

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Björn Stubbe, Dipl.-Ing. Wolfgang Sievers,
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Marc Herkenrath; Düsseldorf

Hybridbus: Modeerscheinung oder Wegbereiter in die Elektromobilität?

Unter welchen Voraussetzungen sind Hybridfahrzeuge sinnvoll?



Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Björn Stubbe, Dipl.-Ing. Wolfgang Sievers,
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Marc Herkenrath; Düsseldorf

Hybridbus: Modeerscheinung oder Wegbereiter in die Elektromobilität?

Unter welchen Voraussetzungen sind Hybridfahrzeuge sinnvoll?

Im Vorfeld der Beschaffung neuer Linienbusse stellt sich für Verkehrsunternehmen zunehmend die Frage, ob der Einstieg in die Hybrid-Technologie auch ohne spezielle Förderprogramme sinnvoll ist. Ein von Rail&Bus Consultants entwickeltes, zweistufiges Verfahren trägt dazu bei, hierfür eine für jeden Verkehrsbetrieb maßgeschneiderte Antwort zu finden. Als erster Schritt erfolgt eine Marktanalyse unter Beachtung der jeweiligen speziellen Anforderungen. Hierbei wirken folgende Aspekte ein:

- ☐ Entwicklung bei den fossilen Kraftstoffen, insbesondere der limitierten Verfügbarkeit und den daraus erfolgenden steigenden Rohstoffpreisen.
- ☐ Verfügbare Technologien, mit denen die Fahrzeugflotten von der Primärenergie Diesellochstoff unabhängig werden oder mit denen sich zumindest kurzfristig eine Verbrauchsreduktion erreichen lässt. Wichtige Aspekte sind hierbei Einsatzreife, Entwicklungsstadium, Zukunftsperspektive und Zukunftssicherheit.
- ☐ Eignung der Technologie für den jeweiligen Einsatzbereich.

In einem zweiten Schritt geht es um die betriebswirtschaftliche Analyse:

- notwendige Investitionen,
- Veränderung der Betriebskosten, insbesondere der Kraftstoffkosten,
- Veränderung der Emissionstechnik.

An dem Beschaffungsprozess sind neben dem Verkehrsunternehmen Städte und Kommunen mit ihren lokalen umweltpolitischen Forderungen beteiligt. Zumeist liegt bei den Kommunen auch die Aufgabenträgerschaft als Besteller des lokalen ÖPNV, dessen Leistungsumfang im jeweiligen Nahverkehrsplan festgeschrieben ist.

Darüber hinaus sind der Bund, die Länder und die Europäische Union treibende Kraft bei der Verbreitung der Elektromobilität im ÖPNV. Diese Institutionen initiieren diverse Forschungsprojekte, mit denen die flächendeckende Verbreitung der alternativ angetriebenen Linienbusse mit Sonderförderungen unterstützt wird. Die Nutzfahrzeug- und Zulieferindustrie bietet inzwischen verschiedene alternativ angetriebene Linienbusse an, die

durch die Förderung seitens Bund, Land und EU bei den Verkehrsunternehmen in Felderprobung gehen sollen. Auf diesem Weg bekommt die Nutzfahrzeugindustrie die notwendige Information für die zielgerichtete und marktorientierte weitere Entwicklung der Hybridbusse.

Gegenwärtige und zukünftige Linienbusantriebe

Dieselbus EEV/Euro V und VI

Der Antriebsstrang des Dieselbusses nach EEV-Standard beziehungsweise Euro V (zukünftig Euro VI) besteht klassisch aus einem Dieselmotor und einem automatisierten Getriebe. Diese Fahrzeuge sind durch verschiedene Maßnahmen gemäß der oben genannten Standards und Normen in Bezug auf Partikel und Stickoxide emissionsreduziert. Für Euro V wird dies erreicht mittels:

- AGR: Abgasrückführung + Partikelfilter (innermotorische Maßnahme),
- SCRT: Selektive katalytische Reduktion + Partikelfilter (außermotorische Maßnahme).

Nach heutigem Entwicklungsstand wird der Weg zu Euro-VI-fähigen Motoren über eine Kombination aus den oben genannten Systemen führen.

Möchte der Flottenbetreiber über diese Emissionsreduzierung hinaus auch den Ausstoß des für den Treibhauseffekt verantwortlichen Klimagases CO₂ reduzieren, bieten sich zwei mögliche Strategien an:

- ☐ Der Dieselhybrid, um den Dieselverbrauch und die damit zusammenhängenden CO₂-Emissionen zu reduzieren.
- ☐ CO₂-ärmere Primärenergieträger fossilen oder – bevorzugter Weise – regenerativen Ursprungs, zum Beispiel Erdgas, diverse Biokraftstoffe, Wasserstoff und elektrische Energie.

Im Rahmen dieses Beitrages wird nur die erste Strategie behandelt, da sich Fahrzeuge gemäß der zweiten Strategie derzeit überwiegend noch im Experimentierstadium befinden.



Stubbe



Sievers



Herkenrath

DIE AUTOREN

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Björn Stubbe (29) ist seit 2009 als Ingenieur für Systemtechnik, Fahrzeuge und Instandhaltung bei Rail&Bus Consultants GmbH/LRTC GmbH in Düsseldorf tätig. Er hat nach seiner kaufmännischen Berufsausbildung von 2003 bis 2008 an der FH Gelsenkirchen, Abteilung Recklinghausen Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Verkehr-Logistik studiert. Im Jahr 2008 beendete er das Studium mit der Diplomarbeit zum Thema: Hybridantriebe im Linienbusbereich – technische, organisatorische und personelle Auswirkungen auf die Werkstätten und Betriebshöfe der DB Stadtverkehr NRW.

Dipl.-Ing. Wolfgang Sievers (50) ist seit 2008 Projektleiter im Bereich Verkehrs- und Betriebsplanung bei Rail&Bus Consultants GmbH/LRTC GmbH in Düsseldorf. Zuvor war er bereits 15 Jahre im Verkehrsconsulting-Bereich im In- und Ausland tätig. Er hat von 1985 bis 1990 an der Universität Dortmund im Fachbereich Raumplanung Stadt- und Verkehrsplanung studiert und war anschließend Projekttingenieur bei der Rheinischen Bahngesellschaft AG.

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Marc Herkenrath (39) ist seit 2008 Prokurist und Bereichsleiter Systemplanung bei Rail&Bus Consultants GmbH/LRTC GmbH in Düsseldorf. Zuvor war er von 1999 bis 2007 Projektleiter und Projekttingenieur im Verkehrsconsulting-Bereich. Herkenrath ist spezialisiert auf Konzeptionierung und Beschaffung von Fahrzeugen sowie konzeptionelle Betriebshofplanung. Darüber hinaus ist er zuständig für Planung und Implementierung von Gesamtsystemen.

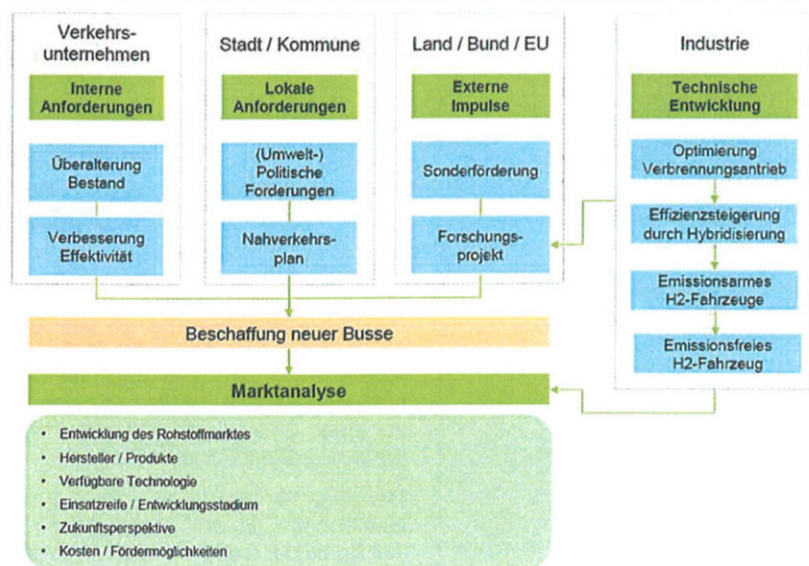


Abb. 1: Auslösende Faktoren für den Beschaffungsprozess

Elektrobus

Die Zielvorstellung der Elektromobilität stellt das rein elektrisch betriebene Fahrzeug dar. Dieses gilt insbesondere im Linienbusbereich, da er sich mit seinen räumlich begrenzten Liniennetzen in einem urbanen Umfeld gut dafür eignet. In den 1970er und 80er Jahren fanden im Rheinland bereits Tests mit batteriebetriebenen Linienbussen statt, bei denen die Bleibatterien aus Gewichtsgründen auf einem separaten Anhänger mitgeführt wurden. Später wurde dieser Versuch bei der Rheinbahn AG in Düsseldorf modifiziert, in dem die Nachladung der Traktionsbatterien an der Endhaltestelle am Bahnhof Düsseldorf-Benrath vorgenommen wurde. Ein ähnlicher technischer Ansatz mit diversen Nachladestrategien wird heute bei einigen Modellprojekten in Italien weiterverfolgt.

Die größten Hinderungsgründe für den Einsatz von Elektrobusen sind dabei bis zum heutigen Zeitpunkt das Gewicht, die Temperaturentwicklung, die mangelnde Kapazität und die geringe Lebensdauer der Traktionsbatterien. Bei den mit Bleibatterien ausgestatteten Fahrzeugen besteht zudem die Gefahr der Knallgasbildung. Aus den oben genannten technischen Einschränkungen sind viele der heute eingesetzten Batteriebusse als Mini- oder Midibusse ausgeführt und bedienen Kurzstrecken in besonderen Einsatzbedingungen wie etwa Kurorte und Messengelände.

Diesel-Hybridbus

Ein Hybridantrieb besteht grundsätzlich aus mindestens einer Energiezuführung, zwei Energiewandlern und zwei Energiespeichern. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zwischen einem Hybridantrieb und einem reinen dieselelektrischen Fahrentrieb, wie er etwa von Schienenfahrzeugen bekannt ist, ist

der zweite Energiespeicher, mit dem die Bremsenergie zurück gewonnen wird.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ergeben sich bei der Gestaltung eines alternativ angetriebenen Linienbusses unterschiedliche Entwicklungsszenarien: Die zu erwartende Entwicklung erstreckt sich vom aktuellen Diesellbus über den Dieselhybrid und den wasserstoffbetriebenen Hybridbus bis zum reinen Elektrobus. In dieser Konfiguration steht am Ende der Entwicklung ein batteriebetriebener Elektrobus, der nach dieser Definition kein Hybridbus mehr ist.

Grundlegend lassen sich Hybridantriebe in parallele, serielle und leistungsverzweigte Hybridstrukturen unterteilen. Der zentrale

Unterschied zwischen den drei verschiedenen Hybridantrieben ist die Form der Leistungsübertragung zwischen Hauptaggregat und Radantrieb.

Paralleler Hybrid

Beim Parallelhybrid erfolgt die Leistungsübertragung über einen (hydro-)mechanischen Antriebsstrang. Um beim Bremsen die anfallende Energie zurückzugewinnen und speichern zu können, muss zwischen oder neben dem Hauptaggregat und dem Radantrieb eine elektrische Motor/Generatoreinheit eingefügt werden. Diese wandelt parallel zum (hydro-)mechanischen Antriebsstrang die anfallende kinetische Bremsenergie in elektrische Energie um und speichert diese im Energiespeicher (Rekuperation).

Beim Beschleunigen oder anderen energieintensiven Fahraktionen erfolgt eine Addition der Leistung aus dem mechanischen und dem elektrischen Zweig des Antriebsstrangs. Dadurch wird der Verbrennungsmotor entlastet und kann infolge dessen leistungsschwächer ausgeführt werden (Downsizing).

Die Kombination der mechanischen und elektrischen Antriebsleistung kann erfolgen durch:

- Momentenaddition über gemeinsame Antriebswelle, Stirnradgetriebe oder Kette,
- Drehzahladdition über Planetengetriebe,
- Zugkraftaddition über zwei unterschiedlich angetriebene Achsen für Verbrennungs- und Elektromotor.

Vorteile

- Verwendung kostengünstiger Komponenten aus der Großserienproduktion von Nutzfahrzeugen. Dies senkt die Produktionskosten und sichert die Verfügbarkeit.



Abb. 2: MAN SL 200 E der Rheinbahn AG am Bahnhof Düsseldorf-Benrath

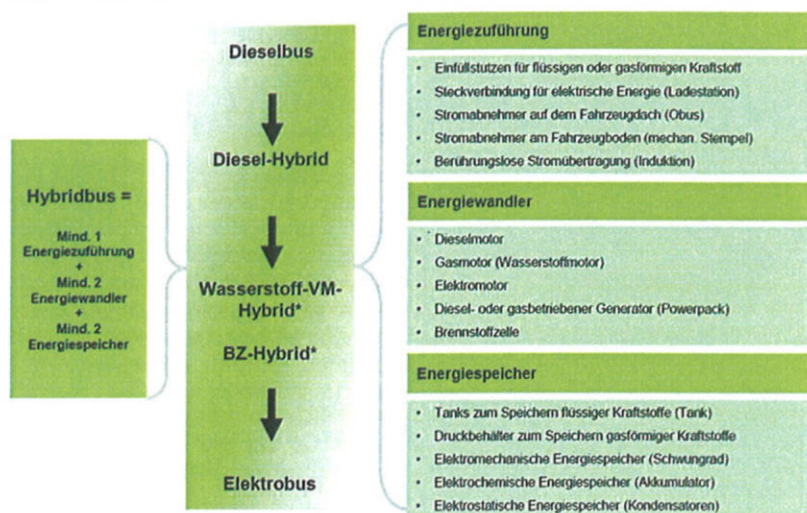


Abb. 3: Entwicklungsszenarien

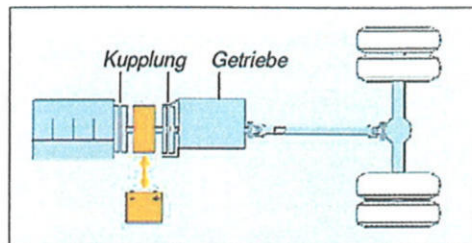


Abb. 4: Struktur Parallelhybrid [2]

Fahrzeug allerdings nur als Standardbus in 12 m Länge lieferbar. Volvo bietet zusätzlich eine Start-Stopp-Automatik und elektrifizierte Nebenaggregate. (Vollhybrid) und kann bis zu einer Geschwindigkeit von maximal 20 km/h rein elektrisch anfahren.

Daneben verfolgt auch Voith Turbo AG aus Heidenheim an der Brenz dieses Konzept. Auf Basis der weitverbreiteten Wandlergetriebe Voith DIWA wurde der Voith DIWAhybrid entwickelt. Dabei handelt es sich um die Ergänzung der bestehenden Produkte um eine elektrische Maschine, die am Eingangskorb des Getriebes angeflanscht ist. In Kombination mit verschiedenen Energiespeichern wird dieser Antrieb für den Einsatz in Linienbussen angeboten.

Nach ersten Tests in den USA wird der Voith DIWAhybrid in Europa zunächst in einem Solaris Urbino 18 Gelenkbus zum Einsatz kommen. Nach heutigem Kenntnisstand handelt es sich allerdings um einen Bremsenhybrid, bei dem die Nebenaggregate nicht elektrifiziert sind. Daher verfügt das Fahrzeug auch über keine Start-Stopp-Automatik zur weiteren Verbrauchs- und Emissionsreduktion.

Als zuletzt vorgestellte Neuerscheinung bei den parallelen Hybriden gilt der Solaris Urbino 12 Hybrid mit einem Eaton-Parallelhybridantrieb. Dieser ist vom Funktionsumfang mit dem Voith DIWAhybrid vergleichbar. Augenfälligste Neuerung des Busses ist die Anordnung des Energiespeichers. Die Lithium-Ionen-Akkus sind nicht wie bei allen anderen Hybridbussen auf dem Dach montiert, sondern im Innenraum auf der Türseite zwischen der ersten und zweiten Achse untergebracht. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass das Fahrzeugdach nicht mit Leitern, Bühnen und Hebezeugen erschlossen werden muss. Dieser Umstand minimiert die Instandhaltungskosten.

Serieller Hybrid

Beim seriellen Hybrid erfolgt die Leistungsübertragung auf den Radantrieb rein elektrisch. Als Hauptaggregat dient beim seriellen Hybrid in der Regel ein Dieselmotor, der mit einem Generator gekoppelt ist. Dieses kompakte Antriebspaket erzeugt die erforderliche elektrische Energie, die über einen Gleichstromzwischenkreis an den elektrischen Radantrieb geliefert wird. Der Energiespeicher ist ebenfalls an dem Gleichstromzwischenkreis angeschlossen. Die elektri-

Das Mehrgewicht durch den zusätzlichen Energiespeicher ist geringer als bei seriellen Hybriden

Hohe Effizienz und Kraftstoffeinsparungen unter verschiedenen Einsatzprofilen im Stadtverkehr. Dadurch ergibt sich für den Parallelhybrid ein breites Einsatzspektrum.

Der Parallelhybrid ist auch für kleine elektrische Leistungen, so genannte Micro- und Mildhybridsysteme, geeignet. Dabei bleibt der Verbrennungsmotor während der gesamten Fahrt permanent im Betrieb. Solche Fahrzeuge lassen sich durch die Verwendung von modifizierten Großserienkomponenten kostengünstig produzieren.

Nachteile

- ☐ Für die Leistungsübertragung ist weiterhin ein Schalt- oder Automatikgetriebe erforderlich. Ein ruckfreies Beschleunigen wie bei einer rein elektromotorischen Kraftübertragung ist nicht möglich.
- ☐ Die Konstruktion des Parallelhybrid orientiert sich an dem Aufbau eines konventionellen Niederflurbusses. Daher kann die Anordnung der Komponenten des Antriebsstrangs nicht verändert werden.

Den Ansatz eines parallelen Hybridbusses verfolgen zurzeit im Wesentlichen drei Anbieter. Zum einen ist es der schwedische Nutzfahrzeughersteller Volvo Bus Corporation mit dem Volvo 7700 Hybrid. Derzeit ist dieses



Abb. 5: Volvo 7700 Hybrid präsentiert auf der IAA 2008

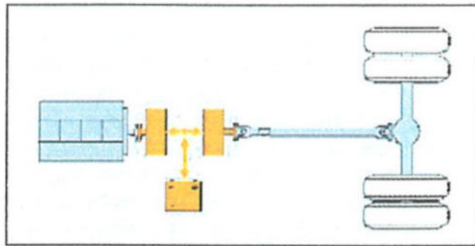


Abb. 6: Struktur Serieller Hybrid [2]

sche Energie wird beim seriellen Hybrid je nach Betriebszustand und Fahrsituation über den Gleichstromzwischenkreis an die drei Grundkomponenten des Hybridantriebs geleitet.

Vorteile

- Durch den fehlenden mechanischen Antriebsstrang ist unter Verwendung von mehreren elektrischen Maschinen der Mehrachsantrieb realisierbar. Unter Verwendung von Radnabenmotoren oder zumindest radnahen Elektromotoren ist zudem ein Allradantrieb der einfach bereiften Achsen darstellbar.
- Der rein elektrische Fahrbetrieb ist in Abhängigkeit von der Kapazität des verwendeten Energiespeichers möglich. Alle Nebenaggregate werden elektrisch über den Gleichstromzwischenkreis versorgt.
- Die Beschleunigung ist ruckfrei und komfortabel. Die Drehzahl des elektrischen Radantriebs lässt sich stufenlos regeln.
- Der serielle Hybrid bietet großes Potenzial für das Downsizing. Er ist besonders effizient beim Einsatz von einem kleinen Hauptaggregat für die Grundlast mit einem großzügig dimensionierten Speicher für die Spitzenbelastung.

- Die Effizienz steigt bei hohen Stop-and-go-Anteilen durch eine hohe Rekuperationsleistung.
- Es lässt sich zusätzlich eine Start-Stopp-Automatik zur weiteren Kraftstoffeinsparung einsetzen. Voraussetzung hierfür ist die Elektrifizierung der Nebenaggregate, damit diese beim ausgeschalteten Hauptaggregat aus dem Energiespeicher gespeist werden.
- Der serielle Hybrid bremst zu einem großen Teil nur mit der als Generator arbeitenden elektrischen Maschine. Das reduziert den Verschleiß der Bremsanlage.
- Für die Fertigung und Instandhaltung von seriellen Hybridantrieben bilden sich Synergieeffekte zwischen Bus- und Schienenfahrzeugbereich.
- Neben dem bereits erwähnten Verbrennungsmotor/Generatorsatz (Powerpack) ist in Zukunft auch die Verwendung einer Brennstoffzelle möglich. Ebenso kann eine externe Stromversorgung, wie die Stromabnehmer eines Obusses, eingesetzt werden. Somit wäre beim Obus ein durchgängiger, lokal emissionsfreier Betrieb möglich. Auch eine Stromzuführung am Fahrzeugboden durch Kontaktstempel oder mittels Induktion ist denkbar.

Nachteile

- Mehrkosten durch den Einsatz von mehreren elektrischen Maschinen und der Leistungselektronik. Abhängig von dem Funktionsumfang (Start-Stopp-Automatik, Energiemanagement et cetera) des seriellen Hybridantriebs ergeben sich höhere Kosten gegenüber konkurrierenden Hybridstrukturen.

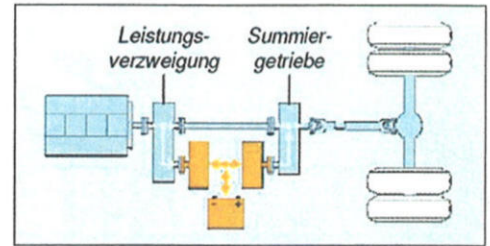


Abb. 8: Die Struktur des leistungsverzweigten Hybrids [2].

- Hohes Mehrgewicht durch die elektrischen Maschinen und den Energiespeicher.
- Die lange Wirkungsgradkette vom Verbrennungsmotor zum Radantrieb führt besonders bei höheren Geschwindigkeiten zu großen Energieverlusten. Dadurch ist der schwere Stadtverkehr das bevorzugte Einsatzgebiet für diese Hybridstruktur.

Bei der Entwicklung und Verbreitung der seriellen Hybridantriebe sind verschiedene Nutzfahrzeug- und Komponentenhersteller tätig. Im Wesentlichen sind dies die Bushersteller Evobus (Mercedes-Benz), MAN, Van Hool aus Belgien und Carrosserie Hess aus der Schweiz. Auf Seiten der Komponentenhersteller sind ZF Friedrichshafen, Siemens und Vossloh-Kiepe vertreten, die ihre Antriebe in mindestens einem Hybridbusmodell zum Einsatz kommen lassen.

Leistungsverzweigter Hybrid

Eine Kombination des parallelen und seriellen Hybrid ist der leistungsverzweigte Hybrid. Diese Hybridstruktur ist vor allem im PKW-Bereich weit verbreitet. Hierbei wird zur Leistungsübertragung ein einstufiges Planetengetriebe (one-mode-hybrid) verwendet. Als komplexeres Gegenstück hat der amerikanische Getriebehersteller GM Allison-Transmission das Allison EV Drive Getriebe für den Einsatz in amerikanischen Stadtbussen konzipiert.

Dieses Getriebe basiert auf einem im Doppelmodus (two-mode-hybrid) verbundenen Planetengetriebe. Der Doppelmodus splittet die Kraftübertragung des Getriebes in zwei Geschwindigkeitsbereiche auf: von 0 km/h bis zirka 40 km/h und > 40 km/h.

Das Getriebe weist einen elektrischen und einen mechanischen Pfad auf. Die Drehzahlen der beiden im Getriebe eingebauten Elektromotoren werden über die Planetensätze mit den mechanisch erzeugten Drehzahlen des Dieselmotors überlagert.

Auf der IAA 2006 präsentierte Solaris Bus & Coach S.A. den Urbino 18 Hybrid, in dem die US-amerikanische Hybridtechnik erstmals in Europa angewendet wird.

Der Einsatz des Allison EV Drive Hybridantriebs bietet folgende Vor- und Nachteile:



Abb. 7: MAN Lions' City Hybrid (Vorserie) präsentiert auf der IAA 2008.



bb. 9: Solaris Urbino 18 Hybrid der Rheinbahn AG

urteile

Das Allison EV Drive Getriebe beansprucht gegenüber einem konventionellen mechanischen Automatikgetriebe keinen größeren Einbauraum. Es hat aber ein Mehrgewicht von ungefähr 30 Prozent gegenüber einem konventionellen Automatikgetriebe.

Hohe Effizienz über den Geschwindigkeitsbereich des Linienbusses hinweg.

Die Verluste im elektrischen Zweig sind bezogen auf die Gesamtleistung gering.

Der konventionelle Antriebsstrang bleibt bis auf das Getriebe weitgehend erhalten. Durch den Leistungssplit können kleinere, leichtere und kostengünstigere mechanische und elektrische Komponenten zum Einsatz kommen.

Wie bei einem seriellen Hybrid ist komfortables Fahren ohne Schaltvorgang möglich.

Die Konstruktion orientiert sich weitgehend an dem Aufbau eines konventionellen Niederflrbusse.

Durch den in Großserie produzierten Hybridantrieb ergibt sich eine hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.

ichteile

Das Allison EV Drive Getriebe ist mit einer aufwändigen Mechanik versehen.

Das Getriebe benötigt bei Einsatz im Nutzfahrzeug zwei elektrische Maschinen.

Verbrauchsvorteile sind zur Zeit nur begrenzt möglich und liegen hinter den Erwartungen zurück.

Allison sieht den Hybridantrieb in der jetzigen Generation als ausgereift an und lässt daher auch keine weiteren Änderungen am Hybridantrieb wie Start-Stopp-Automatik, elektrifizierte Nebenaggregate, alternativer Energiespeicher für erweiterten

ZEV-Betrieb zu. Damit sind die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten für das sehr innovative EV Drive Getriebe limitiert.

- ☐ Daher ist jeder mit dem EV Drive ausgestattete Bus ein Bremsybrid, der nicht batterieelektrisch fahren kann.

Obwohl der leistungsverzweigte Hybrid ausschließlich von Allison Transmission angeboten wird, ist er aufgrund seiner frühen Marktposition in ganz Europa verbreitet. Mit dem Solaris Urbino 18 Hybrid der zweiten Generation ist der Antrieb aktuell bei 14 Verkehrsunternehmen im Einsatz. Neben Solaris haben in Europa auch Optare aus England und VDL Bus&Coach Linienbusse mit dem Hybridantrieb von Allison im Programm.

Einsatzfelder

Aus den vorhergehenden Abschnitten wird ersichtlich, dass alle drei Hybridstrukturen ihre individuellen Eigenschaften besitzen. Zudem verfolgt jeder Nutzfahrzeughersteller innerhalb der drei vorgestellten Hybridstrukturen sein eigenes Hybridkonzept.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Hybridantriebe nach dem Anschaffungspreis und ihrer Leistungsfähigkeit. Ausschlaggebend für die momentane Preisgestaltung ist der Funktionsumfang des Hybridantriebs. Somit wirken sich energiesparende Zusatzfunktionen wie Start-Stopp-Automatik, GPS-gesteuertes Energiemanagement und nicht zuletzt die Bauart und Kapazität des verwendeten Energiespeichers auf die Kosten aus. Daneben spielt der Entwicklungsstand eine große Rolle. Hybridantriebe, die sich bereits in der Serienproduktion befinden und weltweit in großen Stückzahlen abgesetzt wurden, sind kostengünstiger als vollständige Neuentwicklungen im Prototypstadium. Diese Aspekte müssen ebenfalls bei der Beschaffungentscheidung für den Hybridbus beachtet werden. Daher gilt für alle derzeit auf dem Markt befindlichen Hybridbusse, dass diese trotz der gemeinsamen Bezeichnung *Hybrid* nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Der Vergleich verschiedener Linienbusse wird über den SORT (Standardized On-Road Test) ermöglicht. Die UITP (Union Internationale de Transport Public) und der VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen) haben in Zusammenarbeit mit der Fahrzeugindustrie die SORT-Fahrtzyklen für Linienbusse entwickelt. Der SORT-Fahrtzyklus wird durch folgende Eigenschaften beschrieben:

- Durchschnittsgeschwindigkeit,
- Halte pro km,
- Anzahl der Halte,
- Dauer der Halte,
- Haltezeit als prozentualer Anteil zum Gesamtzyklus,
- Gesamtlänge Zyklus.

Die Stadtverkehre der meisten deutschen Verkehrsunternehmen orientieren sich am SORT-2-Zyklus, hingegen sind schwere Stadtverkehre nach SORT in Deutschland eher selten und vor allem in den Innenstädten großer europäischer Metropolen wie London oder Paris zu finden.

Für den Linienbusbereich ergibt sich die in Tabelle 1 dargestellte Verteilung. Daraus ist ersichtlich, dass der serielle Hybrid vor allem

Geeignete Hybridstruktur in Abhängigkeit von Fahrzeugtyp und Fahrzyklus

Tabelle 1

	SORT 1 schwerer Stadtverkehr	SORT 2 leichter Stadtverkehr	SORT 3 Vorortverkehr
Mini- und Midibus 6 m – 7,5 m und 8 m – 10,5 m	P/LV	P/LV	P/LV
Standard Linienbus 12 m	S/P/LV	P/LV	P/LV
Gelenkbus max. 18,75 m	S	S/P/LV	P/LV
Doppelgelenkbus max. 25 m	S	S	S/P/LV
Legende	P= Paralleler Hybrid		
	S= Serieller Hybrid		
	LV= Leistungsverzweigter Hybrid		

Tabelle erstellt auf der Grundlage von M. Wiel: „Parallele und serielle Hybridkonzepte versus Mischhybrid“, Dresden, 2007, S. 39



für den schweren Stadtverkehr geeignet ist. Bei den dort vorherrschenden niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten kann er die Vorteile seines stufenlos regelbaren Antriebes am besten nutzen. Mit den in den leichten Stadt- und Vorortverkehren zunehmenden Durchschnittsgeschwindigkeiten steigt auch die Attraktivität der parallelen und leistungsverzweigten Hybride.

Im Gegensatz zum seriellen Aufbau bieten diese beiden Bauarten einen hohen Übertragungsgrad, der mit dem eines konventionellen (hydro-)mechanischen Antriebsstranges vergleichbar ist. Der Übertragungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis der Leistung an den Antriebsrädern zu der Leistung der Energiequelle (Dieselmotor).

Betriebswirtschaftlicher Kostenvergleich

Zur Bewertung der Auswirkungen eines Einsatzes der vorstehend dargestellten Hybridtechniken werden ein betriebswirtschaftlicher Kostenvergleich zwischen Diesel- und Dieselhybridbussen vorgenommen. Für die Fahrzeuggrößen Standardbus und Gelenkbus finden von einem Verkehrsunternehmen durchschnittliche im Liniennetz erzielte Dieserverbrauchswerte Verwendung. Diese liegen für den Standardbus bei $\varnothing$ 38 l/100 km und für den Gelenkbus bei $\varnothing$ 52 l/100 km.

Anschließend werden die Verbrauchswerte um den zu erwartenden Minderverbrauch der Hybridbusse reduziert. Dieser theoretische Ansatz geschieht mit angenommenen Verbrauchsvorteilen von 10, 20 und 30 Prozent gegenüber dem Dieselbus, da diese Verbrauchswerte als Zielmarken der Hybridbusentwicklung anzusehen sind und eine Betrachtung der Kostenstrukturen über realistische Szenarien erlauben. Als abschließende Überprüfung dienen die in verschiedenen Veröffentlichungen dargestellten Verbrauchswerte der zurzeit auf dem Markt verfügbaren Hybridbusse. Somit lässt sich auch der aktuelle Entwicklungsstand dieser Technologie in Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit darstellen.

Bei Fahrplanangebot und Anzahl der angebotenen Plätze sind Dieselbus und Dieselhybridbus identisch. Die Kostenbetrachtung gliedert sich in Investitions- und Betriebskosten. Zu den Investitionskosten gehören Fahrzeuge, Betriebshof, Werkstatt und Tankanlagen. Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus Fahrdienst, Betriebshofdienst (Instandhaltungspersonal), Energiekosten und Fahrzeuginstandhaltung.

Hinsichtlich der Investitionskosten für die Fahrzeuge ergeben sich für die Hybridbusse gegenüber den Dieselbussen deutliche Kostensteigerungen. Dabei kann ein langfristig wahrscheinlicher Mehrpreis von 20 Prozent gegenüber der Dieselversion angenommen

werden. In der gegenwärtigen Praxis liegen die Anschaffungskosten der Dieselhybridbusse mit rund 300 000 Euro für Standardbusse und zirka 450 000 bis 750 000 Euro für Gelenkbusse deutlich über der finanziellen Zielvorstellung, die sich im wesentlichen aus der Relation zwischen Verbrauchsreduzierung und Investitionskosten ergibt. Es wurde ohne Fahrzeugförderung gerechnet, weil die Hybridtechnologie sich letztendlich nur über den Fahrzeugpreis und den Verbrauchsvorteil verbreiten wird. Insgesamt werden die Investitionskosten für die Dieselhybridbusse wie bei jeder anderen neuen Busgeneration mit der jeweils aktuellen Umwelttechnik steigen.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Fahrzeugbeschaffung ist die Abschreibungsdauer. Hier wird angenommen, dass alle Bustypen unabhängig vom Antrieb über neun Jahre abgeschrieben werden. Wenn es gelänge, den Dieselhybrid, der immer noch gemäß Afa-Tabelle ein Kraftomnibus ist, über einen längeren Zeitraum (wie zum Beispiel Schienenfahrzeuge) abschreiben zu dürfen, ergäben sich für diese Technik vorteilhaftere Kostenstrukturen. Natürlich würde das den Lebenszyklus eines Hybridbusses gegenüber einem Dieselbus deutlich verlängern. Dagegen spricht die für eine wesentlich kürzere betriebliche Nutzungsdauer ausgelegte Konstruktion der heutigen Linienbusse.

Bei den Betriebshöfen und Werkstätten sind Investitionen notwendig: Zum einen muss der Dachbereich der Hybridbusse als Arbeitsfläche erschlossen werden, um dort die Komponenten des Hybridantriebs wie Energiespeicher, Leistungselektronik, Kühlanlagen, elektrifizierte Nebenaggregate instand halten zu können. Dazu werden Krananlagen und Dacharbeitsbühnen benötigt. Aus vergleichbaren Investitionen im Straßenbahnbetriebshöfen lassen sich zirka 80 000 Euro für die Dacharbeitsbühne und rund 20 000 Euro für

eine Krananlage veranschlagen. Darüber hinaus müssen Diagnosegeräte und Software – wie für jede neue Busgeneration – beschafft werden.

Erforderlich ist eine zusätzliche Ausstattung der Werkstatt mit elektrotechnischer Werkstattausrüstung. Die detaillierte Festlegung der Investitionskosten für die Werkstatt hängt in erster Linie von der gewählten Instandhaltungsstrategie ab. Einflussfaktoren sind hierbei die Größe der Hybridbusflotte und angestrebte Fertigungstiefe. Für die Instandhaltung müssen auch die bestehenden Werkstattprozesse überdacht werden.

Die Dieseltankstelle muss prinzipiell nicht geändert werden. Hierbei spielt der Dieselhybrid seinen Vorteil gegenüber allen mit gasförmigen Kraftstoffen betriebenen Bussen aus und erfordert keine weiteren Investitionen.

Mit der Euro-IV-Norm erhielten die SCR-Katalysatoren Einzug in die Fahrzeugflotten und damit das Additiv Harnstoff zur Stickoxidreduktion. Je nach verwendetem Dieselmotor und verwendeter Abgastechnik sind die Dieselhybridbusse weiterhin auf die Harnstofftankanlagen angewiesen.

Die Investition in die Heizöltankanlage ist für jedes Verkehrsunternehmen individuell zu bewerten, weil die Versorgung der Fahrzeugheizungen entweder über Dieselmotor oder das steuerlich günstigere Heizöl geschieht.

In der Gesamtbetrachtung steigt die Summe der Investitionskosten leicht an.

Der zweite große Kostenblock sind die Betriebskosten, die beim Einsatz von Hybridbussen folgende Tendenzen aufweisen werden. Die Betriebskosten für den Fahrdienst werden sich durch die gleich bleibende Anzahl an Fahrbediensteten im Regelfall nicht verändern. Um die Verbrauchsvorteile der Hybridtechnik durch geschultes Personal zu optimieren, können die Verkehrsunternehmen

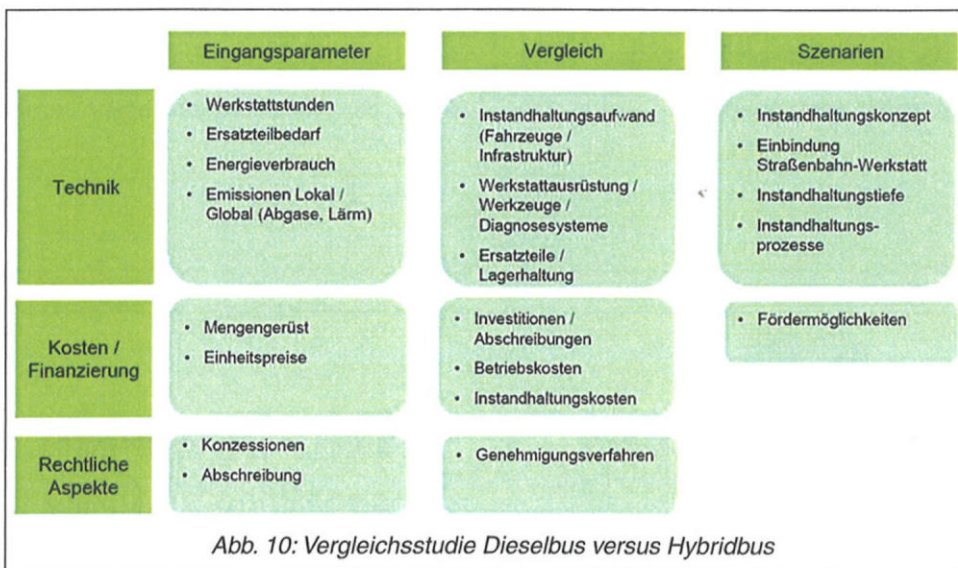


Abb. 10: Vergleichsstudie Dieselbus versus Hybridbus



Fahrerschulungen durchführen. An dieser Stelle treten die entsprechenden Fort- und Weiterbildungskosten als einmalige Investition auf.

Im Gegensatz zum Fahrpersonal werden beim Instandhaltungspersonal weiter reichende Veränderungen notwendig sein. Auf Grund ihrer Ausbildung sind Kfz-Mechaniker noch nicht für den Umgang mit elektrischen Fahrtrieben ausgebildet. In Zukunft werden solche Lehrinhalte bei der Ausbildung zum Kfz-Mechatroniker der Fachrichtung Nfz-Technik oder Elektroniker für Betriebstechnik Bestandteil sein. Bis dahin muss das heutige Personal zur Fachkraft für festgelegte Tätigkeiten für die Instandhaltung der Hybridantriebe weitergebildet werden.

Das wichtigste Einsparpotenzial ergibt sich bei den Energiekosten und den Emissionen. Wie eingangs skizziert, wurde ein Verbrauchsvorteil von 10, 20 oder 30 Prozent angenommen. Entsprechend sinken sowohl die Treibstoffkosten für den Dieselmotorkraftstoff als auch gegebenenfalls für das Additiv Harnstoff (zirka fünf Prozent des Dieselmotorkraftstoffs).

Zusammen mit dem Dieselmotorkraftstoffverbrauch sinken die CO₂-Emissionen. Dieser Effekt ist besonders dann interessant, wenn die CO₂-Emissionen der Linienbusflotten zukünftig über den Emissionshandel monetarisiert würden. Momentan wird an der Energiebörse in Leipzig eine Tonne emittiertes CO₂ mit 15 Euro gehandelt.

In der Fahrzeuginstandhaltung sind die absehbaren Verschleißteile beim Hybridbuseinsatz zu sehen. Dies ist in erster Linie der Energiespeicher. Dabei ergeben sich pro Hybridbus je nach Typ und Kapazität des Energiespeichers nachträgliche Investitionen zwischen 20 000 Euro und teilweise über 50 000 Euro. Die Zyklenfestigkeit und die damit verbundenen Kosten für die Energiespeicher sind zum heutigen Zeitpunkt eine unbekannte Größe, die sich bisher nicht mit Sicherheit beantworten lässt.

In der Gesamtbetrachtung steigen die Betriebskosten der Hybridbusse gegenüber dem Betrieb mit Dieselmotoren leicht an. Das

Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass der Dieselhybrid gegenüber dem Dieselmotorenbus etwa fünf Prozent teurer ist. In Abhängigkeit von Fahrleistungen, spezifischen Rahmenbedingungen des jeweiligen Einsatzfalls und gegebenenfalls weiteren Einflussgrößen (Emissionsbewertung et cetera) kann sich auch heute schon eine Situation ergeben, bei der der Einsatz von Hybridbussen gegenüber der aktuellen Dieselmotortechnologie kostenneutral oder sogar kostengünstiger ist. Dazu sind einzelfallbezogene Detailuntersuchungen notwendig.

Zusammenfassung und Ausblick

Investitionen, die heute getätigt werden in Betrieb, Instandhaltung und periphere Infrastruktur von Hybridbussen, sind im Hinblick auf die absehbare technologische Entwicklung in jeder Hinsicht zukunftsfähig. Da zukünftige Konzepte auf der aktuellen Technologie aufbauen werden, erwerben Verkehrsunternehmen bereits heute einen wertvollen Know-how-Vorsprung. Nicht zuletzt hierdurch schaffen sie gute Voraussetzungen, um auch zukünftig moderne Fahrzeuge effizient einsetzen zu können und sich so eine vorteilhafte Marktposition zu sichern.

Somit kann festgehalten werden, dass der Hybridbus ein Wegbereiter in die Elektromobilität ist. Innerhalb dieser Zielvorstellung Elektromobilität ist davon auszugehen, dass bei den Verkehrsunternehmen weitreichende Umwälzungen auf ihre konventionelle Linienbusflotte zukommen. Die alternativ angetriebenen Linienbusse der Zukunft werden sich in Bezug auf den Fahrzeugantrieb und den Primärenergieträger verändern.

Der Hybridantrieb bietet die Chance, den Antriebstrang des dieselmotorgetriebenen Linienbusses effizienter zu gestalten. Es sind Kraftstoffersparungen und damit CO₂-Reduzierungen möglich. Ein weiterer Aspekt für den Hybridantrieb sind auch mögliche Komfortsteigerung im Fahrbetrieb und die durch den Stationärbetrieb des Dieselmotors hervorgerufene Lärmreduzierung. Ein weiterer Vorteil für den Einsatz von Dieselhybridbussen ist die bei den Verkehrsunternehmen bereits

vorhandene Infrastruktur für den Primärenergieträger Dieselmotorkraftstoff. Bei allen gasförmigen Kraftstoffen müssen zunächst geeignete Tankanlagen beschafft werden.

In der Gesamtkostenbetrachtung ist der Diesel-Hybridbus nur geringfügig teurer als ein konventionell angetriebener Dieselmotorenbus. Ein Kostenfaktor sind hierbei vor allem die gegenwärtig noch deutlich höheren Anschaffungskosten. Zukünftig ist eine steigende Nachfrage nach Dieselhybridbussen zu erwarten, so dass die Industrie durch Serienproduktion und Standardisierung zu einer den veränderten Rahmenbedingungen angepassten Preisgestaltung in der Lage sein wird.

Eine mögliche Regel für das PreisLeistungsverhältnis der Diesel-Hybridbusse könnte wie folgt lauten: Der Mehrpreis des Hybridbusses gegenüber einem Dieselmotorenbus darf prozentual nicht höher sein als sein prozentualer Verbrauchsvorteil.

Unter Berücksichtigung von weiterem Nutzen, wie beispielsweise Emissionen in Rahmen volkswirtschaftlicher Betrachtungen, kann der Einsatz von Hybridbussen schon heute als wirtschaftlich bezeichnet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Görgler, Jürgen: Volvo 7700 Hybrid: Serienreife belegt? Verkehr und Technik 2010, Heft 5, Seite 165–168.
- [2] Hellwig, B.: Hybrid-Strategie für Nutzfahrzeuge: Rahmenbedingungen und Aktivitäten bei ZF. Foliensatz. VDV-Akademie: Hybridantriebe im Linienbusbereich am 13./14. Dezember 2007 in Köln. ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen.
- [3] Stubbe, Björn: Diplomarbeit: Hybridantriebe im Linienbusbereich - technische, organisatorische und personelle Auswirkungen auf die Werkstätten und Betriebshöfe der DB Stadtverkehr NRW, Münster 2008.
- [4] Uhlenhut, Achim: Solaris Urbino 12 Hybrid – Der Prototyp mit Parallelhybrid im Detail. Verkehr und Technik 2010, Heft 6, Seite 203–208.
- [5] Uhlenhut, Achim: Untersuchung ergibt: Hannover-scher Hybridbus ist sparsam und beliebt. Verkehr und Technik 2010, Heft 5, Seite 169–172.
- [6] Wiel, M.: Parallele und serielle Hybridkonzepte versus Mischhybrid. Foliensatz. VDV-Akademie: Hybridantriebe im Linienbusbereich am 13./14. Dezember 2007 in Köln. Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden.

ANZEIGE



Mehr bewegen.
Neue Wege im ÖPNV und Regionalverkehr.

www.rail-bus.de