

FORSCHUNG FÜR EINE MOBILE ZUKUNFT



DRESDEN

Elektrischer ÖPNV in Aachen

Ergebnispräsentation vor Mobilitätsausschuss 10.09.2015

Dr.-Ing. Thoralf Knotz

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI)

Zeunerstraße 38

01069 Dresden

www.ivf.fraunhofer.de



Prämissen

- Keine (wesentlichen) Änderungen im Betriebsablauf durch Nutzung von Elektrobussen.
- Entlastung der Innenstadt
- Minimierung der notwendigen Infrastruktur
- Identifikation von Linien, die bereits heute / kurzfristig umstellbar sind.
- Technischer Fortschritt der Speichertechnik wird schrittweise Umstellung weiterer Linien ermöglichen.



Grobrasterung

Erledigte Arbeiten

Prüfung von Umlaufplänen hinsichtlich Betrieb von Batteriebussen

- vereinfachte Energiebilanzrechnung für 32 Linien
- Schultage, Samstage, Sonntage für alle beauftragten Linien
- Ferientage nur Umlaufpläne der Linien 2, 3A, 3B, 4, 5, 33, 45 und 73
- nur Umlaufpläne, die mindestens eine Fahrt auf beauftragten Linien enthalten (viele Fahrten auf anderen Linien auch betrachtet)
- nur Umlaufpläne für Busse der ASEAG (außer auf Linie 4)

Vorortbesichtigungen

- Endhaltestellen + Streckenabschnitte für Fahrleitungen
- baulich-örtliche Eignung für ausgesuchte Linien
- Ermittlung Anschlusskosten STAWAG für ausgesuchte Linien

Grobrasterung

Fahrzeugdaten – Blick in die Zukunft – konservativ

Buslänge	12	18	24	m
spezifischer Energieverbrauch Linie	1,5	2	2,5	kWh/km
spezifischer Energieverbrauch Leerfahrt	1,2	1,7	2,2	kWh/km
spezifische Leistung im Stand ohne Ladung	1,2	1,5	2	kW
nutzbare Speichergröße	200	250	300	kWh
mittlere Ladeleistung an Batterieklemme	180	230	270	kW

Ausstattung der Fahrzeuge

- Fahrerklimaanlage
- 2, 3 bzw. 4 x 24 V-Klimaanlagen (Spheros)
- Diesel-Zusatzheizung statt rein elektrischer Heizung

Grobrasterung

Vorgehensweise

Bewertung jeder einzelnen Linie – Kriterien

- technische Umsetzbarkeit im Ist- bzw. Planungszustand
 - $E_{\text{Bat}} + E_{\text{Lad}} > E_{\text{Ver}} + E_{\text{Res}}$ stets gegeben
- Umfang notwendiger Änderungen der Umlaufplanung
- notwendige Ladeinfrastruktur und deren Integrierbarkeit
- Anzahl Busse vs. notwendige Ladeinfrastruktur
- Entlastungswirkung (innerstädtisch, Stadtrand, „durchs Grüne“)



Grobrasterung

Ergebnisse

- einzelne Umlaufpläne ohne Nachladung im Betrieb bedienbar
 - keine große Entlastungswirkung – nur Zusatzszenario
- Linien 2, 5, 33, 45, 73 und 173 mit Gelegenheitsladung bedienbar
 - weitgehend linienreine Bedienung, ausreichende Wendezeiten
- Ladestationen:
 - Uniklinik (mind. 2 + 2)
 - Eilendorf, Schubertstraße
 - Preuswald
 - Fuchserde
 - Brand Schulzentrum

Grobrasterung

Ergebnisse

- sonstige Linien / Linienkombinationen nur eingeschränkt und unvollständig bedienbar (nur jeweils einzelne Umlaufpläne)
- Gründe
 - extrem optimierte Umlaufplangestaltung
 - viele Linienwechsel innerhalb eines Umlaufplans
 - kurze Wendezeiten
 - ➔ keine ausreichenden Ladezeiten
- massive Eingriffe in die Umlaufplangestaltung notwendig
 - ➔ höhere Personalkosten
- Linien nachgelagert betrachten, abhängig von Entwicklung der Batteriebusstechnik

Linie 2

Ladestationen

■ Preuswald

- Installation problemlos möglich
- Ladestation: 250.000 €
- Anschlusskosten: 20.000 – 55.000 €

■ Eilendorf, Schubertstraße

- Installation möglich
- Umbau der Wendeschleife notwendig
- Ladestation: 250.000 €
- Anschlusskosten: 65.000 €



Linien 33 / 73 / (173)

Ladestationen

■ Fuchserde

- Installation problemlos möglich
- Ladestation: 250.000 €
- Anschlusskosten: 58.000 €



■ Uniklinik Haltepunkt 3

- Installation problemlos möglich
- mindestens zwei Ladestationen
- gegenseitige Behinderungen
- Ladestationen: 450.000 – 500.000 €
- keine Anschlusskosten



Linien 5 / 45

Ladestationen

■ Brand Schulzentrum

- Installation problemlos möglich
- Ladestation: 250.000 €
- Anschlusskosten: 61.000 €



■ Uniklinik Haltepunkt 1

- Installation problemlos möglich
- gegenseitige Behinderungen
- ggf. zwei Ladestationen
- Ladestation(en): 250.000 / 500.000 €
- keine Anschlusskosten



Detailuntersuchung Linien 2 und 33/73

Messungen - Fahrzeugsimulation

Aufnahme von Weg-Geschwindigkeits-Profilen + Fahrgastzahlen

■ Linie 2

- 02.06.2015
- Umlaufplan 042S; 06:42 – 20:54; 14 Linienfahrten

■ Linien 33 / 73

- 01.06.2015
- Umlaufplan 030; 06:02 – 19:34; 14 Linienfahrten

■ Datenaufbereitung

■ Fahrzeugkonfiguration

■ Energiebilanzierung mittels IVision (Simulation)

Detailuntersuchung Linien 2 und 33/73

Ergebnisse – SOC (Ladezustand der Batterien)

■ Linie 2 – Umlaufplan 042S

- Summe Verspätungen: 60 min (45 % der Wendezeiten)
- SOC_{min} Grobrasterung: 57 %
- SOC_{min} Simulation gemäß Messung: 15 % - Abbruch 17:51 Uhr

■ Linien 33 / 73 – Umlaufplan 030

- Summe Verspätungen: 44 min (36 % der Wendezeiten)
- SOC_{min} Grobrasterung: 23 %
- SOC_{min} Simulation gemäß Messung: 53 % (höhere Ladeleistung)

■ Alle Werte bezogen auf 30°C!

Linie 2 / 5 / 33 / 45 / 73 / (173)

Herausforderungen – Batteriebusse

- Behinderungen im Betriebsablauf
 - parkende Fahrzeuge, enge Straßen, Radfahrer
 - LSA
 - andere Busse
 - Stau

- resultierende Verspätungen gegenüber Umlaufplänen zu groß


- Organisation an der Endhaltestelle Uniklinik
 - mehrere Busse gleichzeitig in Haltepositionen
 - unterschiedliche Abfahrtszeitpunkte -> Vorrücken

- derzeit (noch) keine Batteriedoppelgelenkbusse verfügbar

Linien 3A / 3B

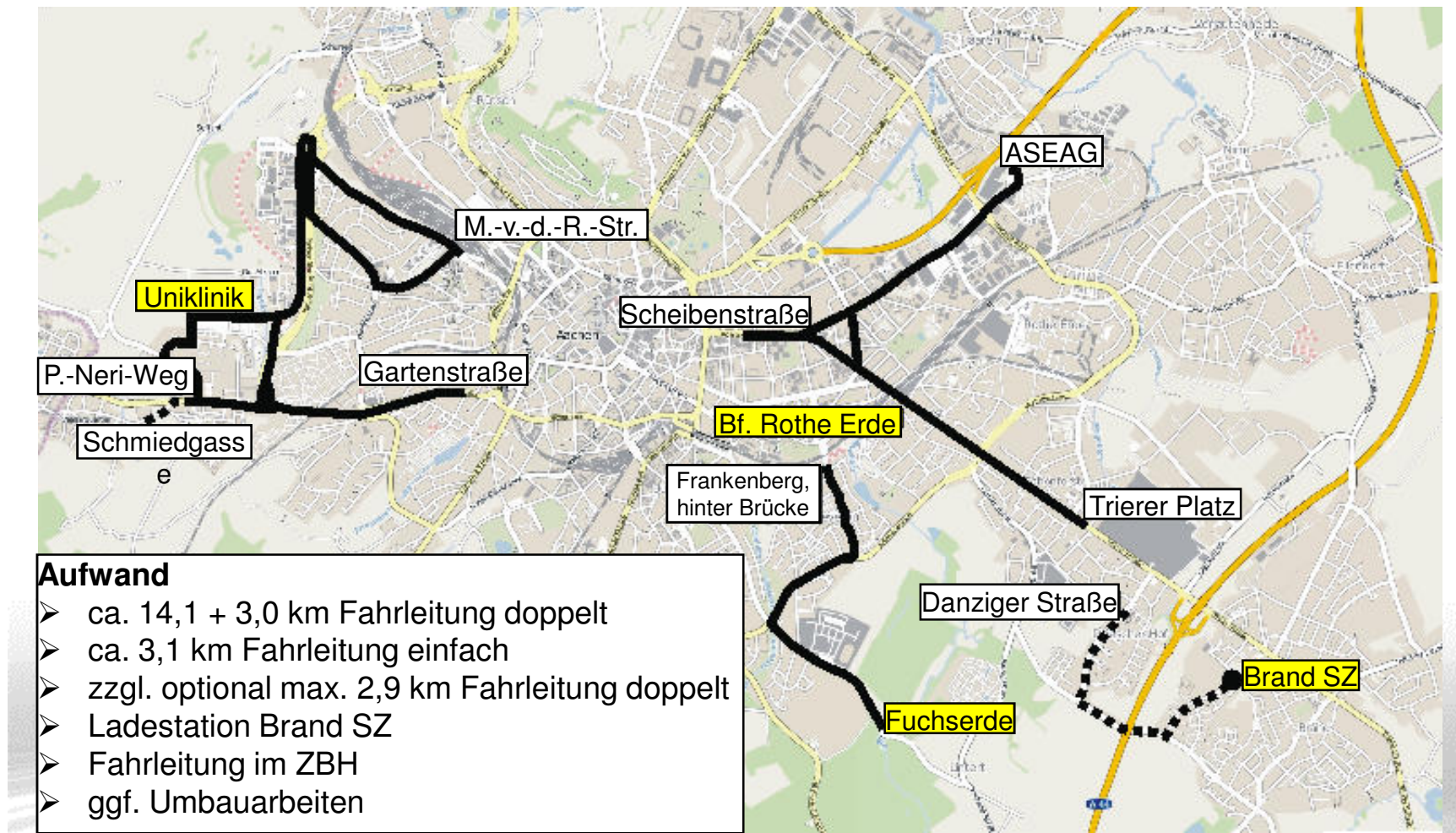
Vorläufig nur Hybridtrolleybusse möglich

- Bedienung mit Batteriebussen im Ist-Zustand nicht möglich
 - zu kurze Wendezeiten
 - Haltestelle Ponttor nur eingeschränkt für Ladestation geeignet
 - Linienwechsel

 - Bedienung nur durch Trolleybusse mit partiell fahrleitungsfreiem Betrieb (Hybridtrolleybusse)
 - 50 – 60 % einer Linie mit Fahrleitung
 - < 50 % -> sehr großer Elektroenergiespeicher notwendig
- 
- Synergien mit den Linien 5, 33, 45, 73
 - Linienwechsel nur sehr eingeschränkt möglich

Linien 3A / 3B + 5 / 45 + 33 / 73

Infrastruktur für Hybridtrolleybusse



Batterie-Solobusse

Ergänzung zu Batteriegelelenk- oder Hybridtrolleybusse

Batterie-Solobusse ohne Nachladung im Betrieb

- Einstieg in den elektrischen ÖPNV
- realistische Reichweite (derzeit): ca. 150 km (dauerhaft)
- Kombination von Umlaufplänen
 - ausreichend Ladezeit zwischen Umlaufplänen
 - möglichst hohe Fahrweite pro Tag
- Tagesfahrweite (2 Umlaufpläne) > 200 km => 5 Kombinationen (Busse)
- Tagesfahrweite (2 Umlaufpläne) > 150 km => 8 Kombinationen (Busse)
jeweils an Schultagen
- 6 + (2) bedienbare Umlaufpläne an Samstagen
- keine bedienbaren Umlaufpläne an Sonn- und Feiertagen

Szenarien

2 + 1 Szenarien

■ Szenario 1

Linien 2 / 5 / 33 / 45 / 73 mit Batteriegelelenk- bzw. -doppelgelelenkbussen

- 34 Busse / Investitionsvolumen: 44,5 Mio. € + ASK ZBH
- abzgl. Investitionskosten Dieselbusse: 12,3 Mio. €

■ Szenario 2

Linie 2 mit Batteriegelelenkbussen

Linien 3A / 3B / 5 / 33 / 45 / 73 mit Hybridtrolleybussen

- 43 Busse / Investitionsvolumen: 72,1 Mio. € + ASK ZBH
- abzgl. Investitionskosten Dieselbusse: 15,7 Mio. €

■ Zusatzszenario

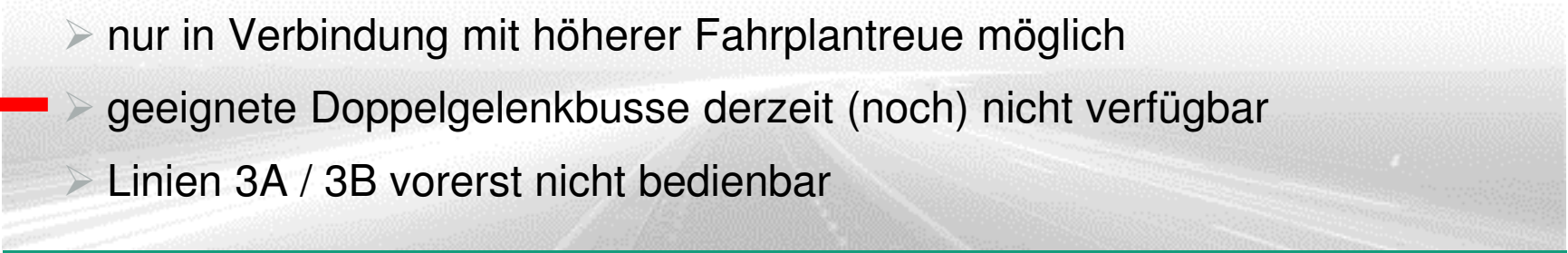
8 Solobatteriebusse

- Investitionsvolumen: 5,2 Mio. € + ASK ZBH
- abzgl. Investitionskosten Dieselbusse: 1,8 Mio. €

Szenarien

Szenario 1 – Gelenkbatteriebusse

■ Linien 2 / 5 / 33 / 45 / 73 mit Batterie Gelenk- bzw. –doppelgelenkbussen

- niedrigere Investitionskosten
 - leichter umsetzbar
 - schrittweise Einführung leichter möglich
 - hohe Umweltwirkung
 - weniger Änderungen im bestehenden Betriebsablauf
 - leichter erweiterbar auf andere Linien bei Anpassung der Dienstpläne oder sich entwickelnder Technologien (Speicher)
- 
- nur in Verbindung mit höherer Fahrplanteue möglich
 - geeignete Doppelgelenkbusse derzeit (noch) nicht verfügbar
 - Linien 3A / 3B vorerst nicht bedienbar

Szenarien

Szenario 2 – Hybridtrolleybusse + Gelenkbatteriebusse

■ Linie 2 mit Batterie Gelenkbussen

Linien 3A / 3B / 5 / 33 / 45 / 73 mit Hybridtrolleybussen

- Linien 3A / 3B bedienbar
- geeignete Fahrzeuge verfügbar – reife Technologie
- weitgehend unsensibel gegenüber Verspätungen
- hohe Umweltwirkung

- höhere Investitionskosten
- schwerer umsetzbar (Fahrleitungen) + längere Einführungszeit
- mehr Änderungen im Betriebsablauf notwendig
- nur sinnvoll auf allen Linien zusammen (Nutzung von Infrastruktur)

Szenarien

Zusatzszenario – Solobatteriebusse

■ 8 Solobatteriebusse

- „Einstieg in die Elektromobilität“
- geringe Investitionskosten
- **+** vergleichsweise hohe Umweltwirkung
- schnell einföhrbar
- Fahrzeuge am Markt verfügbar

- derzeit auf wenige Umlaufpläne beschränkt
- mehr Änderungen im Betriebsablauf (Sonn- und Feiertage) notwendig



Umwelt- und Klimawirkung (Jahr 2020) – Nachhaltigkeit

■ Einsparungen Diesel, CO₂ und Luftschadstoffe

	Szenario 1	Szenario 2	Zusatzszenario
➤ Diesel	≈ 1.146.000 l / a ¹⁾	≈ 1.413.000 l / a ¹⁾	≈ 204.300 l / a ¹⁾
➤ CO ₂ :	≈ 3.426.000 kg / a ²⁾	≈ 4.224.000 kg / a ²⁾	≈ 611.000 kg / a ²⁾
➤ NO ₂ :	≈ 1.930 kg / a ³⁾	≈ 2.380 kg / a ³⁾	≈ 340 kg / a ³⁾
➤ NO _x :	≈ 8.630 kg / a ³⁾	≈ 10.640 kg / a ³⁾	≈ 1.540 kg / a ³⁾
➤ PM:	≈ 56 kg / a ³⁾	≈ 69 kg / a ³⁾	≈ 10 kg / a ³⁾

1) berechnet mit ASEAG-Durchschnittswerten

2) direkt aus Verbrauch berechnet (2,99 kg CO₂ / l)

3) Basis = HBEFA – angepasst über CO₂-Werte

Vergleich Elektrobusse – Dieselbusse

Bezugsgröße: Mehrkosten (ohne Förderung)

■ Kostendifferenzen Elektrisch – Diesel

	Szenario 1	Szenario 2	Zusatzszenario
➤ Kapital:	2,33 Mio. € / a	3,73 Mio. € / a	0,34 Mio. € / a
➤ Betrieb:	-0,75 Mio. € / a	-1,07 Mio. € / a	-0,15 Mio. € / a
➤ W/I ¹⁾ :	-0,016 Mio. € / a	0,35 Mio. € / a	-0,017 Mio. € / a
➤ Mehrkosten:	1,57 Mio. € / a	3,01 Mio. € / a	0,18 Mio. € / a
	0,82 € / km	1,27 € / km	0,38 € / km
➤ Stromkosten:	0,64 Mio. € / a	0,80 Mio. € / a	0,10 Mio. € / a

¹⁾ Wartung und Instandhaltung

Nächste Schritte

Entscheidungsfindung

- Prüfung von Verspätungsanfälligkeit
- Verbrauchsmessungen im eigenen Gelenkbatteriebus der ASEAG + weitere Fahrzeugtests
 - Verifizierung der Annahmen und Simulationen
- Gespräche mit Fahrzeugherstellern
 - Batteriedoppelgelenkbusse
- Entscheidung über Szenario – weitere Vorgehensweise



Empfehlung des Gutachters

Blick in die Zukunft

Szenario 1 mit / ohne Zusatzszenario

nach Prüfung und ggf. Verbesserung von Fahrplanteue

- niedrigere Investitionskosten
- Infrastruktur leichter implementierbar → einfachere Umsetzung
- schrittweiser Ausbau leichter möglich
- mit sich entwickelnden Technologien (Speicher) leichter erweiterbar
- weniger Eingriffe in bestehenden Betriebsablauf
- hohe Umweltwirkung

FORSCHUNG FÜR EINE MOBILE ZUKUNFT



DRESDEN

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Thoralf Knotz

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI)

Zeunerstraße 38

01069 Dresden

www.ivf.fraunhofer.de

