

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 18

**Artikel:** Die Zukunft des Batterie-Elektrobusses

**Autor:** Gerndt, H.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904475>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.10.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Die Zukunft des Batterie-Elektrobusses

H. Gerndt

Batterie-Elektrobusse befinden sich in der Bundesrepublik Deutschland seit mehreren Jahren im praktischen Versuchsbetrieb. Anstatt der bisher üblichen Batteriewechseltechnik erprobt man neuerdings eine Zwischenladungstechnik, die nicht nur eine bessere Fahrdynamik gestattet, sondern auch eine wesentlich längere Batteriebensdauer und einen geringeren Energieverbrauch ermöglicht.

Die Gesamtkosten des Batteriebusbetriebes liegen derzeit noch etwas über denjenigen des Trolleybusses. Es ist jedoch noch eine Weiterentwicklung sowohl der Batterietechnologie als auch des Fahrzeugkonzeptes möglich, die den erdölunabhängigen und umweltfreundlichen Batterie-Elektrobus auch zu einem wirtschaftlich konkurrenzfähigen Nahverkehrsmittel machen können.

*En République fédérale d'Allemagne on a déjà mis en service depuis plusieurs années, à titre d'essai, des autobus électriques à batteries. En remplacement de la technique traditionnelle jusqu'à aujourd'hui qui consiste à changer les batteries, on essaie depuis peu une technique de chargement intermédiaire, qui non seulement offre une meilleure dynamique au niveau de la conduite, mais permet aussi aux batteries d'avoir une durée de vie nettement plus longue et de consommer moins d'énergie.*

*Les coûts d'exploitation totaux des autobus à batteries sont aujourd'hui encore un peu plus élevés que ceux des trolleybus. Mais des progrès tant au niveau de la technologie des batteries que de la conception des véhicules sont encore possibles, qui pourraient faire des autobus électriques à batteries, déjà intéressants par leur aspect écologique et le fait qu'ils n'utilisent pas de pétrole, un véhicule aussi compétitif pour le trafic sur courtes distances.*

## Adresse des Autors

Dr.-Ing. H. Gerndt, techn. Geschäftsführer, Rhein-Consult GmbH, Hansaallee 1, D-4000 Düsseldorf 11

## 1. Einleitung

Erste batterie-elektrische Busse kamen bereits Anfang dieses Jahrhunderts zum Einsatz. Daneben erfüllten Trolleybusse ihren Dienst im Personennahverkehr. Die rasant fortschreitende Entwicklung der Verbrennungsmotoren führte jedoch dazu, dass der batterie-elektrische Bus bald wieder aus unserem Strassenbild verschwand.

Eine neue, für den elektrischen Antrieb im Strassenverkehr günstigere Situation ergab sich Anfang der 70er Jahre. Die steigende Sensibilität hinsichtlich knapper werdender Erdöl-Reserven und zunehmender Umweltbeeinträchtigungen sowie das Vorhandensein moderner elektrischer Bauelemente und leistungsfähigerer Akkumulatoren (Fig. 1) führten zu einer, wenn auch noch zaghaften, Renaissance des batterie-elektrischen Antriebes im Strassenverkehr. Insbesondere im öffentlichen Personennahverkehr boten sich infolge des programmierbaren Einsatzes der Fahrzeuge gute Anwendungsmöglichkeiten.

## 2. Von der Batteriewechseltechnik zur Kurzzeitzwischenladung

Während dem Trolleybus wegen seiner aufwendigen Oberleitung vor allem die Bedienung von Magistralen und Linien mit dichter Zugfolge zuzuordnen sind, bietet sich für den Batteriebus der flächendeckende Einsatz auch auf Linien mit schwacher Verkehrsnachfrage und wechselnder Linienführung an, z.B. als Zubringer für Stadt-, U- und S-Bahnen. Die Nachladung bzw. der Austausch der Batterien kann dabei punktuell im Betriebshof oder an Linienendpunkten erfolgen. Bedingt durch die relativ geringe mitgeführte Energiemenge ist die betriebliche Schrittweite zurzeit noch auf zirka 20 km beschränkt.

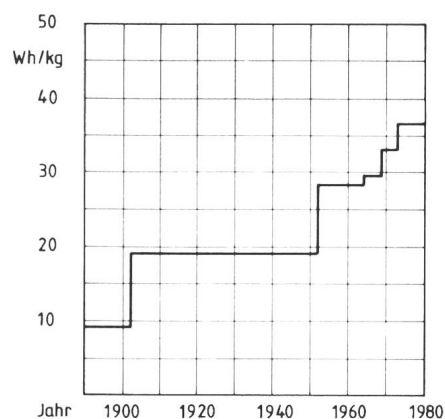


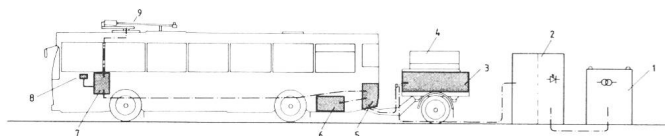
Fig. 1 Entwicklung der Energiedichte von Blei-Traktions-Batterien (Varta)

Dieser zweite Ansatz zur Einführung batteriegetriebener Busse nahm 1974 im Rahmen eines Betriebsversuches in Düsseldorf und Mönchengladbach seinen Anfang. In den folgenden Jahren kamen neben den reinen Batterie- und Trolleybus-Varianten an verschiedenen Orten auch Mischformen dualer und hybrider Art zur Erprobung.

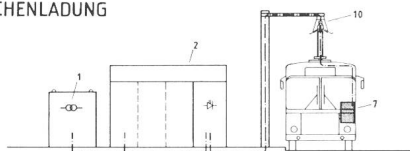
Die erste Phase des Versuchsbetriebes mit Batterie-Bussen sah für die Energieversorgung zunächst eine Off-Line-Lösung durch Batterieaustausch vor. Der mehrjährige Linieneinsatz von 20 Bussen mit dieser sogenannten Batteriewechseltechnik hat erwiesen, dass dieses Verfahren grundsätzlich anwendbar ist. Er zeigte aber auch, dass die gewählte Methode der Batterieladung wegen des grossen betrieblichen Aufwandes und der kostenintensiven Versorgungsanlagen für den praktischen Betriebseinsatz wenig geeignet ist. Es musste daher ein neues Versorgungskonzept entwickelt werden, um diese Nachteile zu eliminieren.

Der Weg wies in die Richtung einer On-Line-Lösung für den Energienachschub. Mit Förderung des Bundesministers für Verkehr wurde - nach

### GRUNDLADUNG



### ZWISCHENLADUNG



#### Legende:

- 1 Transformator
- 2 Ladegerichtiger
- 3 Elektrorespeicher
- 4 Elektrorespeicherkühlung
- 5 Fahrsteuerung
- 6 Fahrmotor
- 7 Ankerpelsteuerung
- 8 Bedieneinrichtung
- 9 Kontaktkopf
- 10 Gegenkontakt am Stahlmast

**Fig. 2**  
Versorgungssystem  
«Zwischenladung»

gründlichen Vorversuchen mit zwei Prototypen – ab Juli 1982 in Düsseldorf-Benrath der Linienbetrieb von der Batteriewechseltechnik auf das Prinzip der Kurzzeitzwischenladung umgestellt und die Erprobung mit der neuen Technik fortgesetzt (Fig. 2). Bei dieser Versorgungsart bleibt die Batterie auf dem Fahrzeug. Die Nachladung erfolgt während des Betriebsablaufes in den fahrplanbedingten Standzeiten über eine halbautomatische Ankoppelvorrichtung am Linienendpunkt (Fig. 3).

Dieses Zwischenladekonzept vermeidet zusätzliche Betriebskosten, die durch den Fahrzeug- und Batteriewechsel entstehen. Hierfür ist erforderlich, dass die fahrplanbedingten und arbeitszeitrechtlichen Wendezeiten ausreichen, um den Ankoppel- und Ladevorgang mit einem ausreichenden Energienachschub vorzunehmen. Während der nächtlichen Standzeiten erfolgt dann auf dem Betriebshof die Vollladung des Batteriespeichers.

### 3. Versuchsbetrieb mit 18 Bussen

Der Versuchsbetrieb wird mit Blei-Schwefelsäure-Batterien durchgeführt,



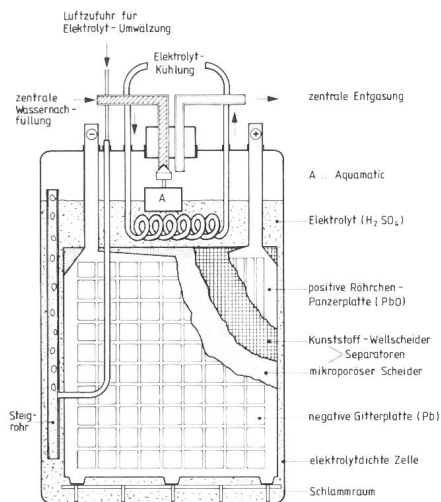
**Fig. 3**  
Batteriebus an  
Zwischenlade-  
einrichtung

die bei einer Klemmenspannung von 360 V eine nutzbare Batteriekapazität von 360 Ah aufweisen. Die Speicher wurden zusätzlich mit einer mechanischen Elektrolytumwälzung ausgerüstet und die Kühlung des Elektrolyten, entsprechend der höheren Stromstärken im Kurzzeitladebereich, modifiziert und vergrößert (Fig. 4). Insgesamt sind 18 Busse auf automatische Ankoppeltechnik umgestellt worden. Damit werden zwei Linien mit Linienlängen von 11 km und 22 km bedient.

Die Zwischenladegeräte wurden an der Endhaltestelle am Bahnhof Düsseldorf-Benrath für zwei Bahnsteige mit insgesamt fünf Versorgungsstellen installiert und werden aus dem Mittelspannungsnetz mit einer Anschlussleistung von je 220 kVA versorgt. Gleichstromseitig besitzen sie eine Ladespannung von 500 V und können einen maximalen Ladestrom von 400 A abgeben (Fig. 5).

Die wichtigsten Daten der eingesetzten Betriebsmittel sind in Tabelle I zusammengestellt.

Die mittlere Nachladezeit beträgt für die 11 km lange Linie zehn Minuten und für die 22 km lange Linie 18 Minuten. Am Ende eines Tageseinsatzes wird bei optimal abgestimmten



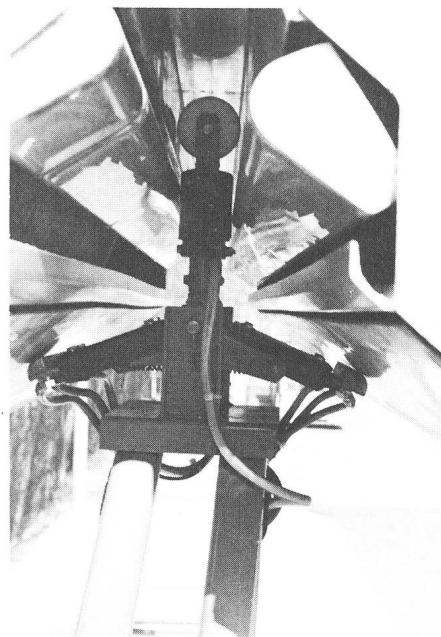
**Fig. 4** Schematische Darstellung Blei-Schwefelsäure-Zelle (geladen)

Einsatzbedingungen und einer Betriebsdauer von 19 Stunden eine Batterierestladung von 30% nicht unterschritten (Fig. 6).

### 4. Ergebnisse der Betriebserprobung

Dieser inzwischen mehr als 1½-jährige Versuch hat bis heute zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Der Elektrobuss mit Kurzzeitzwischenladung und automatischer Ankoppeltechnik ist für den Betriebseinsatz geeignet. Die technischen Komponenten des Ankoppelsystems sind funktionsfähig und anwendungsreif.



**Fig. 5** Kontaktkopf

<b>Fahrzeug:</b>	
Typ	MAN-Standard-Linienbus-E
Personenkapazität	37 Sitz- und 73 Stehplätze
zul. Gesamtgewicht	23,3 t
Fahrleistungen:	
Höchstgeschwindigkeit	70 km/h
Beschleunigung	0–50 km/h etwa 23 s (50% Nutzlast)
Antrieb	
	kompensierter Reihenschlussmotor/fremderregter Nebenschlussmotor
Dauerleistung	115 kW/90 kW
<b>Energiespeicher:</b>	
Bauart	Panzerplatte
Nennspannung	360 V
Nennkapazität (K <sub>s</sub> )	455 Ah
Betriebskapazität	etwa 360 Ah (annähernd 120 kWh)
<b>Ladegerät:</b>	
Nennspannung	360 V
Nennstrom	400 A
Ladekennlinie	IUIa (geneigter U-Teil)
<b>Ankoppelvorrichtung:</b>	
Schienensystem	
	4polig (Plus, Minus, Schutzleiter, Steuerleiter, 500 V/500 A, 1,8 m lang, Standankopplung)
	Höhe 4,25 m
	vollisoliert, nach Abkopplung automatisch spannungslos
Stromabnehmer	
	4polig, mit Schutzleiterüberwachung
	Länge des Auslegers 2,3 m
	Betätigung pneumatisch mit Federkraftunterstützung, Fernbedienung vom Fahrerplatz
	Gewicht etwa 125 kg

- Die hohe Strombelastung der Batterien während der Kurzzeitzwischenladung hat keine nachteiligen Auswirkungen auf die Lebensdauer der Energiespeicher. Die Batterielebensdauer hat sich entgegen allen Vermutungen sogar wesentlich erhöht.
- Die Reduzierung des Gasungsvorganges am Ende der Ladung hat zu einer Verdoppelung der Wartungsintervalle und damit zur Senkung der Wartungskosten geführt.
- Die Energieabnahme aus dem Versorgungsnetz ist gegenüber der Batteriewechseltechnik um 10% gesenkt worden.

4.1 Speicherlebensdauer

Die Lebensdauer von Blei-Schwefelsäure-Batterien wird wesentlich durch die Lade-/Entladecharakteristik und im besonderen durch die Häufigkeit von Tiefentladungen beeinflusst. Von den Batterieherstellern wird daher empfohlen, nur 80% der jeweiligen Betriebskapazität zu entnehmen [1]. Durch die Kurzzeitzwischenladung wird sichergestellt, dass es im normalen Betriebsablauf nicht zu Tiefentladungen kommt, da nach jedem Linien-

umlauf eine Zwischenladung des Speichers erfolgt. Des weiteren wird durch den Einsatz mechanischer Elektrolytumwälzanlagen (Sprudeltechnik) eine über die ganze Zelle gleichmäßige Elektrolytdichte und -temperatur erreicht, so dass punktuelle Überbelastungen der Elektroden (thermisch oder elektrochemisch), die zu einer

Verkürzung der Speicherlebensdauer führen können, verhindert werden. Die darüber hinaus mittels eines Kühlwassersystems realisierte Elektrolytkühlung verhindert schädliche Übertemperaturen der Gesamt-Batterie.

Diese Massnahmen führten in Verbindung mit technischen Verbesserungen beim Separieren der Speicherelektroden [2] zu einer Verlängerung der Speicherlebensdauer von 60 000 km beim Betrieb mit Batteriewechseltechnik auf über 100 000 km bei der heutigen Betriebsart.

4.2 Energiebilanz

Bedingt durch die häufige Zwischenladung stellt sich bei der neuen Versorgungsart im Vergleich zur Wechseltechnik eine im Mittel um 10% höhere Spannungslage des Speichers ein. Trotz der hieraus resultierenden höheren Fahrdynamik – die von den Fahrern positiv aufgenommen und genutzt wird – sank der spezifische Netzenergieverbrauch um etwa 10%, während der spezifische Bruttostromengenverbrauch aus dem Speicher gleich blieb (Tab. II).

Ausschlaggebend für die Netzminderentnahme ist die Steigerung des Nutzbremgrades von 15% auf 26% (Nebenschlussmotor). Da weder die Einsatz- noch die Leistungsdaten der Fahrzeuge geändert wurden, ist dieser bessere Nutzbremseffekt nur durch die höhere Fahrdynamik sowie durch die höhere Ladeakzeptanz des Speichers zu erklären. Der Ladefaktor liegt, u.a. durch die Reduzierung der Gasung, um 8% niedriger.

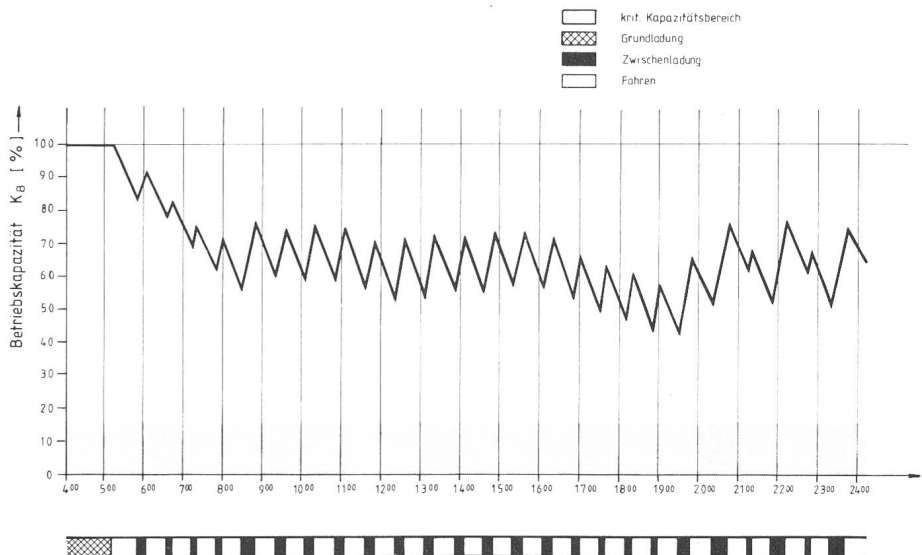


Fig. 6 Beispielhafter Kapazitätsverlauf bei Kurzzeitzwischenladung

Ergebnisse	Versorgungsart	Wechseltechnik	Kurzzeit-zwischenladung	Relative Veränderungen, bezogen auf Wechseltechnik
- spezifischer Brutto-Strommengenverbrauch aus der Batterie - Nebenschlussantrieb - Reihenschlussantrieb		5,83 Ah/km 6,37 Ah/km	5,97 Ah/km 6,30 Ah/km	+ 2,4% - 1,0%
- Nutzbremmsgrad - Nebenschlussantrieb - Reihenschlussantrieb		15,2% 12,0%	26,1% 19,7%	+ 72% + 64%
- spezifische Netto-Strommengenentnahme aus der Batterie - Nebenschlussantrieb - Reihenschlussantrieb		4,95 Ah/km 5,60 Ah/km	4,41 Ah/km 5,06 Ah/km	- 11% - 10%
- spezifischer Netz-Energieverbrauch - Nebenschlussantrieb - Reihenschlussantrieb		2,98 kWh/km 3,37 kWh/km	2,67 kWh/km 3,07 kWh/km	- 10,4% - 9,0%
- mittlerer Ladefaktor im Erfassungszeitraum		1,15	1,06	- 8%

Annuitätenmethode umgerechnet worden. Von den wichtigen Einflussgrößen wurde bei dieser Betrachtung die Speicher-Nutzungsdauer variiert, da die aktuellen Versuchsergebnisse erwarten lassen, dass die Fahrleistung der Blei-Schwefelsäure-Batterien beim Anwendungsfall Kurzzeitzwischenladung auf 120 000 Wagenkilometer steigt. In Fortsetzung dieses Trends sind in der vierten Säule die anzustrebenden Leistungsgrößen bezüglich eines neuen Batterieprinzips dargestellt.

Unter der Voraussetzung, dass die vorgegebenen Leistungsdaten erreicht werden können, ist mit einem spezifischen Kostensatz zu rechnen, der die Vergleichskosten des Oberleitungsombusses erkennbar unterschreitet.

Für den Kostenvergleich sind in erster Linie die Anlagen und Ausrüstungen für die Energieversorgung und den Energietransport von Bedeutung. Den Gleichrichterunterwerken und der zweipoligen Oberleitung beim Trolleybus stehen beim Batteriebus die Ladeeinrichtungen für die Nachtladung, die Zwischenladestationen und die Energiespeicher gegenüber. Dieser Kostenblock macht beim Trolleybus etwa 30% und beim Batteriebus zur Zeit 36% der Vergleichskosten aus. Das bedeutet, dass die Batterie zusammen mit den notwendigen Versorgungsanlagen heute noch teurer ist als die Trolleybus-Fahrleitung einschliesslich der Unterwerksanlagen.

Hinzu kommen die Kosten für den Batterietransport. Hier ist die Ent-

### 5. Kostenvergleich

Unter Zugrundelegung der betrieblichen Kenndaten und der Anlagenbemessung für die Versorgungsinfrastruktur auf der Versuchslinie 779 in Düsseldorf-Benrath sind Vergleichskosten für den Batterie- und den Trolleybus ermittelt worden. Kostenanteile, die für beide Betriebssysteme gleichartig und im gleichen Ausmass anfallen, wurden eliminiert, um den Vergleich übersichtlicher zu gestalten. Die Kostenrechnung stützt sich beim Batteriebus auf Ergebnisse von drei Versuchslinien, die folgende kostenbildende Faktoren der Einsatzfelder berücksichtigen:

- Vorortverkehr mit verdichteten Wohngebieten
- Überlandverkehr mit betonter Schwerpunktbedienung und ebenem Streckenverlauf
- Zubringerverkehre zu S- und Stadtbahnssystemen
- bergiger Streckenverlauf in gemischt erschlossenen Siedlungsgebieten.

Die ermittelten spezifischen Kosten sind daher geeignet, den Durchschnittswerten für Bussysteme mit vergleichbaren Verkehrsaufgaben gegenübergestellt zu werden. Es handelt sich dabei um Systemkosten, die die infrastrukturellen Anlagen für die Energie-

versorgung und den Energietransport mit einschliessen. Die Vergleichskosten für den Trolleybus wurden in Anlehnung an die Studie der SNV [3] ermittelt und beziehen sich auf ein modellhaftes Gesamtnetz.

Figur 7 zeigt eine Gegenüberstellung der Gesamtkosten pro Fahrzeugkilometer für beide Bussysteme. Dabei sind die Investitionen mit Hilfe der

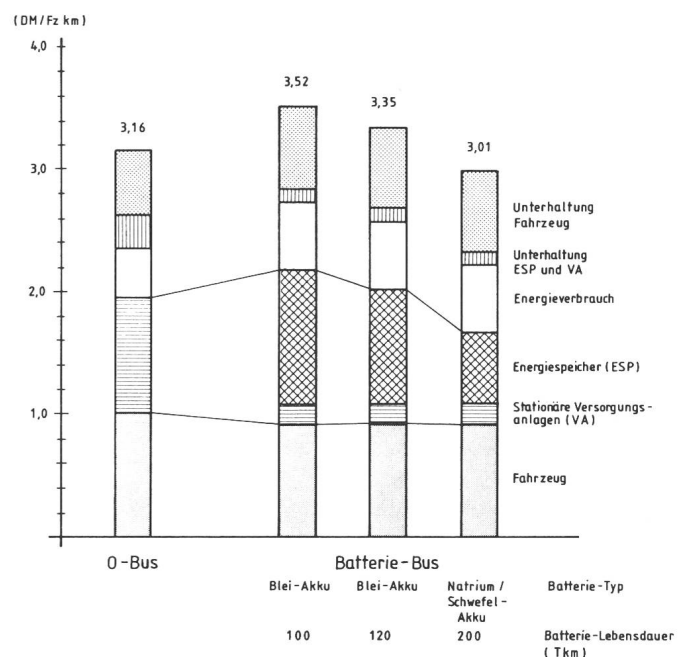


Fig. 7 Spezifische Systemkosten Trolleybus/Zwischenlade-Batteriebus



wicklung eines neuen Batteriebus-Fahrzeugkonzeptes aufzugreifen, das durch die Aufnahme der Batterie als konstruktiven Bestandteil des Fahrzeuges sowohl zur Beseitigung der betrieblichen Erschwernisse durch den Anhänger als auch zu einer Gewichtsreduzierung mit einer entsprechenden Senkung des Energieverbrauches führt.

Bezüglich der Energiekosten liegt der Batteriebus vor allem aufgrund der Wirkungsgradverluste durch die Batteriespeicherung trotz Bremsenergie-rückgewinnung über den Verbrauchswerten des Trolleybusses.

Bei den Aufwendungen für die Fahrzeugunterhaltung macht sich der höhere Reifenverbrauch infolge des grösseren Transportgewichts und des unwirtschaftlichen Antriebsbetriebes kostensteigernd bemerkbar. Die Unterhaltungskosten für die Energieversorgung und den Energietransport liegen beim Batteriebus wegen der fehlenden Oberleitungsanlagen niedriger.

Insgesamt belaufen sich die spezifischen Vergleichskosten beim Trolleybus auf 3,16 DM und beim Batteriebus auf 3,52 DM pro Wagenkilometer. Damit hat der Batteriebus bei gleichen Betriebsverhältnissen und Leistungen in seiner heutigen Versuchsversion noch etwas höhere Kosten als der Trolleybus.

Mit einer Batteriefahrleistung von 120 000 km würden sich die Vergleichskosten des Batteriebusses auf

3,35 DM und bei 200 000 km auf 3,01 DM reduzieren.

## 6. Perspektiven

Eine wirtschaftliche Aufwertung des Bleibatterie-Systems ist nur über die Lebensdauer und damit über die Gesamtfahrleistung zu erzielen. Da die Energiedichte dieser konventionellen Batterie mit wässrigem Elektrolyten ihre natürliche Grenze annähernd erreicht hat, bleiben wesentliche Verbesserungen in bezug auf Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Batteriebus-Systems somit neuartigen Batterietypen vorbehalten, wie sie sich seit Jahren in der Entwicklung befinden. Nach Aussage der Hersteller ist z.B. zum Ende dieses Jahrzehnts mit der Fertigung serienreifer Natrium-Schwefel-Batterien zu rechnen.

Ziel der Entwicklung neuer Batterietechnologien für Strassenfahrzeuge muss sein, die Energiedichte zu vervierfachen und die Lebensdauer mindestens zu verdoppeln. Wenn man vorläufig gleiche Herstellkosten für herkömmliche und neue Batterietypen unterstellt, würde hierdurch sowohl der Forderung nach grösserer Wirtschaftlichkeit (Gewichtsreduzierung, Lebensdauerverlängerung) als auch der nach grösserer Einsatzflexibilität (Reichweitenerhöhung) Rechnung getragen.

Die Betrachtungen zeigen, dass der Batteriebus noch eine weitere Ent-

wicklungsphase erfolgreich durchlaufen muss, wenn er gegenüber dem Trolleybus wirtschaftlich bestehen will. Hierfür ist eine neue Batterietechnologie wie auch ein kompaktes Fahrzeugkonzept erforderlich. Auf diese Weise können weitere kostensenkende Faktoren, die in der vorliegenden Rechnung noch nicht berücksichtigt wurden, wirksam werden.

Unter den genannten Voraussetzungen kann der Batteriebus im Rahmen des oben beschriebenen Einsatzspektrums eine realistische Alternative im Bereich der elektrischen Energieanwendung für Strassenfahrzeuge darstellen. In Hinblick auf die zunehmende Bedeutung des Umweltschutzes und die Notwendigkeit, auf lange Sicht einen leistungsfähigen Ersatz für erdölabhängige Verkehrsmittel bereitzustellen, sind dem Batterie-Elektrobus als modernem und zukunftsorientiertem Nahverkehrsmittel durchaus gute Anwendungschancen zu geben.

## Literatur

- [1] Dr. Ing. Rainer von Courbière: «Anforderungen an Traktionsbatterien für betriebstaugliche elektrische Strassenfahrzeuge und Wege zu deren Erfüllung» aus: «Energiewirtschaftliche Tagesfragen», Heft 12, Dezember 1983.
- [2] Dipl.-Ing. Eckhard Dietrich: «Batterieelektrischer Antrieb – absichernde Option für die Zukunft» aus: «nahverkehrs-praxis», Nr. 1/1984.
- [3] SNV – Studiengesellschaft Nahverkehr, ZENTRAS – Zuverlässiges Energieübertragungs-System für den Duo-Bus, Schlussbericht.