

## **Integration von Fahrsimulatoren in den Entwicklungsprozess von aktiven Fahrwerksystemen**

### **Simulation and Simulator as a Part of the Development Process of Active Chassis Systems**

Dipl.-Ing. F. Fuhr, Aachen

Dipl.-Ing. Th. Schrüllkamp, Aachen

Dipl.-Psych. A. Neukum, Würzburg

Dipl.-Psych. M. Schumacher, Würzburg

#### **Zusammenfassung**

In modernen Kraftfahrzeugen kommen zunehmend semiaktive und aktive Fahrwerksysteme wie z.B. ABS, ESP oder elektromechanische Lenkkräfteunterstützungen zum Einsatz. Da bei diesen mechatronischen Systemen nicht nur mechanische Ausfallerscheinungen, sondern auch elektronische Systemausfälle und -störungen auftreten können, müssen bei der Systementwicklung aufwendige Sicherheitsfunktionen implementiert werden. Da der Mensch als wichtigstes Element des Regelkreises Fahrer - Fahrzeug - Umwelt die Fahrwerksysteme im einwandfreien als auch im Stör- oder Ausfallbetrieb beherrschen muss, ist die Integration des Fahrers in den Entwicklungsprozess unerlässlich. Insbesondere zur Erarbeitung von Sicherheitsstrategien bietet die Vernetzung der Entwicklungswerkzeuge Probandenfahrversuch, Rechensimulation und Fahrsimulation einen ganzheitlichen Ansatz. Die Vernetzung von Entwicklungsdisziplinen ist auch auf andere Bereiche der Fahrwerkentwicklung anwendbar.

#### **Summary**

In modern passenger cars the number of semiactive and active suspension systems e.g. ABS, ESP or electromechanical power steering systems is increasing rapidly. Due to the possibility of mechanical and electronical failures of these mechatronical systems, intelligent safety features have to be implemented within the development process. The human being as the most important element of the driver – vehicle – environment control loop must be capable of handling the suspension systems during normal driving conditions as well as during and after malfunctions. An integration of the driver into the development process of active suspension systems is therefore necessary. A holistic approach to derive safety strategies including the driver is the combination of the development tools driving test, computer simulation and driving simulation. The described combination of development tools can also be used for different fields in the suspension system development.

# 1 Einführung

Die Fahrzeugführung obliegt im Regelkreis Fahrer - Fahrzeug - Umwelt dem Fahrer (Abbildung 1). Der Fahrer versucht als Regler einem Sollkurs zu folgen und bei Abweichungen infolge äußerer Störeinflüsse den Istkurs dem Sollkurs wieder anzugleichen. Da die Adaptionmöglichkeiten des Reglers „Fahrer“ an die Regelstrecke „Fahrzeug“ begrenzt sind und der geschlossene Regelkreis ein dynamisches System darstellt, kann sich bei schnellem Ausregeln großer Kursabweichungen und unter dem Einfluss von Störgrößen das Gesamtsystem instabil verhalten. Abhilfe können unterschiedliche Systeme schaffen, die die aktive Sicherheit stark verbessern und gegebenenfalls durch autonomen Eingriff in das Fahrgeschehen die Konditionssicherheit des Fahrers und die Handhabung des Fahrzeugs deutlich unterstützen.

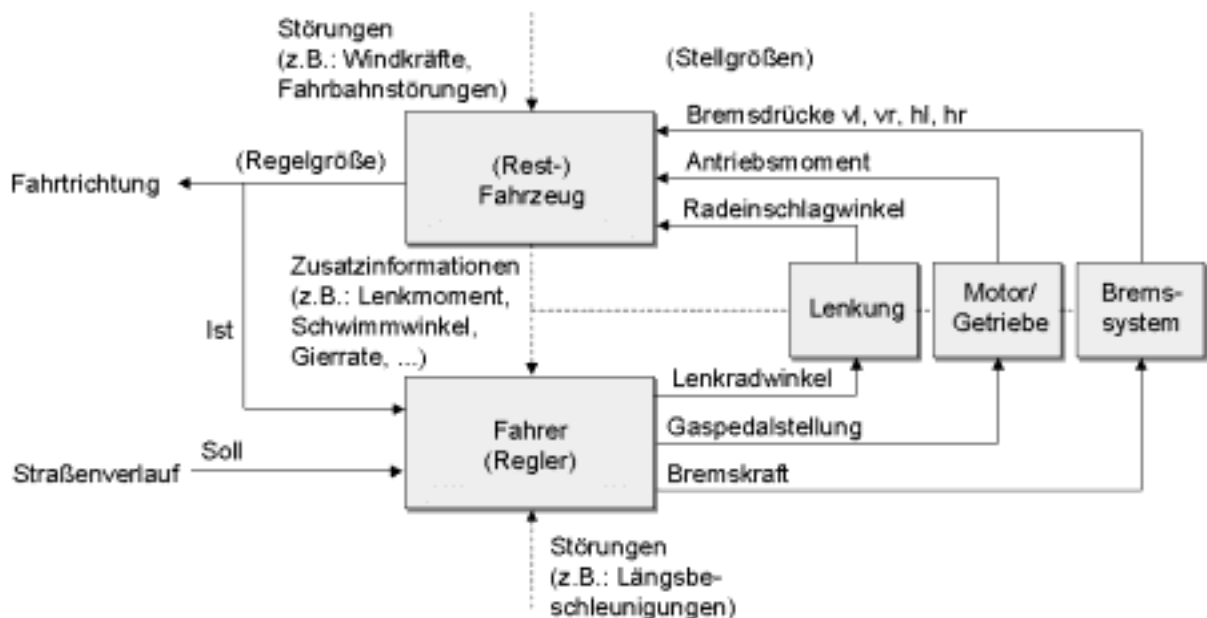


Abbildung 1: Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt / *driver – vehicle – environment control loop*

Diese Herausforderung stellt derzeit den Mittelpunkt in der Fahrwerkentwicklung dar. Daher wurden bestehende Regelsysteme stetig weiterentwickelt, um einen weiteren Beitrag zur aktiven Sicherheit und zum Fahrkomfort zu leisten. Für einen Fahrsicherheitsgewinn ist es jedoch zwingend erforderlich den Fahrer (Regler) in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Dies ist insbesondere bei Fahrwerkssysteme notwendig, die zukünftig verstärkt den Fahrer-eingriffe unterstützen. Als Beispiele sind hier die Entwicklung der Brems- und Lenkungssysteme zu nennen.

Zudem nimmt die Komplexität der Systeme beim Übergang von passiven über semiaktive zu aktiven Systemen stark zu. Der größere Einsatz von Elektronik und die Vernetzung stellt hierbei eine weitere Herausforderung an den Entwicklungsprozess.

## 1.1 Entwicklungsschritte in der Fahrwerktechnik

Eine grobe zeitliche Einteilung der Entwicklung von Fahrwerkssystemen ist im folgenden am Beispiel von Bremssystemen (Abbildung 2) dargestellt.

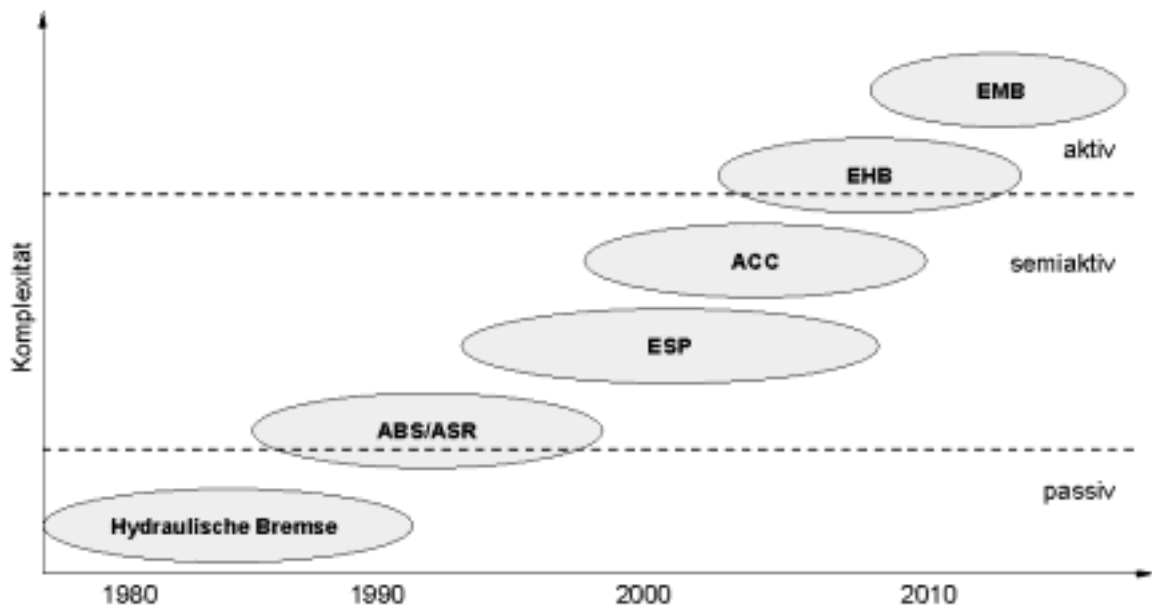


Abbildung 2: Entwicklungsstufen von Bremssystemen / *development stages of brake systems*

Ausgehend von der seit Jahrzehnten im Wesentlichen unveränderten hydraulischen Bremse stellte das Antiblockiersystem (ABS) erstmalig ein Bremssystem zur Erhöhung der aktiven Sicherheit dar, welches die Spurhaltung und Lenkbarkeit des Fahrzeugs bei maximaler Verzögerung sicherstellt. Eine Erweiterung des ABS ist die Antischlupfregelung (ASR), welche auf die Komponenten des ABS zurückgreift. Eine weitere Entwicklungsstufe des Bremssystems ist die Fahrdynamikregelung „Elektronisches Stabilitäts Programm“ (ESP). Dieses System, welches ein Ausbrechen des Fahrzeugs verhindert, stellt in vielen Fahrzeugklassen heute den Stand der Technik dar.

Ebenfalls heute schon in einigen Fahrzeugmodellen vorhanden, jedoch noch nicht in mittleren und unteren Fahrzeugklassen vertreten, sind die „Automatic Cruise Control“ (ACC) und die „Elektro-Hydraulische Bremse“ (EHB). Die ACC stellt eine Erweiterung des Fahrgeschwindigkeitstempomaten dar, die bei Unterschreiten einer definierten Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug eine Bremskraft aufbaut, um den Sicherheitsabstand nicht zu unterschreiten. Die EHB entspricht einer neuen Entwicklungsstufe der Fahrzeugbremse, bei

der ein Steuergerät die Fahrervorgabe Bremspedalweg verarbeitet, um mittels einer Hydraulik Bremskräfte aufzubringen. Als letzte aufgeführte Entwicklungsstufe ist die „Elektro-Mechanische Bremse“ (EMB) aufgeführt, bei der die hydraulische Bremskraftgenerierung der EHB durch eine mechanische in Form von Aktuatoren ersetzt wird. Derartige Bremssysteme sind in zukünftigen Kraftfahrzeugen zu erwarten.

Ebenso wie für Bremssysteme sind in Abbildung 3 die Entwicklungsstufen der Lenksysteme skizziert. Neben den rein mechanischen Lenksystemen ist bereits seit langem die servohydraulische Lenkung in allen Fahrzeugklassen weit verbreitet. Diese stellt in Abhängigkeit vom Lenkmoment dem Fahrer eine Lenkkraftunterstützung zur Verfügung. Eine Erweiterung der Servolenkung stellt die Servotronic dar, die mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit die Lenkkraftunterstützung für den Fahrer leicht reduziert. Hierdurch wird im Parkier- als auch im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ein sehr leichtgängiges Lenkrad realisiert, während für den Hochgeschwindigkeitsbereich die erhöhten Lenkmomente ein nervöses Lenkverhalten des Fahrzeugs verhindern.

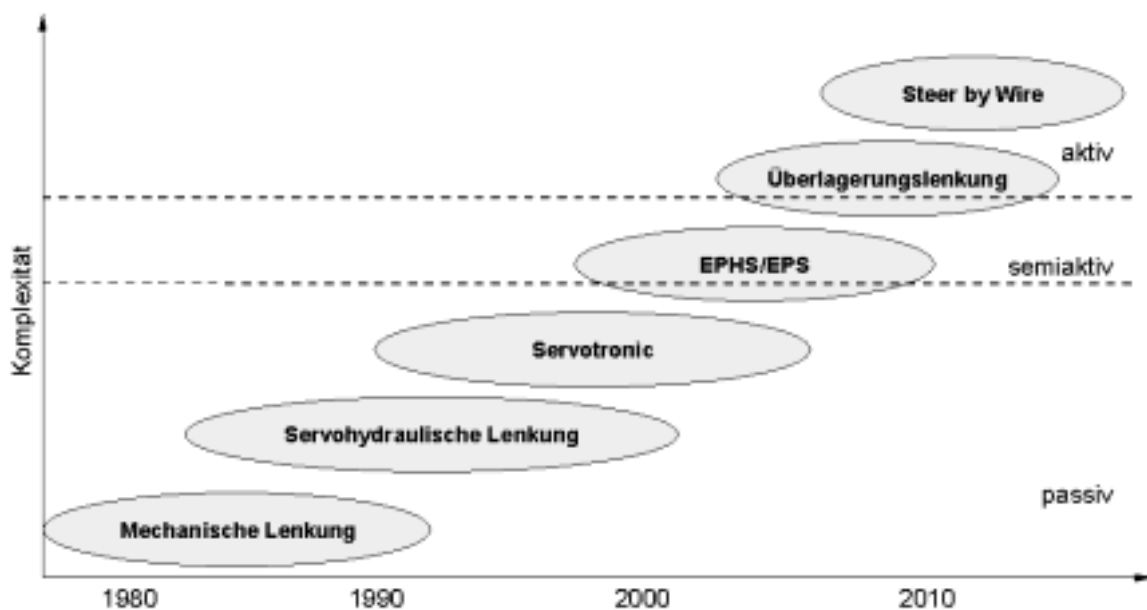


Abbildung 3: Entwicklungsstufen von Lenksystemen / *development stages of steering systems*

Eine Weiterentwicklung der servohydraulischen Lenkung bzw. Servotronic ist die elektrohydraulische Servolenkung (EPHS). Der wesentliche Unterschied zur hydraulischen Servolenkung besteht im Antrieb der Hydropumpe. Während die Flügelzellenpumpe beim konventionellen System üblicherweise über Keilriemen angetrieben wird, geschieht dies beim EPHS-System durch einen Elektromotor, der bedarfsgerecht angesteuert wird. Den Übergang der Lenkung zu semiaktiven Fahrwerksystemen stellt das „Electronic Power Steering“ (EPS) System dar. Hierbei wird die servohydraulische Kraftunterstützung durch einen elektronischen Aktuator ersetzt. Dies bietet den Vorteil, Hilfsenergie nur dann aufzuwenden, wenn

sie benötigt wird. Bisherige servohydraulische Lenkungen haben durch den Dauerbetrieb der Servopumpe eine permanente Leistungsaufnahme. Zudem bietet EPS die Möglichkeit, durch eine geeignete Regelung eine beliebig auslegbare Lenkkräftunterstützung zu realisieren. EPS Lenkungen sind bereits in einigen, aus energetischen Gründen meist Klein- oder Mittelklassefahrzeugen vertreten.

In naher Zukunft sind auch für Lenkungen aktive Systeme zu erwarten. In einem ersten Schritt wird dies durch die Überlagerunglenkung realisiert, die durch ein in den Lenkstrang integriertes Planetengetriebe den Fahrerlenkwinkel und einen Stellmotorwinkel summiert [1]. Durch eine geeignete Regelung des Stellmotors ist eine beliebig variable Lenkübersetzung als auch eine Kompensation von querdynamischen Störgrößen und eine Fahrzeugstabilisierung möglich. Die bei diesem System noch vorhandene mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Fahrzeigrädern gibt dem Fahrer eine direkte Rückmeldung über den querdynamischen Fahrzustand. Außerdem ist der mechanische Durchtrieb unter sicherheitstechnischen Aspekten eine langbewährte Lösung.

Der letzte aufgeführte Entwicklungsschritt ist ein „Steer by Wire“ System, bei dem der Lenkstrang zwischen Lenkrad und Fahrzeigrädern komplett aufgetrennt ist. Der vom Fahrer vorgegebene Lenkradwinkel wird über frei definierbare Kennfelder mittels Aktuatoren in Lenkbewegungen der Vorderräder umgesetzt, so dass die gleichen Vorteile der Überlagerunglenkung umgesetzt werden. Über einen Lenkaktuator wird dem Fahrer ein künstliches, ebenfalls frei definierbares Lenkmoment als Rückmeldung über den Fahrzustand vorgegeben. Abbildung 4 gibt einen Überblick darüber, welche Marktanteile für unterschiedliche Lenksysteme in naher Zukunft in Westeuropa zu erwarten sind.

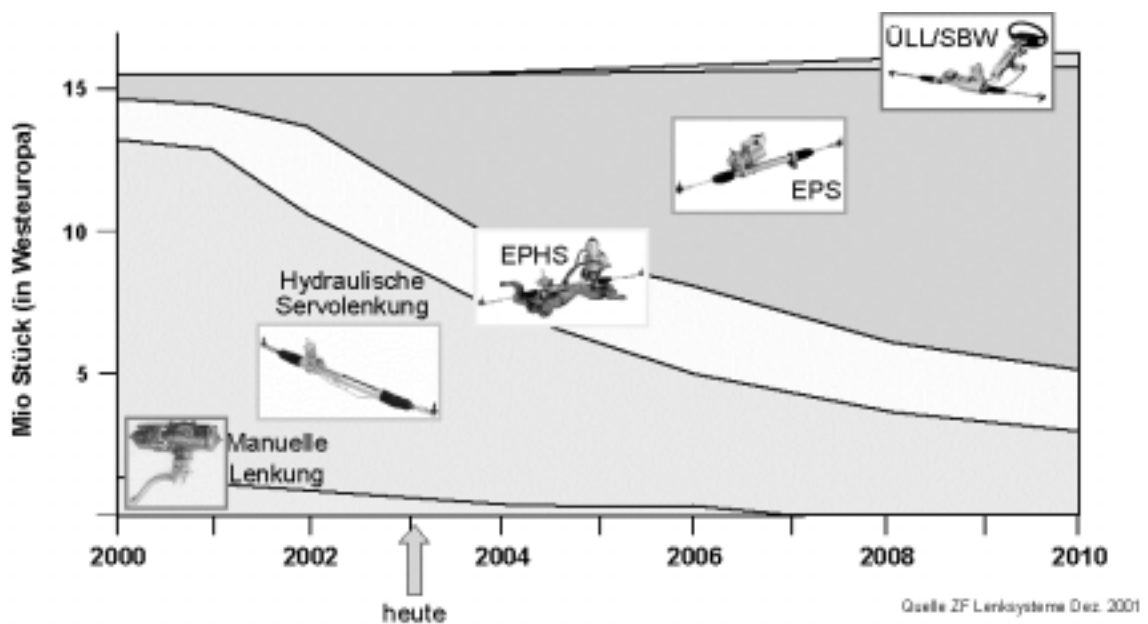


Abbildung 4: Entwicklungstendenzen verschiedener Lenkungssysteme / *development tendencies of different steering systems*

Ein Vergleich von herkömmlichen passiven und modernen aktiven Brems- bzw. Lenksysteme zeigt, dass bei jeder Generation dieser Systeme neue Funktionen hinzukommen. Wie bei den mechanischen Komponenten hydraulischer Lenkungen müssen auch die mechatronischen Systeme hohe Zuverlässigkeiten, Überwachbarkeiten und sichere Rückfallebenen aufweisen. Die Sicherheit ist durch entsprechende systemtechnische und konstruktive Gestaltung zu gewährleisten [3].

## 1.2 Sicherheitspotential von aktiven Systemen

Trotz dieser technischen Fortschritte existiert im Bereich der aktiven Sicherheit noch sehr viel Bedarf hinsichtlich der Entwicklung von Systemen zur Unfallvermeidung, um den hohen Stand der Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen zu erreichen (Abbildung 5).

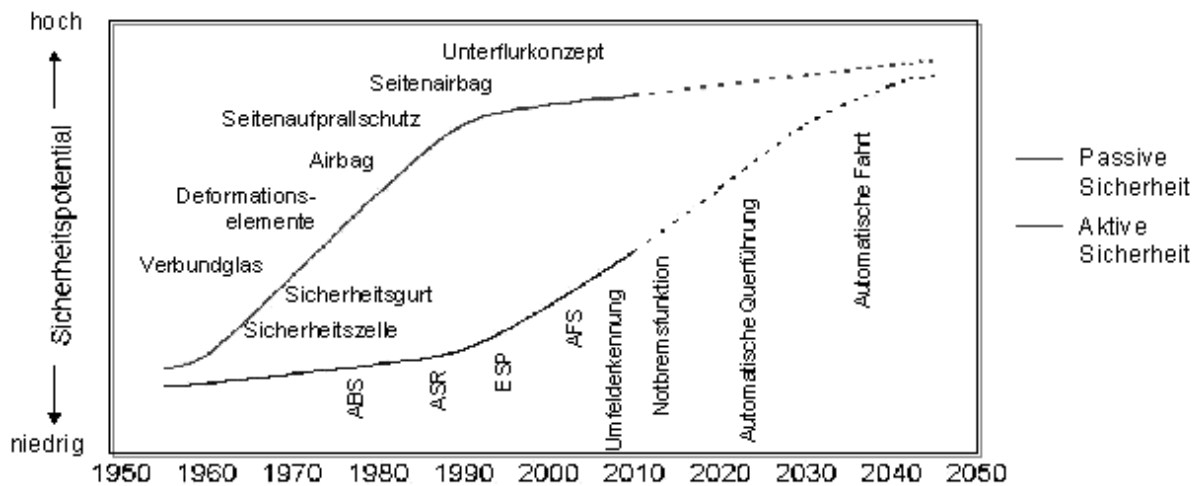


Abbildung 5: : Sicherheitspotential aktiver und passiver Systeme / *safety potential of active and passive systems*

In Abbildung 5 ist neben dem derzeit noch bestehenden Unterschied zwischen dem Sicherheitspotential aktiver und passiver Systeme verdeutlicht, dass das Potential passiver Systeme bereits eine gewisse Sättigung erfährt. Eine weitere Steigerung der Personensicherheit und eine weitere Reduktion der Anzahl verletzter und getöteter Verkehrsteilnehmer verspricht der Einsatz geeigneter aktiver Systeme.

Eine Analyse des Statistischen Bundesamtes zeigt, dass der Anteil von Mercedes Benz Personenwagen an Unfällen in der BRD nach der Serieneinführung von ESP 1999 von 15% auf 10,7% im Jahr 2001 gesunken ist. Außerdem zeigt die Untersuchung für den gleichen Zeitraum einen erheblichen Rückgang von Kollisionen mit Schwerstverletzten bei Mercedes Benz von 15% (1999) auf 5% (2001) .

### 1.3 Einbeziehung des Fahrers in den Entwicklungsprozess

Die Fortschritte in der Entwicklung von Fahrwerksystemen von passiven mechanischen Systemen zu aktiven mechatronischen Systemen sind mit einer Vielzahl von Vorteilen hinsichtlich Sicherheit und Funktionalität verbunden. Einher mit dieser Entwicklung geht auch ein enorm gesteigener Grad an Komplexität. Diesem Aspekt muss im Hinblick auf den geschlossenen Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt im Entwicklungsprozess der Systeme Rechnung getragen werden.

Insbesondere dem Fahrer kommt bei dieser Betrachtung eine entscheidende Rolle zu. Zum einen muss er in der Lage sein, das Fahrzeug bei einwandfreier Funktion aller Systeme problemlos zu führen. Bei allen Vorteilen und erweiterten Funktionalitäten, die moderne Fahrwerksysteme bieten, müssen die Fahrzeugreaktionen infolge einer Fahrervorgabe in einem für den Fahrer sinnvollen und nachvollziehbarem Zusammenhang stehen. Außerdem sollte der Fahrer eine plausible, für ihn gut verständliche Rückmeldung über den aktuellen Fahrzustand erhalten.

Durch den verstärkten Einsatz mechatronischer Komponenten sind bei modernen Fahrwerksystemen nicht nur „klassische“, meist mechanische Ausfallerscheinungen, sondern auch elektronische Störbilder bis hin zum Systemausfall möglich. Diese Störungen haben Auswirkungen auf die Fahrzeugreaktion und damit auch auf das Verhalten des Fahrers. Im folgenden wird beispielhaft eine Störung einer EPS Lenkung im Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt erläutert (Abbildung 6).

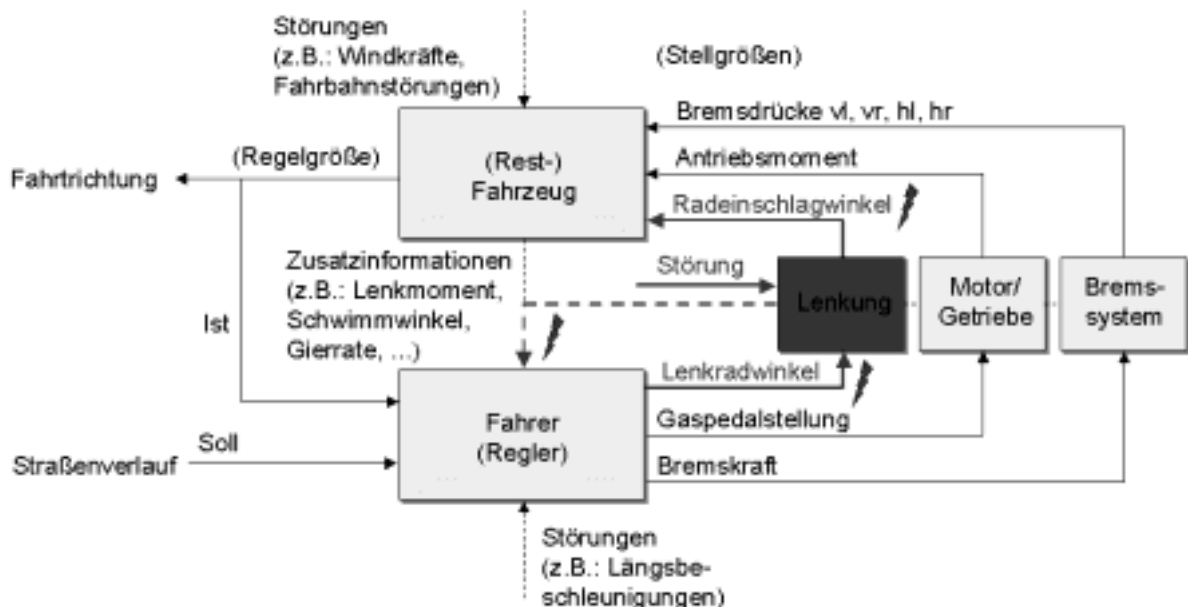


Abbildung 6: Auswirkung einer Systemstörung auf den Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt / influence of a system malfunction on the driver – vehicle – environment control loop

Abhängig von der Art des Lenksystems sind unterschiedliche Fehlerbilder denkbar. Bei EPS Lenksystemen kann durch Fehler in elektronischen Komponenten die Lenkunterstützung beeinträchtigt werden. Weitere denkbare Fehlerbilder sind unbeabsichtigte Selbstaktivitäten der Lenkung sowie eine dem Fahrzustand nicht angepasste Lenkunterstützung [2].

Gegenüber der herkömmlichen hydraulischen Servolenkung ist der Zustand zwischen dem Auftreten eines Fehlers und dem Abschalten des Systems bei elektrischen Servolenkungen signifikant anders. Während das üblicherweise angenommene schlimmste Ausfallverhalten der Hydrolenkung in einer schnell abfallenden Lenkunterstützung besteht, kann bei der EPS zwischen Auftreten des Fehlers und Selbstabschaltung nach Erkennen des Fehlers prinzipbedingt ein Selbstlenken mit maximalem Lenkmoment auftreten.

Das Ausfallverhalten der EPS-Lenkungen wurde entsprechend des angenommenen Zeitverhaltens in folgende Bereiche aufgeteilt (Abbildung 7).

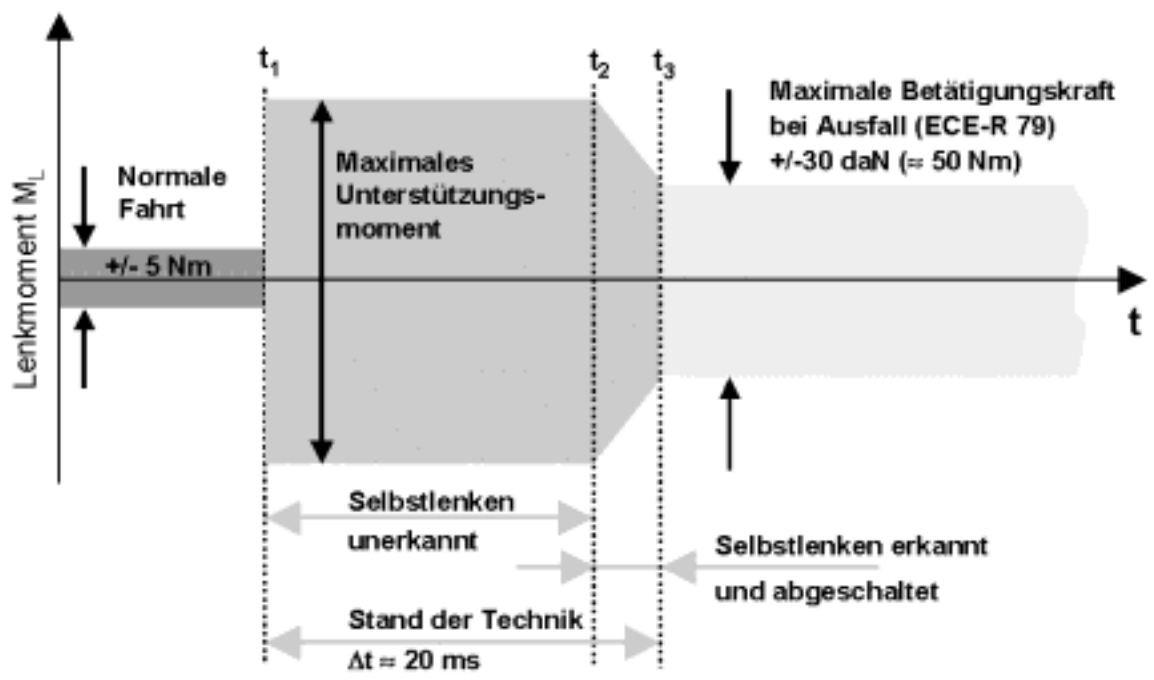


Abbildung 7: Ausfallverhalten einer EPS Lenkung / *behaviour of an EPS steering system during system failure*

vor  $t_1$ : System im fehlerfreien Betrieb.

$t_1 < t < t_2$ : Fehler ist aufgetreten, aber noch nicht erkannt und Fehlerbehandlung dementsprechend noch nicht aktiviert. System führt undefiniertes Selbstlenken aus.

$t_2 < t < t_3$ : Fehler ist erkannt und Fehlerbehandlung eingeleitet, hat jedoch noch keine Auswirkung auf den Motor, so dass immer noch undefiniertes Selbstlenken vorliegt.

nach  $t_3$ : System ist abgeschaltet und in definitionsgemäß sicherem Zustand. Es wird davon ausgegangen, dass die EPS im ausgefallenen Zustand genauso unproblematisch wie konventionelle Hydrolenkungen ist.

Unter Berücksichtigung der realen Systemeigenschaften ausgeführter EPS-Systeme ist die Zeitspanne  $t_3-t_1$  signifikant kleiner als die Reaktionszeit des Fahrers. Es kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass das Auftreten des Fehlers durch den Fahrer kompensiert werden kann [4][10].

## **2 Definition kritischer Einflussgrößen und Integration unterschiedlicher Untersuchungsmethoden**

Um schwerwiegende Folgen von elektronisch verursachten Systemstörungen zu vermeiden, muss die Entwicklung moderner, aktiver Fahrwerksysteme umfangreiche Sicherheitsstrategien beinhalten. Durch geeignete Systemarchitekturen muss der Fahrer während und nach einer Systemstörung in die Lage versetzt werden, das Fahrzeug auch im Störfall sicher zu führen. Zur Erarbeitung adäquater Sicherheitskonzepte ist die Integration des Fahrers in den Entwicklungsprozess von Fahrwerksystemen unerlässlich.

Als Anwendungsbeispiele werden im Folgenden Versuchsanordnungen und Studienergebnisse aus Sicherheitsuntersuchungen aufgeführt, deren Ziel die Ausarbeitung maximal zulässiger Störungsgrößen für aktive Lenksysteme war.

Ausgangspunkt jeder Untersuchung zur Frage von Störungsauswirkungen auf das Fahrverhalten des Gesamtsystems ist die Frage der Definition relevanter Fahrsituationen und -manöver. Die Kritizität einer Fahrsituation ist abhängig von multiplen Einflussfaktoren, wie z.B.

- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Streckenführung
- Fahrbahnbreite
- Beladungszustand des Fahrzeugs
- Verkehrssituation
- Tageszeit/Sichtverhältnisse
- Fahrbahnreibung

Hinzu kommen zusätzliche Einflüsse durch mögliche Variationen und Kombinationen der zu untersuchenden Systemstörungen, welche bekannt und klar definiert sein müssen. Für den betrachteten Fall einer EPS Störung umfassen die Variationsmöglichkeiten der Systemstörung folgende Parameter:

- Fehleramplitude
- Fehleraufschaltdauer
- Übergangsverhalten

Um maximal zulässige Störungen eines aktiven Lenkungssystems zu ermitteln, bei denen der Fahrer noch in der Lage ist, das Fahrzeug zu handhaben, wird eine Vernetzung der Entwicklungswerkzeuge Fahrversuch, Rechnersimulation und Fahrsimulator vorgenommen (Abbildung 8).



Abbildung 8: Vernetzung unterschiedlicher Entwicklungswerkzeuge / *combination of different development tools*

Allgemein können die durch jedes eigene Werkzeug erarbeiteten Ergebnisse für die beiden anderen genutzt werden. So können z.B. mittels Fahrversuchen relevante Störbildbereiche eingegrenzt werden. Die integrative Betrachtung aller Ergebnisse ermöglicht eine Aussage darüber, welche Systemstörungen im alltäglichen Fahrbetrieb zulässig, d.h. nicht sicherheitskritisch, sind. Im folgenden wird auf die einzelnen Untersuchungswerkzeuge und ihre Funktion detailliert eingegangen.

## 2.1 Der Probandenfahrversuch

Untersuchungen im Realfahrzeug sind durch die reale Fahrer – Fahrzeug Kombination am besten zur Identifizierung relevanter Fahrmanöver und Fehlerbilder geeignet. Fahrversuche stellen zudem die Grundlage zur Abstimmung und Validierung der Rechnersimulation und der Fahrsimulation dar.

Die Auswahl der Fahrmanöver, bei denen eine Systemstörung eingeleitet wird, ist von entscheidender Bedeutung für die Aussagekraft der Untersuchung. Die Manöver müssen zum einen für die jeweilige Aufgabenstellung geeignet sein, dürfen die Normalfahrer bei voll funktionsfähigem Fahrzeug jedoch nicht überfordern. Eine Durchführung von Definitionsversuchen mit wenigen Fahrern hat sich als geeignete Maßnahme erwiesen, um die Vielzahl möglicher Versuche auf die für die jeweilige Untersuchung sinnvollen Fahrmanöver zu reduzie-

ren. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der hohen Zeit- und Kostenaufwands von Probandenfahrversuchen notwendig. Außerdem können „Worst Case“-Fahrzustände ausgemacht werden, die in der Hauptuntersuchung intensiv zu beachten sind. Idealerweise ergeben sich aus diesen Anforderungen Fahrmanöver, die einen Bezug zu alltäglichen oder zumindest im Alltag möglichen Verkehrssituationen haben.

Nachdem relevante Fahrmanöver und Fehlerbilder festgelegt wurden, wird die Versuchsplanung unter Zuhilfenahme aller Entwicklungswerkzeuge festgelegt. Zur Abschätzung der fahrdynamischen Folgen einer Systemstörung kommt der Closed Loop Untersuchung im Realfahrzeug noch immer der zentrale Stellenwert zu. Um die Bandbreite der heterogenen Fahrerhaltensmuster [8] abzudecken, ist eine ausreichend große Anzahl von Probanden notwendig. Alle Fahrer absolvieren ein definiertes Versuchsprogramm mit variierenden Manövern und Fehlerbildern [4].






					
<b>Fehler 1</b>					
<b>Fehler 2</b>					
<b>Fehler 3</b>					
...					

Abbildung 9: Versuchsmatrix des Probandenversuchs für alle Fahrer / *test program for driving tests*

Für den Probandenfahrversuch wird ein Versuchsfahrzeug verwendet, das mit einer EPS Lenkung ausgestattet wurde. Um die tolerierbaren Störgrößen zu ermitteln, ist eine synthetische Aufschaltung der möglichen Störbilder vorgesehen. Hierbei ist eine Abstufung der Störungsintensität in kleinen Schritten vorgesehen, um die Toleranzgrenzen möglichst genau bestimmen zu können.

Neben der Störgrößenaufschaltung ist das Fahrzeug mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, um zum einen fahrdynamische Größen wie z.B. Fahrzeuggeschwindigkeit, Gierrate und Querschleunigung als auch die Rückwirkung der Störung auf den Fahrer, in diesem Fall über das Lenkrad, zu erfassen (Abbildung 10). Eine Übersicht von im Rahmen einer Studie aufgezeichneten Messgrößen gibt Tabelle 1.

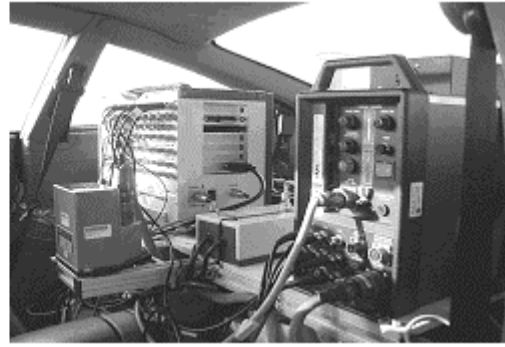


Abbildung 10: Messtechnische Ausrüstung eines Versuchsfahrzeugs / *measurement equipment in a test vehicle*

Messgerät	Messgröße	Messbereich	Auflösung
Datron-Messlenkrad	Lenkradwinkel (umschaltbar)	1 V = 125°: ±1250° 1 V = 20°: ± 200°	0,6° 0,1°
	Lenkmoment (umschaltbar)	1 V = 5 Nm: ± 50 Nm 1 V = 1 Nm: ± 10 Nm	0,02 Nm 0,01 Nm
Kreiselstabilisierte Messplattform	Längs-, Querbearbeitung	1 V = 0,2 g ± 1,2 g	0,001 g
	Giergeschwindigkeit	1 V = 10°/s ± 60°/s	0,06°/s
	Gierwinkel	1 V = 36° ± 180°	0,2°
	Wank-, Nickwinkel	1 V = 10° ± 60°	0,06°
Correxit Sensor	Längsgeschwindigkeit (einstellbar)	0 V bis 10 V: bis 25 mV/km/h	0,1 km/h
	Quergeschwindigkeit (einstellbar)	-5 V bis 5 V: bis 25 mV/km/h	0,1 km/h

Tabelle 1: Verwendete Messtechnik und aufgezeichnete Daten / *measurement equipment and recorded data*

Die Auswertung der Probandenversuche erfolgt nach objektiven Kriterien anhand von fahrdynamisch Messdaten als auch nach subjektiven Kriterien der Probanden, welche mittels Fragebögen ermittelt werden. Aus der Kombination dieser Datenquellen werden Aussagen hinsichtlich tolerierbarer Störungsgrenzwerte abgeleitet.

Objektive Kriterien können z.B. folgende sein:

- Lenkwinkel  $|\delta_{L,max} - \delta_{L,mittel}| [^\circ]$ ,  $|d\delta_{L,max}| [^\circ/s]$
- Lenkmoment  $|M_{L,max} - M_{L,mittel}| [Nm]$
- Schwimmwinkel  $|\beta_{max} - \beta_{mittel}| [^\circ]$
- Gierwinkelgeschwindigkeit  $|d\psi_{max} - d\psi_{mittel}| [^\circ/s]$ ,  $|d\psi_{max}| [^\circ/s]$ ,  $|dd\psi_{max}| [^\circ/s^2]$
- Querbearbeitung  $|a_{quer,max} - a_{quer,mittel}| [g]$
- Spurbreitenbedarf (SBB)  $|\Delta y| [cm]$

Als Beispiel für die Folgen einer Störgrößenaufschaltung in den Lenkstrang ist in Abbildung 11 der Spurbreitenbedarf (SBB) während eines Probandenfahrmanövers dargestellt.

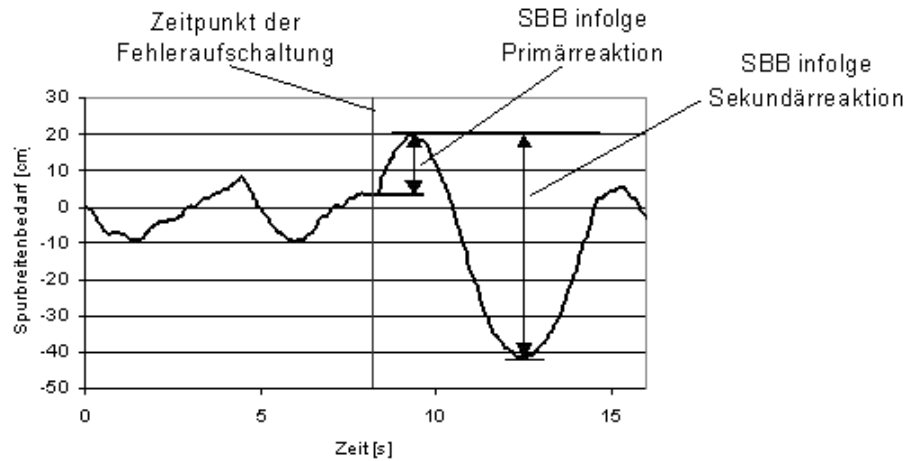


Abbildung 11: Spurbreitenbedarf infolge Primär- und Sekundärreaktion / *track deviation due to primary and secondary reaction*

Wie in Abbildung 11 deutlich zu erkennen, weist oftmals nicht die Fahrzeugreaktion unmittelbar nach Auftreten der Störung, die sogenannte Primärreaktion, die größten querdynamischen Veränderungen auf, sondern die resultierende Fahrzeugreaktion infolge der Fahrerregeltätigkeit, welche als Sekundärreaktion bezeichnet wird.

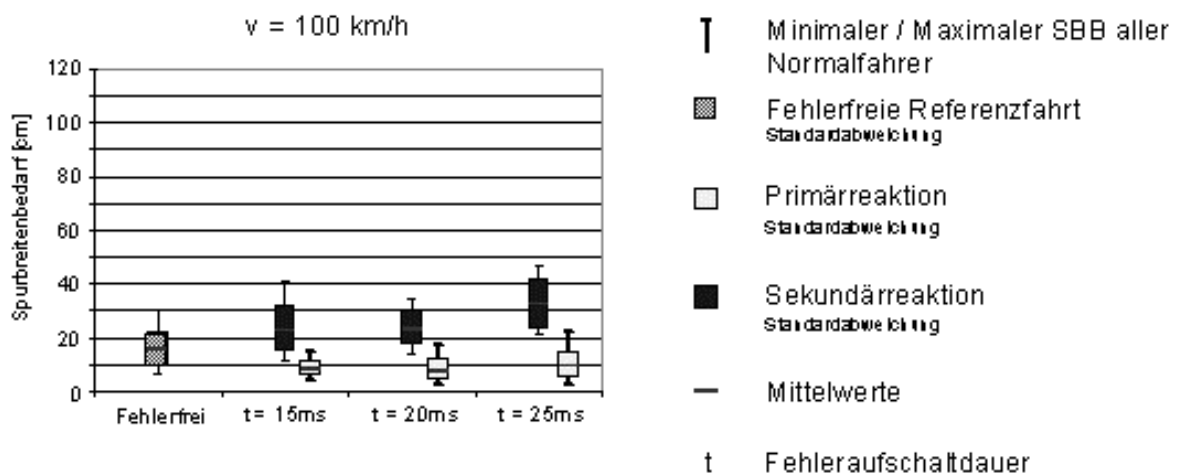


Abbildung 12: Spurbreitenbedarf infolge Primär- und Sekundärreaktion bei Geradeausfahrt / *track deviation due to primary and secondary reaction during straight-ahead driving*

Neben den aufgezeichneten objektiven Messgrößen werden die Probanden während der Fahrversuche nach ihren subjektiven Eindrücken befragt. Hierfür sind geeignete Fragestellungen sowie eine klar verständliche, eindeutig abgestufte Punkteskala der Bewertung notwendig. Subjektive Kriterien können folgende sein [10]:

- Beherrschbarkeit des Fahrzeugs
- Subjektives Sicherheitsempfinden
- Subjektive Spurbabweichung
- Gefährdung der Hände

Die Kombination objektiver und subjektiver Daten ermöglicht eine Aussage hinsichtlich Toleranzgrenzen für eine Beeinträchtigung der von den Probanden subjektiv empfundenen Sicherheit als auch Grenzwerte bzgl. fahrdynamisch kritischer Situationen (Abbildung 13).

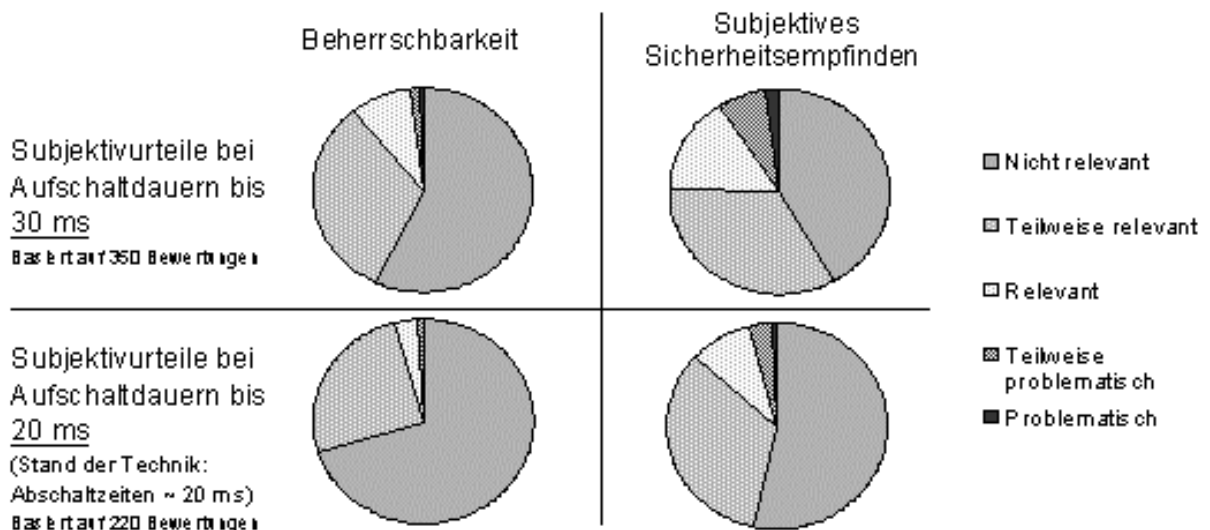


Abbildung 13: Subjektive Beurteilung unterschiedlich intensiver Störungen / *subjective assessment of malfunctions with different intensity levels*

Ergänzend werden physiologische Reaktionen des Fahrers, wie z.B. die Pulsfrequenz erhoben. Aufgrund der meist geringen Spezifität physiologischer Parameter werden diese Messungen vor allem zur Validierung subjektiver Kriterien (z.B. Beanspruchung des Fahrers) herangezogen.

Der Vorteil des Probandenversuchs besteht darin, dass durch die Verwendung eines realen Fahrzeugs inklusive der betrachteten Fahrwerkkomponente der Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt ohne Verfälschungen abgebildet wird.

Nachteile des Fahrversuchs bestehen darin, dass nur ein Teil der im Straßenverkehr vorhandenen Situationen im Teststreckenbetrieb dargestellt werden kann. So ist z.B. das Vorsehen eines hohen Verkehrsaufkommens bzw. dichter Gegenverkehr aus sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich. Auch hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten sind insbesondere mit Normalfahrern nur bedingt durchführbar. Schwierig gestaltet sich eine Variation von Fahrzeugparametern wie z.B. unterschiedliche Beladungszustände und Umweltbedingungen, welche nur mit großem Aufwand zu realisieren sind. Außerdem ist der große Personalaufwand und die hohen Kosten zu beachten. Diese Defizite des Probandenfahrversuches werden teilweise durch den Einsatz der beiden anderen Entwicklungswerkzeuge kompensiert.

## 2.2 Die Rechnersimulation

Die Rechnersimulation dient dazu, die Regelstrecke Fahrzeug und deren Reaktionen auf unterschiedliche Systemstörungen unter unterschiedlichsten Bedingungen zu untersuchen. Wichtig für zuverlässige Aussagen ist eine genaue Abstimmung des Simulationsmodells für den normalen als auch den Störbetrieb anhand von ausgewählten Open Loop Fahrmanövern. Für die Rechnersimulation werden üblicherweise in der Fahrwerkentwicklung weit verbreitete Programme wie z.B. das Mehrkörpersimulationsprogramm ADAMS oder die Software MATLAB/SIMULINK verwendet. Unabhängig von der verwendeten Software ist eine sorgfältige Abstimmung und Validierung eines um das aktive Lenksystem erweiterte Fahrzeugmodell anhand von Standardfahrmanövern, die während der Fahrversuche durchgeführt wurden, notwendig.

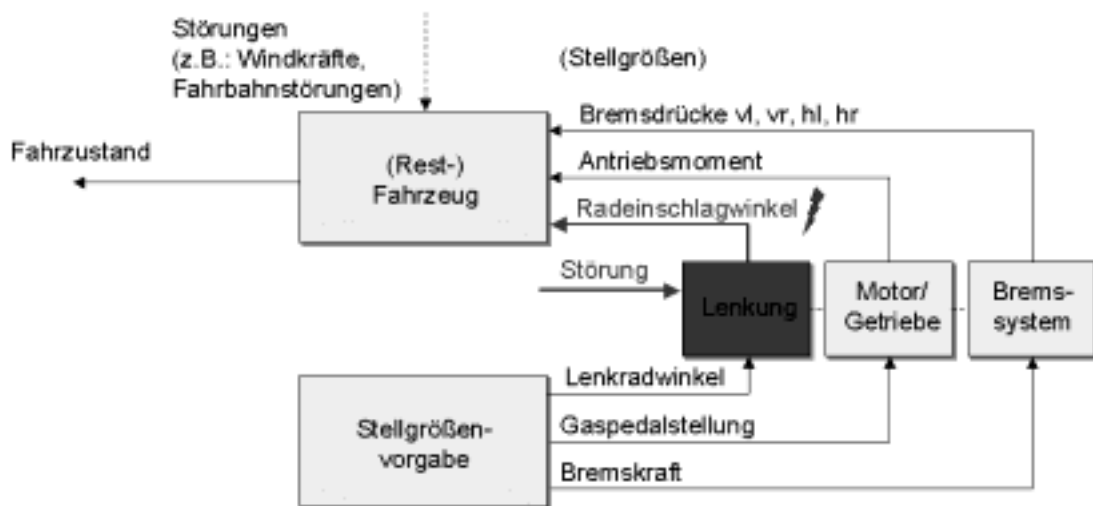


Abbildung 14: Aufgetrennter Regelkreis zur Untersuchung von Fahrzeugreaktionen / *open control loop for analysis of vehicle reactions*

Zuverlässige Modellierungen von Fahrerreaktionen infolge von Systemstörungen sind mit Hilfe der Simulation bislang nur sehr bedingt möglich. Die insbesondere bei anspruchsvollen Manövern große Varianz der Fahrerreaktionen und die nicht bekannte Gewichtung unter-

schiedlicher Einflüsse führen dazu, die Rechnersimulation ausschließlich zur Untersuchung der Fahrzeugreaktionen infolge von Systemstörungen zu verwenden (Open Loop). Aus regelungstechnischer Sicht kommt dies einer Auftrennung des geschlossenen Regelkreises Fahrer – Fahrzeug – Umwelt gleich, so dass der aktuelle Fahrzustand des Fahrzeugs keine Auswirkung auf die Stellgrößen hat (Abbildung 14).

Trotz der Nichtberücksichtigung des Fahrers eignet sich die Rechnersimulation, um Einflüsse unterschiedlicher Parametervariationen auf die Reaktionen der Regelstrecke Fahrzeug infolge von Störungen zu untersuchen. Durchgeführte Versuchsreihen können z.B. folgende Aspekte behandeln:

- Einfluss der Beladungszustände bei Systemstörungen
- Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit bis hin zu Höchstgeschwindigkeiten bei Systemstörungen
- Einfluss der Fahrbahnreibwerte bei Systemstörungen
- Systemstörungen unter „Worst Case“ Bedingungen

Die Ergebnisse geben Hinweise darauf, unter welchen Bedingungen eine Störung zu besonders starken Fahrzeug- oder Lenkstrangreaktionen führt, Abbildung 15. Somit gibt die Rechnersimulation wichtige Hinweise für die Entwicklung der Fahrwerkkomponenten und eignet sich auch für Trendabschätzungen für Manöver, die in den Probandenfahrversuchen aus Sicherheitsgründen nur in einem eingeschränkten Bereich abgedeckt werden.

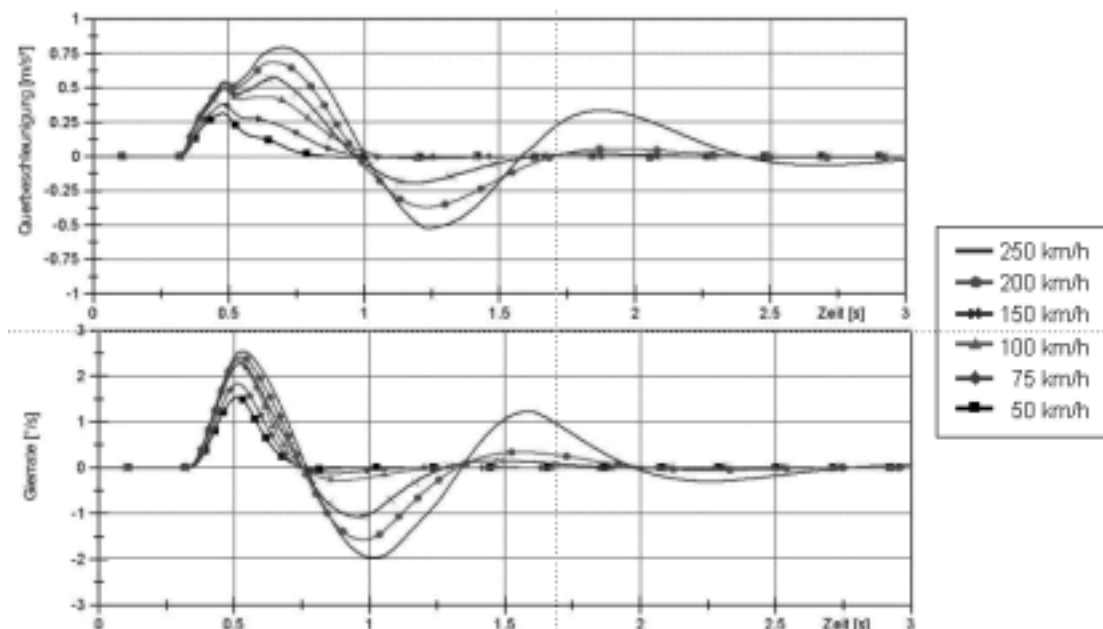


Abbildung 15: Fahrzeugreaktion infolge einer Lenksystemstörung für unterschiedliche Geschwindigkeiten/ *vehicle reaction due to steering system disturbance for different velocities*

Um die Interaktion der einzelnen Entwicklungswerkzeuge optimal zu nutzen, besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse der Rechnersimulation in die Probandenversuche einfließen zu lassen. So können z.B. die „Worst Case“ Szenarien in Fahrsimulatorversuchen eingebunden werden, um zu prüfen, für welche Störungen der Fahrer die sichere Kontrolle über das Fahrzeug behält.

Die Vorteile der Rechnersimulation sind die relativ geringe Entwicklungsdauer des Modells, die hohe Flexibilität hinsichtlich Parametervariationen und die dadurch geringen Kosten. Nachteile entstehen durch die im Rahmen von Simulationen bestehenden Unterschiede zu realen Fahrzeugreaktion und die Vernachlässigung des Fahrers als Regler. Hinsichtlich eines geeigneten, zuverlässigen Fahrermodells zur Abbildung von Probandenreaktionen infolge Systemstörungen besteht noch Forschungsbedarf, da durch das Vorhandensein eines solchen Modells der Regelkreis geschlossen und die Nutzung der Rechnersimulation deutlich ausgeweitet werden würde.

### **2.3 Die Fahrsimulation**

Fahrsimulatoren werden zunehmend häufiger in Untersuchungen zur aktiven Sicherheit eingesetzt. In Abhängigkeit vom Untersuchungsgegenstand müssen dabei unterschiedlich hohe Anforderungen an die realitätsgetreue Darstellung in der Simulation formuliert werden. Bezüglich der Aussagekraft und Übertragbarkeit der Ergebnisse wird dabei grundsätzlich die Unterscheidung zwischen der sog. relativen und absoluten Validität getroffen:

- Die relative Validität ist notwendiges Kriterium für den Einsatz von Fahrsimulatoren. Gefordert wird hierbei, dass Auswirkungen der experimentell vorgenommenen Bedingungsvariation sich in gleicher Richtung bewegen wie dies in realer Umgebung zu beobachten ist.
- Absolute Validität ist dagegen gekennzeichnet durch die numerische Übereinstimmung in den zur Beschreibung herangezogenen Verhaltensparametern (v.a. Bedieneingaben und daraus resultierenden Fahrzeugreaktionen).

Während z.B. in Untersuchungen zur Fahrtüchtigkeit (z.B. Müdigkeit, Wirkung psychotroper Substanzen) oder zur Wirkung von Nebenaufgaben durchgängig relative Validität gefordert ist, sind die Anforderungen im Bereich der Bewertung fahrdynamischer Eigenschaften sehr viel höher. Hier ist eine möglichst realitätsgetreue Darstellung multisensorischer Informationen notwendig, d.h. neben visuellen und akustischen Signalen müssen vor allem auch haptische und kinästhetische Informationen vermittelt werden. Während im Hinblick auf die Rolle visueller Informationen bei der Bewegungswahrnehmung bereits einige Forschungsbefunde vorliegen, besteht, wie neuere Literaturübersichten zeigen [6], in Bezug auf die Bedeutung kinästhetischer und haptischer Signale derzeit noch erheblicher Forschungsbedarf. Verschiedene Arbeiten weisen darauf hin (z.B.[11]), dass die Rolle dieser Informationen für das Fahrerverhalten bislang unterschätzt wurde und dass insbesondere Lenkverhalten bzw.

Querführung stark durch propriozeptiv vermittelte Bewegungsinformationen beeinflusst werden.

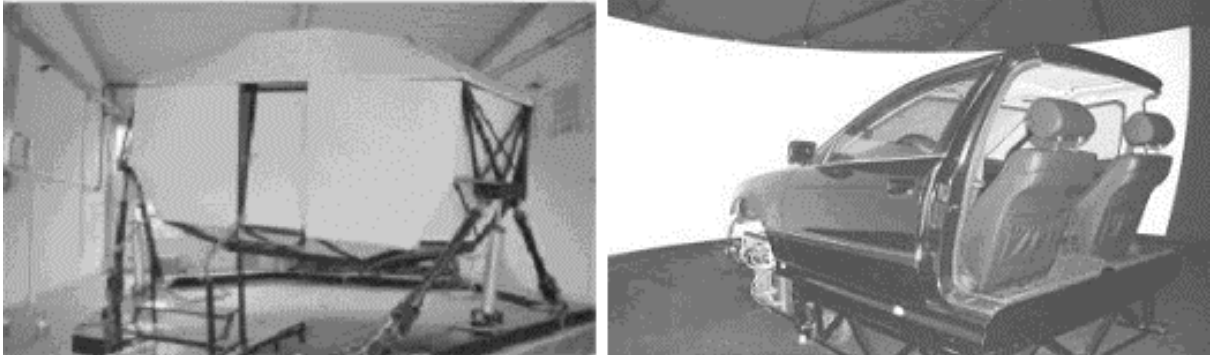


Abbildung 16: Der Fahrsimulator des IZVW Würzburg / *The IZVW driving simulator of the*

Der Untersuchung des Fahrerverhaltens in Folge von Lenksystemstörungen gehen deshalb aufwändige Abstimmungsarbeiten in Hinblick auf Lenkstrang und Fahrzeugmodell voraus. Wie für die Rechnersimulation werden dazu Messwerte verwendet, die im Realfahrzeug ermittelt wurden. Diese im Open Loop erhobenen Daten beschreiben die Fahrzeugreaktion im Störfall und bilden die Basis der Validierungsarbeiten. Die Güte der Umsetzung der Fahrzeugmodelldaten durch das Bewegungssystem ist wiederum über direkte Messungen zu bestimmen. Ein letzter Anpassungsschritt erfolgt unter Einbeziehung von Probanden, deren Bedieneingaben aus Realfahrzeug und Simulator verglichen werden. Neben diesen objektiven Daten werden weiterhin subjektive Beurteilungen der Anpassungsgüte herangezogen.

Deutliche Einschränkungen ergeben sich aufgrund der Eigenschaften des Bewegungssystems (6 Freiheitsgrade, kurzzeitig darstellbar sind lineare Beschleunigungen bis  $5\text{m/s}^2$  und rotatorische Beschleunigungen bis  $100^\circ/\text{s}^2$ ). Der realistischen Darstellung entziehen sich damit insbesondere hochdynamische Fahrmanöver sowie stationäre querdynamische Zustände. Diese systembedingten Grenzen stellen deutliche Einschränkungen des Untersuchungs- und Einsatzbereichs dar. Für Fragestellungen wie die Auslösung reflexartiger Fahrereingriffe und der Stärke kompensatorischer Gegenreaktionen im Fall von störungsbedingten Lenkmomentsprüngen wird jedoch eine ausreichende Anpassungsgüte erreicht.

Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen ist festzuhalten, dass die Definition absoluter Grenzwerte für Lenksystemstörungen bislang noch immer allein auf der Basis der Resultate umfassender Realfahrzeug-Untersuchungen erfolgen kann. Die Fahrsimulation eignet sich als wichtige Ergänzung vor allem für die Analyse von Fahrsituationen und Fahrmanöver, die im Realfahrzeugversuch aus Sicherheitsgründen nicht durchführbar sind. Haupteinsatzgebiet ist z.B. die Untersuchung von Fahrerreaktionen auf Kurshaltungsstörungen in anspruchsvollen Verkehrssituationen, die sich durch deutliche Einschränkungen des Handlungsspielraums auszeichnen.



Abbildung 17: Auslösung einer Lenksystemstörung in Abhängigkeit von Verkehrssituationen

Die flexible Datenbasisgenerierung und Verkehrssteuerung des IZVW-Forschungssimulators [6] erlaubt es z.B., den Fahrer nicht nur bei unterschiedlichen Verkehrsdichten des Mit- und Gegenverkehrs, sondern auch bei definiertem Seiten- und/oder Längsabstand zu anderen Verkehrsteilnehmern mit der Systemstörung zu konfrontieren (Abbildung 17). Sie eignet sich damit insbesondere für die Untersuchung situativer Einflussfaktoren auf die Fahrerverhalten. Kennzeichen der Fahrsimulation als experimentelle Umgebung ist vor allem die hohe Flexibilität, Reproduzierbarkeit und Standardisierbarkeit der Untersuchungsbedingungen, die im Realfahrzeug nicht realisiert werden kann.

Ein weiterer Vorteil der Fahrsimulation gegenüber den Realfahrzeug besteht in der Möglichkeit, das Ausmaß haptischer, visueller und kinästhetischer Informations- bzw. Störungsgrößen isoliert voneinander variieren zu können, woraus sich dann Aussagen über die Relevanz unterschiedlicher sensorischer Informationen auf das Fahrerverhalten ableiten lassen.

### 3 Zusammenfassung

Der rasante Zuwachs von mechatronischen Systemen erfordert für die Entwicklung zukünftiger Fahrwerkssysteme adäquate Sicherheitskonzepte unter Einbeziehung des Fahrerverhaltens. Die vorgestellte Vernetzung der drei Entwicklungswerkzeuge Probandenfahrversuch, Rechnersimulation und Fahrsimulation stellt einen integrativen Zugang zur Erarbeitung von tolerierbaren Störgrößen und daraus abzuleitenden Sicherheitsstrategien dar. Hierbei werden Teilaspekte, die mit einzelnen Entwicklungswerkzeugen nicht umfassend untersucht werden können, von einem oder mehreren alternativen Entwicklungswerkzeugen abgedeckt. Somit entsteht ein besseres Verständnis der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für den Fall einer Systemstörung. Das Risiko einer nicht oder nur zum Teil betrachteten Störungsauswirkung im alltäglichen Einsatz der Fahrwerkkomponente wird minimiert.

## 4 Literatur

- [1] Köhn, P., Baumgarten, G., Richter, T., Schuster, M., Fleck, R.  
Die Aktivlenkung – Das neue Fahrdynamische Lenksystem von BMW  
11. Aachener Kolloquium  
Aachen, Oktober 2002
- [2] Brenner, P.  
Die Ausfallsicherheitsanforderungen bei elektrischen Lenksystemen  
Haus der Technik 2000
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen  
Verkehr in Zahlen 1999  
Deutscher Verkehrs - Verlag  
Hamburg, 1999
- [4] Holle, M.  
Erarbeitung und Verifikation von fahrdynamischen Anforderungen an elektro-  
mechanische Hilfskraftlenkungen  
ika Bericht 9323  
Aachen, Juni 2000
- [5] Holle, M.  
Zukünftige Lenksysteme: Entwicklungsmethodik zur Verbesserung der aktiven Sicher-  
heit  
Haus der Technik, Tagung Fahrwerk  
Mai, 2001
- [6] Kaussner, A., Mark, Ch., Grein M., Krüger, H.-P., Noltemeier, H.  
Fahrsimulator-Datenbasen mit dynamisch veränderbaren Straßennetzwerken.  
VDI-Tagung: Simulation und Simulatoren  
April, 2003
- [7] Kemeny, A.; Panerai, F.  
Evaluation perception in driving simulation experiments  
Trends in Cognitive Sciences, Vol. 7 No. 1  
January 2003
- [8] Neukum, A.; Krüger, H.-P.; Schuller, J.  
Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften?  
VDI-Bericht 1613  
Düsseldorf 2001, VDI Verlag
- [9] N.N.  
Mercedes-Personenwagen verunglücken seltener  
all4engineers  
[www.all4engineers.com](http://www.all4engineers.com), 29. November 2002

[10] Wallentowitz, H; Brand, W., Holle, M.; Schrüllkamp, Th.  
Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung.  
Tag des Fahrwerks  
Aachen, 2002

[11] Wierwille, W.W.; Casali, J.G.; Repa, B.S.  
Driver steering reaction time to abrupt onset crosswind, as measured in an moving-base driving simulator.  
1983; Human Factors, 43, 483-495.

**Autoren:**

Herr Dipl.-Ing. Thomas Schrüllkamp  
Leiter Geschäftsbereich Fahrwerk  
Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika)  
Steinbachstr. 7  
D - 52074 Aachen  
Telefon: 0241/80-25611  
Telefax: 0241/80-22147  
e-mail: [schruellkamp@ika.rwth-aachen.de](mailto:schruellkamp@ika.rwth-aachen.de)

Herr Dipl.-Ing. Florian Fuhr  
Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika)  
Steinbachstr. 7  
D - 52074 Aachen  
Telefon: 0241/80-25646  
Telefax: 0241/80-22147  
e-mail: [fuhr@ika.rwth-aachen.de](mailto:fuhr@ika.rwth-aachen.de)

Frau Dipl.-Psych. Alexandra Neukum  
Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW)  
Röntgenring 11  
D - 97070 Würzburg  
Telefon: 0931/31-2186  
Telefax: 0931/31-2616  
e-mail: [neukum@psychologie.uni-wuerzburg.de](mailto:neukum@psychologie.uni-wuerzburg.de)

Herr Dipl.-Psych. Markus Schumacher  
Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW)  
Röntgenring 11  
D - 97070 Würzburg  
Telefon: 0931/9709940  
Telefax: 0931/9709944  
[schumacher@psychologie.uni-wuerzburg.de](mailto:schumacher@psychologie.uni-wuerzburg.de)