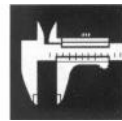


Sonderdrucke aus DER NAHVERKEHR, 911998, Seiten 50-57

COMBINO – Niederflerbahnen Erprobung, Erfahrungen, Erkenntnisse

Verfasser:
Michael Blumenthal
Thorsten Hauck
Alfred Kortemeyer
Martin Walcher





Dr.-Ing. Michael Blumenthal, Erlangen,
 Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Hauck, Düsseldorf,
 Dipl.-Ing. Alfred Kortemeyer, Düsseldorf
 Dipl.-Ing. Martin Walcher, Erlangen

COMBINO-Niederflurbahnen

Erprobung, Erfahrungen, Erkenntnisse

Am 3. Juli 1996 wurde auf dem Werksgelände der Duewag AG in Düsseldorf das erste Fahrzeug aus der modularen COMBINO®-Familie der Fachwelt vorgestellt. Damit wurde im Bereich Verkehrstechnik der Siemens AG eine neue Ära in der Konzeption und dem Bau von Niederflurbahnen eingeleitet.

Dieser Roll-out markierte den Einstieg in eine neue Fahrzeugbauart, um den bis dahin im Fahrzeugentwurf bestehenden Zielkonflikt zwischen Lastenheftkonformität, niedrigen Life-Cycle-Costs, hoher Verfügbarkeit, 100%-Niederflurigkeit und niedrigem Anschaffungspreis aufzulösen. Der starke Marktpreisverfall sowie die Forderung der Betreiber nach kostengünstigen, wartungsarmen und dennoch sehr kundenspezifischen Fahrzeugen waren die wesentlichen Triebfedern für die Entwicklung der COMBINO-Familie.

Die Umsetzung dieser Marktbedürfnisse gelingt durch Modularisierung, Standardisierung und neue Fertigungstechniken. Das Ergebnis ist ein flexibler Fahrzeug-Modulbaukasten mit standardisierten Schnittstellen, der kundenorientierte Lösungen zuläßt. So können von einem 17-m-Kurzzug

bis zu einem über 40 m langen mehrteiligen Gelenkzug in verschiedenen Breiten von 2200 bis 2650 mm die verschiedensten Konfigurationen projektiert werden. Der Wagenkasten erlaubt wahlweise den Einsatz von Normalspur- oder Meterspurfahrwerken.

Sämtliche Fahrzeugs subsysteme wie die Antriebsanlage, das Türsystem oder das Heizungs-/Lüftungs-/Klimasystem sind ebenfalls streng modular aufgebaut, um mit wenigen, einheitlichen Komponenten ein breites Anwendungsspektrum abdecken zu können. Das macht sich darüber hinaus vorteilhaft in Beschaffung und Ersatzteilhaftung bemerkbar, da alle Fahrzeuge aus der COMBINO-Familie mit z. B. demselben Antriebsaggregat oder identischer Bremsanlage ausgerüstet sind. Ein überzeugendes Ersatzteilkonzept, die umfangreiche Dokumentation in verschiedenen Detaillierungsgraden und nicht zuletzt ein auf den Endkunden zugeschnittenes Schulungspaket runden das Produkt COMBINO ab und bieten erstmalig die Voraussetzungen für einen betreiberorientierten After-Sales-Service.

Der Beschluß, zusätzlich zur Konzeptentwicklung ein komplettes Vorserienfahrzeug

zu bauen, ergab sich aus der Erkenntnis, daß

- der Funktionsnachweis eines theoretisch erarbeiteten Konzeptes nur über die Erprobung an einem realen Fahrzeug erfolgen kann,
- eine Erstmuster-Erprobung vor Auslieferung des ersten Kundenfahrzeugs durchgeführt werden muß und
- für die Akquisition ein „begreifbares“ Objekt wesentlich überzeugender als eine theoretische Ausarbeitung ist.

Zudem bietet ein solches Fahrzeug neben der umfassenden Vorfelderprobung auch die ideale Plattform für weitere innovative und kundenorientierte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der Siemens AG im Bereich der Bahntechnik. Als Konfiguration wurde ein 27 m langer und 2300 mm breiter Vierteiler für den Zweirichtungsbetrieb zunächst in Normalspurausführung gewählt. Er enthält alle Module der Fahrzeugfamilie und ist gleichzeitig für Demonstrationsfahrten sehr flexibel einsetzbar.

Der Bau dieses Prototypen begann Anfang Januar 1996 in einer separaten Halle im Werk Düsseldorf der Duewag AG. Dabei konnten erste wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Durch die vorgefertigten und vorgeprüften Subsysteme, die im Fahrzeug nur noch über Stecker angeschlossen werden, konnten die Montage- und Inbetriebsetzungszeiten drastisch reduziert werden.

Mit Erfolg: Am 19. Juni 1996, zwei Wochen vor dem Roll-out, fuhr das Vorserienfahrzeug das erste Mal auf Antrieb mit eigener Kraft. In der folgenden Zeit wurde zunächst die komplette Inbetriebnahme in Düsseldorf durchgeführt, bevor nach Präsentationsveranstaltungen in Berlin, Potsdam und bei der Rheinbahn in Düsseldorf der erste größere Erprobungseinsatz auf dem Streckennetz der Wiener Lokalbahn (WLB) erfolgte. Weitere Einsätze in Wildenrath, Potsdam (Abb. 1) | Barcelona, Erfurt und Basel schlossen sich an.

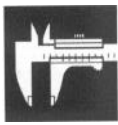
Erprobungs- und Betriebsphase

Für die Konzeption der gesamten Fahrzeugtechnik gilt das Leitmotiv *So innovativ wie nötig, so bewährt und erprobt wie möglich*. Die Erprobungsphase teilt sich in zwei Stufen: In der ersten Stufe wurden dazu alle Komponenten entsprechend dem jeweiligen Innovationsgrad einem Typtest unterzogen. In der zweiten Stufe wurde das komplette Fahrzeug einem Systemtest unterzogen und auf der Strecke erprobt. Die anschließende Betriebsphase zeigte dann die ersten Erkenntnisse im Fahrgastbetrieb.

Die Erfahrung aus 669 gebauten Niederflurfahrzeugen, aufgeteilt in acht verschiedene



Abb. 1: COMBINO-Prototyp im Fahrgasteinsatz, Juli 1997, Platz der Einheit, Potsdam



Typen, ist Basis für das Fahrzeugkonzept COMBINO. Mit diesem Wissen sind die Komponenten ausgewählt, angepaßt oder entwickelt worden. Einem umfangreichen Typtest sind zum Beispiel der Zentralcontainer des Triebmoduls, das Antriebsaggregat mit Motor, Getriebe, Keilpaketkupplung und das hydraulische Bremssystem unterzogen worden. Die Außenschwingschiebetür wurde im präparierten Türportal des COMBINO hinsichtlich der mechanischen und elektrischen Schnittstellen geprüft und hat u. a. 1 Mio Lastspiele durchlaufen.

Das hydraulische Bremssystem, bestehend aus aktivem Bremssattel, Federspeicherbremse und Hydrogerät, wurde einem Testprogramm, bestehend aus Vibrationstest, Temperaturtest und einem Dauertest, unterzogen. Die Hydrogeräte haben mittlerweile 2×10^9 Lastwechsel erreicht.

Die Kegelradgetriebe des Antriebs wurden im Lastfall auf dem Verspannungsprüfstand mit Maximalforderung wie

- max. Antriebsmoment
- max. Motordrehzahl
- Reibwert $\mu = 0,33$

getestet und die Standfestigkeit nachgewiesen.

Anschließend wurde der komplette Radblockantrieb in einem Prüfrahen umfangreich getestet. Für dieses umfangreiche Programm wurden zusätzlich zu den im Prototyp COMBINO eingebauten Antrieb zwei weitere gefertigt.

Der Zentralcontainer mit hohem Integrationsgrad von IGBT – Stromrichtereinheit, Hilfsbetriebeumrichter, Bremswiderstand, Antriebssteuerung Batterie und Bordnetzverteilung ist unter anderem zur

- Klimaprüfung
- Wärmesicherheit
- Schwing-Schockprüfung
- Geräuschmessung
- Überspannungsfestigkeit
- Kurzschlußfestigkeit
- elektromagnetischen Verträglichkeit

umfangreich getestet worden.

Das Schraubverbindungssystem Alugrip[®] wurde hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Frequenzen (Schutzerde, EMV-Erde) sowie bezüglich des Erhalts der Leitfähigkeit über die Einsatzdauer geprüft. Dazu wurde ein Aluminiumprofilstoß mit zwei Schraubsets hergestellt und mit einem Alterungsprozeß nach Tabelle 1 beaufschlagt. Die Messung der Übergangsimpedanzen zeigte, daß die Alterung keinen Einfluß auf den Übergangswiderstand der Verbindung hat.



Blumenthal



Hauck



Kortemeyer



Walcher

DIE AUTOREN

Dr. Ing. Michael Blumenthal (52) ist Leiter des Geschäftsgebiets Fahrzeuge Light Rail im Bereich Verkehrstechnik der Siemens AG. Der promovierte Elektrotechniker begann seine Karriere vor 20 Jahren bei der Siemens AG. Er leitete das Geschäftsgebiet verarbeitende Industrie im Bereich Anlagentechnik und übernahm im November 1997 das Geschäftsgebiet für Light Rail-Fahrzeuge im Bereich Verkehrstechnik. Als General Manager bei Siemens Energy and Automation in Atlanta war er bereits in den 80er Jahren mit den ersten Straßenbahnprojekten in den USA befaßt.

Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Hauck (31) ist seit 1994 Berechnungs- und Versuchsingenieur in der Abteilung Berechnung und Versuch. Er studierte von 1989 bis 1993 Maschinenbau, Fachrichtung Fahrzeugtechnik an der Fachhochschule Ulm. Anschließend arbeitete er von 1993 bis 1994 als Vertriebsingenieur bei Electra Control, einem schwedischen Unterneh-

men der Automobilzulieferindustrie in Dornstadt.

Dipl.-Ing. Alfred Kortemeyer (39) ist Produktmanager des COMBINO im Bereich Verkehrstechnik der Siemens AG. Nach dem Studium der Physikalischen Technik mit Schwerpunkt Konstruktionstechnik an der Fachhochschule Aachen ist er seit 1983 bei der DUEWAG Werk Düsseldorf tätig. 1996 erfolgte der Wechsel vom Technischen Büro als Konstrukteur und Projektleiter zum Produktmanagement.

Dipl.-Ing. Univ. Martin Walcher (30) ist seit 1996 Projektleiter für die Lieferung von 48 Niederflurgelenktriebwagen, Bauart COMBINO[®] an die VIP Verkehrsbetriebe Potsdam GmbH. Er studierte von 1989 bis 1994 Elektrotechnik, Fachrichtung Energietechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Anschließend trat er als Projektingenieur in die Siemens AG, Bereich Verkehrstechnik, ein und arbeitete an der Entwicklung der COMBINO-Fahrzeugfamilie mit.

Der Fahrzeug-Systemtest konnte direkt mit dem Funktionstest beginnen, weil alle Komponenten vorgeprüft und alle Schnittstellen standardisiert sind. Die Subsysteme wie Türen, Sandung, Heizung und Klimaanlage wurden eingestellt. Nach der Optimierung des Antriebskreises im Regelverhalten und bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen wurde das Fahrmotormessprogramm durchgeführt. Störungen wurden simuliert und das Störgrößenverhalten des Antriebs getestet.

Anschließend erfolgten auf dem Testgleis die Antriebsoptimierung, die dynamische Einstellung der elektrischen und mechanischen Bremse, der Test der Beschleunigungs- und Verzögerungsbegrenzung, die Optimierung des Gleit- und Schleuderschutzes, die Messung der Geräuschpegel, sowie die EMV-Messungen mit Störaussendung und Störimpfindlichkeit. Das Temperaturverhalten wurde für Maximallast und zusätzlich mit einem abgeschalteten Antrieb ermittelt. Erste Energiemessungen wurden durchge-

führt. So benötigte der Prototyp mit $1/3$ Zuladung später in Potsdam 55 Wh/t/km bei 30,5% Rückspeisungsgrad.

Diese Erkenntnisse aus dem Systemtest, der Einsatz erprobter Technik und die abschließende Erprobung des ersten Fahrzeugs einer Serie im Prüfcenar Wildenrath ermöglichen die deutliche Reduzierung der Inbetriebsetzungszeit des Fahrzeugs beim Kunden auf

- 1,5 Wochen für das erste Fahrzeug und
- drei Tage für jedes weitere Fahrzeug.

Um die notwendigen Life-Cycle-Cost-Basisdaten zu ermitteln, wurde der Prototyp im September 1996 über vier Wochen probefahrt. So wurden der Ein-/Ausbau unter anderem des kompletten Antriebs, der Radreifentausch, der Erdungskontaktwechsel und der Austausch der Module im Zentralcontainer durchgeführt. Alle Verbesserungspotentiale für die Wartung und den Service wurden aufgezeigt. Die Änderungsmöglichkeiten wurden im Design-Review festge-

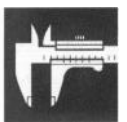


Tabelle 1: Behandlungszyklus der Sehraubverbindung

	Art der Behandlung	Norm
1. Tag	Salzsprühnebelprüfung	DIN 50021
2. Tag	Kondenswasser - Wechselklima	DIN 50017
3. Tag	Kondenswasser - Wechselklima	DIN 50017
4. Tag	Kondenswasser - Wechselklima	DIN 50017
5. Tag	Kondenswasser-Wechselklima	DIN 50017
6. Tag	Lagerung bei Raumtemperatur 18-28°C	DIN 50014
7. Tag	Lagerung bei Raumtemperatur 18-28°C	DIN 50014
48.-14. Tag	Wiederholung der Behandlungen der ersten 7 Tage	-
15.-21. Tag	Wiederholung der Behandlungen der ersten 7 Tage	-
22.-28. Tag	Wiederholung der Behandlungen der ersten 7 Tage	-

halten und in der Serienentwicklung berücksichtigt.

Der Fahrzeug-Systemtest wurde mit Präsentationsfahrten seit dem 2. Oktober 1996 in Berlin, Potsdam und bei der Rheinbahn in Düsseldorf fortgesetzt. Nach dem Abladen und Aufbügeln war der Prototyp sofort auf dem Testgleis im BVG-Betriebshof Marzahn fahrbereit.

Nach dem Einbau der Weichensteuerung erfolgten vom 9. Oktober an in Potsdam die Testfahrten parallel zum Fahrgastbetrieb. Weder Kletterweichen noch enge Kurvenradien machten Probleme. Hier wurde erstmals die hohe Laufstabilität bei 70 km/h demonstriert. Die für das Potsdamer Gleisnetz um 15 mm zu breiten Radreifen des Vorserienfahrzeuges liefen an einigen Stellen auf dem Pflaster und sorgten damit für Verwirrung bei einigen Fahrgästen.

Nach diesem Einsatz mit 512 km Laufleistung wurden bei der Rheinbahn Düsseldorf 300 Test-km absolviert und die Verträglichkeit mit einer bestehenden Werkstattinfrastruktur wie Waschanlage, Unterflurdrehmaschine und Arbeitsbühne geprüft. Anschließend erfolgten im Werk Düsseldorf erste Mängelbehebungen. So wurden die Gelenklager aufgrund von Slip-Stick-Effekten ausgetauscht, die Schienenbremsaufhängung gegen Klappern überarbeitet, die Zusatzfeder in der Sekundarfederung fixiert und der Gleit- und Schleuderschutz optimiert. Die Lüftung wurde geschwindigkeitsabhängig gesteuert und das Sandrohr gegen Verstopfung mit einem geänderten Sandauslauf ausgerüstet.

Vom 13. bis 15. November 1996 erfolgte der Transport des COMBINO nach Wien. Hier sollten unter anderem die Wintereigenschaften, die Eignung für Spannungsschwankungen von 600 bis 1000 V, einseitig geerdete

Schienen und Gleisfreimeldung über Achskurzschluß getestet werden. Die Strecke der Wiener Lokalbahn erlaubte zudem besonders hohe Tageslaufleistungen.

Für den fünfmonatigen Einsatz wurden in der Zentralwerkstatt der Wiener Verkehrsbetriebe (WVB) die Radreifen des Prototyps für das WVB-Profil auf der Unterflurdrehmaschine bearbeitet. Anschließend fanden auf dem Testgleis die Bremsfahrten und die behördliche Abnahme statt. Nach ersten Probefahrten im Gleisnetz der WVB wurde bei Fahrten mit Höchstgeschwindigkeit der Antrieb weiter optimiert. Die Fahr- und Bremsleistungen wurden bei allen Beladungszuständen protokolliert. Fahrwiderstand und Wirkungsgrad wurden ermittelt, Temperaturmessungen in Fahrer- und Fahrgastraum sowie im Zentralcontainer durchgeführt. Ebenso wurden die thermischen Grenzen bei Notbetrieb ermittelt.

Die im Prototyp eingebauten Schlingerdämpfer in den Gelenken wurden bei Meßfahrten zu Versuchszwecken ausgebaut, um den Einfluß der Dämpfer zu überprüfen. Es konnten keine Unterschiede im Fahrverhalten mit und ohne Dämpfer festgestellt werden. Mögliche Eigenschwingungen sind nicht aufgetreten. Der Prototyp kann somit ohne Gelenkdämpfer betrieben werden. Zur Bestätigung dieser Erkenntnis wurde der weitere Betrieb ohne Dämpfer durchgeführt. Des weiteren wurde an einem Fahrwerk ein Motor abgeklemmt, um die Spurstabilität des Radblockantriebs zu dokumentieren. Am 15. April 1998 wurde der Systemtest mit der Erprobung in Wien nach 15 000 km wie geplant beendet. Mehr als 35 Verkehrsbetriebe, Verbände und Behörden konnten den COMBINO-Prototyp in Wien im Fahrbetrieb ausprobieren.

Nach der Präsentation auf der UITP '97 in Stuttgart wurden mit der Eröffnung des Prüf-

Centers Wildenrath im Juni 1997 ergänzende Meßfahrten mit Lastwechseln, Temperaturverhalten einzelner Komponenten sowie Geräuschmessungen durchgeführt. Anschließend wurden hier für den nächsten geplanten Einsatz in Potsdam Bremsfahrten, die für die Freigabe zum uneingeschränkten Fahrgastbetrieb (nach BOStrab) erforderlich sind, durchgeführt. Parallel konnte die Fahrschule der Verkehrsbetriebe Potsdam hier mit der Ausbildung beginnen.

Nach der Präsentation auf dem Nahverkehrsforum in Essen begann ab dem 1. Juli 1997 für zwei Monate der Fahrgastbetrieb in Potsdam. Dazu waren die Radreifen auf der Unterflurdrehmaschine der WVB in Wien auf 100 mm Breite angepaßt worden. Das Radreifenprofil mußte nicht überarbeitet werden.

Der Prototyp wurde im täglichen Linienbetrieb eingesetzt. Der VP-Schaffner im Fahrzeug gab gern Informationen an die interessierten Fahrgäste. Zusätzlich zum Fahrplan wurden die Sonderfahrten *Tram-Tours* und die Präsentationen durchgeführt. Erste Umfrageergebnisse flossen gleich in die Serienentwicklung ein, wie

- beidseitig durchlaufende Deckenhalterungen zum sicheren Halt auch in den Fahrwerkmodulen,
- nur noch ein halbhoher E-Schrank zur Verbesserung der Rundumsicht und der Bewegungsfreiheit des Fahrers,
- eine halbverglaste Trennwand zum Fahrerraum zur Steigerung der Transparenz und des Sicherheitsgefühls,
- doppelte Anzahl Klappfenster.

Zur Verbesserung der Vandalismustfestigkeit wurden die Scheiben innen mit Antikratzfolie geschützt. Das Testergebnis war gut, die Scheiben konnten nicht mehr zerkratzt werden. Der sichere Ausstieg durch diese präparierten Fenster im Notfall wurde im Test nachgewiesen. Nach Optimierung der Schallabsorber konnte das teilweise auftretende Kurvenquietschen vollkommen eliminiert werden. Mit 8200 km Laufleistung in Potsdam endete der erste Fahrgastbetrieb bei Kilometerstand 24 000 sehr erfolgreich.

Am 1. September begann der Transport nach Barcelona zum zweiten Fahrgasteinsatz. Dort war eigens für Bahnpräsentationen ein 640 m langes Testgleis eingerichtet worden. Der Prototyp wurde als Zweirichtungsfahrzeug eingesetzt und absolvierte drei Monate Publikumsverkehr. Während des gesamten Einsatzes wurde eine Verfügbarkeit von 98% erzielt. Großes Interesse zeigten auch die Besucher aus Spanien und Japan, die sich ausführlich vor Ort informierten.

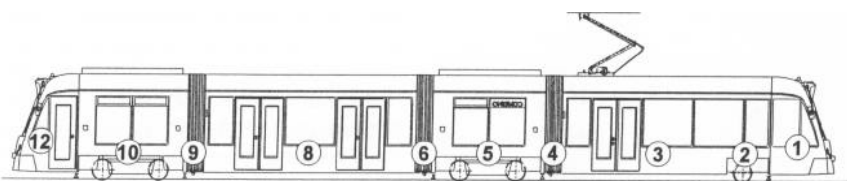


Abb. 2: Meßstellen für die Messungen des Fahrkomforts

Messungen

Von Beginn an sah das Erprobungsprogramm für den COMBINO auch fahrdynamische Untersuchungen vor. Der Schwerpunkt lag dabei in der Ermittlung des Fahrkomforts. Zusätzlich wurden aber auch Messungen bezüglich des allgemeinen Schwingungsverhaltens und des Bogenlaufverhaltens sowie Radprofilmessungen durchgeführt. Mit Hilfe einer Videoanlage, die das Bewegungsverhalten der Triebfahrwerke im Spurkanal aufzeichnete, konnte der Lauf zweier Radpaare im Gleis während der Fahrt beobachtet werden. Aufgrund des Umfangs der Ergebnisse werden aber in dieser Abhandlung nur die Erkenntnisse aus den Fahrkomfortmessungen präsentiert.

Meßstrecken

Die beiden Fahrzeugvarianten Normal-/Meterspur mußten aus organisatorischen Gründen auf unterschiedlichen Meßstrecken untersucht werden. Die Testfahrten mit dem normalspurigen COMBINO wurden bei der Wiener Lokalbahn durchgeführt. Die Messungen fanden immer auf dem Streckenabschnitt von Inzersdorf nach Baden (Endhaltestelle) und zurück statt. Um eine Reproduzierbarkeit der Meßdaten zu erhalten, wurden auf dieser Strecke mehrere Abschnitte ausgewählt, die dann mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchfahren wurden. Bei der Auswahl der Streckenabschnitte sind folgende Kriterien herangezogen worden:

- gerade Strecke
- kein Gefälle oder Steigung
- keine Weiche
- keine Überhöhung.

Mit Hilfe dieser Auswahl konnten neun Meßstrecken je Fahrtrichtung bestimmt werden. Es handelte sich dabei ausschließlich um bahneigenen Körper mit Vignolschienen auf Holzschwellen.

Für den meterspurigen COMBINO ergab sich die Möglichkeit, das in Wildenrath neu erbaute Siemens-Prüfzentrum für Schienenfahrzeuge (PCW) zu benutzen. Gemäß dem geplanten Einsatzgebiet des COMBINO wur-

den die Bereiche T2, T3 und T4 auf dem Testgelände ausgewählt. Die Messungen des Fahrkomforts mit der Meterspur-Variante fanden auf dem Testgleis T3 statt, einem 1,5 km langen, geraden Abschnitt mit Vignolschienen auf Holzschwellen im Schotterbett.

Messung des Fahrkomforts

Zur Ermittlung des Fahrkomforts wurden an den in Abbildung 2 gezeigten Stellen Beschleunigungsaufnehmer für die vertikale und laterale Richtung auf dem Fahrzeugboden installiert. Alle Meßpunkte befanden sich in Fahrzeugquermitte. Die Numerierung orientiert sich dabei an den in der Simulationsrechnung festgelegten Punkten. Aufgrund begrenzter Kanalanzahl bei der Meßdatenerfassung wurde abweichend von der Simulation auf einzelne Meßstellen (7, 11) verzichtet.

Auswertung

In diesem Bericht wird der Schwerpunkt auf das quadratische Wertziffer(Wz)-Verfahren der Deutschen Bahn gelegt. Beim quadratischen Verfahren läßt sich die Wertziffer aus dem Effektivwert der Beschleunigungsamplitude a [cm/s^2] der Frequenz f [Hz] und einem davon abhängigen Bewertungsfaktor B_s [-] berechnen. Für den frequenzabhängigen Bewertungsfaktor B_s (f) des quadratischen Verfahrens gilt nach ORE C 116 RP 8 [1] das untenstehende Diagramm (Abb. 3).

In Tabelle 2 ist der Zusammenhang zwischen Laufgüte (DB), Wertungsziffer und Schwingungsempfinden dargestellt [2]. Hier-

bei ist zu berücksichtigen, daß die Methode für Reisezugwagen entwickelt wurde. Die Reisezeit in einer Straßenbahn, wie sie hier untersucht wird, beträgt im Vergleich dazu nur einen Bruchteil. Die Bewertung des Schwingungsempfindens ist hier somit weniger stark einzusetzen. Als Grenzwert für einen annehmbaren Schwingkomfort wird in der VDV 150 [3] $Wz < 3,0$ angegeben. In der Praxis werden diese Werte aber wegen der oftmals schlechten Gleislage überschritten.

Ergebnisse

Alle Ergebnisse der Wz-Messungen werden als Relativwerte angegeben. Dabei werden die Unterschiede zwischen verschiedenen Konfigurationen bzw. Fahrzeugen als ΔWz_{zy} dargestellt.

Tabelle 2: Bezug zwischen Laufgüte, Wz und Schwingungsempfinden

Laufgüte	Wz	Schwingungsempfinden
sehr gut	1,0	gerade spürbar
	2,0	gut spürbar
gut	2,5	stärker spürbar, unruhig, noch erträglich
	3,0	stark spürbar, unruhig, noch erträglich
	3,2	stark unruhig
befriedigend	3,5	außerordentlich unruhig, unangenehm, lästig, bei längerer Dauer nicht erträglich
	4,0	außerordentlich unangenehm, bei längerer Dauer schädlich
betriebsfähig	4,5	
nicht betriebsfähig	5,0	

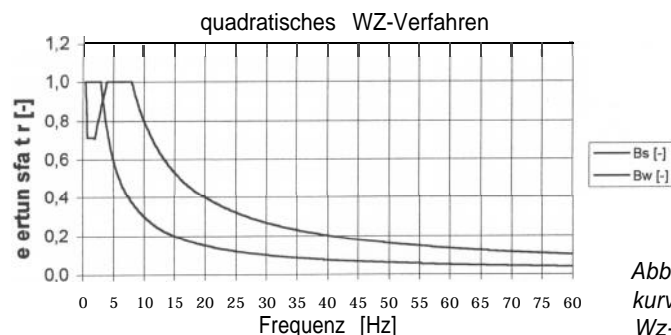
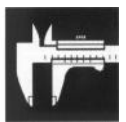


Abb. 3: Bewertungskurve des quadratischen Wz-Verfahrens



Bei den Ergebnisdiagrammen ist zu beachten, daß jeweils eine der beiden dargestellten Konfigurationen die Basis des Vergleichs ist. Das heißt, wird beispielsweise die Normalspur-Variante mit der Meterspur-Variante verglichen, ist die Normalspur-Variante die Basis des Vergleichs. Somit bedeutet ein positives $\Delta W_{z/y}$ daß die Normalspur-Variante an dieser Stelle eine niedrigere Wertziffer aufwies als die Meterspur-Variante und damit besserer Fahrkomfort vorhanden war. Wurde hinsichtlich des Fahrkomforts ein besserer Wert bei dem COMBINO mit Meterspurfahrwerken gemessen, so drückt sich das in einem negativen $\Delta W_{z/y}$ aus.

Ergebnisse des Normalspur-COMBINO

Zunächst sind die Ergebnisse des Normalspur-COMBINO aufgeführt. Die Diagramme (Abb. 4) zeigen den relativen Unterschied zwischen den verschiedenen Meßpunkten. Die Basis dieser dargestellten Differenzen ist der Meßpunkt mit der niedrigsten gemessenen Wertziffer. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist auffällig, daß die Werte im EEF-Modul je nach Schwingrichtung sehr unterschiedlich ausgefallen sind. Beim Vertikalschwingkomfort sind die besten Werte im EEF-Modul zu finden, während beim Querschwingkomfort in diesem Wagenteil der schlechteste Fahrkomfort aufgetreten ist. Bezüglich der Fahrtrichtung sind keine großen Unterschiede auszumachen.

Ergebnisse des Meterspur-COMBINO

Analog zu den im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Diagrammen sind in Abbildung 5 die Ergebnisse des meterspurigen COMBINO aufgeführt. Betrachtet man die

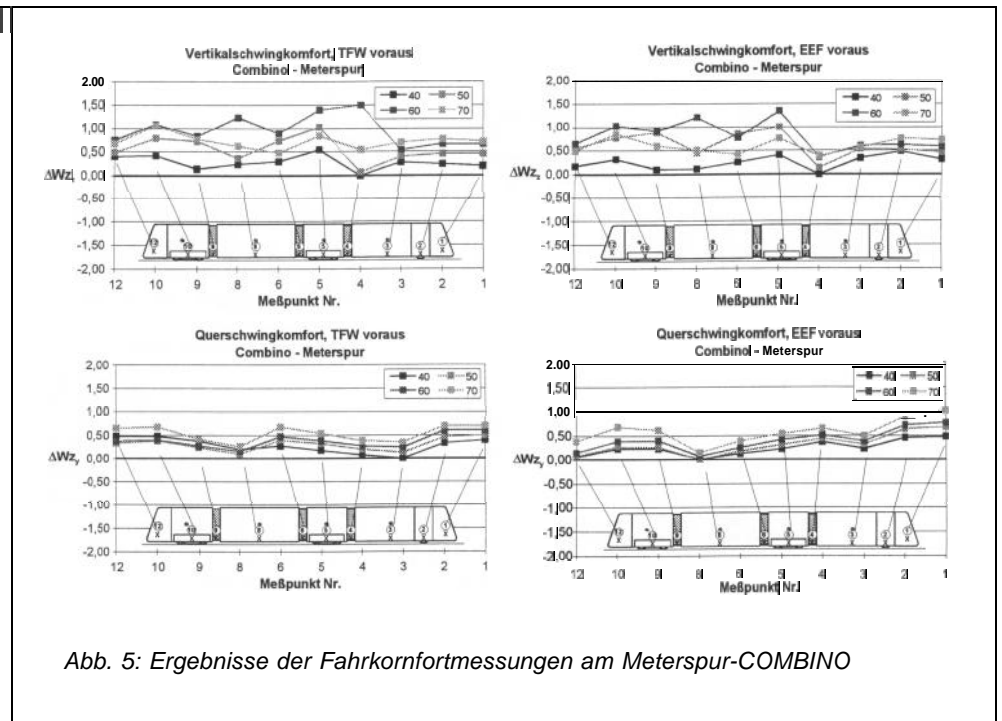


Abb. 5: Ergebnisse der Fahrkomfortmessungen am Meterspur-COMBINO

$\Delta W_{z/y}$ -Werte in den beiden oberen Diagrammen, fällt auf, daß die Werte eine starke Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit aufweisen. Insbesondere das mittlere Triebfahrwerksmodul mit den Meßpunkten 4, 5 und 6 zeigt die größten Differenzen zwischen den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

Der Grund für dieses Verhalten wurde bei der Frequenzanalyse der Meßdaten aufgedeckt. Die Frequenzanalyse der vertikalen Beschleunigungen ergaben eine Resonanzfrequenz, die mit der Raddrehzahl überein-

stimmte. Eine Unwucht an einem Rad des mittleren TFW, die inzwischen behoben ist, führte zu Anregungen einer Resonanzfrequenz im Triebdrehgestellrahmen und wurde somit auf den Wagenkasten übertragen. Diese Resonanzfrequenz stellte sich zwischen 50 und 60 km/h ein und war bei der Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h wieder verschwunden. Dieses Verhalten ist in den Diagrammen gut nachzuvollziehen. Beim Querschwingkomfort ist ein harmonischer Verlauf der Fahrkomfortwerte, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, zu sehen. Der Einfluß der Fahrtrichtung ist auch beim Meterspur-COMBINO gering.

Vergleich COMBINO Normalspur/Meterspur

Der ausführlichste Vergleich fand zwischen dem COMBINO mit Normalspur-Fahrwerken und dem COMBINO mit Meterspur-Fahrwerken statt.

Betrachtet man die folgenden vier Diagramme (Abb. 6), so fällt beim Vergleich des Vertikalschwingkomforts auf, daß die Unterschiede, unabhängig von der Fahrtrichtung, stark von der Fahrgeschwindigkeit abhängig sind. Während im Geschwindigkeitsbereich zwischen 40-60 km/h der Meterspur-COMBINO höhere Wertziffern liefert, sind die Werte bei 70 km/h um die gleiche Größenordnung niedriger.

An dieser Stelle zeigt sich wieder der Einfluß der im letzten Abschnitt ermittelten Unwucht eines Rades unter dem mittleren TFW-Modul. Unbeeinflusst davon blieben die Meßstellen 1-3 der Meterspur-Version, denn unab-

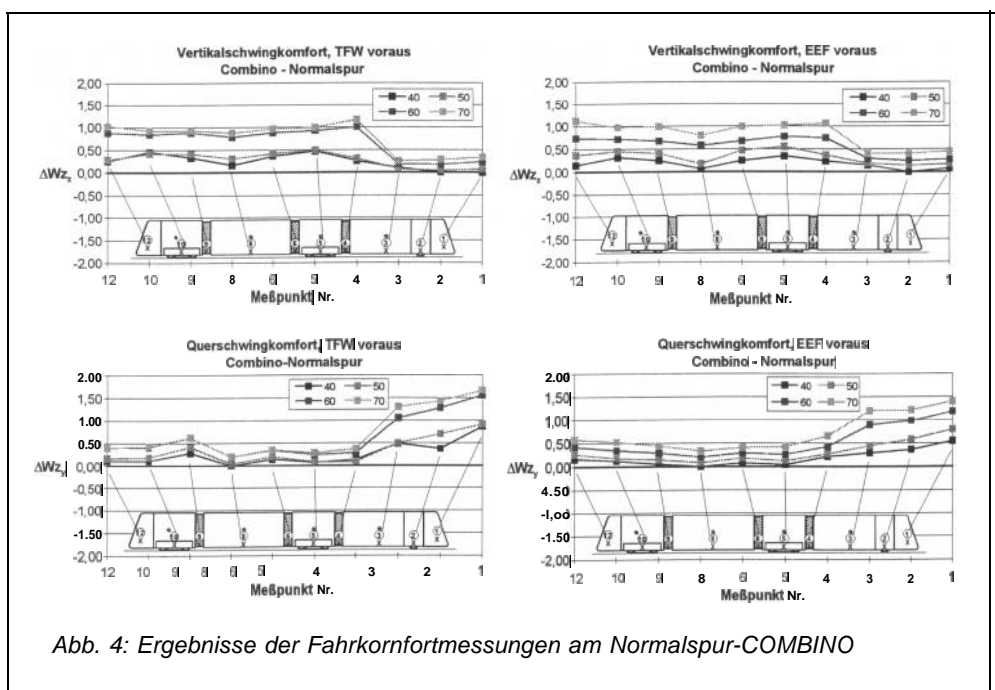
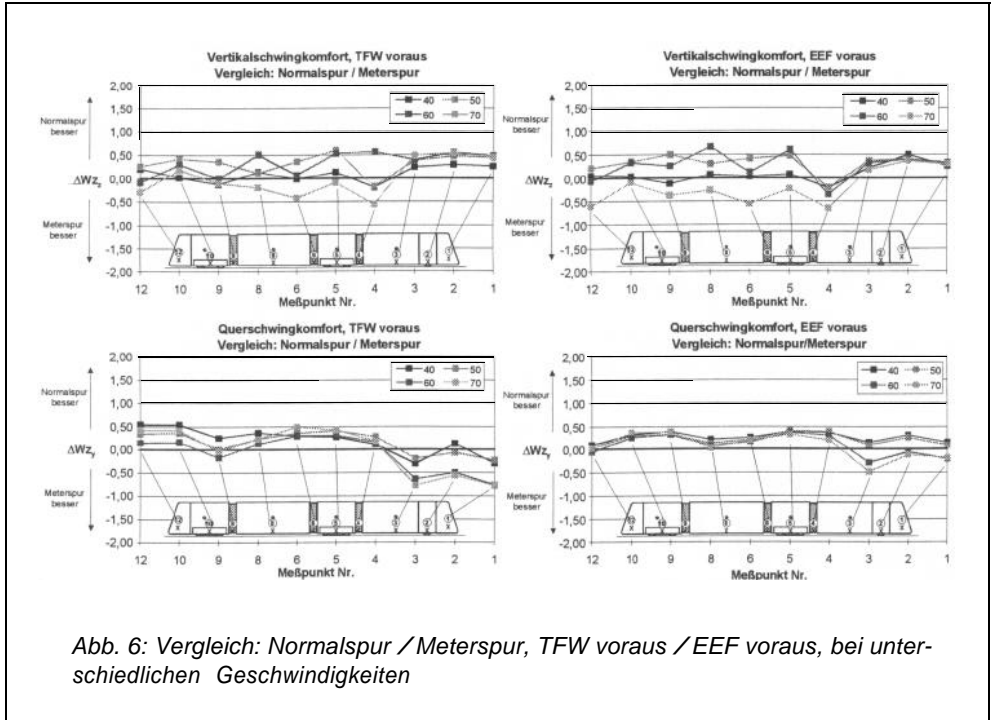


Abb. 4: Ergebnisse der Fahrkomfortmessungen am Normalspur-COMBINO



schneidet. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die zum Vergleich herangezogenen Fahrzeuge mit wesentlich aufwendigeren und teureren Federungssystemen ausgestattet sind, was vor allem den vertikalen Federungskomfort sehr positiv beeinflusst, ist der Abstand zum COMBINO nicht groß. Beim Querschwingkomfort ist der COMBINO besser oder liegt auf ähnlichem Niveau wie die Vergleichsfahrzeuge.

Messungen am Antrieb

Energieverbrauch

Die durch die Fahrleitung dem Fahrzeug zugeführte elektrische Energie dient zum einen dem Antrieb des Fahrzeuges, Abnehmer sind hier die beiden Antriebsanlagen, zum anderen der Versorgung der Hilfs- und Nebenbetriebe, Abnehmer sind hier der Hilfsbetriebeumformer und die Heizung von Fahrgast- und Fahrerraum. Beim Bremsen wird die kinetische Energie des Fahrzeuges wieder in elektrische Energie umgewandelt und der Fahrleitung zugeführt. Ist diese nicht aufnahmefähig, wird diese Energie entweder in den Bremswiderständen und der elektrischen Fahrzeugheizung in Wärme umgewandelt und abgegeben oder für die Versorgung des Hilfsbetriebeumformers verwendet. Die Beheizung des Fahrzeuges erfolgt bis zu einer Außentemperatur von 0°C bei einem üblichen Fahrspiel nahezu ausschließlich durch Bremsstrom.

hängig von der Geschwindigkeit bzw. Fahrtrichtung, wiesen diese positive ΔW_z auf. Die Analyse des Querschwingkomforts zeigt zumindest bei den Meßpunkten 4-12 einen wesentlich geringeren Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die Ergebnisse des Vergleichs. Bei den Meßstellen 1-3 hingegen ist wieder eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu beobachten. Je höher die Geschwindigkeit, um so besser ist der Fahrkomfort im EEF-Modul der Meterspur-Variante gegenüber dem COMBINO mit Normalspur-Fahrwerken. Die Gründe für die vorhandenen Unterschiede zwischen den beiden Ausführungen sind vielfältig. Neben der bei den Tests vorhandenen Unwucht an einem Meterspurfahrwerk ist die Verwendung verschiedener Teststrecken sicher einer der Hauptgründe. Weitere Gründe sind die konstruktiven Unterschiede zwischen den Meterspur-Fahrwerken und den Normalspur-Fahrwerken. Diese Unterschiede können sich im fahrdynamischen Verhalten des Fahrzeuges bemerkbar machen.

Vergleich: COMBINO mit/ohne Gelenkdämpfer

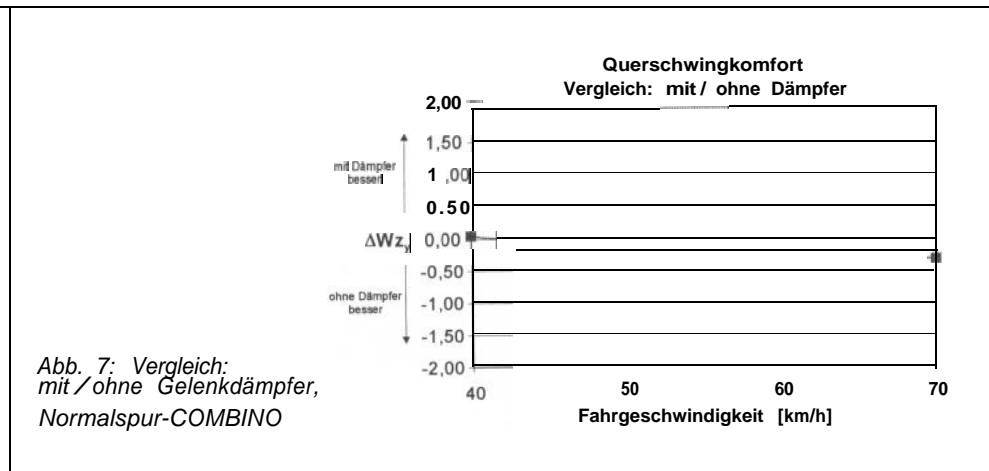
Der COMBINO ist optional im Gelenkbereich mit Schwingungsdämpfern ausgerüstet. Um den Einfluß dieser Dämpfer untersuchen zu können, wurden an der Normalspur-Variante Testfahrten mit und ohne Gelenkdämpfer durchgeführt. Abbildung 7 zeigt die Differenzen zwischen beiden Konfigurationen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Auffällig ist dabei, daß der Fahrkomfort mit zunehmender Geschwindigkeit ohne Gelenkdämpfer besser ist als mit Gelenkdämpfern, wobei

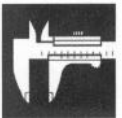
die Unterschiede zum Teil sehr gering sind. Der Grund dafür liegt in dem guten Zustand der befahrenen Strecke. Bei Messungen auf einem Testgleis, welches von Radsatzfahrzeugen sinusförmig ausgefahren ist, würden sich die Ergebnisse umkehren.

Bewertung

Zur Beurteilung der aus den Messungen gewonnenen Daten bietet sich der Vergleich mit anderen Fahrzeugkonzepten aus dem Hause Siemens-Duewag an. Als Vergleich werden die konformen Meßstellen aus Untersuchungen an den 70%-Niederflur-Stadtbahnwagen NGT 6DD der Dresdner Verkehrsbetriebe AG sowie an den 100%-Niederflur-Stadtbahnwagen Typ R der Stadtwerke Frankfurt am Main AG herangezogen. Es läßt sich feststellen, daß der COMBINO bei dieser Gegenüberstellung sehr gut an-

Die Messung und Dokumentation des Energieverbrauches bei den COMBINO-Fahrzeugen ist sehr einfach. Jede Antriebsanlage verfügt über ein eigenes Antriebssteuerggerät, das die Leistungsaufnahme und -abgabe ermittelt. Zusätzlich werden noch die Fahrleitungsspannung und die Gesamtstromaufnahme des Fahrzeuges gemessen und ausgewertet. Aus diesen Größen kann der Energieverbrauch des Antriebes 1 und 2, der Hilfsbetriebe sowie der Rückspeisegrad (und daraus die Energieumsetzung in den Brems-





widerständen und der Fahrzeugheizung) berechnet werden. Man erhält also den gesamten Energiefluß im Fahrzeug und zwischen Fahrleitung und Fahrzeug.

Im Rahmen der Erprobungsfahrten des COMBINO-Prototypen wurden die Einsätze in Potsdam und Basel ausgewertet. Voraussetzend sei gesagt, daß die Interpretation dieser Daten im Vergleich zu anderen Fahrzeugen relativ schwierig ist, da sie stark von dem gefahrenen Zyklus, dem mittleren Besetzungsgrad, der Drehzahl-Drehmoment-Grenzkennlinie der Fahrmotoren und nicht zuletzt von der Aufnahmefähigkeit des Fahrleitungsnetzes bei Energierückspeisung abhängen. Die in Tabelle 3 angegebenen Daten sollten daher qualitativ und nicht quantitativ verstanden werden.

Einen wesentlichen Einfluß hat das Fahrspiel und damit die Durchschnittsgeschwindigkeit. Bei niedriger Durchschnittsgeschwindigkeit wie in Basel kann fast die gesamte Bremsenergie an Heizung, HBU und Fahrleitung zurückgegeben werden. Dabei wird vereinfachend angenommen, daß das Fahrleitungsnetz jederzeit aufnahmefähig ist. Das heißt, Fragen wie Anzahl und Länge der Fahrleitungsabschnitte, Grad der Vermaschung, Form der Energieeinspeisung und andere Verbraucher im Netz werden nicht betrachtet. Zu berücksichtigen ist ferner, daß der Einsatz in Potsdam im Sommer, der in Basel in der Übergangszeit mit anteiliger Heizperiode und damit zusätzlicher Rückspeisung in die Heizgeräte stattgefunden hat.

Antriebsdimensionierung

Ein wesentliches Kriterium bei der Auslegung der Antriebsanlage ist die Erwärmung und Wärmeabführung der Komponenten Stromrichter und Fahrmotor. Während das Temperaturverhalten des Stromrichters über die Fremdbelüftung gut kontrolliert werden kann, ist die Kühlung der eigenbelüfteten Fahrmotoren von deren Drehzahl und damit vom Fahrspiel und der Belastung abhängig.

Für die Messung der Motorthermik wurden zwei Antriebsaggregate an verschiedenen Stellen mit Temperaturfühlern ausgestattet und in das Fahrzeug eingebaut, wozu in jedem Triebwerk jeweils ein Antrieb ausgetauscht wurde. Als Einsatzfall wurde Stop-and-Go-Betrieb im Fußgängerbereich ($v_{max} = 25-30 \text{ km/h}$) bei $\frac{3}{3}$ -Beladung gewählt. Die Untersuchungen fanden im Prüfcenter Wildenrath statt. Durch ständiges Anfahren und Bremsen wurde der Antrieb in die thermische Beharrung gebracht.

In den Fahrmotoren stellte sich eine maximale Wickelkopftemperatur von ca. 140°C ein. Mit Hilfe der Testergebnisse läßt sich daraus auf eine mittlere Wicklungserwär-

Tabelle 3: Messung des Energieverbrauches

	Messung in	
	Potsdam	Basel
Einsatz	7. 7. '97-18. 8. '97	17. 3. '98-13. 5. '98
Einsatzdauer	41 Tage	56 Tage
Gefahrene Distanz	6633,30 km	7215,70 km
Mittlere Tageskilometer	161,79 km	128,85 km
Durchschnittsgeschwindigkeit	27,05 km/h	19,10 km/h
Durchschnittliche Beladung (geschätzt)	5,0 t	5,0 t
Aufgenommene Energie Antriebe	17 575 kWh	18 908 kWh
Zurückgespeiste Energie Antriebe	5358 kWh	7870 kWh
Rückspeisequote	30,5%	41,6%
Fahrzeugspezifischer Energieverbrauch bei einem Fahrzeuggewicht von 28 t und einem mittleren Besetzungsgrad von $\frac{1}{3}$ (entsprechend 65 Personen = 5 t Zuladung)	1,84 kWh/km 55 Wh/(t x km)	1,53 kWh/km 46 Wh/(t x km)

Tabelle 4: Fahrtauern bei Gerätelüfterausfall

	Außentemperatur	Dauer 1)	Dauer 2)
Fahren/Bremsen ohne Einschränkungen	0°C	26 Minuten	13 Minuten
	25°C	15 Minuten	8 Minuten
	40°C	11 Minuten	6 Minuten
Fahren bis 30 km/h und rein mechanisches Bremsen	0°C	unbegrenzt	unbegrenzt
	25°C	75 Minuten	38 Minuten
	40°C	35 Minuten	18 Minuten

- 1) aus „kaltem“ Zustand
2) bei „betriebswarmem“ Fahrzeug

mung von 160°C schließen. Zulässig ist eine mittlere Wicklungstemperatur von 200°C bei einer Umgebungstemperatur von 40°C . Die Lagertemperatur erreicht maximal 85°C . Die Lager sind wärmostabilisiert bis 120°C ausgeführt, das Fett ist ebenfalls für diese Temperatur zugelassen. Damit wurde der Nachweis für die robuste thermische Auslegung des COMBINO-Antriebs erbracht, es sind darüber hinaus noch genügend thermische Reserven vorhanden.

Die Kühlung der Traktionsstromrichter erfolgt über zweistufige Gerätelüfter. Im Normalbetrieb laufen die Lüfter auf Stufe 1. Wird beispielsweise bei hohen Außentemperaturen und gleichzeitig hohem Momentenbedarf die Grenztemperatur der Leistungshalbleiter erreicht, wird auf die höhere Lüfterdrehzahl umgeschaltet. Dies erfolgt nur ab einer Mindestgeschwindigkeit von 3 km/h, so daß die höheren Lüftergeräusche nahezu nicht zu hören sind. Im normalen Betrieb tritt dieser Fall allerdings sehr selten auf, beim Einsatz in Basel wurde kein einziges Mal umgeschaltet. Bei einer Störung des Gerätelüfters oder bei Ausfall der 3AC-400-V-Versorgung vom HBU wird der Antriebscontainer nicht mehr belüftet. Die Temperatur im Luftkanal steigt

dann abhängig von der Außentemperatur und der erzeugten Verlustleistung an. Bei Erreichen der Grenztemperatur der IGBT-Halbleiter sperrt das ASG den Fahrmotorrichter, und es ist kein Fahren und kein elektrodynamisches Bremsen mit dem betroffenen Antriebsmodul mehr möglich. Von besonderem Interesse in diesem Fall ist die Frage, wie lange der Antrieb ohne Belüftung betrieben werden kann. Dazu wurde bei den verschiedenen Einsätzen der Lüfter abgestellt und die Betriebszeiten bis zum Abschalten des Antriebes durch das ASG gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufbereitet.

Sonstige Messungen

Systemwirkungsgrad: Der Systemwirkungsgrad (Mittelwert über ein Standardfahrspiel) liegt bei 82%, wobei hierunter die Umsetzung der elektrischen Energie aus der Fahrleitung in die kinetische Energie des Fahrzeuges verstanden wird.

Fahrwiderstandsformel: Mit Hilfe von, Ausrollversuchen wurden die genauen Parameter der Fahrwiderstandsformel ermittelt. Dies erlaubt nun genauere Berechnungen zur Fahrdynamik.



Abb. 8: Abnahmefahrten des Prototypen im Prüfcenter Wildenrath

Erfahrungen

Abnahmefahrten in Wildenrath

Für den ersten Einsatz des COMBINO-Prototypen im Fahrgastbetrieb im Juli und August 1997 in Potsdam mußte zuvor eine Abnahme durch die zuständige TAB durchgeführt werden. Diese Abnahme erfolgte vom 10.-12. Juni 1997 im Prüfcenter Wildenrath (Abb. 8). Gemäß den Vorschriften für eine Erstmusterprüfung wurden die Bremsfahrten mit $\frac{2}{3}$ - und $\frac{3}{3}$ -Beladung durchgeführt. Die erforderlichen Bremsverzögerungen nach BoStrab wurden im ersten Anlauf erreicht und zum Teil deutlich übertroffen. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurde das Fahrzeug am 1. Juli 1997 von der TAB Brandenburg für den Einsatz für die Personenbeförderung zugelassen.

Gleit- und Schleuderschutz

Zur optimalen Übertragung des Antriebsmomentes auf die Schiene und zur Verhinderung von Flachstellen beim Bremsen sind die Antriebsanlagen mit einem elektronischen Gleit- und Schleuderschutz ausgerüstet. Unterstützend wird Sand gegeben. Dieser kann vom Fahrer auch gesondert angefordert wer-

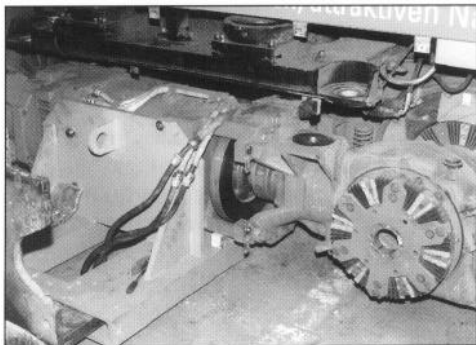


Abb. 9: Abnehmen des Antriebsaggregates mit der Aufnahmevorrichtung

den. Ein immer wieder intensiv diskutiertes Thema ist der Sandverbrauch der Fahrzeuge. Sicherlich haben der Fahrer mit seiner Fahrweise sowie die äußeren Bedingungen wie Witterung und Gleiszustand einen signifikanten Einfluß auf den Sandverbrauch. Nicht unerheblich ist jedoch auch die Art und Weise, in der die Antriebssteuerung auf Gleiten und Schleudern reagiert. Während des Probetriebes wurde der Sandverbrauch des Fahrzeuges sehr genau beobachtet und der Gleit- und Schleuderschutz ständig optimiert. Mußte bei den ersten Fahrten des COMBINO in Düsseldorf noch täglich Sand nachgefüllt werden, so reduzierte sich dieses Intervall auf drei bis vier Tage während des Einsatzes in Basel. Dieser Erfolg wird sicherlich, wie bereits gesagt, nicht einzig und allein der verbesserten Antriebsregelung zuzuschreiben sein, jedoch dürfte sie einen nicht unerheblichen Einfluß gehabt haben.

Austausch der Antriebe

Jedes Triebfahrzeug COMBINO besitzt beidseitig einen längsliegenden Radblockantrieb. Dieser Antrieb ist abgefedert im Fahrwerkrahmen aufgehängt. Jedes Rad wird über eine Hohlwelle mit zwei Gummi-Metall-Paketkupplungen angetrieben. Die Kupplung der

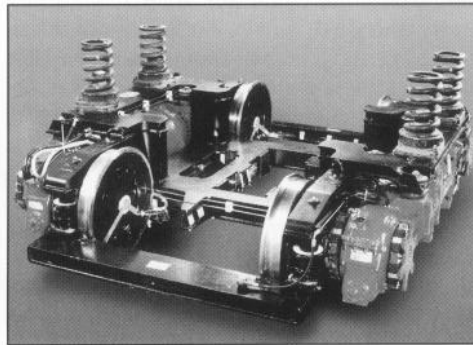


Abb. 10: Meterspurfahrwerk COMBINO

Räder in Längsrichtung zum Radblock bietet nicht nur eine vorteilhafte Spurführungstechnik, sondern mit der seitlichen kompakten Anordnung auch einen deutlichen Montagevorteil. Dazu wurde in Düsseldorf, Wien, Erfurt und Basel der Austausch demonstriert. Am Antrieb wird eine Aufnahmevorrichtung für einen Hubstapler befestigt, damit die Einheit mit 850 kg Masse bewegt werden kann (Abb. 9). Nach dem Trennen der elektrischen und der hydraulischen Verbindung, dem Lösen der Antriebskupplung und der Motoraufhängung im Fahrwerkrahmen kann der Antrieb über die Hohlwellen abgezogen werden. Der komplette Aus- und Einbau einer Einheit dauert knapp zwei Stunden.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem COMBINO ist ein zukunftssträchtiges 100%-Niederflur-Straßenbahnkonzept unter größtmöglicher Verwendung bewährter und robuster Technik entstanden. Die Serienreife ist erreicht und wird mit den Testergebnissen dokumentiert. Die Beurteilung des Komfort-Verhaltens durch das Wertziffer (WZ-)Verfahren ergab keine signifikanten Unterschiede zu anderen Fahrzeugkonzepten. Die Betriebsphase wird im weiteren Fahrbetrieb fortgesetzt. Ziel ist es, den COMBINO immer weiter zu optimieren. Die Erkenntnisse fließen permanent in die weitere Serienentwicklung ein. Der Prototyp ist nun seit Februar auf Meterspurfahrwerke (Abb. 10) umgerüstet. Erste Fahrgasteinsätze wurden in Erfurt und Basel durchgeführt.

Literatur

- [1] ORE: Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Gleis, Frage C 116, RP 8, ORE, Utrecht (1978)
- [2] N. N.: Die Beurteilung der Laufgüte von Eisenbahnfahrzeugen nach dem WZ-Verfahren mittels Auswertegeräten, Mitteilung aus der Bundesbahn-Versuchsanstalt Minden/Westfalen.
- [3] VDV-Recommendations 150: Recommendations regarding type of rail-guided vehicle for urban mass transit - Light Rail Vehicle, Edition April 1990.
- [4] Kortemeyer, A.; Osterhus, W.: Siemens kommt mit dem COMBINO, DER NAHVERKEHR 13 (1995).
- [5] Kortemeyer, A.; Osterhus, W.: Mit COMBINO in die Zukunft, nahverkehrs-praxis 6 (1996).
- [6] Schnaas, J.; Meyer, U.: Innovatives Fahrzeugkonzept für ein modulares Straßenbahnfahrzeug, DER NAHVERKEHR 6 (1996).
- [7] Schindler, C.; Seibert, M.; Weber, F.-J.: Fahrdynamische Auslegung des COMBINO, DER NAHVERKEHR 12 (1996).
- [8] Schnaas, J.: Reparaturfreundliche Fahrzeugkonstruktion Überlegungen am Beispiel des COMBINO, DER NAHVERKEHR 4 (1997).
- [9] Hondius, Harry: ÖPNV-Niederflurfahrzeuge im Kommen (11) 10 Jahre Niederflurstraßenbahnen, Stadtverkehr 9 (1997).
- [10] Hondius, Harry: Fünfzig Jahre Nahverkehrstechnik, Verkehr und Technik 11 (1997).

Siemens AG
Bereich Verkehrstechnik
Light Rail
Postfach 3240
91050 Erlangen
Tel.: (09131)7-0
Fax: (09131)7-23645

Mobility for a moving world
Siemens Verkehrstechnik