

Fortschreibung Studie Petrisberg (Trier)

***Sachstand moderne Antriebstechnik Bussysteme
und
Aktualisierung der Standardisierten Bewertung für
die Einführung eines innovativen Bussystems***



DB International GmbH
Niederlassung Süd

April 2009

Auftraggeber:

Stadtwerke Trier Verkehrs-GmbH
Ostallee 7-13
54290 Trier

Auftragnehmer:

DB International GmbH
Niederlassung Süd
Gartenstraße 82-84
76135 Karlsruhe
☎ 0721/ 93116 0

Inhaltsverzeichnis**Seite**

1	Vorbemerkung und Aufgabenstellung.....	4
2	Darstellung des aktuellen Standes der Busantriebstechnik im Zusammenhang mit einem dieselelektrischen Antrieb	8
2.1	Konzepte, Komponenten und Energiespeicher	8
2.2	Aktueller Entwicklungsstand der Bustechnologie (Hybrid-Antrieb, Energiespeicher, (Teil-) Elektrifizierung) bei ausgewählten Anbietern	16
2.3	Besondere Ausrüstungen.....	22
2.4	Umweltaspekte	24
2.5	Design und Ausgestaltung moderner Bussysteme.....	25
2.6	Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise	28
3	Vorschlag für ein Seilbahnsystem.....	30
3.1	Beschreibung.....	30
3.2	Bewertung.....	32
4	Aktualisierung der Kostenseite nach Standi 2006 (einschließlich Variante Seilbahn)	35
4.1	Allgemeine Vorgehensweise	35
4.2	Bussystem	36
4.3	Seilbahn	37
4.4	Ergebnisbetrachtung	38
5	Zusammenfassung und Empfehlung	41

1 Vorbemerkung und Aufgabenstellung

Zur Erschließung der Konversionsflächen auf dem Petrisberg wurde in 2003 ein Lösungsansatz mit einem spurgeführten und abschnittsweise mit Oberleitung ausgestatteten Bussystem nach dem Vorbild von Nancy (F) entwickelt.

Kernstück der Erschließung war der Neubau einer Bustrasse als neuen Aufstieg auf den Petrisberg (Abbildung 1-1). Damit konnte die Strecke deutlich verkürzt werden. Das Konzept umfasste folgende Teilstrecken:

- ☐ St. Medard - Innenstadt - Porta Nigra
- ☐ Porta Nigra - Hauptbahnhof - Petrisbergaufstieg - Belvedere
- ☐ Belvedere - Universität - BU 11

In einer Standardisierten Bewertung (Standi) wurde in 2003 der volkswirtschaftliche Nutzen mit einem Faktor von 2,49 nachgewiesen. Ergänzend dazu wurde 2003 auch eine Folgekostenrechnung erstellt.

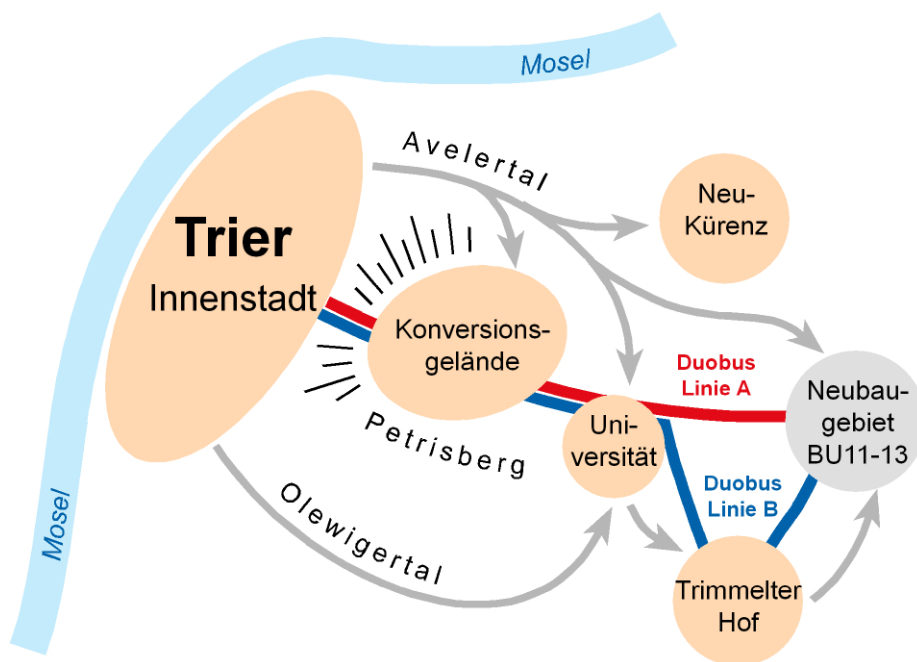


Abbildung 1-1: Erschließungskonzept aus 2003

Zwischenzeitlich haben sich einige technische Randbedingungen geändert:

- ❑ Das damals unterstellte System mit einer Spurführung nach dem System „Nancy“/ GLT wurde vom Hersteller nicht weiterverfolgt, u.a. wegen technischer Mängel
- ❑ Die Antriebstechnik für Busse im elektrischen Bereich einschließlich energetischer Kurzzeitspeicher wurde in wesentlichen Punkten weiterentwickelt, was eine Neubetrachtung der damaligen Ansätze rechtfertigt.

Ziel der jetzt vorliegenden Studie ist es, eine Betriebskonzeption zu finden, die die Erschließung des Petrisberges ermöglicht bei einer Reduzierung der Investitionskosten und möglicher Verbesserung der Energieeffizienz.

Hierzu waren zwei Arbeitspakete zu bearbeiten, deren Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden:

- ☐ Darstellung des aktuellen Standes der Busantriebstechnik im Zusammenhang mit einem (diesel) elektrischen Antrieb (siehe Kapitel 2)
- ☐ Betrachtung einer Variante für eine Seilbahnverbindung (siehe Kapitel 3)
- ☐ Aktualisierung der Kostenseite und Aktualisierung des Nutzen-Kosten-Faktors nach Standi 2006 (siehe Kapitel 4)

Kernaufgabe bei allen Überlegung ist die Überwindung des Petrisberges mit einer Höhendifferenz von ca. 110 m auf einer Länge von nur 1,6 km wodurch sich eine kontinuierlich Steigung von bis zu 13 % ergibt (Abbildung 1-2).

Da dadurch für die Hochfahrt ein hoher Energiebedarf auftritt und bei der Abwärtsfahrt Bremsenergie anfällt, bietet es sich an, ein System mit Energiespeicher zu installieren. Idealerweise wird ein elektrisches Antriebssystem anstelle einer Wärmekraftmaschine implementiert, da hier Energie auf einfache Weise gespeichert und bei Bedarf wieder abgerufen werden kann.

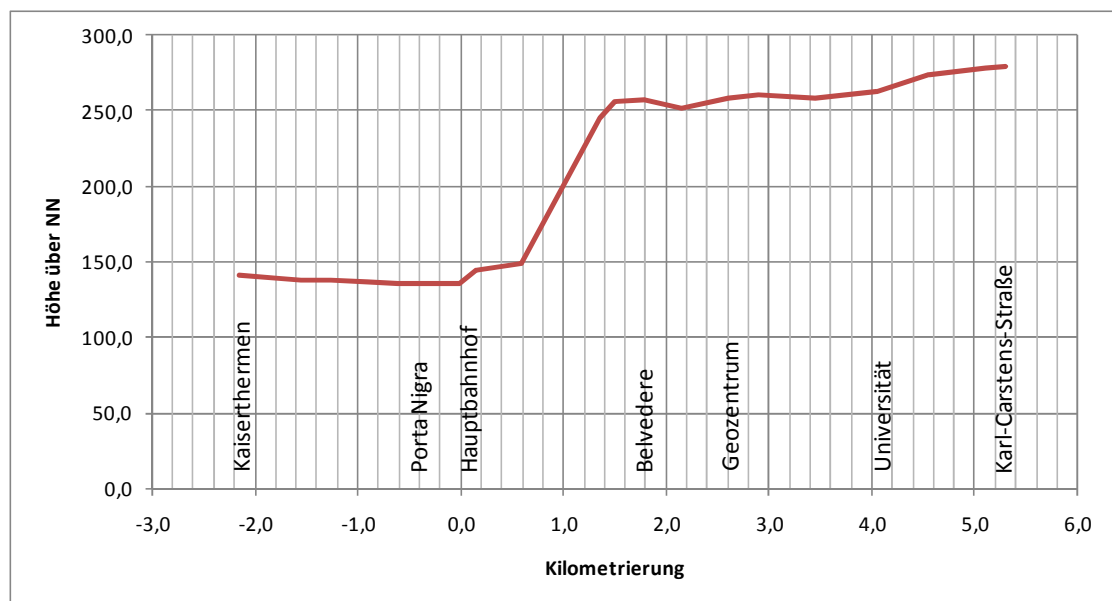


Abbildung 1-2: Gradiente Bustrasse

Als Alternative für ein Bussystem liegt ein Vorschlag für eine Erschließung des Petrisberges mit einer Seilbahn vor. Dieses System folgt im Wesentlichen der Bustrasse von der Porta Nigra bis zum Wohngebiet Tarforst mit 4 Zwischenhaltestellen.

Aufbauend auf die vorliegende Standardisierte Bewertung werden sensitiv die in Tabelle 1-1 aufgeführten Mitfälle untersucht. In Abbildung 1-3 ist die Linienführung

skizziert. Der Mitfall 2 entspricht dem gleichnamigen Mitfall aus 2003, hier wurden lediglich die Kostensätze fortgeschrieben. Die Mitfälle 2a bis 3 beinhalten auch einen Hybridbus statt einem Duobus und verzichten auf die Spurführung. In den Mitfällen 3a bis 3c wird die eigene Trasse auf den Abschnitt Porta Nigra – Belvedere (Konversionsgelände) begrenzt, der Mitfall 3b verzichtet ganz auf eine Oberleitung, während im Mitfall 3c die Energieversorgung induktiv über eine Kabeltrasse in der Fahrbahn erfolgt (nähere Erläuterung siehe auch Kap. 2.3.2). Durch die Wahl der Mitfälle kann die Elastizität des Ergebnis aufgezeigt werden.

Der Mitfall 4 beschreibt ein Seilbahnsystem, das in Kapitel 3 näher beschrieben wird.

Da Erdgas- und Flüssiggasmotoren hier wie Dieselmotoren arbeiten, werden sie in der weiteren Betrachtung nicht aufgeführt. Brennstoffzellen sind wie unidirektionale Energiespeicher zu betrachten und werden daher ebenfalls nicht weiter erörtert.

	Beschreibung	Fahrzeug
Mitfall 2 (aus 2003)	abschnittsweise Spurführung mit Oberleitung (Kosten 2003)	Duobus mit Oberleitung und Spurführung
Mitfall 2a	abschnittsweise mit Oberleitung (Kosten 2008)	Trolley-Hybridbus
Mitfall 3a	abschnittsweise mit Oberleitung (Kosten 2008)	Trolley-Hybridbus
Mitfall 3b	ohne externe Energieversorgung (Kosten 2008)	Hybridbus
Mitfall 3c	mit induktiver Energieübertragung (Kosten 2008)	Hybridbus mit induktiver Energie- übertragung
Mitfall 4	Seilbahn (Kosten 2008 ohne Anpassung Nutzen)	-

Tabelle 1-1: Untersuchte Mitfälle für Studie Petrisberg

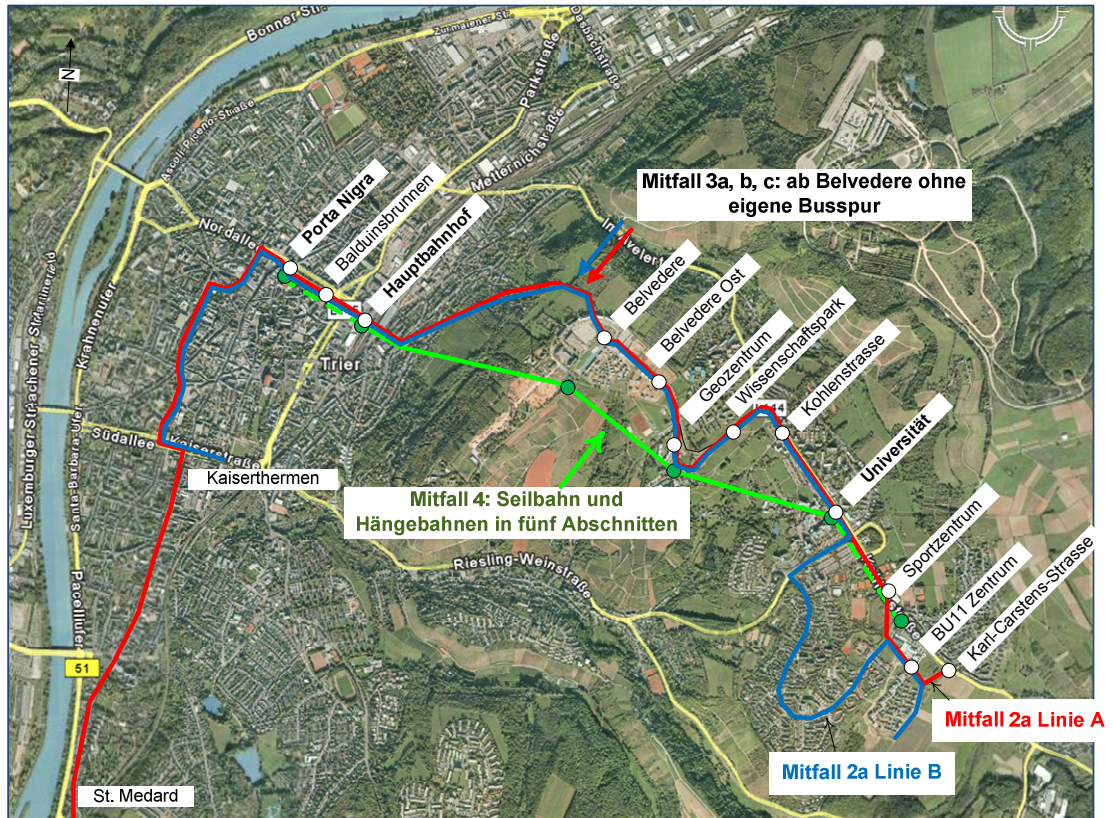


Abbildung 1-3: Übersicht Mitfälle¹

¹

Google Earth und eigene Bearbeitung

2 Darstellung des aktuellen Standes der Busantriebs- technik im Zusammenhang mit einem diesel- elektrischen Antrieb

Die aktuellen Entwicklungen in der Busantriebstechnik werden in diesem Kapitel vorgestellt. Zum besseren Verständnis werden zuerst Konzepte, Komponenten und Begriffe kurz erläutert. Zusammenfassend werden Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt und eine Wertung vorgenommen.

2.1 Konzepte, Komponenten und Energiespeicher

2.1.1 Fahrzeugkonzepte

Bus ist nicht gleich Bus. Es gibt Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebssystemen, Energiespeichern und Energiequellen. Einige ausgewählte Merkmale der unterschiedlichen Antriebssysteme sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Dieselantrieb	Elektrischer Antrieb
<ul style="list-style-type: none"> • Bewährte Konstruktion (u.a. für Personal, Werkstätten) • Geringeres Fahrzeuggewicht • Keine Energierückgewinnung • Lokale Emissionen • Gewicht des Energiespeichers ist verbrauchsabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestaltungsfreiheit (Barrierefreiheit) im Fahrzeug wegen entfallendem Antriebsstrang (nur bei Radnabenmotoren) • Einfache Energierückgewinnung mit Energiespeicher / Oberleitung, damit höherer Wirkungsgrad • Geringe / keine (lokale) Emissionen • Hohe Anzugskraft • Wartungsarm und langlebig

Tabelle 2-1: Merkmale von Dieselantrieb und elektrischen Antrieb

Dieselbus	Duobus	Hybridbus mit Supercap	Hybridbus mit Batterie	Trolleybus	Trolley-Hybrid
Dieselantrieb (ca. 260 kW)	Dieselantrieb (ca. 260 kW) elektrischer Antrieb	Diselektrischer Antrieb (ca. 180 kW Diesel)	Diselektrischer Antrieb (ca. 180 kW Diesel)	elektrischer Antrieb	Diselektrischer Antrieb (ca. 180 kW Diesel) bzw. elektrischer Antrieb
		Energiespeicher	Energiespeicher	Energiespeicher/ Rückspeisung Netz	Energiespeicher
-	Oberleitung	-	-	Oberleitung	Oberleitung
-	Spurführung	-	-	-	-

Tabelle 2-2: Fahrzeugarten

Zur besseren Darstellung und Unterscheidung sind die verschiedenen Fahrzeugarten in Tabelle 2-2 mit ausgewählten Charakteristika dargestellt und werden anschließend beschrieben:

☐ **Dieselbus**

Klassischer Bus mit Diesellaggregat und mechanischem Getriebe.

☐ **Duobus**

Ein Duobus ist ein Omnibus, der über zwei Antriebssysteme verfügt (bimodaler bzw. hybrider Betrieb). Der Duobus hat neben einer elektrischen Ausrüstung zusätzlich einen Dieselmotor, der die volle Antriebsleistung erbringt. Neben der Stromversorgung durch eine Oberleitung ist auch eine in den Boden eingelassene Stromversorgung möglich.

Der Duo-Bus kann auf ausgebauten und mit Fahrleitung ausgestatteten Strecken, z. B. auch in den Stadtzentren die Vorteile des elektrischen Antriebs nutzen. Er verfügt bei elektrischem Antrieb über hohe Beschleunigung, keine Abgasemissionen, geringe Lärmbelastung, während er am Stadtrand mit Dieselantrieb flexibel nahezu beliebige Streckenführungen befahren kann. Ein weiterer Vorteil ist die Redundanz, d.h. bei Ausfall des elektrischen Systems durch Schäden am Stromabnehmer oder Netzausfall, kann weiter gefahren werden.

Ein Nachteil des Duobusses ist, dass er über ein vollwertiges Diesellaggregat verfügen muss, was das Fahrzeuggewicht erhöht.

☐ **Hybridbus**

Diese sind, ähnlich wie die Duobusse mit zwei Antriebssystemen ausgestattet. Sie verfügen über einen Dieselmotor, Generator, Elektromotoren und zusätzlich über ein Stromspeichersystem. Der Hybridantrieb in der Kombination mit einem Energiespeicher ermöglicht die Speicherung von Bremsenergie oder überschüssiger Antriebsleistung des Dieselantriebs, eine intelligente Steuerung sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Leistung. Die Hybridtechnologie ermöglicht eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger Reduzierung von Stickoxiden (bis 39 %²) und Feinpartikeln (51 - 97%³).

Der Hybridbus verfügt gegenüber einem konventionellen Bus über ein deutlich

²
³ „Hybrid-Bus: Auf Linie gebracht“ Süddeutsche Zeitung vom 14.4.2007)
ebenda

reduziertes Diesellaggregat. Bei erhöhtem Leistungsbedarf erfolgt eine Unterstützung über einen Energiespeicher. Dies kann eine Batterie oder auch ein Supercap - Erläuterung siehe unten - sein. Über die Generatoreinheit kann beim Bremsen Energie in den Speicher zurückgeladen werden.

Ein Stadtbuss verkehrt im Wesentlichen im Stopp-and-Go-Verkehr. Dadurch gibt es genügend Gelegenheiten die Bremsenergie durch Speicher zurückzugewinnen, also ideale Voraussetzungen für ein Hybridfahrzeug. Der Hybridbus kann die rückgewonnene Energie nach jedem Halt zum rein elektrischen Anfahren nutzen, erzeugt dabei keine Emissionen und wenig Lärm. Der Dieselmotor muss erst wieder eingreifen, wenn die Energiespeicher Nachschub benötigen.

Bei den Hybridbussen gibt es zwei unterschiedliche Antriebstechnologien:

– **Paralleler Hybrid**

Im Pkw-Bereich gibt es seit einiger Zeit hybride Antriebstechnologie, z. B. Toyota Prius, die bereits serienreif entwickelt wurden und auf dem Markt verfügbar sind. Beim Parallelhybrid arbeiten Verbrennungsmotor und Elektromotor zusammen und wirken über ein gemeinsames Getriebe auf die Antriebsräder (Schema siehe Abbildung 2-6).

– **Serieller Hybrid**

Grundlage ist ein elektrischer Antrieb. Der Dieselmotor übernimmt die Funktion eines Generators und speist die elektrischen Energiespeicher, aus denen sich wiederum die Elektromotoren nach Bedarf bedienen. Den eigentlichen Antrieb übernehmen Elektromotoren (Schema siehe Abbildung 2-7).

Beim seriellen Hybrid ist der Antriebsmotor getrennt vom Diesel, womit das Automatikgetriebe entfallen kann und z. B. durchgängig barrierefreie Fahrgasträume durch die entfallenden Achsen erstellt werden können. Der kleinere Dieselmotor ermöglicht eine Gewichtseinsparung von ca. 500 kg. Allerdings erhöht sich das Gesamtgewicht u. a. durch die Energiespeicher um rund eine Tonne. Beim seriellen Hybrid ist es zusätzlich sinnvoll die übrigen Komponenten und Nebenaggregate des Fahrzeuges elektrisch anzutreiben.

□ **Trolleybus**

Der Trolleybus, auch als Oberleitungsbus bzw. Obus bezeichnet, ist eine Mischform zwischen einer spurgebundenen Bahn (Eisenbahn oder Straßenbahn) und einem Omnibus. Dies macht sich auch juristisch bemerkbar. So gilt beispielsweise in Deutschland für den Betrieb von Oberleitungsbussen sowohl die Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab) als auch die Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft).

Der Trolleybus erhält seine Energie über eine (zweipolige) Oberleitung (Abbildung 2-1). Eine Besonderheit ist die Ausführung der Trolleybusse mit einer doppelten Isolierung.



Abbildung 2-1: Beispiel für eine Trolleybus-Oberleitung (Salzburg)

☐ **Trolley-Hybridbus**

Der Trolley-Hybridbus vereint die verschiedenen Ideen eines Antriebes in sich wie

- Elektrischer (serieller) Antrieb,
- Externe Energieversorgung über Oberleitung
- Energiespeicher
- Leistungsfähiges Dieselaggregat (vergleichbar mit seriellem Hybrid)

Damit wurde ein für unterschiedliche Einsatzarten geeignetes, aber auch teures Fahrzeug geschaffen. Es können elektrifizierte und nicht-elektrifizierte Strecken befahren werden und die Vorteile des elektrischen Antriebes genutzt werden.

Ergänzend dazu gibt es noch verschiedene Bezeichnungen für Bustypen, die sich auf die Bauform beziehen und über unterschiedliche Antriebstechnologien verfügen:

☐ **Doppelgelenkbus**

3-teiliges Fahrzeug mit ca. 24 m Gesamtlänge auf der Basis eines Gelenkbusses, aber dreiteilig mit vier Achsen. Derzeit erfolgt eine Zulassung nur mit Ausnahmegenehmigung. Regelbetrieb u. a. in Hamburg, Aachen sowie als „LighTram“ in verschiedenen Schweizer Städten.

☐ **LighTram**

Das LighTram ist ein vierachsiger Doppelgelenkbus, der als Oberleitungsbus und als Hybridbus mit seriellem Hybridantrieb angeboten wird. Die Karosserie wird von Carrosserie Hess produziert, die Antriebstechnik von Vossloh-Kiepe. Das Fahrzeug ist 24,7 Meter lang, 24,6 t schwer und durchgängig niederflurig. Von den vier Achsen (zwei im vorderen Busteil, je eine in jedem Gelenkteil) werden die 2. und 3. angetrieben, neben der 1. ist auch die 4. Achse lenkbar.

Die Variante als Oberleitungsbus wird in Genf, Luzern, St. Gallen und Zürich eingesetzt.



Abbildung 2-2: Doppelgelenkbus mit Hybridantrieb, hier als LightTram⁴

Die Antriebssysteme „Diesel“ und „Elektrisch“ unterscheiden sich in einigen wesentlichen Punkten, wie sie in Tabelle 2-1 aufgeführt sind.

Bei der Installation eines elektrischen Systems, egal ob mit Infrastruktur oder nur elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, erfordert entsprechend ausgebildetes Personal.

Für Straßenfahrzeuge wird üblicherweise Gleichspannung mit 600 V verwendet.

Eine Voraussetzung für einen energieeffizienten Einsatz eines modernen Verkehrssystems ist die Speicherung der Bremsenergie und der spätere Abruf beim Beschleunigen. Dabei können folgende Energiespeicher zum Einsatz kommen:

❑ Akkumulatoren / Batterien

Akkumulatoren haben eine hohe Lebensdauer, sind zuverlässig und preisgünstig. Sie haben aber ein hohes Gewicht und nur eine geringe Energiedichte. In Fahrzeugen haben sie sich aber bewährt. Eine höhere Energiedichte haben Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Ihre Selbstentladung ist gering, es können aber keine nichtwässrigen Lösungen verwendet werden, was im Handling nicht immer ganz einfach ist.

❑ Kondensatoren (Supercap / Ultracap)

Doppelschicht-Kondensatoren, auch elektrochemische Doppelschicht-Kondensatoren (engl. electrochemical double layer capacitor - EDLC) oder Superkondensatoren genannt, mit den Markennamen Goldcaps, Supercaps, BoostCaps oder Ultracaps, haben die größte Energiedichte aller Kondensatoren. Ihre hohe Kapazität basiert auf der Dissoziation von Ionen in einem flüssigen Elektrolyt, die ein Dielektrikum von wenigen Atomlagen bilden, und einer großen Elektrodenoberfläche. Es sind, wie Elektrolytkondensatoren, gepolte Bauelemente. Es handelt sich aber nicht um Elektrolytkondensatoren.

Durch die lange Lebensdauer (in Ladezyklen) eignen sich Doppelschicht-Kondensatoren als Ersatz für Akkumulatoren, wenn eine hohe Zuverlässigkeit und ein häufiges Laden und Entladen gefordert wird. Die Kondensatoren können im Vergleich zu Akkumulatoren deutlich schneller geladen werden und erhöhen somit die Verfügbarkeitszeit der Geräte. Ein weiterer Vorteil der Doppelschicht-Kondensatoren gegenüber Akkumulatoren ist das sehr einfache Ladeverfahren; bei Anlegen einer konstanten Spannung ist kein Überladen und kaum Ladestromüberschreitung möglich.

❑ Schwungrad (Flywheel)

Die Bremsenergie wird in Form von Rotationsenergie gespeichert und kann beim Anfahren wieder genutzt werden. Im Bus-, aber auch im Bahnbereich, werden derzeit keine Konzepte verfolgt, die mittelfristig einen Praxiseinsatz im ÖPNV erwarten lassen. Daher wird das Schwungrad hier nicht weiter behandelt.

Die verschiedenen Energiespeicher unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Energiedichte und ihrer Leistungsdichte. So haben Bleibatterien eine hohe Energiedichte, aber können mit der geringeren Leistungsdichte nur begrenzt die Leistung wieder abgeben. Sie eignen sich dann eher für eine geringe Energieabgabe über eine längere Laufzeit. Bei Supercaps verhält es sich genau umgekehrt. Die Li-Ion-Akkumulatoren liegen dazwischen, eher mit der Charakteristika einer Batterie. Wie sich die einzelnen Speicher verhalten ist der Abbildung 2-3 zu entnehmen.

Bei Anwendungen, in denen die hohe Energiedichte eines Akkumulators unverzichtbar ist, können die Doppelschichtkondensatoren zwar nicht als Ersatz verwendet werden, aber in Kombination mit Akkumulatoren lassen sich deutliche Gewichtseinsparungen und Verlängerung von Lebensdauern erreichen. Hybridfahrzeuge sind aus diesem Grund bereits jetzt teilweise mit Doppelschichtkondensatoren ausgestattet, um die Akkus bzw. den Verbrennungsmotor zu puffern.

Für die Bewertung der Life-Cycle-Kosten eines Energiespeichers zählt die Zahl der möglichen Ladezyklen. Ein Bus im städtischen Linienverkehr hat pro Jahr ca. 150 bis 250.000 Anfahr- und Bremszyklen. Entsprechend werden die Energiespeicher belastet und ihre Lebensdauer bestimmt. Bei Batterien wird die Lebensdauer durch eine geringe Teilentladung verlängert. Beispielhaft sind die Ladezyklen in Abbildung 2-4 gegenübergestellt. Eine Beispielrechnung für Batterie und Supercap wurde von der Fa. Vossloh für den Anwendungsfall Trier durchgeführt (Tabelle 2-3).

Es gilt, dass

- ❑ Akkumulatoren (Batterien)
 - große Energiemengen speichern
 - aber nur geringe Leistung abgeben / aufnehmen,
- ❑ Kondensatoren
 - nur begrenzte Energiemengen speichern
 - aber hohe Leistung abgeben / aufnehmen.

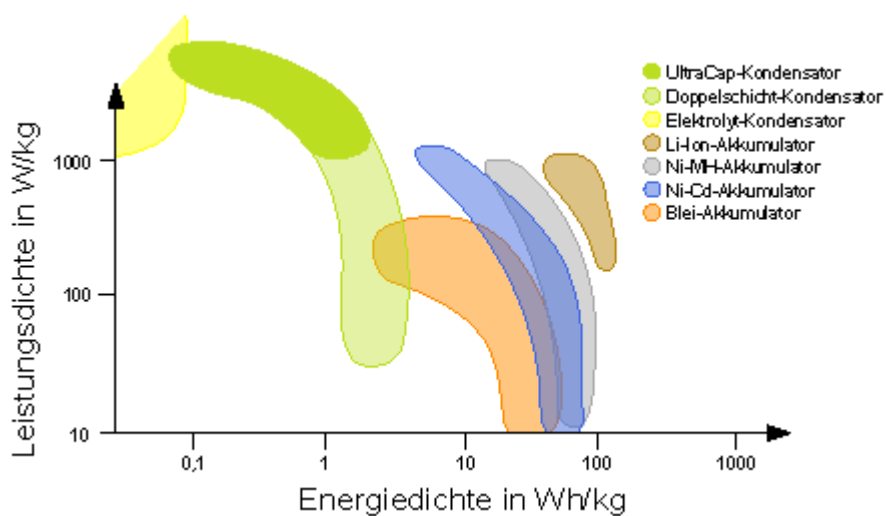


Abbildung 2-3: Vergleich der Leistungs- und Energiedichten von Energiespeichern⁵

⁵

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Energiespeicher2.svg&filetimestamp=20080707111846>

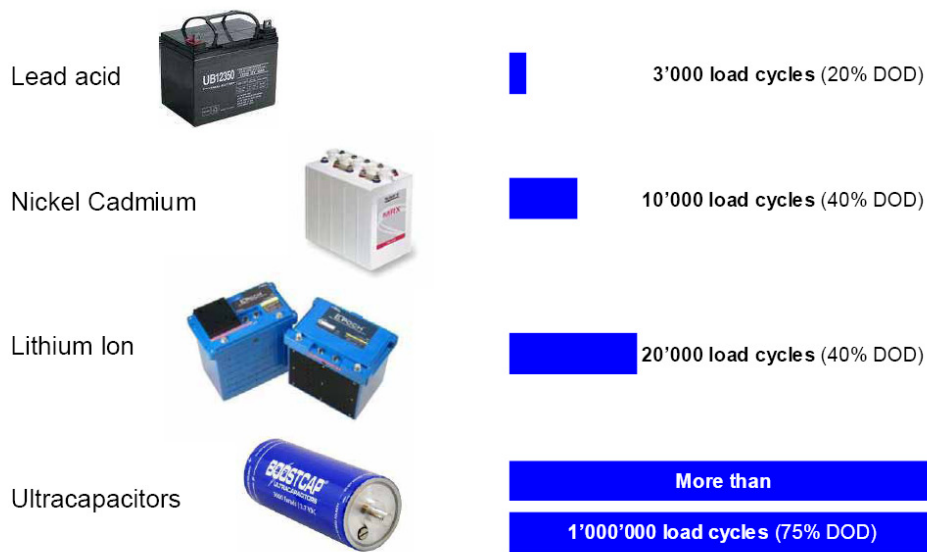


Abbildung 2-4: Ladezyklen verschiedener Energiespeicher⁶

	Batterie	Supercap
Lebenserwartung	30 000 Zyklen bei 30% Kapazitätsnutzung per Zyklus	2,1 Millionen Zyklen
Stromaufnahme beim Bremsen; 100% = 350 A	Ca ¼ des Bremsstrom,	Voller Bremsstrom
Vermutete Lebenserwartung für Trier	4,3 Jahre , wenn man nur die Belastung durch die Steigung von Hauptbahnhof nach Belvedere berücksichtigt. Da die Batterie bei jeder Haltestelle aktiv wird, müsste deshalb die Lebenserwartung noch kürzer ausfallen.	9 Jahre

Tabelle 2-3: Beispielrechnung für Batterie und Supercap für Anwendungsfall Trier⁷

⁶ Quelle: Maxwell Technologies
⁷ Quelle/ Darstellung: Vossloh-Kiepe

2.1.2 Sonstige Komponenten und Begriffe

Zur Abrundung der Zusammenstellung sind noch einige wichtige Komponenten und Begriffe im Zusammenhang mit einem elektrischen Fahrzeugantrieb zu erläutern:

❑ **Energiemanager**

Der Energiemanager regelt die Energieflüsse zwischen Generator, Energiespeicher und Traktionsmotor.

❑ **Brennstoffzellen**

Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, die die chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie wandelt. Im Sprachgebrauch steht Brennstoffzelle meist für die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle. Eine Brennstoffzelle ist kein Energiespeicher sondern ein Energiewandler. Die Energie zur Stromproduktion wird mit den Brennstoffen zugeführt⁸.

Die Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen. Beim Citaro könnte z. B. der Dieselmotor durch eine Brennstoffzelle ersetzt werden. Alle übrigen Komponenten wie Energiespeicher oder Elektromotoren könnten dann einfach übernommen werden.

❑ **Radnabenmotor**

Beim Radnabenmotor sitzt der Antrieb direkt im Rad. Pro Achse gibt es 2 Motoren. Ein Getriebe entfällt. Ein Vorteil des Radnabenmotors ist das geringere Gewicht, die bessere Zugänglichkeit sowie eine bessere Gewichtsverteilung, was besonders im Bus notwendig ist.

2.2 **Aktueller Entwicklungsstand der Bustechnologie (Hybrid-Antrieb, Energiespeicher, (Teil-) Elektrifizierung) bei ausgewählten Anbietern**

Im Rahmen der Studie wurden die Unterlagen verschiedener Anbieter von modernen Bussystemen auf der Basis von Hybrid, Duo- und Obussen ausgewertet. Zusätzlich gab es Interviews mit den Herstellern Mercedes-Benz, Vossloh-Kiepe und Viseon.

⁸

<http://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzelle>

2.2.1 Mercedes-Benz

Von Mercedes-Benz wurde für den Stadtverkehr auf der Basis des Citaro ein Antriebskonzept entwickelt, das langfristig ein emissionsfreies Fahrzeug („Zero Emission Vehicle“) ermöglicht. Es wird der Charakteristik des Stadtverkehrs mit kurzen Haltestellenabständen und häufigem Beschleunigen und Abbremsen Rechnung getragen. Das Konzept des seriellen Hybrid enthält auf der Basis eines 18 m-Zuges folgende Komponenten:

- ☐ E-Antrieb mit Radnabenmotoren (4x) auf allen ungelenkten Rädern, die auch als Generatoren wirken
- ☐ Energiespeicher (Li-Ionen)
- ☐ Dieselaggregat (mit reduzierter Leistung von 260 auf 160 kW und damit verbundener Gewichtseinsparung von ca. 500 kg) mit Motormanagement im optimalen Bereich

Die Anordnung der Komponenten beim Citaro Hybrid entspricht der Abbildung 2-5. In der Abbildung 2-6 ist die Komponentenverteilung dargestellt.

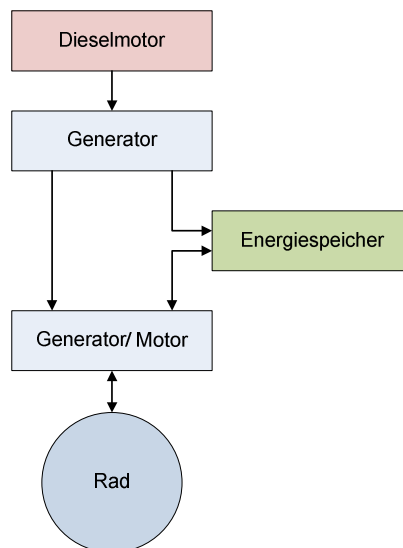


Abbildung 2-5: Anordnung der Komponenten beim Citaro Hybrid (Beispiel für Seriellen Antrieb)

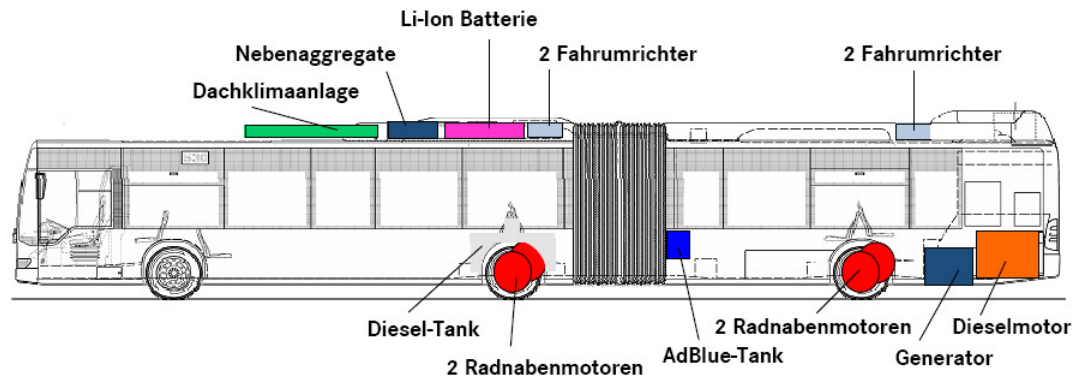


Abbildung 2-6: Komponentenverteilung bei Hybridbus Citaro⁹

2.2.2 Solaris Urbino 18 Hybrid

Solaris verwendet für Ihren Hybridbus ein System mit parallelem Antrieb und ein Getriebe von Allison Transmission, das sich bereits in den USA bewährt hat. Ein besonderes Getriebe führt den elektrischen und den mechanischen Strang zusammen. Zur Optimierung ist eine besondere Steuerung vorgesehen, die den Hybridantrieb steuert und das Zusammenwirken der einzelnen Fahrzeugkomponenten koordiniert.

Als Energiespeicher dient eine Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH) mit einem Gewicht von 437 kg und einer erwartenden Nutzungsdauer von 6 Jahren.

Der Dieselmotor verfügt über 178 kW. Bestandteil des Hybridsystems ist ein Dual Power Inverter Modul (DPIM), das aus zwei Umrichter-Modulen besteht und ca. 75 kg wiegt.

Die Anordnung der Komponenten entspricht der Abbildung 2-7. In der Abbildung 2-8 ist die Komponentenverteilung dargestellt.

⁹

Mercedes Benz

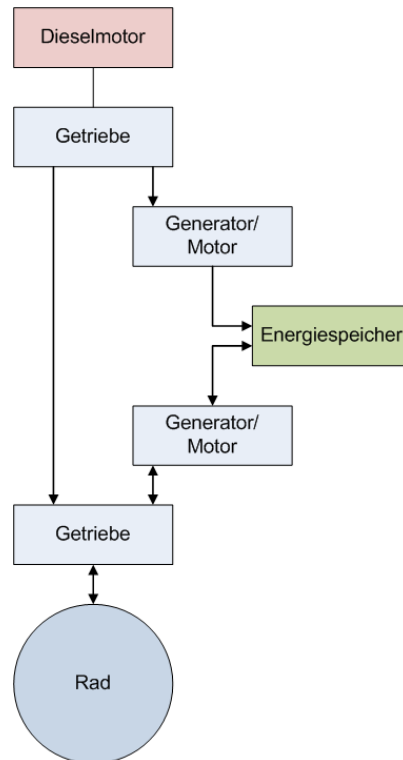


Abbildung 2-7: Anordnung der Komponenten beim Solaris Urbino Hybrid (Beispiel für parallelen Antrieb)

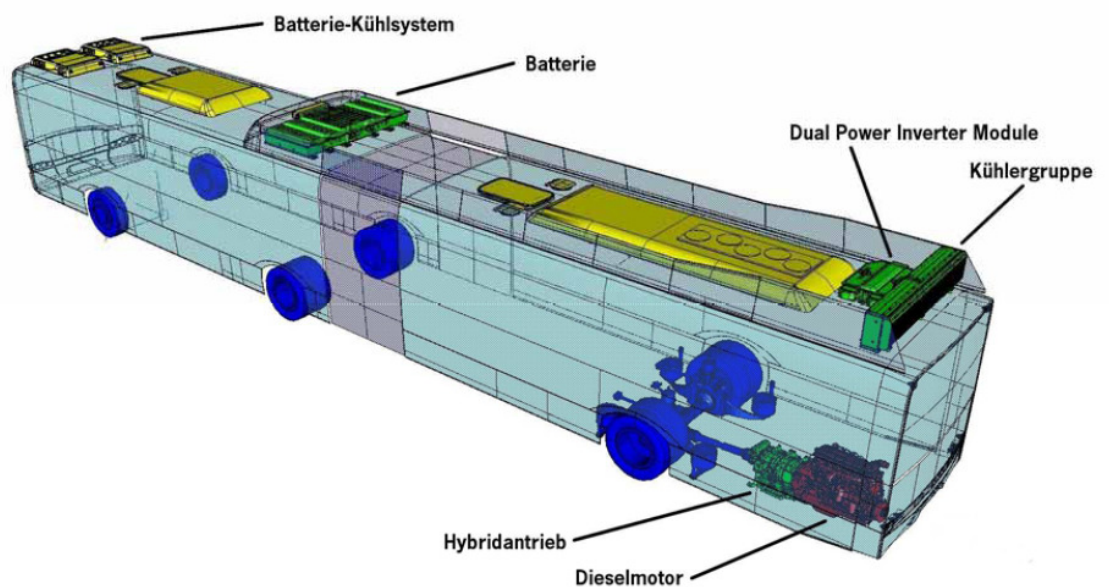


Abbildung 2-8: Komponentenverteilung beim Solaris Hybrid¹⁰

¹⁰ Solaris

2.2.3 Vossloh-Kiepe

Die Firma Vossloh-Kiepe ist ein Hersteller von elektrischen Komponenten für städtische Verkehrssysteme, insbesondere Busse und Straßenbahnen. Die Komponenten werden in Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller eingebaut. Eine Spezialität sind 24 m Hybridbusse (siehe Kap. 2.1.1) und Doppelgelenkbusse (z. B. für Zürich).

Von der Fa. Vossloh wurden die in Kap. 4.4 dargestellten Energieverbräuche auf der Basis von Fahrzyklen ermittelt. Eine Simulation der Strecke Kaiserthermen - Karl-Carstens-Straße (Linie A) ergab folgende Ergebnisse:

- ☐ Energierückspeisung beträgt beim Trolleybusbetrieb 25 % (Hinfahrt) bzw. 75 % (Rückfahrt)
- ☐ Die Bergfahrt erfolgt beim Trolleybus mit 22 km/h statt mit 18 km/h beim Dieselbus (260 kW)
- ☐ Ein Hybridbus (mit 180 kW Diesel, aber ohne externe Energieversorgung wie Oberleitung) würde bei der Bergfahrt 18 km/h (mit Batterie) bzw. 12 km/h (Supercap) erreichen
- ☐ Ein (neuer) Trolley-Hybrid kann die Fahrleistung eines Trolleybuses erreichen (maximale Achslasten erfordern ein 18 m oder 20 m-Fahrzeug)

Die Simulation hatte gezeigt, dass ein Supercap alleine als Energiespeicher nicht ausreicht. Dieser würde sich bei der Bergfahrt zu schnell entladen, so dass die überwiegende Fahrstrecke im reinen Dieselbetrieb erfolgen würde. Umgekehrt würde bei der Talfahrt der Speicher sehr schnell gefüllt werden, ein großer Teil der Bremsenergie müsste dann über Widerstände vernichtet werden.

Die elektrische Ausrüstung verbunden mit Energiespeichern bringt gegenüber einem Dieselbus mehr Gewicht auf die Waage. Zur besseren Achslastverteilung ist ein 4-achsiges Fahrzeug günstig, dies könnte auch ein 20 m-Gelenkbus (z. B. mit hinterer Doppelachse) sein, idealerweise ein 24 m Doppelgelenkbus, sofern dies vom Fahrgastaufkommen wirtschaftlich vertretbar ist.

2.2.4 Viseon

Viseon ist eine Ausgründung von MAN und hat sich unter anderem auf Busse mit elektrischem Antrieb konzentriert. Ein Produkt ist der „digitaler Trolleybus“, ein Trolleybus ohne Fahrdraht, dessen Energiespeicher z. B. an Haltestellen aufgeladen wird oder nach einem System wie in Kap. 2.3.2 beschrieben. Die Betriebsmöglichkeiten zeigt Abbildung 2-9.

Die Funktionsweise eines Hybriden wird in Abbildung 2-10 dargestellt.

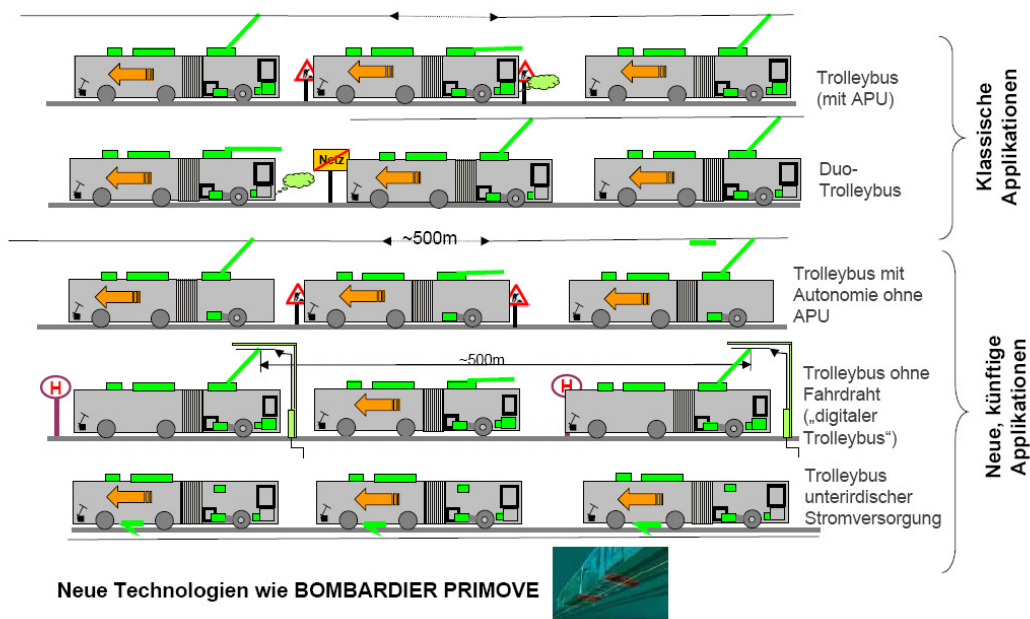


Abbildung 2-9: Betriebsmöglichkeiten¹¹

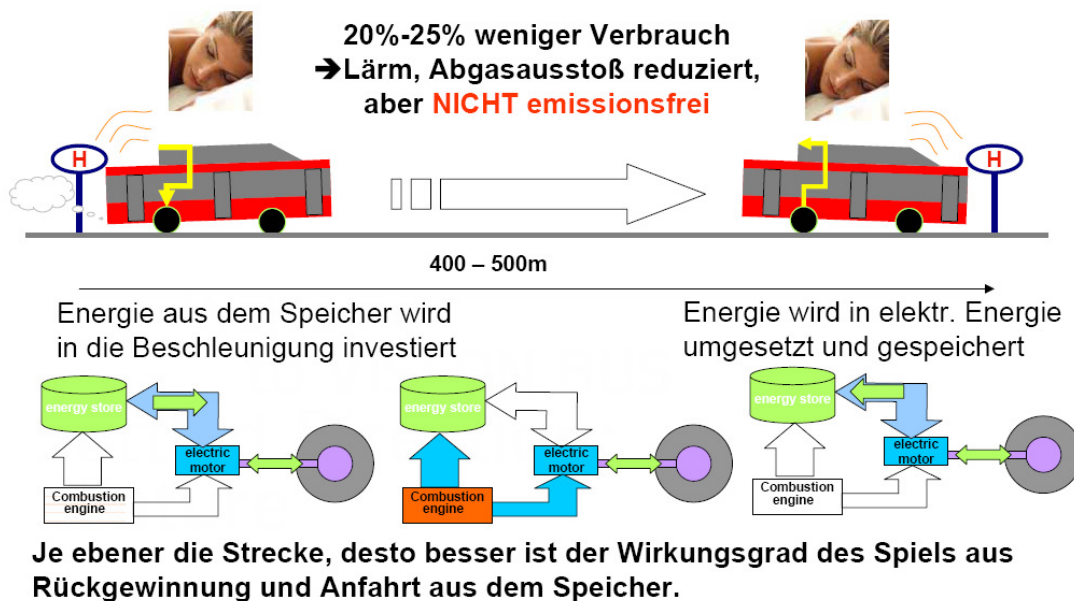


Abbildung 2-10: Funktionsweise des hybriden Antriebsstranges im Stadtverkehr¹²

¹¹ Quelle: Vison
¹² Quelle: Vison

2.3 Besondere Ausrüstungen

2.3.1 Mechanische und optische Spurführung

Von Mercedes-Benz wurde in den 80er Jahren des Jahrhunderts ein System der mechanischen Spurführung entwickelt. Heute noch in Betrieb sind Abschnitte in Mannheim und Adelaide (AUS). Das Prinzip hat sich nicht weiter durchgesetzt, u. a. auch weil die erhofften Einsparungen bei der Infrastruktur nicht realisiert werden konnten.

Das System des GLT wie es in Nancy (F) mit einer zwischen den Rädern und in der Straße versenkten Leitschiene gebaut wurde, hat sich nicht bewährt, es ist laut und immer wieder gab es folgenschwere Entgleisungen. Das System wird nicht weiterentwickelt.

Um doch noch die Vorteile einer reduzierten Fahrbahnbreite mit Hilfe einer Spurführung realisieren zu können, aber auf die Nachteile der mechanischen Spurführung verzichten zu können, wurde eine optische Spurführung entwickelt.

Die Vorteile einer Spurführung konnten bisher nicht überzeugen.

2.3.2 PRIMOVE: leitungsfreie Energieversorgung von Bombardier¹³

Das System PRIMOVE stellt eine kontaktlose Energieübertragung dar. Eine Oberleitung ist nicht nötig, vielmehr erfolgt die Energieübertragung kontaktlos über in den Boden eingebaute Spulen. Die induktive Übertragung stellt im Prinzip ein aufgeschnittener Transformator dar (s. Abbildung 2-11). Damit in der Fahrbahn auf eine Bündelung des elektromagnetischen Feldes verzichtet werden kann, muss eine sehr hohe Frequenz von z. B. 20 bis 25 kHz Anwendung finden¹⁴. Die erforderlichen Kabel werden in der Fahrbahn verlegt und nur aktiv geschaltet, wenn sich ein Fahrzeug darüber befindet. Die geschaltete Abschnittslänge beträgt abhängig von der Fahrzeuglänge 10 - 20 m, im Tunnel kann sie auch bis zu 300 m betragen. Die Übertragung ist wetterunabhängig. Der Luftspalt beträgt idealerweise ca. 7 cm, größere Abstände sind möglich bei reduziertem Wirkungsgrad. Es wird ein Wirkungsgrad von ca. 98 % angegeben. Die übertragbare Leistung beträgt zwischen 100 kW und 1.000 kW. Elektrische Beeinflussungen werden ausgeschlossen. Eine Versuchsstrecke für Straßenbahnen ist seit 2008 in Bautzen in Betrieb.

Der Einsatz erfolgt idealerweise in Kombination mit einem Energiespeicher. Grundsätzlich erscheint das System auch für elektrisch angetriebene Busse anwendbar.

Ein Vorteil ist die oberleitungsfreie Trasse, die eine Installation auch in städtebaulich sensiblen Bereichen ermöglicht. Nachzuweisen ist noch der tatsächlich erreichbare Wirkungsgrad. Zu ergänzen ist, dass für Steuerung und Energieversorgung umfangreiche Anlagen entlang der Trasse erforderlich werden.

¹³ Die angegebenen Daten beziehen sich im wesentlichen auf einen Vortrag von Dr. Carsten Struve im November in Zürich (Trolley-motion 2008)

¹⁴ Siehe auch: „Fahrdrahtlose Energieübertragung für Straßen- und Stadtbahnen“ in Internationale Eisenbahn-Revue 3/ 2009



Abbildung 2-11: Funktionsprinzip induktive Übertragung¹⁵

Ein vergleichbares System, wenn auch in kleinerem Maßstab, haben Eco Power Technologies (EPT, Italien)/ Wampfler AG (Weil) für Genua erstellt und seit 1990 in Betrieb. Elektrisch angetriebene Minibusse laden jeweils an den Haltestellen ihre Batterien über im Fahrweg installierte Spulen auf.

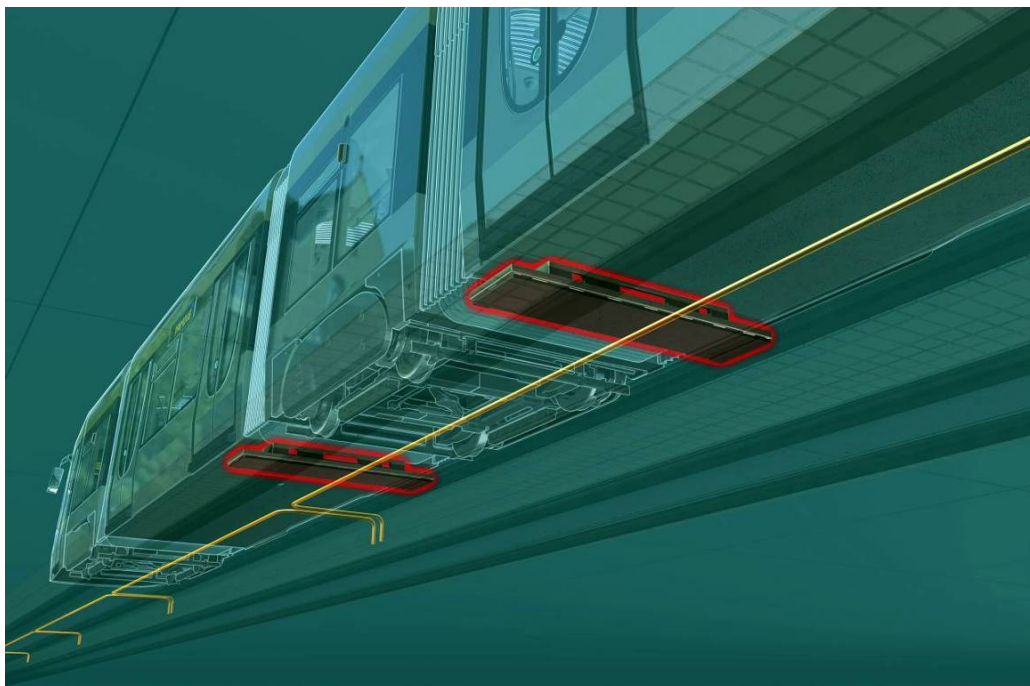


Abbildung 2-12: Induktives Übertragungssystem PRIMOVE am Beispiel einer Straßenbahn¹⁶

¹⁵ Quelle: Bombardier
¹⁶ Quelle: Bombardier

2.4 Umweltaspekte

In einer Schweizer Studie zu „Umweltverträglichkeit und Energieeffizienz des Trolleybusses – externe Kosten“ wird die elektrische Traktion des Oberleitungsbusses im Vergleich mit dem Dieselbus dargestellt¹⁷. Die Studie beleuchtet exemplarisch die Möglichkeiten, die die elektrische Traktion bietet (siehe Tabelle 2-4).

	Obus um ca. x % besser als Dieselbus
<u>Energieverbrauch</u>	+ 40
<u>Klimagase</u> (CH-Strommix)	+ 75
<u>Stickoxide</u> (ohne / mit <u>Euro IV</u>)	+ 90 / 80
<u>Kohlenwasserstoffe</u> (ohne / mit Euro IV)	+ 70 / 55
Feinpartikel (ohne / mit Filter)	+ 70 / 20
Grobpartikel	+ 25
<u>Lärm</u>	+ 90
<u>Landverbrauch</u>	+/- 0
<u>Unfälle</u>	+/- 0

Tabelle 2-4: Vergleich Obus mit Dieselbus und Straßenbahn

Für Leipzig wurde bereits eine Modellrechnung für unterschiedliche Antriebsysteme hinsichtlich Energiekosten und CO₂ - Ausstoß durchgeführt. Der Obus liegt für alle Werte am günstigsten, der Dieselbus hingegen am ungünstigsten, während der Hybridbus in der Mitte liegt (siehe Tabelle 2-5).

	<u>Obus</u>	<u>Dieselbus</u>	<u>Hybridbus</u>
<u>Verbrauch</u>	200 kW	55 - 60 l	45 - 50 l
<u>Kosten pro 100 km</u>	28 €	82,50 - 90 €	67,5 - 75 €
	(bei 0,14 €/kWh)	(bei 1,50 €/l)	(bei 1,50 €/l)
<u>CO₂</u>	82,4 kg	166,1 - 181,2 kg	135,9 - 151 €

Tabelle 2-5: Vergleich Obus, Dieselbus und Hybridbus¹⁸

¹⁷ Umweltverträglichkeit und Energieeffizienz des Trolleybusses – externe Kosten, Referat von Dr. Peter Marti, Metron Verkehrsplanung AG, Brugg, gehalten an der internationalen Fachtagung des DLR, 10./11. Mai 2007 in Solingen D

¹⁸ Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH, Zürich 2008

2.5 Design und Ausgestaltung moderner Bussysteme

Im Wettbewerb mit anderen Verkehrsmitteln waren Busse lange Zeit die grauen Mäuse. Jetzt gibt es Busse auch in einem modernen Design. Das Äußere soll die Identifikation mit dem System erleichtern, dabei wurde Maß genommen an den erfolgreichen Straßen- und Stadtbahnsystemen. Einige ausgewählte Beispiele für moderne Busse sind in Abbildung 2-14 zusammengestellt.

Ein Bussystem besteht nicht nur aus Fahrzeugen, sondern auch aus der Infrastruktur für Fahrweg und Haltestellen sowie Informations- und Vertriebskomponenten. Ein herausragendes und erfolgreiches Beispiel ist der Busway in Nantes (F) mit seinem eigenen Fahrweg (Abbildung 2-13) sowie der gestalterischen Ausbildung des gesamten Systems (Abbildung 2-15). Beeindruckend ist auch die Fahrgastentwicklung innerhalb der kurzen Betriebszeit (Abbildung 2-16).

Ein besonderes Buskonzept ist der Phileas in Eindhoven mit modernem Fahrzeugdesign und eigener Infrastruktur (Abbildung 2-17).



Abbildung 2-13: Ausgestaltung des Busway in Nantes¹⁹

¹⁹

Mercedes-Benz









		
Viseon		Solaris (Bremen)
		
Irisbus Cristalis (Las Vegas)		Phileas
		
Autotram ²⁰		Hugh Frost (London)
		
Irisbus (RATP)		Mercedes Benz

Abbildung 2-14: Modernes Design für Busse²¹

²⁰

Fraunhofer Gesellschaft 2006

²¹

Quellen: jeweils Hersteller, Entwickler, Betreiber



Abbildung 2-15: Qualitätsverbesserung im Busverkehr (Beispiel Nantes²²)

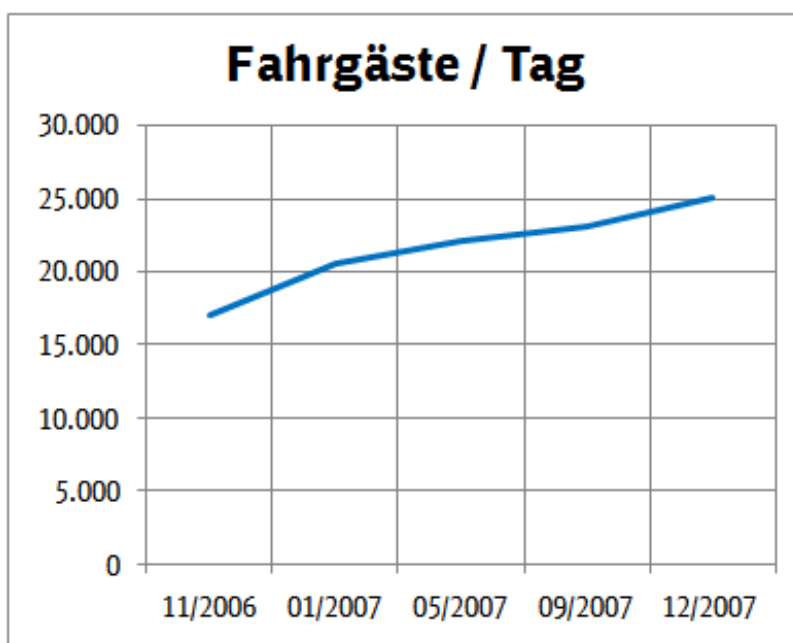


Abbildung 2-16: Fahrgastentwicklung des Busway in Nantes seit Inbetriebnahme²³

²² Mercedes-Benz
²³ Daten: Mercedes-Benz



Abbildung 2-17: Phileas in Eindhoven²⁴

2.6 Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise

Unter den gegebenen Bedingungen in Trier mit Steigungen bis zu 13 % liegt ein besonderes Augenmerk auf die Steigfähigkeit der Fahrzeuge sowie dem Bremsverhalten. Die Voraussetzungen für eine Fahrzeitermittlung ergeben sich aus der Tabelle 2-6.

Die rasante Entwicklung bei den Speichertechnologien zeigt neue Möglichkeiten bei den Antriebstechnologien im städtischen Busverkehr auf. Die Hersteller arbeiten mit unterschiedlichen Technologien, einige Fahrzeuge befinden sich bereits im Linienbetrieb, bei anderen wird die Serienreife in wenigen Jahren erwartet.

Elektrische Antriebs- und Speichertechnologien können helfen Energie einzusparen und die Emissionen mindern. Dies können für die besonderen topografischen Verhältnisse wichtige Entscheidungskriterien sein. Die neuen Technologien bleiben teuer. Die Wirtschaftlichkeit ist betriebsspezifisch zu ermitteln, für Trier wurden verschiedene Berechnungen in Kap. 4 durchgeführt.

²⁴

www.wikipedia.de

km	Haltestelle	Länge der [km]		km	Höhe ca. [m]	Steigung geschätzt	Länge der [km]
-2,15	Kaisertherme	0,40		-2,15	141,0	-0,5%	0,40
-1,75	Südallee/Kaiserstrasse	0,20		-1,75	139,0	-0,2%	1,75
-1,55	Rathaus	0,30		0,00	136,0	5,7%	0,15
-1,25	Karl-Marx-Haus	0,35		0,15	144,6	1,0%	0,45
-0,90	Nik. Koch Platz	0,30		0,60	149,3	12,8%	0,75
-0,60	Treviris	0,20		1,35	245,3	7,1%	0,15
-0,40	Porta Nigra/Petrusstrasse	0,20		1,50	255,9	0,4%	0,30
-0,20	Kochstrasse	0,35		1,80	257,0	-1,4%	0,35
0,15	Hauptbahnhof	1,65		2,15	252,0	0,5%	1,30
1,80	Belvedere	0,35		3,45	258,0	0,7%	0,60
2,15	Belvedere Ost	0,45		4,05	262,0	2,2%	0,50
2,60	Geozentrum	0,30		4,55	273,0	0,9%	0,55
2,90	Wissenschaftspark	0,55		5,10	278,0	0,5%	0,20
3,45	Kohlenstraße	0,60		5,30	279,0		
4,05	Universität	0,50					
4,55	Sportzentrum	0,55	Summe	7,45			7,45
5,10	BU11 Zentrum	0,20					
5,30	Karl-Carstens-Straße						
7,45	Summe	7,45					

Tabelle 2-6: Steigungen und Haltestellen

3 Vorschlag für ein Seilbahnsystem²⁵

3.1 Beschreibung

Von der Firma Doppelmayr wurde für Trier ein Seilbahnsystem als Kuppelbare Dreiseil-Umlaufbahn vorgeschlagen, das die Porta Nigra über den Hauptbahnhof mit dem Einkaufszentrum Tarforst durch drei Teilstrecken verbindet. Die Seilbahn ist mit Kabinen für 35 Personen vorgesehen und hat auf dem Abschnitt Hauptbahnhof-Universität zwei Zwischenstationen. Die beiden Abschnitte Porta-Nigra-Bahnhof und Universität-Tarforst sollen als Hängebahn an die Seilbahn angeschlossen werden. In Abbildung 3-1 ist die geplante Linienführung der Seilbahn (gelbe Linie) gezeigt. Die beiden Abschnitte, die hier in rot und blau eingetragen sind, sollen als Hängebahn gebaut werden. In Abbildung 3-2 ist jeweils ein Beispiel für eine Seil- und eine Hängebahn dargestellt. Einen Eindruck vom Innenraum einer Kabine bietet die Abbildung 3-3. Die Fahrgeschwindigkeit der Seilbahn zwischen den Stationen beträgt 25,2 km/h (7 m/s), im Abschnitt mit der Hängebahn ca. 14,4 km/h (4 m/s). Aufgrund ihres (halb-) automatischen Betriebes sind Taktzeiten von ca. 102 s möglich.

Der Vorschlag für eine Seilbahn hat auf den ersten Blick etwas Bestechendes. Eine schnelle Punkt zu Punkt Verbindung kann mit ihr hergestellt werden, ohne dass – außer an den Stationen und den Pfeilern – Dritte wesentlich tangiert werden. Selbst Gebäude können überfahren werden. Gerade im alpinen Raum überzeugen Seilbahnen immer wieder. Auch ist es möglich große Menschenmengen zu transportieren und durch den automatischen Betrieb auch eine dichte Taktfolge zu erreichen.

Mit einer Förderleistung bis 4.000 P/h je Richtung und einem Fassungsvermögen von bis zu 35 Personen pro Kabine ist das System durchaus leistungsfähig und den Anforderungen theoretisch gewachsen. Für Trier wurde das System im Anfangsausbau mit einer Förderleistung von 1.236 P/h je Richtung dimensioniert. Die Funktionsfähigkeit von Seilbahnsystem kann aufgrund der Vielzahl von weltweit in Betrieb befindlichen System als sichergestellt angesehen werden. Ein Betrieb ist bis Windgeschwindigkeiten von 100 km/h möglich.

²⁵ Die wesentlichen Eingangsdaten sowie die Abbildungen in diesem Kapitel sind Unterlagen der Fa. Doppelmayr entnommen, u.a.: „Weiterentwicklung des Seilbahnprojekts ‚Petrisberg-Express‘ in Trier“ vom 29.1.2009

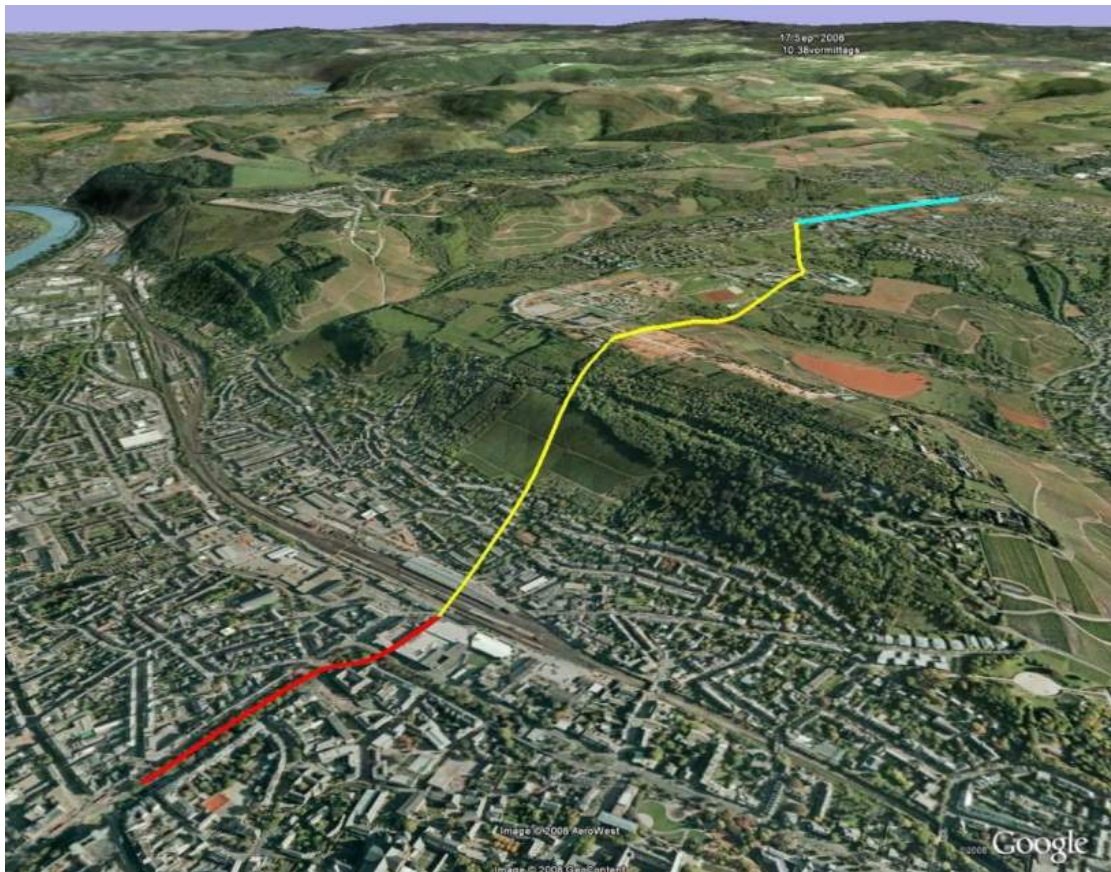


Abbildung 3-1: Geplante Linienführung von Seilbahn und Hängebahnen

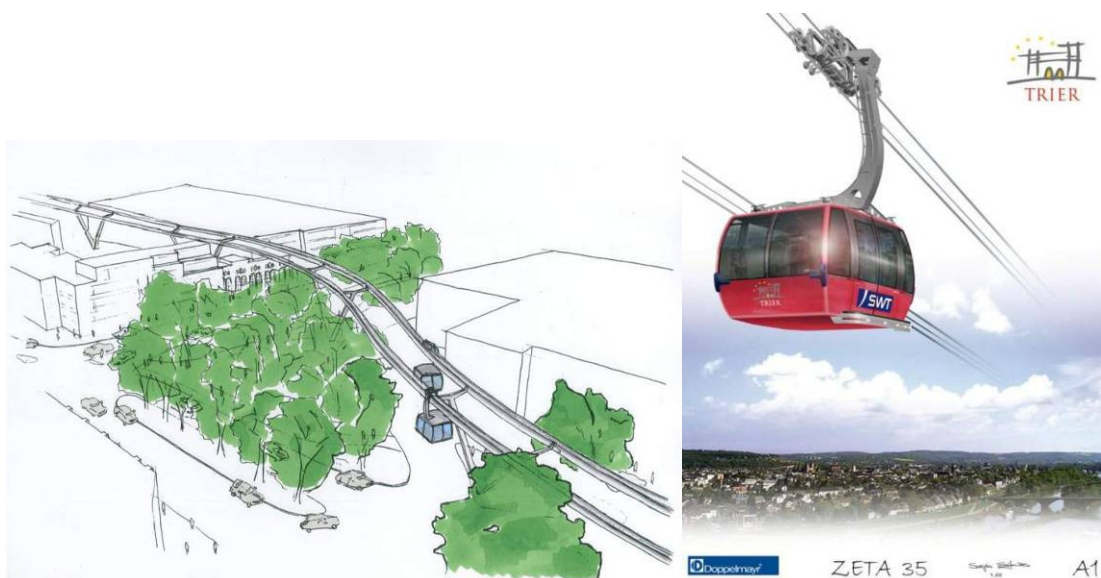


Abbildung 3-2: Beispiel für Hängebahn (links) und Seilbahn



Abbildung 3-3: Vision einer Gondel

3.2 Bewertung

Problematisch für die Nutzung der Seilbahn ist der Umstieg zwischen Bus und Seilbahn. Durch mehrere verschiedene Fahrzeugsysteme (Bus und Seilbahn) wird der ÖPNV unübersichtlich und unkomfortabel. Die Seilbahn erschließt das Gebiet des Petrisberg nur grob, da dort nur drei Haltestellen vorgesehen sind. Für den Bus sind 14 Haltestellen geplant (Linie A: Belvedere - Karl-Carstens-Strasse, Linie B: Belvedere - BU11 Süd). Im Mitfall 4 (Seilbahn) muss für die Feinerschließung weiterhin ein Bus auf dem Tarforster Plateau verkehren (Linie 3).

In Tabelle 3-1 sind die Fahrzeiten von Bus und Seilbahn für die Strecke Porta Nigra - BU 11 gegenüber gestellt. Auf der Steilstrecke zwischen Hbf und Belvedere ist die Seilbahn schneller, da sie einen direkteren Weg hat.

Die Erschließung mit dem Bus ist aufgrund der höheren Zahl der Haltestellen und teilweise mäandrierenden Fahrwege deutlich besser als mit der Seilbahn. Die Fahrzeiten für die meisten Relationen sind mit dem Bus geringer. Die Seilbahn verfügt nur über 6 Stationen gegenüber 12 beim Bus.

Linie A	Fahrzeiten						
	Duobus (Standi 2003)		Seilbahn (Doppelmayr)	Gelenk-Trolleybus (Vossloh-Kiepe)		Istfahrzeiten (SWT 3)	
	hin min	zurück min	beide Ri min	hin min	zurück min	hin min	zurück min
Streckenlänge: 7,45 km							
Summe Reisezeit Porta Nigra - BU 11	13,0	12,4	14,7	14,2	13,0	16,0	18,0
	105%	100%	119%	115%	105%	129%	145%
Summe Reisezeit Kaisertherme - BU 11	21,0	20,4		19,6	18,4		

Tabelle 3-1: Fahrzeitenvergleich

In einigen Punkten unterscheidet sich die Situation im städtischen Umfeld von Trier:

- ☐ Die Punkt - Punkt Beziehung ergibt sich im Wesentlichen nur zwischen Hauptbahnhof und Universität, die übrigen Verflechtungen müssen bei einer Seilbahn aus geometrischen Gründen durch eine aufwendige Hängebahnkonstruktion hergestellt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit ein ausreichendes Busangebot zur Feinerschließung vorzuhalten.
- ☐ Die abschnittsweise erforderliche Hängebahn sowie die zusätzlichen Stationen mit der abgeminderten Fahrgeschwindigkeit dort reduzieren die Reisegeschwindigkeit der Seilbahn
- ☐ Die Stationen sind aufwendig und müssen in der Regel in der +1-Ebene barrierefrei erschlossen werden
- ☐ Sofern die Gondeln nicht begleitet sind, wovon auszugehen ist, fehlt die soziale Kontrolle
- ☐ Sofern kein vollautomatischer Betrieb realisiert wird, werden auch während des laufenden Betriebes Personale als Rückfallebenen und zur Unterstützung beim Ein- und Ausstieg aus den - sich auch in den Stationen - in Bewegung befindlichen Gondeln sinnvoll sein.
(Anm.: Die Infrastrukturkalkulation geht von einem vollautomatischen Betrieb aus, was pro Schicht 3 P erforderlich macht)
- ☐ Der Verkehr zwischen Innenstadt und Plateau wird gebrochen, worunter die Attraktivität und der Modal Split zu Lasten des ÖV leiden dürfte.
- ☐ Der Vorschlag einer Hängebahn zwischen Porta Nigra und Hauptbahnhof dürfte städtebaulich nur schwer zu integrieren sein
(Anmerkung: eine derartige Konstruktion ergibt sich aus der Notwendigkeit dem Straßenverlauf zu folgen)

Als besondere Vorteile einer Seilbahn sind folgende Aspekte zu würdigen:

- ☐ Eine Seilbahn hat ein Alleinstellungsmerkmal mit innovativer Strahlkraft für Trier,
- ☐ in der Punkt - Punkt-Relation Hauptbahnhof - Belvedere ergibt sich eine schnelle Verbindung
- ☐ keine Beeinflussung des Bodenverkehrs und keine Durchschneidung von Grundstücken, außer an Stationen und Pfeilern
- ☐ variable und auch für die Zukunft ausbaubare Förderkapazität
- ☐ kaum Wartezeiten durch kurze Taktfolge, ebenso zeitnahe Anpassung (innerhalb weniger Minuten) der Kapazitäten auf Bedarfsänderungen
- ☐ Gute Aufstiegshilfe auch für Radfahrer

4 Aktualisierung der Kostenseite nach Standi 2006 (einschließlich Variante Seilbahn)

4.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Standardisierte Bewertung einschließlich der damit verbundenen Folgekostenrechnung stammt aus 2003 mit dem damaligen Preis- und Verfahrensstand. Zwischenzeitlich wurde das Verfahren mit Stand 2006 fortgeschrieben. Daraus ändern sich die Wertansätze bei gleichem Mengengerüst. Zur Abschätzung der zwischenzeitlichen Entwicklungen ist daher eine Überarbeitung auf der Kostenseite sinnvoll, um die grundsätzliche Förderwürdigkeit abzuschätzen. Die vorliegende Studie ist keine neue Standardisierte Bewertung, u.a. auch weil die Nutzenseite nicht überarbeitet wurde.

In der Tabelle 4-1 sind die untersuchten Mitfälle einschließlich der Abschnittsausbildung aufgeführt. Mitfall 2 entspricht dem 2003 untersuchten Fall.

	Beschreibung	Fahrzeug	St. Medard - Porta Nigra	Abschnitte Porta Nigra - Belvedere	Belvedere - Carl- Carstens-Str.
Mitfall 2 (aus 2003)	abschnittsweise Spurführung mit Oberleitung (Kosten 2003)	Duobus mit Oberleitung und Spurführung	Diselelektrisch auf Straße	elektrisch (Oberleitung) auf eigener Trasse mit Spurführung	
Mitfall 2a	abschnittsweise mit Oberleitung (Kosten 2008)	Trolley-Hybridbus		elektrisch (Oberleitung) auf eigener Trasse	
Mitfall 3a	abschnittsweise mit Oberleitung (Kosten 2008)	Trolley-Hybridbus	Diselelektrisch auf Straße	elektrisch (Oberleitung) auf eigener Trasse	Diselelektrisch auf Straße
Mitfall 3b	ohne externe Energieversorgung (Kosten 2008)	Hybridbus		diselelektrisch auf eigener Trasse	
Mitfall 3c	mit induktiver Energieübertragung (Kosten 2008)	Hybridbus mit induktiver Energie- übertragung		elektrisch (induktiv) auf eigener Trasse	
Mitfall 4	Seilbahn (Kosten 2008 ohne Anpassung Nutzen)	-	Dieselbus	Seilbahn mit Busergänzung	

Tabelle 4-1: Untersuchte Mitfälle für Studie Petrisberg

Für die Ermittlung der Nutzen wurden nur die Hauptanteile neu ermittelt. Die Anteile bei denen eine geringe Änderung zu erwarten ist, wurden aus der Studie von 2003 übernommen. Dies beinhaltet, dass die Reisezeitdifferenzen nicht neu ermittelt wurden. Nach der aktuellen Version für die Standardisierte Bewertung (2006) ist der Einheitswert für die Bewertung der Reisezeitdifferenzen geändert (-7,5 statt bisher -7) und wird hier in der neuen Version verwendet. Der Saldo der Pkw-Betriebskosten wird wie in der Studie 2003 beibehalten ebenso wie der Saldo der Unfallschäden. Bei den Unfallschäden muss beachtet werden, dass diese zunehmen, wenn der Anteil der systemeigenen Trasse abnimmt. Das heißt für die Planfälle 3a bis 3c sind die Unfallschäden größer und somit der Nutzen geringer als bei Mitfall 2 und 2a. Da

diese Änderungen für den Bus aber im Vergleich zu den Unfallschäden im MIV zu vernachlässigen sind, werden sie aus der Studie 2003 übernommen.

Neu ermittelt wurden die Investitionen für die Infrastruktur und Fahrzeuge sowie die Personalkosten, Unterhaltskosten und Energiekosten. Auch der Saldo für Kosten aus CO₂-Emissionen und Emissionen sonstiger Schadstoffe wurde aus dem Energieverbrauch ermittelt.

Der Kostenfaktor wurde für alle Planfälle mit der aktuellen Version für die Standardisierte Bewertung (2006) neu bestimmt. Für die Investitionen Infrastruktur wurde eine Teuerung von 3% pro Jahr angenommen und über 5 Jahre auf 2008 hochgerechnet.

Die Kosten für die induktive Energieübertragung (Mitfall 3c) wurden mangels anderer Werte mit den 3-fachen Kosten einer Oberleitung angenommen²⁶.

4.2 Bussystem

Da für elektrische Bussysteme keine Kenndaten in der Standardisierten Bewertung verfügbar sind, wurden diese anhand von Vergleichsdaten zwischen Dieselbus und Straßenbahn hochgerechnet. Für den Hybridbus wurde ein Faktor für die Rekuperation von 20 % eingearbeitet. Der Anteil im Diesel- bzw. im elektrischen Betrieb wurde eindeutig den einzelnen Abschnitten zugeordnet, d. h. es wurde entweder Fahrzeugtyp Nr. 3 oder 4 zugrunde gelegt.

Die Mehrkosten für Hybridbusse werden in der Literatur mit ca. 170 - 220 TEUR angegeben. Die Abfrage bei den Herstellern ergab einen Kostenrahmen von ca. 700 bis 750 TEUR für einen 18 m Bus. Für die Rechnung in der Standardisierten Bewertung wurde der obere Eckwert angenommen. Die verwendeten Kenndaten der Fahrzeuge sind der Tabelle 4-2 zu entnehmen. In der früheren Standi war der damalige Marktpreis mit 1,2 Mio. EUR festgelegt worden.

Nr.	Fahrzeugtyp	Invest	Nutzungsdauer	Abschreibung	Sitzplätze	Stehplätze	Plätze	Nettogewicht	Bruttolasten (2/3-Belastung bei 75 kg/P)	zeitabh. Unterhalt, Instandsetzung	laufabh. Unterhalt, Instandsetzung, Fahrzeugbehandlung	Kraftstoffverbrauch Diesel	Einheitsenergieverbrauch	Einheitsenergieverbrauch je Stationshalt
		EUR	a					to	to	€/ (Fhz + a)	€/ Fhz-km	l/ Fhz-km	kWh/ 1000 tkm	kWh/ 1000 t
1	Gelenkbus Stadt	350.000	12	35200	47	56	103	16	21,2	8700	0,32	0,55	-	-
2	Gelenk-Obus	750.000	15	62800	47	56	103	18,9	24,1	8700	0,38	-	42	44
3	Hybridbus (18m, Seriel, Diesel)	750.000	12	75300	47	56	103	18,5	23,7	8700	0,38	0,44	-	-
4	Hybridbus (18m, Seriel, Elektrisch extern)	750.000	12	75300	47	56	103	18,5	23,7	8700	0,38	-	42	44

Tabelle 4-2: Kenndaten Bus

²⁶

Entspricht dem Wert der Stromschiene des APS-Systems für die Straßenbahn Bordeaux (F) mit vergleichbaren schalttechnischen Fragestellungen

4.3 Seilbahn

Die Gesamtinvestitionskosten, die Sie in der Ihnen vorliegenden Präsentation sehen, von 84-89 Mio. EUR, entsprechen den Maximalkosten angepasst auf die Preisbasis 2009, in denen sämtliche Kosten für Infrastruktur wie Brücke über den HBF sämtliche Hochbauten, alle Schnittstellen, Aufzüge, Rolltreppen, Genehmigungen, Gutachten, etc. enthalten sind. Die Kosten sind für die Gesamtstrecke von Porta Nigra bis Tarforst mit bedienerlosen Stationen repräsentativ.

Um die schlechtere Erschließung durch die Seilbahn gegenüber dem Bus darzustellen, wurden die Fahrzeugkilometer und der Fahrzeugbedarf der Line 3 aus dem Ohnefall um jeweils 100% heraufgesetzt.

Für die Seilbahn wurden die vom Hersteller ermittelten Investitionen übernommen und durch verschiedene Nebenkosten wie Grunderwerb ergänzt (Tabelle 4-3).

Seilbahn			
Abschnitte Seilbahn (Quelle: Doppelmayr)	Seilbahn und Montage T€	Rolltreppen, Aufzüge, Gebäude, Genehmigungen T€	Summe T€
Hbf - WIP - Geo - Uni	25.800	19.000	44.800
Uni - Tarforst	9.400	4.000	13.400
Porta Nigra - Hbf	12.000	3.500,0	15.500,0
Zwischensumme Seilbahn	73.700,0		
Sonstige Nebenkosten			
Grunderwerb			2.250
Leitungsverlegung			500
Entschädigung			300
Bauzustände, Baubehelfe,			250
Städtische Erschließung			500
Zwischensumme II	77.500,0		
Umwelt	3%		2.329
Zwischensumme II	79.829,0		
Planungskosten	10%		7.983
Gesamtkosten Seilbahn			87.812

Tabelle 4-3: Übersicht Kosten Seilbahn

4.4 Ergebnisbetrachtung

In zwei unterschiedlichen Preisszenarien wurden die Energiekosten auf der Grundlage der von Vossloh (Busse) und Doppelmayr (Seilbahn) ermittelten Verbräuche ermittelt. In zwei Preisszenarien wurden der Energieverbrauch und die Energiekosten ermittelt (Tabelle 4-4).

Aus den Energieverbräuchen wurden wiederum Emissionen ermittelt und diese monetarisiert (Tabelle 4-5). Grundlage der Berechnung war die Standardisierte Bewertung bzw. Vorgaben der EU.

	Dimension	Dieselbus	Hybridbus Supercap	Hybridbus Batterie	Trolleybus	Trolley-Hybrid	Seilbahn
			Entnahme 0,6kWh	Entnahme 4kWh			
Energieaufnahme	kWh/ Umlauf	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7	
	kWh/ Stunde						790
Rückspeisung		-	18,2kWh*90% = 16,3 kWh	21,5kWh*75% = 16,1 kWh	24,4 kWh	24,65 kWh	
Nettoverbrauch	kWh	54,7	38,4	38,6	30,3	30,05	
davon Strom	kWh	-	-	-	30,3	7,13	
Fhz-km Diesel	km/a	976.392	976.392	976.392		402.844	
Fhz-km elektrisch	km/a				976.392	573.548	

Dieserverbrauch	l/a	535.500	375.900	377.900		224.100	
Stromverbrauch	kWh/a				1.985.500	467.200	4.613.600
Energie-Kosten 84 ct/ l + 14ct/kWh	€/a	465.900	327.000	328.800	278.000	260.400	645.900
Energie-Kosten 120 ct/ l + 12ct/kWh	€/a	642.600	451.100	453.500	238.300	325.000	553.600

Geschwindigkeit (bergwärts)		18km/h	12km/h	18km/h	22km/h	22km/h
--------------------------------	--	--------	--------	--------	--------	--------

Tabelle 4-4: Energieverbrauch und Energiekosten²⁷

	Dimension	Dieselbus	Hybridbus Supercap	Hybridbus Batterie	Trolleybus	Trolley-Hybrid
CO ₂	€/a	50.510	34.680	34.890	-	20.660
CO	€/a	0	0	0	-	0
HC	€/a	1.000	700	700	-	420
NO _x	€/a	19.070	13.390	13.460	-	7.970
Partikel	€/a	3.730	2.490	2.660	-	1.560
Einheitskosten elektrische Energie	€/a	0	0	0	5.960	1.400
Summe Geldwert Emissionen	€/a	133.220	92.610	93.280	5.960	56.660

Fahrzeugkosten	€/ Stück	350.000	700.000	700.000	750.000	810.000
----------------	----------	---------	---------	---------	---------	---------

Tabelle 4-5: Umweltkosten

Die Neubewertung der Mitfälle zeigt immer einen Nutzen-Kosten-Faktor von >1. Damit besteht eine grundsätzliche Förderfähigkeit der Infrastrukturinvestitionen. Trotz einer Anhebung der Infrastrukturinvestition verbessert sich der Faktor sogar. Dies resultiert unter anderem dadurch, dass einige Nutzenkomponenten angehoben wurden und die Fahrzeugkosten deutlich reduziert werden konnten.

Die Mitfälle 2a bis 3c haben gegenüber dem alten Mitfall 2 deutlich reduzierte Kosten bei den Fahrzeugen. Für die Spurführung wurde damals der aufwendige GLT angesetzt, der aber heute nicht mehr auf dem Markt ist. Die kleine Renaissance auf dem Obus-Markt hat hier zu niedrigeren Fahrzeugpreisen geführt. Im Mitfall 2a wurden gegenüber Mitfall 2 die Infrastrukturkosten fortgeschrieben. Die Kenndaten einschließlich des Nutzen-Kosten-Faktors sind der Tabelle 4-6 zu entnehmen. Die Infrastrukturkosten sind in der Tabelle 4-7 aufgeführt.

		Investitionen Infrastruktur [T€]	Energie+ Personal Betriebskosten [T€/Jahr]	Kosten-Nutzen- Faktor	Kosten Fahrzeug [T€]	neue Fahrzeugart		
						Anzahl Fahrzeuge	Fhz-km diesel [1.000 Bus- km/Jahr]	Fhz km elektrisch [1.000 Bus- km/Jahr]
Mitfall 2	abschnittsweise Spurführung mit Oberleitung (Kosten 2003)	73.343	3.870	aus alter Studie: 2,49 neu errechnet: 2,61	1.176	21	403	574
Mitfall 2a	abschnittsweise mit Oberleitung (Kosten 2008)	86.995	3.518	2,58	750		403	574
Mitfall 3a	abschnittsweise mit Oberleitung (Kosten 2008)	72.138	3.611	3,31	750	21	725	251
Mitfall 3b	ohne externe Energieversorgung (Kosten 2008)	68.985	3.692	3,43			976	0
Mitfall 3c	mit induktiver Energieübertragung (Kosten 2008)	75.815	3.611	3,19			725	251
Mitfall 4	Seilbahn (Kosten 2009 o. Anpassung Nutzen)	87.812	3.134	1,90 (*)	0	-	-	-
(*) Nutzenseite ist nicht überarbeitet, daher ist Wert zu hoch								

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Mitfälle

		Investitionen Infrastruktur [T€] ohne periphere Anlagen und Anpassungen	Investitionen Infrastruktur [T€] incl. 3% Umwelt- ausgleich	Kommentar	Investitionen Infrastruktur [T€] incl. 10% Planungs- kosten
Mitfall 2	abschnittsweise Spurführung mit Oberleitung (2003)		66.672	davon für die Spurführung: 990 T€	73.339
Mitfall 2a	abschnittsweise mit Oberleitung (2008)		79.087	Mitfall 2 mit einer Teuerung von 3% auf 5 Jahre, mit Preis Anpassung Fahrleitung Beleuchtung, Leitungsverlegung, ohne Spurführung	86.995
Mitfall 3a	abschnittsweise mit Oberleitung (2008)		65.580	Wie 2a ohne Bustrasse ab Belvedere (Einsparung: 13.358 T€)	72.138
Mitfall 3b	ohne externe Energieversorgung (2008)		62.714	Wie 2b ohne Oberleitung (Einsparung: 2.866 T€)	68.985
Mitfall 3c	mit induktiver Energieübertragung		68.923	Wie 3a mit Extrakosten für Energieübertragung (1.672 T€)	75.815
Mitfall 4	Seilbahn	73.700	79.829	Zusätzliche Investitionen für Grunderwerb, Leitungsverlegung, Anpassungen Verkehrswege (3.800 T€)	87.812

Tabelle 4-7: Hinweise zu Infrastrukturkosten

5 Zusammenfassung und Empfehlung

Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ☐ Alle Mitfälle zeigen einen Faktor > 1 (Höchstwert 3,41)
- ☐ Der Nutzen-Kosten-Faktor (Planfall 2) steigt mit der neuen Standi (gegenüber 2003) von 2,49 auf 2,61
Grund: Erhöhung Nutzenwerte / Reduzierung Kostenwerte
- ☐ Die Preissteigerung bei der Infrastruktur wird kompensiert durch reduzierte Fahrzeugkosten, daher nur geringe Absenkung des Faktors auf 2,49 (Planfall 2a)
- ☐ Das Projekt eines neuen Petrisbergaufstieges mittels einer Busbahn erscheint weiterhin volkswirtschaftlich sinnvoll
- ☐ Neue elektrische Antriebskonzepte ermöglichen einen energieeffizienten Betrieb; die untersuchten Konzepte sind entweder schon in Betrieb oder in ihrer Entwicklung weit fortgeschritten, so dass bei einem Realisierungshorizont 2015 beherrschbare Risiken bestehen
- ☐ Ein elektrisches Antriebskonzept
 - verkürzt die Reisezeiten
 - reduziert die Energiekosten
 - reduziert die Emissionen
 - aber: erfordert Investitionen in Infrastruktur und Fahrzeuge
- ☐ Die abschließende Sinnhaftigkeit einer Seilbahn kann nur durch eine Potentialstudie bewertet werden, vermutlich ist eine Wirtschaftlichkeit nur mit einer verkürzten Länge (z. B. Hauptbahnhof - Uni) erreichbar.

Sofern ein System mit externer Energieversorgung vorgesehen ist, sollte eine Trassenlänge so gewählt werden, dass das erforderliche Gleichrichterunterwerk optimal ausgelastet wird und auch die Möglichkeit besteht, dass sich mehrere Fahrzeuge im Regelverkehr gleichzeitig im Abschnitt befinden, um eine Rückspeisung zu ermöglichen. Gegebenenfalls ist ein lokaler Energiespeicher im Unterwerk vorzusehen.

Nach heutigem Stand der Technik sind bei den topografischen Verhältnissen am Petrisbergaufstieg nur der Einsatz von Batterien sinnvoll, nicht aber von Supercaps als alleinige Energiespeicher, sofern keine externe Energieversorgung vorgesehen wird.

Die Umsetzung eines neuen Bussystems mit seinen umfangreichen Infrastrukturmaßnahmen bedarf einer Vorbereitungs-, Planungs- und Realisierungszeit. Wie dieser zeitliche Ablauf aussehen könnte wird in Abbildung 5-1 mit Anhaltswerten aufgezeigt.

Ein wesentlicher Zeitfaktor für eine Realisierung des Petrisbergaufstieges ist die notwendige Erlangung des Baurechtes und der Bauzeit des Fahrweges selbst, u. a. mit der Querung des Hauptbahnhofes mittels eines neuen Brückenbauwerkes.

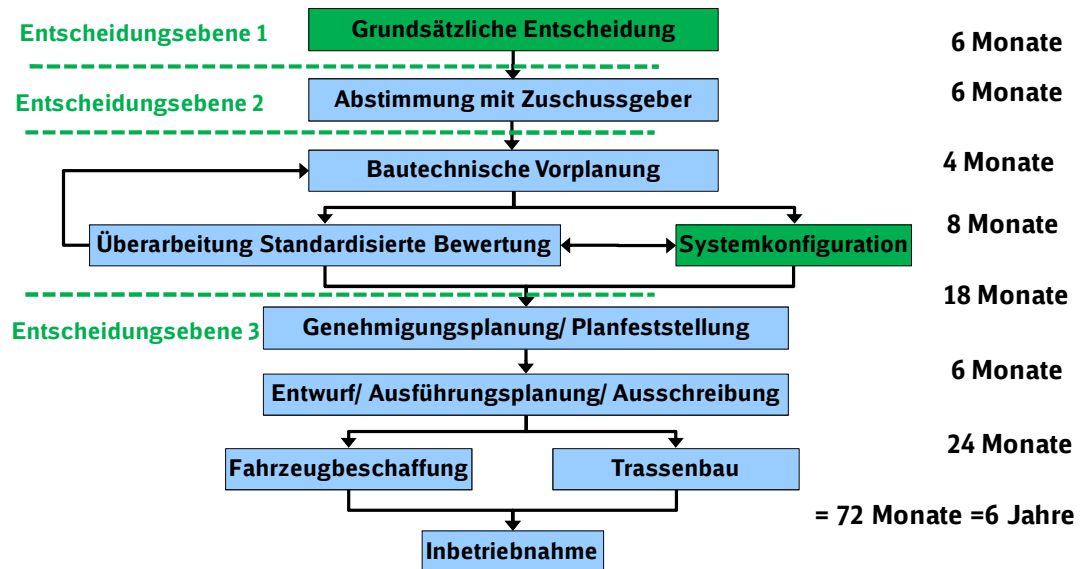


Abbildung 5-1: zeitliche Anhaltswerte zur Umsetzung eines neuen Bussystems in Trier