

Leichtbau-Fahrwerke für den Regionalverkehr

Bruno Meier, dipl. Ing. ETH

Dr.-Ing. Oldřich Polách, Doz. habil.

Thomas Grossenbacher, Masch.-Ing. HTL

Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik, Winterthur

Aufbauend auf Erfahrungen mit sich radial-einstellenden Fahrwerken für Hochleistungslokomotiven, befasst sich die SLM seit Anfang der neunziger Jahre mit der Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von modernen Trieb- und Lauffahrwerken für den Regionalverkehr. Dies sowohl im Bereich der Normalspur wie auch der Meterspur.

Erstmals wurde im Drehgestell für die Triebwagen Be 4/4 der SZU eine zugkraftunabhängige Radialeinstellung in ein Drehgestell mit verwindungsweichem Drehgestellrahmen Bauart SLM eingebaut (vergleiche Bild des Lenkachs-drehgestells für den Be 4/4-Triebwagen der SZU).

Normalspuriger GTW der Mittelthurgaubahn zwischen Nenzingen und Stockach (Foto R. Behrbohm, 9. 9. 1996).

Die sehr guten Ergebnisse dieser Konstruktion – in erster Linie seien hier die deutlich längeren Standzeiten der Radlaufflächen infolge geringeren Verschleisses und eine markante Reduktion des Kurvenkreischens erwähnt – bildeten dann die Basis für entsprechende Weiterentwicklungen, die nun in grösserer Stückzahl unter Gelenktriebwagen GTW 2/6 im Einsatz sind.

Lenkachs-Drehgestell

Wie bereits in [1] beschrieben, besteht das Lenkachs-Drehgestell aus einem H-förmigen, verwindungsweichen Drehgestellrahmen und zwei Antriebseinheiten, die sich aus querliegendem Motor mit zweistufigem Getriebe mit tangential gefedertem Grossrad

in Tatzlageranordnung und dem Radsatz zusammensetzen. Auf jedes Rad wirken zwei Klotzbremseinheiten mit Sinterklötzen in Kompaktbauweise, die an den gekröpften Langträgern des Drehgestellrahmens befestigt sind. Die beiden Antriebseinheiten sind in Drehgestellmitte mit der sogenannten Motorquerkupplung untereinander verbunden, so dass sich Vertikalreaktionen der Zug- und Bremskräfte kompensieren und eine radiale Einstellung der Radsätze bei Kurvenfahrt möglich bleibt. Die Längsanbindung zum Kasten erfolgt über eine Zug-/Druckstange von einem Tatzlagerrohr aus. Die Primärfederung besteht aus zwei Gummischichtfedern pro Achslager, in der Sekundärfederstufe sind zwei Luftfedern mit integrierter Notlaufauflage eingebaut.

Die spezielle Bauart des verwindungsweichen Drehgestellrahmens ermöglicht es, auf eine zusätzliche Wankstütze zu verzichten. In der Sekundärfederstufe sind vertikal und quer hydraulische Dämpfer parallel zum Luftfedersystem montiert, die Primärfederstufe kommt ohne hydraulische Dämpfer aus.

Rahmenloses Triebfahrwerk

Infolge der speziellen Anordnung unter einem kurzen GTW-Mittelteil [2] entfällt die sonst für ein Drehgestell typische Anforderung, gegenüber dem Fahrzeugkasten grosse Drehbewegungen um die Fahrzeughochachse ausführen zu müssen. Dieser Anwendungsfall ist somit prädestiniert für den Einsatz eines gewichtssparenden, rahmenlosen Fahrwerks. Das Grundkonzept betreffend Achsantrieb und Radialeinstellung der Achsen unterscheidet sich nicht vom eingangs erwähnten Lenkachs-drehgestell. Die Vertikallasten werden aber hier direkt über weiche Federsätze vom Kasten auf die Achslager übertragen; der Drehgestellrahmen wird dadurch überflüssig.

Als zentrale Komponenten sind die beiden Antriebseinheiten, bestehend aus je einem querliegenden Motor mit zweistufigem Getriebe, einerseits auf den Radsätzen tatzlager, andererseits in Fahrwerksmitte am Kasten mit vertikalen Pendeln aufgehängt und quer miteinander verbunden (Motorquerkupplung). Die Längsanbindung und Übertragung der Zugkräfte erfolgt je über eine Zug-/Druckstange vom Tatzlagerrohr an den Kasten. Eine leichte Längstraverse zwischen den Achslagern sichert die Achslagergehäuse gegen Verdrehen und stellt die nötigen Steifigkeiten für die Achsführung sicher. Sie dient ebenfalls als Befestigungsstelle für allfällige Magnetschienenbremsen, wie dies bei den Meterspurausführungen realisiert wurde [3]. Queranschlagpuffer an den Achslagergehäusen stellen die nötige Progression der Fahrwerks-Querfederung sicher.

Die oben beschriebene Radsatzführung stellt auf einfachste Weise die zugkraftunab-



Fahrzeuge mit SLM-Leichtbau-Fahrwerken

Fahrzeug	Fahrwerke pro Fahrzeug	Anzahl Fahrzeuge	in Betrieb seit
Triebwagen Be 4/4 der SZU	2 Lenkachs-drehgestelle	8	1992
GTW 2/6 Prototyp für MThB	1 rahmenloses Triebfahrwerk 2 Laufdrehgestelle	3	1996
GTW 2/6 Meterspur für BTI und MOB/CEV	1 rahmenloses Triebfahrwerk 2 Laufdrehgestelle	11	1997
GTW 2/6-Serie für Hessische Landesbahn	1 rahmenloses Triebfahrwerk 2 Laufdrehgestelle	15	Auftrag in Abwicklung
GTW 2/6-Serie für DB AG	1 rahmenloses Triebfahrwerk 2 Laufdrehgestelle	30 + 14	Auftrag in Abwicklung

hängige Radialeinstellung der Radsätze bei Bogenfahrt sicher. Durch die Motorquerkupplung sind die Ausdrehbewegungen der Radsätze miteinander gekoppelt, was die Radialeinstellung wesentlich unempfindlicher gegenüber der Rad-/Schiene-Berührgeometrie und besonders geeignet für das Befahren enger Kurven macht.

Die Auslegung der Federung macht zusammen mit der relativ grossen Querbasis der Vertikalabstützung auch bei diesem Fahrwerk eine zusätzliche Wankstütze überflüssig.

Pro Radsatz ist ein Paar Radbremssscheiben eingebaut. Der Einbau eines zweiten Paares Radbremssscheiben ist möglich. Die pneumatischen Bremszylinder mit Betätigungsstäbe sind am Motorschild und am Getriebegehäuse befestigt.

Vier hydraulische Vertikaldämpfer, zwei Querdämpfer über den Achsen und allenfalls zwei Schlingerdämpfer längs zwischen den Achslagern vervollständigen die Ausrüstung des rahmenlosen Triebfahrwerks, wie es in der beschriebenen Ausführung zur Zeit für die Hessische Landesbahn gebaut wird und für weitere Anwendungen für die DB AG vorgesehen ist.

Das Fahrwerk hat inklusive Motoren und Getriebe ein Gewicht von lediglich 7,4 t.

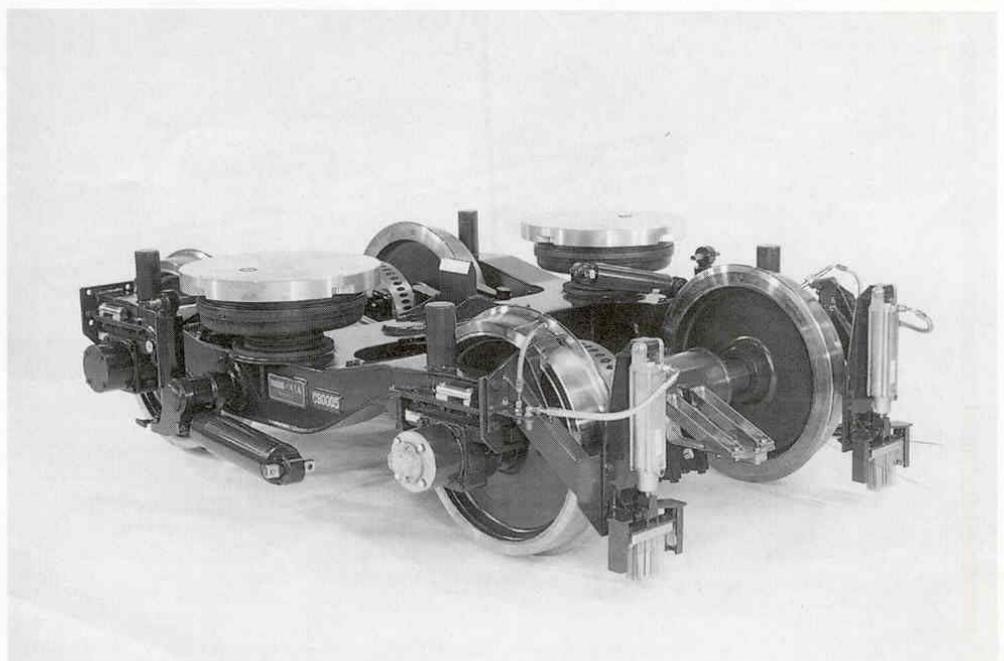
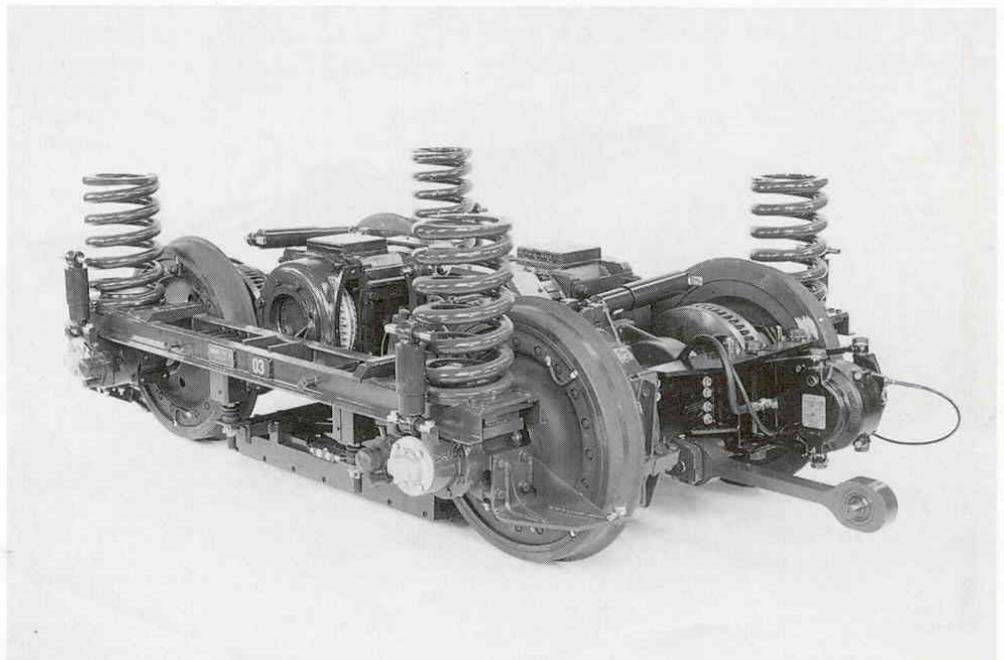
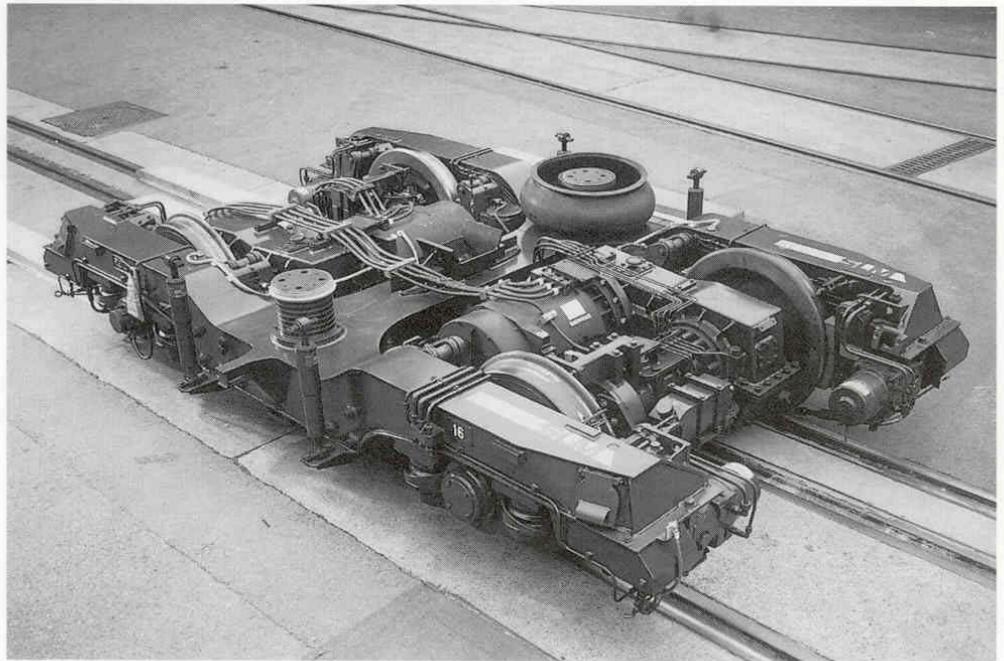
Verwindungsweiches Laufdrehgestell

Zentrales Element der verwindungsweichen Laufdrehgestelle ist der offene, H-förmige Drehgestellrahmen. Wie bereits die Rahmen der Lenkachs-Drehgestelle zeichnen sich auch diese Rahmen durch die spezielle Geometrie des Mittelträgers aus, die es erlaubt, extrem grosse Gleisverwindungen praktisch reaktionsfrei aufzunehmen [1], [4], [5].

An auf den Achsen gelagerten Bremswagen befinden sich die pneumatischen Betätigungsorgane für die Wellenbremssscheiben. Die beiden Bremswagen sind in Drehgestellmitte miteinander verbunden, und vertikal gegenüber dem Rahmen mittels eines Pendels gehalten. Werden zusätzlich Magnetschienenbremsen benötigt, so werden diese in Tiefaufhängung direkt am Drehgestellrahmen gehalten. Infolge der in Vertikalrichtung relativ harten Kennlinie der Primärfederung ist dies möglich.

Die Längsanbindung der Drehgestelle geschieht ebenfalls über Zug-/Druck-Stangen von einem Bremswagen weg an die Wagenkasten. Diese Anordnung erlaubt wiederum eine Radialeinstellung der Radsätze, mit allen bereits weiter oben beschriebenen Vorteilen.

Die Abfederung geschieht in der Primärfederstufe über eine Gummischichtfeder; in der Sekundärfederstufe sind pro Drehgestell



Oben: Lenkachsdrehgestell des SZU-Triebwagens Be 4/4 (Foto SLM).

Mitte: Rahmenloses Triebfahrwerk in Meterspurausführung für die GTW 2/6 der BTI und MOB/CEV (Foto SLM).

Unten: Verwindungsweiches Laufdrehgestell für Meterspur, hier mit zusätzlichen Schienenbürsten zum Reinigen der Schienen (Foto SLM).



zwei Luftfedern mit integrierter Notfederung plaziert. Die spezielle Ausführung des Drehgestellrahmens hat die Eigenschaft einer Wankstütze in der Primärfederstufe, was eine zusätzliche Wankstütze in der Luftfederstufe mit den bekannt negativen Auswirkungen auf die Körperschallübertragung überflüssig macht.

Hydraulische Dämpfer werden nur sehr spärlich benötigt. Die Primärfederstufe kommt komplett ohne Dämpfer aus; in der Sekundärfederstufe braucht es mindestens einen Querdämpfer und infolge der guten Radialeinstellung zwei Schlingerdämpfer in Fahrzeuginnenrichtung. Die Vertikaldämpfung konnte mit gutem Erfolg komplett ins Luftfedersystem integriert werden.

Das komplette Drehgestell in Normalspurausführung mit Magnetschienenbremsen zeichnet sich durch ein sehr niedriges Gewicht von nur 3,3 t aus.

Strukturintegrität

Die Schlüsselkomponenten der Fahrwerke wurden schon in einem sehr frühen Konstruktionsstadium für hohe Zuverlässigkeit mit sehr geringem Leistungsgewicht konzipiert und deshalb mit der Methode der Finiten Elemente untersucht. Besonders sorgfältig wurden der Drehgestellrahmen, der Bremswagen und die Längstraverse der Triebfahrwerke untersucht.

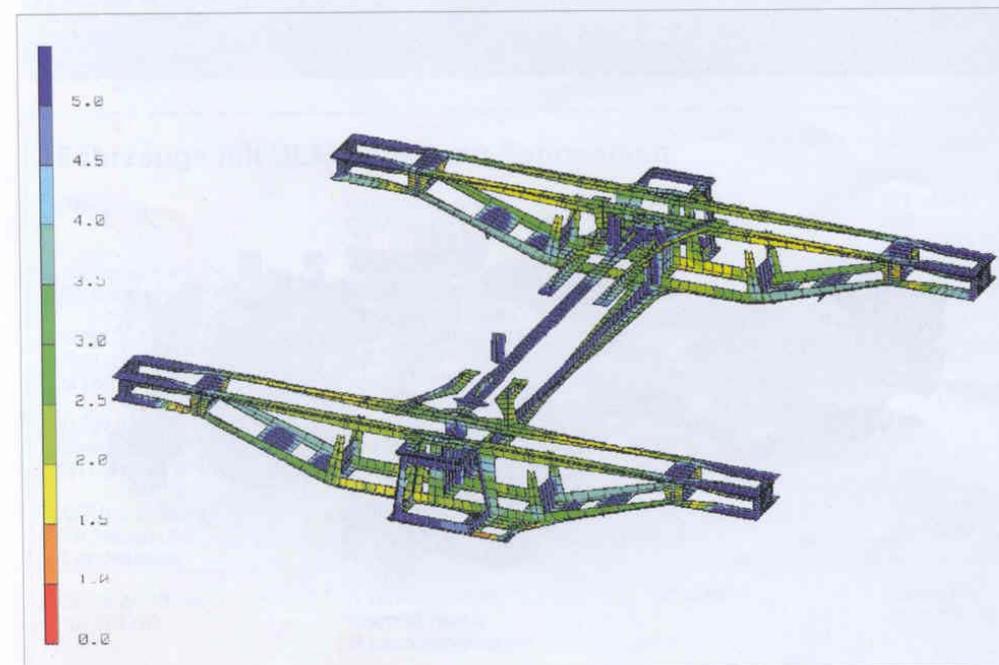
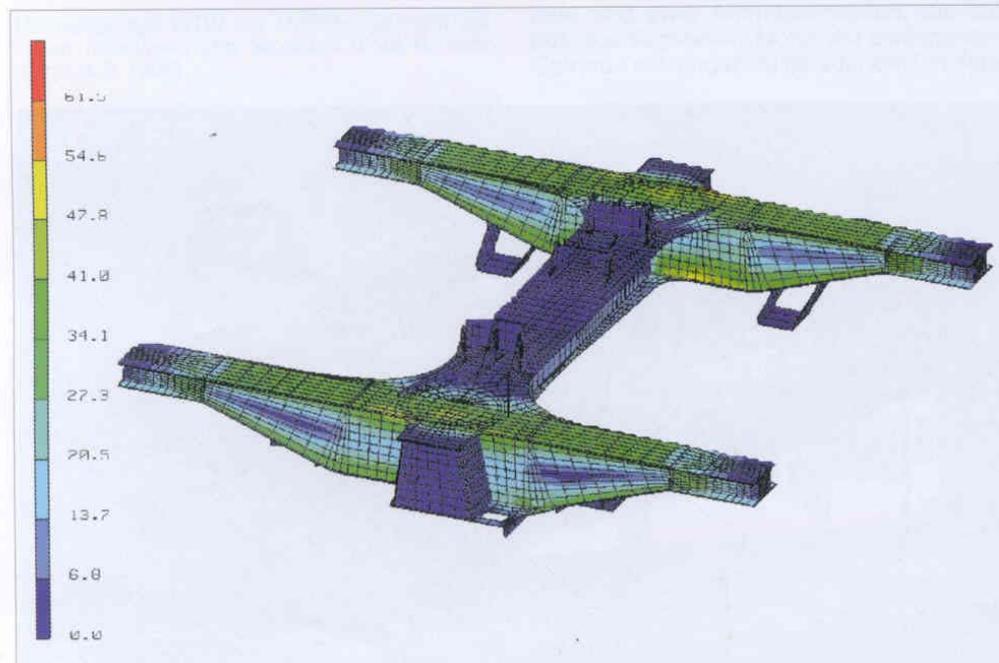
Die Lastannahmen beruhen auf den entsprechenden UIC-Vorschriften, wobei die speziellen Eigenschaften sich radialeinstellender Radsätze und ideal verwindungsweicher Drehgestellrahmen mit einfließen.

Als Werkzeug dient in der Regel die Software von IDEAS/ABAQUS, wobei vor allem für die Spannungsbewertung SLM-eigene Software verwendet wird.

Für die in Deutschland zu liefernden Serien ist ein Drehgestellrahmen-Schwingversuch nach den gängigen europäischen Normen notwendig. Zur Zeit wird ein solcher Test an einem Rahmen für die GTW 2/6 der Hessischen Landesbahn durchgeführt. Ebenfalls mit der Finite-Elemente-Methode wird auch die Reaktion des Drehgestellrahmens auf die Verwindung ermittelt, welche im Versuch leicht nachgewiesen werden kann.

Lauftechnische Berechnungen

Die Entwicklung und Konstruktion der SLM-Fahrwerke wird durch lauftechnische Auslegungs- und Nachweisrechnungen unterstützt. Die rechnerische Simulation hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Bereits in der Entwurfs- und



Oben: Verwindungsweiches Laufdrehgestell für Normalspur (Foto SLM).

Mitte: Darstellung der Vergleichsspannungen bei Vertikallast (Grafik SLM).

Unten: Mit SLM-eigener Software ermittelte Dauerfestigkeitsreserven der Schweißnähte (Grafik SLM).

Meterspuriger GTW für die Biel – Täuffelen – Ins-Bahn (Foto R. Steiner, 11. 8. 1997).

Auslegungsphase werden einzelne Varianten durchgespielt und die Parameter optimiert. Vor dem Fertigungsbeginn wird die Einhaltung der Grenzwerte durch lauftechnische Nachweisrechnungen überprüft, so dass bei Bedarf Gegenmassnahmen eingeleitet werden können.

Eine Grundvoraussetzung für effiziente und zuverlässige lauftechnische Berechnungen ist ein Softwarepaket, das umfangreiche Möglichkeiten zur Modellierung und Berechnung von Mehrkörpersystemen mit Bedienungsfreundlichkeit und Darstellungsmöglichkeit verbindet. Für die dynamischen Berechnungen von Schienenfahrzeugen ist ausserdem das Rad/Schiene-System als spezielles Element unabdingbar. SLM verwendet seit 1996, neben dem schon jahrelang eingesetzten Programm MEDYNA, das moderne und leistungsfähige Programmpaket ADAMS/Rail, das durch Erweiterung des in der ganzen Welt stark verbreiteten Programms ADAMS um die schienenfahrzeugspezifischen Elemente und Berechnungen entstanden ist. Das Programm ADAMS/Rail stellt eine breite Palette an Rechenverfahren zur Verfügung, wie

- Berechnung nomineller Schnittkräfte,
- Berechnung von statischen und quasistatischen Zuständen,
- Eigenwert- und Eigenvektor-Berechnung,
- lineare Stabilitätsanalyse,
- kinematische Analyse,
- nichtlineare Simulation im Zeitbereich.

Mit dem Postprocessing können neben Zeitverläufen und X-Y-Diagrammen auch spektrale Leistungsdichten, Komfortziffern und verschiedene statistische Grössen ausgewertet werden. Die Modelle werden interaktiv gebildet; die Resultate können durch Animation sehr anschaulich beobachtet oder präsentiert werden.

Auch die GTW-Fahrwerke wurden mit Hilfe der lauftechnischen Berechnungen untersucht. Das Fahrzeugmodell muss neben dem Fahrwerk auch die Parameter des Wagenkastens, und bei den GTW-Fahrzeugen auch die des ganzen Triebzugs, berücksichtigen. SLM ist als Fahrwerklieferant für die Fahreigenschaften des Fahrzeugs zuständig und beteiligt sich an der Auslegung aller Bauteile, die die Fahreigenschaften massgebend beeinflussen, wie zum Beispiel die Kopplung der Wagenkästen bei den GTW-Fahrzeugen. Als Beispiel wird das ADAMS/Rail-Modell des GTW 2/6 für die Hessische Landesbahn gezeigt, das für die Auslegungsrechnung verwendet wurde. Neben den Federn und Dämpfern wurden auch



alle anderen Koppellemente und kinematischen Kopplungen vollständig modelliert.

Im Rahmen der Auslegungs- und Nachweisrechnungen werden typischerweise folgende Berechnungen durchgeführt:

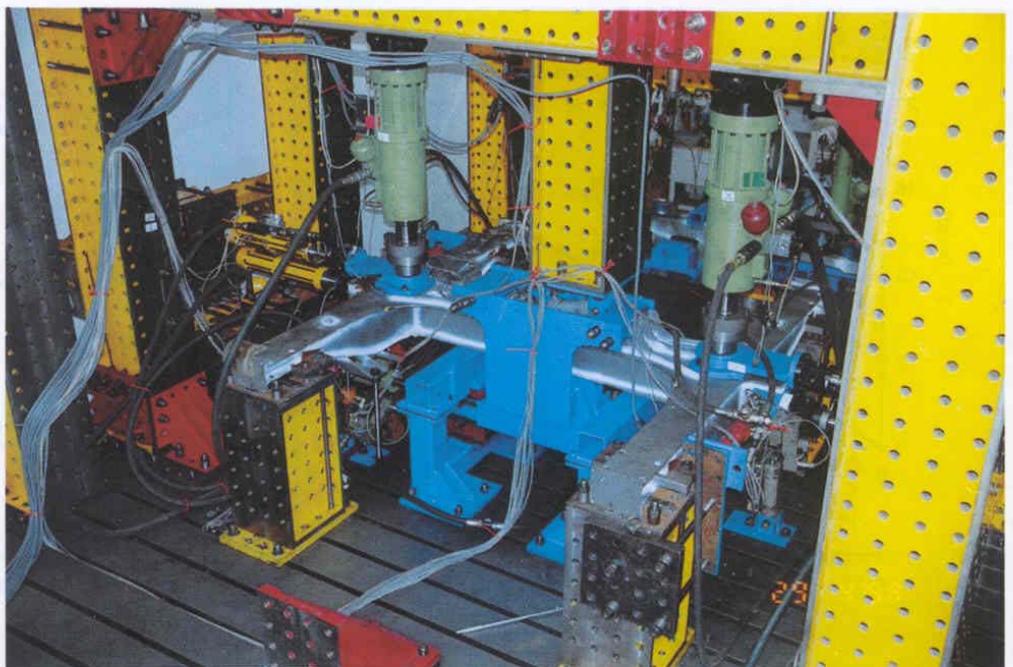
- Eigenwertanalyse (Eigenfrequenzen und -dämpfungen),
- lineare Stabilitätsanalyse,
- Störverhalten und Fahrkomfortberechnung in der Geraden,
- Berechnung der Entgleisungssicherheit im Gleis mit Verwindung,
- quasistatische Bogenfahrtberechnung.

Mit der Eigenwertanalyse wird einerseits die Frequenzkopplung untersucht, andererseits die Dämpfer optimiert, um eine ausreichende, aber nicht zu grosse Dämpfung der einzelnen Schwingungsformen zu erreichen.

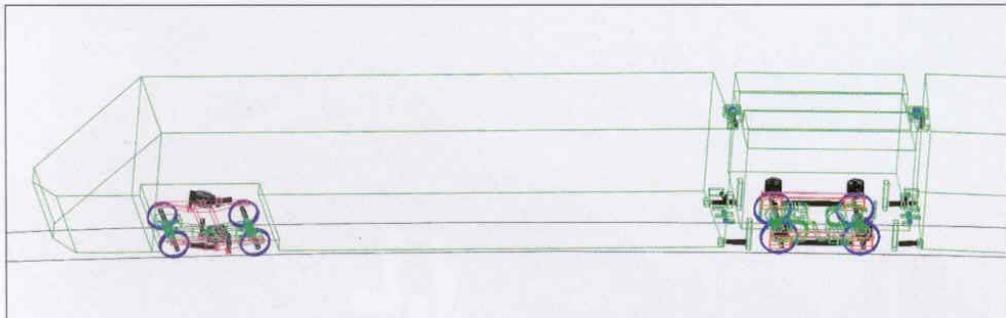
Bei der linearen Stabilitätsanalyse werden die Eigenwerte für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten in der komplexen Ebene als Wurzelortskurven aufgetragen. Aus dieser Darstellung lässt sich die kritische Ge-

schwindigkeit ablesen, das heisst diejenige Fahrgeschwindigkeit, bei welcher das Lehrsche Dämpfungsmaß der am niedrigsten gedämpften Schwingungsform auf die vorgegebene Mindestdämpfung (zwischen 0 und 0,05) gesunken ist. Ein wichtiger Variationsparameter ist hierbei die äquivalente Konizität der Rad/Schiene-Paarung. Durch Variation der Konizität und automatisiertes Suchen nach der kritischen Geschwindigkeit können sogenannte Stabilitätskarten dargestellt werden. Mit Hilfe der Wurzelortskurven und Stabilitätskarten werden verschiedene Fahrzeugparameter, vor allem die Elemente der Radsatzführung und die Schlingerdämpfer, so optimiert, dass eine stabile Fahrt bei vorgegebener Konizität gewährleistet wird.

Die Untersuchung des Störverhaltens und die Fahrkomfortberechnung in den Geraden werden üblicherweise mit einer simulierten Fahrt auf einer Strecke mit Gleislagestörungen durchgeführt. Als Resultat werden die Beschleunigungen im Wagenkasten, die Rad/Schiene-Kräfte und bei Bedarf auch andere Grössen, zum Beispiel Feder- und



Drehgestellrahmen auf dem Prüfstand beim Institut für Schienenfahrzeuge (IFS) in Berlin-Bohnsdorf (Foto IFS).



Modell des GTW 2/6 für lauftechnische Berechnungen mit ADAMS/Rail (Grafik SLM).

Dämpferwege und -kräfte, ausgewertet. Für die Beurteilung des Fahrkomforts sind die Komfortwerte massgebend (RMS-Wert der Beschleunigung frequenzbewertet nach ISO 2631 oder UIC 513, Wertungszahl W_z oder N -Wert). Die Auswertung der RMS-Werte kann direkt mit ADAMS/Rail erfolgen, die anderen Komfortziffern werden zur Zeit mit einem hauseigenen Postprocessor ausgewertet.

Bei der Berechnung der Entgleisungssicherheit liegt die Fahrt im Versuchsgleis nach ERRI B55 zu Grunde oder eine Fahrt auf einem fiktiven Gleis mit einer Verwindung, die der Fahrzeugprüfverwindung nach ERRI B 55 entspricht. Dabei wird die Einhaltung des Entgleisungsquotienten $Y/Q < 1,2$ geprüft.

Die quasistatische Bogenfahrtberechnung zeigt die mittleren Werte der Rad/Schiene-Kräfte, die Einstellwinkel der Radsätze um die Hochachse gegenüber dem Fahrwerkrahmen und die Anlaufwinkel in verschiedenen Bögen. Somit können die für SLM-Fahrwerke typischen Eigenschaften – niedrige Rad/Schiene-Kräfte und kleine Anlaufwinkel im Bogen – geprüft und im Zusammenhang mit hoher Geschwindigkeit im geraden Gleis optimiert werden. Beispiele der quasistatischen Bogenfahrtberechnungen des GTW

Berechnung der Bogenfahrt des GTW 2/6 für die Hessische Landesbahn: Einstellwinkel zwischen dem Radsatz 1 und 2 (links) und Summe der Führungskräfte (rechts) am Laufdrehgestell bei Fahrten mit unausgeglichener Querbeschleunigung von 1 m/s^2 (Grafik SLM).

2/6 der Hessischen Landesbahn (Laufdrehgestell) werden in Bildern gezeigt. Aus den Resultaten ist für die meisten Bogenradien eine beinahe ideale radiale Einstellung der Radsätze ersichtlich, die auch durch Messungen bei anderen GTW-Fahrzeugen (vergleiche Bild der Messung der Radialeinstellung der Radsätze im Laufdrehgestell) bestätigt wurde.

Erfahrungen aus Versuchen und Betrieb

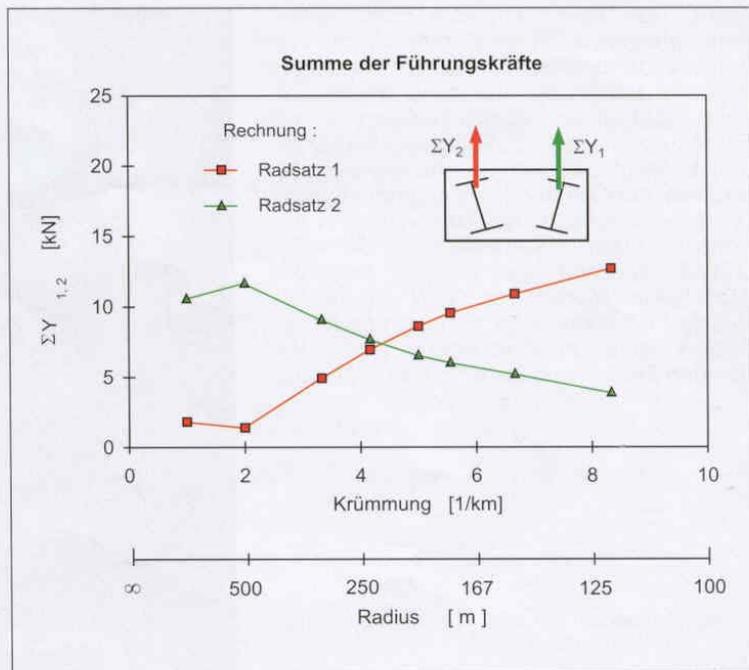
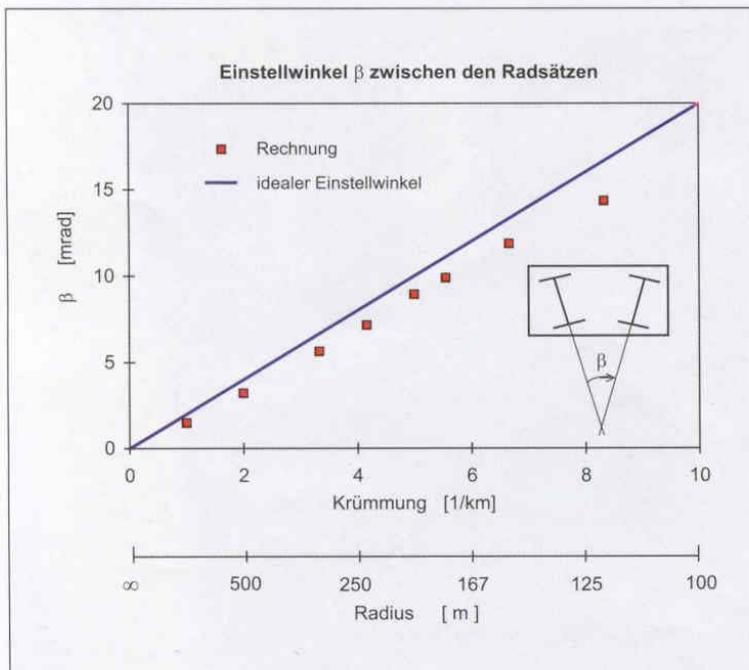
Die Fahrzeuge mit SLM-Fahrwerken werden einerseits während der Inbetriebsetzung Messungen unterzogen, bei denen die wichtigsten lauftechnischen Eigenschaften und die Einhaltung der technischen Spezifikation geprüft werden, andererseits von den Kunden im täglichen Einsatz beurteilt.

Bisherige Betriebserfahrungen mit GTW-Fahrwerken zeigen eine sehr gute Zufriedenheit der Kunden. Die Fahrzeuge sind durch sehr gute Fahrkomfortwerte gekennzeichnet. Dies zeigt sich in den lauftechnischen Berechnungen und wurde auch durch Messungen bestätigt, obwohl diese im Hinblick auf nicht bekannte Gleislagedaten nicht direkt mit der Rechnung verglichen werden können. Sehr positiv werden vor allem die bogenfreundlichen Eigenschaften der Fahrwerke beurteilt. Durch die horizontal weiche Kopplung der Radsätze zum Drehgestellrahmen beziehungsweise zum Kasten des Mittelteils bei den Triebradsätzen, kombiniert mit der gegenseitigen Kopplung der Radsätze, wird eine radiale Einstellung der Radsätze mit entsprechend positiven Auswirkungen

auf die Rad/Schiene-Kräfte und den Verschleiss erreicht, ohne Zusatzaufwand für die Wartung empfindlicher Steuermechanismen. Die Radialeinstellung der Radsätze ist passiv, dadurch ausfallsicher, und funktioniert auch in sehr engen Bogenradien ausgezeichnet. Diese Eigenschaft lässt sich dem Bild entnehmen, in dem der Einstellwinkel zwischen den Radsätzen aus der Messung des GTW 2/6 der Biel – Täuffelen – Ins-Bahn (BTI) gezeigt wird.

Während der Inbetriebsetzung der Fahrzeuge mit GTW-Fahrwerken haben einige Erscheinungen ein Potential zu Verbesserungen gezeigt und Anlass für weitere Optimierung gegeben. Es hat sich gezeigt, dass der Leichtbau des Wagenkastens in Kombination mit einem leichten, verwindungsweichen Laufdrehgestell hinsichtlich Vibrations- und Körperschallübertragung empfindlich ist. Versuche und Messungen mit teilweise ausgebauten und modifizierten Bauteilen der Kastenabstützung auf dem Laufdrehgestell haben eindeutig gezeigt, dass Körperschall überwiegend durch die Vertikaldämpfer übertragen wird. Der Ausbau der Vertikaldämpfer hat dies bestätigt, die Dämpfung der Vertikalbewegung des Wagenkastens war jedoch zu niedrig. Deswegen wurde die Möglichkeit verfolgt, die benötigte Dämpfung in der Luftfeder zu realisieren.

Das Luftfedersystem besteht aus Luftfederbalg und Zusatzluftbehälter, die durch eine Luftleitung verbunden sind. Die Eigenschaften dieses Systems sind durch das Verhältnis der Luftvolumina (Federbalg / Zusatzbehälter) und durch die Ausführung der Blende und der Luftleitung bestimmt. Bei grossem Blendendurchmesser wird das System nur sehr gering gedämpft, und beide Luftfedervolumina (Federbalg und Zusatzbehälter) bestimmen die Federsteifigkeit. Dadurch wird eine niedrige Tauchfrequenz erreicht. Ist der Blendendurchmesser sehr klein, findet kein Luftaustausch zwischen dem Federbalg und dem Zusatzluftvolumen



statt. Die Dämpfung des Systems ist gering, der Zusatzbehälter hat keine Auswirkung und die Tauchfrequenz ist grösser. Zwischen diesen zwei Extremzuständen ist das System durch eine höhere Dämpfung und durch eine zwischen den zwei oben erwähnten Frequenzen liegende Tauchfrequenz gekennzeichnet. Durch die Optimierung des Luftfedersystems lässt sich die Dämpfung erhöhen und die gewünschte Tauchfrequenz erreichen.

Nebst den theoretischen Berechnungen wurden solche Optimierungen bei der Familie der Schmalspur-GTW (BTI, MOB/CEV) experimentell mit Hilfe von Keilversuchen durchgeführt. Aufgrund der Versuche wurde ein Blendendurchmesser von 8 mm gewählt, wodurch ein Lehrsches Dämpfungsmass der Tauchbewegung von mehr als 0,2 erreicht wird (siehe Bild). Somit kann auf die Vertikaldämpfer verzichtet werden. Gleichzeitig wurde eine deutliche Reduktion der Vibrationen im Wagenkasten erreicht. Dies ist aus den Bildern mit gemessenen spektralen Leistungsdichten der Vertikalbeschleunigung im Wagenkasten oberhalb des Laufdrehgestells (GTW 2/6 der BTI) ersichtlich.

Eine weitere bezüglich Körperschall- und Vibrationsübertragung empfindliche Schnittstelle ist die Zug-/Druck-Stange. Auch hier wurde mit mehreren Versuchen durch Änderung der Gummielemente und Versteifung der Bodenstruktur des Wagenkastens eine deutliche Verbesserung erreicht. Bei dünnwandigen, gewichtsoptimierten Kastenstrukturen kann aber die Einleitung der Zug-/Druck-Stange in den Fahrzeugboden nicht als optimal bezeichnet werden, da der Boden als Membran wirkt.

Mit grossem Erfolg wurden Lösungen mit anderweitiger Drehgestellanbindung untersucht. Insbesondere werden die neusten Fahrwerke mit Zug-/Druck-Stangen, die gegen das Wagenende gerichtet sind, ausgeführt. Die Zug-/Druck-Stangen werden am Stossbalken oder einem mit dem Fahrzeugboden nicht verbundenen Querträger befestigt.

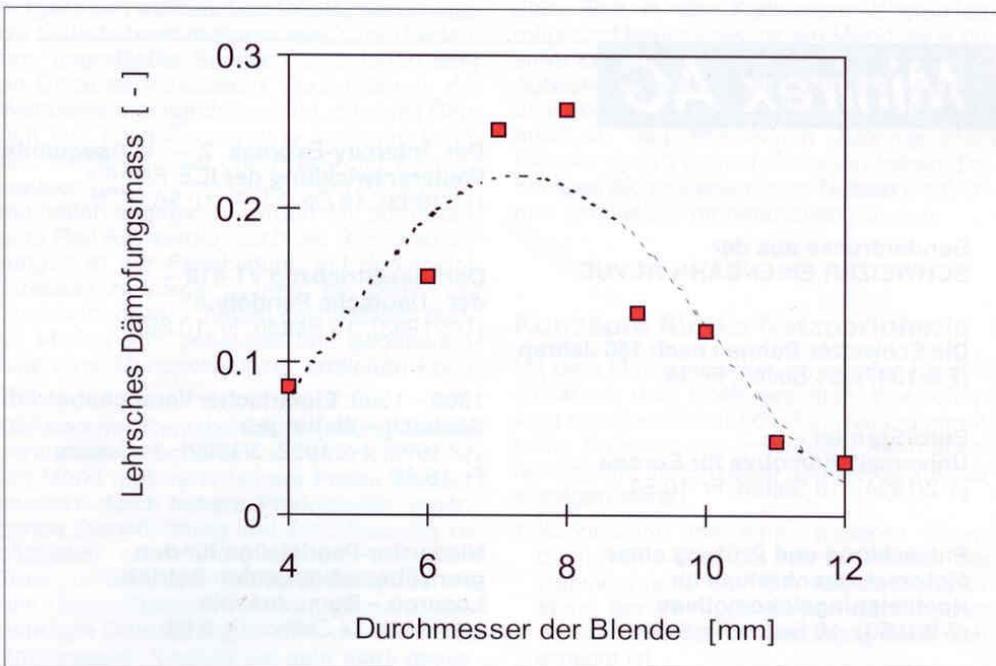
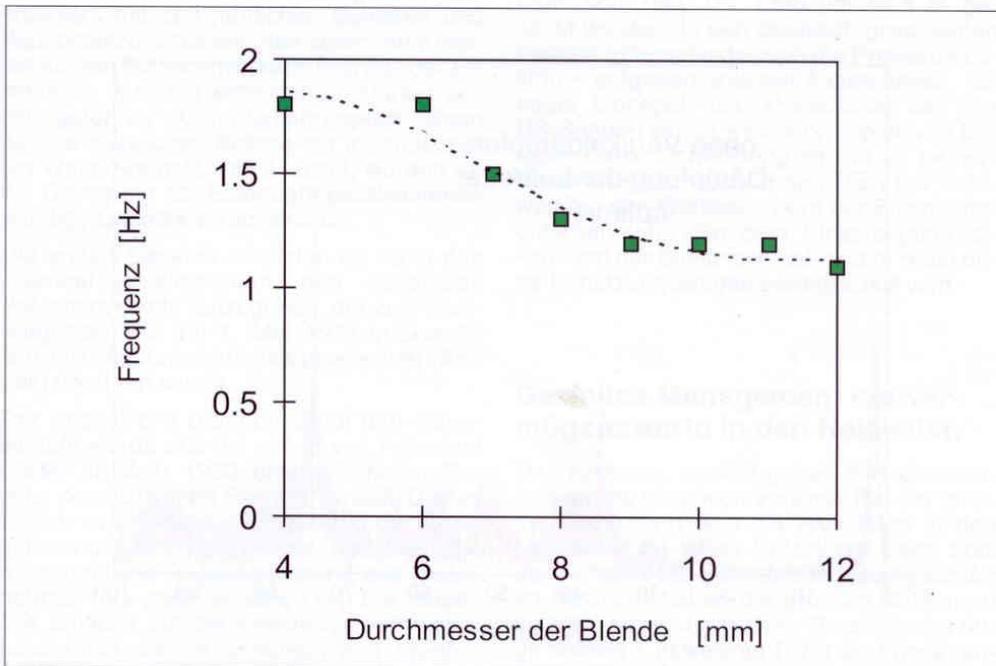
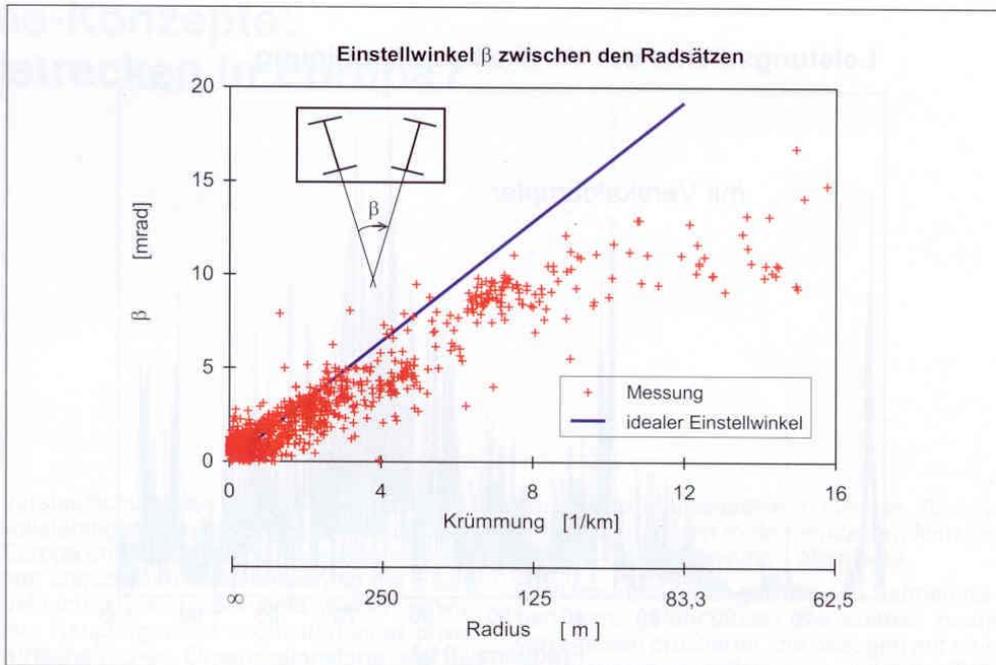
Zusammenfassung und Ausblick

Die SLM hat sich in den letzten Jahren grosses Know-how in Auslegung, Konstruktion und Fertigung von modernen Regionalverkehrsfahrwerken angeeignet.

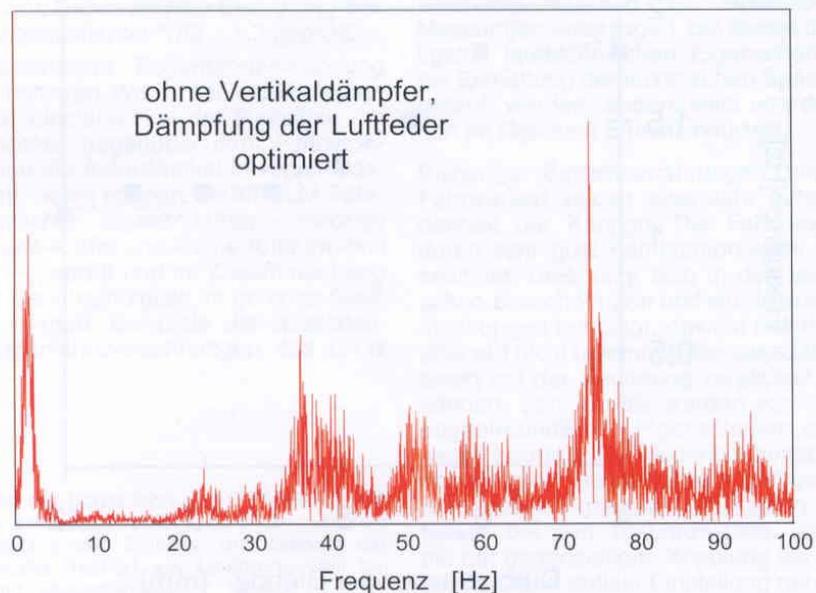
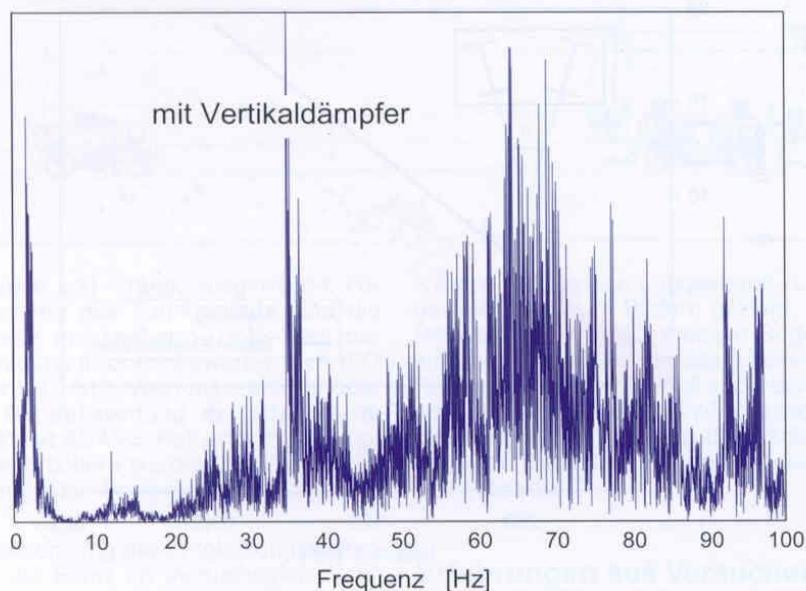
Es hat sich gezeigt, dass bis zu Geschwindigkeiten von 120 km/h und normal unterhaltenem Gleis die übersichtlichen Fahrwerke, mit teilweise reduzierten Federstufen den Anforderungen vollauf genügen, dies insbesondere auch wegen des tiefen Eigengewichts.

Oben: Messung der Radialeinstellung der Radsätze im Laufdrehgestell: Einstellwinkel zwischen dem Radsatz 1 und 2 in Abhängigkeit vom Bogenradius (beim GTW 2/6 der BTI; Grafik SLM).

Mitte: Optimierung des Luftfedersystems bei GTW-Fahrzeugen. Gemessene Eigenfrequenz (Mitte) und -dämpfung (unten) der Vertikalschwingung des Wagenkastens in Abhängigkeit vom Blendendurchmesser (Grafik SLM).



Leistungsdichte der Vertikalbeschleunigung



Die Leistungsdichte der Vertikalbeschleunigung im Wagenkasten zeigt eine Reduktion der Vibrationsübertragung durch Optimierung der Dämpfung in der Luftfeder und Verzicht auf die Vertikaldämpfer (Grafik SLM).

Die positive Wirkung von gummigefederten Rädern auf den Einfluss eines harten Oberbaues und auch auf Schienen-Riffel scheint sich auch bei den SLM-Fahrwerken zu bestätigen. Aus Lärmgründen (Kurvenkreischen) sind gummigefederte Räder infolge der guten Radialeinstellung jedoch nicht erforderlich.

Für höhere Geschwindigkeiten und / oder entsprechend schlechte Gleislagen und Schienenstöße laufen bei der SLM Entwicklungen für vollabgefederte Antriebe, ohne dabei aber die oben beschriebenen Vorteile und das geringe Gewicht eines rahmenlosen Fahrwerks aufzugeben.

Als Weiterentwicklung der aus gekoppelten Einzelachsen bestehenden Triebfahrwerke der GTW-Familie werden die trennbaren Jakobsfahrwerke für Gliederzüge (aktuell für den EMU 72 der NSB mit zweistufiger Federung für 160 km/h) gebaut.

Literatur

- [1] Steinacher, Walter: Triebwagen Be 4/4 der SZU. Schweizer Eisenbahn-Revue 4/1993, S. 147 – 164.
- [2] Meier, Andreas / Wieser, Urs / Meier, Bruno: Dieselelektrischer Gelenktriebwagen GTW 2/6 in Niederflurbauweise. Schweizer Eisenbahn-Revue 5/1996, S. 177, und Eisenbahn-Revue International 6/1996, S. 212.
- [3] Wieser, Urs / Zimmermann, Anton: Elektrische Gelenktriebwagen Be 2/6 in Niederflurbauweise für BTI und CEV. Schweizer Eisenbahn-Revue 3/1998, S. 81.
- [4] Cortesi, Alberto: Modernes, zweiachsiges Triebdrehgestell mit verwindungsweichem Rahmen. SLM Technische Mitteilungen 1986, S. 18.
- [5] Cortesi, Alberto: Trends im Triebfahrzeugbau – SLM-Radialdrehgestelle. Eisenbahntechnische Rundschau 7-8/1996.