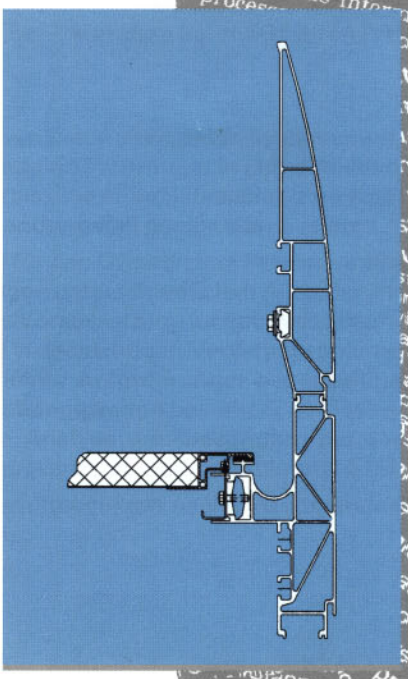
SIEMENS

Sonderdruck aus ZEV + DET Glasers Annalen Juli/August Seiten 279 – 287

Neue Fertigungsprinzipien zum Vorteil des Kunden

Erläuterungen am Beispiel der Aluminium-Hybridbauweise der Niederflurstraßenbahn COMBINO

Verfasser:
J. Schnaas



© 1999 by Georg Siemens Verlagsbuchhandlung

Neue Fertigungsprinzipien zum Vorteil des Kunden

Erläuterungen am Beispiel der Aluminium-Hybridbauweise der Niederflurstraßenbahn COMBINO®

Jürgen Schnaas, Düsseldorf

Customers benefit from new manufacturing principles – The example of aluminium hybrid construction for COMBINO® low-floor LRVs

For several years already, manufacturing of new urban transit vehicles for public passenger transport has focussed on both the development of new vehicle concepts and new forms of design and construction, primarily for the load-carrying coach body shell. Focusing on the fundamental reasons for technical advances, the paper discusses the development goals of the rail vehicle industry that can no longer be achieved with conventional forms of construction and manufacturing processes. To solve this problem, both intelligent design and manufacturing techniques and the use of modules and systems are necessary. Examples from the area of the load-carrying COMBINO coach body shell show how the aluminium hybrid construction results in distinct customer benefits.

Nouveaux principes de fabrication avantageux pour le client – Explications à l'exemple du mode de construction hybride en aluminium retenu pour le tramway à plancher surbaissé COMBINO®

Depuis quelques années, outre des nouveaux concepts de véhicule, des nouveaux modes de construction notamment pour la structure porteuse de caisse, ont été développés pour la construction de nouveaux véhicules destinés au transport public urbain. Ne pouvant plus être atteints par les modes de construction et les procédés de fabrication conventionnels, les objectifs de développement essentiels pour l'industrie ferroviaire sont déduits des motivations essentielles des évolutions techniques.

La solution du problème nécessite d'une part le recours à des technologies de construction et de fabrication intelligentes et l'utilisation de modules et de systèmes d'autre part. A partir des exemples concrets du domaine de la structure porteuse de caisse du COMBINO®, le présent article précise de quelle façon le mode de construction hybride en aluminium se manifeste directement par des avantages significatifs pour le client.

Seit einigen Jahren werden bei der Herstellung von Nahverkehrsfahrzeugen für den Öffentlichen Personennahverkehr neben neuen Fahrzeugkonzepten auch neue Bauweisen vor allem für die tragende Wagenkastenstruktur entwickelt. Aus den wesentlichen Gründen für die technischen Weiterentwicklungen werden die Entwicklungsziele für die Schienenfahrzeugindustrie abgeleitet, die mit den konventionellen Bauweisen und Fertigungsabläufen nicht mehr erreichbar sind.

Zur Lösung des Problems bedarf es intelligenter Konstruktions- und Fertigungstechniken einerseits sowie der Verwendung von Modulen und Systemen andererseits. Anhand konkreter Beispiele aus dem Bereich der tragenden Wagenkastenstruktur des COMBINO® wird dargelegt, wie sich die Aluminium-Hybridbauweise direkt in deutlichen Kundenvorteilen niederschlägt.

1. Einleitung

Neben den nicht spurgeführten Bussen existieren unterschiedlichste spurgeführte Verkehrssysteme, mit denen die städtespezifischen Anforderungen an den kommunalen Nahverkehr erfüllt werden. Im einzelnen sind dies:

- bimodale Fahrzeugsysteme wie beispielsweise der sogenannte Spurbus in Essen [1, 2], der TVR (Transport sur Voie Réservé) [3 bis 5] oder die Projektstudie „Translohr",
- innovative Bahnsysteme wie Kabinenbahnen [6], Magnetbahnen [7], Monorailbahnen, People Mover [8] oder Standseilbahnen [9], die alle in [10] ausführlich beschrieben und für einen definierten Einsatzfall miteinander verglichen und bewertet wurden,
- Niederflur-Straßenbahnsysteme,
- Stadtbahnsysteme – sowohl in Niederflur- als auch in Hochflurausführung; hierzu gehören auch die Mehrsystemfahrzeuge, die sowohl innerstädtisch als auch auf Vollbahngleisen z. B. der Deutschen Bahn AG fahren [11, 12], und
- U-Bahn-Systeme.

Die typischen betrieblichen Daten eines jeden Systems sind, mit Ausnahme der bimodalen Fahrzeuge, in [13] detailliert nachzulesen; sie dienen als eine erste Hilfestellung zur Auswahl des für einen Anwendungsfall geeigneten Systems.

All diese Verkehrsmittel für den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) unterliegen unterschiedlichen Anforderungen, deren Beachtung die Voraussetzung für optimale Lösungen der vielfältigen und vielschichtigen Verkehrsprobleme ist. Da zwischen den einzelnen Anforderungen gegenseitige Beeinflussungen und Abhängigkeiten bestehen, ist diesbezüglich eine detaillierte Analyse – insbesondere bei der Erarbeitung neuer Fahrzeugkonzepte – durchzuführen [14,15].

Die jeweiligen Verkehrsmittel sollten nach [14] folgenden Grundkriterien genügen:

- Umweltfreundlichkeit
  - leise,
  - leicht,
  - niedriger Energieverbrauch und
  - niedriger Schadstoffausstoß,

Dipl.-Ing. Jürgen Schnaas (34). Studium des Maschinenbaus an der Ruhr-Universität Bochum und an der RWTH Aachen mit Schwerpunkt Schienenfahrzeugtechnik bis 1989. Anschließend mehrere Monate als Ingenieur bei der Siemens Duewag Corp., Sacramento (USA), tätig. Von 1990 bis 1994 Entwicklungsingenieur und Projektleiter „Schienenfahrzeuge" bei der VAW aluminium AG, Bonn. Nach dem Wechsel zur DUEWAG AG von 1994 bis 1998 Projektleiter für die Entwicklung neuartiger Bauweisen tragender Wagenkastenstrukturen. Seit Herbst 1998 Leiter der Abteilung „Planung, Logistik und Qualitätstechnik" des Leistungscenters „Fertigmontage COMBINO®" im Werk Düsseldorf der Siemens Duewag Schienenfahrzeuge GmbH.
Anschrift: Siemens Duewag Schienenfahrzeuge GmbH, Werk Düsseldorf, Königsberger Straße 100, D-40231 Düsseldorf.

- Fahrgastfreundlichkeit
  - sicher, z. B. im Fall einer Kollision,
  - ansprechendes Design,
  - gutes Fahrverhalten, z. B. beim Bremsen oder Beschleunigen und
  - komfortabel, z. B. durch gute Klimatisierung, und bequem, z.B. durch einen stufenlosen Einstieg;
- Beschaffungsfreundlichkeit
  - kostengünstig in der Beschaffung auch bei kleinen Stückzahlen,
  - zuverlässig durch die Verwendung erprobter Technik und
  - flexibles, für die Zukunft adaptierbares Fahrzeugkonzept,
- Instandhaltungsfreundlichkeit
  - verschleißarme Technik,
  - wartungsfreie/wartungsarme Technik,
  - niedrige Lebenszykluskosten (LCC) bzw. hohe Wirtschaftlichkeit,
  - hohe Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit und
  - hohe Vandalismusresistenz.

2. Anforderungen des Marktes

Seit einigen Jahren ist im Hinblick auf die Herstellung von neuen Nahverkehrsfahrzeugen für den ÖPNV der Trend festzustellen, daß neben neuen Fahrzeugkonzepten auch neue Bauweisen, vor allem für die tragende Wagenkastenstruktur, entwickelt werden. Die Gründe für diese technischen Weiterentwicklungen sind vielfältig [16,17], sie werden nachfolgend kurz erläutert.

Seit Beginn des Europäischen Binnenmarktes Anfang der 90er Jahre hat sich das Bestellverhalten der Verkehrsbetriebe deutlich verändert: Die Verkehrsbetriebe erteilen den Auftrag zum Bau von Fahrzeugen nicht mehr direkt an den „Haus- und Hoflieferanten", sondern schreiben das Projekt zur Lieferung von Fahrzeugen europaweit aus. Diese gesetzlich geregelte öffentliche Ausschreibung gewinnt derjenige Schienenfahrzeughersteller, der das insgesamt wirtschaftlichste Angebot unterbreitet hat. Hierdurch hat sich der Wettbewerb in der europäischen Waggonindustrie enorm verstärkt, wie zahlreiche Beispiele belegen. Damit einhergehend ist ein drastischer Preisverfall bei Schienenfahrzeugen zu verzeichnen – bis zu 30 % innerhalb eines halben Jahrzehnts.

Ein weiterer Aspekt besteht in der Tatsache, daß das Beschaffungsvolumen auf den heimischen Märkten, also in Deutschland und Westeuropa, schwankt. In den potentiellen Wachstumsmärkten in Mittel- und Osteuropa, wo etwa 60 % aller Straßenbahnen weltweit im Einsatz sind, fehlt zudem das Geld für die Neubeschaffung verhältnismäßig teurer Westprodukte. Man spricht teilweise von Überkapazitäten, besonders bei den westeuropäischen Schienenfahrzeugherstellern.

Der zunehmende Wettbewerb bei der Verteilung der öffentlichen Gelder vor allem in Deutschland – insbesondere nachdem die Sonderfördermaßnahmen des ÖPNV nach der Wiedervereinigung von West- und Ostdeutschland mit Ablauf des Jahres 1997 eingestellt wurden – bewirkte einen erheblichen Kostendruck bei den Verkehrsbetrieben. Dies führt mitunter dazu, daß Investitionen in den Ausbau des ÖPNV zurückgestellt oder sogar eingestellt werden müssen.

Die unterschiedlichen Kundenwünsche bei immer kurzfristiger disponierenden Märkten und einem gleichzeitig ungünstigen Verhältnis von zu liefernder Fahrzeugstückzahl und hoher Variantenvielfalt führte zwangsläufig zu einer Verteuerung der Produkte [18].

Seit einigen Jahren herrscht darüber hinaus ein enormer Wettbewerbsdruck zwischen den einzelnen Verkehrsträgern im ÖPNV. Hierbei müssen sich die Verkehrsträger hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit auch mit dem Stadtbus vergleichen lassen und werden von den Entscheidungsträgern einer strikten Kosten-/Nutzen-Analyse unterworfen [19].

Bei der Vielzahl der verschiedenen Verkehrsträger wird sehr schnell offenbar, daß in Zukunft nur diejenigen Verkehrssysteme weiterhin existieren werden, die den attraktivsten Betrieb bei gleichzeitig geringstmöglichen Kosten gewährleisten. Bei einem Vergleich der einzelnen Verkehrssysteme sind selbstverständlich alle Kosten zu berücksichtigen, die im Betrieb eines Verkehrssystems entstehen – also auch diejenigen für Fahr- und Instandhaltungspersonal, für Bau und Instandhaltung der Fahrwege sowie für die Sicherungs- und Leittechnik.

Aus der Betrachtung dieser Situation lassen sich die beiden wesentlichen Entwicklungsziele der Schienenfahrzeugindustrie zur Herstellung von Nahverkehrsfahrzeugen ableiten:

1. Realisierung eines möglichst kostengünstigen Fahrzeugs bzw. Fahrzeugkonzepts über alle Entstehungs- und Lebensphasen – also beginnend mit der Entwicklung und Konstruktion und weiter über Herstellung, Betrieb und Instandhaltung bis hin zum Recycling.
2. Erreichen eines niedrigen Kostenniveaus bei wettbewerbsfähiger Attraktivität des Fahrzeugs hinsichtlich Zuverlässigkeit und Komfort.

Weitere, nicht unwesentliche Ziele sind die Verkürzung der Lieferzeiten, eine Verringerung des Fahrzeuggewichtes sowie eine erhöhte Flexibilität im Hinblick auf Kundenwünsche.

Mit den heutigen konventionellen Bauweisen und Fertigungsabläufen können diese Ziele bei weitem nicht erreicht werden [20]. Die Aufwendungen für Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Vorrichtungsbau führen beispielsweise zu extrem hohen Fixkosten, so daß Aufträge mit geringen Fahrzeugstückzahlen nur schwer zu wettbewerbsfähigen Kosten abgewickelt werden können. Erst bei für ÖPNV-Schienenfahrzeuge hohen Stückzahlen von etwa 30 bis 40 Fahrzeugen je Auftrag erlangen die variablen Kosten wie Lohn und Material eine derartige Bedeutung, daß der Fixkostenanteil an den Gesamtkosten nicht mehr so stark ins Gewicht fällt.

3. Lösungsansätze

Zur Lösung dieses Problems bedarf es einer intelligenten Konstruktions- und Fertigungstechnik einerseits und eines Denkens in Systemen andererseits. Die Definition von Fahrzeugmodulen und Komponenten in einem Standardisierungskonzept mit eindeutig festgelegten Schnittstellen in der Konstruktion sowie die Definition von vorfertigbaren, prüfbaren Fertigungseinheiten und die Festlegung von Montagemodulen, die zu einem Fertigungsmodul komplettiert werden, sind der Schlüssel zum Erfolg [21, 22].

Der Einsatz solch intelligenter Konstruktions- und Fertigungstechniken sowie die Verwendung von Modulen und Systemen bieten Vorteile bei der Fahrzeugherstellung, die sich direkt in prägnantem Kundennutzen niederschlagen:

- kürzere Fahrzeuglieferzeiten,
- Verwendung erprobter und qualitativ hochwertiger Technik,
- kostengünstige Fahrzeuge hinsichtlich der Beschaffungskosten,
- Fahrzeuge mit geringen Lebenszykluskosten,
- hohe Flexibilität in bezug auf spezielle Kundenwünsche,
- leichtere und somit energiesparendere Fahrzeuge und
- niedrigere Ersatzteilkosten und kürzere -lieferzeiten sowie höhere Verfügbarkeit von Ersatzteilen.

Bild 1: Der erste Serien-COMBINO® im Fahrgasteinsatz in Potsdam

Die Realisierung dieser Kundenvorteile wird durch eine Vielzahl von Aspekten ermöglicht, die nachfolgend anhand von Beispielen aus dem Bereich des Wagenkastenrohbaues der 100%-Niederflur-Straßenbahn COMBINO® (Bild 1) erläutert werden sollen [23]. Die tragende Wagenkastenstruktur des Fahrzeuges wird in der sogenannten Hybridbauweise (hybrid: (lat.) von zweierlei Herkunft) hergestellt. Sie besteht aus unterschiedlichen Materialien, welche mittels unterschiedlicher Fügetechniken miteinander verbunden werden (Bild 2).

3.1 Konstruktion aus dem Baukasten

Der COMBINO® ist die erste moderne Niederflurstraßenbahn von Siemens Verkehrstechnik, Geschäftsgebiet Light Rail, Erlangen, die konsequent nach dem Baukastenprinzip entwickelt worden ist und nun produziert wird [24]. Die konstruierten Baugruppen und Komponenten wurden und werden unter realen Bedingungen – beispielsweise im Vorserienfahrzeug – ausgiebig getestet [25, 26], nach ihrer Bewährung für die Serienfertigung freigegeben und in den Baukasten übernommen. Sind die technischen Lösungen erst einmal freigegeben, bleiben sie solange unverändert, bis neue technische Erkenntnisse vorliegen, die eine Änderung unter Berücksichtigung aller Aspekte wie beispielsweise Kosten und Kundennutzen rechtfertigen. An der Entwicklung und Erweiterung des Baukastens wird bei Siemens Verkehrstechnik kontinuierlich gearbeitet (Bild 3).

Die klare Trennung einzelner Baugruppen sowie die Definition von eindeutigen Schnittstellen, wie sie beim COMBINO® konsequent durchgeführt wurden, sind hierfür eine unabdingbare Voraussetzung. Jede Aufweichung dieses Prinzips schwächt die Wirkung des COMBINO®-Baukastens ganz erheblich – alle sich bietenden, zuvor genannten Vorteile würden nur noch abgeschwächt zur Geltung kommen.

Es ist offensichtlich, daß zur Lösungsfindung unter Berücksichtigung aller relevanten Aspekte ggf. mehr Zeit aufgewendet werden muß als bislang üblich, doch wird dieser Mehraufwand im allgemeinen bereits durch die Umsetzung des Baukastens in der Fertigung wirtschaftlich. Bei der Festlegung des Wagenkastenrohbaues sowie der Definition der beim COMBINO® verwendeten Aluminium-Strangpreßprofile wurde auf eine hohe Funktionsintegration bei gleichzeitiger Vermeidung von Anschweißteilen geachtet. Es entstand ein durchgängig strukturierter Wagenkastenaufbau, kombiniert mit einer leicht zu realisierenden Längen- und Breitenvariabilität [27, 28], der für alle derzeit in Auftrag befindlichen COMBINO®-Fahrzeuge übernommen wird.

Ein Beispiel für ein solch komplexes Bauteil ist der Obergurt des COMBINO®. Er besteht aus zwei automatisch verschweißten Profilen, in denen unterschiedlichste Funktionen integriert sind wie z. B. Regenrinne, Befestigungsmöglichkeiten für Türantriebe und Kabelkanäle sowie Abdicht- und Klebeflächen für das Dach, das aus einem Aluminium-Hartschaum-Sandwich hergestellt ist (Bild 4).

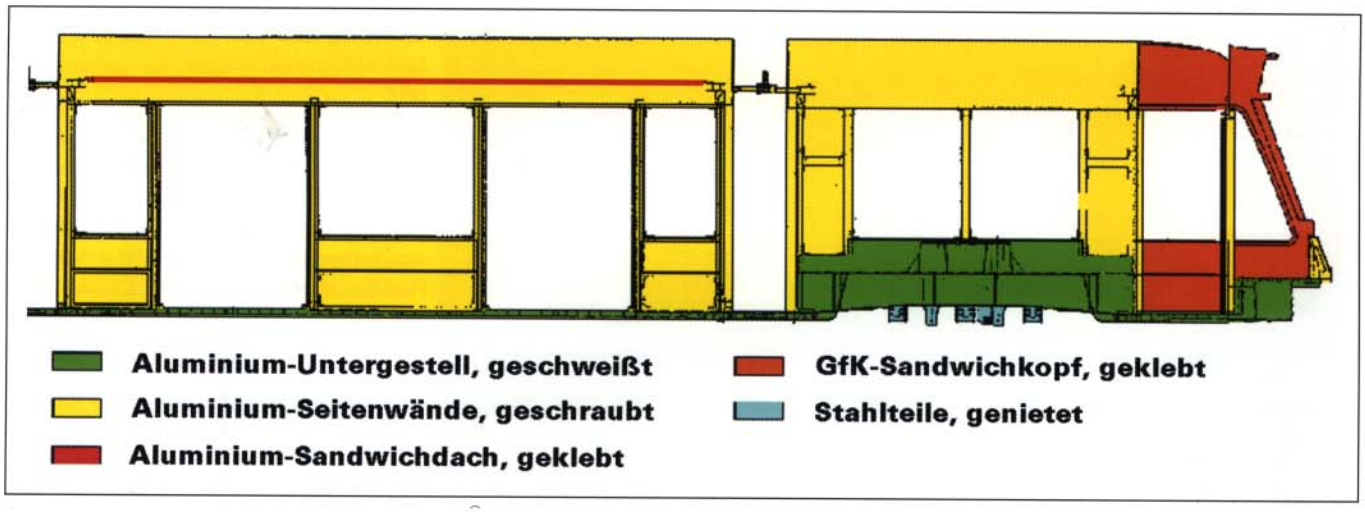


Bild 2: Prinzipieller Aufbau der COMBINO®-Wagenkastenstruktur am Beispiel des Vorserienfahrzeuges

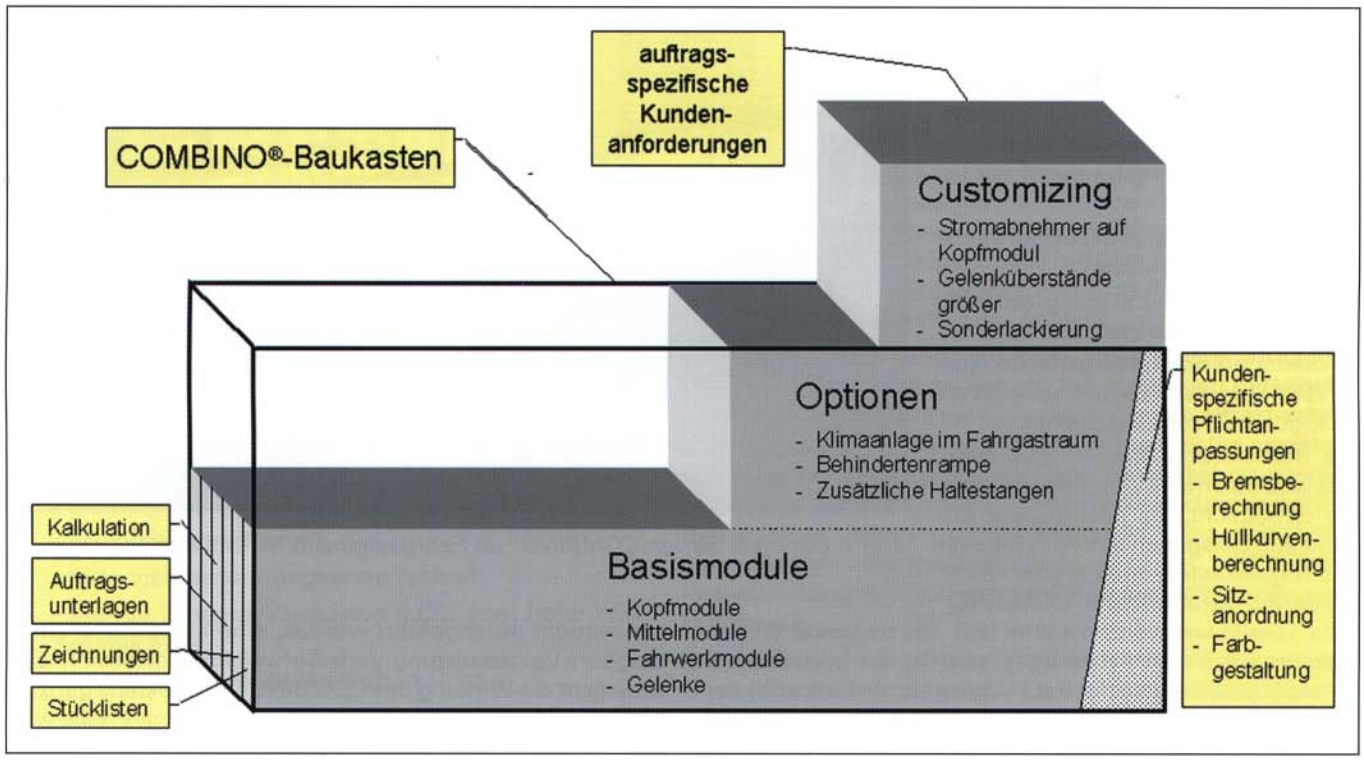


Bild 3: Schematischer Aufbau des COMBINO®-Baukastens

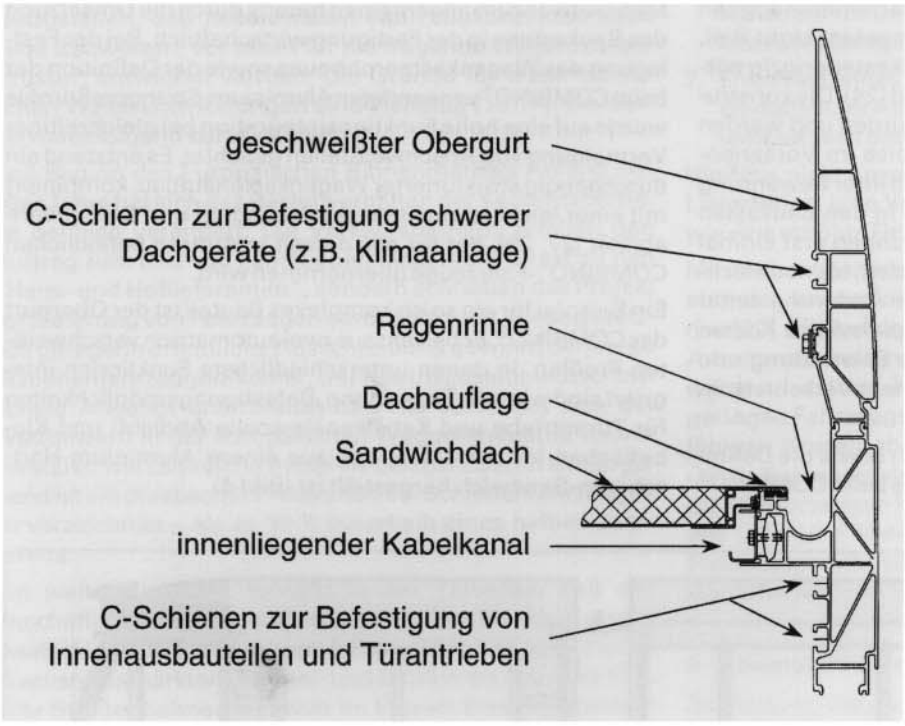


Bild 4: Funktionsintegration durch komplexe Aluminium-Strangpreßprofile am Beispiel des Obergurtprofiles des COMBINO®

3.2 Konfigurationsmanagement und 3D-CAD-Systeme

Für bereits vorliegende technische Lösungen muß kein Entwicklungsaufwand mehr getrieben werden, was die Durchlaufzeit in der Konstruktion reduziert. Ein zusätzliches intelligentes Konfigurationsmanagement, welches sich derzeit in der Entwicklungsphase befindet, bietet bei erfolgreicher Implementierung zukünftig die Möglichkeit, quasi per Knopfdruck die bereits existierenden Zeichnungen, Stücklisten und Arbeitspläne für den jeweiligen Auftrag zusammenzustellen, so daß weitere Arbeitsunterlagen nur für noch nicht im Baukasten enthaltene Konstruktionen erstellt werden müssen (Bild 5).

Mit Hilfe eines parametrischen 3D-CAD-Systems können die neu entwickelten Baugruppen direkt einer Verträglichkeits- und Kollisionsprüfung mit den bereits existierenden Baukastenkonstruktionen unterzogen werden, was Konstruktionsfehler reduziert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dem Kunden im Sinn von „virtual reality" eine dreidimensionale Visualisierung der von ihm gewünschten Sonderausstattungen zu geben [29, 30].

3.3 Konstruktionsprinzipien

Die frühzeitige Festlegung von konstruktiven Merkmalen bei der Niederflur-Straßenbahnfamilie COMBINO® erfolgte vor dem Hintergrund „Kundennutzen durch Design to cost" [21] unter besonderer Berücksichtigung der Instandhaltungsfreundlichkeit. So ist beispielsweise auf den Einsatz von durchgehenden Langträgern in den Untergestellen der Fahrwerkmodule von Anfang an bewußt verzichtet worden. Statt dessen wird unterhalb der Fensterbrüstung ein kräftiges Brüstungsgurtprofil eingeschweißt. Durch diese Maßnahme kann der komplette An-

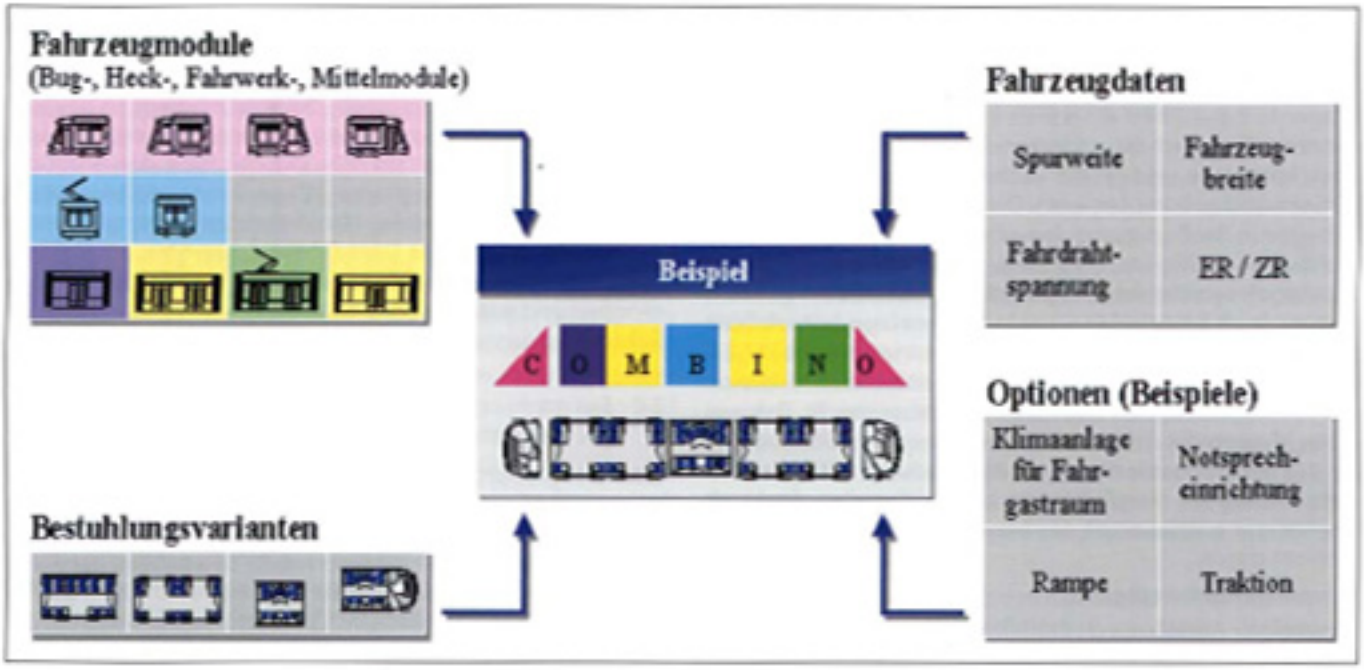


Bild 5: Konfigurationsmanagement für den COMBINO®-Baukasten

triebsstrang mit Hilfe eines leichten Flurförderzeuges innerhalb von etwa zwei Stunden ausgetauscht werden, ohne daß Fahrwerk und Wagenkasten voneinander getrennt werden müssen (Bild 6).

Darüber hinaus ist in den vier Eckbereichen der Bodengruppe ausreichend Platz für diverse Aggregate vorgesehen, wie z. B. für das Hydrogerät der Bremsanlage oder den Flüssigkeitsbehälter der optional angebotenen Spurkranzschmieranlage. Diese Bereiche liegen geschützt vor äußeren Einwirkungen und sind für Wartungszwecke ideal von außen zugänglich.

3.4 Teile- und Baugruppenfertigung

Durch die konsequente Umsetzung der Baukastenphilosophie einerseits und deren Kundenakzeptanz aufgrund ihrer eindeutigen Vorteile andererseits ist es gelungen, sowohl den Wagenkastenrohbau als auch viele Innen- und Außenanbauteile für alle derzeit bei Siemens Verkehrstechnik in Auftrag befindlichen COMBINO®-Fahrzeuge von der Strukturgeometrie her gleichzuhalten. Der wesentliche Unterschied in den einzelnen Aufträgen besteht lediglich in der Anordnung der Bauteile bzw. deren Farbgebung, was sich vorteilhaft auf die Lagerhaltung sowohl beim Hersteller als auch bei den Verkehrsbetrieben bzw. im zentralen COMBINO®-Ersatzteillager von Siemens auswirkt.

Die derzeit in der Produktion befindlichen Module weisen alle die gleichen Grundabmessungen wie Länge, Fenster- und Türteiler etc. auf [31] und werden rohbauseitig aus den gleichen Aluminium-Strangpreßprofilen hergestellt. Dies gilt nicht nur für den Profilquerschnitt, sondern auch für die Länge der Profile sowie deren spanende Bearbeitung, so daß mit einer auftragsunabhängigen Teileproduktion in der Vorfertigung begonnen werden konnte. Ein möglichst später Übergang von einer kundenneutralen zu einer kundenspezifischen Fertigung ist somit das Ziel für die Produktion von COMBINO®-Fahrzeugen. Je später der kundenspezifische Anteil montiert wird, desto kurzfristiger kann die Produktion auf Marktveränderungen reagieren und desto schneller können Fahrzeuge ausgeliefert werden.

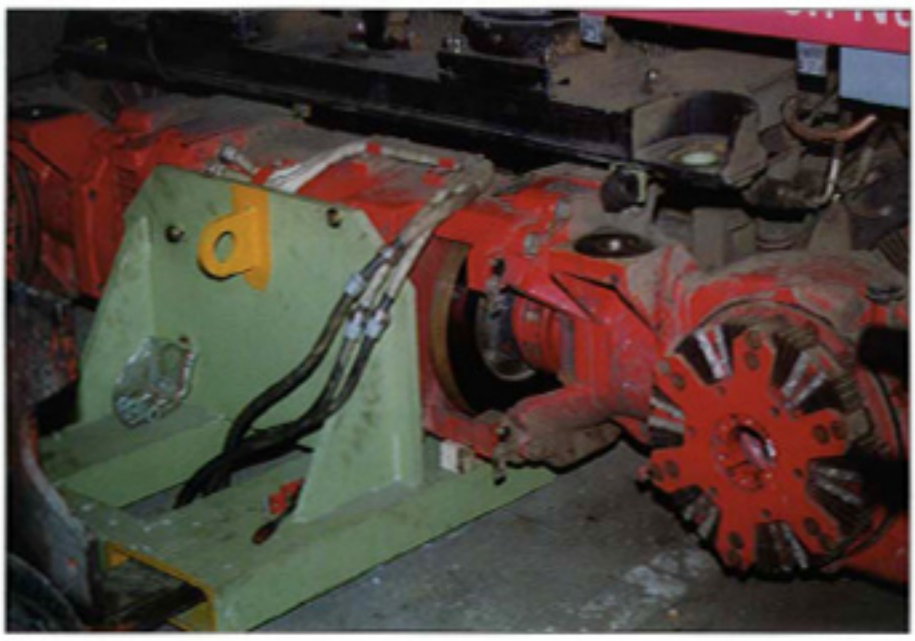


Bild 6: Demontage eines Antriebsstrangs ohne Trennung des Fahrwerkes vom Wagenkasten

3.5 Alternative Fertigungs- und Fügetechniken

Die Verwendung der Aluminium-Schraubtechnik für den Wagenkastenaufbau einerseits sowie die Nutzung der bekannten Klebetechnik andererseits gestatten es, zukünftig auch komplexe und große Vorbaugruppen separat vorzufertigen und zu komplettieren. Dies ermöglicht ein paralleles Arbeiten in der Fertigung, da sich die Werker bei ihrer Arbeit nicht gegenseitig im Weg sind. Darüber hinaus wird die Montagefreundlichkeit aufgrund optimierter Einbaubedingungen (zum Beispiel Montage in Wannenlage, helle Arbeitsplätze, kurze Wege zum Holen von Material) erhöht [17,27], welche sich wiederum in niedrigeren Fehlerraten, d. h. einer gleichbleibend hohen Qualität, bemerkbar macht. Des weiteren können die Arbeitsplätze humaner gestaltet werden, da die Aluminiumfertigung in Verbindung mit kalten Fügetechniken im Vergleich zur konventionellen Stahlrohbaufertigung wesentlich sauberer und leiser ist. Dies wird erreicht durch:

- weniger Schweißgase,
- weniger Abrieb durch Schleifen,
- nur vereinzeltes mechanisches Richten mit dem Hammer und
- Verzicht auf zweikomponentige Spachtelmassen zur Glättung der sichtbaren Außenhaut (keine Dämpfe).

Ein gutes Beispiel hierfür ist das Dach der Mittelmodule. Es besteht aus einer Sandwichplatte, in der alle Befestigungspunkte sowie sämtliche Kabeldurchbrüche integriert sind. Vor dem Fixieren mittels eines Polyurethan-Klebers wird die Dachplatte mit allen Auf- und Anbauten wie Gelenkklemmenkästen, Kabelrohren, Dachheizgerät, Luftkanälen, Lampenband, Außen- und Innenlautsprechern, etc. ausgerüstet, komplett verkabelt und geprüft (Bild 7). Hierdurch werden die Durchlaufzeiten im Fertigungsprozeß (Endmontage und elektrische Prüfung) erheblich verkürzt, was sich auf die Lieferzeit des Fahrzeuges positiv auswirkt.

Standardisierte kalte Fügetechniken einerseits und vereinfachte Zugänglichkeiten andererseits ermöglichen eine schnelle Montage des Wagenkastenaufbaues und der Innen- und Außenanbauteile. Natürlich können im Instandsetzungsfall durch den Verkehrsbetrieb – sei es nach einem Unfall oder aufgrund eines Defektes – die entsprechenden Bauteile auch ohne speziell geschultes Personal schnell aus- und wieder eingebaut werden [32]. Der mit Hilfe des Alugrip®-Schraubsystems montierte Wagenkastenaufbau eines COMBINO®-Mittelmoduls – also die beiden Seitenwände und der darauf aufgesetzte Dachrahmen – werden als Rohbau innerhalb weniger Stunden in einfachen Vorrichtungen vormontiert und anschließend, ebenfalls unter Verwendung des Schraubsystems, auf die Bodengruppe aufgeschraubt.

3.6 Funktionsintegration und Verringerung der Teilevielfalt

Eine Integration von zusätzlichen Funktionen in einzelne Komponenten ermöglicht eine deutliche Verringerung der Teileanzahl und somit auch einen verminderten Steuerungs- und Lageraufwand für diese Bauteile sowohl bei der Fahrzeugherstellung als auch bei der Wartung und/oder Instandsetzung des Fahrzeuges beim Verkehrsbetrieb. So bildet der Antriebscontainer des COMBINO® auf jedem Fahrwerkmodul gleichzeitig auch das Fahrzeugdach – die Herstellung einer separaten Dachplatte, das Durchführen von Kabeln durch diese Dachplatte sowie zusätzlicher Montageaufwand konnten hierdurch eingespart werden, was sich direkt in geringeren Fertigungskosten, geringeren Durchlaufzeiten und vermindertem Fahrzeuggewicht bemerkbar macht.

Darüber hinaus wird die Teileanzahl durch die Verwendung der Aluminium-Hybridbauweise für die tragende Wagenkastenstruktur drastisch reduziert. So werden für die Herstellung einer Mittelmodul-Seitenwand inklusive Montagematerial wie beispielsweise Nieten und Alugrip®-Schraubsets nur gut 70 Einzelteile benötigt, während für eine vergleichbare Seitenwand in konventioneller Stahlbauweise (geschweißte Blech-Gerippe-Bauweise) etwa 140 Einzelteile erforderlich sind. Für vergleichbare Untergestelle sieht diese Bilanz noch erheblich besser aus: Lediglich etwa 20 Teile werden beim aus miteinander verschweißten Aluminiumprofilen bestehenden Untergestell des COMBINO®-Mittelmoduls verwendet. Für ein konventionelles, geschweißtes Stahl-Untergestell aus Walz- und Kantprofilen sowie Blechen sind mehr als 380 Teile erforderlich.

Bild 7: Aufkleben des komplett vormontierten und geprüften Sandwichdaches eines COMBINO®-Mittelmodules

3.7 Höhere Reproduzierbarkeit

Die weitgehende Verwendung kalter Fügetechniken wie Schrauben, Nieten und Kleben für den sichtbaren Wagenkastenaufbau ermöglicht eine hohe Reproduzierbarkeit sowohl in der Rohbaufertigung als auch in der Endmontage. Die traditionellen und kostspieligen Anpaßarbeiten können – von wenigen Ausnahmen abgesehen – nach Einführung und Stabilisierung entsprechender Herstellungsprozesse ganz entfallen. Die zulässigen Toleranzfelder des Wagenkastens können im Vergleich zu konventionellen Stahl- oder Aluminium-Schweißkonstruktionen deutlich enger gesteckt werden, was

gleichzeitig die Qualität des Produkts erhöht (z. B. gleichmäßigere Schattenfugen).

Darüber hinaus gestatten die kalten Fügetechniken in Kombination mit den richtigen Halbzeugen die Herstellung eines richt- und spachtelfreien Wagenkastenaufbaus, weil zum einen Schrumpfungen aufgrund der Einbringung von Schweißwärme und zum anderen unregelmäßige, deutlich sichtbare Unebenheiten im Material durch größere Dicken bei gleichzeitig leichteren Werkstoffen vermieden werden (Bild 8). Dies wirkt sich sowohl im Hinblick auf die Durchlaufzeit und das Fahrzeuggewicht als auch in der Qualität des Lackaufbaus positiv aus. So werden beispielsweise bei konventionell hergestellten Stahlfahrzeugen bis zu 500 kg Spachtelmasse auf ein etwa 30 m langes Fahrzeug aufgetragen und nur zu einem geringen Teil wieder abgeschliffen.

Bedenkt man, daß das thermische Spannen konventionell beblechter Seitenwände sowie das mechanische Richten mit dem Hammer und das sich anschließende Glätten der Oberflächen mittels Spachteln je nach Fahrzeugtyp bis zu 25 % der Fertigungszeit eines lackierten Wagenkastenrohbaues in Anspruch nehmen, so wird klar, daß ein weiterer Vorteil in der Kostenersparnis beim Fahrzeughersteller liegt. Es können bei der Aluminium-Hybridbauweise somit Arbeitsschritte entfallen, die sich nicht auf die Funktionsfähigkeit und Sicherheit des Fahrzeuges auswirken, und die in der heutigen Zeit von kaum einem Verkehrsbetrieb extra bezahlt werden.

Der Verzicht auf Spachtelmaterial bei der Fahrzeugherstellung wirkt sich darüber hinaus auch im Hinblick auf die Reparatur von Wagenkästen beim Verkehrsbetrieb positiv aus. Die Reparatur wird einfacher, und die Mitarbeiter sind weniger Schleifstäuben ausgesetzt.

Bild 8: Rohbaudetail des COMBINO®-Fahrwerkmodules

3.8 Vorrichtungskomplexität und -flexibilität

Die Herstellung der tragenden Wagenkastenstruktur ist traditionell auch mit großen, mitunter sogar komplexen und vor allem teuren Vorrichtungen verbunden. Dies schlägt sich sowohl in den Produktionszeiten als auch in den Fixkosten je Auftrag nieder. Aufgrund des Baukastens kann die COMBINO®-Fertigung – und hier insbesondere die Fertigung der tragenden Wagenkastenstruktur – mit längen- und breitenvariablen Vorrichtungen auftragsunabhängig vorgenommen werden. Darüber hinaus sind die Vorrichtungen für den geschraubten Wagenkastenaufbau sehr einfach und universell ausgeführt. Beide Aspekte führen zwangsläufig zu einer Reduzierung der Fixkosten je Auftrag im Vergleich zu den herkömmlichen Fahrzeugen in geschweißter Stahl- oder Aluminiumbauweise.

Ist bereits die Herstellung des Rohbaues mit einfachen Mitteln und Vorrichtungen realisierbar, so gilt dies – teilweise in deutlich größerem Maß – auch für die Reparatur von Fahrzeugen nach Unfällen. Hierbei sind, von ganz schweren Unfällen abgesehen, kaum bzw. keine Vorrichtungen notwendig, da die meisten Bauteile wie z. B. Säulen oder Seitenwandpaneele durch das Lösen der Schraubverbindungen einfach ausgebaut und anschließend die neuen, gegebenenfalls bereits fertig lackierten Profile mittels kalter Fügetechniken wieder eingebaut werden können [27, 32].

3.9 Gewichtsverringerung

Die COMBINO®-Fahrzeugfamilie zeichnet sich durch eine deutliche Gewichtsverringerung im Vergleich zu bisherigen Serienfahrzeugen aus. So wiegt der in Aluminium-Hybridbauweise hergestellte Wagenkastenrohbau eines fünfteiligen, etwa 30 m langen COMBINO® für den Einrichtungsbetrieb etwa 30 % weniger als der konventionelle Stahlrohbau eines vergleichbaren Fahrzeugtyps. Zusätzliches Gewicht wird eingespart durch die intelligente Integration von Baugruppen wie beispielsweise der Innendecken in das Dachsandwich des Mittelmoduls.

Gleichzeitig sinken mit jedem Kilogramm eingespartem Material auch die Belastung des Oberbaues (Bodenschwingungen, Erschütterungen etc.), die Umweltbelastungen sowie der spezifische Energieverbrauch des Fahrzeuges [33]. So liegt der über einen Zeitraum von etwa vier Monaten gemessene spezifische Energieverbrauch des Antriebsstranges der Potsdamer COMBINO®-Fahrzeuge bei einem angenommenen mittleren Besetztgrad von 50 % (dies entspricht 125 Fahrgästen) und einer gemessenen Rückspeisequote von ca. 12,6 % bei nur ca. 13,31 Wh/(Pers.-km) [26]. Vergleichbare Fahrzeuge in konventioneller Bauweise wiegen gut 3 000 kg mehr, was eine Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs um ca. 9 % auf 14,6 Wh/(Pers.-km) bedeuten würde. Dies entspricht, vorsichtig gerechnet, bei einer angenommenen jährlichen Fahrleistung von 70 000 km, einer Einsatzzeit von 30 Jahren und einem konstanten Strompreis von 0,25 DM/kWh Mehrkosten für den Verkehrsbetrieb von etwa 75 500 DM je Fahrzeug.

3.10 Recyclingfähigkeit

Die tragende Wagenkastenstruktur des COMBINO® ist aufgrund der verwendeten kalten Fügetechniken nach dem Erreichen der Fahrzeuglebensdauer leicht demontierbar.

Die Aluminiumwerkstoffe können ohne Probleme wieder dem Wertstoff-Kreislauf zugeführt und bei sachgemäßer Sortierung zu artgleichen Produkten wiederverwendet werden – d. h., daß beispielsweise aus einer Türsäule immer wieder eine Türsäule hergestellt werden kann, die die gleichen mechanischen Eigenschaften aufweist wie das Ursprungsprodukt. Dies erklärt auch den hohen Marktpreis von zur Zeit etwa 1,50 DM für ein Kilogramm Aluminiumschrott (Stand April 1999).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Aluminium-Hybridbauweise erlaubt – vor allem aufgrund der verstärkt zur Anwendung kommenden Fügeverfahren Schrauben, Nieten und Kleben – eine rationellere Gestaltung der gesamten Fertigungsorganisation [34]; sie ist eines der derzeit fortschrittlichsten Fertigungskonzepte. Nur ein abgestimmtes Konstruktions- und Fertigungssystem, die weitgehende Integration der Elektrik sowie die strikte Einhaltung der Baukastenphilosophie ermöglichen die erfolgreiche Umsetzung der oben genannten Vorteile.

Traditionelle Fertigungsformen werden in Zukunft ihre Gültigkeit verlieren. Hauptbaugruppen wie Untergestell, Seitenwände, Führerstände und Dächer werden möglichst getrennt voneinander in optimaler Fertigungsposition ausgestattet und erst kurz vor der Fertigstellung des Fahrzeuges an wenigen Fügestellen zusammengebaut. Aufgrund des Baukastens und der verschiedenen COMBINO®-Module ist nach einer Stabilisierung der Prozesse der Weg frei für eine Serienfertigung mit getakteten Arbeitsabläufen und exakt definierten Arbeitsinhalten.

In den nächsten Jahren werden sich die „Werkstoffe der Zukunft" jedoch weiterentwickeln. In Verbindung mit innovativen Fügetechniken könnten dann tragende Strukturen für Straßen- und Stadtbahnen möglich werden, die sich heute erst im Versuchsstadium oder „in den Köpfen der Entwickler und Konstrukteure" befinden. Siemens Verkehrstechnik bietet seinen Kunden höchsten Nutzwert und beteiligt sich deshalb aktiv an der Entwicklung neuer, zukunftsträchtiger Fahrzeuge, wie z. B. dem neuen Kunststoff-Mittelwagen für Nahverkehrsfahrzeuge [35], dessen Entwicklung und Bau mit Mitteln des Landes Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union gefördert worden ist. – A 531 –

(Bildnachweis: 1, Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH; 2 bis 8, Siemens Verkehrstechnik)

Literatur

[1] Teubner, W. u. F. A. Wayte: Zukunftsperspektiven für Spurbusse und Omnibusbahnen. ETR 36 (1987) 3, S. 179 – 186.

[2] N.N.: Spurbus Essen. Hrsg.: Essener Verkehrs AG, Essen.

[3] Jahn, R.: Guided Light Transit (GLT): Die Straßenbahn auf Gummireifen. Nahverkehrspraxis 44 (1996) 9, S. 24 – 27.

[4] Hondius, H.: TVR/GLT als Straßenfahrzeug homologiert - Teststrecke in Paris im Bau. Stadtverkehr 42 (1997) 2, S. 12 – 15.

[5] Müller, C.: Straßenbahn auf Gummirädern oder spurgeführter Bus? - Das GLT-System für Caen. Internationales Verkehrswesen 49 (1997) 5, S. 260 – 262.

[6] Böhm, E. u. G. Müller: Die neue Fahrzeuggeneration der H-Bahn Dortmund. ETR 44 (1995) 1/2, S. 81 – 87.

[7] Dreimann, K.: Aspekte neuer Verkehrssysteme – M-Bahn als zukunftssichere Dimension im Nahverkehr. ETR 37 (1988) 5/6, S. 323 – 327.

[8] N.N.: Automated Transit Systems. Firmenschrift AEG Transportation Systems, Inc.

[9] Müller, C.: CABLE Liner – die Standseilbahn für den Nahverkehr. Internationales Verkehrswesen 49 (1997) 5, S. 267 – 268.

[10] Hellinger, R., Markgraf, W. u. J.-D. Ziegner: Einsatzmöglichkeiten für neuartige Bahnsysteme im Nahverkehr. Der Nahverkehr 13 (1995) 6, S. 49 – 54.

[11] Ludwig, D. u. G. Drechsler: Mit der Stadtbahn auf Bundesbahnstrecken. ETR 40 (1991) 8, S. 489 – 496.

[12] Riechers, D.: Neue Fahrzeuge für die AVG: eine neue Dimension im Karlsruher ÖPNV/SPNV. Verkehr und Technik 50 (1997) 10, S. 427 – 436.

[13] Scholtis, G.: Getting the right system right from the start. CRI (1997) 11/12, S. 29 – 32.

[14] Müller-Hellmann, A.: Deutsche Straßen- und Stadtbahnen bewähren sich auch weltweit. Der Nahverkehr 11 (1993) 1/2, S. 8 – 18.

[15] Martinsen, W.: Kostenwirksame Lösungen für die Schiene. Public Transport International 46 (1997) 3, S. 19 – 22.

[16] Ahlbrecht, H.: Chancen der Low-Cost-Straßenbahn. Der Nahverkehr 16 (1998) 7/8, S. 24 – 27.

[17] Altenburg, K. u. O. Sauer: Stahl im Schienenfahrzeugbau – Potentiale und Chancen. In: Tätigkeitsbericht 1994 bis 1996, Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.

[18] Hondius, H.: Wie kann man die Bezahlbarkeit der Strassen- und Stadtbahnen verbessern? UITP - Orientation des Métros Légers, 1994.

[19] Giesen, U.: Standardisierung als Möglichkeit einer kostengünstigen Stadtbahn. Der Nahverkehr 12 (1994) 11, S. 44 – 46.

[20] Altenburg, K.: Quo vadis Waggonbau? ZEV+DET Glas. Ann. 116 (1992) 10, S. 416 – 420.

[21] Feldhusen, J.: Combino - Kundennutzen durch Design-To-Cost. ZEV+DET Glas. Ann. 121 (1997) 2/3, S. 181 – 186.

[22] Krummheuer, E.: Statt Maßfertigung Produkte von der Stange. Handelsblatt Nr. 196, 12.10.1998.

[23] Schnaas, J.: Innovative Stadtbahnfahrzeuge in Hybridbauweise. Vortrag anläßlich der Tagung „Verkehrssysteme der Zukunft", Berlin, 17.11.1998.

[24] Kortemeyer, A. u. W. Osterhus: Mit Combino in die Zukunft. Nahverkehrspraxis 44 (1996) 6, S. 14 – 19.

[25] Blumenthal, M., Hauck, T., Kortemeyer, A. u. M. Walcher: COMBINO®-Niederflurbahnen – Erprobung, Erfahrungen, Erkenntnisse. Der Nahverkehr 16 (1998) 9, S. 3 – 10.

[26] Blumenthal, M., Taenzer, B. u. M. Walcher: COMBINO® Potsdam – Erfahrungen mit den ersten Serienfahrzeugen. Vortrag anläßlich der 2. Internationalen Konferenz „Elektrische Bahnsysteme", Berlin, 23./24.03.1999.

[27] Schnaas, J. u. U. Meier: Innovatives Rohbaukonzept für ein modulares Straßenbahnfahrzeug. Der Nahverkehr 14 (1996) 6, S. 48 – 53.

[28] Zehnder, J.: Neuartige Struktur in Aluminium-Hybridbauweise für Nahverkehrsfahrzeuge. ZEV+DET Glas. Ann. 121 (1997) 2/3, S. 202 – 206.

[29] Feldhusen, J. u. G. Lashin: Gesichtspunkte zum Einsatz von 3D-CAD am Beispiel der Schienenfahrzeugindustrie. VDI Bericht Nr. 1357 (1997), S. 375 – 396.

[30] Feldhusen, J. u. G. Lashin: Top-Down-Konstruktion auf der Basis von 3D-CAD – Ansätze und Voraussetzungen für den Einsatz im Maschinenbau. VDI Bericht Nr. 1435 (1998), S. 277 – 301.

[31] Hondius, H.: Die Entwicklung der Niederflur- und Mittelflur-Straßen- und Stadtbahnwagen in der westlichen Welt. Stadtverkehr 43 (1998) 10, S. 6 – 27.

[32] Schnaas, J.: Reparaturfreundliche Fahrzeugkonstruktion am Beispiel des Combino. Der Nahverkehr 15 (1997) 4, S. 34 – 41.

[33] Ganzer, U.: Ökologische Aspekte bei der Entwicklung von Schienenfahrzeugen. Eisenbahningenieur 45 (1994) 4, S. 268 – 271.

[34] Zehnder, J.: Material- und Fertigungstechnologie – Schlüssel zu wirtschaftlichen Fahrzeugen des ÖPNV. Public Transport International 46 (1997) 3, S. 60 – 66.

[35] Feldhusen, J.: Innovativ und flexibel zum Nutzen für den Kunden - Der Kunststoffmittelwagen für die Dortmunder Stadtwerke. Vortrag anläßlich der Präsentation des Kunststoffmittelwagens, Dortmund, 28.05.1998.