SIEMENS

Sonderdruck aus "DER NAHVERKEHR" 12/96. Seite 30-36

Fahrdynamische Auslegung des Combino

Verfasser: Christian Schindler Michael Seibert Franz-Josef Weber

Integriert bei Siemens Verkehrstechnik:

DUEWAG ALEX.FRIEDMANN HPW INTEGRA





Dr.-Ing. Christian Schindler, Cand. Ing. Michael Seibert, Düsseldorf Dipl.-Ing. Franz-Josef Weber, Graz

Fahrdynamische Auslegung des Combino

100% niederfluriges Straßenbahnfahrzeug mit robuster Technik

Im Juni 1994 startete der Bereich Verkehrstechnik der Siemens AG zusammen mit seiner Mechantochter Duewag AG das Projekt NF 100. Ziel war, in gemeinsamer Arbeit zwischen E- und M-Partner ein zukunftsträchtiges Konzept für eine besonders wirtschaftliche und robuste 100%-Niederflur-Straßenbahn zu entwickeln. Unter dem Namen COMBINO entstand ein modulares System, mit dem nun Fahrzeuge kundenspezifisch zusammengestellt werden können (Abb. 1)

Das System besteht prinzipiell aus fünf unterschiedlichen Wagenmodulen, aus denen, wie bei einem Baukasten, nahezu alle Fahrzeuglängen realisierbar sind. Da die Breite flexibel zwischen 2,20 m und 2,65 m ausführbar ist, kann damit jede übliche Fahrzeuggröße gebaut werden. Es stehen zwei Fahrwerktypen zur Verfügung. Eines ist mit zwei Radpaaren versehen und als Trieboder Lauffahrwerk einsetzbar. Das andere, mit einem Radpaar ausgerüstet, ist als reines Lauffahrwerk vorgesehen. Beide sind sowohl in Normalspurbauweise als auch als Meterspurvariante erhältlich.

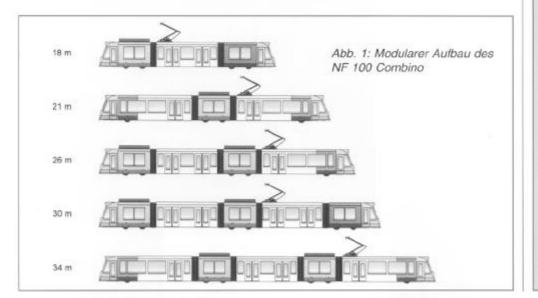
Nachdem das Fahrzeugkonzept stand, wurde die Entwicklung aller Module und der Bau eines Prototypen für den Erprobungsbetrieb beschlossen. Entwicklungsbegleitend waren fahrdynamische Berechnungen des Prototypen vorgesehen, um seine Funktion aus lauftechnischer Sicht zu überprüfen und das Fahrzeug durch Parameterstudien hinsichtlich Schwingkomfort und Rad/Schiene-Verschleiß zu optimieren. Um die Rechenergebnisse diskutieren zu können, wurden Vergleichsrechnungen mit einem bereits gebauten und bekannten Fahrzeug ähnlicher Art durchgeführt.

Prototyp

Als Prototyp wurde ein vierteiliger Wagen in 2300 mm Breite gewählt, der alle fünf Module beinhaltet (Abb. 2). Das Zweirichtungsfahrzeug besitzt zwei zweiachsige Triebfahrwerke und ein einachsiges Lauffahrwerk in Normalspurausführung.

Triebfahrwerk

Während der Konzeptphase wurde als günstigste Variante für ein Triebfahrwerk in 100%-Niederflur-Technik ein zweiachsiges Einzelradfahrwerk ausgewählt, dessen Räder einer Seite jeweils durch einen längsliegenden Motor und zwei Winkelgetriebe verbunden sind [2] (Abb. 3). Die schnellaufende







Cahindlar

Selbert



Webe

DIE AUTOREN

Dr.-Ing. Christian Schindler (37) ist seit 1994 Leiter der Abteilung Berechnung und Versuch im Geschäftsbereich Nahverkehr der Duewag AG, Werk Düsseldorf. Er studierte von 1979 bis 1986 Maschinenbau, Fachrichtung Kraftfahrwesen, an der RWTH Aachen. Anschließend war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent am Institut für Fördertechnik und Schienenfahrzeuge der RWTH Aachen, wo er 1991 promovierte. In den Jahren 1992/93 war er als Systemingenieur im Bereich Bahngesamtsysteme der AEG Westinghouse Transport-Systeme GmbH, Ottobrunn, tätig.

Cand. ing. Michael Seibert (28) studiert Maschinenbau, Fachrichtung Schienenfahrzeuge, an der RWTH Aachen. Seit 1994 arbeitet er als studentische Hilfskraft bei der Duewag AG, Werk Düsseldorf; zunächst an der Entwicklung des Combino, seit 1995 im Bereich Fahrdynamik der Abteilung Berechnung und Versuch.

Dipl.-Ing. Franz-Josef Weber (30) ist Konstrukteur bei Siemens SGP Verkehrstechnik, Graz. Er studierte von 1988 bis 1995 Maschinenbau an der RWTH Aachen. Nach einem Gastsemester an der TU Budapest arbeitete er 1994/95 als studentische Hilfskraft für die Duewag AG, Düsseldorf, an der Konzeption und an der lauftechnischen Untersuchung des Combino.



Scheiberremse befindet sich zwischen Moor und (triebe. Damit ist es möglich, robute und awährte Antriebstechnik einzuseten.

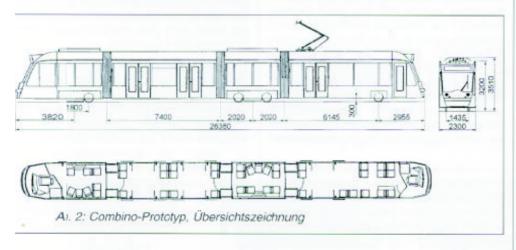
Die Antroseinheit ist über vier elastische Elementwoll abgefedert am Fahrwerkrahnen aufihängt. Die dynamische Entkoppung desirehfreiheitsgrades zu den Rädern ibernimr ein Paar außen liegender Gumni/Metal'aketkupplungen je Rad. Der Rahnen stütsich über insgesamt acht Gummi-lementauf den gekröpften Achsen ab, an velchen ie Einzelräder über Achsstummel ielagert nd.

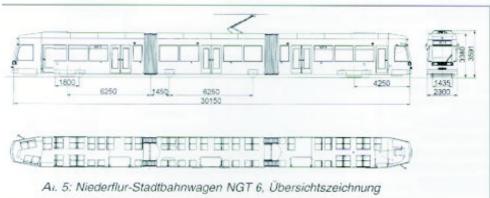
Die besidere Herausforderung bestand larin, ein möglichst großen Raum in der ahrwerhitte freizuhalten, so daß eine Fußodenhö: von maximal 350 mm bei einer langbre von mindestens 800 mm eingealten wden konnte. Aus diesem Grund efindenich die zwei Schraubenfedern der Sekundätufe weit außen oberhalb der Anriebseinlit. Die Anordnung hat den positien Nebieffekt, daß durch die große Feerbasiser Wankwinkel des Wagenkastens ninimiervird. Parallel zu den Sekundärfeern befilet sich auf jeder Seite ein vertikaer Schwaungsdämpfer. In der weit herunergezogien Mittelpartie des Fahrwerkrahnens beiden sich Schwingungsdämpfer für ie Quechtung sowie zwei längsliegende Lenker, die das Fahrwerk mit dem darüberliegenden kurzen Wagenkasten verbinden. Die Lenker erlauben, zusammen mit seitlichen Anschlägen, nur eine sehr geringe Verdrehung des Wagenkastens zum Fahrwerk um die Hochachse.

Aus konstruktiver Sicht basiert die Antriebsanordnung auf dem bewährten Duewag-Monomotorprinzip. Spurführungstechnisch aber hat man es hier mit einem Doppelfahrwerk mit Radblockantrieb zu tun, einer Variante. die bisher so noch nicht realisiert wurde. Im Gegensatz zum Radsatz fehlt hier das Wendemoment aus Radienunterschied zweier drehzahlgekoppelter Räder einer Achse, welches für den charakteristischen Wellenlauf verantwortlich ist. Eine völlige Entkopplung aller Räder, wie sie bei den Einzelradfahrwerken, z. B. des Frankfurter Niederflurwagens Typ R, bekannt ist, liegt aber auch nicht vor. Vielmehr erlaubt die Radblockkopplung nahezu freies Rollen bei paralleler Querauslenkung des Fahrwerks. Bei Schrägstellung im Spurkanal treten Radracienunterschiede und somit Schlupf jeweils zwischen vorderem und hinterem Rad auf.

Lauffahrwerke

Prinzipiell kann bei der Combino-Familie das Triebfahrwerk durch ein zweiachsiges Lauffahrwerk gleicher Bauart ersetzt werden. Da





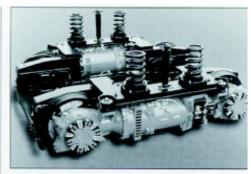


Abb. 3: Triebfahrwerk mit Radblockantrieb

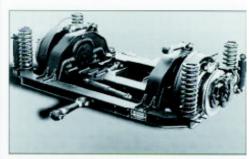


Abb. 4: Selbstregelndes Einzelrad-Einzelfahrwerk EEF

hierbei der Antrieb fehlt, wären alle Räder voneinander unabhängig drehbar. Als Alternative ist – besonders für Zwischenlängen – je nach Ausführung an einem oder beiden Fahrzeugenden ein Einzelfahrwerk vorgesehen. Hier wurde das bewährte selbstregelnde Einzelrad-Einzelfahrwerk (EEF) gewählt (Abb. 4)

Das EEF wurde zuerst 1990 im Einrichtungs-Stadtbahnwagen für die Kasseler Verkehrsgesellschaft AG eingesetzt [3]. Mittlerweile ist es unter ständiger Weiterentwicklung in Normal- und Meterspurausführung auch für den Zweirichtungsbetrieb über 300mal an neun deutsche Städte geliefert worden. Seine Funktionsweise ist u. a. in [4] ausführlich beschrieben.

Der große Vorteil des EEF besteht darin, caß im Bogen die Räder ohne fremde Hilfe nur durch den Rad/Schiene-Kontakt in eine tangentiale Stellung gelenkt werden. Somit ist es das einzig bekannte Fahrwerk, das auch bei Bogenein- und Ausfahrt keinen prinzipbedingten Fehlstellungswinkel aufweist, wie er bei allen zwangsgesteuerten Fahrwerken auftritt.

Vergleichsfahrzeug

Als Vergleichsfahrzeug für die Simulationsrechnungen wurde der bekannte sechsachsige Niederflurgelenktriebwagen der Baureihe NGT 6 gewählt (Abb. 5).



Das normalspurige Fahrzeug besitzt etwa 70% Niederfluranteil im mittleren Bereich des Fahrgastraumes. An den Enden befinden sich die Triebfahrwerke, welche wegen ihrer konventionellen Bauweise mit einzeln angetriebenen Radsätzen eine Fußbodenhöhe von mindestens 560 mm vorschreiben. Unter dem Mittelwagen sind zwei EEF angeordnet.

Untersuchungsverfahren

Untersuchungen des Fahrverhaltens von Schienenfahrzeugen durch Computersimulation sind im Vollbahnsektor bereits seit ca. 20 Jahren üblich. Im Nahverkehrsbereich trat diese Entwicklung erst später ein, da diese Berechnung wegen der kurzen Entwicklungszeiten zu aufwendig war und die Fahrzeuge mit ihren niedrigen Fahrgeschwindigkeiten bezüglich Fahrsicherheit unkritischer waren. Auch gab es bis Ende der 80er Jahre kaum Veränderungen im Anordnungs- und Konstruktionsprinzip Fahrzeug/Fahrwerk. Erst mit dem Aufkommen der Niederflurtechnik wurde plötzlich eine Vielzahl verschiedener Fahrzeugvarianten entwickelt mit Fahrwerken, die teilweise nur noch entfernt mit einem herkömmlichen Drehgestell verwandt sind.

Um bei diesen Fahrzeugen das fahrdynamische Verhalten vorab zu bestimmen, wurden rechnerische Voraussagen notwendig, Bei Duewag wird die Fahrdynamiksimulation seit etwa vier Jahren betrieben.

Der Combino-Prototyp erforderte insbesondere deshalb eine fahrdynamische Untersuchung, da er zum einen mit einem neuartigen Triebfahrwerktyp ausgerüstet ist, der zwar aus bekannten und prinzipiell bewährten Komponenten besteht, dessen Spurführungsverhalten aber weitgehend unbekannt ist. Zum anderen wird das EEF nicht, wie bekannt, unter dem Mittelwagen, sondern als führendes Fahrwerk unter einem Endwagen positioniert.

Im einzelnen waren folgende Punkte zu untersuchen:

- ☐ Spurführungsverhalten des Radblock-Triebfahrwerks.
- ☐ Spurführungsverhalten des EEF als führendes Fahrwerk.
- Optimierung des Fahrverhaltens des Gesamtfahrzeugs, insbesondere in bezug auf Rad/Schiene-Verschleiß und Schwingkomfort.

Simulationsprogramm

Für die vorliegende Untersuchung wurde das am Institut für Fördertechnik und Schienenfahrzeuge der RWTH Aachen (IFS) entstandene Programmsystem IFSIM verwendet. Das Programm wurde bei Duewag an die Erfordernisse von Nahverkehrsfahrzeugen angepaßt und wird fortlaufend weiterentwikkelt. Hiermit wurden bereits zahlreiche Schienenfahrzeug-Simulationen durchgeführt, deren Ergebnisse z. T. auch veröffentlicht sind, z. B. [5].

Ein besonderer Vorteil von IFSIM ist die sehr ausführliche Modellierung des Rad/Schiene-Bereiches, welche sich von jeher gleichermaßen für die Simulation von Radsätzen und Einzelradpaaren (z. B. in Form von Losrad-Achsbrücken) eignet. Das selbstregelnde EEF weist allerdings einige Besonderheiten gegenüber einem solchen Einzelradpaar auf. So schwenken die beiden Räder eines EEF um die Hochachse mit unterschiedlichen Winkeln. Außerdem liegen die Schwenkachsen nicht zwischen den Meßkreisebenen der

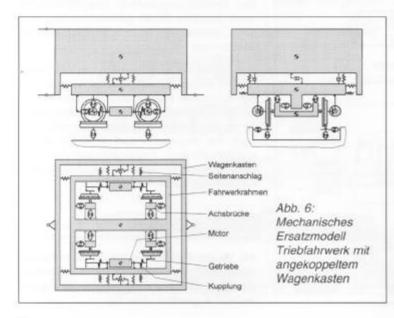
Räder, sondern außerhalb. Daher waren für die Modellierung der EEF entsprechende Anpassungen der den Rad/Schiene-Bereich betreffenden Programmteile notwendig [6].

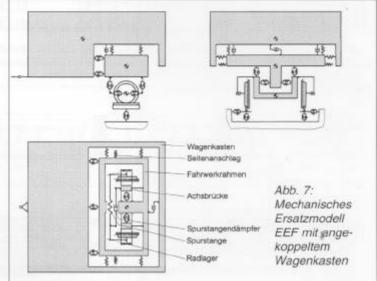
Ferner mußte dem bewußt unsymmetrischen Aufbau des Combino-Prototypen mit vier unterschiedlichen Wagenkästen Rechnung getragen werden und die Zahl der einzulesenden Fahrzeugdatensätze entsprechend erhöht werden. Als Nebenprodukt der Untersuchung NF100/Combino wurde so das Programmsystem IFSIM wesentlich flexibler gestaltet.

Modellbildung

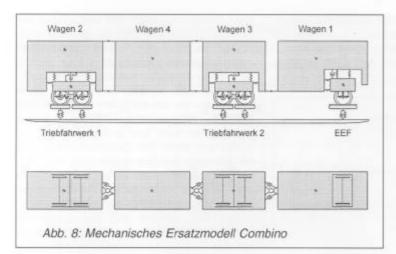
Für die Modellbildung wird das zu untersuchende Fahrzeug in ein System von Starrkörpern zerlegt, welche durch Federn, Dämpfer, Reibelemente etc. miteinander gekoppelt sind. Im allgemeinen wird für jeden der sechs Freiheitsgrade, die ein Körper im Raum besitzt, die Differentialgleichung formuliert. Als Starrkörper vorgesehen sind grundsätzlich Wagenkästen, Fahrwerkrahmen und Radpaare, letztere mit sieben Freiheitsgraden: es wird von Einzelradpaaren ausgegangen, bei denen die Räder unabhängig voneinander um die Querachse rotieren können. Je nach Modell werden sie über einen "Schalter" zu Radsätzen gekoppelt. Im Gegensatz dazu werden wegen der bereits genannten Besonderheiten des EEF dessen Einzelräder jeweils als separate Starrkörper mit sechs zum Teil wiederum gekoppelten Freiheitsgraden modelliert.

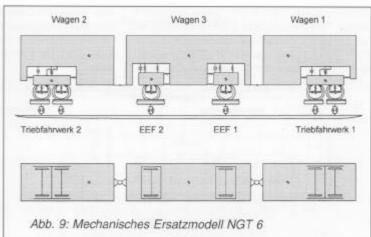
Eine Übersicht über die der Simulation zugrunde liegenden Ersatzmodelle geben die Abbildungen 6 bis 9. Hierbei sind die Gelenke vereinfacht dargestellt; sie werden in alle Richtungen als (sehr steife) Federn mit parallelgeschalteter schwacher Dämpfung mo-











delliert. Auch Lenker sowie Spurstangen der EEF sind mit einer Federsteifigkeit versehen.

Besondere Aufmerksamkeit wurde dem Lenktrapez des EEF sowie der Drehzahl-kopplung der hintereinander fahrenden Antriebsräder des Combino-Triebfahrwerks gewidmet. So wurde u. a. auch Elastizität und Dämpfung der Antriebskupplungen zwischen den rotierenden Antriebsmassen und den Einzelrädern berücksichtigt.

Randbedingungen

Alle Fahrsimulationen wurden auf der Schiene S 49 mit einer Einbauneigung von 1:40
durchgeführt. Als Radprofil wurde das verschleißangepaßte IFS-Profil [7] gewählt. Die
Gleislagestörung wurde nach [8] vorab aus
einem gegebenen Leistungsdichtespektrum
synthetisiert. Sie entspricht einer mittleren
Gleislagegüte. Zur Prüfung der Plausibilität
der Modellbildung und zur Analyse der Funktion der Fahrwerke wurden ferner Fahrsimulationen auf ungestörtem Gleis durchgeführt.

Für die Bestimmung der Kräfte im Rad/Schiene-Kontakt wurden die Kraftschluß/Schlupf-Beziehungen nach Frederich verwendet [9], die maximalen Kraftschlußbeiwerte wurden jedoch wie in [5] um 20% reduziert [7].

Untersuchungskriterien

Das Fahrverhalten auf dem Gleis mit synthetisierten Gleislageabweichungen wurde anhand von Kennzahlen für den Schwingkomfort und den Rad/Schiene-Verschleiß beurteilt.

Fahrkomfort

Für die Bewertung wurde das Wz-Verfahren nach Sperling gewählt, und zwar die im Rahmen der Entwicklung des Rad/Schiene-Versuchs- und Demonstrationsfahrzeuges von der DB weiterentwickelte quadratische Methode [10]. Für Straßenbahnen werden bei Höchstgeschwindigkeit üblicherweise Wz-Werte zwischen 2,5 und 3,0 gefordert.

Rad/Schiene-Verschleiß

Geringer Verschleiß ist eine Grundvoraussetzung für einen wirtschaftlichen Bahnbetrieb. Ursache für den natürlichen Verschleiß von Rad und Schiene sind die in der Berührfläche wirkenden Kraftschlußkräfte T°x,y und Relativgeschwindigkeiten w°x,y. Als Kenngrößen lassen sich hieraus u. a. ermitteln:

☐ die auf die Berührfläche A bezogenen Kraftschlußleistung p_v

$$p_v = \frac{T^\circ_x \cdot w^\circ_x + T^\circ_y \cdot w^\circ_y}{A}$$

sowie durch Integration über die zeitabhängigen Größen und Division durch den zurückgelegten Weg s und die Radlast Q die spezifische, normierte Kraftschlußarbeit av.spez.norm

$$a_{v,spez,norm} = \frac{1}{s \cdot Q} \int_{1}^{1} \frac{T^{\circ}_{x} \cdot w^{\circ}_{x} + T^{\circ}_{y} \cdot w^{\circ}_{y}}{A}$$

Die Kraftschlußarbeit zwischen Rad und Schiene wird in Verschleiß, aber auch in Wärme und Geräusch umgesetzt, wobei die Verteilung auf die verschiedenen Energieformen unbekannt ist. Insofern ist ihr Wert lediglich als Kennzahl für die vergleichende Beurteilung des zu erwartenden Rad/Schiene-Verschleißes verschiedener Fahrwerke anzusehen.

Ausgewählte Fahrsituationen

Das Prototypfahrzeug Combino wurde auf idealem Gleis bei der vorgesehenen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h in zwei verschiedenen Varianten simuliert:

- wie projektiert mit Radblock-Doppelfahrwerken und EEF;
- zu Vergleichszwecken mit Radsatzkopplung in den Doppelfahrwerken.

Die Fahrten auf gestörtem Gleis erfolgten mit dem Prototypfahrzeug Combino in beiden o.g. Varianten sowie mit dem Vergleichsfahrzeug NGT 6, und zwar in neun verschiedenen Fahrsituationen (Abb. 10).

Trassie- rungsart	Bogen- radius [m]	Querbe- schleuni- gung [m/s ²]	Fahrge- schwindig- keit [km/h]
Bogen	20	1	15
	35	1	20
	50	1	25
	100	1	35
	200	1	50
	300	1	60
Gerade	-	-	25
	-	-	50
	-	-	75

Abb. 10: Fahrprogramm für die lauftechnische Auslegung des Combino

Ergebnisse

Bewegungsverhalten

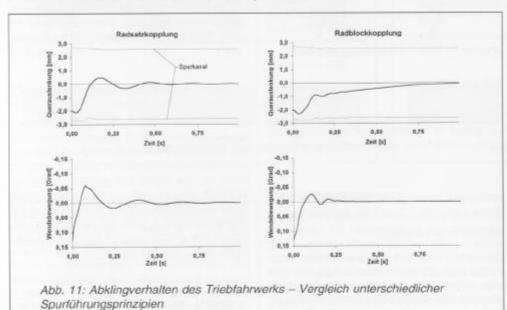
Das prinzipielle Verhalten des Doppelfahrwerks mit Radblockkopplung kann anhand der Zeitschriebe für die Radpaarquer- und Wendebewegung auf ungestörtem Gleis im Vergleich zum konventionellen Radsatzfahrwerk erläutert werden (Abb. 11).

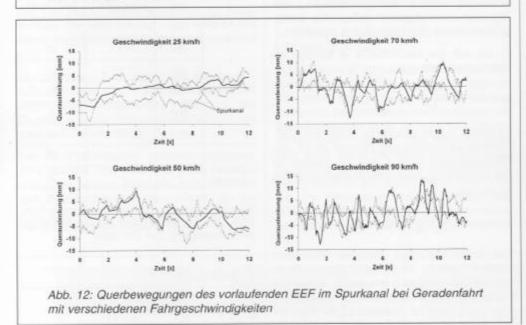
Hierbei ist in der linken Spalte die Bewegung des Radsatzfahrwerks und in der rechten die des Radblockfahrwerks im Spurkanal dargestellt. Betrachtet wird jeweils das vordere Radpaar des vorausfahrenden Fahrwerks. In beiden Fällen ist das Fahrwerk zu Simulationsbeginn so ausgelenkt, daß das vordere Radpaar um 2 mm quer nach rechts und das hintere um den gleichen Weg nach links ver-



schoben steht. Ferner sind beide Radpaare sowie Fahrwerkrahmen und Wagenkasten um den entsprechenden Wendewinkel $\psi = 0.13^{\circ}$ zur Schiene verdreht; die Fahrwerkmitte steht also über der Gleisachse. Der Rad-

satz zeigt das bekannte klassische wellenförmige Bewegungsverhalten. Er führt einige Schwingungen mit kleiner werdender Amplitude durch und zentriert sich dann in Gleismitte.



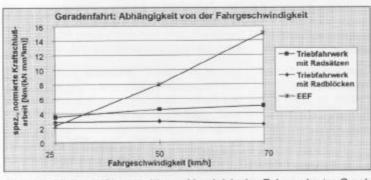


Wendemoment aus den Längskraftschlußkräften, die durch den Radradienunterschied zweier drehzahlgekoppelter Räder entstehen. In der Ausgangsposition des Radblockfahrwerks sind sie zwar vorhanden, heben sich aber, da an vorderem und hinterem Radpaar entgegengesetzt wirkend, in bezug auf das Fahrwerk zum großen Teil auf. So bilden vor allem die Querkraftschlußkräfte ein Moment um das anlaufende Rad, das den Fahrwerkrahmen solange um dieses dreht, bis alle Räder parallel zur Gleisachse stehen. Jetzt wirken nur noch die Geometrieseitenkräfte, welche bei der gewählten Rad/Schiene-Profilkombination stets entgegen der Radpaarquerauslenkung wirken; sie drücken das Fahrwerk, ohne Verschleiß zu verursachen, asymptotisch zur Gleismitte. Das zu beobachtende leichte Überschwingen resultiert aus der Trägheit der nahezu drehfest mit dem Fahrwerk verbundenen Wagenkastenmasse. Gegenüber dem Radsatzfahrwerk ergibt sich als Vorteil, daß eine Anregung der Wagenkästen zu Resonanzschwingungen nur in erheblich geringerem Maße möglich ist.

Beim Radblocksystem fehlt weitgehend das

Anhand von Abbildung 12 kann die Funktionsfähigkeit des EEF als vorlaufendes, geschobenes Fahrwerk ersehen werden.

Bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten läuft das EEF fast von der Gleislage unbeeinflußt in Spurkanalmitte und es kommt nur bei großen Störstellen zum Anstoß an die Fahr-Bei höheren Geschwindigkeiten kommt es zu häufigerem Anlaufen und zu einer fast wellenförmigen Bewegung im Spurkanal. Hat das EEF bei langsamer Fahrt genügend Zeit, seine Räder - wenn durch eine Störung schräggestellt - wieder in eine tangentiale Stellung zur Schiene zu bringen, bevor es anläuft, so erfolgt bei schnellerer Fahrt zuerst der Anlauf und dann das langsame Einschwenken in die Tangentialposition. Das anlaufende Rad verbleibt somit stets für kurze Zeit an der Fahrkante. Hier sind sicherlich noch Optimierungsmöglichkeiten vorhanden: das Potential des EEF ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft.



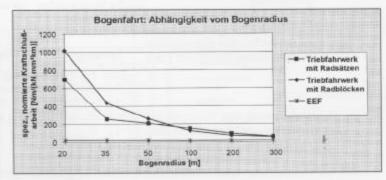


Abb. 13: Verschleißkennzahlen - Vergleich der Fahrwerke im Combino

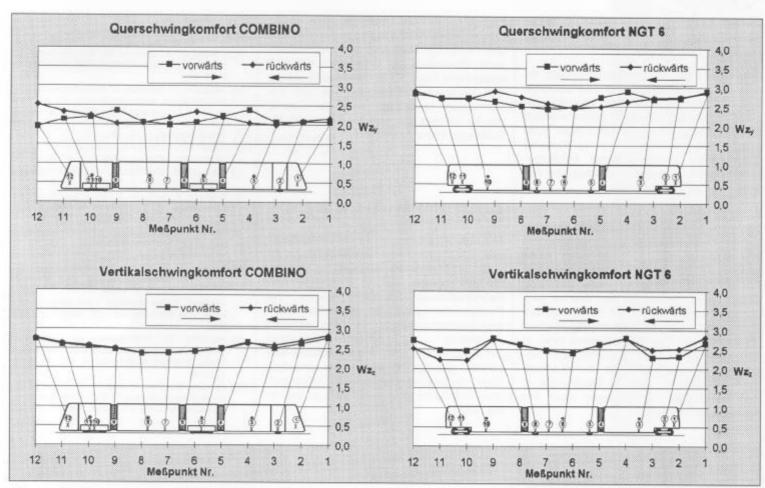


Abb. 14: Schwingkomfort - Quadratische Wz-Werte

Rad/Schiene-Verschleiß

Die Auswertung der im Rahmen der Fahrsimulationen auf gestörtem Gleis ermittelten spezifischen, normierten Kraftschlußarbeiten zeigt Abbildung 13.

Auch hier werden die Ergebnisse des projektierten Triebfahrwerkes mit Radblockkopplung denen eines gedachten Radsatzfahrwerkes ansonsten gleicher Ausführung und den Ergebnissen des EEF im Combino gegenübergestellt. Es handelt sich um die Mittelwerte über alle Räder des jeweiligen Fahrwerks sowie – da sich die Ergebnisse zahlenmäßig kaum unterscheiden – über Vorund Rückwärtsfahrt.

Man erhält für das Triebfahrwerk in beiden Varianten Verschleißkennwerte in gleicher Größenordnung. In der Geraden läuft das Radblockfahrwerk etwas günstiger, in sehr engen Bögen besitzt das Radsatzfahrwerk leichte Vorteile. Ursache hierfür ist der Einfluß des Längsschlupfes auf den maximal ausnutzbaren Querkraftschlußbeiwert, der auch in dem verwendeten Kraftschlußmodell berücksichtigt wird [9].

Das EEF reagiert auf höhere Fahrgeschwindigkeiten empfindlicher als ein Doppelfahrwerk. Im Bogen jedoch zeigt sich sehr deutlich der Vorteil der selbsttätigen radialen Einstellung.

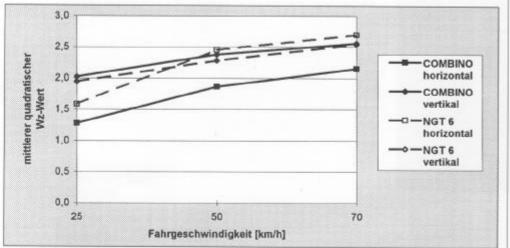


Abb. 15: Abhängigkeit des Schwingkomforts von der Fahrgeschwindigkeit

Schwingkomfort

Der Schwingkomfort eines Fahrzeuges ist durch viele Parameter wie Feder- und Dämpfercharakteristik, Fahrwerksauslegung, freie Spiele und vieles mehr beeinflußbar. Durch die Simulation sollte unter den gegebenen Randbedingungen aus den vorhandenen konstruktiven Möglichkeiten die optimale Fahrwerksabstimmung, d. h.

- möglichst gleichmäßiger Schwingkomfort im gesamten Fahrzeug – auch für den Fahrer,
- möglichst eine Komfortverbesserung gegenüber derzeit im Einsatz befindlichen



ahrzeugen mit Schraubenfederung in der ekundarstufe.

rreicht werden. Die gefundene Lösung erillt diese Ziele weitgehend und bestätigt,
aß auch mit der einfachen, kostengünstien, wartungsarmen und platzsparenden
chraubenfeder in der Sekundärstufe guter
ahrkomfort erreichbar ist. Die Wz-Werte für
ieradenfahrt bei projektierter Höchstgechwindigkeit mit leerem Fahrzeug sind Abildung 14 zu entnehmen.

ür den Combino-Prototypen ergeben ich in Querrichtung Werte zwischen 2,0 nd 2,5; der NGT 6 weist unter exakt leichen Bedingungen Werte zwischen ,5 und 3,0 auf. In vertikaler Richtung egen beide Fahrzeuge bei Werten zwichen 2,2 und 2,8. Die ungünstigsten rgebnisse treten hierbei im allgemeinen n den Enden der Wagenkästen bzw. in en Gelenken auf. Ergänzend zeigt Abildung 15 die Mittelwerte der quadratichen Wz-Zahlen aller 12 Meßpunkte in en Fahrzeugen, aufgetragen über der ahrgeschwindigkeit.

Es ist zu betonen, daß die errechneten Schwingkomfortwerte nur so genau sind, wie das Fahrzeugmodell und die Eingabedaten darin. Besonders das Gleis spielt hier eine wesentliche Rolle. Es ist davon auszugehen, daß Meßwerte zahlenmäßig von den Rechenwerten abweichen, wenn die Qualität des Meßgleises sich von der hier gewählten Gleislage unterscheidet.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Combino ist ein zukunftsträchtiges 100%-Niederflur-Straßenbahnkonzept unter größtmöglicher Verwendung bewährter und robuster Technik entstanden. Die Fahrsimulationsrechnungen zeigen die Funktionstüchtigkeit der gewählten Fahrwerkskomponenten in der vorgesehenen Anordnung und lassen hinsichtlich Schwingkomfort und Rad/ Schiene-Verschleiß günstige Eigenschaften erwarten. Über demnächst stattfindende umfangreiche Meßfahrten wird ausführlich zu berichten sein.

Literatur

- Kortemeyer, A.; Osterhus, W.: Siemens kommt mit dem Combino, DER NAHVERKEHR 13 (1995), 10, S. 79–82
- [2] Feldhusen, J.; Schindler, C.: Niederflurbauweise bei Straßenbahnen, Herausforderungen an die Fahrwerk- und Antriebstechnik, Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Bd. 83 (1996), S. 34–46, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld
- [3] Bader, K.: Niederflur-Straßenbahnen für Kassel, DER NAHVERKEHR 7 (1989), 5, S. 62–70
- [4] Frederich, F.: Spurführung in engen Gleisbögen, DER NAHVERKEHR 3 (1985), 2, S. 52–61
- [5] Frederich, F.; Schindler, C.: Neuartige Reisezugwageneinheiten mit gesteuerten Einzelfahrwerken, ZEV+DET Glas. Ann. 119 (1995), 2, S. 36–44
- [6] Weber, F.-J.: Untersuchung des Spurführungsverhaltens eines Einzelrad-Einzelfahrwerkes EEF. Diplomarbeit. RWTH Aachen (1995), unveröffentlicht
- [7] Schindler, C.: Geringerer Verschleiß durch verbesserte Rad/Schiene-Profilpaarung, DER NAHVER-KEHR 10 (1992), 8, S. 29–36
- [8] Frederich, F.: Die Gleislage aus fahrzeugtechnischer Sicht. ZEV-Glas. Ann. 108 (1984), 12, S. 355– 362
- [9] Frederich; F.: Möglichkeiten zur Hochausnutzung des Rad/Schliene-Kraftschlusses – Zusammenhänge, Einflüsse, Maßnahmen – AET 38 (1983), S, 45–56
- [10] Deutsche Bundesbahn: Rad/Schiene-Versuchs- und Demonstrationsfahrzeug (R/S-VD), Definitionsphase. Bundesbahnzentralamt München (1981)

Siemens AG Bereich Verkehrstechnik Fahrzeuge Nahverkehr Postfach 3240 91050 Erlangen Tel.: (0 9131) 7-0

Fax: (09131)7-20505

