

Tagungssektion: III. Entwicklungstendenzen der Fahrzeugtechnik

Thema: Schienenfahrzeuge mit aktiven Komponenten

Referent:

N a m e, Vorname: Dronka, Sven
Titel, Akad. Grade: Dipl.-Ing.
Dienststelle: Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Theoretische Grundlagen der Fahrzeugtechnik

Funktion: Wiss. Mitarbeiter
Adresse: 01062 Dresden
Hettnerstr. 1-3
Raum H 55

Telefon: 0351/463 6578
Fax: 0351/463 6572
Email: dronka@rcs.urz.tu-dresden.de

Autoren:

Dipl.-Ing. S. Dronka
TU Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Theoretische Grundlagen der Fahrzeugtechnik
Tel.: 0351/463-6578

Prof. Dr.-Ing. habil. S. Liebig
TU Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Theoretische Grundlagen der Fahrzeugtechnik
Tel.: 0351/463-6571

Dipl.-Ing. V. Quarz
TU Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Theoretische Grundlagen der Fahrzeugtechnik
Tel.: 0351/463-6618

Schienenfahrzeuge mit aktiven Komponenten

1 Einleitung

Die Anforderungen an moderne Schienenfahrzeuge bezüglich einer höheren Reisegeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verbesserung des Fahrkomforts für die Fahrzeuginsassen und der Erhöhung der Lebensdauer durch die Verringerung der Bauteilbeanspruchung wachsen ständig. Durch den Einsatz neuer, moderner Fahrzeugkonzepte und das ausgeschöpfte Optimierungspotential der eingesetzten passiven Feder-Dämpfer-Systeme ergibt sich verstärkt die Forderung nach dem Einsatz aktiver Stellelemente zur Beeinflussung des dynamischen Verhaltens des Fahrzeuges.

Die typischen Zielkonflikte bei der Auslegung der Schienenfahrzeuge bestehen darin, daß für die Fahrt auf gerader Strecke und für die Bogenfahrt unterschiedliche Anforderungen an die Feder-Dämpfer-Systeme gestellt werden. Ein Beispiel für einen solchen Auslegungskonflikt ist die vertikale Sekundärfederung: einer für einen hohen Fahrkomfort weich ausgelegten Federung stehen große Wankwinkel des Wagenkastens bei Bogenfahrt gegenüber. Mit zunehmender Geschwindigkeit vergrößern sich die Widersprüche dieser Anforderungen und es können mit rein passiven Feder-Dämpfer-Systemen nur noch unbefriedigende Kompromisse erreicht werden.

Mit der Integration aktiver Komponenten ins Schienenfahrzeug, die bislang mechanische Komponenten ergänzen oder ersetzen, werden dem Fahrzeug Sensoren, Regler und Aktoren zugefügt. Aus der Sicht der Fahrzeugdynamik ist das mechanische System dann nur noch Teilsystem des Gesamtsystems, dessen dynamisches Verhalten von Steuer- und Regelalgorithmen, sowie den eingesetzten Aktoren und Sensoren beeinflußt wird. Solcherart aufgebaute Systeme werden auch als mechatronische Systeme bezeichnet.

In den letzten Jahren sind zum Thema aktive Komponenten in Schienenfahrzeugen zahlreiche Untersuchungen vorgenommen worden, wobei einige auch für den Regelbetrieb zum Einsatz kamen bzw. kommen. Dazu beigetragen haben die wesentliche Steigerung der Leistungsfähigkeit der Rechentechnik, die nun auch die Umsetzung komplexer Regelstrategien erlaubt, die Entwicklung besserer und preisgünstigerer Sensoren, teilweise auch auf der Grundlage neuer Sensorkonzepte, und die Erkenntnis, daß die Zukunft für die Verbesserung der Fahrzeugdynamik im mechatronischen Entwurf liegt.

Der vorliegende Beitrag wird im weiteren Einsatzgebiete aktiver Baugruppen zur Beeinflussung der Fahrzeugdynamik von Schienenfahrzeugen diskutieren. Danach werden die Werkzeuge für die Modellierung und Simulation von Schienenfahrzeugen kurz vorgestellt. Am Beispiel zweier hydraulischer Baugruppen werden die Möglichkeiten der Einbindung dieser in das MKS-Simulationsprogramm beschrieben und in einer Zusammenfassung bewertet.

2 Einsatzgebiete aktiver Komponenten im Schienenfahrzeug

Die im Schienenfahrzeug eingesetzten aktiven Komponenten können auf unterschiedliche Art und Weise klassifiziert werden. Nach der Art der Beeinflussung wird zwischen „semi-aktiven“ und „aktiven“ Komponenten unterschieden.

Als „semi-aktiv“ werden Komponenten bezeichnet, deren Charakteristik auf der Basis von Meßwerten des dynamischen Systems beeinflußt werden kann. Oft wird das Dämpfungsverhalten der eingesetzten Bauteile gezielt verändert. Wird diese Veränderung auf der Grundlage von Meßvariablen vorgenommen, die vom geregelten System nicht beeinflußt werden, spricht

man auch von „semi-passiven“ oder „adaptiven“ Komponenten. Beispiele hierfür sind Dämpfer, deren Charakteristik nur in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit variiert wird.

„Aktiv“ sind Komponenten, deren auf das System ausgeübte Kraft in Abhängigkeit von Meßwerten des Systems generiert wird. Im Gegensatz zur „semi-aktiven“ Komponente kann hier die direkte Kraftereinwirkung auf das System beeinflusst werden, während sich diese im „semi-aktiven“ Fall erst aus den Relativbewegungen ergibt.

Die eingesetzten aktiven Komponenten können weiterhin nach ihrer Bandbreite unterschieden werden, d.h. in welchem Frequenzbereich die Komponente wirksam werden kann. Bei Einsatz von Systemen mit niedriger Frequenzbandbreite wird die Fahrzeugdynamik im wesentlichen von den passiven Komponenten beeinflusst. Das aktive Element agiert nur mit geringer Frequenzaktivität, z.B. für eine Niveauregulierung oder Zentrierung. Systeme mit hoher Bandbreite können das dynamische Verhalten des Gesamtsystems im relevanten Frequenzbereich durch die Regelstrategie gezielt beeinflussen.

In den bekannten Realisierungen aktiver Komponenten im Schienenfahrzeug kommen folgende Aktor-Technologien zum Einsatz:

- servo-hydraulisch,
- servo-pneumatisch,
- elektro-mechanisch,
- elektro-magnetisch.

Im folgenden sollen nun die bekannten und die denkbaren Einsatzgebiete aktiver Komponenten, sowie die Probleme beim Einsatz kurz skizziert werden. Ein Überblick über bekannte Realisierungen solcher Systeme wird in [1] gegeben.

2.1 Radialsteuerung für konventionellen Radsatz

Bei Fahrt im Spurkanal bildet der Radsatz eine oszillierende Wellenlaufbewegung um die Gleismitte (**Bild 1**) aus, die eine selbständige Spurhaltung des Radsatzes im Gleis erlaubt. Mit

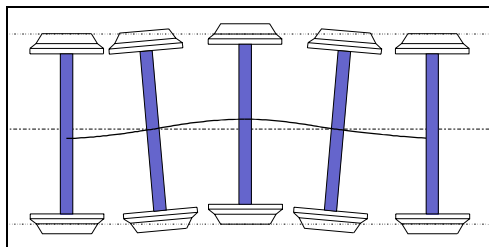


Bild 1: Wellenlauf des Radsatzes

zunehmender Geschwindigkeit nimmt die Dämpfung für diese Bewegung ab. Die Stabilitätsgrenze wird bei der *kritischen Geschwindigkeit* erreicht, bei der für diese Bewegung das volle Spurspiel mit Anlauf des Radsatzes am Spurkranz (Grenzzykel) ausgenutzt wird.

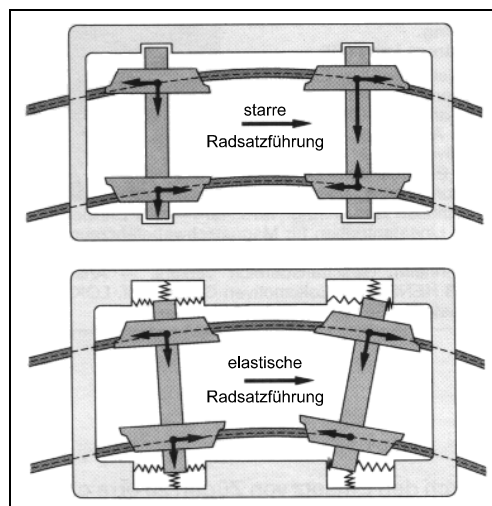


Bild 2: Radiale Einstellung des Radsatzes

Über die Primärfederung kann der Radsatz so gefesselt werden, daß die kritische Geschwindigkeit nach oben in Geschwindigkeitsbereiche verschoben wird, die außerhalb der für das Fahrzeug zugelassenen Höchstgeschwindigkeit liegt. Hier ist eine hohe Längssteifigkeit der Primärfederung von Vorteil (starre Radsatzführung). Für eine Bogenfahrt soll sich jedoch der Radsatz radial einstellen. Die geometrischen Verhältnisse und die Rad-Schiene-Käfte bei Bogenfahrt sind solcherart, daß es bei elastischer Lagerung des Radsatzes den Effekt einer radialen „Selbsteinstellung“ gibt, jedoch wird dieser durch die Primärfederung behindert (**Bild 2**). Hier sind kleine Längssteifigkeiten der Primärfederung von Vorteil (elastische Radsatzführung). Bei nicht radialer Einstellung des Radsatzes im Gleisbogen

tritt erhöhter Verschleiß an Rad und Schiene ein. Für hohe Geschwindigkeiten ist mit passiven Federsystemen kein befriedigender Kompromiß mehr zu erreichen. Daher werden aktive Komponenten eingesetzt, die die radiale Einstellung des Radsatzes bei Bogenfahrt unterstützen.

Die einzelnen Realisierungen solcher Systeme sind je nach Fahrzeugkonstruktion unterschiedlich. Im allgemeinen gibt es zwei Ansätze: entweder werden die aktiven Komponenten so eingesetzt, daß die Federcharakteristik der Primärfederung und damit die Kinematik des Radsatzes direkt beeinflußt wird oder es erfolgt eine direkte Anlenkung des Radsatzes, z.B. durch Verstellen der Lage der Achslager oder Verdrehen einer Zwischenebene mitsamt Primärfederung und Radsatz gegenüber dem Wagenkasten.

Ein generelles Problem beim Einsatz aktiver Komponenten in der Primärfederstufe sind die hohen dynamischen Belastungen, denen diese bei Fahrt ausgesetzt sind. Das erfordert den Einsatz sehr robuster Bauteile. Weiterhin wird durch die Charakteristik der Primärfederung die Laufstabilität des Schienenfahrzeuges direkt beeinflußt. Aus diesem Grund müssen die eingesetzten aktiven Komponenten eine hohe Verfügbarkeit aufweisen und es wird meist notwendig, für den Ausfall der aktiven Komponenten eine Rückfallebene zur Gewährleistung der Laufsicherheit durch passive Komponenten einzubringen.

2.2 Radialeinstellung für Losradsatz

Losradsätze vermeiden die mit der Wellenlaufbewegung des konventionellen Radsatzes verbundene Fahrinstabilität. Abhängig von der Profilvereinigung Rad / Schiene kann aber ein unsymmetrischer Lauf des Losradsatzes bei Fahrt in geradem Gleis auftreten. Der Effekt der radialen Selbsteinstellung bei Bogenfahrt ist nicht wirksam, da sich beide Räder unabhängig voneinander bewegen und somit kein Giermoment für eine radiale Einstellung aufbauen können. Um einen großen Anlaufwinkel des Losradsatzes im Gleisbogen zu vermeiden, muß dieser angelenkt werden. Für die Realisierung einer solchen gezielten Lenkfunktion kommen daher auch für Losradsätze aktive Komponenten zum Einsatz. Diese bewirken entweder eine aktive Kopplung der Räder, um temporär Eigenschaften des Radsatzes zu erzeugen, oder prägen den Rädern ein bestimmtes Moment auf. Auch die Lenkung des Losradsatzes wie für die Radialsteuerung des konventionellen Radsatzes ist möglich. Für einen solchen aktiven Eingriff in eine sicherheitsrelevante Fahrzeugbaugruppe müssen robuste Komponenten mit hoher Zuverlässigkeit eingesetzt werden.

2.3 Aktive Federung

Das primäre Ziel für den Einsatz aktiver Federungen ist die Erhöhung des Fahrkomforts für den Fahrgast. Die wesentlichen Entwicklungen auf dem Gebiet der aktiven Federungen kommen aus dem Automobilbereich, wo diese Systeme auch heute noch Gegenstand zahlreicher Untersuchungen sind. Im Schienenfahrzeug werden aktive Federsysteme in der lateralen Sekundärfederung (Querzentrierung, aktive Querfederung) und in der vertikalen Sekundärfederung eingesetzt.

Die Erhöhung des Fahrkomforts kann mit einer weichen Sekundärfederung erreicht werden. Um aber gleichzeitig die damit verbundenen großen Federwege bei Fahrt durch den Gleisbogen zu verhindern, die zum Wanken des Wagenkastens führen, werden aktive Komponenten mit niedriger Frequenzbandbreite eingesetzt. Diese übernehmen hierbei eine Zentrierungs- bzw. Ausgleichsfunktion, beeinflussen aber den Fahrkomfort nicht. Ein Beispiel für solche Federungssysteme sind hydro-pneumatische Federungen (**Bild 4**), bei denen die guten Eigenschaften der Luftfederung mit der Möglichkeit einer aktiven Beeinflussung der Federlänge kombiniert werden. Mit solchen Systemen kann z.B. die Funktion einer Wank-

stabilisierung bei Fahrt durch den Gleisbogen oder auch die Niveauregulierung für den Ausgleich unsymmetrischer Schwerpunktlagen im Wagenkasten realisiert werden.

Für eine gesteuerte Beeinflussung des Fahrkomforts werden in der vertikalen Sekundärfederung aktive Komponenten mit hohen Bandbreiten eingesetzt. Hier kommen sowohl semi-aktive Systeme und voll-aktive Systeme zum Einsatz, die von der Einstellung unterschiedlichen Dämpferverhaltens bis zur Realisierung des Skyhook-Dämpfers einen großen Bereich unterschiedlicher Komplexitätsstufen abdecken. Ein Großteil der Anwendungen befindet sich jedoch noch in einem experimentellen Stadium.

Die Baugruppen der aktiven Federung werden häufig im Zusammenspiel mit den Baugruppen für die Realisierung der im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Neigetechnikfunktion eingesetzt. Ein Beispiel für den Einsatz aktiver Komponenten für Neigetechnik, vertikale Sekundärfederung und aktive Querzentrierung wird in **Bild 3** gegeben.

2.4 Neigetechnik

Ein aktuelles Beispiel für den Einsatz aktiver Komponenten im Schienenfahrzeug ist die Neigetechnik. Sie erlaubt eine deutliche Erhöhung der Durchschnittsreisegeschwindigkeit auf kurvenreichen Strecken unter Einhaltung des Komfortwertes der auf die Passagiere wirkenden Querbeschleunigung.

Die Realisierungen der Neigetechniksysteme erlauben eine Klassifizierung nach ihrer unmittelbaren Eingriffsart:

- Neigen oberhalb der Sekundärfederung,
- Neigen in der Sekundärfederung,
- Neigen unterhalb der Sekundärfederung.

Die Realisierung der Neigetechnikfunktion in der Sekundärfederung kann durch eine gezielte Längenänderung der vertikalen Sekundärfederung bewirkt werden.

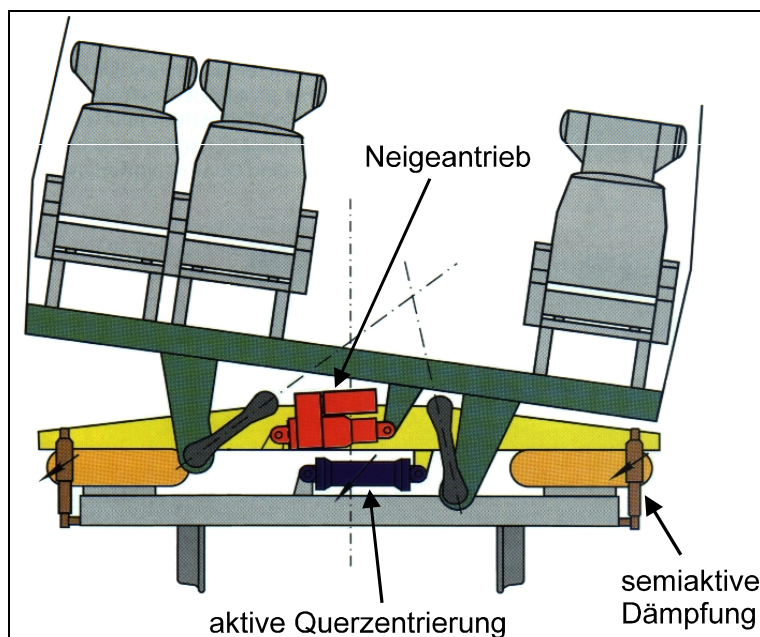


Bild 3: Einsatzbeispiel aktiver Komponenten im Schienenfahrzeug [2]

Für die Umsetzung der Neigetechnik über- oder unterhalb der Sekundärfederung wird in das Fahrzeug eine zusätzliche (mechanische oder logische) Zwischenebene (Neigeebene) eingefügt, die gegenüber einer unteren Ebene geneigt werden kann. Die Kinematik der Neigebewegung wird meist durch entsprechende konstruktive Maßnahmen (geneigte Pendel (**Bild 3**), Hebelmechanismen) festgelegt. Ein wesentliches Vergleichskriterium der genutzten konstruktiven Maßnahmen zur Realisierung einer Neigetechnikfunktion ist die Lage von Drehpol der Neigetechnik und

Schwerpunkt des Wagenkastens. Die Lage dieser beiden Punkte entscheidet darüber, ob das Fahrzeug eine stabile oder labile Gleichgewichtslage in Mittelstellung besitzt und gesonderte Maßnahmen (zusätzliche passive Komponenten) notwendig sind, um bei Ausfall der

Neigetechnik eine stabile Gleichgewichtslage zu gewährleisten und ein Umfallen des Wagenkastens zu verhindern. Wesentlich unterscheiden sich die realisierten Neigetechniksysteme auch in der Art ihrer Ansteuerung, d.h. welche Sensorik eingesetzt und mit welchen Algorithmen das Stellsignal berechnet wird.

Die Stellbewegung der Neigetechnik arbeitet in beiden Fällen gegen die Sekundärfederung. Bei Einsatz aktiver Federstufen muß daher auf eine ausreichende Entkopplung der beiden Regelungen geachtet werden, um gegenseitige Beeinflussungen, die auch zu Instabilitäten führen können, zu verhindern. Durch einen Gesamtentwurf der Regelung für das System „Neigetechnik - Aktive Federung“ können solche Schwierigkeiten von Beginn an vermieden werden.

Beim Einsatz der Neigetechnik unterhalb der Sekundärfederung, wird diese beim Neigevorgang mit geneigt. Dies führt zur Verminderung der Belastung der Sekundärfederung bei Bogenfahrt und damit zu geringeren Wankwinkeln. Allerdings wird beim Einsatz der Neigetechnik über der Sekundärfederung die dynamische Belastung der aktiven Baugruppen geringer sein.

Wird die Neigetechnik für Züge mit elektrischer Traktion eingesetzt, kann es notwendig werden, bei Neigung des Wagenkastens den Stromabnehmer entsprechend entgegengesetzt zu neigen. In den aktuellen Realisierungen wird dies entweder über entsprechende Hebelmechanismen bewirkt oder aber es wird für den Stromabnehmer eine eigenständige Neigetechnik unabhängig von der des Wagenkastens realisiert. Für die Stellfunktion des zweitgenannten Falls müssen wieder aktive Komponenten eingesetzt werden.

2.5 Beeinflussung der Schwingformen eines Zugverbandes

In den letzten Jahren hat sich verstärkt der Trend durchgesetzt, im Regelbetrieb nichttrennbare Zugverbände einzusetzen. Das ermöglicht den Einsatz aktiver Komponenten zwischen den einzelnen Wagenkästen, um Schwingformen des Zugverbandes gezielt zu beeinflussen.

2.6 Weitere Einsatzgebiete

Weitere Einsatzgebiete aktiver Komponenten im Schienenfahrzeug, die in ihrer primären Zielsetzung nicht auf die gezielte Beeinflussung der Fahrzeugdynamik ausgelegt sind, sind z.B.:

- Stell- und Kippvorrichtungen für Güterwagen,
- Bremsen,
- Nebenantriebe (aktive Kupplungseinrichtungen, Türbedienung).

Damit sind im wesentlichen die Einsatzgebiete aktiver Stellelemente im Schienenfahrzeug genannt. Der Einsatz aktiver Komponenten zur Beeinflussung des akustischen Verhaltens ist ebenfalls Gegenstand aktueller Untersuchungen. Jedoch müssen die dort eingesetzten Stellglieder in ihrer Funktion keine großen Stellwege realisieren können und bedienen einen anderen Frequenzbereich.

3 Simulationswerkzeuge für Entwurf und Analyse

Simulationsprogramme zur Abbildung des dynamischen Verhaltens technischer Systeme sind Stand der Technik. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen technischer Spezialgebiete wurden angepaßte Programmsysteme entwickelt, die den physikalischen Eigenschaften ihrer Disziplin angepaßt sind. Sie bedienen sich i.a. durch Nutzung graphischer Hilfsmittel bei Modellaufbau und -analyse einer Darstellungsform, die dem Anwender vertraut ist. Diese Hilfsmittel ermöglichen einen Modellaufbau auf der Basis fachspezifischer ingenieur-

wissenschaftlicher Kenntnisse und befreien den Anwender von der Formulierung der beschreibenden Differentialgleichungssysteme.

3.1 Die Modellierung von Schienenfahrzeugen

Auch für die Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines Fahrzeuges in frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung werden Simulationswerkzeuge eingesetzt. Ziel dabei ist es, durch die Modellierung das zu untersuchende Verhalten des Fahrzeuges genügend genau durch ein mechanisches Ersatzsystem wiederzugeben. Je nach Anspruch und Ziel der Untersuchungen kommen unterschiedliche Modellierungsarten zum Einsatz. Diese unterscheiden sich im wesentlichen in der Art der Modellierung, dem Modellierungsaufwand, der Modellierungsgenauigkeit und dem für das Modell gültigen Frequenzbereich.

Im Bereich der Mechanik kommen im wesentlichen vier Modellierungsarten zum Einsatz [3]:

- Modellierung durch kontinuierliche Systeme (KOS),
- Methode der finiten Elemente (FEM),
- Randelemente Methode (BEM),
- Methode der Mehrkörpersysteme (MKS).

Die Anwendung jeder dieser Modellierungsarten erlaubt für sich allein die effiziente und zuverlässige Lösung eines Teilproblems. Für eine umfassende Untersuchung des mechanischen Systems Schienenfahrzeug kann es aber notwendig werden, Werkzeuge zur Verfügung zu haben, die eine Verkopplung dieser Modellierungsarten zulassen.

Für die Modellierung mechanischer Systeme mit Körperbewegungen großer Amplitude (Fahrzeuge, Roboter, Raumfahrt, ...) und niedriger Frequenz haben sich am Markt Programme nach der Theorie der Mehrkörpersysteme (MKS) durchgesetzt. Unter der Annahme einer diskreten Masseverteilung und der Vernachlässigung von Verformungen der Körper wird das Modell aus idealisierten starren Körpern aufgebaut, deren Bewegungsfreiheiten durch zugehörige Gelenke definiert werden. Kraftwirkungen zwischen den Körpern werden an diskreten Stellen durch masselose Kraftkoppellemente nachgebildet. Auf der Basis dieser Daten kann über einen Mehrkörperformalismus das beschreibende System der Bewegungsdifferentialgleichungen generiert werden. Algorithmen und Terminologie einiger am Markt verfügbarer MKS-Programme sind in [4] zusammengestellt.

Für Untersuchungen, in denen die Verformungen der Körper nicht vernachlässigt werden können (Komfortbetrachtungen bei Schienenfahrzeugen), wird eine Mischform aus MKS- und FEM-Modellierung notwendig. Die elastischen Eigenschaften von Körpern können in einige MKS-Programme über den Import der Modalmatrizen eingebunden werden.

Für den Einsatz der MKS-Programme zur Simulation von Schienenfahrzeugen muß die Software die Einbindung des Rad-Schiene-Kontaktes, die Vorgabe des Fahrweges und der Fahrzeugregung durch Gleisunebenheiten gestatten. Diese Funktionalität wird nicht von allen MKS-Programmen ermöglicht. Eine Zusammenstellung und ein Vergleich der für die Modellierung von Fahrzeugen benutzten MKS-Programme, speziell auch für Schienenfahrzeuge, wird in [5] gegeben.

Am Institut für Theoretische Grundlagen der Fahrzeugtechnik der TU Dresden (ITGF) wird für die Modellierung und Simulation von Schienenfahrzeugen das MKS-Programmsystem SIMPACK [6] eingesetzt. Dieses Programmsystem stellt die volle Funktionalität eines MKS-Programmes bereit und gestattet durch entsprechende Programmmodule die Einbeziehung des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes für Straßenfahrzeuge und des Rad-Schiene-Kontaktes für Schienenfahrzeuge in die Simulation.

3.2 Die Modellierung hydraulischer Baugruppen

Die Integration aktiver Komponenten bringt ein zusätzliches dynamisches Verhalten in das System Schienenfahrzeug. Für eine Analyse und Synthese von Schienenfahrzeugen mit aktiven Komponenten ist es daher erforderlich, dieses zusätzliche dynamische Verhalten in die Untersuchungen einzubeziehen.

Innerhalb eines Projektes am ITGF war für die Realisierung einer Neigetechnik die Umsetzung eines ventilgesteuerten Stellantriebs (**Bild 4**) und für die laterale Sekundärfederstufe eine hydropneumatische Federung (**Bild 4**) erforderlich.

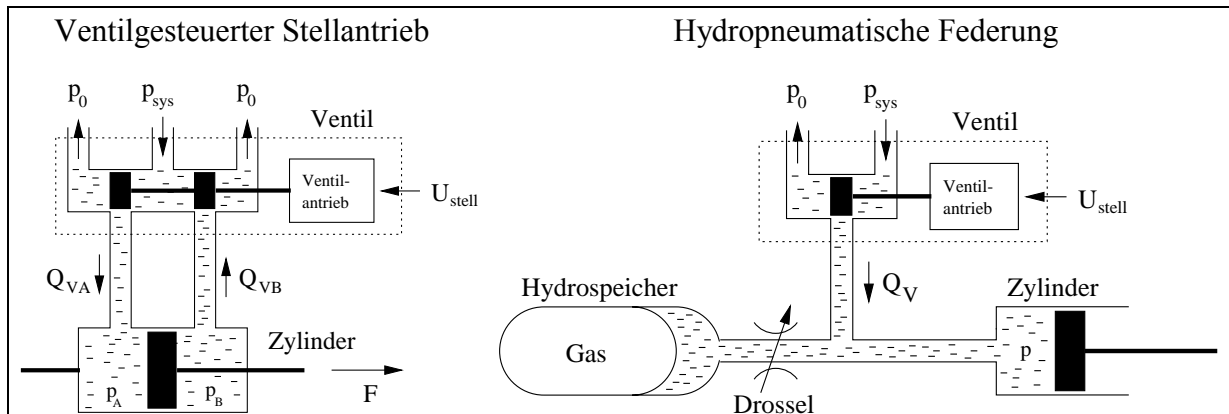


Bild 4: Beispiele für hydraulische Baugruppen im Schienenfahrzeug

Für die simulationstechnische Darstellung hydraulischer Antriebstechnik ist eine Vielzahl von Programmen verfügbar, die i.a. auf dem Konzept der Simulation mit konzentrierten Parametern beruhen. Sie erlauben eine an den Aufbau von Hydraulikschaltplänen orientierte graphische Modellerstellung. Die wichtigsten Merkmale für ihre Hydraulikorientierung sind die Implikation der Gesetze der Hydrostatik, des Verhaltens hydraulischer Kapazitäten und die Berücksichtigung der nichtlinearen Fluideigenschaften. Expertenwissen zur hydraulischen Antriebstechnik ist in Bibliotheken hinterlegt und steht beim Modellaufbau zur Verfügung.

Wird für die Modellierung des hydraulischen Teilsystems ein solches Simulationsprogramm eingesetzt und für die Abbildung des Fahrzeuges ein MKS-Simulationsprogramm, so ist für die Analyse des „Schienenfahrzeugs mit Hydraulik“ im Zeitbereich (Zeitschrittintegration) die Kopplung dieser Programme notwendig. Aus Sicht des benutzten MKS-Simulationsprogrammes SIMPACK ist aber zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Schnittstelle zu einem Hydraulik-Simulationsprogramm verfügbar. Für eine Zeitschrittintegration des Gesamtsystems ist es daher notwendig, die hydraulischen Baugruppen über eine der von SIMPACK angebotenen Schnittstellen einzubeziehen. Eine Beschreibung der Möglichkeiten erfolgt im nächsten Abschnitt.

Voraussetzung für eine solche Lösung ist aber in jedem Fall, daß die mathematische Beschreibung der hydraulischen Komponenten durch nichtlineare Differentialgleichungssysteme vorliegt. Im Fall der oben angegebenen hydraulischen Baugruppen wurde vom Hydraulikhersteller entsprechende Unterstützung gegeben.

3.3 Einbindung aktiver Kraftelemente in SIMPACK

Das Programmsystem SIMPACK stellt für die Modellierung von Kraftkopplungen eine Bibliothek von Kraftelementen bereit. Für den speziellen Fall des hydraulischen Stellantriebs bzw. der hydro-pneumatischen Federung wird jedoch kein Standardelement angeboten. Die Einbindung solcher Systemanteile in eine Zeitschrittintegration kann in SIMPACK über zwei Schnittstellen vorgenommen werden:

1. Benutzerelemente (USER-Routines)

Eigene Algorithmen für Kraftelemente können in vorgegebenen FORTRAN-Subroutinen programmiert werden. Für dynamische Anteile werden spezielle Variablen definiert, die als Zustandsgrößen dem Differentialgleichungssystem des MKS-Modells zugefügt und vom Integrator mit gelöst werden. Die so eingebundenen Benutzer-Krafelemente können wie Standard-Krafelemente über die grafische Benutzeroberfläche benutzt und parametrisiert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Realisierung einer solchen Form der Einbindung für einen ventilgesteuerten Hydraulikantrieb ist in [7] beschrieben.

2. Schnittstellen zu den Simulationspaketen Matrix_x/Systembuild bzw. Matlab/Simulink

Die Programmpakete Matrix_x bzw. Matlab besitzen beide eine grafische Simulationsoberfläche (Systembuild bzw. Simulink), die eine Modellierung nichtlinearer dynamischer Systeme über die Verkopplung von Funktionsblöcken und deren Zeitschrittintegration erlaubt. Die Modellierung hydraulischer Systemanteile, d.h. die Nachbildung der beschreibenden Differentialgleichungssysteme, kann also durch den Einsatz dieser Werkzeuge erfolgen. Die Modellierung des hydraulischen Steuerventils in Matrix_x ist in **Bild 5** dargestellt.

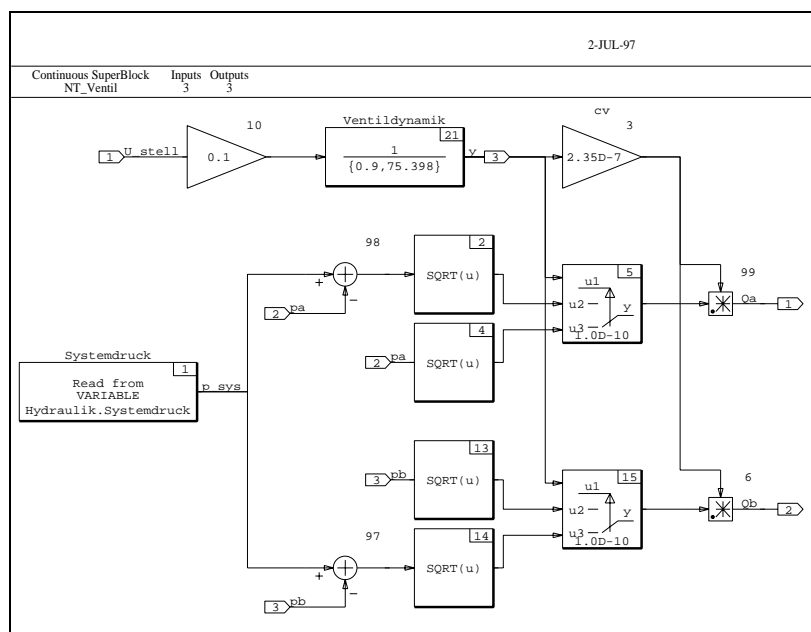


Bild 5: Modellierung der hydraulischen Baugruppe Steuerventil in Matrix_x

Für beide Programmpakete werden mehrere Schnittstellen angeboten [8, 9]. Die Schnittstellen basieren weitestgehend darauf, daß das mechanische Modell aus SIMPACK in irgendeiner Form in die Matrix_x- bzw. Matlab-Umgebung eingebunden wird. Dies ist sowohl für das linearisierte mechanische Modell in Form der linearen Systemmatrizen als auch für das nichtlineare mechanische Modell möglich. Die Zeitschrittintegration wird in der Programmumgebung von Matrix_x bzw. Matlab durchgeführt. Für die

SIMPACK-Matlab-Kopplung wurde inzwischen noch eine zusätzliche Schnittstelle geschaffen, bei der die verkoppelten Teilmodelle in SIMPACK bzw. Matlab getrennt integriert werden und beide Programme nur zu diskreten Zeitpunkten Daten austauschen. Dies räumt den bisher wesentlichen Nachteil der Matlab-Kopplung beiseite, daß in Matlab keine Integrationsalgorithmen für Differential-Algebraische-Gleichungssysteme (DAE - Differential Algebraic Equations) zur Verfügung stehen. Ein solches DAE entsteht bei der Modellierung mechanischer Systeme mit geschlossenen Schleifen. Für die Lösung des DAEs des mechanischen Teilsystems können nun die in SIMPACK angebotenen Solver benutzt werden.

Am ITFG wurde die Simulation von Schienenfahrzeugen mit aktiven hydraulischen Stellelementen bisher über die Programmkopplung mit Matrix_x und durch die Einbindung der hydraulischen Elemente durch benutzerdefinierte Krafelemente in SIMPACK realisiert. Die anfänglich über die SIMPACK-Matrix_x-Schnittstelle realisierte Einbindung hydraulischer Baugruppen ließ zwar die Integration verkoppelter hydraulischer und mechanischer Systeme mit kinematischen Schleifen zu, funktionierte aber leider zum damaligen Zeitpunkt bei

Einbeziehung des Rad-Schiene-Kontaktes in die Simulation nicht mehr. Aus diesem Grund wurde im weiteren eine Integration der hydraulischen Baugruppen in das MKS-Modell über die benutzerdefinierten Kraftelemente vorgenommen. Für die hydraulischen Baugruppen Ventil und Zylinder wurden eigene Kraftelemente programmiert. Damit ist eine relativ flexible Einbindung gegeben, die auch die Möglichkeit zuläßt, daß ein Ventil mehrere Zylinder bedient. Die Benutzung dieser programmierten Kraftelemente setzt allerdings einen relativ tiefen Einblick in das Programmsystem SIMPACK voraus.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz neuer Technologien und Fahrzeugkonzepte, sowie die Lösung von typischen Auslegungskonflikten im Schienenfahrzeug führen zum Trend, verstärkt aktive Komponenten zur Beeinflussung des Fahrzeugverhaltens in das Schienenfahrzeug zu integrieren.

Die Integration dieser Baugruppen erfordert natürlich auch die Einbeziehung des dynamischen Verhaltens in die simulationstechnischen Untersuchungen. Die Modellierung und Analyse von Schienenfahrzeugen für fahrdynamische Untersuchungen wird heute mit MKS-Programmen durchgeführt. Am Beispiel des am ITGF eingesetzten MKS-Programmes SIMPACK wurden zwei Möglichkeiten zur Einbindung von hydraulischen Baugruppen für eine Zeitbereichsanalyse (Zeitschrittintegration) aufgezeigt.

Für beide Fälle muß die Beschreibung der hydraulischen Baugruppen in Form von Differentialgleichungen vorliegen. Damit sind aber auch gleichzeitig die Grenzen der Gültigkeit einer solchen Modellierung festgelegt. Der Aufwand für eine Modellierung und Umsetzung komplexer Hydraulik-Systeme, die z.B. Leitungslängen, Druckschwankungen durch die Versorgung, etc. , mit berücksichtigen, wird unvertretbar hoch. Die aufgezeigten Möglichkeiten einer Realisierung werden sich daher immer auf kleine, eigenständige Hydraulik-Baugruppen beschränken. Beide Lösungen sind für eine flexible Modellierung hydraulischer Antriebssysteme nicht als akzeptabel anzusehen, da sowohl der Modellierungsvorgang als auch die Beschreibungstiefe der hydraulischen Elemente nicht mit der eines Hydrauliksimulationsprogrammes verglichen werden kann.

Ein Ausweg aus dieser Situation stellt die Kopplung eines Hydrauliksimulationsprogrammes mit einem MKS-Simulationsprogramm dar. Die Modellierung komplexer hydraulischer Antriebssysteme kann so auf der Grundlage einer angebotenen Elementebibliothek hydraulischer Grundbausteine erfolgen. Mit dem gekoppelten Werkzeug kann dann die geschlossene Untersuchung des Systems „Schienenfahrzeug mit Hydraulik“ vorgenommen werden. Die Realisierung einer solchen Verkopplung zweier Simulationsprogramme ist eines der geplanten Forschungsvorhaben des ITGF.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Goodall, R.; Active Railway Suspensions: Implementation, Status and Technological Trends, Vehicle System Dynamics, 28 (1997), pp. 87-117
- [2] Rath, B.; Der Komfortzug - ein innovatives Neigetechnik-Konzept
Stribersky, A.; ZEV+DET Glas. Ann. 121 (1997) Nr. 5 Mai
Müller, H.;
- [3] Eberhard, P.; Zur Mehrkriterienoptimierung von Mehrkörpersystemen, Fortschr.-bericht VDI, Reihe 11, Nr. 227
VDI Verlag (GmbH), Düsseldorf 1996
- [4] Schiehlen, W., ed.; Multibody Systems Handbook,
Springer 1990
- [5] Kortüm, W. Multibody computer codes in vehicle system dynamics,
Sharp, R.S., ed.; Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol. 22, 1993
- [6] Rulka, W.; Anwendung moderner Auslegungsstrategien für
Haigermoser, A.; Schienenfahrzeuge durch Einsatz des Simulations-
Mauer, L.; programms SIMPACK
Netter, H.; VDI-Tagung: Simulation und Simulatoren für den Schienenverkehr,
München, 21./22.09.95,
http://www.op.dlr.de/FF-DR/dr_fs/publications/wheel_rail_vdi_sep_95.TeX.ps.gz
- [7] Dronka, S.; Zur Einbindung hydraulischer Elemente in SIMPACK
Simpack-News, 2. Jahrgang, 2. Ausgabe
- [8] Krüger, W.; SIMAX: SIMPACK-MATRIXx-Interface
Simpack-News, 1. Jahrgang, 2. Ausgabe, Intec
- [9] n.n.; Design mechatronischer Systeme mit SIMPACK und MATLAB
Newsserver, Ausgabe 1/98, Scientific Computers