

Modellgestützte methodische Entwicklung aktiver Fahrwerke für Straßenfahrzeuge

Dr.-Ing. Ralph Streiter

DaimlerChrysler, Forschung Esslingen, RIC/AR

03.09.2002

1 Abstract

In der vorliegenden Arbeit wird ein Designzyklus beschrieben, der die Möglichkeit bietet, im Sinne eines Bewertungskataloges für aktive Systeme ein prognosesicheres Modell zu erstellen, sowie Regelungsstrukturen, die sich hinsichtlich Performance und Robustheit von bisher realisierten Konzepten positiv abheben. Durch die Vorgabe eines Wunschverhaltens kann der Regler direkt in einem Schritt berechnet werden. Der modellgestützte und analytische Entwurfskern ermöglicht das Regelkonzept sofort auf strukturgleiche Probleme zu übertragen. Das Konzept bietet weiterhin die Möglichkeit, Hinweise zur Auslegung der passiven Eigenschaften des zu regelnden Systems zu liefern. Mit Hilfe des prognosesicheren Modells und der Parametersensitivitätsanalyse kann eine On-line-Fehlererkennung realisiert werden. Durch die diskutierte Vorgehensweise kann Entwicklungszeit vermindert werden.

2 Einleitung

In den letzten Jahren nimmt die Bedeutung von Regelungssystemen in der Automobilindustrie deutlich zu. Heute sind hier u.a. ESP (Electronic Stability Program), SBC (Sensotronic Brake Control) und ABC (Active Body Control [ABC99]) als Einzelsysteme zu nennen. Zukünftig werden sie mit weiteren Systemen wie Drive-by-Wire in einem Fahrzeug vereint sein und miteinander wechselwirken. Diese Regelungssysteme sollen den Fahrer zunehmend entlasten und unterstützen, den Komfort steigern und gefährliche Situationen für den Fahrer kontrollierbar gestalten.

Zunehmend kommt jedoch zu der Problematik jedes Einzelsystem zu designen die Aufgabe hinzu, die Interaktion zwischen den aktiven Systemen zu beherrschen und im Idealfall Synergieeffekte nutzbar zu machen. Es ist offensichtlich, dass sich durch die Vielzahl der aktiven Systeme die Designproblematik zunehmend komplizierter gestaltet. Betrachtet man das konventionelle Fahrwerkdesign stark vereinfachend als die Aufgabe Feder- und Dämpfungseigenschaften festzulegen, so kommt durch jedes aktive System eine Vielzahl von Parametern und Strukturelementen hinzu, die alle mit der gleichen Sorgfalt festgelegt werden müssen, wie dies für passive Systeme bereits geschieht. Heutige Fahrwerksysteme sind somit wesentlich komplexer in ihrer Auslegungsproblematik als dies in der Vergangenheit der Fall war. Wenn aktive Systeme zudem sicherheitskritische Aufgaben übernehmen, müssen auch kleine Fehler völlig ausgeschlossen werden.

Dies treibt Entwicklungsaufwand und -zeit in die Höhe, was in der heutigen Marktsituation inakzeptabel ist. Ein schon beschrittener Weg zur Verbesserung der Situation ist der breite Einsatz von Simulationswerkzeugen zur frühen Unterstützung und Absicherung des Designprozesses. Jedoch zeigt die reale Entwurfspraxis, dass Regel-

systeme zumeist in aufwendigen Fahrversuchen "per Hand" angepasst und weiterentwickelt werden. Neben dem damit verknüpften Zeitaufwand, ist mit einer Schnittstellenproblematik zwischen den Entwicklungsteams zu rechnen: Auf der einen Seite die Systemdesigner, die das System zunächst auf einer eher idealisierten Basis mittels Simulationswerkzeugen entwerfen und auf der anderen Seite das Applikationsteam, dass das System auf Serienbelange hin abstimmt. Diese Arbeitsaufteilung birgt aber neben der bereits angesprochenen Zeitproblematik auch die Gefahr, dass die Systeme an Performance verlieren, da das Know-how zwischen den Teams häufig nicht ohne weiteres lückenlos transportiert werden kann. Als weiteres Problemfeld wird häufig das jeweilige Regelsystem als "Add-On" zur bestehenden Hardware gesehen und somit Synergiepotential nicht vollständig genutzt.

Es ist also das Problem zu lösen, bereits in der Entwurfsphase die Designsicherheit soweit zu erhöhen, dass nachträgliche Abstimmungsänderungen nur noch in sehr begrenztem Maße notwendig sind.

Hieraus resultieren folgende Fragen:

1. Wie groß muss der Detaillierungsgrad des Simulationsmodelles sein um sichere Prognosen treffen zu können?
2. Wie werden die relevanten Modellparameter bestimmt und wie genau muss dies erfolgen?
3. Welche Parameter der Hardware sind kritisch, d.h. welche Parameter haben einen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des geregelten Systems?
4. Wie groß dürfen Parameter- und Strukturunsicherheiten sein, ohne dass das aktive System signifikant negativ davon beeinflusst wird?
5. Wie muss die Reglerstruktur und -parametrierung aussehen, damit der zu definierende Anforderungskatalog für das Gesamtsystem erfüllt wird und die verbleibenden Struktur- und Parameterunsicherheiten problemlos sind?
6. Wie kann eine sichere On-Line-Diagnose bzw. Fehlererkennung des aktiven Systems gestaltet werden? Wie kann also sicher eine Fehlfunktion zeitnah detektiert werden?
7. Zu guter Letzt muss die Frage nach einer objektiven Bewertung des entworfenen Gesamtsystems gestellt werden.

Es ist naheliegend, dass es im idealen Fall möglich sein sollte, diese Planfelder vollständig mit Simulationshilfsmitteln zu bearbeiten. Damit dies möglich ist, ist das Durchlaufen eines mechatronischen Design- und Analyseprozesses notwendig, der schrittweise nach fest vorgegebenen Kriterien eine sichere Prognosefähigkeit herstellt und ein Hilfsmittel zur Verfügung stellt, Regelungsstrukturen für diese Systeme zu entwerfen und zu parametrieren. Hier soll der Versuch unternommen werden einen solchen geschlossenen Designzyklus zu entwerfen.

3 Der geschlossene Designzyklus

Nachfolgend sollen die einzelnen Entwicklungsschritte des geschlossenen Designzyklus erörtert und Quality-Gates definiert werden, die zu einer sicheren Entwurfssystematik für aktive Fahrwerksysteme führt. Startpunkt stellt bei dieser Vorgehensweise die Aufstellung des Bewertungskataloges da.

3.1 Der Startpunkt: Der Bewertungskatalog

In einem ersten Schritt muss ein Bewertungskatalog zur Beurteilung des Gesamtsystems aufgebaut werden. Dieser Bewertungskatalog bildet die Grundlage für

1. die notwendige Modellierungstiefe
2. die notwendige Reglerstruktur
3. die resultierende Reglerparametrierung

Somit kommt dem Bewertungskatalog eine zentrale Bedeutung im Designprozess zu. Der Katalog setzt sich dabei aus zwei Hauptkomponenten zusammen:

1. Aus Manövern oder allgemeinen Belastungsfällen, die für das jeweilige Gesamtsystem repräsentativ das Feld der zu erfüllenden Randbedingungen abstecken und
2. aus Bewertungskriterien, die zur Beurteilung des Gesamtverhaltens bei den definierten Belastungsfällen maßgeblich sind.

Beispielsweise könnten verschiedene Strecken und Fahrmanöver wie

- Schlechtwegstrecke
- Rampenauffahrt
- ...
- Doppelspurwechsel

als maßgeblich definiert und in den Bewertungskatalog integriert werden.

Zur Beurteilung werden nachfolgende Kriterien wie zum Beispiel

- maximaler Wankwinkel
- vertikaler Komfort bewertet nach Frank [FRAN94] (Bild 1) mit der Komfort-

$$\text{kennzahl } K = \int_{f=0}^{\infty} A_{z_A}(f) \cdot A_{B_1}(f) \cdot df$$

- bewertete Kopfquerbeschleunigung
- Spitzen der vertikalen Beschleunigungen auf den Fahrgast als Maß für die Stössigkeit
- maximaler Aktorweg
- Radlastschwankungen
- Energieverbrauch

definiert und formal im Katalog abgelegt. Für jedes der definierten Manöver ergeben sich somit die jeweils definierten Bewertungsgrößen. Insgesamt ergeben sich also bei n Manövern und m Bewertungskriterien $n \cdot m$ Kriterien im Katalog.

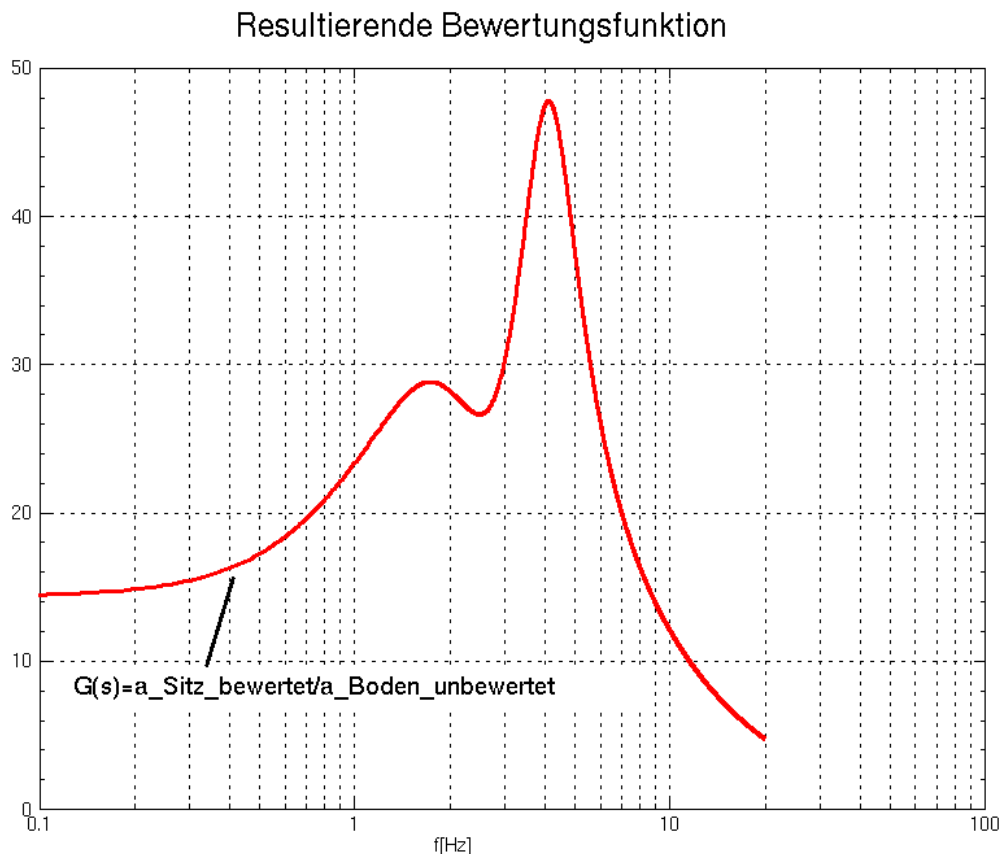


Bild 1: Komfort - Bewertungsfunktion B1 zur Bewertung des vertikalen Schwingempfindens im Fahrzeug abhängig von der Schwingfrequenz (Sitz berücksichtigt)

Um die Bedeutung des Bewertungskataloges zu unterstreichen, soll darauf hingewiesen werden, dass Forderungen aus dem Bewertungskatalog eine direkte Auswirkung auf die zu verwendende Reglerstruktur haben. Würde wie hier z.B. die Rampenauffahrt als ein zu leistendes Manöver definiert, so sollte die Regelungsstruktur keine absolute Aufbaugeschwindigkeit zur Komfortregelung verwenden, da bei der Rampenauffahrt eine konstante Aufbaugeschwindigkeit von der Regelung akzeptiert werden muss. Würde dieser Umstand ignoriert, so würde dies zu Konflikten mit der Niveauregulierung führen, was bei anderen Manövern dann erhebliche Nachteile mit sich bringen würde.

3.2 Das Herzstück für Designqualität: Das Modell

Kern des Designprozesses ist die Modellierung des zu regelnden Systems. Dabei obliegt es zunächst der Erfahrung des Entwicklungsingenieurs, die Detaillierungstiefe des Modells festzulegen. Die Modellelemente werden dagegen von dem Bewertungskatalog festgelegt (Bild 2), denn es sollten natürlich alle Größen durch das Modell zur Verfügung gestellt werden, die zur Bewertung des Gesamtsystems erforderlich sind. Werden beispielsweise im Bewertungskatalog Achsschwingungen bewertet, sollte das Modell detailliert auf die Achsmodellierung eingehen. Spielen diese Achsschwingungen keine Rolle in der Bewertung, kann ein vereinfachtes Modellelement eingesetzt werden.

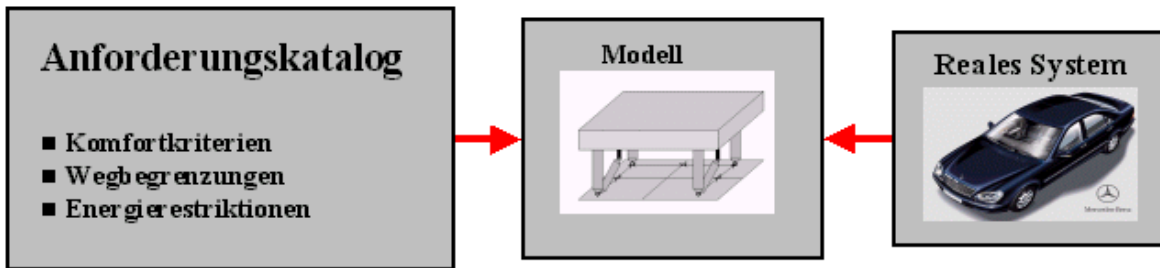


Bild 2: Die Modellbildung in Abhängigkeit von einem Anforderungskatalog und dem realen System

Ein Modell für die Auslegung hat beispielsweise folgende Struktur (Bild 3):

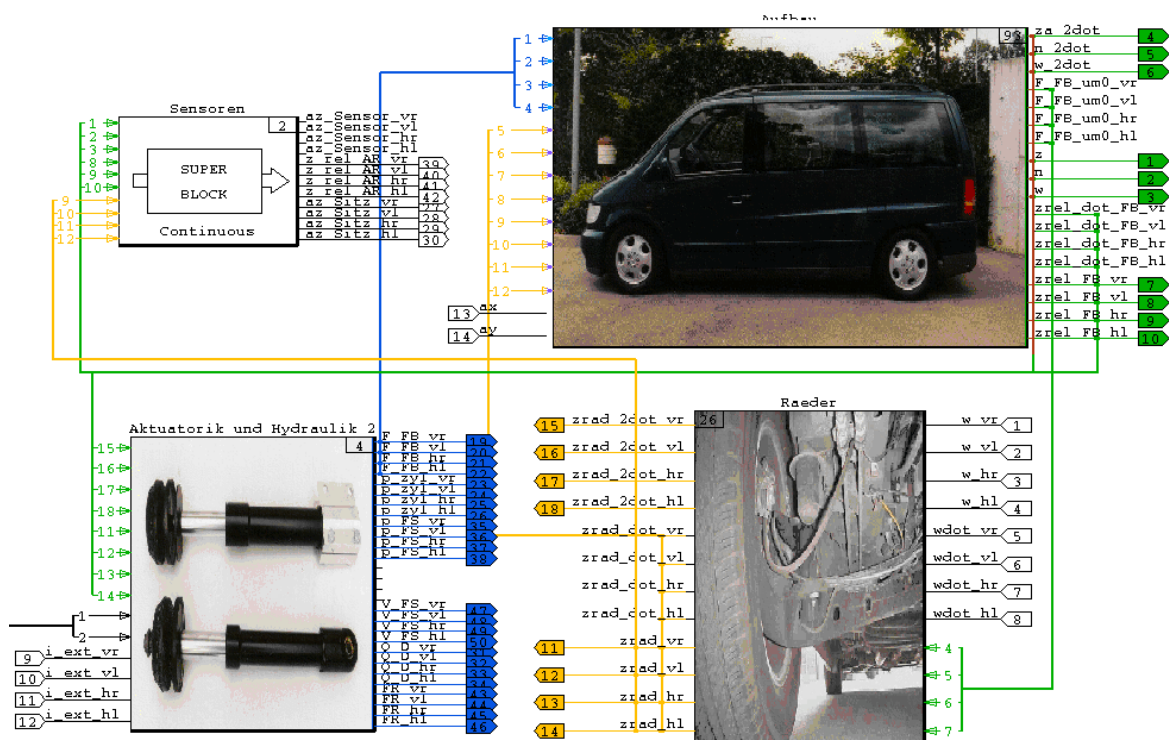


Bild 3: Modellstruktur in Matrix [MATX96]

3.3 Quality-Gate 1: Die Identifikation

Zunächst hat das aufgestellte Modell keine nachgewiesene Qualität, sondern spiegelt lediglich den Erfahrungshorizont des Entwicklungsingenieurs wieder. Um zu prognosesicheren Aussagen zu kommen, sollte im ersten Schritt eine Parameteridentifikation durchgeführt werden. Existiert im Idealfall bereits ein Prototyp, so muss das Modell zunächst anhand von Messungen am passiven System einer Parameteridentifikation unterzogen werden. Hier hat sich ein Identifikationsalgorithmus nach Karmarkar [KARMAR84] als besonders leistungsfähig erwiesen, da er aufgrund seiner vollständig vektoriiellen Arbeitsweise in der Lage ist, auch Parameterzahlen größer 100 sicher zu identifizieren und das auch für nichtlineare Systeme. Dieser Algorithmus ist in den vergangenen Jahren in der Forschung von DaimlerChrysler erheblich weiterentwickelt worden, so dass Probleme wie lineare Abhängigkeiten und

Nichtidentifizierbarkeiten aufgedeckt werden können, sowie dem Benutzer Informationen zu Modellgüte zur Verfügung gestellt werden.

Ist das Modell in der Lage, eine systemtypische Messung abzubilden, muss der Identifikationsprozess für verschiedene Arten von Messungen, die idealerweise den Manövern aus dem Bewertungskatalog entsprechen, wiederholt werden. An dieser Stelle zeigt sich, ob das Modell zunächst in der Lage ist, alle Messungen gleichermaßen abzubilden (Bild 4). Sollte dies der Fall sein, so muss die sich grundsätzlich ergebende Parameterstreuung analysiert werden, denn ein Modell wird nur dann prognosesicher sein, wenn alle Messungen mit einem nahezu identischen Parametersatz abgebildet werden können. Das Maß der tolerierbaren Parameterschwankungen und damit -unsicherheiten muss in einem weiteren Schritt bewertbar gemacht werden.

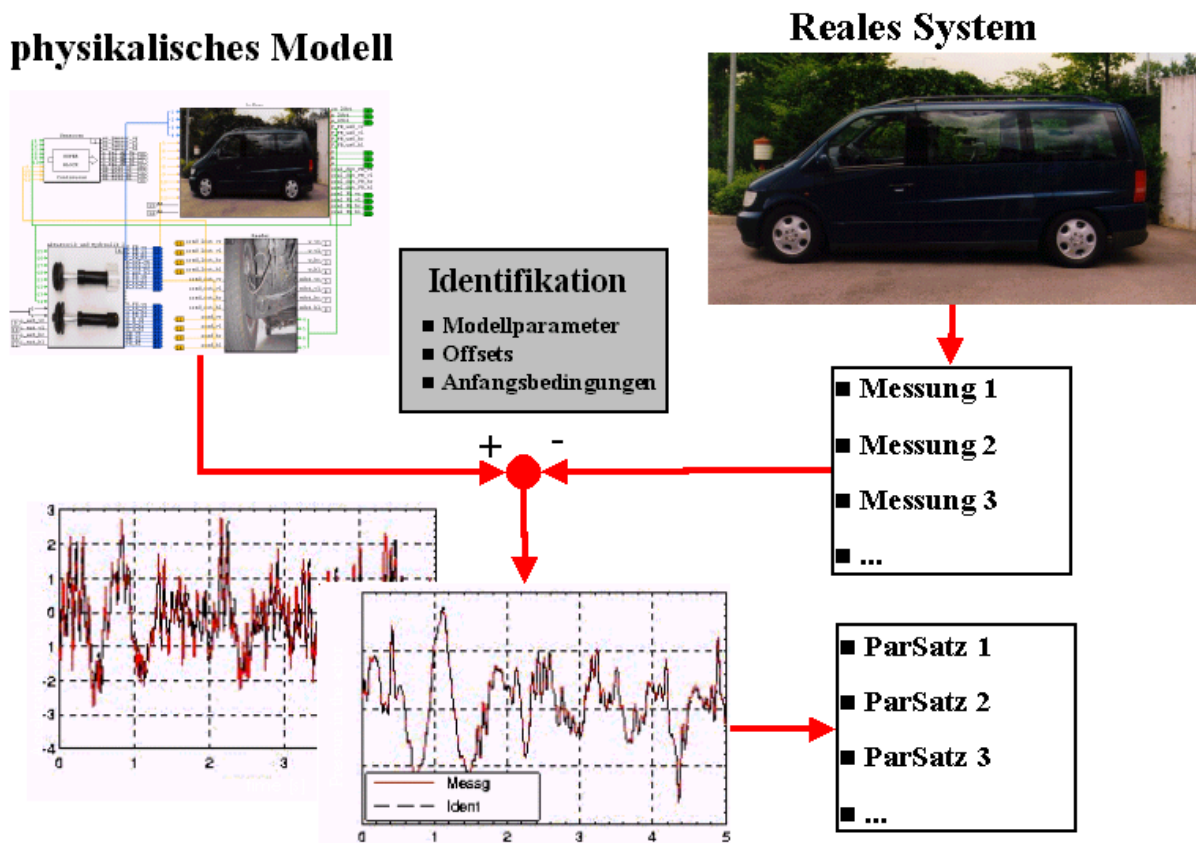


Bild 4: Ablauf der Identifikation über verschiedene Messungen

3.4 Das Regelkonzept

Nachdem nun grundsätzlich eine durch die Identifikation bestätigte Modellstruktur bestimmt werden konnte, erfolgt im nächsten Schritt das Reglerdesign auf Basis dieses Modells. Dabei fließt nicht nur die Modellstruktur selbst explizit in das Design ein, sondern ebenso die Forderungen, die im Bewertungskatalog formuliert wurden (Bild 5).

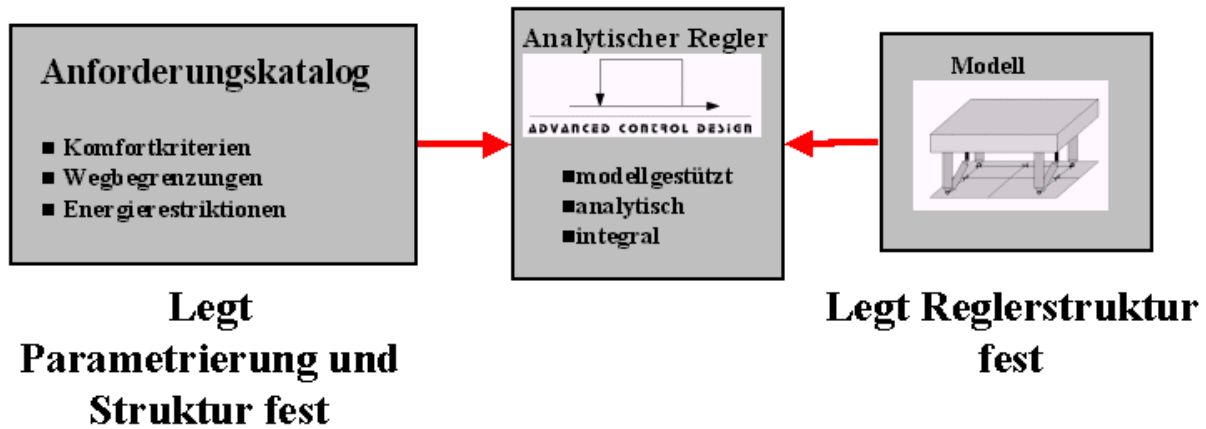


Bild 5: Bestimmung der Reglerstruktur

Hier kann die folgende Überlegung angewendet werden:

Alle Bewertungskriterien, die in dem Bewertungskatalog formuliert wurden, sollen sich explizit in der Reglerstruktur wiederfinden. Will man noch weiter gehen, so könnte die Aussage dahingehend erweitert werden, dass nur diese Kriterien dort einfließen dürfen.

Die Überlegung kann unter anderem durch eine Effizienzabschätzung motiviert werden: Tendenziell stehen alle in der Regelung verwendeten Eingangssignale miteinander in Konflikt bzw. in Konkurrenz¹. Jede Reduktion von Konfliktpotential in der Regelungsstruktur wird daher die Effizienz des Gesamtsystems steigern, da weniger "Kompromisse" geschlossen werden müssen. Die konsequente Umsetzung dieser Überlegung führt zum Ausschluss zahlreicher Varianten. Beispielsweise sind Kaskadenstrukturen auf dieser Basis nur dann zu argumentieren, wenn Systemgrößen, die im Bewertungskatalog enthalten sind, nur so auf die gewünschte Weise kontrolliert werden können.

Durch das modellgestützte Designverfahren liefert das Verfahren ähnlich wie bei Zustandsreglern eine für das jeweilig zu regelnde System angepasste Reglerstruktur. Jedoch integriert dieser Regleransatz explizit dynamische Elemente wie Filter oder Integratoren und liefert höhere Ableitungen von Messgrößen selbständig. Auf diese Weise repräsentiert dieses Regelkonzept Zustandsregelung und Beobachter in einem. Dies zieht natürlich eine Vereinfachung des Designprozesses nach sich². Durch seine integrale, also vollständige Struktur kontrolliert der Regler alle Eigenschaften des zu regelnden Systems und weist daher eine hohe Robustheit auf. Dieser Zusammenhang ist in erster Linie darin begründet, dass die Robustheit eines Reglers primär von seiner Struktur und erst in zweiter Linie von seiner Parametrierung abhängt. Dies kann leicht durch die Überlegung motiviert werden, dass tendenziell ein Regler, der alle relevanten Systemeigenschaften kontrolliert, auf Parameter- oder Systemeigenschaftsschwankungen robuster reagiert als ein Regler, der manche relevanten "Eigenarten" des Systems unkontrolliert lässt. Früher wurden solche vollständigen Regler nur selten realisiert, da sich ihre Komplexität notwendigerweise an

¹ Ansonsten wären Eingangssignale redundant

² Bei einem vollständigen Zustandsregler und -beobachter gilt zwar das Separationstheorem, so dass sich die Stabilität der einzelnen Komponenten nicht beeinflusst. Das Übergangsverhalten auf Störungen wird jedoch von beiden Komponenten bestimmt, so dass sich trotzdem eine iterative Auslegung als notwendig erweist.

der Komplexität des zu regelnden Systems orientieren muss. Somit fallen solche Regler häufig wesentlich größer aus als klassische Regelungsansätze. Mit dem Fortschritt der Rechnertechnik ist aber der Umfang der Regelungssoftware nicht mehr in dem Maße beschränkt, wie das noch vor zehn Jahren der Fall war. Daher sind solche vollständigen, das System umfassende Regler mit dem heutigen Stand der Technik realisierbar. Hier ergibt sich aber sofort die Frage, wie solche Regelungsstrukturen mit einer häufig großen Anzahl von Parametern entworfen werden sollen. Um dieses Problem zu lösen, wurde in den letzten Jahren ein Verfahren entwickelt, das den Regler in einem Schritt durch Rückwärtsrechnen, von einem Wunschverhalten des Gesamtsystems ausgehend, berechnet. Wir nennen das Verfahren "Advanced Control Design".

Ein auf diese Weise an dem Modell designter Regler garantiert nicht nur Vollständigkeit und Modellkonformität sondern auch eine wesentlich verbesserte Übertragbarkeit auf Probleme gleicher Struktur. Eine einmal ermittelte Regelungsvariante ist durch den modellgestützten Charakter und die analytische Berechnung auf strukturgleiche Probleme übertragbar. Somit wird die Definition von Standardreglern unterstützt. Parameter- und Strukturänderungen des Modells, die nicht die Systemordnung des zu regelnden Systems betreffen, können von nun an also in einem Schritt im Regler berücksichtigt werden. Dies gibt dem Designer die nötige Schnelligkeit und Flexibilität um sich auf die eigentliche Designaufgabe, nämlich das Verhalten des geschlossenen Regelkreises, zu konzentrieren. So betrachtet ist das Design des Reglers nur mittelbar das Ziel. Die resultierende Form, das "Wunschverhalten", zu definieren ist die eigentliche Aufgabe. Dieses "Wunschverhalten" wird dabei durch eine mathematische Beschreibung festgelegt, die die Forderungen des Bewertungskataloges widerspiegeln soll und ein realisierbares Ziel darstellen muss. Die Realisierbarkeit zielt einerseits auf die Festlegung der Systemordnung des Wunschverhaltens ab, da durch den Einsatz eines Reglers keine Systeme realisiert werden können, die kleiner als das zu regelnde System sind³. Andererseits liefert die sich ergebende Regelungsparametrierung ebenso einen Anhaltspunkt für die Realisierbarkeit des Wunsches. Beispielsweise lässt sich aus einem sehr "schnellen" System kein beliebig "langsames" System machen und würde bei der Reglerberechnung zu Vorzeichenumkehr im Regler führen und somit eine Nichtrealisierbarkeit des Wunsches signalisieren. Diese Rückmeldung führt zu einer sehr bewussten Auseinandersetzung über die Ziele, die durch die Regelung erreicht werden sollen.

³ Häufiger liegt aber der Fall vor, dass durch die Integration dynamischer Elemente in den Regler, beispielsweise Filter oder Integratoren, die sich ergebende Systemordnung des Gesamtsystems wesentlich größer ist.

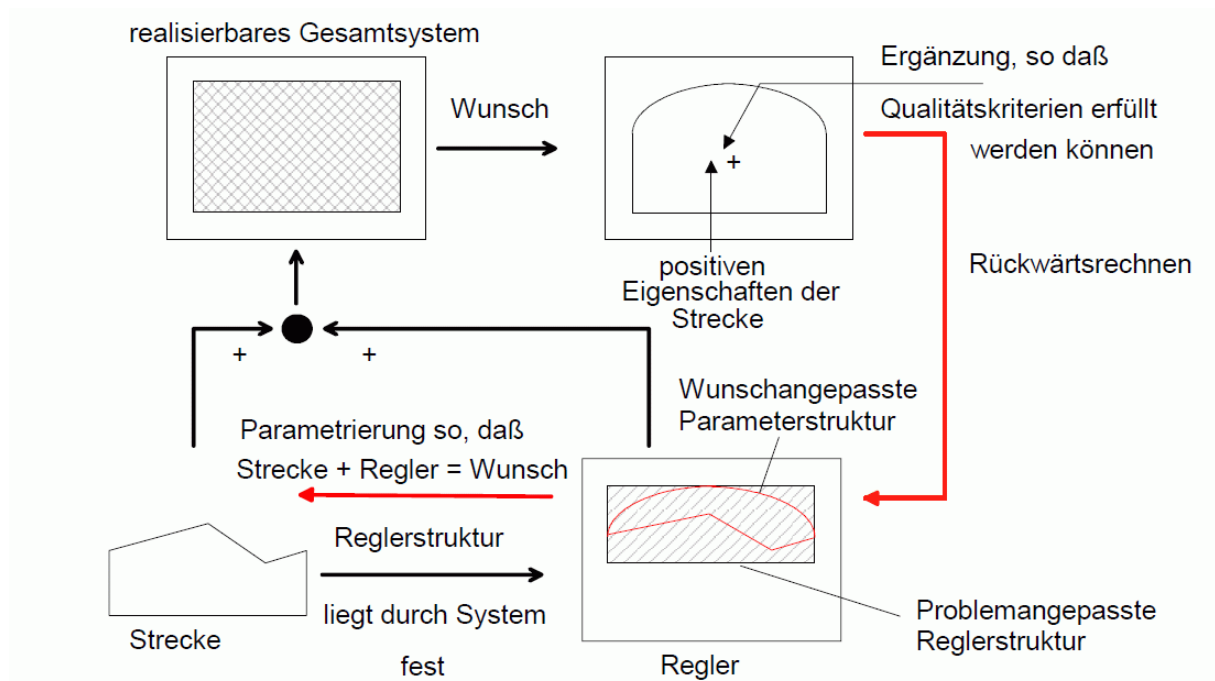


Bild 6: modellgestütztes Reglerdesign

Die minimale Struktur des Wunschverhaltens ist somit durch das zu regelnde System und der Forderung nach Vollständigkeit des Reglers festgelegt. Weitere Strukturelemente können eingesetzt werden, um Forderungen des Bewertungskataloges abzubilden. System und Reglerstruktur definieren somit zusammen den Raum der realisierbaren Möglichkeiten⁴ (Bild 6). Im Raum der so festgelegten Möglichkeiten kann der Systementwickler ein Wunschverhalten festlegen. Dabei ist es im Sinne einer Zusammenarbeit von Hard- und Software unbedingt notwendig, dass in den Wunsch diejenigen Eigenschaften des passiven Systems integriert werden, die günstig im Sinne des Gesamtverhaltens sind. Lediglich die Eigenschaften, die als ungünstig angesehen werden, sollten ersetzt werden. Hier wird wiederum der mechatronische Gedanke, der das Miteinander von Hard- und Software zum Inhalt hat, sichtbar. Zwar ist theoretisch im Raum der Möglichkeiten jeder Wunsch erfüllbar, aber dies kann im ungünstigen Fall zu einem Gegeneinanderarbeiten von Hard- und Software führen. Dies hat nicht nur negative energetische Aspekte, sondern führt tendenziell zu parameterempfindlichen Regelungen und zum Verschleiß von Bauteilen. Liegt also beispielsweise die Eigenfrequenz des zu regelnden Systems bereits in dem Bereich, der für das Gesamtsystem geplant ist, so wird man diese Systemeigenschaft in den Wunsch integrieren. Diese Überlegung ist zwar zunächst ein Hinweis, der von dem Regelungsdesigner zu beachten ist, er bildet aber gleichzeitig auch eine Brücke zum Design der Hardware. Im Sinne eines sinnvollen Zusammenwirkens von Hard- und Software kann hier ein weiteres Instrumentarium gefunden werden, das passive System bereits so auszulegen, dass es dem Regler "entgegen kommt".

⁴ Beispielsweise ist zur vollständigen Kontrolle eines I-Gliedes lediglich ein P-Regler notwendig. Dagegen benötigt ein PT1-System bereits einen PI-Regler um die Forderung nach Vollständigkeit zu erfüllen. Forderungen nach Bandbegrenzungen des Reglers würden Filter notwendig machen, die auf diese Weise direkt in den Reglerdesignprozess integrierbar sind.

3.5 Quality-Gate 2: Die Parametersensitivitätsanalyse (PSA)

Nachdem nun einerseits ein Modell vorliegt, dessen Modellgenauigkeiten aus der Identifikation bekannt sind, und andererseits ein Regler, der aus Modellstruktur und Bewertungskatalog analytisch hergeleitet wurde, können nun diese Modellfehler bewertet und Sensitivitäten untersucht werden. Insgesamt stellt die PSA bei erfolgreicher Analyse die Prognosesicherheit des Modells sicher. Die Parametersensitivitätsanalyse wird an dem Gesamtsystem (Strecke + Regler) per Simulation durchgeführt. Es können zweierlei Kriterien abgeprüft werden:

A) Die relativen Sensitivitäten.

Hier wird überprüft, wie empfindlich das System insgesamt ohne Berücksichtigung der Modellgüte allgemein ist. Dazu werden die aus der Identifikationsserie gemittelten Parameter um einen festen prozentualen Anteil verschoben und in das Modell eingesetzt. Dabei wird die Reglerparametrierung konstant gehalten. Mittels repräsentativer Manöver, idealerweise mit denen aus dem Bewertungskatalog, wird das veränderte Verhalten des geschlossenen Regelkreises anhand des Bewertungskataloges und den dort definierten Kriterien $K_j(p_i)$ bewertet.

Dazu kann die relative Verstärkung V_j des Kriteriums K_j bezüglich der Verschiebung des Parameters p_i um Δp_i mittels

$$V_j = \frac{K_j(p_i) - K_j(p_i - \Delta p_i)}{p_i - (p_i - \Delta p_i)} \cdot \frac{p_i}{K_j(p_i)} \text{ falls } K_j(p_i) \neq 0 \text{ und } p_i \neq 0$$

definiert werden. $K_j(p_i)$ und p_i definieren dabei das Kriterium j und den Modellparameter i unter Verwendung des aus der Identifikationsserie gemittelten Parametersatzes. Es ist plausibel, dass eine Verstärkung größer 1 auf einen sensiblen Modellparameter hinweist. Hier ist also entweder

1. besondere Sorgfalt bei der Ermittlung des Parameters notwendig, oder
2. die Regelungsstruktur speziell auf dieses Problem hin robuster zu gestalten oder
3. eine Modifikation der Hardware notwendig oder, falls die Verstärkung eine Verbesserung des Kriteriums repräsentiert, eine Verbesserung des Gesamtverhaltens durch konstruktive Maßnahmen möglich.

Die Betrachtung der relativen Sensitivitätsfaktoren eröffnet also die effektive Möglichkeit das Zusammenwirken zwischen Hard- und Software zu verbessern und entspricht demzufolge dem Grundgedanken eines mechatronischen Designprozesses.

B) Die absoluten Sensitivitäten.

Als zweites Kriterium wird die absolute Veränderung der Kriterien aus dem Bewertungskatalog bei Verschiebung der Modellparameter um die ermittelten Parameterstreuungen ermittelt (Bild 7).

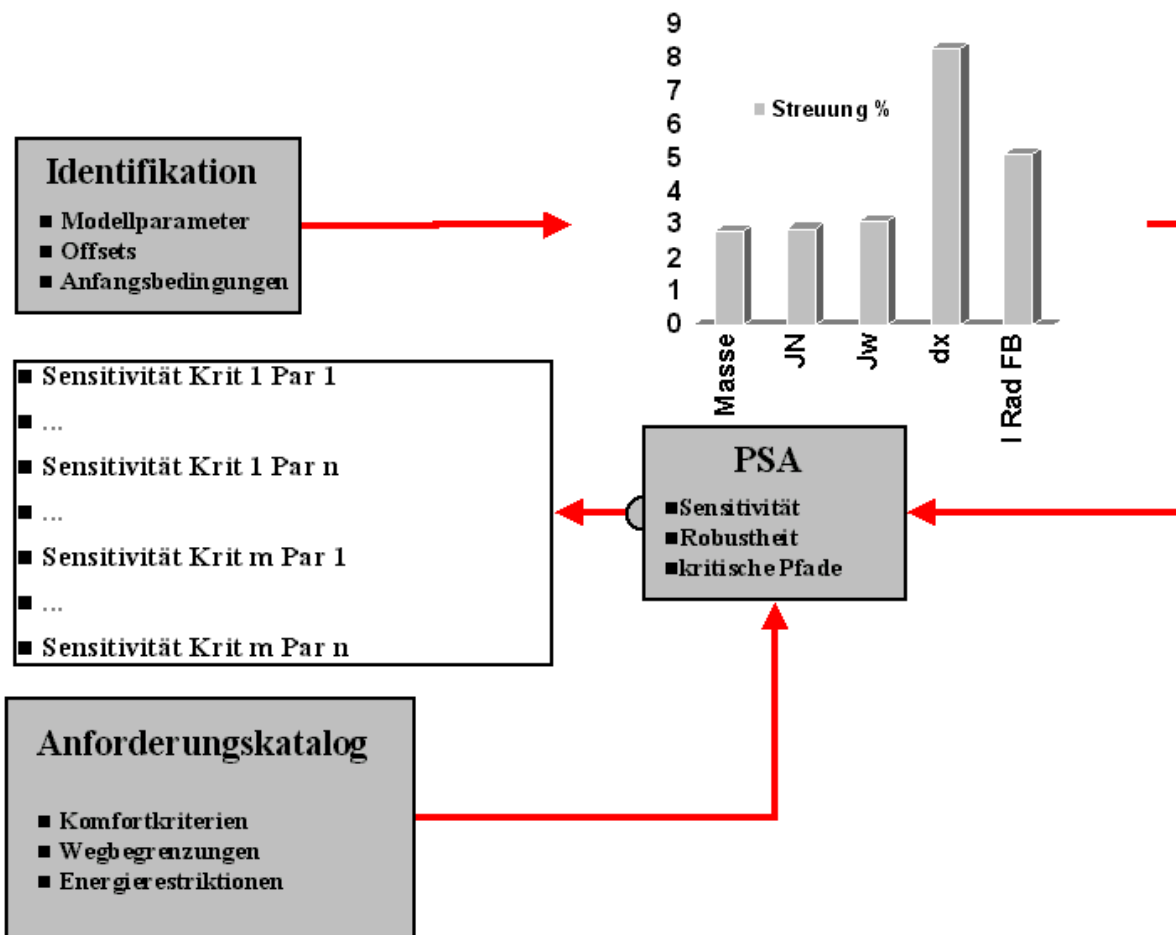


Bild 7: Ablauf der PSA nach B)

Dazu werden die aus der Identifikationsserie gemittelten Parameter mit den ermittelten Parameterschwankungen beaufschlagt und wiederum in das Modell eingesetzt. Dabei wird wieder die Reglerparametrierung konstant gehalten. Die Bewertung erfolgt analog zur Analyse für die relativen Sensitivitäten. Hier wird also das Maß der Auswirkung der Modellunsicherheit überprüft. Bleiben bei dieser Untersuchung alle Bewertungskriterien unterhalb der definierten Zielschranken, so ist davon auszugehen, dass die gefundene Modellstruktur und -parametrierung in Bezug auf den eingesetzten Regler "genau" genug ist. In diesem Fall kann grünes Licht für die Reglerfreigabe gegeben werden. Werden dagegen einzelne Zielkriterien des Bewertungskataloges bei den ermittelten Parameterunsicherheiten nicht erreicht, so muss entweder die Modellgüte erhöht, oder der Regler robuster gestaltet werden. Da die zweite Variante meistens durch eine Reduzierung der Reglerperformance bewerkstelligt werden muss, wird i.a. die Verbesserung der Modellgüte ratsam sein. Dies ist auch deswegen sinnvoll, da ein auf diese Weise verbessertes Modell das Systemverständnis verbessert und Probleme offenlegt, die sonst häufig im Verborgenen bleiben. Eine derartige Modellverbesserung verringert dabei nicht nur die Modellunsicherheit, sondern erlaubt auch eine strukturelle Verbesserung des Reglers. So wird das Modell und dessen Identifikation zum Schlüssel, um Regelungssysteme mit höherer Komplexität in kurzer Zeit erfolgreich zu realisieren.

3.6 Der Kreis wird geschlossen: Die Implementierung

Nachfolgend wird der Regler im Zielfahrzeug implementiert. Da durch die Aktivierung des Systems speziell nichtlineare Eigenschaften zu Tage treten können, die vorher

nicht sichtbar waren, sollte nachfolgend der Designzyklus noch einmal durchlaufen werden (Bild 8).

Ein derart abgesichertes Modell bietet jetzt die Möglichkeit, falls dies für notwendig erachtet wird, eine Feinabstimmung des Reglers mittels Optimierung des Wunschverhaltens durchzuführen. Häufig wird aber bereits die "Grundausslegung" im Vergleich zu Resultaten, die mit konventionell ausgelegten Regler erzielt werden können, vergleichsweise günstige Eigenschaften aufweisen. Im Ergebnis wird durch dieses Vorgehen prognosesicher ein Reglerdesign generiert, welches auf der einen Seite robust und auf der anderen Seite auf Systeme gleicher Struktur sofort übertragbar ist. Die geleistete Arbeit muss also tendenziell nur einmal erbracht und nicht für jede Zielanwendung neu durchlaufen werden. Hier liefert eine erneute Parameteridentifikation bereits alle Informationen um den Regler in einem Schritt zu designen. Ein konstantes resultierendes Wunschverhalten kann zum Beispiel als Kennzeichen der Marke eingesetzt werden. Ebenso sind Plattformkonzepte möglich. Es ist also plausibel, dass der Nutzen dieses Vorgehens beträchtlich sein kann.

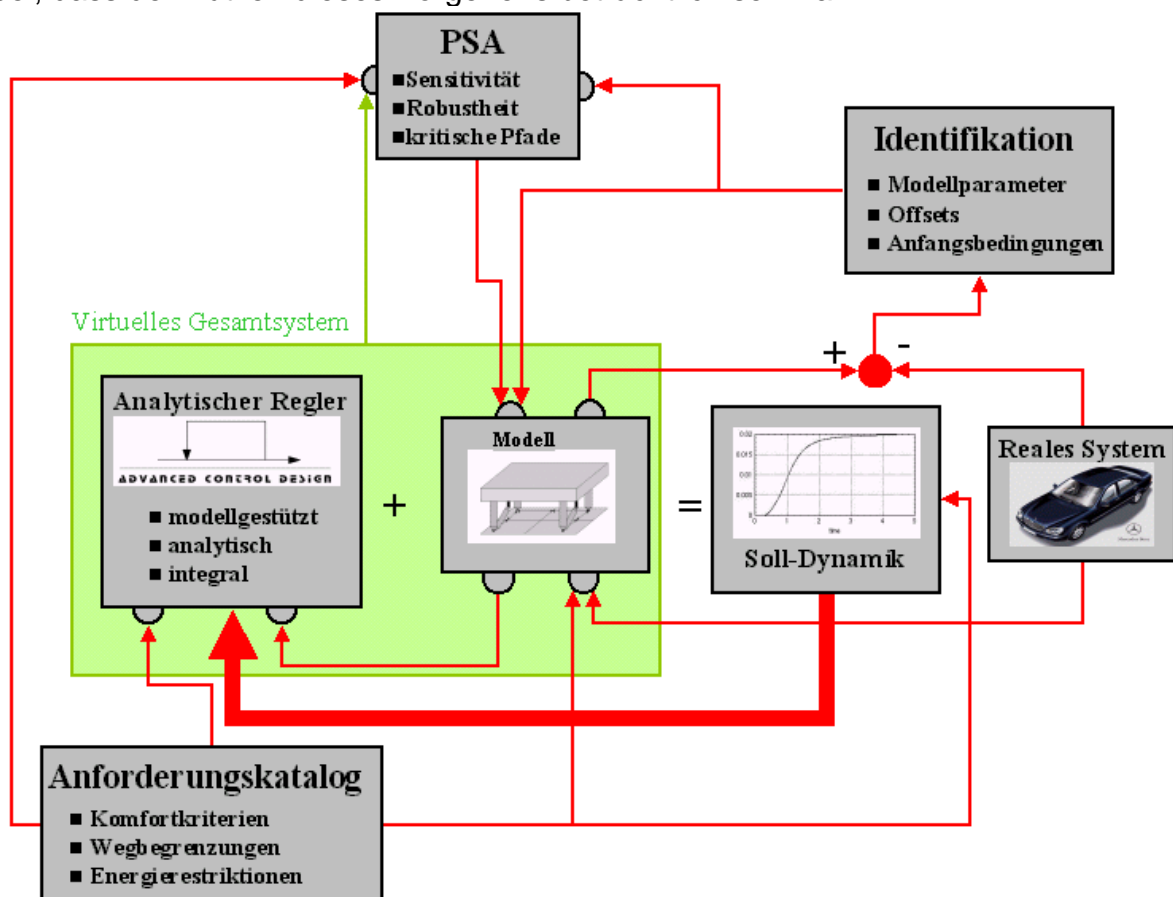


Bild 8: Vereinfachte Darstellung der Abhängigkeiten und Abläufe des geschlossenen Designzyklus. Im Zentrum das Modell.

3.7 Mehr Sicherheit statt weniger: Die On-Line-Diagnose

Ein Nebenprodukt dieses Vorgehens ist die Möglichkeit eine modellgestützte Fehlerdiagnose zu realisieren. Wiederum ist hier das Systemmodell das zentrale Element, dessen Parameterunsicherheiten durch die Identifikation bei verschiedenen Anregungsformen und Belastungsfällen sowie die noch tolerierbaren Systemänderungen aus der PSA bekannt sind. Ähnlich wie bei der Parameteridentifikation dies offline durchgeführt wird kann eine online Darstellung des Modells mit Messwerten gespeist werden. Das Modell liefert dann zu erwartende Ausgangssignale, die mit

korrespondierenden Messgrößen online verglichen werden. Da aus der PSA bekannt ist, wie stark das reale System vom angenommenen Verhalten abweichen darf, ohne dass dies einen Fehler darstellt, können Fehlerschranken für diese Abweichungen definiert werden. Wird eine dieser Fehlerschranken überschritten, so ist dies ein sicherer Hinweis darauf, dass ein Fehler vorliegt. Dieses Vorgehen kann auch durch die Überlegung begründet werden, dass der Regler nur so lange mit erwartetem Verhalten reagiert, wie die angenommene Modellstruktur und -parametrierung mit dem realen System, im Rahmen der vorab bestimmten Fehlertoleranzen, übereinstimmt. Maßgeblich ist, dass eine derartige Fehlererkennung sehr viel früher einen Ausfall erkennen kann, als häufig verwendete Grenzwertüberwachungen. Dies kann dem System den entscheidenden Zeitvorteil liefern, um frühzeitig auf einen Fehlerfall zu reagieren. Werden verschiedene Formulierungen des Modells oder Subsysteme des Modells parallel betrachtet, so ist sogar eine Fehlerdiagnose möglich [STREIT01]. Wenn beispielsweise das Submodell der Aktuatoren keinen Fehler liefert, während das Gesamtmodell einen Fehler feststellt, so kann auf diese Weise die Fehlerursache bereits eingegrenzt werden. Durch noch feinere Aufteilung des Gesamtmodells kann zielgenau eine Diagnose von "Wirkgruppen" erfolgen, so dass situationsabhängig auf den Ausfall reagiert werden kann. Beispielsweise kann der Ausfall der Beschleunigungssensoren am Aufbau eines Fahrzeugs mit aktiver Federung durchaus kritisch sein, aber durch ein frühzeitiges Umschalten auf ein reines Wegregelkonzept abgefangen werden. Der Kunde könnte problemlos weiterfahren und den Fehler in der nächsten Werkstatt beheben lassen, ohne jemals in eine kritische Situation gekommen zu sein. So kann die Behandlung der häufig diskutierten Sicherheitsproblematik von aktiven Systemen vereinfacht werden: Die "Intelligenz" im Fahrzeug macht Ausfälle leichter erkennbar und das Gesamtsystem damit sicherer.

4 Realisierungen

In einer sehr frühen Phase der Entwicklung dieses Designprozesses wurde eine modellgestützte Variante des ABC-Systems entwickelt (Bild 9). Damals existierte nur eine rudimentäre Vorstellung des Designprozesses und eine Vorvariante des heutigen modellgestützten Regelungsdesignkerns [STREIT96].



Bild 9: ABC mit Advanced Control Design

In den nachfolgenden Jahren wurde die Theorie zu dem heutigen Designzyklus verfeinert und kam in einem Schienenfahrzeug für den Hochgeschwindigkeitszug zum Einsatz [STREIT01]. Aufgabe war es eine Querkomfortregelung mittels zweier Queraktoren zu realisieren.



Bild 10: Modellgestützte Querkomfortregelung für Hochgeschwindigkeitszüge auf dem Prüfstand in München

Die Reglerrealisierung wurde in nur 18 Monaten durchgeführt und am Rollenprüfstand [ROLLP85] in München getestet (Bild 10). Der Auftraggeber Bombardier arbeitet an einer Serienumsetzung.

In jüngster Zeit wurden die Untersuchungen für aktive Fahrwerke auf den Transporterbereich erweitert und dabei hydropneumatische Aktoren eingesetzt, die einerseits Bauraumvorteile mit sich bringen und andererseits Skalierungskonzepte ermöglichen (Bild 11).



Bild 11: Modellgestützte Komfortregelung in der V-Klasse mit hydropneumatischen Federbeinen. Vergleich zwischen passiv (links) und aktiv (rechts) bei Kurvenfahrt

Hier kam ebenfalls der beschriebene Designzyklus zum Einsatz. Zunächst wurde ein Modell der Struktur, wie in Bild 3 dargestellt aufgebaut. An Messungen des Prototypen erfolgten dann die Parameteridentifikationen. Bild 12 zeigt die berechneten Parameterstreuungen über sechs verschiedene Messungen. Die größte Unsicherheit besteht demzufolge in der Schwerpunktlage in x-Richtung. Die relative Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Fahrzeugmasse ein kritischer Parameter ist (Bild 13). Der Regler wurde daraufhin bezüglich Massenänderungen adaptiv gestaltet.

rel. Sensitivitäten

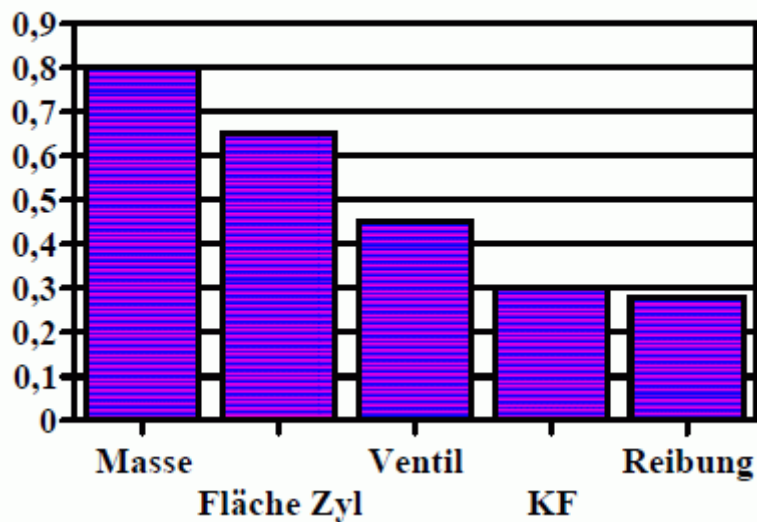


Bild 12: relative Sensitivitäten

% Parameterstreuung

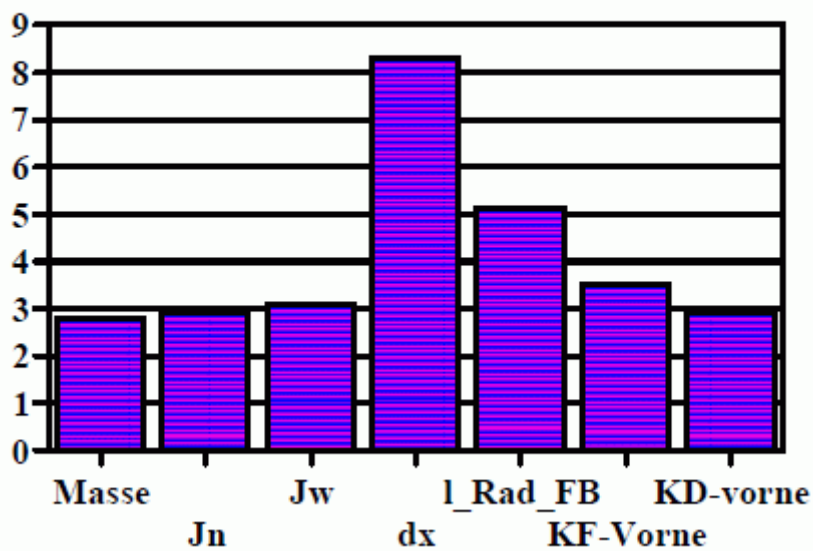


Bild 13: Prozentuale Parameterstreuungen bei verschiedenen Messungen

Insgesamt ergeben sich im Vergleich zwischen aktivem und passivem System durch die Regelung erhebliche Verbesserungen (Bild 14).

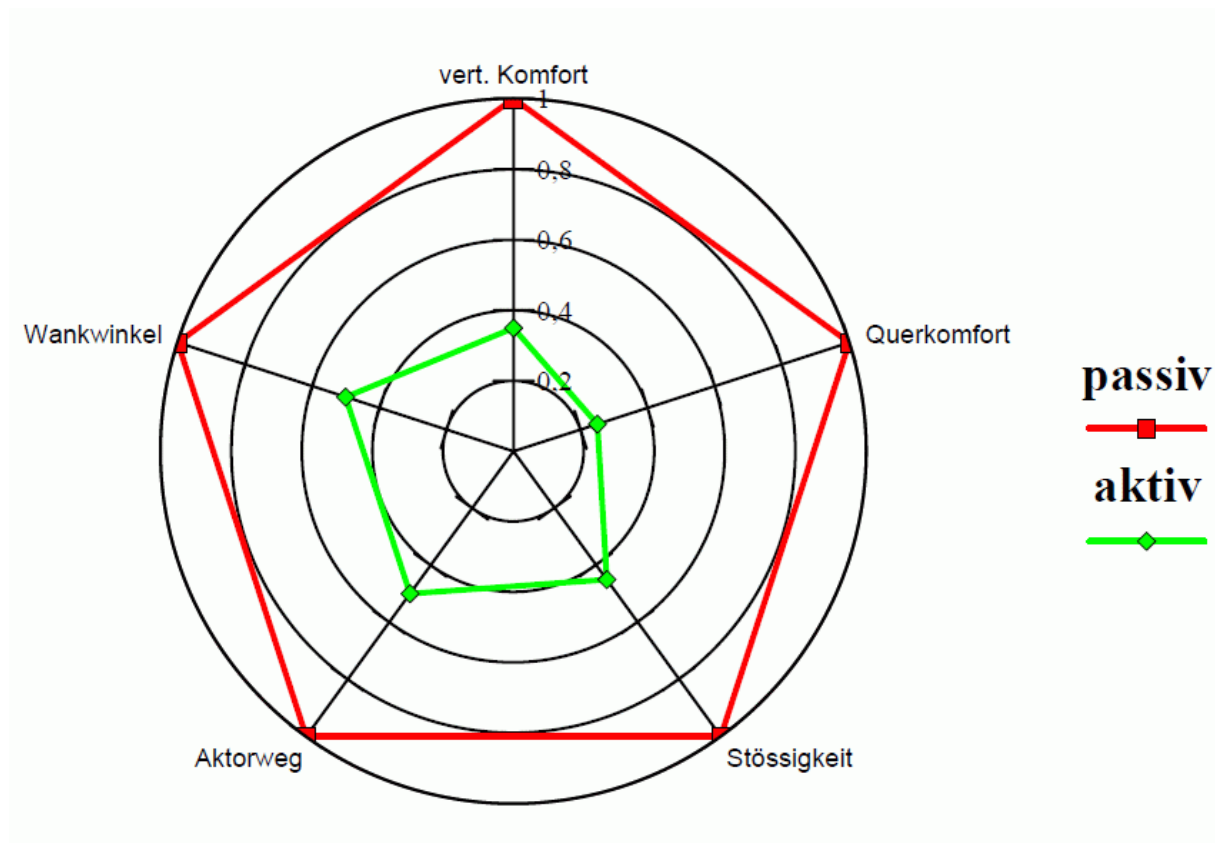


Bild 14: Normierter Vergleich zwischen dem aktiven und passiven Betrieb.

5 Literatur

ABC99	ABC-Fahrpraxis - Ein Automobil, zwei Fahrwerke ISSN 0005-1306 Automobil-Industrie 1999, pages 68 - 69
FRAN94	FRANK, P. Bewertungsverfahren Schwingempfinden Technischer Bericht F1M-94-004 Forschungsinstitut Mercedes-Benz Stuttgart 1994
KARMAR84	Karmarkar, N. A new polynomial-time algorithm for linear programming Combinatorica, Vol. 4, pp. 373-395, 1984
MATX96	MatrixX Users' Guide Integrated Systems, Santa Clara, CA 95054 - 3309, 1996
ROLLP85	Polifka, F. Eisenbahntechnische Versuchseinrichtungen für die Komponenten- und Systemerprobung. Conference report: Statusseminar Schnellbahnen. Rad/Schiene- und Magnetschwebetechnik. Reports, Nürnberg, D, June 1985, (1985) Page 2.1.1-2.1.24 (24 pages, 16 illustrations) Darmstadt: HESTRA-Verlag
STREIT96	Streiter, R. "Entwicklung und Realisierung eines analytischen Regelkonzeptes für

	<p>eine aktive Federung” Dissertation ISS-Fahrzeugtechnik und angewandte Mechanik Technische Universität Berlin 1996</p>
STREIT01	<p>Streiter, R., Boller M., Riege B, Schneider R., Himmelstein G. “Active lateral Suspension for high-speed trains - a step towards the mechatronic bogie” World Congress on Railway Research WCRR, Cologne, November 2001 http://www.streiter.com/Veroeffentlichungen/ Active_Lateral_Suspension_for_High_Speed_Trains_World_Congress_on_Railway_Research_2001.pdf</p>