wenn Schnittstellen und Wechselwirkungen untersucht werden sollen, sind System- oder Gesamtfahrzeugprüfungen erforderlich.

Prozessoptimierungen erfordern weitere Prüfungen

Durch Veränderungen der Entwicklungsprozesse werden auf zwei Weisen neue Prüfungen induziert. Einerseits sind Prüfungen zur Unterstützung der Simulation durchzuführen, wobei Bauteilkennlinien zur Modellparametrierung aufgezeichnet bzw. Modelle auf Systemebene validiert werden (Beispiel TIME Prüfprozedur [94]). Andererseits sind Versuche zur Unterstützung des Fahrversuchs gefragt. In diesem Fall sind Fahrsituationen für Detailuntersuchungen am Prüfstand zu reproduzieren (Beispiel Reproduktion von Lenkraddrehschwingungen [124]).

Kompetenzverschiebungen in Entwicklungsnetzwerken führen zu Verlagerungen

Die Fahrzeugentwicklung in Partnernetzwerken bietet einiges Synergiepotenzial durch Vermeidung doppelt vorgehaltener Prüfkapazitäten. Für den Entwicklungsfortschritt ist primär die korrekte Durchführung und ein verlässliches Prüfergebnis entscheidend. Die häufig kontrovers diskutierte Frage, ob die Prüfung besser beim Lieferanten oder beim Fahrzeughersteller durchgeführt wird, ist sekundär.

Ein gangbarer Weg für die Praxis ist, Einzelteilprüfungen unter Regie der Lieferanten durchzuführen und Systeme bzw. Gesamtfahrzeuge beim OEM zu prüfen. Diese Aufteilung entspricht der in Kapitel 4.2.4 geschilderten Verantwortungsaufteilung und berücksichtigt die spezifischen Kompetenzen. Zusätzlich sollten unabhängige Prüfinstitute in regelmäßigen Abständen eingebunden werden, um durch Ringversuche systematische Diskrepanzen (beispielsweise Einflüsse der Aufspannung oder Prüfstandssteifigkeiten auf das Versuchsergebnis) auszuschließen.

Weiterhin dient es der allgemeinen Effizienzsteigerung, möglichst viele Prüfungen zu standardisieren, wie beispielsweise die Stoßdämpferprüfung nach VDA. Durch Standardisierung lassen sich die verschiedenen Versuchsspezifikationen der unterschiedlichen OEMs vereinheitlichen und so Unklarheiten, Fehler und Verzögerungen vermeiden.

Entwicklung der Kriterien für Prüfstände

Für die zukünftige Entwicklung des Prüffelds lassen sich allgemeingültige Aussagen über die in Kapitel 3.1.2 definierten Kriterien für Prüfstände treffen.

Versuchsumfang

Bei gegebener Realitätsnähe sollte stets der kleinstmögliche Versuchsumfang realisiert werden, um Komplexität, Kosten und Aufwand zu reduzieren. Bei der Prüfstandskonstruktion ist genau zu definieren, welche Fahrzeugkomponenten für einen korrekten Versuchsaufbau erforderlich sind und wie die Versuchsobjekte am Prüfstand adaptiert werden. Zum Beispiel sind beim Aufbau von Achsprüfständen lokale Karosseriesteifigkeiten darzustellen. Werden die Steifigkeiten der Anbindungsstellen am Prüfstand variabel und somit für jeden Versuch einstellbar ausgeführt, kann auf die Integration einer Teilkarosserie in den Aufbau verzichtet werden.

Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse, Versuchskonzept

Ziel eines Prüfstandsversuchs ist die eindeutige Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse; tendenzielle Aussagen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Das für eindeutige Ergebnisse erforderliche Versuchskonzept ist im Einzelfall zu betrachten: für bekannte Umfänge sind Ersatzversuche aufgrund der geringeren Komplexität vorzuziehen; bei nicht vollständig erfassten Themen sind aufwendigere Anwendungsversuche erforderlich, um möglichst alle entscheidenden Faktoren im

Vorhinein zu berücksichtigen. Bei der Neuentwicklung von Innovationen finden aus diesen Gründen häufig Anwendungsversuche Verwendung, bis synthetische Ersatzversuche mit den zugehörigen Grenzwerten definiert sind, die zur die Applikationsentwicklung in weitere Fahrzeugprojekte zum Einsatz kommen. Zum Beispiel sind bei der Neuentwicklung hydraulischer Fahrwerkssysteme Anwendungsversuche erforderlich, um die Interaktion der einzelnen Komponenten miteinander (Temperaturentwicklung, Druckverluste, etc.) zu erforschen und bauteilspezifische Bewertungskriterien zu erarbeiten, die anschließend in Ersatzversuchen entwickelt werden können.

Versuchssteuerung

Der Automatisierungsgrad sollte aus den in Kapitel 3.1.4 genannten Gründen stets maximiert werden.

4.3.2 Weiterentwicklung Simulationsmethoden

Die Weiterentwicklung der Simulationsmethoden ist hauptsächlich durch Detailverbesserungen bestimmt. Die Theorien der in Kapitel 3.2 erläuterten Berechnungsverfahren wie Mehrkörpersystemsimulation, Finite Element Methoden, etc. sind entwickelt und ihr Einsatz in der Praxis bewährt. Weitere Entwicklungsarbeit ist bei der konkreten Anpassung der allgemeingültigen Methoden an die konkrete Aufgabenstellung, der Modellierung, zu leisten. In Kapitel 3.2.4 sind aktuelle Themenstellungen genannt.

Unterstützend kommt die kontinuierliche Steigerung der erzielbaren Rechenleistung hinzu. Die Anwenderfreundlichkeit der Softwarepakete wird sich immer weiter verbessern. Gleichermaßen werden die Simulationstools durch Workflow Management bzw. PDM Systeme stärker in die Entwicklungsprozesse integriert.

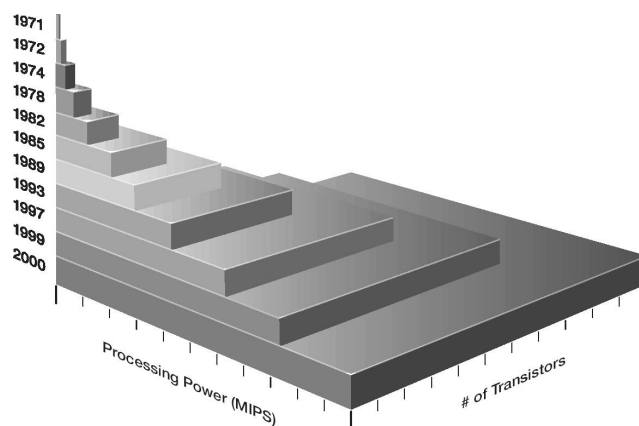


Bild 30: Exponentielle Steigerung der verfügbaren Rechenleistung [72]

Die wichtigste zu bewerkstelligende Aufgabe für die Fahrdynamiksimulation ist die Objektivierung der Fahrdynamikbewertung („Ride and Handling“). Wie in Bild 31 illustriert, setzt sich die Beurteilung des Fahrverhaltens aus dem objektiv beschreibbaren Verhalten des Fahrzeugs, das wesentlich von Fahrer, Strecke bzw. Fahrbahn und weiteren Umweltbedingungen beeinflusst wird, und dem subjektiven Eindruck des Fahrers zusammen.

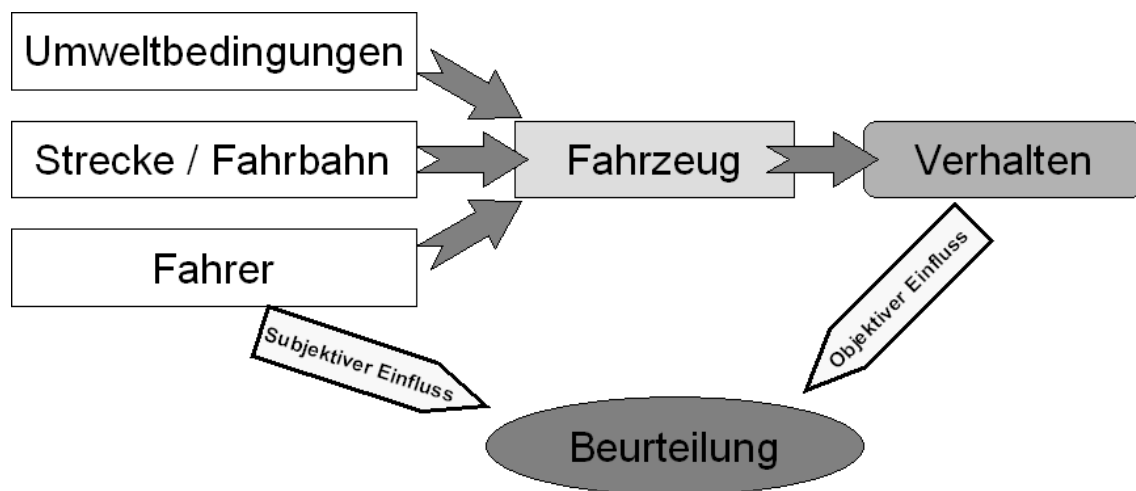


Bild 31: Einflüsse auf die Beurteilung des Fahrverhaltens

Die Objektivierung der Fahrdynamikbewertung verfolgt zwei unterschiedliche Ansätze:

- Definition objektiver Zielgrößen und Bewertung aufgrund rein objektiver Einflüsse
- Nachbildung der subjektiven Einflüsse und Bewertung aufgrund subjektiver und objektiver Einflüsse

Beide Ansätze können prinzipiell mit Simulationstools realisiert werden, allerdings sind bei beiden Vorgehensweisen größere Hürden zu überwinden [13], [85], [109], [144].

4.3.3 Ausweitung HiL Technologie

Weiterhin ist von einer massiven Ausweitung der HiL Technologie auszugehen, und zwar aus drei Gründen, die in Kapitel 3.3 ausführlich dargestellt sind und hier kurz wiedergegeben seien:

- Zum ersten erfordert die Absicherung aktiver Fahrwerkskomponenten mit Regelsystemen zwingend die Simulation von Umgebungsbedingungen, eine Anforderung, die nur mit HiL-Simulation sinnvoll erfüllbar ist.
- Zum zweiten ist eine umfassende Funktionsbewertung von Fahrwerkssystemen unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen nur mit HiL in einem akzeptablen wirt-

schaftlichen Rahmen möglich. Ohne HiL Technologie steigen Komplexität und Aufwand überproportional.

- Zum dritten bietet die Fahrdynamiksimulation mit realen Bauteilen einige Kosten-, Zeit- bzw. Qualitätspotenziale in der Entwicklung, die bis zur Verfügbarkeit ausreichend detaillierter virtueller Modelle ausgeschöpft werden sollten. Als Beispiele sind Reifen oder Stoßdämpfer zu nennen.

4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Ausführungen dieses Kapitel haben verschiedene Entwicklungstendenzen im internationalen Automobilmarkt und deren Folgen auf die Fahrzeug- bzw. Fahrwerksentwicklung aufgezeigt. Die vorherrschenden Trends sind untereinander vernetzt und voneinander abhängig. Zur besseren Übersicht werden in Bild 32 die relevanten Trends und in Tabelle 7 bzw. Tabelle 8 die jeweiligen Auswirkungen auf Prüffeld und Simulation zusammengestellt. Die kursiv beschrifteten Felder haben keinen oder keinen direkten Einfluss auf Prüffeld oder Simulation.

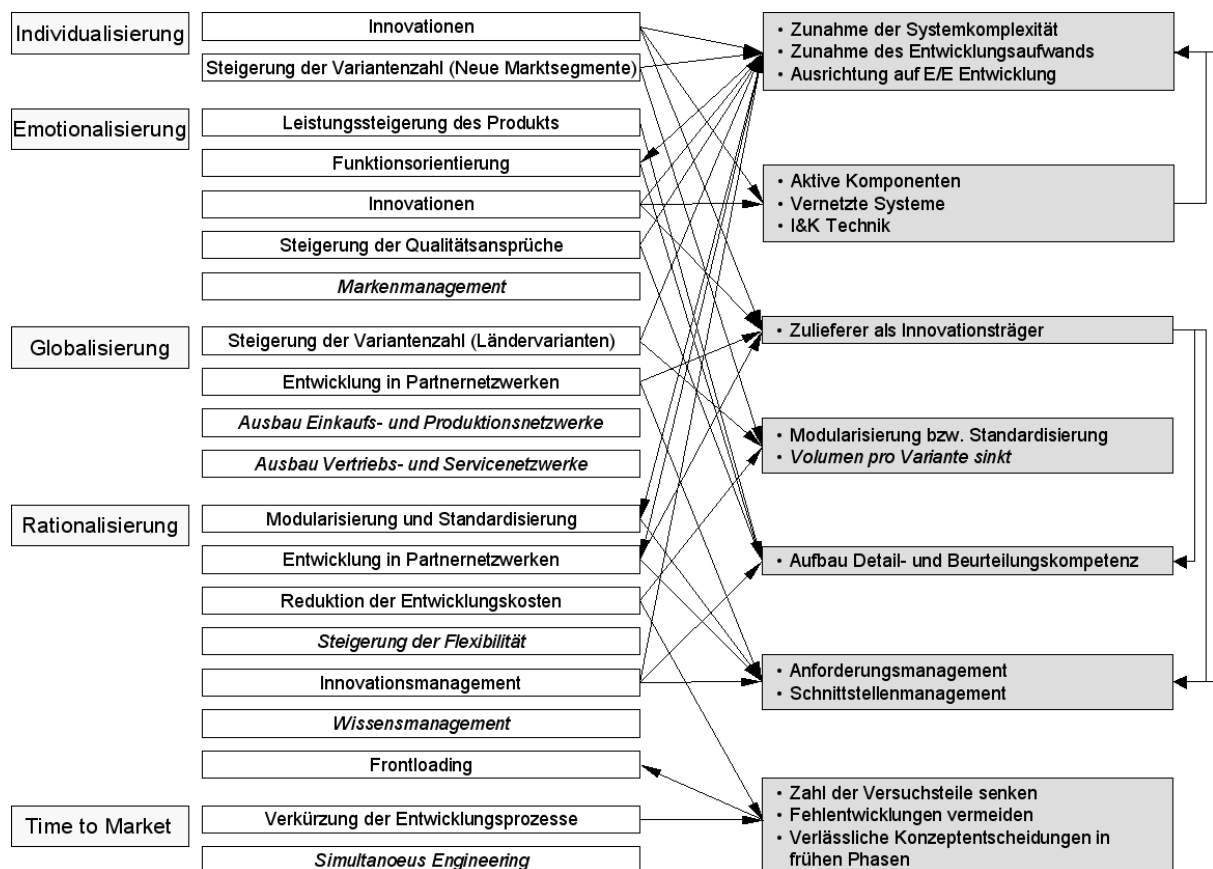


Bild 32: Auswirkungen der Handlungsfelder auf die Fahrwerksentwicklung

Die wichtigsten Auswirkungen (Tabelle 7) auf das Prüffeld sind:

- Erstellung neuer Prüfstände für innovative Komponenten und Systeme
- Anpassung von System- bzw. Gesamtfahrzeugprüfständen an Innovationen
- Berücksichtigung von aktiven Komponenten, Regelsystemen sowie deren Schnittstellen bzw. Vernetzung (z. B. durch HiL-Simulation)
- Reproduktion kundenrelevanter Betriebszustände (Funktionsorientierung)
- Steigerung des Automatisierungsgrades sowie der Flexibilität
- Einsatz neuer Prüftechniken.
- Weitere Verbesserung der Prüfstandsaufbauten durch
 - Erweiterte Mess- und Stellbereiche
 - Höhere Dynamik
 - Berücksichtigung weiterer Randbedingungen
 - Realisierung zusätzlicher Freiheitsgrade
- Reduktion des Prüfaufwands durch Entfall/Reduzierung von Variantenprüfungen

Die größten Auswirkungen (Tabelle 8) auf die Simulation sind:

- Aufbau neuer Komponenten- und Systemmodelle für Innovationen zur frühzeitigen, kundennahen Bewertung
- Entwicklung von Detailmodellen aktiver mechatronischer Komponenten
- Integration aktiver Komponenten und deren Regelalgorithmen in Fahrdynamiksimulation
- Ausweitung der System- und Gesamtfahrzeugsimulation zu Beurteilung von Schnittstellen und Wechselwirkungen.
- Erarbeitung von Qualitätsvorschriften durch Simulation
- Durchführung von Simulationen bei Zulieferern oder Dienstleistern

Trend	Auswirkungen auf das Prüffeld
Innovationen	Neue Prüfstände für Komponenten und Systeme Anpassung von System- und Gesamtfahrzeugprüfständen
Aktive Komponenten Vernetzte Systeme Ausrichtung auf E/E Entwicklung	HiL-Simulation zur Prüfung aktiver Komponenten, Regelsystemalgorithmen, Schnittstellen und Integration zu Modulen Prüfung in Modulen bzw. Gesamtfahrzeugen
Steigerung der Variantenzahl	Zunahme der Absicherungsprüfungen Zunahme der Konzeptentscheidungen
Funktionsorientierung	Reproduktion kundenrelevanter Betriebszustände
Modularisierung und Standardisierung	Abnahme von Entwicklungs- und Absicherungsprüfungen
Entwicklung in Partnernetzwerken	Prüfungen bei Zulieferern bzw. Dienstleistern
Reduktion der Entwicklungskosten	Reduktion von Prüfungen
Rationalisierungen	Steigerung des Automatisierungsgrads Steigerung der Flexibilität Reduktion des Prüfaufwands (weniger Variantenprüfungen) Steigerung der Prüfstandsauslastung
Frontloading	Bestätigung virtueller Erprobungsergebnisse durch spätere Prüfstandsversuche
Vermeidung von Fehlentwicklungen Konzeptentscheidungen in frühen Phasen	Bestätigungsprüfungen erst am Ende des PEP
Zunahme der Systemkomplexität	Komplexität der Prüfungen steigt Höhere Mitarbeiterqualifikation erforderlich Systemversuche statt Gesamtfahrzeugprüfungen Komponentenversuche statt Systemprüfungen
Aufbau Detail- und Beurteilungskompetenz	Neue Prüfstände zur kundennahen Phänomenreproduktion Prüfungen zur Erarbeitung von Qualitätsvorschriften Einsatz neuer Prüftechniken Zusätzliche Randbedingungen Erweiterte Mess- und Stellbereiche Höhere Dynamik Realisierung weiterer Freiheitsgrade
Schnittstellenmanagement	System- und Gesamtfahrzeugprüfungen zur Beurteilung von Schnittstellen und Wechselwirkungen OEM prüft Module in Systemen und im Systemverbund Zulieferer prüft Komponenten und Module
Reduktion der Erprobungsträger und Versuchsteile	Systemversuche statt Gesamtfahrzeuge Komponentenversuche statt Systeme

Tabelle 7: Auswirkungen der herrschenden Trends auf das Prüffeld

Trend	Auswirkungen auf die Simulation
Innovationen Innovationsmanagement	Neue Simulationsmodelle für Komponenten und Systeme Anpassung von System- und Gesamtfahrzeugmodellen.
Aktive Komponenten Vernetzte Systeme Ausrichtung auf E/E Entwicklung	Ausbreitung der HiL-Simulation Detailmodelle aktiver Komponenten Integration aktiver Komponenten und deren Regelungs- algorithmen in Fahrdynamiksimulation
Steigerung der Variantenzahl	Zunahme virtueller Konzeptentscheidungen
Funktionsorientierung	Objektivierung der Fahrdynamikbewertung Ableitung objektiver Zielwerte
Rationalisierungen	Simulation anstatt Prüfung Erarbeitung von Qualitätsvorschriften durch Simulation
Modularisierung und Standardisierung	Zunahme der Modell-Modularisierung
Entwicklung in Partnernetzwerken	Simulation durch Zulieferer bzw. Dienstleister
Reduktion der Entwicklungskosten	Zunahme virtueller Konzeptentscheidungen
Frontloading	Aufbau virtueller Detail- und Beurteilungskompetenz Früher Einsatz von Simulationsmethoden
Vermeidung von Fehlentwicklungen Konzeptentscheidungen in frühen Phasen	Frühzeitige, kundennahe Bewertung von Innovationen und Produkten Aufbau virtueller Detail- und Beurteilungskompetenz
Zunahme der Systemkomplexität	Komplexität der Simulationsmodelle steigt
Aufbau Detail- und Beurteilungskompetenz	Detaillierung von Simulationsmethoden und -modellen Entwicklung von Simulationsmethoden zur kunden- nahen Phänomenreproduktion
Schnittstellenmanagement	System- und Gesamtfahrzeugsimulationen zur Beurtei- lung von Schnittstellen und Wechselwirkungen
Reduktion der Erprobungsträger und Versuchsteile	Variantsimulationen in den frühen Entwicklungs- phasen Zusammenführen diverser Komponenten-Versuchs- ergebnisse zu Modul- und Gesamtfahrzeug- eigenschaften

Tabelle 8: Auswirkungen der herrschenden Trends auf die Simulation

5 Szenario: „Fortgeschrittene Simulation“ – Das Prüffeld der Zukunft

Das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ prognostiziert den Zustand der Fahrwerksentwicklung in den nächsten 10 bis 15 Jahren. Unter Weiterführung der aufgezeigten Trends wird die Aufgabenverteilung zwischen Prüffeld und Simulation abgeleitet und das darauf zugeschnittene Prüffeld beschrieben.

Der Entwicklungsprozess im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ wird von der Verlagerung der Aufgabenverteilung zu Gunsten der virtuellen Produktentwicklung gekennzeichnet sein. Wie Tabelle 9 zeigt, sprechen Rationalisierungen, die steigende Variantenvielfalt, die zunehmende Komplexität, Frontloading und die Entwicklung von Innovationen für einen Zuwachs des Simulationsaufwands. Der Prüfaufwand hingegen wird in Zukunft leicht sinken, denn die Mehrungen aus Varianten- und Komplexitätszuwachs sowie Innovationen werden durch Minderungen aus Rationalisierungen, Frontloading und Modularisierung überkompensiert.

	Aufwand im Prüffeld	Aufwand für Simulation
Rationalisierungen	sinkt	steigt
Steigende Variantenzahl	steigt	steigt
Zunehmende Komplexität	steigt	steigt
Frontloading	sinkt	steigt
Innovationen	steigt	steigt
Modularisierung	sinkt	sinkt

Tabelle 9: Veränderungen des Entwicklungsaufwands im Prüffeld der Zukunft

Die Leistungsfähigkeit von Prüftechnik und Simulation wird zum Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ erwartungsgemäß steigen, wobei die Simulation unbestritten den größeren Anteil am Zugewinn haben wird. Die Einzelheiten der prognostizierten Leistungssteigerungen und die daraus abzuleitenden Veränderungen des Prüffelds der Zukunft werden in den nächsten Kapiteln aufgezeigt.

5.1 Weiterentwicklung des Prüffelds zum Szenario „Fortgeschrittene Simulation“

5.1.1 Prüfstände zur Funktionsabsicherung von Innovationen

Um zukünftige Innovationen in ihrer Funktion absichern zu können bieten sich in Abhängigkeit von der konkreten Ausprägung der Innovationen folgende Alternativen an:

- Prüfung der Innovation auf bestehenden Prüfständen
- Anpassung bestehender Prüfstände
- Konzeption eines neuen Prüfaufbaus

Beispielsweise können innovative Feder-Dämpfer-Systeme mit geringfügigen Änderungen am bestehenden Dämpfer-Hydropulsprüfstand untersucht werden, während die Beurteilung eines neuartigen Lenkgetriebekonzepts (z. B. elektrisch statt hydraulisch) einen neuen Prüfaufbau erfordert.

Heute ist nicht abschätzbar, welche Innovationen sich in Zukunft etablieren und durchsetzen werden. Folglich kann zum heutigen Zeitpunkt lediglich die Möglichkeit von Investitionsbedarfen ausgewiesen werden.

Neuerrichtung von Komponentenprüfständen

Einsatzgebiete für neue bzw. angepasste Komponentenprüfstände sind:

- Bremsbeläge, -sättel und -scheiben
- Fahrwerkslager (aktiv und passiv)
- Lenkhilfepumpen (bzw. allgemein die Energieversorgung aktiver Systeme).

Für die Themen Luftfedern, Stoßdämpfer, Pedalwerk und Bremsbetätigung sind zum Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ lediglich Anpassungen der Prüfstandsadaptionen zu erwarten. Neue Prüfsysteme sind in diesen Bereichen nicht erforderlich. Auch auf Seiten der Reifenprüfung wird keine Anpassung der Komponentenprüfstände erforderlich sein.

Die Notwendigkeit geringfügiger Anpassungen (z. B. zusätzliche Messkanäle) hängt intensiv vom Messaufbau ab und muss daher im Einzelfall konkret betrachtet werden.

Anpassung von System- und Gesamtfahrzeugprüfständen

Anpassungen von System- und Gesamtfahrzeugprüfständen sind noch eine Stufe allgemeiner zu beurteilen. Hier werden – je nach Ausprägung der Innovation – komplett neue Systemprüfstände erforderlich. Ein mögliches Beispiel dafür ist ein innovatives Bremssystem, bei dem nicht mehr die Reibung zwischen Bremsbelag und -scheibe eine Verzögerung bewirkt, sondern ein anderer

physikalischer Effekt. In diesem Fall müssten unter anderem die Reibwertprüfer sowie der Bremssattelprüfstand an das neue Bremssystem angepasst werden (z.B. neue Aktuatorik zur Stellung eines Bremsmoments). In Abhängigkeit von der Ausprägung der Innovation kann an dieser Stelle eine Ertüchtigung der bestehenden Prüfstände ausreichen oder ein gänzlich neues Konzept gefragt sein.

Diese Entwicklung ist bereits heute an den Beispielen „aktive Stabilisierungssysteme“ (ARS bzw. ABC) und „innovative Lenksysteme“ (EPS, Überlagerungslenkung AFS) erkennbar. Die Erprobung dieser Systeme setzt darauf spezialisierte Systemprüfstände voraus.

Die Prüfung von Innovationen auf den Gebieten Feder-/Dämpfer- und Betätigungssysteme erfordert aus heutiger Sicht keine neuen Systemprüfstände, lediglich Ertüchtigungen durch geringfügige Anpassungen⁹. Für das Rad-Reifen-System ist die bekannte Reifenflachbahntechnik als Komponentenprüfung auch im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ optimal. Da sich die Schnittstelle Fahrzeug/Reifen/Fahrbahn auch im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ nicht grundlegend verändern wird, werden durch die Entwicklung innovativer Fahrwerkssysteme keine Anpassungen der Gesamtfahrzeugprüfstände erforderlich sein.

5.1.2 Prüfstände für Regelsysteme und aktive Komponenten

Nachdem Regelsysteme und aktive Fahrwerkskomponenten zukünftig einen besonderen Stellenwert bei der Erreichung der Fahrdynamikziele einnehmen werden, soll hier speziell auf die dadurch verursachten Veränderungen eingegangen werden. Dabei sind zwei grundsätzliche Aspekte zu betrachten:

- Prüfung aktiver Komponenten, der Regelsystemalgorithmen sowie der Schnittstellen
- Berücksichtigung der aktiven Systeme bei allen weiteren Prüfungen

Die Prüfung aktiver Komponenten, der Regelsystemalgorithmen sowie der Schnittstellen lassen sich in einem gesamthaften Aufbau ähnlich Bild 33 realisieren. Mit den im Folgenden dargestellten ½- bzw. 1-Achsprüfständen werden die Themen Bremsen, Federung/Dämpfung, Stabilisierung, Fahrwerkslager, Achskinematik und Lenkung unter Berücksichtigung aller Regelsysteme und Schnittstellen in ihrem Zusammenspiel bewertet.

Im Gegensatz zur gezeigten Abbildung nehmen die Prüfstände im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ eine (Halb-)Achse an den Karosserieanbindungspunkten auf, wobei die globalen und lokalen Steifigkeiten des Fahrzeugs durch geeignet angepasste Adaptionen realisiert werden. Die Schnittstellen Lenksäule, Abtriebswelle, etc. werden an den ½- bzw. 1-Achs-Prüfständen von

⁹ Bei Ablösung des heute üblichen Fahrzeugbedienkonzepts „Lenkrad/Pedalerie“ sind zur Erprobung des neuen Konzepts unter Umständen neue Prüfstände nötig.

geeigneter Aktuatorik bedient. Die Schnittstelle Rad/Reifen/Fahrbahn ist durch flexibel austauschbare Radersatzsysteme bzw. Flachbahneinheiten realisiert. In beiden Fällen sind alle sechs Freiheitsgrade des Rades dynamisch anzusteuern und zu regeln. Die Verwendung nicht auf Iteration angewiesener Kraftregelkreise vermeidet einen freischwingenden Aufbau mit simulierter Fahrzeugmasse und erhöht damit den Detaillierungsgrad des Versuchs. Auf einem Steuerrechner (HiL Technologie) werden sowohl alle relevanten Ansteuerdaten für die Regelsysteme als auch die Reaktionen der virtuellen Versuchsbausteine wie Aufbaubewegung, Seitenführungskräfte der übrigen Räder, etc. berechnet.

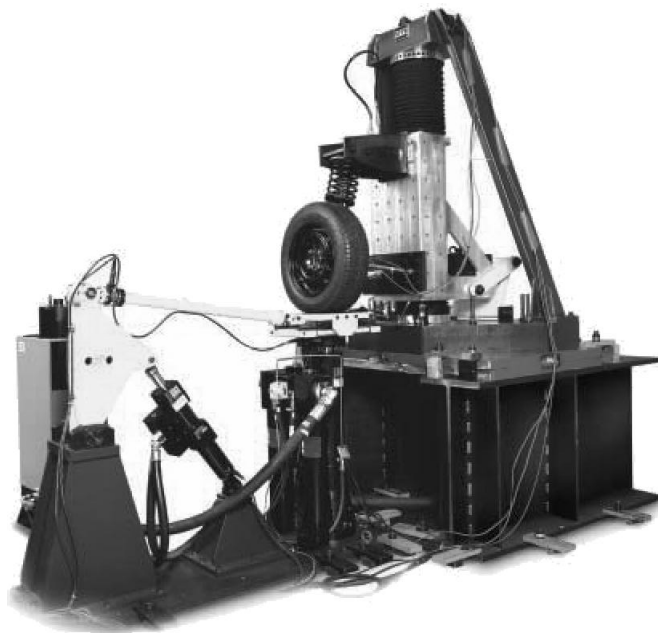


Bild 33: Halbachprüfstand mit frei schwingender Viertelfahrzeugmasse [208]

Basis für den Versuchsablauf ist die Wiedergabe gemessener Daten (zum Beispiel: Streckendaten, Lenkwinkel, Fahrpedalstellung) unter Berücksichtigung fester Fahrzeugparameter (unter anderem statische Achslastverteilung, Schwerpunkthöhe). Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung aller Kennwerte der Radstellung unter verschiedenen Fahrzuständen, die bei Bedarf „gehalten“ werden können. Beispielhafte Versuchsziele sind die Bewertung alternativer Elastomerlagermischungen oder unterschiedlicher Regelsystemabstimmungen im Systemverbund auf simulierten Handlingkurs- bzw. Komfortstrecken.

Zur exakten Darstellung der Regelseinflüsse auf die Fahrdynamik des Gesamtfahrzeugs müssen Vorder- und Hinterachse gemeinsam betrieben und bewertet werden. Dazu bietet sich eine flexible Koppelung zweier 1-Achs-Prüfstände über die verwendeten HiL Rechner an. Die gekoppelte Prüfung von Vorder- und Hinterachse erhöht den Detaillierungsgrad wesentlich

durch Darstellung gesamtfahrzeugdynamischer Vorgänge wie dynamische Achslastverlagerung oder der Wankmomentenabstützung unter Einbeziehung der dynamischen Elastokinematik. Der Zusatzaufwand im Vergleich zur Prüfung einzelner Achsen ist dabei relativ gering.

Gleichzeitig bieten getrennt voneinander betriebene ½- bzw. 1-Achs-Prüfstände bestmögliche Flexibilität bei niedrigen Versuchskosten. Sie gewährleisten einen qualitativ hochwertigen Entwicklungsstand bei der Durchführung gekoppelter Versuche durch die separate Inbetriebnahme der Achsen.

Die für die Realisierung der beschriebenen (Halb)Achsprüfstände erforderliche Prüfstands- und Softwaretechnik ist bereits heute vorhanden. Achsprüfstände sowie Flachbahneinheiten sind Stand der Technik, genauso die Prüfstandssteuerung mit HiL Simulation. Unter Umständen muss eine auf die konkrete Anwendung spezialisierte Prüfstandssteuerung entwickelt werden.

Mit den beschriebenen Prüfständen kann das Zusammenspiel der verschiedenen Regelsysteme im Hinblick auf objektive Zielsysteme (beispielsweise Fahrdynamik bzw. Fahrkomfort) analysiert werden. Für eine abschließende Aussage ist im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ nach wie vor eine subjektive Bewertung des Fahrverhaltens im Gesamtfahrzeug auf der Teststrecke erforderlich. Dennoch kann das Fahrzeugversuchsprogramm durch Verwendung der ½- bzw. 1-Achsprüfstände deutlich reduziert werden.

Der Betrieb eines 2-Achs Flachbahnprüfstands [160], bei dem ein Gesamtfahrzeug auf vier einzeln bewegbaren Flachbahneinheiten geprüft wird, ist im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ nicht zielführend: im Gegensatz zu 1-Achsprüfständen steigen die Investitions- und Betriebskosten sowie der Prüfaufwand, gleichzeitig sinkt die Flexibilität. Hinzu kommen technische Probleme und aus der Komplexität des Prüfstandskonzepts (korrekte Fahrzeugfesselung vgl. Kap. 3.1.5, Reifentemperatur und –reibwert, [160]).

Um die Einflüsse aktiver Systeme auf die übrigen Fahrzeugeigenschaften berücksichtigen zu können sind Anpassungen insbesondere bei folgenden Prüfständen erforderlich:

- Bremsengeräuschprüfstand
- Feststellbremsenprüfstand
- Reibwertprüfer (ggf. Schwungmassenprüfstand)
- Lager-Hydropulsprüfstand
- Dämpfer-Hydropulsprüfstand
- VDA Stoßdämpferprüfstand
- Pumpenfunktionsprüfstand
- Hydropuls- und statischer BKV Prüfstand

- Kupplungsbetätigungsprüfstand
- K&C Prüfstand

Die nötigen Veränderungen hängen im Einzelfall sowohl von der konkreten Ausprägung des aktiven Systems als auch von der erforderlichen Prüfdynamik ab.

Bei statischen bzw. stationären Prüfungen (z. B. quasistatische Kennlinien der Achs- oder Pedalwerkkinematik; Stoßdämpferprüfung nach VDA) ist die Integration und Ansteuerung des kompletten Regelsystems mit HiL Simulation nicht zwingend erforderlich. Die Einstellung der gewünschten Betriebszustände aktiver Komponenten über Steuerströme, CAN-Botschaften¹⁰ oder andere unidirektionale Kommunikationswege ist hier ausreichend.

Aus diesen Gründen sind für Bremsengeräusch-, Feststellbremsen-, VDA Stoßdämpfer-, Pumpenfunktions-, statischen BKV-, Kupplungsbetätigungs- und K&C Prüfstand keine HiL Systeme erforderlich. Anstelle dessen sind geeignete Maßnahmen zur Ansteuerung bzw. Einstellung der jeweiligen Aktuatoren in die relevanten Betriebszustände zu treffen.

Bei dynamischen Prüfungen, die bidirektionale Kommunikation mit den Aktuatoren erfordern, kann nicht auf ein HiL Simulationssystem verzichtet werden: die dynamische Antwort des Steuergeräts ist in diesen Fällen wichtig für die korrekte Versuchsdurchführung (z. B. bei elektrisch verstellbaren High-Impact Stoßdämpfern, die je nach Dämpfergeschwindigkeit die Dämpfung erhöhen oder verringern). Ohne direkte Rückkoppelung in das Regelsystem lassen sich keine belastbare Aussagen aus den Tests ableiten.

Die dynamischen Hydropulsprüfstände (Lager-, Dämpfer- sowie BKV Prüfstand) erfordern daher zwingend ein HiL System zur Bewertung ihrer spezifischen Komponenten unter Berücksichtigung der Regelsysteme.

5.1.3 Reproduktion kundenrelevanter Betriebszustände

Um der zukünftigen Anforderung nach Funktionsorientierung gerecht zu werden, müssen einige Prüfstände auf die Bewertung kundenrelevanter Betriebszustände ausgerichtet werden. Anpassungen sind insbesondere auf Seiten der Lenkungsprüfstände erforderlich: der Pumpenfunktionsprüfstand muss um eine dynamische Belastungseinheit erweitert werden und zur Untersuchung von Lenkraddrehschwingungen wird ein spezieller Prüfstand benötigt. Darüber hinaus sind ein Fahrsimulator für Vertikaldynamik, der Reifenflachbahnprüfstand, sowie Erweiterungen des Versuchsprogramms am K&C Prüfstand zu realisieren.

¹⁰ CAN = Controller Area Network, botschaftenbasierter Datenaustauschstandard, der vorwiegend in der Fahrzeugtechnik Verwendung findet.

Pumpenfunktionsprüfstand

Die dynamische Belastungseinheit am Pumpenfunktionsprüfstand dient zur besseren Bestimmung funktionsrelevanter Kenngrößen (z.B. Druckpulsation, Energieeintrag, Fördervolumenstrom) bei dynamisch veränderlichen Betriebszuständen (Pumpendrehzahl, Leitungsstaudruck, Vorlauftemperatur). Im Gegensatz zur heutigen stationären Kennwertermittlung müssen im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ Druckrampen von bis zu 1000 bar pro Sekunde und Volumenstromänderungen von 100 l/min pro Sekunde eingestellt und die Funktionalität der Pumpen dabei bestätigt werden.

Prüfstand für Lenkraddrehschwingungen

Lenkraddrehschwingungen (LDS) sind Rotationsschwingungen am Lenkrad, die unter anderem durch Bremsmomentschwankungen an der Vorderachse ausgelöst werden können [115]. Obwohl dieser Zielkonflikt aus Lenkpräzision und Schwingungskomfort schon seit mehreren Jahrzehnten bearbeitet wird [12], besitzt er auch heute noch einen hohen Stellenwert bei der Komfortbewertung von Vorderachsen [119]. Zur Reproduktion der Schwingungsphänomene und zur Analyse von Abhilfemaßnahmen sollte ein Prüfstand wie in [124] beschrieben eingesetzt werden.



Bild 34: LDS Prüfstand [124]

Bei dem in der Quelle dargestellten Prüfstand leiten Hydraulikzylinder Längskräfte in die Radaufstandspunkte der Vorderachse eines Versuchsfahrzeugs ein und regen sowohl Lenkung als auch Vorderwagen dynamisch an. Gegenstand der Analyse sind Frequenz und Amplitude der entstehenden Schwingformen entlang des Lenkungsstrangs bis zum Lenkrad, aus denen die

Empfindlichkeit des Fahrzeugs für LDS bestimmt und gegebenenfalls Handlungsbedarf aufgezeigt werden kann.

Fahrsimulator für Vertikaldynamik

Die eingeschränkte Darstellungsmöglichkeit von Quer- und Längsdynamik verhindert eine verlässliche kundennahe Bewertung in Simulatoren (vgl. Kapitel 3.3.3). Folglich ist die Fahrdynamikbewertung am Prüfstand auf Vertikaldynamik oder schwingungsbehaftete Quer- bzw. Längsdynamik beschränkt. Ein Ansatz ist, das Komfortverhalten einer Fahrwerksabstimmung frühzeitig im Entwicklungsprozess in einem Fahrsimulator erlebbar zu machen. Dazu wird eine Fahrgastzelle auf einem Hexapodsystem befestigt und von einem Simulationssystem in verschiedenen Frequenzen und in drei Vorzugsrichtungen (Heben, Nicken, Wanken) bewegt. Die „Testfahrer“ befinden sich im Inneren der Fahrgastzelle und steuern den Versuchsablauf über einen Computer. Auf Basis nachgefahrener bzw. simulierter Vertikaldynamik erfolgt die subjektive Beurteilung des erlebten Eindrucks. Der Fahrsimulator hilft somit, Entwicklungsaufwand, -kosten und -zeit einzusparen.

Reifenflachbahnprüfstand

Für eine zuverlässige Bewertung von Reifeneigenschaften ist, wie oben ausführlich dargestellt, ein Flachbahnprüfstand unerlässlich.

Erweiterung des Versuchsprogramms am K&C Prüfstand

Am K&C Prüfstand kann durch die Erarbeitung zusätzlicher Versuchsprogramme (stationäre Darstellung dynamischer Lastfälle wie Bremsen in der Kurve) die Bewertungsqualität der Kinetikanalyse weiter gesteigert werden.

Weitere Anpassungen

Die Themen Bremsen, Federung, Dämpfung und Stabilisierung sowie Pedalwerk und Betätigung erfordern keine weitergehende Anpassungen aus Sicht der Funktionsorientierung, da die betreffenden Prüfstände (Bremsengeräuschprüfstand, Reibwertprüfer, Lager- und Dämpfer-Hydropulsprüfstand sowie Hydropuls BKV Prüfstand) bereits heute ihren wichtigen Beitrag liefern. Detailverbesserungen der genannten Prüfstände sind teilweise erforderlich (siehe Kapitel 5.1.5), allerdings sind aufgrund Funktionsorientierung weder Prüfaufbau noch Versuchsprogramm grundlegend zu verändern.

Auch im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ wird eine umfassende Bewertung des dynamischen Fahrverhaltens nur im Fahrversuch möglich sein (Berücksichtigung des Zusammenspiels von Quer-, Längs- und Vertikaldynamik). Die angesprochenen Prüfstände können daher, wie heute, nur einen Teil der Bewertung beitragen.

5.1.4 Steigerung des Automatisierungsgrads und der Flexibilität

Zur Effizienzerhöhung müssen Automatisierungsgrad und Flexibilität der Prüfstände im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ gegenüber dem heutigen Stand gesteigert werden.

Folgende Prüfstände bieten dafür Potenziale:

- **Pumpenprüfstand**
Ein Automatisierungssystem steigert die Effizienz der Prüfabwicklung durch vordefinierte Prüfprogramme und automatische Einstellung aller Versuchsparameter.
- **Reifenschnellaufprüfstand**
Am Reifenschnellaufprüfstand reduziert eine im Vergleich zu heute verbesserte Prüfstandssoftware den Aufwand für Programmierung und Abruf durch intuitive Bedienung und parametrisierte, flexible Prüfprogramme.
- **K&C Prüfstand**
Durch Anfertigung rad- bzw. fahrzeugspezifischer Adapter kann der Zeitbedarf für Radersatz- und Fahrzeugfesselung – und somit ein Großteil der Prüfstandsbelegung eines Fahrzeugs – deutlich reduziert werden.

Weitergehende Anpassungen zur Steigerung von Automatisierungsgrad bzw. Flexibilität der Prüfstände scheinen aufgrund des heutigen hohen Optimierungsgrades nicht erforderlich.

5.1.5 Verbesserung der Prüfstandsaufbauten und neue Prüftechniken

Die Verbesserung von Prüfstandsaufbauten kann in folgende vier Aspekte unterteilt werden:

- Erweiterung der Mess- und Stellbereiche
- Erhöhung der Dynamik
- Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen
- Realisierung weiterer Freiheitsgrade

Erweiterung der Mess- und Stellbereiche

Alle Prüfstände erfüllen bereits heute die Anforderungen an ihre Mess- und Stellbereiche. Sie werden auch die im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ geltenden Anforderungen ohne Anpassung erfüllen.

Erhöhung der Dynamik

Auf Seiten der Bremsenprüfstände sind die Umfangskraft- und Bremsdruckaktuatoren des Bremssattelprüfstands so anzupassen, dass dynamische Prüfungen möglich werden. Für beide Aktuatoren gilt die Anforderung, im Bereich der ABS- bzw. DSC-Regelfrequenzen bis zu 30 Hz dynamische Kräfte bzw. Drücke zu stellen.

Um das Verhalten aktiver Feder-/Dämpfersysteme bei hochdynamischen Fahrbahnregungen beurteilen zu können, muss der Dämpfer-Hydropuls Prüfstand mit höherer Dynamik ausgestattet werden. Hindernisüberfahrten erzeugen Vertikalgeschwindigkeiten des Rades im Bereich von 10 m/s. Darauf muss der Prüfstand ausgelegt werden.

Wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben, wird für den Pumpenfunktionsprüfstand eine dynamische Belastungseinheit benötigt, die Druckänderungen von 1000 bar/Sekunde und Volumenstromänderungen von 100 l/min pro Sekunde stellen kann.

Mit dem neuen Reifenflachbahnprüfstand sollen nicht nur stationäre sondern auch instationäre Kennlinien des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes ermittelt werden. Dafür sind Radaufstandskraft-, Sturz- und Schräglaufwinkel- sowie Brems-/Antriebsmomentaktuatoren erforderlich, die bis zu einem Frequenzbereich von bis zu 30 Hz regeln können.

Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen

Zur besseren Abbildung der Realität am Prüfstand müssen im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ einige Prüfungen unter kundennahen Temperatur- bzw. Klimabedingungen durchgeführt werden. An folgenden Prüfständen sind dementsprechend Klimakammern zu installieren:

- Bremssattelprüfstand
- Feststellbremsenprüfstand (mit Spritzwasserbeaufschlagung)
- Reibwertprüfer und Schwungmassenprüfstand (mit fahrzeuggerechter Fahrtwindumströmung und Spritzwasserbeaufschlagung)
- Lager-Hydropulsprüfstand
- Dämpfer-Hydropulsprüfstand
- Lenkgetriebeprüfstand
- Reifenflachbahnprüfstand (mit Wasserbeaufschlagung)

Prüfungen der Kupplungsbetätigung unter Berücksichtigung der Temperatur werden am Hydropuls BKV Prüfstand durchgeführt, um eine zusätzliche Klimakammer zu vermeiden. Am Rollenprüfstand mit Klimakammer müssen eine Luftentfeuchtungsanlage sowie ein fahrzeuggerechtes Fahrtwindgebläse installiert werden.

Über die Klimatisierung hinaus sind an folgenden Prüfständen weitere Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Am Bremsengeräuschprüfstand wird durch fahrzeugspezifische Anbindungskonstruktionen die Aussagefähigkeit auf Körperschall erweitert: die Abbildung der Karos-

seriesteifigkeit an allen Verschraubungen der Fahrwerkslenker ermöglicht die Messung und Beurteilung der eingeleiteten Schwingungen.

- An Lenkgetriebe und Pumpenfunktionsprüfstand werden Schläuche und Hydraulikleitungen in Fahrzeuggeometrie in den Prüfstands Aufbau integriert. Dadurch lassen sich bessere Aussagen zum hydraulischen Verhalten der betreffenden Komponenten erzielen, denn Druckverluste und Temperaturänderungen lassen sich am Besten in einem gemeinsamen Hydraulikkreislauf bewerten.

Realisierung weiterer Freiheitsgrade

Die Realisierung weiterer Freiheitsgrade ist beim Lager-Hydropulsprüfstand zwingend erforderlich. Entsprechend der jeweiligen Einbau-, Spann- und Betriebsbedingungen der Lager sind bis zu sechs Freiheitsgrade zu realisieren, um die Bauteile fahrzeug- und kundengerecht zu prüfen. Die dazu erforderliche Prüfstandstechnik ist heute noch nicht verfügbar; das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ setzt die Verfügbarkeit einer technischen umsetzbaren Lösung voraus.

An allen anderen Prüfständen sind bereits heute die im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ benötigten Freiheitsgrade realisiert.

Einsatz neuer Prüftechniken

Die oben beschriebenen Anforderungen an das Prüffeld im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ erfordern teilweise neue Prüftechniken. In folgenden Fällen ist die heute verwendete Prüftechnik nicht ausreichend und sollte ertüchtigt werden:

- Am Dämpfer-Hydropulsprüfstand muss ein neuartiger Aktuator eingesetzt werden, der auf einem Weg von maximal 0,5m Geschwindigkeiten bis zu 10m/s geregelt nachfahren kann.
- Die Prüfung von Fahrwerkslagern in sechs Freiheitsgraden erfordert ein bis heute nicht bekanntes Prüfstandskonzept.
- Die Reifenprüfung wird mit Flachbahntechnik durchgeführt. Diese Technik ist bereits seit längerem bekannt [196], [197].
- Systemversuche am Bremsengeräuschprüfstand werden mit Hilfe des Rollenprüfstands mit Klimakammer auf Gesamtfahrzeugebene bestätigt. Das ist heute keine gängige Praxis, entlastet in Zukunft aber den Fahrversuch und bringt unter anderem Unabhängigkeit von Witterungsbedingungen.

5.1.6 Erweiterungen des Prüffelds

Zusammenfassend seien in der folgenden Liste die für das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ neu zu errichtenden Prüfstände zusammengestellt.

- ½-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz
- 1-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz, mit optionaler Koppelung über HiL
- ARS-Prüfstand (aktive Stabilisierungssysteme)
- Dynamischer mehraxialer Kennlinienprüfstand für Elastomerlager
- Fahr Simulator für Vertikaldynamik
- Flachbahnprüfstand (Reifenprüfung)
- LDS Prüfstand
- Prüfstände für innovative Lenksysteme (AFS, EPS)

5.2 Weiterentwicklung der Simulation zum Szenario „Fortgeschrittene Simulation“

5.2.1 Aussagefähigkeit der Simulation

Basierend auf den heutigen Fähigkeiten der Simulation ist für das Prüffeld der Zukunft im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ zu erwarten, dass folgende virtuelle Anwendungen die Genauigkeit von Prüfstandsversuchen liefern werden und daher den Prüfaufwand deutlich reduzieren:

- Bremssattelaufweitung inklusive Volumenaufnahme
- Bremsbelagsteifigkeit und –durchwärmung
- Frequenz und Pegelhöhe der Betriebsschwingungen von Brems scheiben- und Umgebungstemperatur, sowie mechanischer Vorspannungen
- Statische und dynamische Steifigkeit und Dämpfung von Elastomer- und Hydrolagern bei periodischer bzw. sprunghafter Anregung.
- Pedalkraft und Hydraulikdruck des Bremskraftverstärkers unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses.
- Dynamische Kennlinien der Achskinematik (Radlast, Spur und Sturz über Einfederung, Brems- und Seitenkraft)
- Steifigkeit und Dämpfung von Stoßdämpfern und Luftfedern
- Fliehkraftkontur von Reifen
- Reifenkennlinien: Seitenkräfte und Rückstellmoment bei kombiniertem Schräg- und Längsschlupf; Radaufstands- und Längskräfte bei Hindernisüberfahrten.

Folgende Anwendungen der Simulation werden trotz intensiver Forschung nicht für den Einsatz im Entwicklungsprozess zur Verfügung stehen. Grund dafür ist die Komplexität der Modellierung:

- Reibwert von Betriebs- und Feststellbremse
- Steifigkeit und Dämpfung von Elastomer- und Hydrolagern unter Temperatureinfluss
- Volumenstrom, Druck und Temperatur von Hydrauliksystemen
- Reifenkennlinien unter dynamischen Radlasten bzw. Temperatur- und Fahrbahneinfluss

5.2.2 Ausweitung der Fahrdynamiksimulation

Zusätzlich zu den heute bekannten und bearbeiteten Themen sind im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ weitere Inhalte mit Hilfe der Simulation zu bearbeiten, dabei stehen folgende drei Themen heraus:

- Modellierung von Innovationen
- Berücksichtigung aktiver Komponenten und deren Regelungsalgorithmen
- Beurteilung von Schnittstellen und Wechselwirkungen

Modellierung von Innovationen

Im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ wird die prinzipielle Funktionsfähigkeit innovativer Konzepte in der frühen Phase vorwiegend mit Hilfe der Simulation nachgewiesen. Das in der Fahrzeugtechnik bekannte Wissen wird in diese Simulationsmodelle eingebracht und unter den Gesichtspunkten der Konzeptentwicklung neu angewendet. Erst nach positivem Abschluss der virtuellen Konzeptentwicklungsphasen wird mit der Realisierung erster Prototypen begonnen. Die spezialisierten Simulationsmodelle wachsen während der Konzeptausgestaltung weiter mit: sie werden parallel zur Detaillierung der technischen Lösung immer mehr verfeinert. Auch in der Serienentwicklung finden sie Verwendung als eingebundenes Modul in der Fahrdynamiksimulation auf Gesamtfahrzeugebene.

Berücksichtigung aktiver Komponenten und deren Regelungsalgorithmen

Genauso müssen aktive Komponenten und deren Regelungsalgorithmen in der Fahrdynamiksimulation berücksichtigt werden. Dabei gilt es nicht nur, das Idealverhalten des Regelsystems sondern auch die Eigenschaften seiner konkreten Umsetzungen zu bewerten. Beispielsweise ist die Implementierung eines Regelsystemalgorithmus (Erzeugung von Kräften, Momenten oder Stellwegen auf Basis berechneter Regelsystem-Ausgangsgrößen aus den vorgegebenen Eingangsgrößen) in der Simulationsumgebung nur der erste Schritt. Die Modellierung des Aktuator- und Sensorverhaltens (insbesondere frequenz- und amplitudenabhängiger Unterschied von Soll- und

Istwert) sowie die Reglereigenschaften des realen Steuergeräts müssen für hochauflösende Aussagen mit abgebildet werden.

Beurteilung von Schnittstellen und Wechselwirkungen

Eine wichtige Aufgabe der Simulation im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ ist die Bewertung von Schnittstellen und Wechselwirkungen – auf mechanischer wie auf logischer Ebene. Dazu müssen die Randbedingungen aller Systeme in der Fahrdynamiksimulation auf Gesamtfahrzeugebene modelliert und parametrisiert sein. Neben den mechanischen Eigenschaften (Masse, Steifigkeit, Dämpfung) aller Komponenten müssen auch, wie oben dargestellt, die relevanten Innovationen, aktiven Komponenten und Regelsystemen in Ihren logischen Eigenschaften abgebildet werden.

*

Für das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ wird davon ausgegangen, dass Regelsysteme mit Hilfe der Fahrdynamiksimulation nur grob vorabgestimmt werden können. Insbesondere die für eine Feinabstimmung erforderliche Modellierung bzw. Parametrierung des realen Aktuator-, Sensor- und Steuergeräteverhaltens bedarf eines immensen Datenbeschaffungsaufwands, der im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ nicht zu leisten sein wird.

Tatsächlich wird die Simulation mit ihren Aussagen eine erste Entscheidungshilfe für die Konzeptauswahl bzw. für die Bewertung von Risiken liefern können. Für Feinabstimmungen werden auch im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ Prüfstands- und Fahrversuche erforderlich sein.

5.3 Zusammenwirken von Prüffeld und Simulation

Im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ wird zu jeder Entscheidung – sei es in der Konzept- oder Serienentwicklung – ein Simulationsergebnis vorliegen, das je nach Aussagekraft der Simulation (siehe Kapitel 5.2.1) alleine ausreichend ist oder zusammen mit anderen Ergebnissen zu einer Entscheidung beiträgt.

Voraussetzung für belastbare Simulationsergebnisse sind einwandfrei modellierte und parametrisierte Simulationsmodelle. Dazu wird im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ ein deutlicher Prüfaufwand erforderlich sein, der sich auf die Parametrierung bekannter Modelle (Anpassung eines gegebenen Modells an eine konkrete Ausführung) und auf die Modellerstellung bisher nicht simulierter Systeme (Definition der erforderlichen Parameter und ihrer Zusammenhänge) aufteilen lässt.

5.3.1 Modellparametrierung

Bei bekannten Modellen kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Parameter (mit Anpassungen) vom Vorgängermodell übernommen werden kann. In den anderen Fällen müssen unbekannte Parameter vor dem Simulationslauf gemessen oder zunächst abgeschätzt und im Nachhinein durch eine Messung bestätigt werden. In allen Fällen ist eine Validierung des Simulationsergebnisses durch einen vergleichenden Prüfstandsversuch ratsam.

Messungen zur Modellparametrierung

Im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ sind keine parametrierenden Messungen mehr erforderlich. Aus der Vielzahl der bekannten Simulationsmodelle lassen sich Startwerte für alle Parameter abschätzen bzw. aus anderen Simulationsmodellen berechnen.

Messungen zur Bestätigung von Modellparametern

Aufgrund der teilweise eingeschränkten Aussagefähigkeit der Simulation (siehe Kap. 5.2.1) sind im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ Messungen zur Bestätigung von Modellparametern an folgenden Prüfständen erforderlich:

- Bremsenprüfstand mit Massensimulation: Standfestigkeit, Temperaturfading
- Feststellbremsenprüfstand: Reibwert im Seilzug
- Reibwertprüfer: Reibwert, Reaktionszeiten aktiver Bremssysteme
- Schwungmassenprüfstand: Reibwert
- ARS-, Lenkgetriebe-, Pumpenfunktionsprüfstand: Druckverluste in Leitungen und an Blenden
- Rollenprüfstand: Tieftemperaturmessung von Komponenten in Fahrzeugumgebung

Messungen zur Validierung von Simulationsergebnissen

Aus heutiger Sicht werden – bis auf eine Ausnahme – alle Prüfstände zur Ergebnisvalidierung beitragen. Lediglich die Federwaage kommt aufgrund der hohen Ergebnisqualität bei der Steifigkeitsberechnung nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Im Einzelnen werden folgende Themen mit Prüfständen validiert:

- Bremsen
 - Bremsbelag Kompressibilitätsprüfstand: Bremsbelagsteifigkeit
 - Bremsengeräuschprüfstand: Frequenz und Pegelhöhe der Schallentwicklung
 - Bremsenprüfstand mit Massensimulation: Standfestigkeit, Temperaturfading
 - Bremssattelprüfstand: Bremssattelaufweitung
 - Brems Scheiben-Formfehler-Messmaschine: Oberflächenrauigkeit und bleibende Verformung nach Bremsvorgängen

- Feststellbremsenprüfstand: erforderliche Handkräfte
- Reibwertprüfer: Reibwert, Druckanstiegszeiten unter Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- Schwungmassenprüfstand: Reibwert
- Federung, Dämpfung und Stabilisierung
 - ARS-Prüfstand: Phasenlage von Solldruck zu Pendelstützenkraft
 - Lager-Hydropulsprüfstand: Steifigkeit und Dämpfung bei verschiedenen Temperaturen
 - Dämpfer-Hydropulsprüfstand: Dämpfung bei verschiedenen Temperaturen
 - VDA Stoßdämpferprüfstand: Kennlinienmessung
- Lenkung
 - Lenkgetriebeprüfstand, AFS/EPS-Prüfstand: Kennlinien, z.B. Phasenlage Hydraulikdruck bzw. Lenkmoment zu Spurstangenkraft
 - Pumpenfunktionsprüfstand: Leistungsaufnahme unter Druck, Temperatur
- Pedalwerk
 - Hydropuls BKV Prüfstand: Pedalkraft bei verschiedenen Pedalgeschwindigkeiten bzw. Temperaturen
 - Kupplungsbetätigungsprüfstand: Pedalkraft bei verschiedenen Temperaturen
 - Statischer BKV-Prüfstand: Pedalkraft bei verschiedenen Temperaturen
- Reifen
 - Reifenflachbahnprüfstand (für Reifeneigenschaftenprüfstand): Seitenkraft bei Schräg- und Längsschlupf, Rückstellmoment
 - Reifenschnelllaufprüfstand: Federeigenschaften und Rollwiderstand
 - Reifen-Uniformity-Prüfstand: Höhengschlag, Kraftschwankungen
- Achskinematik
 - K&C Prüfstand: Kennlinien der Achskinematik
 - ½- und 1-Achsprüfstände: dynamische Kennlinien der Achskinematik unter Berücksichtigung der Regelsysteme
 - Rollenprüfstand mit Klimakammer: Tieftemperaturmessungen an verschiedenen Komponenten

5.3.2 Prüfstandsversuche zur Modellerstellung

Der zweite große Block simulationsbedingter Prüfstandsversuche dient der Erstellung von Simulationsmodellen für Innovationen und aktive Komponenten.

Komponenten- und Systemmodelle für Innovationen

Der Aufwand und die geeignetsten Mittel zur Modellerstellung für Innovationen ist sehr stark abhängig von der konkreten Ausprägung der Innovation. Daher können hier nur die Prüfstände angeführt werden, bei denen sicher mit Prüfaufwand zur Erstellung neuer Modelle zu rechnen ist:

- Lager-Hydropulsprüfstand: Steifigkeit und Dämpfung innovativer Fahrwerkslager
- Dämpfer-Hydropulsprüfstand: Steifigkeit und Dämpfung bei dynamischer und hochdynamischer Einfederung
- VDA Stoßdämpferprüfstand: Dämpfung bei stationären Einfedergeschwindigkeiten
- Hydropuls BKV Prüfstand: dynamische Kennlinien von Betätigungssystemen
- ½- und 1-Achsprüfstände: dynamische Kennlinien der Achskinematik in Verbindung mit Regelsystemen

Alle übrigen Prüfstände werden je nach Bedarf hinzugezogen. Für gänzlich neue Systeme sind unter Umständen eigene Prüfstände zu errichten.

Detailmodelle aktiver Komponenten

Um Simulationsmodelle aktiver Komponenten für die Fahrdynamiksimulation bereitstellen zu können sind modellbildende Versuche an folgenden Prüfständen zu erwarten:

- Feststellbremsenprüfstand, Reibwertprüfer: Verzögerung (Reibwert) aktiver Bremssysteme unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur.
- ARS-Prüfstand: detailliertes (hydraulisches) Modell aktiver Wankstabilisierungssysteme
- Lager-Hydropulsprüfstand: Steifigkeit und Dämpfung verstellbarer Lagerkonzepte
- Dämpfer-Hydropulsprüfstand: Steifigkeit und Dämpfung bei dynamischer und hochdynamischer Einfederung unter Berücksichtigung des Regelsystemverhaltens
- VDA Stoßdämpferprüfstand: Dämpfung bei stationären Einfedergeschwindigkeiten (ohne aktive Verstellung durch das Regelsystem)
- AFS/EPS-Prüfstand: detailliertes mechatronisches Modell aktiver Lenksysteme
- Hydropuls- und statischer BKV-/Kupplungsbetätigungsprüfstand: dynamische und statische Kennlinien aktiver Betätigungssysteme

Die Reifenprüfstände werden nicht zur Erarbeitung von Systemmodellen beitragen können, da keine aktiven Reifensysteme zu erwarten sind.

Gesamtfahrzeugprüfstände dienen allenfalls in Ausnahmesituationen der Modellbildung. Um die Einflussparameter und Versuchsbedingungen exakt einstellen und kontrollieren zu können werden detaillierte Simulationsmodelle mit Komponenten- und Systemprüfungen erstellt. Gesamtfahrzeug- und $\frac{1}{2}$ - bzw. 1-Achsprüfstände validieren das Systemverhalten durch den Vergleich von Systemsimulation und -versuch.

5.3.3 Beispiele für das Zusammenwirken von Simulation und Versuch

Im Folgenden soll das Zusammenwirken von Simulation und Versuch im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ anhand der Beispiele „LDS Prüfstand“ und „K&C Prüfstand“ verdeutlicht werden.

Beispiel LDS Prüfstand

Zur Bewertung von Lenkraddrehschwingungen stehen heute die drei generellen Methoden der Fahrdynamikbewertung zur Verfügung: Fahrversuch, Prüfstandsversuch und Simulation. Im Straßenversuch fährt das zu untersuchende Fahrzeug bei verschiedenen Startgeschwindigkeiten und ggf. mit leichtem Bremsdruck über eine besonders ebene Fahrbahn. Die dabei auftretenden Vibrationen am Lenkrad (Messgröße Beschleunigung oder Drehwinkel) werden über der Geschwindigkeit aufgetragen und mit anderen Messpunkten (z. B. Sitzschiene, Spurstange, Zahnstange, Lenksäulengelenk) verglichen. Ziel ist, die Vibrationen am Lenkrad bei allen Geschwindigkeiten und bei allen Bremsdrücken zu minimieren. Die Schwierigkeit der Bewertung im Fahrversuch liegt in der schlechten Reproduzierbarkeit durch die Vielzahl nicht einstellbarer Parameter wie Phasenlage der Bremsmomentschwankung an linkem bzw. rechtem Vorderrad.

Zur Steigerung der Reproduzierbarkeit der Versuche wurde der in [124] beschriebene LDS Prüfstand errichtet. Er bietet alle Voraussetzungen, um die Neigung eines Fahrzeugs zu Lenkraddrehschwingungen reproduzierbar aufzuzeigen.

Für die Simulation von LDS existiert heute neben den umfangreichen Gesamtfahrzeugmodellen der MKS [119] ein „ebenes Vorderachsmo-
dell“ auf Matlab-Basis [124]. Es ist aus vier Massen (zwei Vorderräder, Zahnstange und Lenkrad) mit insgesamt acht Freiheitsgraden aufgebaut. Die Körper sind sowohl untereinander als auch gegenüber den Karosserieanbindungspunkten mit linearisierten Feder-Dämpfer-Elementen gefesselt. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen bilden den LDS Prüfstand nach: die Anregung erfolgt über dynamische Lasten im Radaufstandspunkt, Ausgangsgrößen sind Beschleunigungen an verschiedenen Punkten im Lenkungsstrang.

In der folgenden Tabelle 10 werden die erforderlichen Aufwände, die unberücksichtigten Versuchsparameter sowie die resultierenden Aussagen der drei Bewertungsmethoden gegenübergestellt und im Folgenden erläutert.

	Fahrversuch	Prüfstand	Simulation
Einmalige Aufwände	Auswahl geeignete Teststrecke	Aufbau Prüfstand Versuchsdefinition	Aufbau Simulationsmodell Definition Fahrsituation/Anregung Definition Ausgabegrößen
Proportionale Aufwände	Aufbau Versuchsfahrzeug (Komponenten + Messtechnik) Durchführung Versuchsfahrten Ergebnisauswertung	Aufbau Versuchsfahrzeug (Komponenten + Messtechnik) Versuchsdurchführung Ergebnisauswertung	Parametrierung Simulationsmodell Durchführung Simulationslauf Ergebnisauswertung
Nicht abgebildete Faktoren	keine	Bremsdruckübersprechen li/re	Bremsdruckübersprechen li/re Reibungen, nicht linearisierte Anteile
Nicht einstellbare Parameter	Phasenlage Bremsdruckschwankung li/re Phasenlage Bremsmomentschwankung li/re Phasenlage Radkraftschwankung li/re	Dämpfung des nicht angeregten Rades	keine
Relative Streuung Beschleunigung am Lenkrad	$2 - 3 \frac{m}{s^2}$	$1 \frac{m}{s^2}$	„0“ $\frac{m}{s^2}$
Resultierende Aussage	Auftreten von LDS bei bestimmten Fahr-situationen	Empfindlichkeit des Fahrzeugs für LDS Tendenzielle Auswirkung von Bauteil-änderungen	Tendenzielle Auswirkung von Parameter- / Modellierungsänderungen

Tabelle 10: Vergleich der Eigenschaften von Fahrversuch, Prüfstand und Simulation in Bezug auf Lenkraddrehschwingungen

Der Fahrversuch ist durch einen geringen Vorbereitungsaufwand gekennzeichnet, dem allerdings relativ hohe proportionale Aufwände je Versuch gegenüberstehen. Insbesondere die zur Eingrenzung der Streuung erforderliche Versuchsanzahl und die damit verbundene längerfristige Bereitstellung eines messtechnisch ausgerüsteten Versuchsfahrzeugs verursachen hohe Kosten. Im Fahrversuch sind alle relevanten Faktoren abgebildet, dennoch sind einige entscheidende Versuchsparameter nicht kontrollierbar. Daraus resultiert die hohe Streuung der Versuchsergebnisse, sodass mehrere Wiederholungen erforderlich sind, um verlässliche Messwerte zu erhalten.

Zum Aufbau des LDS Prüfstands ist ein hoher Einmalaufwand geleistet worden, im Gegensatz dazu erfordern Versuchsvorbereitung und -durchführung nur einen moderaten proportionalen Aufwand. Durch den Prüfstandsversuch sind nicht alle relevanten Faktoren abgebildet, dementsprechend sind keine Absolutaussagen möglich. Die Streuung der Ergebnisse ist wegen der wenigen unkontrollierbaren Parameter gering. Dadurch und durch den moderaten proportionalen Aufwand wird es möglich, verschiedene Varianten auf ihre Empfindlichkeit für LDS zu untersuchen und Relativaussagen zu treffen. Aussage des Prüfstandsversuchs ist folglich die Empfindlichkeit des Fahrzeugs für LDS sowie der tendenzielle Einfluss von Bauteiländerungen.

Für die Erstellung des Simulationsmodells ist ebenfalls ein hoher Einmalaufwand erforderlich. Im „ebenen Modell“ sind einige wichtige Faktoren nicht abgebildet bzw. linearisiert, daher sind auch in der Simulation nur Relativvergleiche möglich. In der Einrichtung der Simulationsreihen liegt ein moderater proportionaler Aufwand durch die Parametrierung des Simulationsmodells und die Definition der zu variierenden Größen – dieser Aufwand steigt überproportional bei der Verwendung detaillierterer MKS Modelle. In der Simulation sind alle Parameter kontrollierbar, demzufolge sind alle Aussagen zur Auswirkung von Parameterveränderungen absolut reproduzierbar.

★

Im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ steht der LDS Prüfstand als Bestätigungsinstrument am Ende der Serienentwicklung, die mit der Erstellung und Parametrierung der Simulationsmodelle beginnt: Die relevanten Parameter der für Lenkraddrehschwingungen ausschlaggebenden mechanischen Bauteile

- Fahrwerkslager (Steifigkeit und Dämpfung)
- Lenkgetriebe (Zahnstangenübersetzung, Reibung)
- Lenkhilfeunterstützung (Kennlinie Spurstangenkraft über Lenkradmoment, frequenzabhängige Phasenlage, Verstärkung)
- Lenksäule mit Lenkrad (Drehsteifigkeit, Reibung, Masse, Trägheit)
- Steifigkeiten der Achsbauteile und Karosserieanbindungspunkte

werden aus den Auslegungsdaten bzw. mit Anpassungen vom Vorgängermodell in ein Mehrkörper-Simulationsmodell übernommen. Das Modell enthält die Achskinematik und ist um eventuelle Regelsysteme bzw. aktive Komponenten erweitert. Dafür erforderliche Algorithmen und Parameter liegen als Ergebnisse der Konzeptphase vor. Ein PDM System als zentrale Ablage der Simulationsmodelle verwaltet alle Parameter durch Koppelung der Simulations- und CAD-Modelle sowie eine durchgängige Versionskontrolle.

Parallel zur Modellbildung entsteht ein kundenrelevantes Detail-Zielsystem speziell für Lenkraddreh-schwingungen, das sich aus dem Zielsystem des Gesamtfahrzeugs ableitet. Das Zielsystem beschreibt objektive und subjektive Kriterien, anhand derer das Fahrzeug bezüglich LDS bewertet werden soll, und bildet so den Zielkonflikt aus Lenkpräzision und Schwingungskomfort ab. Die quantifizierbaren Bewertungsgrößen finden sich im Zielsystem für eine virtuelle Optimierung wieder. Das Ergebnis der Optimierung sind angepasste Auslegungsparameter, mit denen die Empfindlichkeit des Fahrzeugs für LDS minimiert werden kann.

Mit diesen Parametern startet die Detailkonstruktion und -optimierung. Unter Abstimmung aller Entwicklungsziele wie Funktion, Akustik, Betriebsfestigkeit, Produktion, Kosten etc. werden die Konzepte auskonstruiert. Dabei werden stets Komponentensimulationen durchgeführt, um die Erreichbarkeit der Auslegungsparameter zu bestätigen. Bei Anpassungsbedarf werden die LDS Simulationen wiederholt, um eventuelle Abweichungen des Zielsystems frühzeitig zu erkennen und darauf reagieren zu können.

Bevor in der Prototypenphase Fahrzeuge gebaut werden sind die einzelnen Bauteile auf den betreffenden Komponentenprüfständen zu testen, um die Realisierung aller Auslegungsgrößen auf Komponentenebene zu bestätigen. Mit den Prüfstandsergebnissen findet zunächst eine Überprüfung bzw. Anpassung aller Modellparameter statt. Ab Verfügbarkeit von Fahrzeugen erfolgt die Validierung der Simulationsmodelle am LDS Prüfstand. Die abschließende Bewertung der Anfälligkeit eines Fahrzeugs für LDS führt nach wie vor der Fahrversuch.

In besonderen Fällen können die 1-Achsprüfstände zu einer genaueren Analyse der entstehenden Schwingformen herangezogen werden, wenn die Ergebnisse am LDS Prüfstand nicht plausibel sein sollten oder im Fahrversuch nicht bestätigt werden können.

Durch diese Vorgehensweise werden erforderliche Änderungen an Achsbauteilen oder -konzepten frühzeitig erkannt. In den späteren Prozessphasen sinken Änderungs- und Versuchskosten wie angestrebt, gleichzeitig steigt die Qualität der Konstruktion durch frühzeitige und nachhaltige Bewertung der Anforderungen. Dem steht ein erhöhter Aufwand für Modellierung und Parametrierung der Simulation gegenüber, der durch das PDM System beherrschbar bleibt.

Beispiel K&C Prüfstand

Als zweites Beispiel für den Einsatz von Prüfständen im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ soll der K&C Prüfstand betrachtet werden. Der K&C Prüfstand dient heute, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, der Elastokinematikbewertung von Gesamtfahrzeugen. Weiterhin finden Fahr- dynamik- und Achskinematiksimulationen sowie Fahrversuche auf verschiedenen Teststrecken zu diesem Zweck statt.

Die Simulation kinematischer Kenngrößen hat bereits heute die Qualität quasistatischer Prüf- standsergebnisse erreicht, wie die Ergebnisse von [159] zeigen. Die Quelle verwendet starre Mehrkörpermodelle für Vorder- und Hinterachse, bei denen Elastomerlager durch überlagerte, linearisierte Ersatzsteifigkeiten dargestellt sind. Mit einem virtuellen Prüfstand werden Kennlinien der Achskinematik berechnet und anschließend zur Modellvalidierung mit Messungen eines Versuchsfahrzeugs auf dem K&C Prüfstand verglichen.

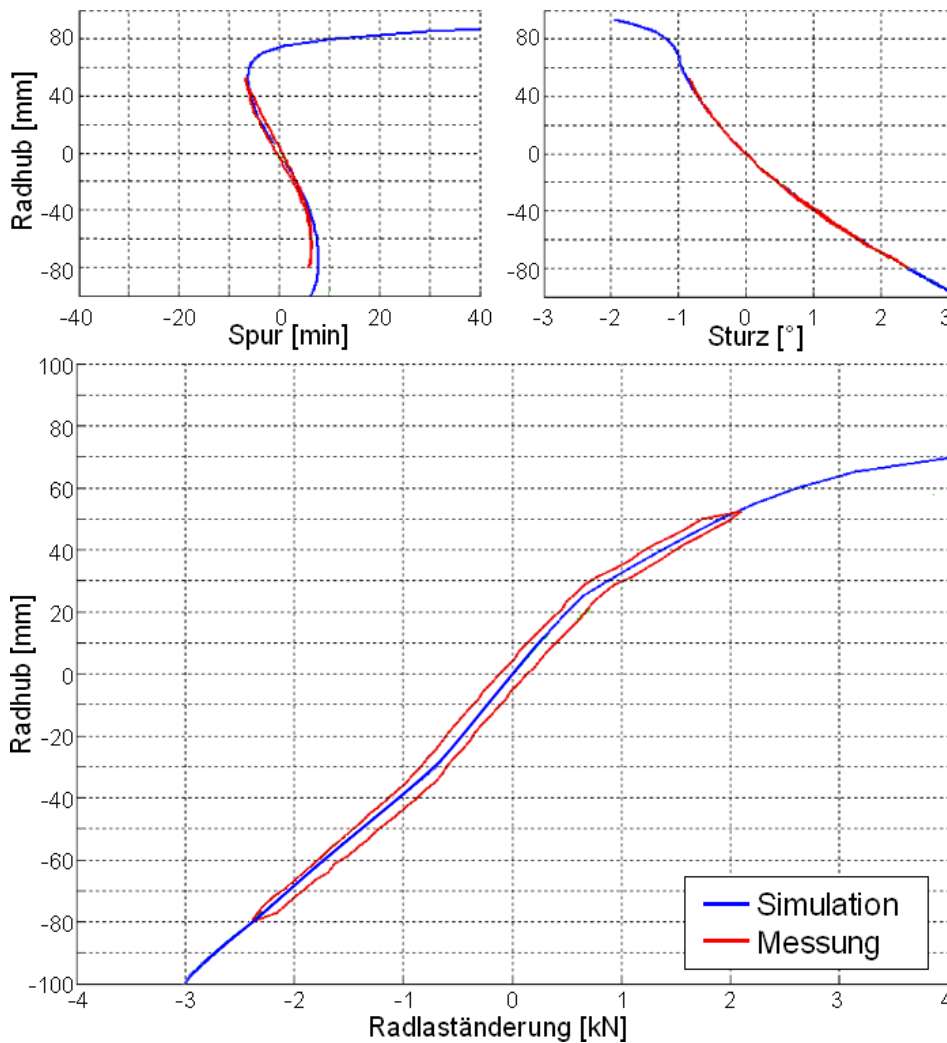


Bild 35: Radhub über Spur-, Sturz- und Radlaständerung an einer Vorderachse – Vergleich von Simulationsmodell und Prüfstandsergebnis [159]

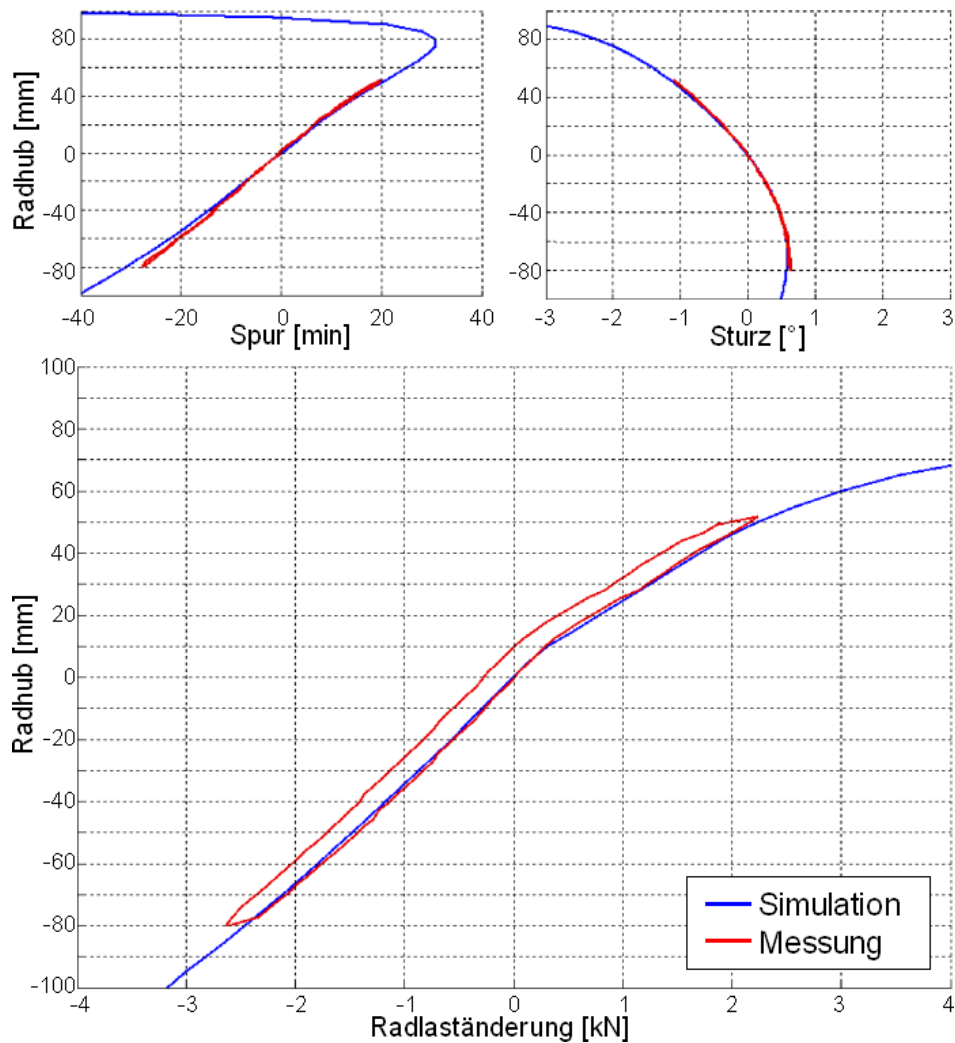


Bild 36: Radhub über Spur-, Sturz- und Radlaständerung an einer Hinterachse – Vergleich von Simulationsmodell und Prüfstandsergebnis [159]

Wie die in Bild 35 und 36 dargestellten Kennlinien von Radhub über Spur, Sturz, bzw. Radlaständerung zeigen, stimmen die Simulationsergebnisse sehr gut mit den Prüfstandsergebnissen überein. Lediglich das Radlastdiagramm der Hinterachse weist geringe Abweichungen über den gesamten Messbereich auf. Minimale Unterschiede in den Verläufen der Vorspur an Vorder- und Hinterachse treten nur in Bereichen großer Ausfederung auf und haben aufgrund der niedrigen Radaufstandskräfte an dieser Stelle nur geringe Auswirkungen auf die Fahrdynamiksimulation.

Diese Aussagen lassen sich nach [159] auch für Spur, Sturz und Radlast unter Seiten- und Längskraft, in verschiedenen Ein- bzw. Ausfederungszuständen sowie für unterschiedliche Lenkradwinkel an der Vorderachse übertragen. Genauso behalten Sie ihre Gültigkeit für Daten, die mit mobiler Fahrzeugmesstechnik auf Teststrecken aufgezeichnet werden.

Die Betrachtung der heutigen Vorgehensweise für Modellierung und Parametrierung am Beispiel quasistatischer Kennlinien der Elastokinematik zeigt, dass sich mit vorwiegend quasistatisch und

eindimensional ermittelten Parametrierdaten sehr gute Ergebnisse erzielen lassen. Durch die oben dargestellte Validierung der Achskinematikmodelle ist die Gültigkeit der rechnerischen Überlagerung eindimensionaler Kennlinien zu mehrdimensionalen Kennfeldern nachgewiesen.

Dagegen ist die Validierung der dynamischen Elastokinematik am Prüfstand mit den heute vorhandenen Mitteln noch nicht möglich. Folglich bestehen bei der Simulation dynamischer Fahrmanöver Unsicherheiten – beispielsweise bei Elastomer- und Hydrolagern oder bei der Kraftflussverteilung zwischen Tragfeder und Stoßdämpfer¹¹. In diesem Punkt ist zusätzliche Unterstützung des Prüffelds erforderlich, um die Aussagefähigkeit der Fahrdynamiksimulation weiter zu erhöhen. Der Einfluss von Regelsystemen auf die Achskinematik kann zwar in der Simulationsumgebung modelliert, aber heute nicht mit Prüfständen validiert werden. Auch hier bestehen heute Unsicherheiten bezüglich des dynamischen Verhaltens des Gesamtfahrzeugs, die im Prüffeld bei „Fortgeschrittene Simulation“ zu eliminieren sind.

Zusammenfassung

Im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ sind die Voraussetzungen geschaffen, um die heutigen Defizite zu beseitigen. Wie im ersten Beispiel werden die relevanten Modellparameter des mechanischen Fahrwerks

- Steifigkeit der Achsbauteile und Karosserieanbindungspunkte
- Steifigkeit bzw. Dämpfung der Fahrwerkslager, Trag- und Zusatzfedern, Stoßdämpfer und Stabilisatoren
- Geometrie und Einstellwerte der Radaufhängung

zur ersten Modellbildung (mit Anpassungen) vom Vorgängermodell bzw. aus der Konzeptphase übernommen. Genauso liegen die Regelsystemalgorithmen sowie die ausschlaggebenden Parameter aktiver Komponenten als Ergebnisse der Konzeptphase im PDM System vor.

Anhand eines speziell erstellten Teilzielsystems für die Elastokinematik werden die gesammelten Parameter mit Hilfe der Fahrdynamiksimulation bewertet und in ihrem Kontext optimiert. Der optimierte Parametersatz dient als Startpunkt der Detailkonstruktion, bei der auch die übrigen Fahrzeugfunktionen (Bauraum, Fertigung, etc.) Berücksichtigung finden.

Durch die Abstimmung mit anderen Fachbereichen verursachte Änderungen werden anhand von Komponentensimulationen vorzugsweise bei den Zulieferern bewertet. Wenn sich die angestrebten Komponenteneigenschaften wegen der geänderten Randbedingungen als nicht realisierbar herausstellen, müssen die Fahrdynamiksimulationen mit neuen Parametersätzen wiederholt werden, um die Auswirkungen auf die Fahrdynamik virtuell bewerten zu können.

¹¹ insbesondere bei aufgetrennter Feder-/Dämpferanordnung bei Hinterachse

Zum Aufbau der ersten Fahrzeugbaugruppen liegen dann Bauteile vor, mit denen die Komponenten-, System- und Gesamtfahrzeugeigenschaften sukzessive bestätigt werden können. Dafür kommen zunächst die Komponentenprüfstände (VDA Stoßdämpferprüfstand, Lager- und Dämpfer-Hydropulsprüfstand) sowie geometrische Komponentenvermessungen zum Einsatz. Auf diesen Ergebnissen aufbauend findet die Systemvalidierung mit Hilfe der ½- und 1-Achs-Prüfstände statt.

Eventuelle Abweichungen der realen Bauteile von den Auslegungsdaten werden in die Simulationsmodelle übernommen, um die Validierung vergleichbarer Stände zu ermöglichen. Sobald Gesamtfahrzeuge verfügbar sind, wird die Elastokinematik am K&C Prüfstand validiert und im Fahrversuch subjektiv bewertet. Damit sind alle Bewertungskriterien des Zielsystems Elastokinematik/Fahrdynamik ermittelt und zusätzliche Handlungsbedarfe können abgeleitet werden.

Für die Analyse unvorhergesehener Abweichungen bieten sich aufgrund ihrer Auslegung die ½- und 1-Achs-Prüfstände an. Sie ermöglichen die Validierung aller dynamischen Simulationsergebnisse unter Einbeziehung der Regelsysteme. Einflüsse der Karosseriesteifigkeiten auf die Achskinematik werden statisch am K&C Prüfstand ermittelt.

*

Tabelle 11 vergleicht die Situation „heute“ mit dem Szenario „Fortgeschrittene Simulation“. Während heute hauptsächlich eindimensionale statische Parametersätze zur Beschreibung der Komponenteneigenschaften Verwendung finden, werden in Zukunft mehrdimensionale, dynamisch gemessene Parameter eingesetzt. Beispiel Elastomerlager: die eindimensionale Steifigkeitsmessung in mehreren isolierten Krafrichtungen in Verbindung mit einer rechnerischen Überlagerung der Steifigkeiten wird ersetzt durch die direkte überlagerte Messung in allen relevanten Krafrichtungen.

	Stand der Technik heute	Stand der Technik bei „Fortgeschrittener Simulation“
Parametrierungsqualität	Großteil statisch, eindimensional Teilweise dynamisch, mehrdimensional Rechnerische Überlagerung	Dynamisch Mehrdimensional wo erforderlich keine Überlagerung erforderlich
Einfluss von Regelsystemen auf Elastokinematik	Nicht validiert	Komplett validiert
Validierungsqualität	Quasistatisch Mehrdimensional	Dynamisch Mehrdimensional
Aussagegenauigkeit Prüfstand / Simulation	Radlast / Radhub: 60 / 100 N Spur / Radhub: 0,1 / 0,1 ° Sturz / Radhub: 0,1 / 0,1 °	60 / 60 N 0,1 / 0,1 ° 0,1 / 0,1 °

Tabelle 11: Qualitäten virtueller Aussagen im Vergleich: heute vs. Szenario „Fortgeschrittene Simulation“

Eine dynamische Vermessung und Parametrierung der Elastomerlagermodelle ermöglicht dynamische Simulationsergebnisse, die an den 1-Achs-Prüfständen validiert werden können. Weiterhin ermöglichen die 1-Achs-Prüfstände die Überprüfung und Validierung der Regelsystemeinflüsse auf die Elastokinematik.

Durch die genannten Verbesserungen ergibt sich folgender Nutzen:

- Aussagegenauigkeit der Simulation auf dem Niveau der Prüfstands- bzw. Messtechnik.
- Reduktion von Defiziten in der Validierung
- Voraussage der Fahrzeugeigenschaften und Aufzeigen von Optimierungspotenzialen in der "Frühen Phase".
- Aufzeigen von Änderungsbedarfen bevor Serienwerkzeuge ausgelöst bzw. gefertigt werden
- Vermeiden von Änderungskosten

Auch das Beispiel „K&C Prüfstand“ zeigt einen erheblichen Mehraufwand bei Modellierung und Parametrierung der Simulationsmodelle – ebenso wie das Beispiel „LDS Prüfstand“. Auch in diesem Beispiel bleibt der Zusatzaufwand durch konsequente Anwendung von PDM Systemen beherrschbar. Die gegenüber der heutigen Situation deutliche Einsparung von Änderungskosten rechtfertigt den zusätzlichen Modellierungsaufwand.

5.4 Prüffeldkonzept bei „Fortgeschrittener Simulation“

Bild 37 zeigt eine Zusammenstellung der im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ erforderlichen Prüfstände. Das in Kapitel 3.1.1 beschriebene repräsentative Prüffeld nach heutigem Stand der Technik wird um die in Kapitel 5.1.6 zusammengefassten Neuanschaffungen erweitert.

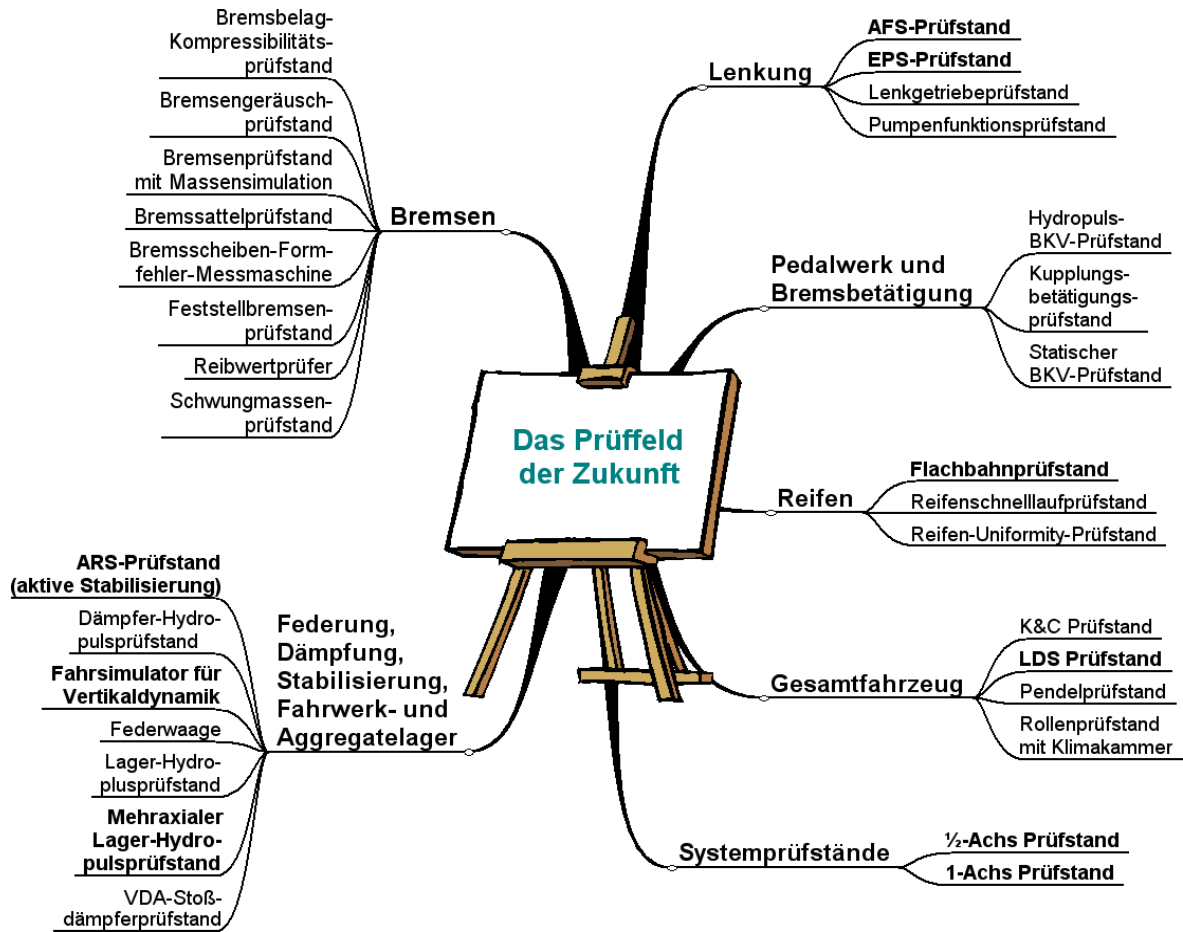


Bild 37: Prüffeldkonzept für das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“

5.4.1 Flächenbedarfe der Prüfstände

Tabelle 12 enthält die Flächenbedarfe aller Prüfstände. Es sind sowohl Grundfläche A_G (berechnet aus Breite b_G und Tiefe t_G) als auch die benötigten Verkehrsflächen (b_V und t_V) aufgestellt, aus denen sich die effektiven Flächenbedarfe A_{eff} der Prüfstände ergeben (vgl. Bild 38):

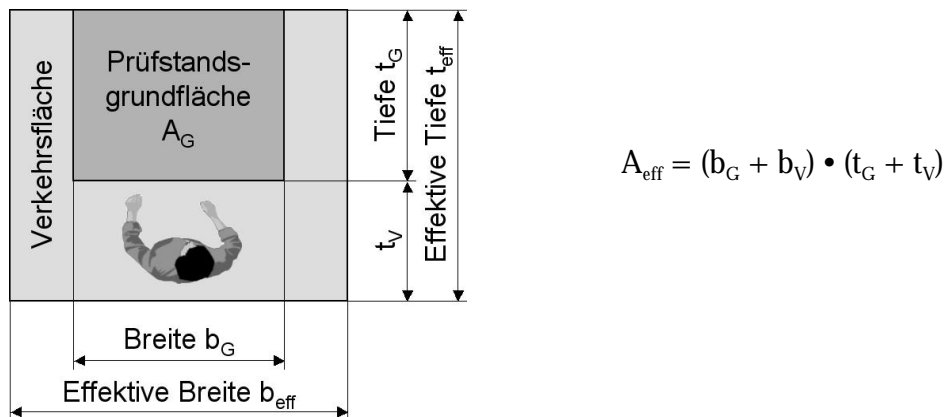


Bild 38: Bemaßung der Prüfstände in Breite und Tiefe

Zusätzlich berücksichtigt Tabelle 12 die Anzahl n der jeweiligen Prüfstände, aus der sich der Gesamtflächenbedarf A_n berechnet. Das Prüffeld bei „Fortgeschrittener Simulation“ besteht demnach aus 40 Prüfständen und bedarf einer Nutzfläche von knapp 1100 m².

	Prüfstand	n	b _G m	t _G m	A _G m ²	b _V m	t _V m	b _{eff} m	t _{eff} m	A _{eff} m ²	A _n m ²
Bremsen	Bremsbelag-Kompressibilitätsprüfstand	1	2	1	2	1	1	3	2	6	6
	Bremsengeräuschprüfstand	1	3	3	9	3	3	6	6	36	36
	Bremsenprüfstand mit Massensimulation	1	5	3	15	1	1	6	4	24	24
	Bremssattelprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
	Bremsscheiben-Formfehler-Messmaschine	1	1	1	1	1	1	2	2	4	4
	Feststellbremsenprüfstand	1	3	2	6	1	1	4	3	12	12
	Reibwertprüfer	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
	Schwungmassenprüfstand	1	4	2	8	2	2	6	4	24	24
Federung, Dämpfung, Stabilisierung, Fahrwerk- und Aggregatelagerung	ARS-Prüfstand (aktive Stabilisierung)	2	3	2	6	1	1	4	3	12	24
	Dämpfer-Hydropulsprüfstand	1	2	1	2	1	1	3	2	6	6
	Fahrsimulator f. Vertikaldynamik	1	4	4	16	2	2	6	6	36	36
	Federwaage	1	1	1	1	1	2	2	3	6	6
	Lager Hydropulsprüfstand	1	2	1	2	1	1	3	2	6	6
	Mehraxialer Lager Hydropulsprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
	VDA-Stoßdämpferprüfstand	1	2	1	2	1	1	3	2	6	6
Lenkung	AFS-Prüfstand	1	2	3	6	3	2	5	5	25	25
	EPS-Prüfstand	1	2	3	6	3	2	5	5	25	25
	Lenkgetriebeprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
	Pumpenfunktionsprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
Pedalwerk und Bremsbetätigung	Hydropuls BKV Prüfstand	1	3	2	6	2	1	5	3	15	15
	Kupplungsbetätigungsprüfstand	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
	Statischer BKV Prüfstand	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
Reifen	Flachbahnprüfstand	1	3	4	12	2	3	5	7	35	35
	Reifenschnelllaufprüfstand	1	2	3	6	2	3	4	6	24	24
	Reifen-Uniformity-Prüfstand	1	2	3	6	2	3	4	6	24	24
Gesamtfahrzeug	K&C Prüfstand	1	3	6	18	4	4	7	10	70	70
	LDS Prüfstand	1	6	3	18	4	4	10	7	70	70
	Pendelprüfstand	1	5	9	45	4	4	9	13	117	117
	Rollenprüfstand mit Klimakammer	1	10	7	70	0	0	10	7	70	70
Systeme	½-Achs Prüfstand	2	2	2	4	3	3	5	5	25	50
	1-Achs Prüfstand	6	2	3	6	3	3	5	6	30	180
Werkstatt	Achsmesstände	2	3	6	18	3	3	6	9	54	108
Summe		40			313					822	1063

Tabelle 12: Flächenbedarfe der Prüfstände im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“

5.4.2 Weitere zu berücksichtigende Flächenbedarfe und Einflussfaktoren

Neben Prüfständen sind bei der Gestaltung des Prüffelds im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ weitere Flächenbedarfe zu berücksichtigen:

- Erweiterungsflächen für „Innovationsprüfstände“
- Messwarten und Büroräume
- Lager für Halbzeuge, Vorrichtungen, Kleinteile (Schrauben, Muttern etc.), Versuchsteile und Werkzeuge
- Wareneingang mit Anliefer- und Kommissionierungsflächen
- Messlabor für geometrische Vermessungen und Messtechnikapplikation
- Werkstatt für Prüflingsanpassungen und Herstellung bzw. Modifikation von Prüfstandsadaptionen
- Fahrzeugarbeitsplätze zur Auf- und Umrüstung von Fahrzeugen
- Verkehrs- und Andienungswege für den Transport von Versuchteilen, Vorrichtungen und Fahrzeugen
- Schleusen als Schnittstellen des Prüffelds zu den Außenbereichen
- Technikflächen für Medienaufbereitung und -versorgung
- Sozialräume (Umkleiden, Toiletten, Pausenräume, ...)

Die oben genannten Punkte fließen als grob abgeschätzte Flächenbedarfe in die räumliche Aufstellung des Prüffelds ein. Weiterhin sind bei der Planung eines konkreten Bauvorhabens gesetzliche Bestimmungen wie Baurecht und Arbeitsstättenrichtlinie zu beachten. Insbesondere ist darauf zu achten, dass alle Arbeitsplätze Sichtkontakt zu den Außenbereichen haben.

Über diese Themen hinausgehende Flächenbedarfe und Einflussfaktoren, insbesondere die Unterteilung in Brandabschnitte, Feuerwehrumfahrten, Parkplätze, Kantinegebäude, Grundstücksmaße und -eigenheiten werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit vernachlässigt, es wird vielmehr der Ansatz einer „grünen Wiese“ verfolgt..

5.5 Räumliche und organisatorische Aufstellung

Die organisatorische Aufstellung des Prüffelds orientiert sich an der bewährten Einteilung nach dem Versuchsobjekt, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Im Zuge der Prüffeldplanung „auf der grünen Wiese“ sollte allerdings die Möglichkeit, verstärkt Teamarbeit einzuführen, genutzt werden. Insbesondere ist es erfolgversprechend, Messwarten inhaltlich oder thematisch verwandter Prüfstände zusammen zu legen, um Jobrotation und Vertreterregelungen zu erleichtern.

5.5.1 Strukturelle Gestaltung

Zur räumlichen Gestaltung des Prüffelds und des umgebenden Entwicklungszentrums können verschiedene, in Bild 39 dargestellte Strukturen dienen.

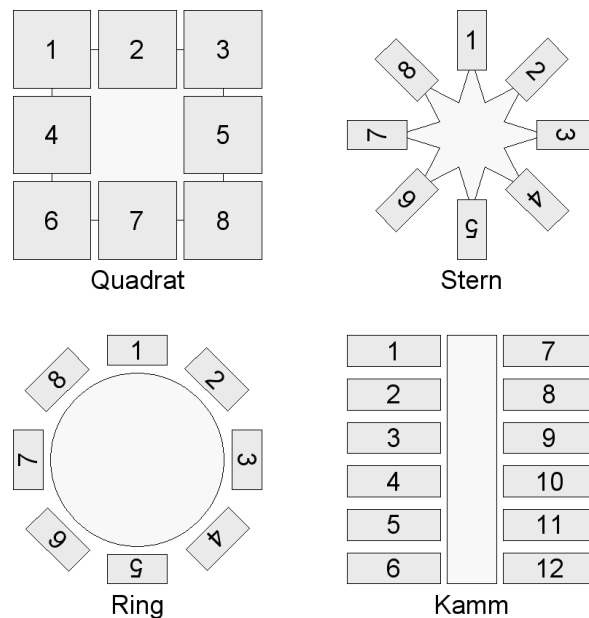


Bild 39: Strukturen der räumlichen Gestaltung

Für das Entwicklungszentrum ist eine Sternstruktur vorteilhaft, aus folgenden Gründen:

- Die Sternstruktur verbindet alle Strukturelemente mit relativ kurzen Wegen.
- Sie bietet ausreichend Potenziale für zukünftige Erweiterungen.
- Die Mehrzahl der Warenströme fließt über die Werkstatt, die daher im Zentrum zu positionieren ist.

Die günstigste Struktur für das eigentliche Prüffeld als Teil der übergeordneten Sternstruktur ist eine einseitige Kammstruktur. Dafür sprechen mehrere Gründe:

- Die Kammstruktur bietet als einzige die Möglichkeit, Messwarten und Bereitstellungswege mehrfach zu nutzen.
- Die Anbindung durch einen zentralen Versorgungsweg garantiert einen hohen Teileumschlag
- Zukünftige Erweiterungen lassen sich durch Anbauten einfach gestalten, ohne bestehende Strukturen zu stören.
- Alle Messwarten haben direkten Sichtkontakt zu den Außenbereichen.

5.5.2 Groblayout des Entwicklungszentrums

Die Hauptelemente des Entwicklungszentrums und ihre Verbindungen sind in Bild 40 skizziert.

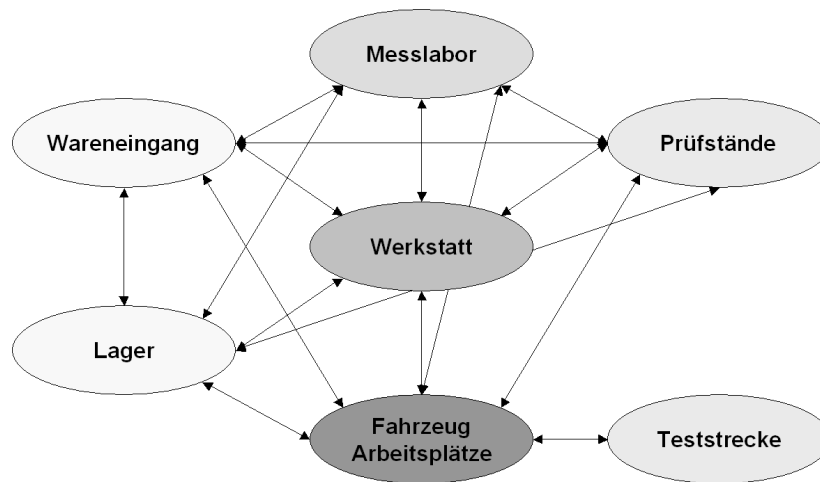


Bild 40: Elemente und Verbindungen des Entwicklungszentrums

Daraus leitet sich das in Bild 41 dargestellte Groblayout für das Erdgeschoss, in dem alle Warenströme fließen, ab.

Der Wareneingang inklusive Disposition ist zusammen mit dem Lager für Halbzeuge, Werkzeuge, Versuchs- und Vorrichtungsteile in einem eigenen Gebäude untergebracht. Über zwei Schleusen gelangen alle Transportgüter in das Entwicklungsgebäude, in dem Messlabor, Werkstätten, Fahrzeugarbeitsplätze und Prüffeld untergebracht sind. Die Werkstätten beinhalten neben den Fertigungseinrichtungen auch Meisterbüros und die werkstattnahe Verwaltung. Der Transport von Versuchsteilen, Vorrichtungen und Fahrzeugen geschieht über Transportwege und Bereitstellungsflächen. Versuchsfahrzeuge verlassen das Entwicklungsgebäude über zusätzliche Schleusen.

Technikflächen für Medienaufbereitung und -versorgung sind im Dachbereich des einstöckigen Prüffelds untergebracht – Sozialräume wie Umkleiden und Toiletten im Untergeschoss des gesamten Gebäudes.

Im Obergeschoss des Entwicklungsgebäudes, im Bereich von Messlabor, Werkstätten und Fahrzeugarbeitsplätzen, befinden sich Büroräume für die technische Entwicklung, die kaufmännische und technische Verwaltung und Pausenräume für die gesamte Belegschaft.

Durch die vorgeschlagene Anordnung sind alle Warenströme auf das Erdgeschoss begrenzt. Ebenensprünge finden nicht statt. Werkstatt und Ingenieure sind nur ein Stockwerk voneinander getrennt; die Kommunikationswege somit äußerst kurz.

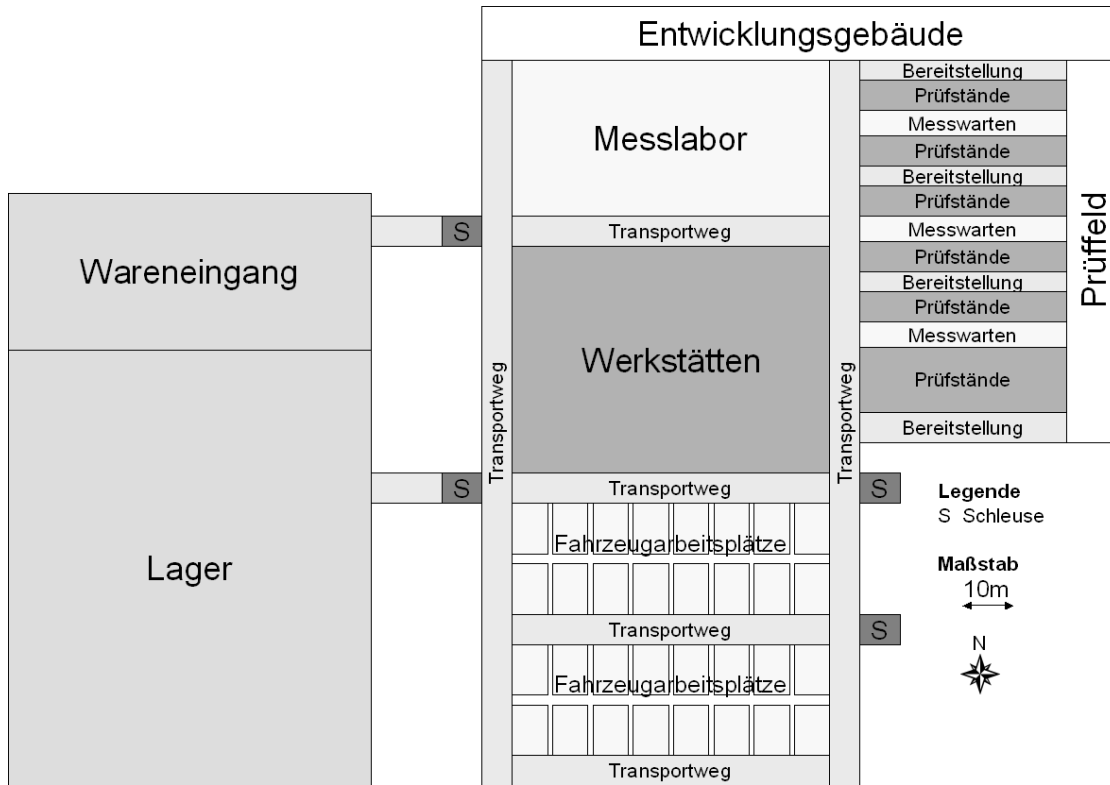


Bild 41: Groblayout des Entwicklungszentrums (Erdgeschoss)

Das Konzept ist so ausgelegt, dass spätere Erweiterungen möglich sind. Das Messlabor ist nach Norden und Westen erweiterbar, die Fahrzeugarbeitsplätze nach Ost und Süd, Wareneingang und Lager nach Ost. Das Prüffeld kann nach Norden, Osten und Süden ausgedehnt werden. Vergrößerungen der Werkstattflächen gehen zu Lasten des Messlabors oder führen zur Umwidmung von Fahrzeugarbeitsplätzen.

5.5.3 Feinlayout des Prüffelds

Das Prüffeld ist so aufgebaut, dass über eine Messwarte jeweils mehrere Prüfstände bedient werden können. Des weiteren sind die Prüfstände so angeordnet, dass in den betreffenden Messwarten stets vergleichbare Tätigkeiten durchgeführt werden können, um Jobrotation und Arbeitsteilung zu fördern.

Die Zuführung von Prüflingen und Vorrichtungen erfolgt über eigene Bereitstellungsflächen, die an mehrere Prüfstände angrenzen und so gemeinsam genutzt werden. Die Prü fzellen sind, falls erforderlich, durch Schall- bzw. Schwingungs isolation voneinander und von den Messwarten getrennt, sodass es nicht zu Beeinträchtigungen kommen kann. Prü fzellen, Bereitstellungswege und Messwarten haben jeweils gleiche Größe, um die Erweiterung in Modulbauweise zu unterstützen. Lediglich die Gesamtfahrzeugprüfstände erfordern größere Tiefe und Bereitstellungsflächen.

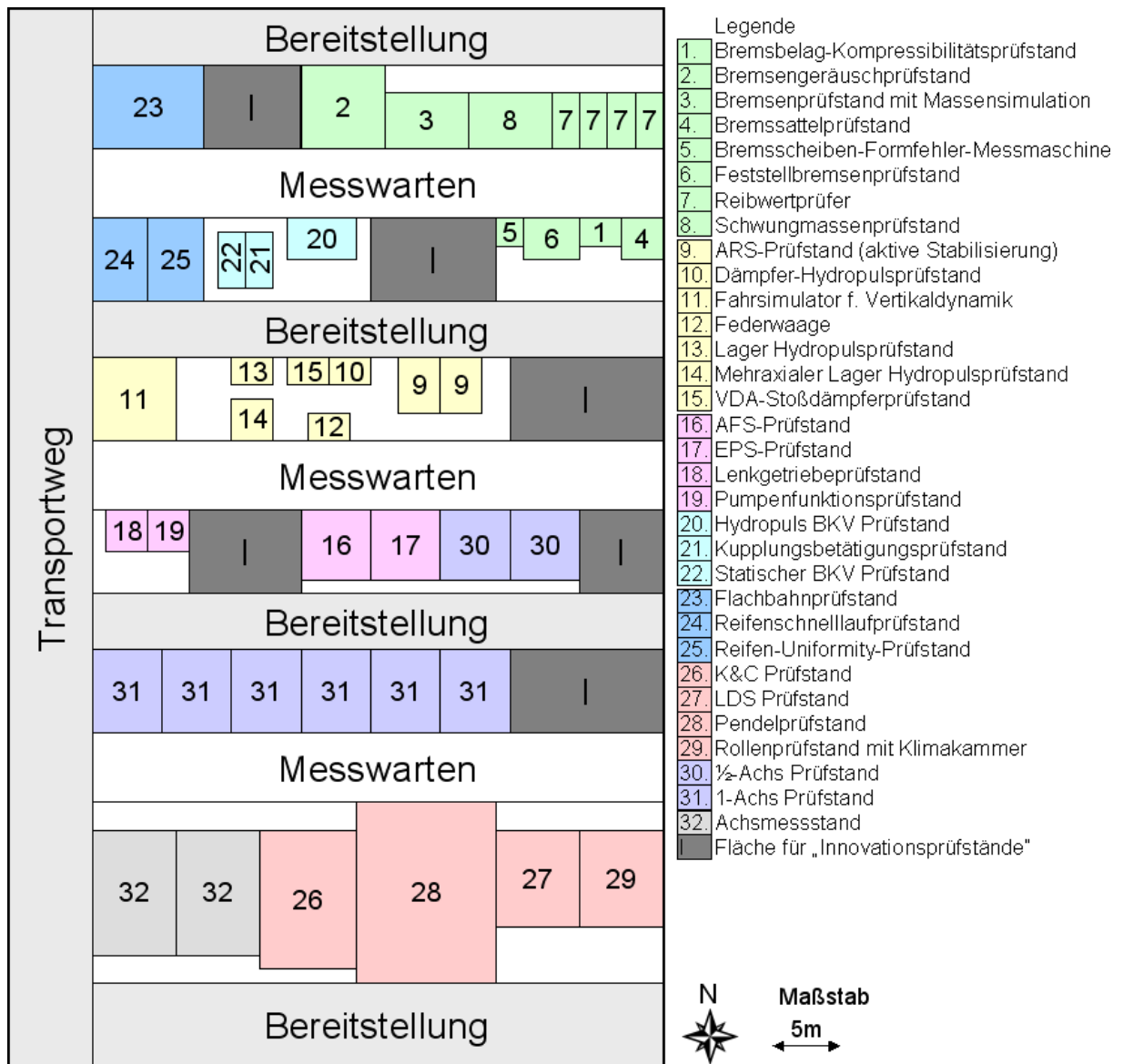


Bild 42: Feinlayout des Prüffelds im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“

Für zukünftige Innovationen sind Flächen vorgehalten. Zusätzliche Erweiterungen sind durch Modulbauweise leicht nach Osten möglich, wenn Platz für einzelne Prüfstände geschaffen werden muss. In diesem Fall werden die betreffenden Bereitstellungsflächen und Messwarten verlängert. Größere Erweiterungen nach Norden oder Süden sind durch den Anbau neuer Messwarten und Prüfzellen möglich.

6 Vision: „Vollständige Simulation“

Die Vergangenheit hat wiederholt gezeigt, dass unerreichbar scheinende Meilensteine der Technik, wie zum Beispiel das Elektronenmikroskop oder die Mondlandung, durch den technischen Fortschritt plötzlich realisiert werden konnten. In den letzten Jahren hat gerade die Computertechnik herausragende Leistungen wie Virtual Reality, Spracheingabe und kabellose High-Speed-Kommunikation erzielt und dadurch auch andere Bereiche einschneidend verändert. Erwähnt seien: computerunterstützte Operationen in der High-Tech-Medizin, der Einzug der Internet-technologie in Banken, Handel und Logistik sowie der Erfolg elektronischer Regel- und Assistenzsysteme im Automobilbau.

Dieser Trend hat auch den Prozess der Produktentwicklung in der Fahrwerkstechnik verändert. Es ist davon auszugehen, dass der Einfluss der virtuellen Produktentwicklung – auch aus strategischen Gründen – weiter zunehmen muss – und wird.

Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen, wird in diesem Kapitel die Vision der „Vollständigen Simulation“ aufgestellt und ihre Auswirkungen auf Produktentwicklungsprozess und Prüffeld abgeleitet. Die Vision „Vollständige Simulation“ postuliert über folgende Aussagen die Gleichwertigkeit von Versuch und Simulation:

1. Alle Bewertungskriterien der Fahrwerksentwicklung sind der Simulation zugänglich und ihre Modelle validiert.
2. Trennschärfe und Aussagesicherheit der Simulationsergebnisse sind identisch mit Trennschärfe und Aussagesicherheit von Versuchsergebnissen.

Um die Umsetzung der Vision „Vollständige Simulation“ zu erreichen, sind folgende Ziele zu verfolgen:

- Steigerung des Detaillierungsgrades der Simulationsmodelle
- Objektivierung der Fahrdynamikbewertung

Beide Zielsetzungen sind nur über einen iterativen Prozess aus Modellerstellung, Test, Validierung und Modellanpassung zu erreichen und erfordern die intensive Zusammenarbeit von Fahrzeugherstellern, Zulieferern und Softwareentwicklern.

6.1 Entwicklungsprozess bei „Vollständiger Simulation“

Unter den genannten Voraussetzungen läuft nahezu der gesamte Entwicklungsprozess auf virtueller Basis ab, wie in Bild 43 dargestellt: Auslegung, Konstruktion und Abstimmung bis zur virtuellen Produktvorfreigabe liegen in der Verantwortung der Simulation. Nur die anschließende Bestätigung durch die Produktfreigabe findet auf Basis von Prototypenversuchen statt.

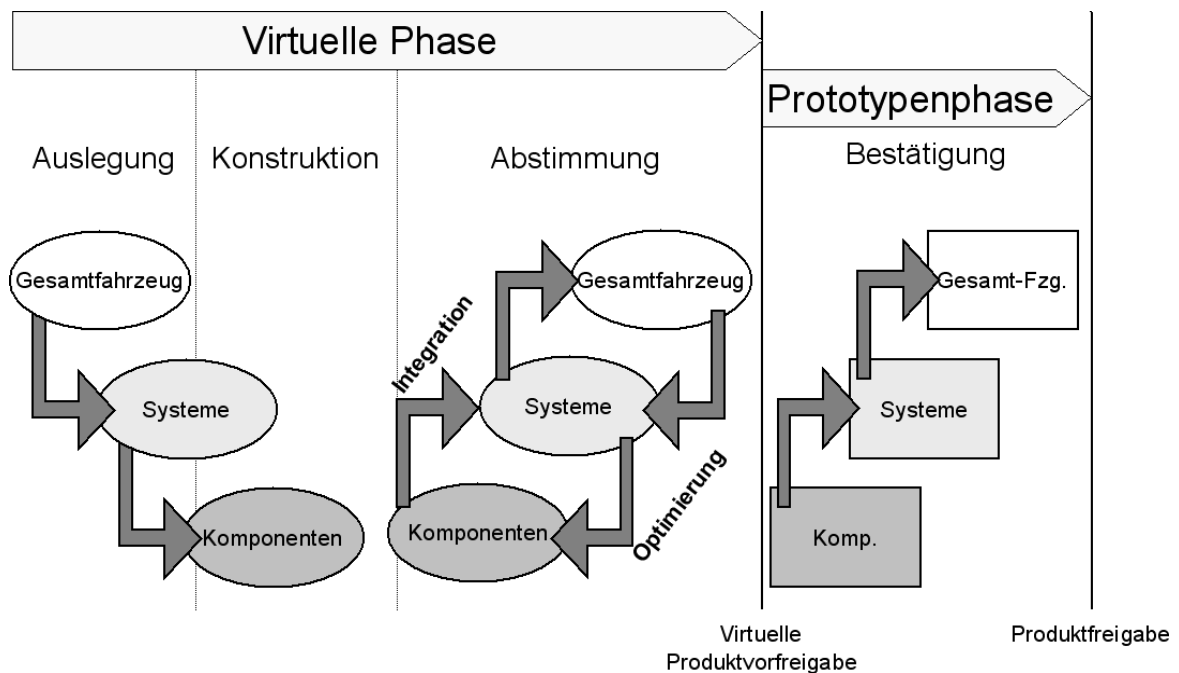


Bild 43: Prozessmodell bei „Vollständiger Simulation“: Aufteilung in virtuelle und Prototypenphase

6.1.1 Virtuelle Produktentwicklung bis zur Produktvorfreigabe

Aufgabe der Simulation ist die funktionale, geometrische und produktionstechnische Integration mit allen zugehörigen Abstimmungen und Optimierungen. Unterstützung durch Hardwareversuche ist in der Entwicklungsphase nicht notwendig. Dadurch sinken Entwicklungszeiten und -kosten drastisch.

Es ist davon auszugehen, dass Initial- (Erarbeitung einer Fahrzeug-Zielvision) sowie Konzeptphase (Ausarbeitung des Fahrzeugkonzepts mit grob abgestimmtem Zielsystem) im Vergleich zu heute (siehe Kap. 3.4) nicht mehr nennenswert verkürzt werden können. Diese Phasen liegen im Entwicklungsprozess zeitlich vor der Vorbereitungsphase (in Bild 43 „Auslegung“) und erscheinen daher nicht im Bild. Ab der Vorbereitungsphase sind Zeitgewinne durch virtuelle Optimierung und Vorausberechnung der Zielerreichung auf Gesamtfahrzeugebene zu erwarten:

Vorbereitungsphase

Die Detaillierung der Zielkaskade inklusive Konzeptkonstruktion (Bild 43: „Auslegung“, teilweise „Konstruktion“) wird auch bei „Vollständiger Simulation“ nicht zu verkürzen sein. Anpassung und Parametrierung der Simulationsmodelle werden die Prozessphase im Vergleich zu heute wegen des gestiegenen Aufwands zur Datenbeschaffung sogar eher ausdehnen. Deutliche Einsparungen sind durch automatisierte Variationsrechnungen sowie die rechnerische Prognose von Gesamtfahrzeugeigenschaften zu erwarten. Dadurch sind Varianten bzw. Änderungen leichter und schneller zu bewerten. Weitere Zeitersparnis bei Abstimmung und Entscheidungsfindung während der Konstruktion ergibt sich aus der höheren Tiefe der Simulation, da weniger Unsicherheiten zu diskutieren und abzuwägen sind. Insgesamt kann in der Vorbereitungsphase mit einer Einsparung von ca. zwei Monaten gerechnet werden.

Abstimmphase

Weitere Zeitersparnisse ergeben sich in der Abstimmphase. Auch hier können Änderungen und Varianten deutlich schneller bewertet werden als heute möglich. Durch die höhere Entscheidungssicherheit in der Vorbereitungsphase ist außerdem von weniger Änderungs- und Abstimmungsbedarf auszugehen. Eine Verkürzung der Abstimmphase um vier Monate erscheint erreichbar.

Bestätigungsphase

Aufgrund der hohen Konzeptreife am Ende der Abstimmphase kann die Bestätigungsphase auf eine Entwicklungsbaugruppe reduziert werden. Damit fallen Prototypenfertigung sowie Versuchsdurchführung und –auswertung nur einmal an. Hinzu kommt die Zeitersparnis durch virtuelle Vorbereitung der Bestätigungsversuche. Im Vergleich zu heute ist eine Reduktion der Bestätigungsphase auf ca. acht Monate realistisch.

Reifephase

Für die Fertigungs- und Montagesimulation sind ähnliche Leistungssteigerungen und Prozessverkürzungen zu erwarten wie in der Produktentwicklung. Das führt bei der Entwicklung der Herstellungsprozesse (in Bild 43: „Bestätigung“ der Herstellbarkeit) zu vergleichbaren Prozessverkürzungen und zu weniger Optimierungsbedarf während der Anlaufproduktion in der Reifephase. Steilere Anlaufkurven sind die Folge und versprechen eine Verkürzung der Reifephase um zwei Monate.

Insgesamt ergibt sich eine geschätzte Einsparung von etwa 15 Monaten, wie Tabelle 13 zeigt:

Entwicklungsphase	Entwicklungsinhalt	Dauer (Monate)		
		heute	bei „Vollständiger Simulation“	Differenz
Initialphase	Zielvision	6	6	0
Konzeptphase	Konzeptdetaillierung	16	16	0
Vorbereitungsphase	Auslegung, Konstruktion	8	6	2
Abstimmphase	Abstimmung	7	3	4
Bestätigungsphase	Bestätigung	15	8	7
Reifephase	Bestätigung	8	6	2
Summe		60	45	15

Tabelle 13: Dauern der Entwicklungsphasen heute und bei vollständiger Simulation im Vergleich

Die postulierte Trennschärfe und Aussagesicherheit der Simulationsergebnisse garantiert die Belastbarkeit der virtuellen Produktvorfregabe sowie die Sicherheit, mit dem durch Simulation entwickelten Stand Werkzeuge auszulösen und ohne kostenintensive Änderungen in Serie gehen zu können.

Um die postulierte Leistungsfähigkeit der Simulation zu erreichen, müssen sämtliche Fahrzeugkomponenten in ihren Eigenschaften modelliert und validiert sein. Die Modelle müssen Gültigkeit für alle relevanten Fahrsituationen und Umgebungsbedingungen besitzen und in Gesamtfahrzeugmodelle integriert sein. Wesentlicher Bestandteil dieser Integration ist die Interaktion aller aktiven Fahrwerkssysteme über parametrisierte Regelsystemabstimmungen. Weiterhin müssen Informationen über mögliche Bauteilswankungen (Fertigungstoleranzen, Alterung, etc.) vorliegen. Durch die vollständig objektivierte Fahrdynamik (Fahrverhalten und Fahrkomfort) werden Entwicklungsstände mit „virtuellen Probefahrten“ (Gesamtfahrzeugsimulationen mit standardisierten Kriterien) bewertet.

6.1.2 Produktfreigabe durch Hardwareversuche

Erst nach erfolgreichem Abschluss der virtuellen Produktvorfregabe beginnt die Fertigung realer Bauteile und die letztendliche Produktfreigabe auf Basis von Bestätigungsversuchen.

Zur Beurteilung der Anlieferqualität aller Bauteile sind Messungen und Prüfstandsversuche unverzichtbar. Die Simulation ist zwar in der Lage, Toleranzschwankungen zu berücksichtigen, allerdings ist eine Aussage über den Zustand konkreter Bauteile nur durch Messung möglich. Um etwaige Mängel zielgerichtet identifizieren zu können ist für die Beurteilung eine Prüfung auf Komponentenebene zweckmäßig.

Wie in Bild 44 illustriert, bietet die Ermittlung von System- oder Fahrzeugeigenschaften auf Prüfständen gegenüber den virtuell ermittelten Eigenschaften keinen Erkenntnisgewinn. Unter der Voraussetzung der postulierten Qualität von Simulationsergebnissen sind virtuelle und

physische Integration gleichwertig und liefern daher dieselben aus den Komponenteneigenschaften abgeleiteten Ergebnisse – auf Systemebene sowie auf Gesamtfahrzeugebene. Um Versuchskosten sowie Aufwand einzusparen sind diese Prüfungen zu vermeiden. System- und Gesamtfahrzeugprüfstände sind nicht mehr erforderlich.

Zur Erteilung der Produktfreigabe sollte das Fahrverhalten als letzte Absicherung durch Testfahrten bestätigt werden. Fahrversuche sind der verlässlichste Weg zur Bestätigung aller Ziele, deren Erreichung durch die Produktvorfreigabe in Aussicht gestellt wurde.

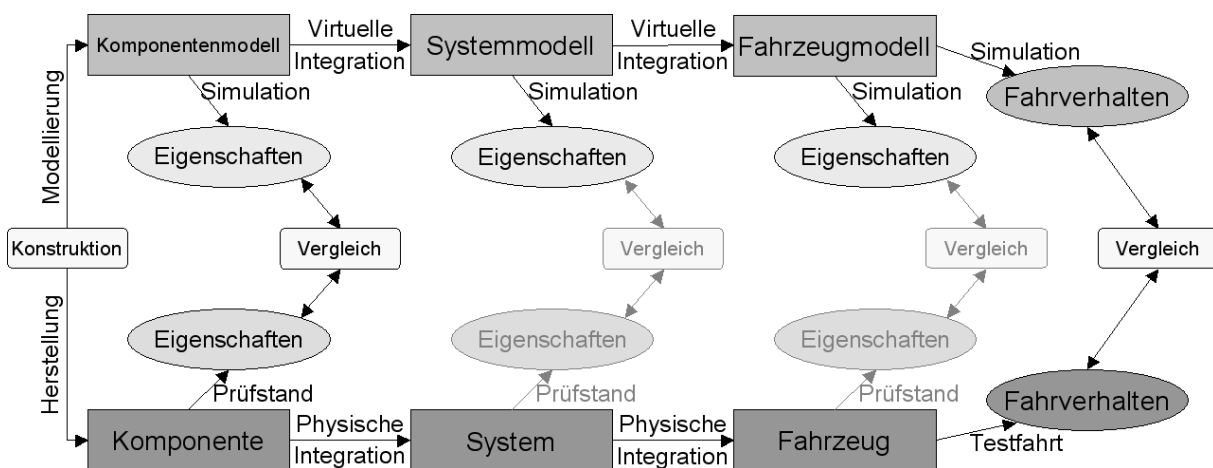


Bild 44: Prozessmodell bei „Vollständiger Simulation“: Gleichwertigkeit virtueller und physischer Integration

6.2 Prüffeldkonzept

Die Einsparungen auf Seiten der System- und Gesamtfahrzeugprüfstände ergeben für das Prüffeld bei „Vollständiger Simulation“ einige Veränderungen gegenüber dem in Kapitel 5.4 dargestellten Prüffeld bei „Fortgeschrittener Simulation“. Die Veränderungen sind:

- System- und Gesamtfahrzeugprüfstände werden abgerüstet. Davon sind betroffen: Bremsengeräuschprüfstand, Bremsenprüfstand mit Massensimulation, Feststellbremsenprüfstand, ARS-Prüfstand, K&C Prüfstand, AFS- und EPS Prüfstand, ½- und 1-Achs-Prüfstände, Pendelprüfstand, LDS Prüfstand sowie der Rollenprüfstand mit Klimakammer.
- Der Fahr Simulator für Vertikaldynamik wird eingespart, da kundenoptimale Zielgrößen bei vollständiger Simulation rein virtuell entwickelt und abgesichert werden.

Zur Absicherung von Regelsystemkomponenten müssen ein hydraulischer Ventilblockprüfstand, ein Steuergeräteprüfstand sowie verschiedene Aktuatorprüfstände neu errichtet werden. Sie dienen zur Funktionsbestätigung der Einzelkomponenten.

Durch den hohen Beitrag der Simulation ist das Auftragsvolumen für Prüfungen so reduziert, dass keine externen Kapazitäten angefragt werden müssen. Alle Prüfungen werden im Hause durchgeführt.

Das Prüffeldkonzept ist in Bild 45 zusammengefasst, wobei abgerüstete Prüfstände rot markiert und Neuerrichtungen fett gedruckt sind.

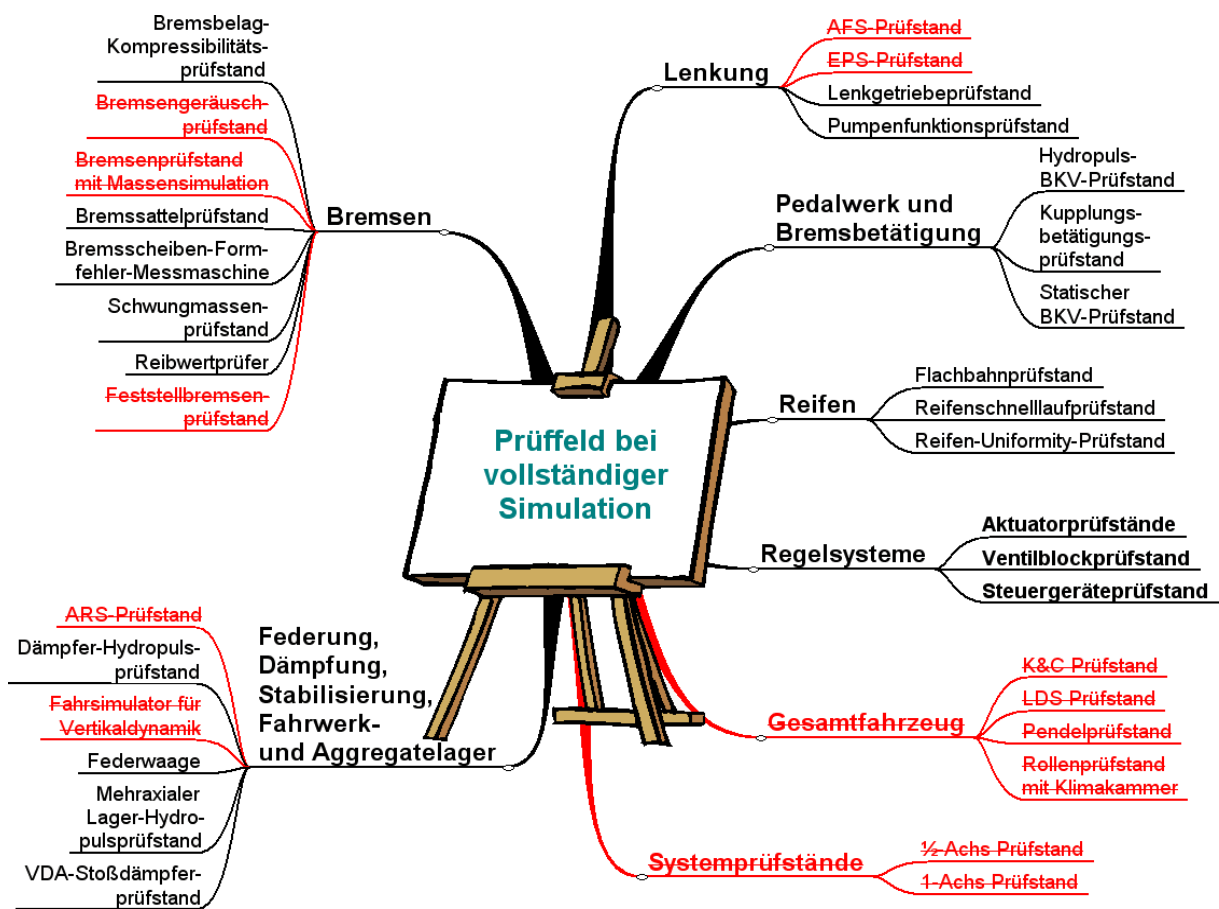


Bild 45: Konzept für das Prüffeld bei vollständiger Simulation

Für die Aufstellung der Prüfstände ergeben sich die in Tabelle 14 aufgelisteten Flächenbedarfe.

	Prüfstand	n	b _G m	t _G m	A _G m ²	b _V m	t _V m	b _{eff} m	t _{eff} m	A _{eff} m ²	A _n m ²
Bremsen	Bremsbelag-Kompressibilitätsprüfstand	1	2	1	2	1	1	3	2	6	6
	Bremssattelprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
	Bremsscheiben-Formfehler-Messmaschine	1	1	1	1	1	1	2	2	4	4
	Reibwertprüfer	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
	Schwungmassenprüfstand	1	4	2	8	2	2	6	4	24	24
Federung, Dämpfung, Stabilis., Fahrwerk- und Aggregatelagerung	Dämpfer Hydropulsprüfstand	1	2	1	2	1	1	3	2	6	6
	Federwaage	1	1	1	1	1	2	2	3	6	6
	Mehraxialer Lager Hydropulsprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
	VDA-Stoßdämpferprüfstand	1	2	1	2	1	1	3	2	6	6
Lenkung	Lenkgetriebeprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
	Pumpenfunktionsprüfstand	1	2	2	4	1	1	3	3	9	9
Pedalwerk und Bremsbetätigung	Statischer BKV Prüfstand	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
	Kupplungsbetätigungsprüfstand	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
	Hydropuls BKV Prüfstand	1	3	2	6	2	1	5	3	15	15
Regelsysteme	Ventilblockprüfstand	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
	Steuergerätprüfstand	1	1	2	2	1	2	2	4	8	8
	Aktuatorprüfstände	3	2	2	4	1	1	3	3	9	27
Reifen	Flachbahnprüfstand	1	3	4	12	2	3	5	7	35	35
	Reifenschnellaufprüfstand	1	2	3	6	2	3	4	6	24	24
	Reifen-Uniformity-Prüfstand	1	2	3	6	2	3	4	6	24	24
Werkstatt	Achsmessstände	2	3	6	18	3	3	6	9	54	108
Summe		24			94					289	361

Tabelle 14: Flächenbedarfe der Prüfstände bei vollständiger Simulation

Das Prüffeld bei „Vollständiger Simulation“ besteht demnach aus 24 Prüfständen und erfordert eine Nutzfläche von ca. 360 m². Im Vergleich zum in Kapitel 5.4 aufgestellten Prüffeld bei „Fortgeschrittener Simulation“ entspricht das einer Flächenreduktion von nahezu 65 %. Die übrigen Flächenbedarfe bleiben unverändert.

Die zu erwartenden Einsparungen an Prototypen- und Versuchskosten lassen sich aus der Flächenreduktion sowie aus dem Entfall der Entwicklungsbaugruppen grob abschätzen.

Kap. 4.2.5 hat gezeigt, dass sich durch den Fortschritt der Simulation innerhalb von acht Jahren Kosteneinsparungen von gut 40% erreichen lassen. In dieser Zeit wurde die Zahl der Hardwareversuche um knapp 40% gesenkt.

Im Fall der „Vollständigen Simulation“ werden die Versuchszahlen stärker gesenkt. Der Verzicht auf die kostenintensiven System- und Gesamtfahrzeugprüfstände verringert den Versuchsaufwand um geschätzte 50%.

Die Einsparungen durch den Verzicht auf eine komplette Entwicklungsbaugruppe lassen sich auf Basis der heute üblichen Versuchsteilbedarfe mit etwa 40% abschätzen: Die Aufwände für Versuchsteile der ersten Entwicklungsbaugruppe stehen in etwa im Verhältnis 1:4 mit denen der

zweiten. Geht man von einem kompletten Entfall der ersten Baugruppe und einer geringfügigen Reduktion der zweiten aus, so ergeben sich zirka die genannten 40%.

Daraus resultiert insgesamt eine Reduktion der prüfstandsbezogenen Versuchs- und Prototypenkosten von grob 70%.

6.3 Räumliche und organisatorische Aufstellung

Die strukturelle und organisatorische Aufstellung des Prüffelds bei „Vollständiger Simulation“ wird vom Prüffeld bei „Fortgeschrittener Simulation“ (Kapitel 5.4.2) unverändert übernommen, genauso das Groblayout; die Veränderungen am Feinlayout sind in Bild 46 dargestellt:

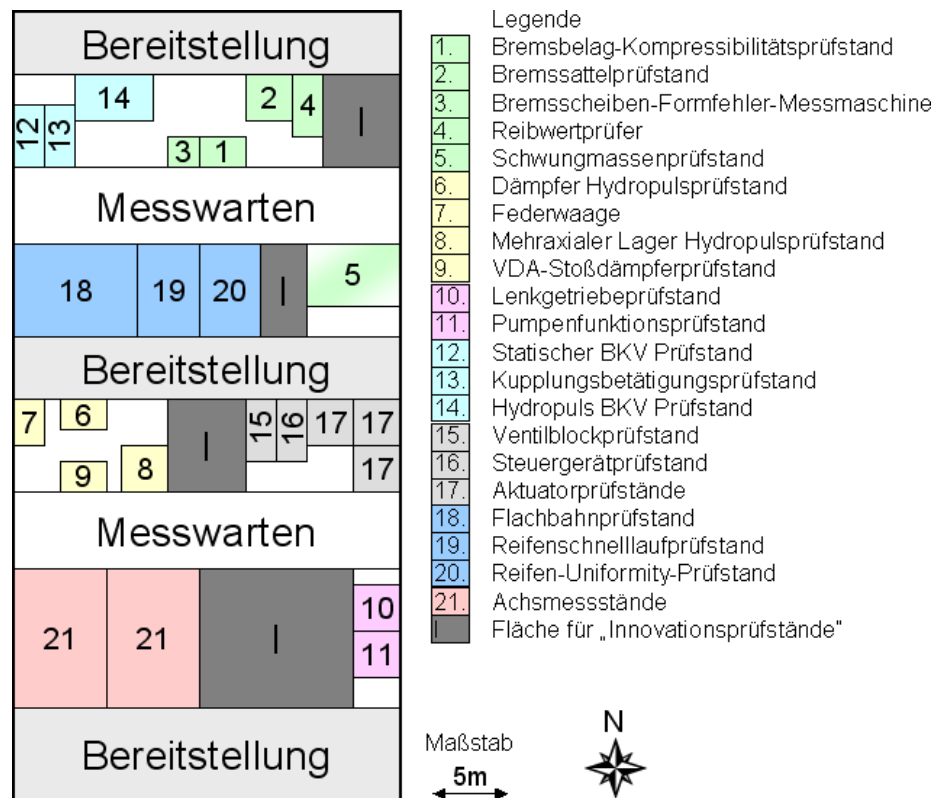


Bild 46: Feinlayout des Prüffelds bei „Vollständiger Simulation“

7 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse, Empfehlung

7.1 Vergleich der Entwicklungsprozesse

Im Produktentwicklungsprozess des Szenarios „Fortgeschrittene Simulation“ laufen virtuelle und physische Integrationsphase weitgehend parallel, um, wie Bild 47 im oberen Teil zeigt, den erforderlichen ständigen Abgleich von Simulationsergebnissen mit Prototypenversuchen darstellen zu können. Daher müssen Prozesszeiten für Beschaffungs- und Herstellungsvorgänge akzeptiert und einkalkuliert werden. Eine entscheidende Verkürzung des Produktentwicklungsprozesses wird dadurch verhindert.

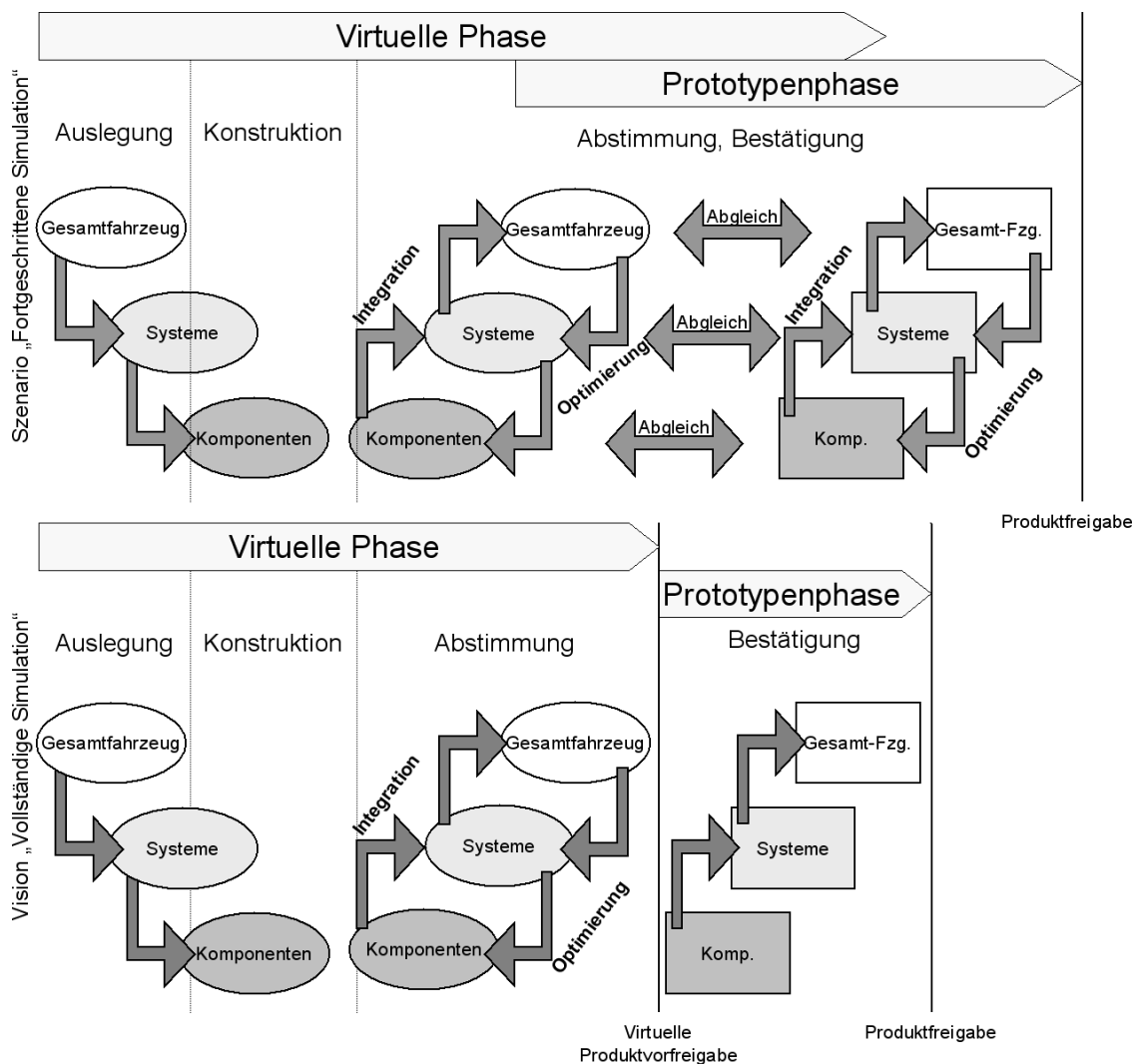


Bild 47: Vergleich der Prozessmodelle: Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ und Vision „Vollständige Simulation“

Bei der Vision „Vollständige Simulation“ entfällt der Zwang des ständigen Abgleichs von Versuch und Simulation wegen des Postulats validierter Simulationsmethoden. Die in Bild 47 unten dargestellte Trennung von virtueller und physischer Integrationsphase durch eine Produktvorfreigabe garantiert, dass alle verzögernden Prozesszeiten nur einmal durchlaufen werden müssen. Eine Verkürzung des Entwicklungsprozesses um 15 Monate ist die Folge. Die geschickte Parallelisierung des Übergangs von virtueller und physischer Phase, zum Beispiel die Auslösung von Werkzeugbestellungen vor dem Abschluss der letzten Produktdetaillierungen, verkürzt den Gesamtprozess weiterhin. Gleichzeitig reduzieren sich Prototypen- und Versuchskosten um ca. 50%. Hinzu kommen Einsparungen durch entfallende Werkzeugänderungskosten sowie sinkende Fixkosten durch die Reduktion des Prüffelds.

7.2 Vergleich der Chancen und Risiken

Das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ ist ein konservativer Ansatz, bei dem nur kalkulierbare Risiken eingegangen werden. Alle Aussagen der Simulation in den frühen Entwicklungsphasen können zu einem späteren Zeitpunkt durch Versuche in Hardware abgesichert werden. Bei Bedarf wird durch Konstruktionsänderungen auf unzureichende Versuchsergebnisse reagiert. Die Qualität der Simulationsergebnisse ist daher direkt ausschlaggebend für den späteren Korrekturaufwand und somit entscheidend für Änderungs- bzw. Entwicklungskosten.

Die zeitige Einbindung des Versuchs in den Entwicklungsprozess gewährleistet, Defizite in den Konstruktionen und offene Entwicklungsinhalte früh zu entdecken und bearbeiten zu können. Dennoch besteht aufgrund der Einteilung der Produktentwicklung in spezialisierte Fachbereiche die Gefahr, Schnittstellenthemen und integrierte, kundennahe Ziele zu spät zu überprüfen.

Die Vision „Vollständige Simulation“ bietet die Möglichkeit, den gesamten Produktentwicklungsprozess durch ein integriertes Zielmanagementsystem auf ein kundennahes Zielsystem auszurichten. Sämtliche Detailziele werden dabei priorisiert und mit ihren Abhängigkeiten zu einem Gesamtnutzwert verrechnet. Weiterhin bestehen die in Kapitel 7.1 beschriebenen Chancen, Entwicklungskosten und -zeit drastisch zu senken.

Der erfolgreichen Realisierung der Vision „Vollständige Simulation“ stehen allerdings folgende Risiken entgegen:

Erreichen der postulierten Leistungssteigerungen

Um den Zustand vollständiger Simulation zu erreichen sind Leistungssteigerungen der virtuellen Produktentwicklung erforderlich, die über das heute absehbare Spektrum hinausgehen. Insbesondere sind die Abbildung der subjektiven Beurteilung, die Identifikation sämtlicher Einfluss-

faktoren auf alle entwicklungsrelevanten Phänomene sowie die mathematische Beschreibung der zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen zu erreichen.

Die Objektivierung subjektiver Beurteilungen ist bereits heute in verschiedenen Ansätzen prinzipiell nachgewiesen, wie in Kapitel 4.3.2 dargestellt. Allerdings sind die Ansätze noch auf das breite Spektrum der gängigen subjektiven Beurteilungskriterien anzuwenden – ein Prozess, der einige Jahre in Anspruch nehmen wird. Damit einher geht die Identifikation der relevanten Einflussfaktoren einen nicht vernachlässigbaren Einmalaufwand darstellt. Zusätzlich erscheint die Modellierung und Parametrierung aller relevanten Einflussfaktoren (Fahrzeug- bzw. Fahrwerkskomponenten, Fahrzustände, Umgebungsbedingungen) aus heutiger Sicht kaum beherrschbar¹².

Virtualisierung anderer Fachprozesse

Der vorgestellte Entwicklungsprozess bei vollständiger Simulation kann nur funktionieren, wenn alle entwickelnden Fachbereiche einen ähnlich hohen Virtualisierungsgrad aufweisen. Eine isolierte Betrachtung der Fahrwerksentwicklung ist nicht ausreichend. Andere Fachprozesse, wie Design, Karosserie-, Innenraum- oder Antriebsentwicklung sowie Fertigungs- und Logistikplanung müssen ebenfalls auf den verkürzten Entwicklungsprozess ausgerichtet sein.

Entwicklung und Absicherung von Innovationen

Die Entwicklung und Absicherung von Innovationen unterscheidet sich von der Anpassungsentwicklung bekannter Systeme darin, dass die Auswirkungen des neuen Systems auf das Gesamtfahrzeug zu Beginn der Entwicklung nicht ausreichend bekannt sind. Aufgrund der Beschränktheit der Simulation auf bereits bekannte Zusammenhänge sind weitergehende Maßnahmen zur frühzeitigen Bewertung des Systems notwendig. Neben Beurteilungen im Fahrversuch sind zur Innovationsentwicklung System- und Gesamtfahrzeugprüfstände erforderlich, um relevante Einflussfaktoren zu identifizieren, Eigenschaften zu verifizieren, Simulationsmodelle zu erarbeiten und zu validieren. Wegen der zu erwartenden niedrigen Auslastung dieser Prüfstände und der vergleichsweise hohen Investitionskosten sind unter Umständen Partnerschaftsmodelle mit Dienstleistern und anderen Fahrzeugherstellern eine zielführende Lösung.

Prozesssicherheit und Fehlertoleranz des Entwicklungsprozesses

Das Auftreten von Fehlern im Entwicklungsprozess bei vollständiger Simulation hat unter Umständen gravierende Folgen. Durch den Wegfall von System- und Gesamtfahrzeugprüfständen ist die Simulation neben dem Fahrversuch das einzige Entwicklungswerkzeug zur Absicherung der Integration. Treten Integrationsfehler auf, zum Beispiel Übertragungs- oder Modellierungsfehler auf Seiten der Simulation oder Fehler bei der Fahrzeugmontage, werden diese im schlimmsten

¹² Im Gegensatz dazu lässt sich die Betrachtung von fertigungs- und alterungsbedingten Eigenschaftsschwankungen von Bauteilen automatisiert durch Variationsrechnungen berücksichtigen.

Fall erst bei der abschließenden Produktfreigabe im Fahrversuch entdeckt. Daraus ergibt sich unter Umständen die einschneidende Folge, dass der Serieneinsatz in Frage gestellt ist. Unter hohem Termindruck müssen dann Lösungen erarbeitet werden, deren Wirksamkeit verlässlich zu bestätigen ist. Dazu kommt die Schwierigkeit der genauen Fehlerlokalisierung am realen Fahrzeug: Gesamtfahrzeug- bzw. Systemprüfstände stehen im Entwicklungsprozess der vollständigen Simulation nicht zur Verfügung. Die Alternativen – Messtechnikapplikation am Gesamtfahrzeug oder Ausweichen auf Prüfstände bei Dienstleistern – sind mit zusätzlichem Aufwand und zeitlichen Verzögerungen verbunden.

7.3 Empfehlung

Die Analyse der Chancen und Risiken hat gezeigt, dass der Entwicklungsprozess bei vollständiger Simulation zwar lukrative Chancen bietet, gleichzeitig aber auch große Risiken birgt. Insbesondere stellt der Verzicht auf System- und Gesamtfahrzeugprüfstände ein Risiko für Innovationsentwicklungen und Troubleshooting dar. Außerdem sind die postulierten Leistungssteigerungen der virtuellen Produktentwicklung nur langfristig erreichbar.

Daher wird empfohlen, die Weiterentwicklung der Simulationsmethoden voranzutreiben und das im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ (Kapitel 5) beschriebene Prüffeld zu realisieren. Verlässliche, virtuell erarbeitete Aussagen sorgen für richtige Weichenstellungen in den frühen Entwicklungsphasen und verhindern kostspielige Änderungen in den späteren Phasen. Prüfstandsversuche liefern die gegen Ende der Serienentwicklung erforderliche Aussagegenauigkeit, die in der nächsten Zukunft nicht anders darstellbar sein wird.

Entsprechend der in Kapitel 5.1 angesprochenen Auslegungsziele des Prüffelds der Zukunft

- Entwicklung und Absicherung von Innovationen
- Bewertung von Regelsystemen und aktiven Komponenten
- Reproduktion kundenrelevanter Betriebszustände
- Steigerung des Automatisierungsgrads und der Flexibilität
- Verbesserung der Prüfstandsaufbauten und Einsatz neuer Prüftechniken

sind Prüfstände zu ertüchtigen bzw. neu zu errichten. Es sind im Einzelnen:

- ½-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz
- 1-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz, mit optionaler Koppelung über HiL
- ARS-Prüfstand für aktive Stabilisierungssysteme
- Dynamischer mehraxialer Kennlinienprüfstand für Elastomerlager
- Fahrsimulator für Vertikaldynamik

- Flachbahnprüfstand (Reifenprüfung)
- LDS Prüfstand
- Prüfstände für innovative Lenksysteme (AFS, EPS)

Durch diese Anpassungen wird das Prüffeld optimal für die zukünftigen Anforderungen aufgestellt. Der zu erwartenden Ausweitung der HiL Technologie ist Rechnung getragen.

Die heute absehbaren Innovationen der nächsten 10 bis 15 Jahre werden mit dem empfohlenen Prüffeld serienreif entwickelbar sein. Für darüber hinausgehende Innovationen sind unter Umständen weitere, an besondere Aufgabenstellungen angepasste Prüfstandskonzepte erforderlich, die in der Planung durch Flächenvorhalt berücksichtigt sind.

8 Zusammenfassung

Aufgrund des seit einigen Jahren steigenden Wettbewerbs wird es für die internationale Automobilindustrie unter anderem immer dringlicher, einen Ausweg aus dem Zielkonflikt zwischen Produktsubstanz und Entwicklungskosten zu finden. Eine strategisch vielversprechende Lösung ist der forcierte Ausbau der virtuellen Produktentwicklung, die bei steigender Leistungsfähigkeit sinkende Entwicklungskosten verspricht.

Für die Funktionsentwicklung in der Fahrwerkstechnik bedeutet das speziell, die Fahrdynamiksimulation zu erweitern und die Entwicklungsprozesse darauf auszurichten. Ziel der vorliegenden Ausarbeitung ist die Gestaltung eines an die zukünftigen Fähigkeiten der Simulation angepassten Prüffelds für die Fahrwerksentwicklung.

Die Automobilindustrie ist seit ihren Anfängen geprägt von Innovation und Wachstum. Begleitet wird dieser Wandel von stetigen Detaillierungen und Spezialisierungen der Prüfstandstechnik. Wurden früher Gesamtfahrzeugprüfstände für die Prüfung von Komponenten verwendet, entstanden in der Folge vermehrt Prüfstände für Einzelkomponenten (Beispiele: Bremsbelag-, Stoßdämpferprüfstand), die den Prüfaufwand reduzierten und genauere Ergebnisse lieferten. Ebenso entstanden neue System- und Gesamtfahrzeugprüfstände (Beispiele: Bremsengeräuschprüfstand, Elastokinematikprüfstand „K&C“), mit denen umfassendere Aussagen möglich wurden.

Bis heute haben sich in der Automobilindustrie umfangreiche Prüffelder entwickelt. Für diese Arbeit wurde beispielhaft ein repräsentatives Prüffeld der Fahrwerksentwicklung der Automobilindustrie ausgewählt, das nahezu 30 Komponenten- bzw. Systemprüfstände für Bremsen, Federung, Dämpfung, Stabilisierung, Fahrwerk- und Aggregatelager, Pedalwerk und Bremsbetätigung, Lenkung und Reifen sowie 3 Gesamtfahrzeugprüfstände enthält.

Auf Seiten der Simulation ist das Jahr 1965 als Wendemarke herauszustellen: die vormals unzureichende Rechnertechnik wurde durch die Einführung integrierter Schaltungen so leistungsfähig, dass Simulationen erstmals effizient durchgeführt werden konnten. Die bekannten Grundprinzipien der Simulation (wie FEM und MKS) wurden schnell implementiert und kommerzialisiert. Seitdem wurde eine Vielzahl an Modellen für verschiedene Anwendungen entwickelt, die bis heute mit unterschiedlicher Genauigkeit und unterschiedlichem Detaillierungsgrad weiterentwickelt und verfeinert wurden. So ist zum Beispiel die erreichbare Genauigkeit von Steifigkeitsberechnungen für Elastomer- und Hydrolager bei Raumtemperatur sehr gut (ver-

gleichbar mit der Genauigkeit entsprechender Prüfstände); Veränderungen der Randbedingungen (beispielsweise Umgebungstemperatur) sind dagegen in dieser Simulation nicht möglich. Andere Phänomene, wie beispielsweise der Reibwert zwischen Bremsbelag und -scheibe können nur sehr eingeschränkt simuliert werden.

Seit Mitte der 90er Jahre hält die HiL-Simulation verstärkt Einzug, die in der Fahrzeugtechnik üblicherweise für die Entwicklung von Fahrwerkregelsystemen verwendet wird. Sie kombiniert die Vorteile von Versuch und Simulation durch Integration realer Bauteile in das Simulationssystem.

Die entscheidenden Stärken der Simulation sind einfache Variierbarkeit von Simulationsmodellen und geringe Kostenintensität. Durch die herausragenden Fähigkeiten zur Optimierung von Konstruktionen ist die Simulation prädestiniert für frühe Projektphasen, wenn viele Konzeptvarianten zu bewerten und Tendenzen aufzuzeigen sind. Der frühe Einsatz der Simulation hilft, durch Vorauswahl die Anzahl der möglichen Konstruktionsvarianten einzuschränken und somit beherrschbar zu machen. Prüfstandsversuche sowie HiL-Simulationen besitzen die erforderliche Aussagegenauigkeit für Detailentscheidungen in späteren Projektphasen. Sie berücksichtigen die erforderlichen Randbedingungen und liefern so belastbare Aussagen, die mit rein virtueller Simulation heute nicht darstellbar sind.

Die zukünftigen Entwicklungen von Prüffeld bzw. Simulation resultieren mittelbar aus den fünf wichtigsten Handlungsfeldern der Automobilindustrie – Individualisierung, Emotionalisierung, Globalisierung, Rationalisierung und Time to Market. Es ergeben sich folgende Anforderungen:

- Funktionsorientierung (Kundennahe Bewertung der Fahrzeugeigenschaften während des gesamten Entwicklungsprozesses)
- Entwicklung und Absicherung von Innovationen (Alleinstellungsmerkmale)
- Bewertung von Regelsystemen und aktiven Komponenten
- Aufbau bzw. Erweiterung von Detailkompetenzen (Erweiterung der Aussagefähigkeit)
- Durchführung von Prüfungen bei Zulieferern oder Dienstleistern

Zur konkreten Planung eines Prüffelds der Zukunft wird das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ aufgestellt. Es prognostiziert den Zustand der Fahrwerksentwicklung in den nächsten 10 bis 15 Jahren unter Weiterführung der aufgezeigten Trends. Dabei wird vorausgesetzt, dass die heute nur in Ansätzen verfügbaren Simulationsmodelle so weiterentwickelt und verfeinert sind, dass sie im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ die Aussagegenauigkeit von Prüfstandsversuchen erreichen und alle relevanten Randbedingungen berücksichtigen.

Unter Berücksichtigung dieser Trends und der zukünftigen Zusammenarbeit von Prüffeld und Simulation wird daraus die Liste der neu zu errichtenden Prüfstände abgeleitet:

- ½-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz
- 1-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz, mit optionaler Koppelung über HiL
- ARS-Prüfstand für aktive Stabilisierungssysteme
- Dynamischer mehraxialer Kennlinienprüfstand für Elastomerlager
- Fahr Simulator für Vertikaldynamik
- Flachbahnprüfstand (Reifenprüfung)
- LDS Prüfstand
- Prüfstände für innovative Lenksysteme (AFS, EPS)

Das Layout des Prüffelds bei „Fortgeschrittener Simulation“ wird als Kammstruktur in eine übergeordnete Sternstruktur des Entwicklungszentrums eingegliedert. Es besteht aus 40 Prüfständen und bedarf einer Nutzfläche von rund 1100 m².

Die zur Berücksichtigung weitergehender Leistungssteigerungen der Simulation aufgestellte Vision „Vollständige Simulation“ formuliert die Gleichwertigkeit von Versuch und Simulation anhand zweier Postulate:

1. Alle Bewertungskriterien der Fahrwerksentwicklung sind der Simulation zugänglich und ihre Modelle validiert.
2. Trennschärfe und Aussagesicherheit der Simulationsergebnisse sind identisch mit Trennschärfe und Aussagesicherheit von Versuchsergebnissen.

Unter diesen Voraussetzungen läuft nahezu der gesamte Entwicklungsprozess auf virtueller Basis ab: Auslegung, Konstruktion, und Abstimmung liegen in der Verantwortung der Simulation. Prototypenteile werden erst nach erfolgreicher virtueller Produktvorfregabe hergestellt. Die postulierte Gleichwertigkeit von Versuch und Simulation gewährleistet eine anlaufaugliche Qualität dieser ersten Prototypenteile, sodass die tatsächliche Produktfregabe ohne Abstimmrunden in Hardware gegeben werden kann.

System- und Gesamtfahrzeugprüfstände sind nicht mehr erforderlich. Die Aufgabe des Prüffelds besteht in der Qualitätssicherung von Prototypenbauteilen sowie der Entwicklung von Innovationen.

Das Prüffeld bei „Vollständiger Simulation“ besteht aus 25 Prüfständen und erfordert eine Nutzfläche von ca. 360 m². Im Vergleich zum Prüffeld im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ entspricht das einer Flächenreduktion von 66%.

Der Entwicklungsprozess bei „Vollständiger Simulation“ bietet lukrative Chancen: Verkürzung der Entwicklungsdauer um 15 Monate und Einsparung der Prototypen- und Versuchskosten um ca. 70%. Dem stehen einige Risiken gegenüber:

- Der Verzicht auf System- und Gesamtfahrzeugprüfstände erschwert die Entwicklung von Innovationen und das Troubleshooting
- Die für die Vision „Vollständige Simulation“ postulierten Leistungssteigerungen der virtuellen Produktentwicklung liegen noch in weiter Ferne.

Daher wird empfohlen, das Prüffeld bei „Fortgeschrittener Simulation“ zu realisieren und parallel die Weiterentwicklung der Simulationsmethoden voranzutreiben. Verlässliche, virtuell erarbeitete Ergebnisse sorgen für richtige Weichenstellungen in den frühen Entwicklungsphasen und verhindern kostspielige Änderungen in den späteren Phasen. Prüfstandsversuche liefern die für Produktfreigaben erforderlichen belastbaren Aussagen, die in der nächsten Zukunft nicht anders darstellbar sind.

9 Anhang

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] 100-098-018 DYNAMICK&C-01: *Dynamic Kinematic and Compliance Testing*. Eden Prairie, MN, U.S.A.: MTS Systems Corporation, 08/2002
- [2] ADAMS, W., TOPPING, R.: *The Steering Characterization Functions (SCFs) and Their Use in Steering System Specification, Simulation and Synthesis*. SAE Paper #2001-01-1353, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2001
- [3] AHRENS, B., BARZ, D.: *Schnellaufender Nutzfahrzeugreifen-Gleichförmigkeitsprüfstand*. Automobiltechnische Zeitschrift 7/8/1993
- [4] ALIRAND, M., LEBRUN, M., RICHARDS, C. W.: *Front Wheel Vibrations: A Hydraulic Point of View - Models and First Results*. SAE Paper #2001-01-0490, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2001
- [5] AMMON, D., GIPSER, M., RAUH, J., WIMMER, J.: *Effiziente Simulation der Gesamtdynamik Reifen-Achse-Fahrwerk*. VDI Berichte Nr. 1224: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Düsseldorf: VDI Verlag, 1995
- [6] AMMON, D.: *Was macht der Stoßdämpfer mit dem Abrollkomfort?* VDI Berichte Nr. 1350: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997
- [7] AUGSBURG, K., BRUNNER, H., JESCHOR, M., SCHMALER, J.: *Neues Prüffeld Reifen- und Fahrwerkstechnik am IVK Dresden*. Automobiltechnische Zeitschrift 5/1995
- [8] BARBER, A. J.: *Accurate Models for Bushings and Dampers using the Empirical Dynamics Method*. Modeling Integration Products and Services, MTS Systems Corporation, 2000
- [9] BARTELS, M., FISCHER, E.: *ADAMS – Ein universelles Programm zur Berechnung der Dynamik großer Bewegungen*. Automobiltechnische Zeitschrift 9/1984
- [10] BATHE, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden*. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2002
- [11] BECKER, A., SEIFERT, B.: *Simulation von Abrieb und von Reifenkennwerten für Handling mit einem stationär rollenden FE-Reifenmodell*. VDI Berichte Nr. 1350: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997
- [12] BECKER, G., FROMM, H., MARHUHN, H.: *Schwingungen in Automobillenkungen*. Berlin: M. Krayn, Technischer Verlag, 1931.
- [13] BECKER, K. ET. AL.: *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen*. Renningen-Malmsheim: expert verlag, 2000
- [14] BEIKER, S.: *2Spur - ein kennlinienbasiertes Gesamtfahrzeugmodell für die Fahrdynamiksimulation*. Dokumentation der Programminhalte. München: BMW AG, 2000
- [15] BEIKER, S.: *Verbesserungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens von PKW durch zusammenwirkende Regelsysteme*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 418, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [16] BEISSBARTH, H.: *Prüfung von Stoßdämpfern an Kraftfahrzeugen*. Automobiltechnische Zeitschrift 10/1958

- [17] BÖCKING, J., HEIDRICH, M., RUDOLPH, A.: *Hydraulische Fahrwerkslager - Wirkungsweise, Einfluss und rechnergestützte Auslegung bei Freudenberg*. VDI Berichte Nr. 1494: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999
- [18] BOOTZ, A.: *Interner Bericht*. München: BMW Group, 2005
- [19] BRAESS, H.-H.: Konstruktion, Berechnung und Versuch – Zunehmende Partnerschaft auch in der Automobiltechnik. *Automobiltechnische Zeitschrift* 7/8/1985
- [20] BRAUN, H., BECKE, M.: *Neuer Reifenprüfstand am IFF der TU Braunschweig*. *Automobiltechnische Zeitschrift* 11/1976
- [21] BROCKHAUS, H., HAARDT, H., HOMANN, R.: *Ein Fahrzeugprüfstand mit Nachbildung der Fahrmechanik*. *Automobiltechnische Zeitschrift* 1/1961
- [22] BRÖDER, K., HAARDT, H., PAUL, U.: *Reifenprüfstand mit innerer und äußerer Fahrbahn*. *Automobiltechnische Zeitschrift* 2/1973
- [23] BRUNE, M., FIELDER, B., GAIER, C., NEUREITER, W., UNGER, B.: *Einsatz der rechnerischen Lebensdauerabschätzung in der frühen Bauteilentwicklungsphase. Betriebsfestigkeit und Entwicklungszeitverkürzung – 23. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit: Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung, Köln: 1997*
- [24] BULD, S., KRÜGER, H.-P., HOFFMANN, S., TOTZKE, I.: *Die Fahrsimulation als Methode bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. VDI-Berichte Nr. 1745: Simulation und Simulatoren-Mobilität virtuell gestalten, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003
- [25] CARLITZ, A.: *Vergleich der Messverfahren für die Schwingungsdämpfungsprüfung im Fahrzeug*. Essen: Haus der Technik, 2003
- [26] CHIESA, A.: *Anwendung der analogen elektronischen Rechnung bei Untersuchungen an Kraftfahrzeugen*. *Automobiltechnische Zeitschrift* 5/1960
- [27] CUYPER, J. DE., COPPENS, D.: *Schwingungsbelastungssimulation mit einem Mehrachsenprüfstand in der Fahrzeugentwicklung*. *Sound and Vibration*, Band 33 (1999) Heft 10
- [28] DAY, T., ROBERTS, S.: *A Simulation Model for Vehicle Braking Systems Fitted with ABS*. SAE Paper #2002-01-0559, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2002
- [29] DERAËD, P.: *Die Marke bildet das zukünftige Asset*. München: Mercer Management Consulting, 2003
- [30] DERAËD, P.: *Komponentenwerke auf dem Prüfstand: Automobilhersteller*. München: Mercer Management Consulting, 2003
- [31] DIRSCHMID, W.: *Einsatz der Simulationstechnik unter dem Gesichtspunkt des Nutzen-Kosten-Aspektes*. *Automobiltechnische Zeitschrift* 9/1992
- [32] DIRSCHMID, W.: *Berechnung im Automobilbau*. *Automobiltechnische Zeitschrift* 6/1997
- [33] DONLEY, M., STOKES, W., JEONG G. S., SUH J. K., JUNG S. G.: *Kfz-Schwingungs- und Geräuschauslegung: Fahrverhalten*. *Sound and Vibration*, 08/1996
- [34] DREWS, R., DEUSCHL, M.: *Tendenzen in der Prüftechnik*. *FahrwerkTech 2003*, München: TÜV Süddeutschland, 2003
- [35] DREWS, R., JONGEN, H.: *Modulares Experimentierfahrzeug für Betriebslastenmessungen*. *Automobiltechnische Zeitschrift* 01/2002
- [36] DZIERZEK, S.: *Experiment-Based Modeling of Cylindrical Rubber Bushings for the Simulation of Wheel Suspension Dynamic Behavior*. SAE Paper #2000-01-0095, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2000

-
- [37] EBERAN-EBERHORST, R.: *Ein Automobil-Prüfstand mit mechanisch-simulierter Fahrdynamik*. Automobiltechnische Zeitschrift 10/1968
- [38] EBERHARD, P., SCHIELEN, W., BESTLE, D., BISCHOF, CH.: *Seminar Optimierung schwingungsfähiger Systeme in der Fahrzeugtechnik*. München: Haus der Technik, 2003
- [39] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produktentwicklung und Konstruktion*. München: Hanser 2003
- [40] EICHLSEDER, W., PÜHRINGER, P.: *Simulation der Fahrwerks- und Karosseriebeanspruchungen auf dynamischen Prüfständen*. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift 5/1996, Band 141
- [41] ELVENKEMPER, A., BRECHT, J., BETTEN, J., NAVRATH, U.: *Experimental and Theoretical Work on the Viscoelastic Behavior of Friction Materials*. SAE Paper #2002-01-2593, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2002
- [42] FINCKH, K.: *Großer Schwungmassenprüfstand für Fahrzeugbremsen*. Automobiltechnische Zeitschrift 10/1968
- [43] FINE, C. H.: *Clock Speed*. Reading, Massachusetts, U.S.A.: Perseus Books, 1998
- [44] FLESZAR, A. R., LINDEN, P. J. G. VAN DER, JOHNSON, B. R., GRIMMER, M. J.: *Combining vehicle and test-bed diagnosis information to guide vehicle development for pass-by noise*. Mess- und Versuchstechnik im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2001
- [45] FOAG, W., PANKIEWICZ, E., RÖSER, C., SCHMID, W., TROLL, H.: *Der neue BMW-Simulationsprüfstand für Antiblockiersysteme*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1994
- [46] FSC-CS: *Force Control with Hexapods*. Schiphol, The Netherlands: FCS Control Systems B.V., 05/2002
- [47] FUHR, F., SCHRÜLLKAMP, TH., NEUKUM, A., SCHUMACHER, M.: *Integration von Fahrsimulatoren in den Entwicklungsprozess von aktiven Fahrwerksystemen*. VDI-Berichte Nr. 1745: Simulation und Simulatoren-Mobilität virtuell gestalten, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003
- [48] GALL, R.: *Zur Berechnung von faserverstärkten Reifen mit der Methode der finiten Elemente*. Dissertation, Hamburg: Universität der Bundeswehr, 1985
- [49] GANZHORN, K., WALTER, W.: *Die geschichtliche Entwicklung der Datenverarbeitung*. IBM Deutschland, Stuttgart: 1975
- [50] GAUS, H., WEIBLEN, W.: *Einbindung der Mess- und Versuchstechnik in den Entwicklungsablauf*. VDI Berichte Nr. 1470: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999
- [51] GEERING, H. P.: *Regelungstechnik – Mathematische Grundlagen, Entwurfsmethoden, Beispiele*. 4. Auflage, Berlin: Springer, 1996
- [52] GIPSER, M.: *Reifenmodelle für Komfort- und Schlechtwegsimulationen*. 7. Aachener Kolloquium - Fahrzeug- und Motorentchnik, Aachen, 1998
- [53] GIPSER, M.: *FTire: Methoden der Parametrierung eines physikalisch basierten Reifenmodells*. Tagung Simulation in der Fahrzeugdynamik, Essen: Haus der Technik, 2003
- [54] GLOCKER, A., KULKA, CH., MEYER, R., OBERLOHER, M.: *Aluminium-Fahrwerk der neuen BMW 5er Baureihe*. Automobiltechnische Zeitschrift 3/1996
- [55] GOLLWITZER, J.: *Untersuchungen der Einsatzmöglichkeiten magnetorheologischer Flüssigkeiten in der Motor- u. Getriebelagerung*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik München, München: Technische Universität München, 2003

- [56] GRAF, M. V.: *Interner Bericht*. München: BMW Group, 2004
- [57] GUHL, G.: *Rollenprüfstände zur Kontrolle der Fahrzeugbremse*. Automobiltechnische Zeitschrift 8/1963
- [58] HAGEMANN, G., HEINS, H., KIRCHNER, A.-R., LADENTIN, T., NOODT, M., SCHUCK, N.: *Universelle Prüfumgebung für Untersuchungen des Antriebsstrangs*. Automobiltechnische Zeitschrift 2/2003
- [59] HAMMER, H., REINALTER, W., TIEBER, W.: *Simulation von Schnittgrößen durch Befahren eines Handlingkurses*. Automotive Engineering Partners 02/2003
- [60] HEISSING, B., BRANDL, H. J.: *Subjektive Bewertung des Fahrverhaltens*. 1. Auflage, Würzburg: Vogel, 2002
- [61] HEISSING, B.: *Seminar Grundlagen der Fahrdynamik*. Berlin: Haus der Technik, 2003
- [62] HELLMUND, R., SCIUTO, M.: *'Road To Rig' – Transfer von Fahrzeugtesten ins Labor*. 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentchnik, Band 2, Aachen, 1998
- [63] HENDRIXS, W., GARESCI, F., PEZZUTTO, A., VAN DER AUWERAER, H.: *Experimental and Numerical Modelling of Friction Induces Noise in Disc Brakes*. SAE Paper #2002-01-1192, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2002
- [64] HIRAO, O., NAKAJIMA, T.: *Versuche an Kraftfahrzeugen auf dem Prüfstand*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1968
- [65] HIRSCHBERGER, W., RIEDER, G.: *Zur Modellierung und Anwendung nichtlinearer Fahrwerkslagerungen, Tagung Simulationstechniken in der Fahrzeugentwicklung*. Haus der Technik, Essen, 1995
- [66] HÖFER, P., KALISKE, M., THIELE, K.: *Vorhersage von Reifenkennlinien mit FEM Simulation*. VDI Berichte Nr. 1632: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Düsseldorf: VDI Verlag, 2001
- [67] HOFFMANN, H.-J.: *Wirksamkeit von Stoßdämpfern am Fahrzeug*. Automobiltechnische Zeitschrift 10/1958
- [68] HOFFMANN, S., KRÜGER, H.-P., BULD, S.: *Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation*. VDI-Berichte Nr. 1745: Simulation und Simulatoren-Mobilität virtuell gestalten, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003
- [69] HOMANN, R., STEINHILBER, H., WITTMANN, H.-J.: *Fahrzeugprüfstände – Bauarten und Erfahrungen aus Konstruktion und Anwendung*. Automobiltechnische Zeitschrift 2/1968
- [70] HOPF, A., GAUCH, A.: *Numerische Simulation der Bremsenkühlung mit CFD und FEM*. VDI-Berichte Nr. 1559: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [71] INSTITUT FÜR MOBILITÄTSFORSCHUNG: *Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2020*. Berlin: BMW AG, 2002
- [72] INTEL CORPORATION: *Expanding Moore's Law*. Santa Clara, U.S.A., 2002
- [73] ISO 12021-1: *Road Vehicles – Sensitivity to Lateral Wind Part 1: Open-Loop Test Method Using Wind Generator Input*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [74] ISO 13674-1 / ISO 13674-2: *Road Vehicles – Test Method for the Quantification of On-Center Handling – Part 1: Weave Test / Part 2: Transition Test*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [75] ISO 14512: *Road Vehicles – Straight-Ahead Breaking on Surfaces with Split Coefficient of Friction – Open-Loop Test Method*. International Organization for Standardization, Genf, CH

- [76] ISO 17288-1 / ISO 17288-2: *Passenger Cars – Free Steer Behavior – Part 1: Steering-Release Open-Loop Test Method / Part 2: Steering-Pulse Open-Loop Test Method*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [77] ISO 3888-1 / ISO 3888-2: *Passenger Cars – Test Track for a Severe Lane Change Maneuver – Part 1: Double Lane-Change / Part 2: Obstacle Avoidance*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [78] ISO 4138: *Passenger Cars – Steady State Circular Driving Behavior – Open-Loop Test Procedure*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [79] ISO 7401: *Road Vehicles – Lateral Transient Response Test Methods*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [80] ISO 7975: *Passenger Cars – Breaking in a Turn – Open-Loop Test Procedure*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [81] ISO 9815: *Passenger Car/Trailer Combinations – Lateral Stability Test*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [82] ISO 9816: *Passenger Cars – Power-Off Reactions of a Vehicle in a Turn – Open-Loop Test Method*. International Organization for Standardization, Genf, CH
- [83] IST0067AG: *RS Elastomer – Software zur Ermittlung von Kennwerten von Elastomeren und Elastomer-Verbund-Bauteilen*. Darmstadt: Instron Structural Testing Systems GmbH, 2002
- [84] JAMES, A., RUDOLPH, M., GEHRING, J., PÖHLMANN, TH.: *Hardware-in-the-Loop bei Audi-Antriebssträngen*. Automobiltechnische Zeitschrift 4/2002
- [85] JANG, H.-K., KOOK, D.-Y.: *Objective Measurement of the Start Motion Quality of a Forklift Truck*. Kyonggi-Do, Korea: Noise and Vibration Technology Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin, 2002
- [86] KAPLICK, C.: *Verifikation und Bewertung fahrdynamischer Traktor-Simulationsmodelle*. Fortschrittsberichte VDI Reihe 14 Nr. 73. Düsseldorf: VDI Verlag, 1995.
- [87] KAPPELMANN, P., KLENK, TH., WIEDEMANN, J.: *Simulation eines Unterdruckbremsverstärkers im Verbund mit dem Gesamtsystem und dem Fahrzeug*. VDI Berichte Nr. 1864: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2004
- [88] KEIJSERS, R., HUDI, J.: *MKS-Gesamtfahrzeugsimulation zu Lastwechselschwingungen und Triebwerksbewegungen*. Tagung Fahrwerk-Tech, TÜV Akademie, München: 2001
- [89] KERN, G., GROßMANN, TH. UND GÖHLICH, D.: *Computerunterstützte Auslegung von hydraulisch gedämpften Gummilagern*. Automobiltechnische Zeitschrift 94/1992
- [90] KESSING, N.: *Anwendung von CAE in der Fahrkomfortentwicklung*. Tagung Fahrzeugschwingungen – Fahrkomfort und Fahrwerk, Essen: Haus der Technik, 06/2000
- [91] KIM, S., SINGH, R.: *Examination of High Frequency Characterization Methods for Mounts*. SAE Paper #2001-01-1444, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2001
- [92] KINZINGER, K.: *Rationeller Prüfstandbau bei Opel*. Automobiltechnische Zeitschrift 2/1997
- [93] KIRCHKNOFF, P., WITTA, L.: *Der neue BMW Schwingungs- und Akustiksimulator*. VDI-Berichte Nr. 1745: Simulation und Simulatoren – Mobilität virtuell gestalten, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003

- [94] KLAAS, A., VAN OOSTEN, J., SAVI, C., UNRAU, H.-J., BOUHET, O., COLINOT, J.: *TIME, Tire Measurements – Eine neue Standardprüfprozedur für stationäre Reifen-Seitenkraftmessungen*. VDI Berichte Nr. 1494: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999
- [95] KLEINSORGE, W.: *Dynamische Prüfung von Kraftfahrzeugbremsen*. Automobiltechnische Zeitschrift 8/1963
- [96] KÖHL, S., LEMP, D., PLÖGER, M.: *Steuergeräte-Verbundtests mittels Hardware-in-the-Loop-Simulation*. Automobiltechnische Zeitschrift 10/2003
- [97] KÖHN, PH., HOLDMANN, P.: *Moderne Prüfstandtechnik für das Fahrwerk*. Automobiltechnische Zeitschrift 9/1998
- [98] KOWALSKI, D., MOHAN, R., BLOUGH, J., GRUENBERG, S., GRIFFITHS, D.: *The Effects of Different Input Excitation on the Dynamic Characterization of an Automotive Shock Absorber*. SAE Paper #2001-01-1442, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2001
- [99] KRAMER, M.: *Produktivitätssteigerung im Versuchswesen*. Automobiltechnische Zeitschrift 5/1982
- [100] KRÜGER, L., BOSS, K.-H., ANGERER, S.: *Bremsenprüfstand für Betriebslastensimulation*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1992
- [101] KUDRITZKI, D.: *Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1989
- [102] KÜPPERS, TH., AUSTERMANN, B., KETT, R.: *Untersuchungen der luftgefederten Pkw-Radaufhängungen durch Koppelung von MKS- und Pneumatiksimulation (Simpack/DSHplus)*. 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentchnik, Band 2, Aachen, 1998
- [103] LABES, K., MIEHE, B. O., STOLZE, F.J., JACOBY, G.: *Die Gesamtfahrzeug-Betriebsfestigkeits-Prüfung im Entwicklungsprozess von Automobilen*. Automobiltechnische Zeitschrift 5/1995
- [104] LAMBERG, K.: *Methodik zur systematischen Bereitstellung von HIL-Testsystemen für Kfz-Steuergeräte*. Dissertation am Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, TU München: 2001
- [105] LANG, R., SONNENBURG, R.: *A Detailed Shock Absorber Model for Full Vehicle Simulation*. Adams User Meeting 1995
- [106] LEE, K.: *Numerical Modelling for the Hydraulic Performance Prediction of Automotive Monotube Dampers*. Vehicle System Dynamics, 28/1997
- [107] LEE, K.: *Numerical Prediction of Brake Fluid Temperature Rise During Braking and Heat Soaking*. SAE Paper #1999-01-0483, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 1999
- [108] LEISTER, G., RUNTSCH, G., WIDMAYER, H.: *Ermittlung objektiver Reifeneigenschaften im Entwicklungsprozess mit einem Reifenmessbus*. Automobiltechnische Zeitschrift 05/1999
- [109] LEOPOLDSBERGER, J.: *Analyse und messtechnische Erfassung der dynamischen Lenkübersetzung im Fahrversuch*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik München, München: Technische Universität München, 2004
- [110] LINDEMANN, U.: *Methoden der Produktentwicklung*. Skriptum zur Vorlesung, Technische Universität München, 2003
- [111] LION, A., EICHLER, M.: *Gesamtfahrzeugsimulation auf Prüfstrecken zur Bestimmung von Lastkollektiven*. VDI Berichte Nr. 1559: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000

-
- [112] LIPPMANN, M.: *Eskalationsverfahren*. Qualitäts-Verfahrensweisung der BMW Group, München: VA Nr. 4.1.3/6 (9.6), 1999
- [113] LOZIA, Z., ZARDECKI, D.: *Vehicle Dynamics Simulation with Inclusion of Freeplay and Dry Friction in Steering System*. SAE Paper #2002-01-0619, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2002
- [114] MAURER, A., DIETZ, F., LANK, N.: *BCG Report: Beyond Cost Reduction*. Boston, MA: The Boston Consulting Group, 2004
- [115] MARQUARD, E.: *Schwingungsdynamik des schnellen Strassenfahrzeugs*. Essen: Girardet Verlag, 1952
- [116] MCGUAN, S. P., PINTAR, S. C.: *Modeling vehicle suspension structural compliance at Ford Motor Company using a coupling of ADAMS and MSC/NASTRAN*. SAE Paper #941118, 1994
- [117] MEITINGER, TH.: *Einsatz digitaler Straßendaten in der Fahrwerksentwicklung*. Symposium Reifen und Fahrwerk, Wien: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, 2003
- [118] MEITINGER, TH.: *Functional Virtual Prototyping in Vehicle Chassis Development*. ADAMS User Conference, USA (Phoenix, AZ): 2003
- [119] MEITINGER, TH.: *Untersuchung der Lenkunruhe mit Hilfe der Mehrkörper-Simulation*. 5. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Renningen: expert Verlag, 2003
- [120] MELJNIKOV, D., AMMON, D.: *Praxisgerechte Stoßdämpfermodelle für die Ride- & Handling Simulation*. 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentechnik, Aachen, 2000
- [121] MÜHLBAUER, R.: *Virtuelle Auslegung und Absicherung strukturmechanischer Fahrwerksfunktionen*. VDI Berichte Nr. 1701: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2002
- [122] MÜLLER, W.: *Schwungmomentenaufteilung bei Bremsenprüfständen*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1961
- [123] NISSING, D., KESSELGRUBER, D.: *Erprobung von realen aktiven Fahrwerkregelsystemen im virtuellen Fahrzeug*. VDI-Berichte Nr. 1745: Simulation und Simulatoren-Mobilität virtuell gestalten, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003
- [124] NOWICKI, D., BESTLE, D., STRASSER, G.: *Empfindlichkeitsuntersuchung von Kraftfahrzeugen auf bremserrege Lenkraddrehschwingungen (LDS) mit Hilfe eines Komplettfahrzeugprüfstands*. 3. Symposium Reifen und Fahrwerk, Wien: TU Wien, 2005
- [125] OERTEL, CH.: *Final Report EU Project INVEC, Subtask Conventional Bushing*. 1998
- [126] OERTEL, CH., FANDRE, A.: *Das Reifenmodellsystem RMOD-K*. Automobiltechnische Zeitschrift 11/2001
- [127] OERTEL, H., LAURIEN, E.: *Numerische Strömungsmechanik*. 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2003
- [128] PACEJKA, H. B., BAKKER, E.: *The Magic Formula Tyre Model*. In : Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis; Vehicle System Dynamics, Vol. 21 Lisse, NL: Swets & Zeitlinger, 1993
- [129] PAUL, M.: *Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen*. HNI Verlagsschriftenreihe, 1. Aufl., Paderborn: HNI, 1996

- [130] PELZ, P., BÖCKING, J., OBERLE, R., VON BROOCK, U., JASCHKE, H.-G.: *Simulation eines Luft-Feder-Dämpfers (LFD)*. VDI-Berichte Nr. 1701: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2002
- [131] PELZ, P., SONNENBURG, R.: *Bestimmung komfortoptimaler Designparameter eines Luft-Feder-Dämpfers im Fahrzeugmodell – Vergleich mit konventioneller hydraulischer Dämpfung*. VDI-Berichte Nr. 1846: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2004
- [132] PETER, W.: *Berechnung im Automobilbau*. Automobiltechnische Zeitschrift 6/1988
- [133] PFENNINGER, TH.: *Der Fahrsimulator – Ideensieb für die Entwicklung neuer Fahrzeuge*. Automotive Engineering Partners 4/2003
- [134] POPP, K., RUDOLPH, M., TREYDE, T., SCHITTENHELM, H., WEDIG, W., AMS, A., SCHMALFUß, C., HERKENRATH, D.: *Nichtlineare Effekte als Ursache von Bremsengeräuschen*. Technische Anwendungen von Erkenntnissen der Nichtlinearen Dynamik, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999
- [135] POPP, K.: *Mehrkörpersysteme*. Skriptum zur Vorlesung, Universität Hannover, 2001
- [136] PROKOP, G.: *Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization*. Vehicle System Dynamics 2001, Vol. 25, No. 1, Lisse, NL: Swets & Zeitlinger
- [137] RADAJ, D.: *Stand der Berechnung im Automobilbau*. Automobiltechnische Zeitschrift 11/1982
- [138] RADAJ, D.: *Fortschritte der technischen Berechnung im Automobilbau*. Automobiltechnische Zeitschrift 2/1985
- [139] RADAJ, D.: *Geschichte, Stand und Tendenzen automobiltechnischer Berechnung als Teil einer Gesamtentwicklung*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1987
- [140] RAUH, J., MELNIKOV, D., DRONKA, S., HILF, K.-D., SCHIRLE, T.: *Praxisgerechte Komponentenmodelle für die Gesamtfahrzeugsimulation*. Tagung Simulation in der Fahrzeugdynamik, Essen: Haus der Technik, 2003
- [141] REIBNITZ, U. v.: *Szenarien – Optionen für die Zukunft*. Hamburg: McGraw-Hill, 1987
- [142] REYBROUCK, K., DUYM, S.: *A Physical Parametric Model for Nonlinear Dynamic and Temperature- Dependent Behaviour of Automotive Shock Absorbers*. 11 th European ADAMS Users' Conference, Frankfurt, November 1996
- [143] REYBROUCK, K.: *A Non Linear Parametric Model of an Automotive Shock Absorber*. SAE Paper #940869, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2000
- [144] RIEDEL, ARBINGER: *Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw*. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 1997
- [145] RIEDER, G., SCHMID, M.: *Optimierung und Verkürzung des Entwicklungsablaufs von Fahrwerken durch Einsatz der MKS-Simulation*. Tagung Fahrwerk-Tech, TÜV Akademie, München: 2001
- [146] RIEGER, K., SCHIELEN, W.: *Echtzeitsimulation eines Fahrzeugmodells mit aktiver Federung – Hardware-in-the-Loop Experimente*. VDI Berichte Nr. 1189: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 1995
- [147] RIEKERT P., SCHUNCK, T.: *Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs*. Ingenieur Archiv Band IX, 1940
- [148] RILL, G.: *TMEASY - ein „easy to use“ Reifenmodell*. Tagung Simulationstechniken in der Fahrzeugentwicklung, Essen: Haus der Technik, 1995

- [149] RISCH, S.: *Partner oder Knecht? Interview Carl-Peter Forster*. McK Wissen 06/2003 „Mobilität“, Hamburg: brand eins, 2003
- [150] RIXMANN, W.: *Das Kraftfahrzeug-Laboratorium der Staatlichen Ingenieurschule Esslingen/N.*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1967
- [151] RIXMANN, W., Schmid, I.: *Forschung und Entwicklung am Automobil 1968.*. Automobiltechnische Zeitschrift 70/1968
- [152] ROCHLITZ, H., STEYH, R., SCHUBERT, H.: *Prüfstand für die Festigkeitserprobung von Fahrzeugen unter Klima- und Sonnenlichteinwirkung*. 29. Jahrestagung der GUS: „Umwelteinflüsse erfassen, simulieren, bewerten“, Karlsruhe: DWS Werbeagentur und Verlag, 2000
- [153] RÖSSLE, M.: *Approximation der Gesamtfahrzeugparameter Masse, Schwerpunktlage und Massenträgheitsmomente in der frühen Konzeptphase*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München, München: 2004
- [154] ROMPE, K., HEISSING, B.: *Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen: Quer- und Längsdynamik*. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1984
- [155] RUÍZ, S.: *Integration im Aufwind – Koppelung von CFD und Mehrkörpersimulation*. Automotive Engineering Partners 4/2003
- [156] SCHILLING, R., PAAS, M., LANZERATH, H., WESEMANN, J.: *Numerical Analysis of New Material Applications for Passive Safety*. VDI Berichte Nr. 1559: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [157] SCHMID, I., TOMASKE, W.: *Reifenprüfanlage zur Simulation instationärer Betriebszustände*. Automobiltechnische Zeitschrift 9/1984
- [158] SCHÖPF, J., KÖTZLE, H., KÄSTNER, A., BLEZIG, H.: *Schnelllaufende Flachbahn als neuartige Komponente für Fahrzeug- und Bauteilprüfstände*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1989
- [159] SCHUDY, J.: *Validierung eines virtuellen Fahrzeugmodells*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München, München: 2004
- [160] SCHULTZ, G., TONG, I., KEFAUVER, K., ISHIBASHI, J.: *Steering and Handling Testing using Roadway Simulator Technology*. Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing, Vol 1, Nos. 1/2/3, 2005.
- [161] SCHUMACHER, A., BRUNIES, F.: *Crash-Optimierung unter Einbeziehung weiterer, fachübergreifender Strukturanforderungen*. VDI Berichte Nr. 1559: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [162] SCHWERTASSEK, R., WALLRAPP, O.: *Dynamik flexibler Mehrkörpersysteme*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1999
- [163] SCHWILM, J., VACULÍN, O., JASCHINSKI, A.: *Möglichkeiten der Fahrdynamik- und Komfortbewertung zukünftiger virtueller Prototypen mittels Simulation*. VDI-Berichte Nr. 1745: Simulation und Simulatoren-Mobilität virtuell gestalten, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003
- [164] SEIFFERT, U., MUND, A.: *Aufgaben der Automobilforschung – Unterstützung durch Rechnereinsatz*. Automobiltechnische Zeitschrift 9/1984
- [165] SEIFFERT, U., SCHARNHORST, TH.: *Die Bedeutung von Berechnungen und Simulationen für den Automobilbau*. Automobiltechnische Zeitschrift 5/1989
- [166] SEIFFERT, U.: *Die Stellung der Mess- und Versuchstechnik im Entwicklungsprozess*. VDI Berichte Nr. 974: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau - Fortschritte und Tendenzen, Düsseldorf: VDI Verlag, 1992

- [167] SHABANA, A.: *Dynamics of multibody systems*. 2nd ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [168] SIEFKES, T.: *Flachbahnprüfstand II – Eine Versuchseinheit zur Ermittlung der Eigenschaften von Nutzfahrzeugaufhängungen und -achse*. Automobiltechnische Zeitschrift 6/1993
- [169] SONNENBURG, R., PLANITZER, M., ZIMMERMANN, G.: *Vier unterschiedliche Ansätze zur Simulation von Stoßdämpfern in der ZF Sachs AG*. Tagung Simulation in der Fahrzeugdynamik, Essen: Haus der Technik, 2003
- [170] STALL, E., HEUSER, G.: *Neuartiges Prüfstandskonzept zur Darstellung des Radschlupfes für die Prüfung und Entwicklung von ABV und ABS*. Automobiltechnische Zeitschrift 4/1988
- [171] STEINER, W., UNGER, B., KALTENBÖCK, M., GATTRINGER, O.: *Advanced methods in fatigue simulations of transmission and engine components*. VDI Berichte Nr. 1665 Band 2: International Conference on Gears, Düsseldorf: VDI Verlag, 2002
- [172] STEINWEGER, T., WELTIN, U.: *Beschreibung elastischer Lager in MKS-Simulationen*. Tagung Elastische Lagerungen im Automobilbau, Essen: Haus der Technik, 1997
- [173] STEINWEGER, T., WELTIN, U.: *Mehrdimensionale Beschreibung elastischer Lager in MKS-Simulationen*. VDI-Berichte Nr. 1416: Schwingungen in Antrieben, Düsseldorf: VDI Verlag, 1998
- [174] TALBOTT, M., STARKEY, J.: *An Experimentally Validated Physical Model of a High-Performance Mono-Tube Damper*. SAE Paper #2002-01-3337, Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2002
- [175] TEWS, V.: *Zur iterativen Stellsignalbestimmung bei mehraxialen Prüfständen für Betriebslastensimulationen*. Fortschrittsberichte VDI Reihe 8 Nr. 172. Düsseldorf: VDI Verlag, 1988.
- [176] TROULIS, M., TYBISLAWSKI, M., NEHLS, O., GRAAF, R.: *Reifensimulation, Stand und neueste Entwicklung bei FORD*. Tagung Simulation in der Fahrzeugdynamik, Essen: Haus der Technik, 2003
- [177] UFFELMANN, F.: AUTDYN – ein digitales Simulationsrechenprogramm für die Fahrdynamik von Personenkraftwagen. Automobiltechnische Zeitschrift 2/1984
- [178] VDI BERICHTE NR. 444: *Berechnung im Automobilbau*, Düsseldorf: VDI Verlag, 1982
- [179] VDI BERICHTE NR. 537: *Berechnung im Automobilbau*, Düsseldorf: VDI Verlag, 1984
- [180] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *Auto Jahresbericht 1999*. Frankfurt am Main: 1999
- [181] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *Auto Jahresbericht 2002*. Frankfurt am Main: 2002
- [182] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *Auto Jahresbericht 2004*. Frankfurt am Main: 2004
- [183] VOIGT, U.: *Road to Rig test systems - new transmission & powertrain durability testing facility*. Advanced Transmission Design & Performance, Procdures of the 1999 Global Power Train Congress, Stuttgart, 1999
- [184] WAHLE, M., KOLM, H., LASAI, S., POHL, R.: *Schwingungsanalyse von Subsystemen mit Hilfe der Simulation*. Automobiltechnische Zeitschrift 102/2000
- [185] WAHLE, M., WEBER, M.: *Zum Stand von Komponentenmodellen im Rahmen der Fahrzeugsimulation*. Tagung Fahrwerk-Tech, München: TÜV Akademie, 2001
- [186] WANDERS, G.: *Prüfmaschinen für Federn und Bauteile*. Automobiltechnische Zeitschrift 1/1980

- [187] WANG, X., DENKER, D.: *Hydraulic Engine Mount Isolation for Improved Vehicle Vibration*. 12th European ADAMS Users's Conference, 1997
- [188] WEBER, J.: *Digital Mock-Up (DMU) und virtueller Fahrzeugbau*. Vorlesung „CAD in der Produktentwicklung“, München: Technische Universität München, 2004
- [189] WEID, D., NOACK, J., SAUTER, J., BANGERT, C.: *Schnelle und kostengünstige Entwicklung eines Vorderachs-Radbremsenkonzepts unter konsequenter Anwendung von CAE-Analysewerkzeugen und innovativen Optimierungsmethoden*. VDI Berichte Nr. 1864: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Düsseldorf: VDI Verlag, 2004
- [190] WEISS, D.: *Aktuelle Trends der Prüftechnik für Geräusch- und Schwingungsuntersuchungen an Fahrzeugbremsen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 373, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999
- [191] WEISS, R., OSEN, E.: *FEM-Berechnung von Elastomerbauteilen*. Automobiltechnische Zeitschrift 3/2001
- [192] WENZ, K., ROSE, B.: *Ruiniert per Gesetz?* Automobil Industrie 05/2003, Würzburg: Vogel Auto Medien GmbH
- [193] WHEELER, G., MANTRALA, A., ASHMORE, S. C., HODGES, H. C. JUN.: *Integration of virtual prototyping with instrumented testing of vehicles*. Warrendale, PA, U.S.A.: Society of Automotive Engineers, 2000
- [194] WILLUMEIT, H.-P., JÜRGENSOHN, TH.: *Fahrermodelle – ein kritischer Überblick*. Automobiltechnische Zeitschrift 7/8/1997
- [195] WOLFF, B., STEHLE, H.: *Das Porsche Entwicklungszentrum*. Automobiltechnische Zeitschrift 2/1973
- [196] ZENK, J.: *Get into the Groove*. testing technology international 09/2002, Dorking Surrey, UK: UK & International Press
- [197] ZOEPPRITZ, H.-P.: *Reifen und Reifendruck*. Automobiltechnische Zeitschrift 13/1942
- [198] DSHplus.
<http://www.fluidon.com/>
- [199] FEMFAT.
<http://www.femfat.com/>
- [200] Förderverein Bürgernetz für den Landkreis Günzburg e. V.
<http://www.bnv-gz.de/>
- [201] Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, Stuttgart
<http://www.fkfs.de/>
- [202] IST Instron Structural Testing Systems for Automotive Testing
<http://www.instron.de/ist/>
- [203] Lehrstuhl für Ergonomie an der TU München
<http://www.lfe.mw.tum.de/>
- [204] LMS International
<http://www.lmsintl.com/>
- [205] LS-DYNA
<http://www.lstc.com/>
- [206] MSC.Nastran.
<http://www.mscsoftware.com/>
- [207] MSC.Patran.
<http://www.mscsoftware.com/>

- [208] MTS Systems Corp.
<http://www.mts.com/>
- [209] TESIS DYNAware
<http://www.thesis.de/de/>
- [210] Simpack.
<http://www.simpack.com/>
- [211] STAR-CD
www.cd-adapco.com/
- [212] The MathWorks
<http://www.mathworks.com/>

9.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Aufgaben für Simulation, Prüfstände und Fahrversuch bei der Fahrdynamikentwicklung	2
Bild 2:	Rechenmaschine Zuse Z3 [200]	5
Bild 3:	Achsschwingungsprüfmaschinen für Gesamtfahrzeuge von Beissbarth [16]	7
Bild 4:	Prüfstand zur Untersuchung des Lenkverhaltens eines Kraftfahrzeugs	8
Bild 5:	Simulation der Überfahrt eines Fahrzeugs über ein großes Hindernis mit ADAMS [9]	9
Bild 6:	Drahtmodellardarstellung eines Fahrdynamikmodells [137]	10
Bild 7:	Flachbahneinheit [158]	12
Bild 8:	ABS HiL-Prüfstand [45]	13
Bild 9:	Übersicht eines repräsentativen Prüffelds der Automobilindustrie	16
Bild 10:	Klassifikation von Prüfständen	17
Bild 11:	Messung von Reifeneigenschaften auf der Teststrecke [201]	26
Bild 12:	Zweispurmodell [14]	31
Bild 13:	Modell einer HiL-Simulation	42
Bild 14:	Zuordnung Prüfstandsversuche, Simulation und HiL zu Entwicklungsphasen	51
Bild 15:	Veränderungen von Markt und Produkt	54
Bild 16:	Pkw-Neuzulassungen nach Segmenten der Jahre 1999-2002 [181], [182]	55
Bild 17:	Markteinführung und Beitrag zur aktiven Sicherheit bedeutender Innovationen [61]	56
Bild 18:	Entwicklung der Pkw-Exporte aus Deutschland 1998 bis 2003 [180] [182]	57
Bild 19:	10 Trends, die zur Veränderung der Lieferantenbeziehungen führen [114]	62
Bild 20:	Wachstumsmarkt Zulieferindustrie [181]	63
Bild 21:	Veränderung der Lieferantenbeziehung [30]	63
Bild 22:	Entwicklungsablauf und Schnittstellenmanagement	64
Bild 23:	Anzahl virtueller und realer Crashversuche bei der Entwicklung des T1	66
Bild 24:	Anzahl virtueller und realer Crashversuche bei der Entwicklung des T2	66
Bild 25:	Anzahl virtueller und realer Crashversuche bei der Entwicklung des E39REE	67
Bild 26:	Vergleich der Crashversuchskosten bei T1, T1REE und T2	68
Bild 27:	Mechanismen der Entstehung neuer Prüfstände	69
Bild 28:	Prüfungen zur Innovationsentwicklung	70
Bild 29:	Ertüchtigung durch technische Verbesserungen bzw. neue Prüfprinzipien	71
Bild 30:	Exponentielle Steigerung der verfügbaren Rechenleistung [72]	73
Bild 31:	Einflüsse auf die Beurteilung des Fahrverhaltens	74
Bild 32:	Auswirkungen der Handlungsfelder auf die Fahrwerksentwicklung	75
Bild 33:	Halbachsprüfstand mit frei schwingender Viertelfahrzeugmasse [208]	82
Bild 34:	LDS Prüfstand [124]	85
Bild 35:	Radhub über Spur-, Sturz- und Radlaständerung an einer Vorderachse – Vergleich von Simulationsmodell und Prüfstandsergebnis [159]	100
Bild 36:	Radhub über Spur-, Sturz- und Radlaständerung an einer Hinterachse – Vergleich von Simulationsmodell und Prüfstandsergebnis [159]	101
Bild 37:	Prüffeldkonzept für das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“	105
Bild 38:	Bemaßung der Prüfstände in Breite und Tiefe	105
Bild 39:	Strukturen der räumlichen Gestaltung	108
Bild 40:	Elemente und Verbindungen des Entwicklungszentrums	109
Bild 41:	Groblayout des Entwicklungszentrums (Erdgeschoss)	110
Bild 42:	Feinlayout des Prüffelds im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“	111
Bild 43:	Prozessmodell bei „Vollständiger Simulation“: Aufteilung in virtuelle und Prototypenphase	113

Bild 44: Prozessmodell bei „Vollständiger Simulation“: Gleichwertigkeit virtueller und physischer Integration	116
Bild 45: Konzept für das Prüffeld bei vollständiger Simulation	117
Bild 46: Feinlayout des Prüffelds bei „Vollständiger Simulation“	119
Bild 47: Vergleich der Prozessmodelle: Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ und Vision „Vollständige Simulation“	120

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1/Teil 1: Eigenschaften eines repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung.....	20
Tabelle 2/Teil 1: Weitere Eigenschaften des repräsentativen Prüffelds der Fahrwerksentwicklung	23
Tabelle 3/Teil 1: Eigenschaften, berechenbare Größen und erreichbare Genauigkeiten von Simulationsmodellen.....	36
Tabelle 4/Teil 1: Vergleich der mit Prüfständen und Simulationstools erreichbaren Genauigkeiten	47
Tabelle 5: Trends des internationalen Automobilmarkts und Folgen für die Fahrzeugentwicklung	60
Tabelle 6: Beispiele für Innovationen des nächsten Jahrzehnts [182].....	61
Tabelle 7: Auswirkungen der herrschenden Trends auf das Prüffeld.....	77
Tabelle 8: Auswirkungen der herrschenden Trends auf die Simulation	78
Tabelle 9: Veränderungen des Entwicklungsaufwands im Prüffeld der Zukunft	79
Tabelle 10: Vergleich der Eigenschaften von Fahrversuch, Prüfstand und Simulation in Bezug auf Lenkraddrehwinkel.....	97
Tabelle 11: Qualitäten virtueller Aussagen im Vergleich: heute vs. Szenario „Fortgeschrittene Simulation“	103
Tabelle 12: Flächenbedarfe der Prüfstände im Szenario „Fortgeschrittene Simulation“	106
Tabelle 13: Dauern der Entwicklungsphasen heute und bei vollständiger Simulation im Vergleich ...	115
Tabelle 14: Flächenbedarfe der Prüfstände bei vollständiger Simulation	118

9.4 Klassifizierungskriterien für Prüfstände

9.4.1 Versuchsumfang

Die Klassifizierungskriterien der Ordnungsgruppe *Versuchsobjekt* definieren, was der Gegenstand des Versuchs ist.

Gesamtfahrzeug

Als Gesamtfahrzeug wird ein komplett aufgerüstetes Fahrzeug bezeichnet.

Subsystem

Ein Subsystem ist ein Verbund von mehreren Komponenten, zum Beispiel eine Vorderachse oder eine Bremsanlage.

Komponente

Als Komponenten werden Einzelbauteile oder abgeschlossene Baugruppen bezeichnet, zum Beispiel ein Stossdämpfer, ein Achslager oder ein Stabilisator.

Prüfkörper

Prüfkörper sind Gegenstände, die eine andere Form als das eigentliche Bauteil haben. Ein Beispiel für die Verwendung von Prüfkörpern sind Zugproben, die bei der Ermittlung von Werkstoffeigenschaften geprüft werden.

9.4.2 Versuchskonzept

Die Klassifizierungskriterien der Ordnungsgruppe *Versuchskonzept* geben wieder, wie der Versuchsaufbau entwickelt wurde.

Ersatzversuch

Bei einem Ersatzversuch wurde darauf Wert gelegt, einen möglichst einfachen Aufbau zu erzielen. Zur bestmöglichen Komplexitätsreduktion wird bei Ersatzversuchs meist nur eine isolierte Eigenschaft des Prüflings geprüft.

Anwendungsversuch

Bei einem Anwendungsversuch liegt der Fokus auf einer möglichst exakten Wiedergabe der Prüflingsumgebung im Realbetrieb.

9.4.3 Übertragbarkeit

Die Klassifizierungskriterien der Ordnungsgruppe *Übertragbarkeit* geben Auskunft darüber, in wieweit die Prüfstandsergebnisse auf das Verhalten des Prüflings im Realbetrieb übertragen werden können.

Eindeutige Übertragbarkeit

Bei eindeutiger Übertragbarkeit kann direkt aus den Prüfstandsergebnissen auf das Straßenverhalten geschlossen werden.

Tendenzielle Übertragbarkeit

Bei tendenzieller Übertragbarkeit sind Erfahrungswerte nötig, um die Bedeutung der Prüfstandsergebnisse für das Straßenverhalten interpretieren zu können.

9.4.4 Belastung

Unter *Belastung* wird definiert, welchen Einflüssen der Prüfling während des Versuchs ausgesetzt wird.

Dabei wird nicht unterschieden, ob die Belastung vom Prüfstand aufgebracht wird, oder eine innere Reaktion des Prüflings auf die äußeren Belastungen darstellt. Zum Beispiel wird ein Bremsscheibe bei der Reibwertprüfung mechanisch und tribologisch belastet. Daraufhin findet eine innere Erwärmung statt. Nach dieser Definition setzt sich die Belastung daher aus mechanischen, thermischen und tribologischen Anteilen zusammen.

Mechanisch

Unter mechanischer Belastung wird das Einwirken von Kräften, Momenten bzw. Auslenkungen verstanden.

Thermisch

Unter thermischer Belastung wird das Einwirken von Temperaturänderungen auf den Prüfling verstanden. Temperaturänderungen können zum Beispiel durch innere Energieumwandlung oder durch eine Klimakammer verursacht werden.

Korrosiv

Korrosive Belastung bedeutet das Einwirken korrosiver Medien auf den Prüfling.

Erosiv

Erosive Belastung bedeutet das Einwirken eines flüssigen Mediums auf den Prüfling, bei dem Material abgetragen wird.

Tribologisch

Tribologische Belastung liegt vor, wenn der Prüfling gleichzeitig einer mechanischen Belastung und einer Relativbewegung ausgesetzt ist.

9.4.5 Anregung

Unter *Anregung* wird die Dynamik der Belastung, die dem Prüfling aufgeprägt wird, klassifiziert.

Statisch

Unter statischer Anregung wird zum einen das zeitlich konstante Halten eines Belastungswertes verstanden. Zum anderen wird die quasistatische Anregung dazugezählt, bei der die Belastungswerte so langsam verändert werden, dass der Prüfling keine dynamischen Effekte zeigt.

Mathematische Funktion

Unter mathematischen Zeitfunktionen werden Dirac-Impuls, Sprung- und Rampenfunktion sowie periodische Funktionen (insbesondere Sinusfunktionen) verstanden.

Gemessene/Berechnete Zeitfunktion

Unter gemessenen bzw. berechneten Zeitfunktionen werden alle Signale verstanden, die mit Hilfe von realen oder virtuellen Versuchen ermittelt wurden und auf dem Prüfstand nachgefahren werden sollen.

Stochastisches Rauschen

Unter Stochastischem Rauschen wird ein zufälliges Eingangssignal verstanden, das eine Gauß'sche Amplitudenverteilung aufweist (vgl. [51]).

9.4.6 Versuchssteuerung

Unter *Versuchssteuerung* wird definiert, wie die Durchführung des Versuchs gesteuert und überwacht wird.

Manuell

Bei manueller Versuchssteuerung wird der Versuch von einem Menschen gesteuert und überwacht.

Automatisierte Steuerung bzw. Regelung

Bei automatisierter Steuerung bzw. Regelung ist kein manueller Eingriff während des Versuchsablaufs nötig. Lediglich der Versuchsstart wird üblicherweise manuell ausgeführt.