

PLANERISCHE IMPLEMENTIERUNG: AUSWIRKUNGEN BEI EINSATZ VON WASSERSTOFFBUSSEN AUF LINIENNETZ, BETRIEB UND INFRASTRUKTUR



GLIEDERUNG

- Ziele und Rahmenbedingungen
- Verkehrliche und betriebliche Aspekte
 - ortsfeste Infrastruktur zur Energiezufuhr
 - Liniennetz- und Fahrplangestaltung
 - Fahrzeugeinsatz
 - Personaleinsatz
 - Betriebskosten
- Erfahrungen, Bewertungen und Empfehlungen

GLIEDERUNG

- **Ziele und Rahmenbedingungen**
- Verkehrliche und betriebliche Aspekte
 - ortsfeste Infrastruktur zur Energiezufuhr
 - Liniennetz- und Fahrplangestaltung
 - Fahrzeugeinsatz
 - Personaleinsatz
 - Betriebskosten
- Erfahrungen, Bewertungen und Empfehlungen

ZIELE UND RAHMENBEDINGUNGEN

- EU-Weißbuch 2011:
Halbierung der mit konventionellem Kraftstoff betriebenen Pkw bis 2030, deren völlige Abschaffung in Städten bis 2050. In städtischen Zentren soll die Stadtlogistik bis 2030 CO₂-frei sein.
- Bundesregierung Koalitionsvertrag 2018:
„Wir setzen das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 und den Klimaschutzplan 2050 mit den für alle Sektoren vereinbarten Maßnahmenpaketen und Zielen vollständig um und werden Ergänzungen vornehmen, um die Handlungslücke zur Erreichung des Klimaziels 2020 so schnell wie möglich zu schließen. Das Minderungsziel 2030 wollen wir auf jeden Fall erreichen.“
- Freie und Hansestadt Hamburg Wirtschafts- und Verkehrssenator:
Ab dem Jahr 2020 ist vorgesehen, nur noch emissionsfreie Busse anzuschaffen.

SZENARIEN ZUR ZUKÜNFTIGEN ENTWICKLUNG

Bevölkerung	Szenario 1	Szenario 2
Bevölkerungsstruktur	amtliche Prognose	amtliche Prognose
Erwerbstätigkeit	Zuwachs um 0,2% p.a.	Zuwachs um 0,03% p.a.
Motorisierungsgrad	Zuwachs um 0,6% p.a.	Zuwachs um 0,4% p.a.
Wirtschaft		
Wirtschaftsentwicklung	Zuwachs um 1,8% p.a.	geringer Zuwachs (<i>ca. 0,8% p.a.</i>)
Entwicklung der Erwerbsstruktur	Flexibilisierung der Arbeitsverhältnisse (mehr Teilzeitbeschäftigung)	starke Zunahme des Anteils an Mehrfacharbeitsverhältnissen
Preise für Mobilität (insbes. Kraftstoffpreise)	Zuwachs MIV (<i>1,42€/Liter</i>) Benzin: 1,2% p.a. Diesel: 2,2% p.a. Zuwachs ÖV: 1,5% p.a.	Zuwachs MIV (<i>1,83€/Liter</i>) Benzin: 3,0% p.a. Diesel: 3,0% p.a. Zuwachs ÖV: 1,0% p.a.
Gesellschaft/Technik		
Lebensstil	keine Änderung im Mobilitätsverhalten	Menschen passen ihr Mobilitätsverhalten an
Alltagsorganisation	Abflachung Verkehrsspitze um 1% (<i>von 7% auf 6% des werktägl. Aufkommens</i>)	keine spürbare Entlastung in den Verkehrsspitzenzeiten
Telemobilität	Verkehrssubstitution im Einkaufs-, Berufs- und Ausbildungsverkehr	keine Verkehrssubstitution zugunsten der Entwicklung des Freizeitverkehrs
Antriebstechnologie	Anteil Pkw mit grüner Plakate beträgt 100%	Anteil Pkw mit grüner Plakete entspricht Status Quo 2008
Politik		
Einführung von Umweltzonen	nein	ja
Ausweitung Tempo 30-Zonen	nein	ja
Anreize für neue Antriebe/Kraftstoffe	ja	nein
Radverkehrsförderung	trendmäßige Entwicklung des Radverkehrsanteils	Status Quo-Erhaltung: Radverkehrsanteil bleibt stabil

Beispiel Hamburg-Altona
Ziel: 25% mehr Fahrgastnutzen
Randbedingung: Komplett emissionsfrei

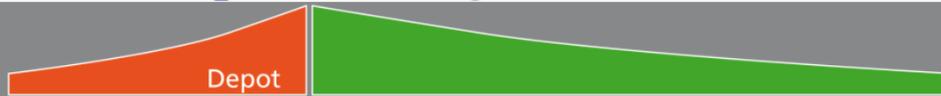
WAS HEISST DAS FÜR DIE VERKEHRSUNTERNEHMEN?

- Die Erwartungen der Besteller (Politik) zielen auf moderne Themen ab wie Sharingmodellen, On Demand Verkehren, Mobility as a Service. Das eigentliche Brot-und-Butter-Geschäft der Unternehmen, die Planung und Bereitstellung einer hochwertigen Verkehrsdienstleistung, gerät in den Hintergrund, es ist nicht „sexy“. Fahr- und Werkstattpersonal verlieren, Marketing und Controlling gewinnen.
Und jetzt: E-Mobilität
- Die Verkehrsunternehmen stehen unter Kostendruck. Die Restrukturierung der letzten Jahrzehnte hat zu Kostensenkungen geführt, es ging dabei aber auch viel Know-how verloren.
- Bei der Antriebstechnik dominiert der Dieselbus. Er ist preiswert weil
 - leistungsfähig,
 - in großer Stückzahl produziert wird,
 - die Tankfüllung für den Umlauf eines Tages reicht,
 - er mit Lkws kompatibel ist (Tankstelle, Werkstatt) und
 - er keine gesonderte straßenseitige Infrastruktur erfordert.
- Traditionelle Konkurrenten wie Erdgas (Augsburg, Saarbrücken, Hannover, Neumünster) oder Rapsöl (Hagen) sind eher auf dem Rückzug. Die Brennstoffzelle (Hamburg, Berlin) war schon mal stärker...

WELCHE FORMEN VON E-MOBILITÄT GIBT ES ÜBERHAUPT?



Depotlader
(*Overnight Charging*)



Gelegenheitslader
(*Opportunity Charging*)



Streckenlader
(*In Motion Charging*)



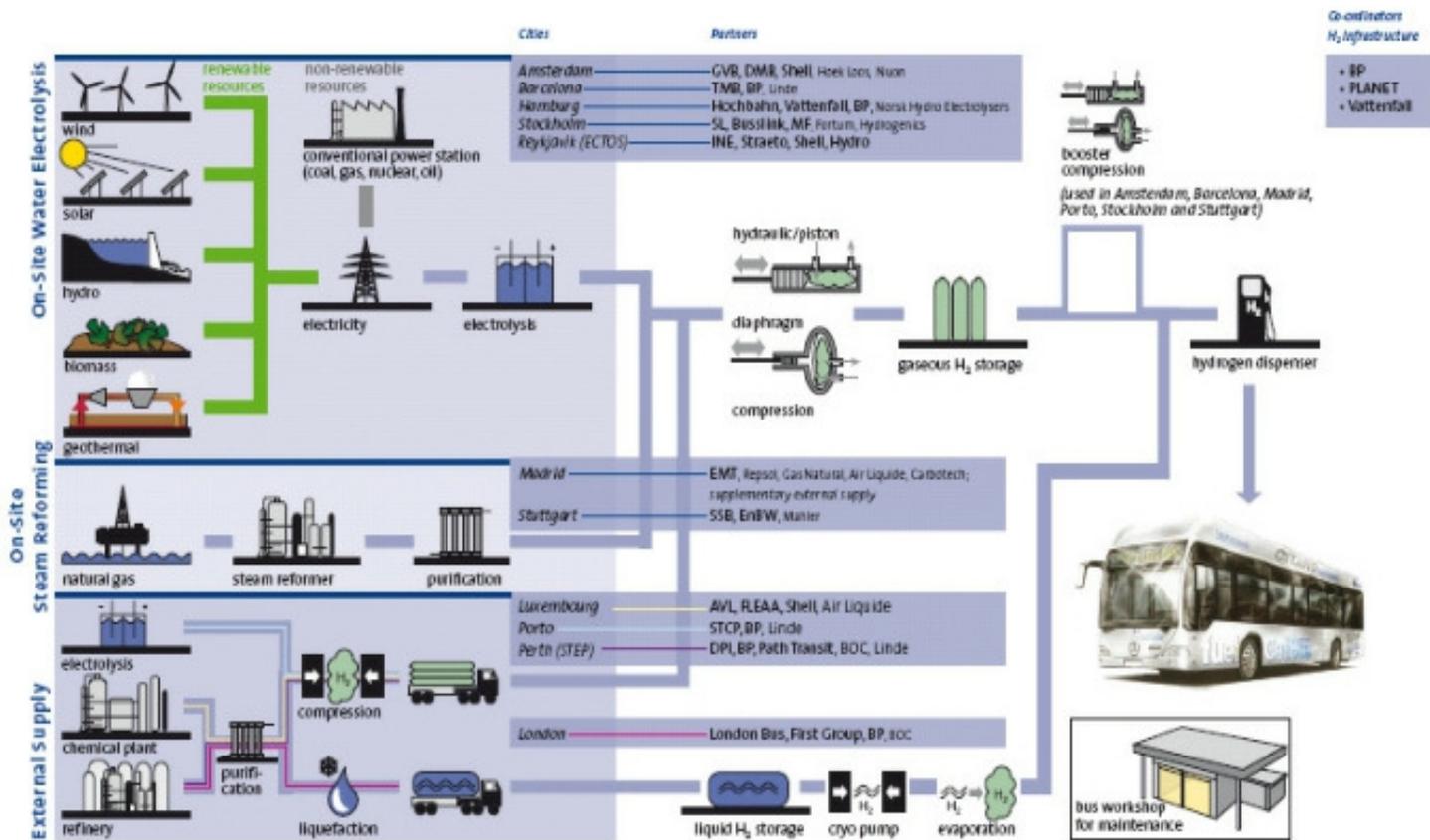
WAS BEDEUTET E-MOBILITÄT FÜR DIE UNTERNEHMEN?

- Eine Umstellung der gesamten Flotte auf „einen Schlag“ ist wg. des heterogenen Fahrzeugalters und des kaum existenten Gebrauchtbusmarktes sehr schwierig.
- Nur wirklich große Verkehrsunternehmen mit einigen Betriebshöfen können die Umstellung sukzessive vornehmen.
- Elektrische Antriebe können gegenüber dem Diesel zu betrieblichen Einschränkungen führen aufgrund
 - unterschiedlicher Fahrzeugtypen
 - geringerer Reichweite
 - Abhängigkeit von Streckenausrüstung
 - geänderter Anforderungen an Werkstatt und Tankstelle

GLIEDERUNG

- Ziele und Rahmenbedingungen
- **Verkehrliche und betriebliche Aspekte**
 - ortsfeste Infrastruktur zur Energiezufuhr
 - Liniennetz- und Fahrplangestaltung
 - Fahrzeugeinsatz
 - Personaleinsatz
 - Betriebskosten
- Erfahrungen, Bewertungen und Empfehlungen

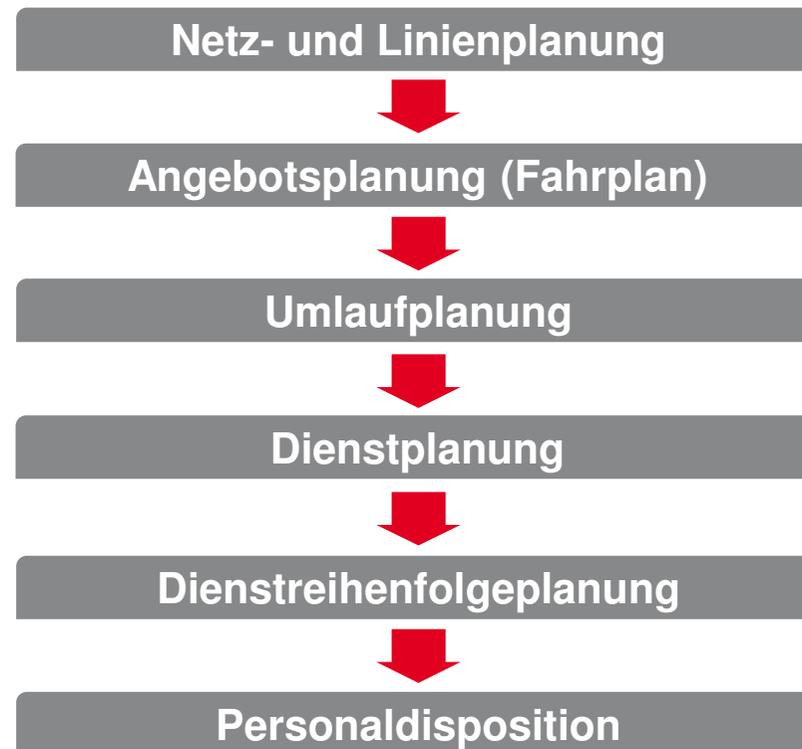
ORTSFESTE INFRASTRUKTUR ZUR ENERGIEZUFUHR ERZEUGUNG UND TRANSPORT VON WASSERSTOFF BEI CUTE



ORTSFESTE INFRASTRUKTUR ZUR ENERGIEZUFUHR : WASSERSTOFFTANKSTELLE

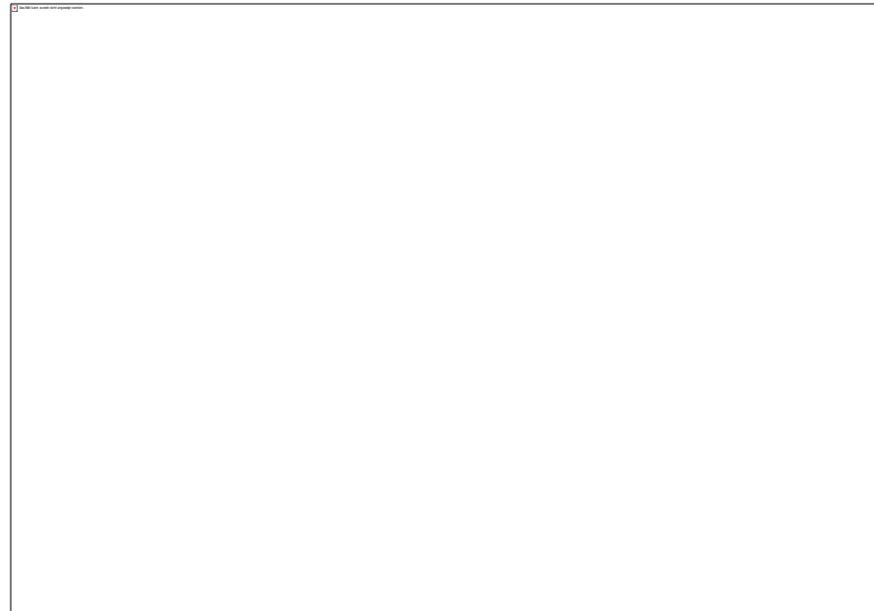


VERKEHRLICHE UND BETRIEBLICHE ASPEKTE EINFLUSSBEREICHE DER ANTRIEBSART



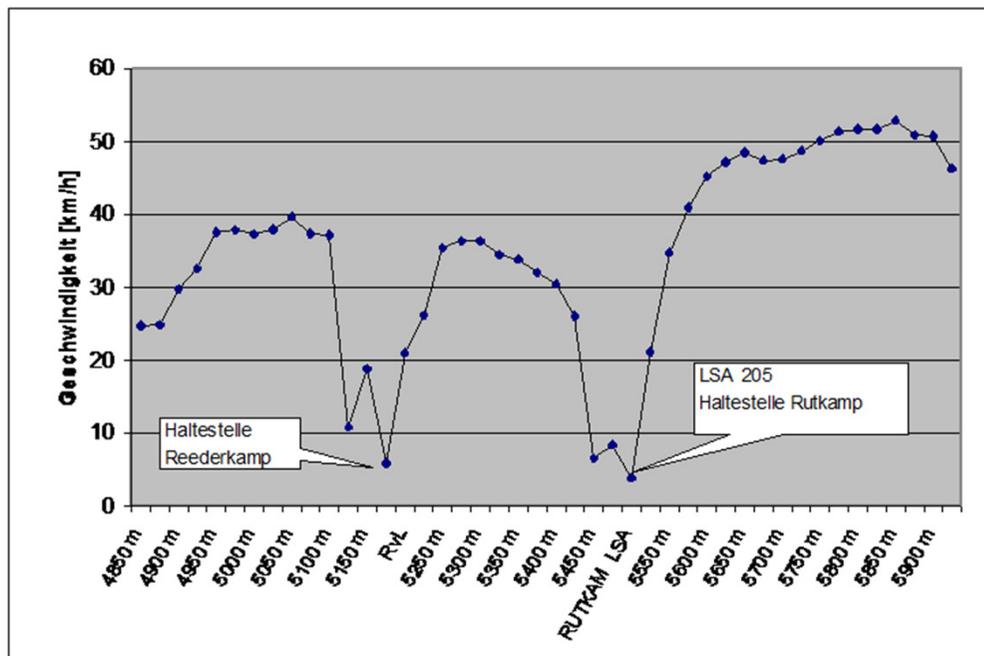
LINIENNETZ- UND FAHRPLANGESTALTUNG

- Identifizierung „geeigneter“ Linien für Wasserstofffahrzeuge
 - Berücksichtigung des Nahverkehrsplans
 - Fahrgastnachfrage
 - Streckenparameter
 - Qualitätsparameter
 - Lage Betriebshof / Tankstelle



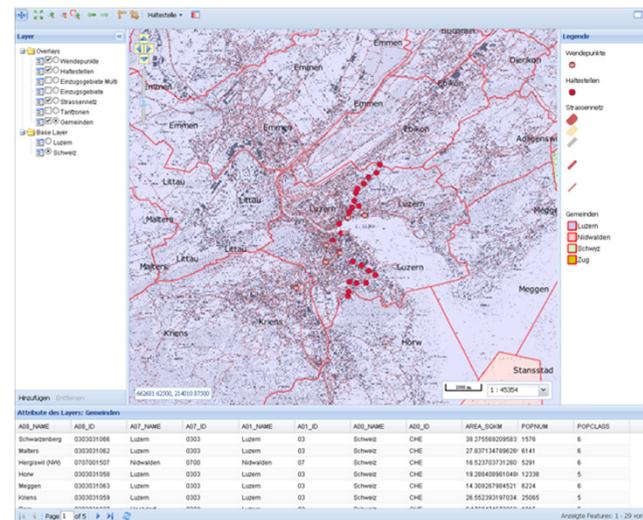
LINIENNETZ- UND FAHRPLANGESTALTUNG

- Einfluss der Antriebsenergie auf den Fahrtablauf
 - Beschleunigungsvermögen
 - Höchstgeschwindigkeit
 - Bergtauglichkeit
 - Reichweite



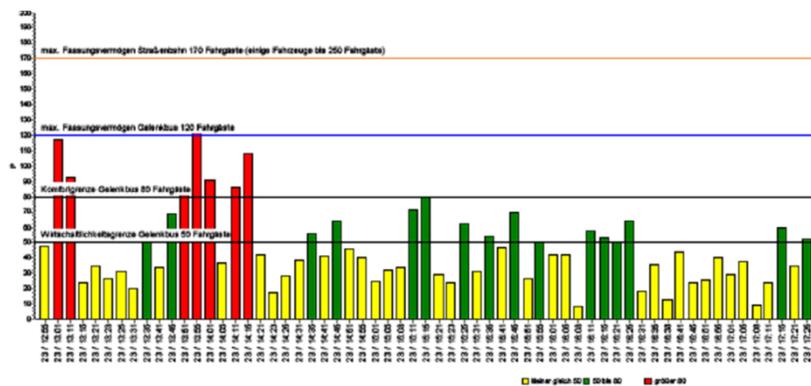
FAHRZEUGEINSATZ VERKEHRLICH

- Platzkapazitäten
- Direktfahrtenmaximierung
- Fuhrpark / Fahrzeugmix



Pivotauswertung Fahrgastwechsel (P)

Mittelwert	Liniennummer	2						
	Linienrichtung	2						
Ortsnummer	Ortskürzel	Ortsname \ Abfahrzeit (Soll)	04:00 - 05:59	06:00 - 07:59	08:00 - 09:59	10:00 - 11:59	12:00 - 13:59	16:00 - 17:59
6601	PÜRМ	P+R-Platz Messe	1,00	13,00	2,50	5,00	5,00	1,00
59999	MESS	Messe	0	0,50	3,50	7,50	4,50	9,00
612	MDR	mdi/Kinderkanal	1,00	2,50	1,50	0,50	2,50	3,00
602	EGA	ega	1,00	0,50	1,50	1,00	2,50	0
452	GOTP	Gothaer Platz	0	8,50	6,50	9,50	14,50	4,00
7302	SFIZ	S-Finanzzentrum	0	6,50	5,50	5,00	3,50	4,00
432	GORS	Gorkstraße	1,00	1,00	4,00	7,50	6,00	6,00
412	BRÜG	Bühler Garten	0	4,50	5,00	7,75	8,00	4,00
361	NEWS	Neuerwerkstraße	3,00	6,25	5,50	7,00	5,75	3,00
332	ANGB	Angerbrunnen	0	5,00	11,00	11,50	18,50	8,00
313	ANGE	Anger	21,00	63,00	51,50	63,50	82,00	45,00
1882	KRÄT	Krämpfedor	0	7,00	5,50	11,50	12,00	6,00
20304	LEIP	Leipziger Platz	1,00	7,50	14,25	12,50	20,50	6,00
20504	HANP	Hanseplatz/FH	3,00	37,00	17,00	19,50	21,50	15,00
20704	GRES	Greifswalder Straße	1,00	13,00	2,00	2,50	7,25	1,00
8091	KRÄG	Krämpfer Gärten	3,00	12,75	8,00	16,00	10,00	7,00
3613	BAUW	Bautzener Weg	0	0	1,50	1,00	5,00	0
21304	BRER	Mauel-Breuer-Ring	8,50	5,50	6,00	11,00	24,00	8,00
8171	WAGS	Wagenfeldstraße	4,50	2,00	2,50	5,25	17,00	7,00
2122	RINB	Ringelberg	0	0	0	0	0,50	1,00
2123	RINB	Ringelberg	0	0,50	0,75	1,00	2,50	0



FAHRZEUGEINSATZ BETRIEBLICH

- Reichweite
- Ladezeit
- Entfernung zur Tankstelle
- Fuhrpark / Fahrzeugmix

Text	ohne trip-shifting	mit trip-shifting -3/+3 min.
max. Fahrzeugbedarf in der Verkehrsspitze	16	15

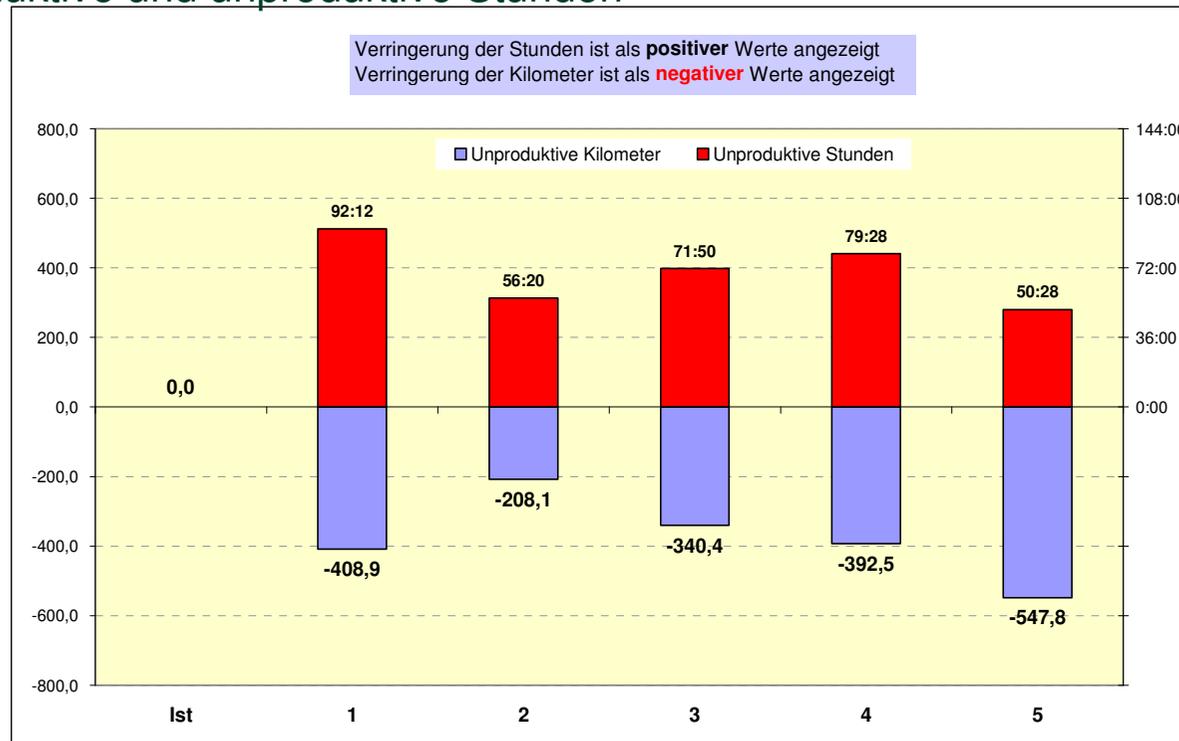
- Ergebnis der Umlaufoptimierung
 - Von 565 produktiven Fahrten montags bis freitags wurden nur 34 Fahrten verschoben
 - Nur 10 Fahrten wurden um das maximale Maß von ± 3 Minuten verschoben

Verschiebung [Min]	-3	-2	-1	0	1	2	3
Anzahl Fahrten	4	5	8	531	6	5	6

→ Ein größerer Fahrzeugmix erschwert die Einsatzplanung

PERSONALEINSATZ

- Fahrzeugeinsatz
- Produktive und unproduktive Stunden



→ Ein größerer Fahrzeugmix verteuert den Personaleinsatz

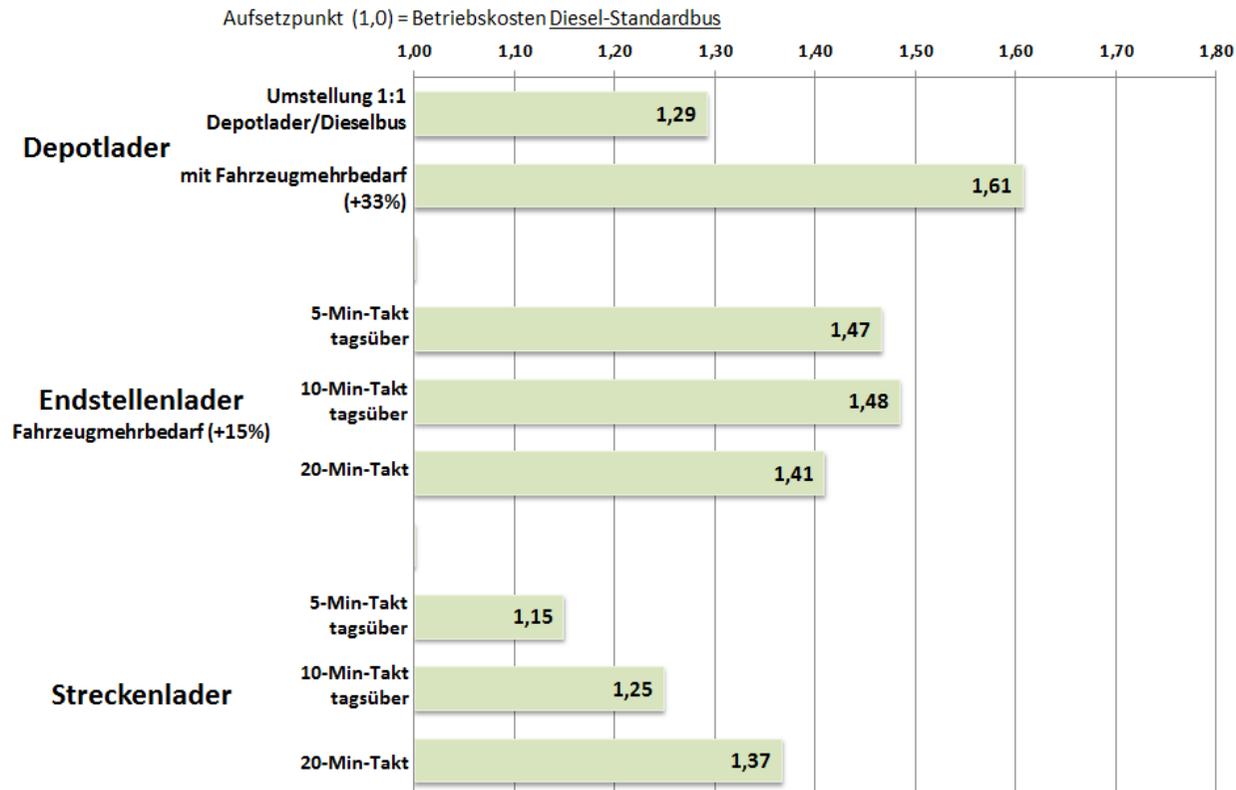
PRIMÄRENERGIE-WIRKUNGSGRAD

Antriebsenergie	Anmerkungen/Differenzierungen	Primärenergie-Wirkungsgrad
Elektrizität (Ökostrom)	Trolleybus	74,7 %
	E-Bus - Streckenladung	71,0 %
	E-Bus - Depotladung	69,4 %
	E-Bus - Gelegenheitsladung	65,1 %
Brennstoffzelle/ Wasserstoff	Erzeugt aus regenerativer Elektrizität (Power to X)	28,3 %
Gas oder Flüssigtreibstoff		22,8 %

Quelle: CNB aus Daten von TU Dresden, *Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen*, 2017 und *Schaufenster Mobilität, E-Bus Berlin – Gemeinsamer Abschlussbericht*, 2016 (Elektrizität und Wasserstoff)
 Karlsruher Institut für Technologie, *Power-to-Gas mit hohem Wirkungsgrad*, 2018 und FEV GmbH, *FEV entwickelt neue Großmotorenfamilie*, 2017 (Gas)

BETRIEBSKOSTEN ELEKTRO-SOLOBUS FÜR 15 KM MUSTERLINIE

Betriebskostenfaktor im Vergleich zu Dieselnbussen
nach Ladekonzept und Einsatzbereich (Stand 2018, Standardbus)

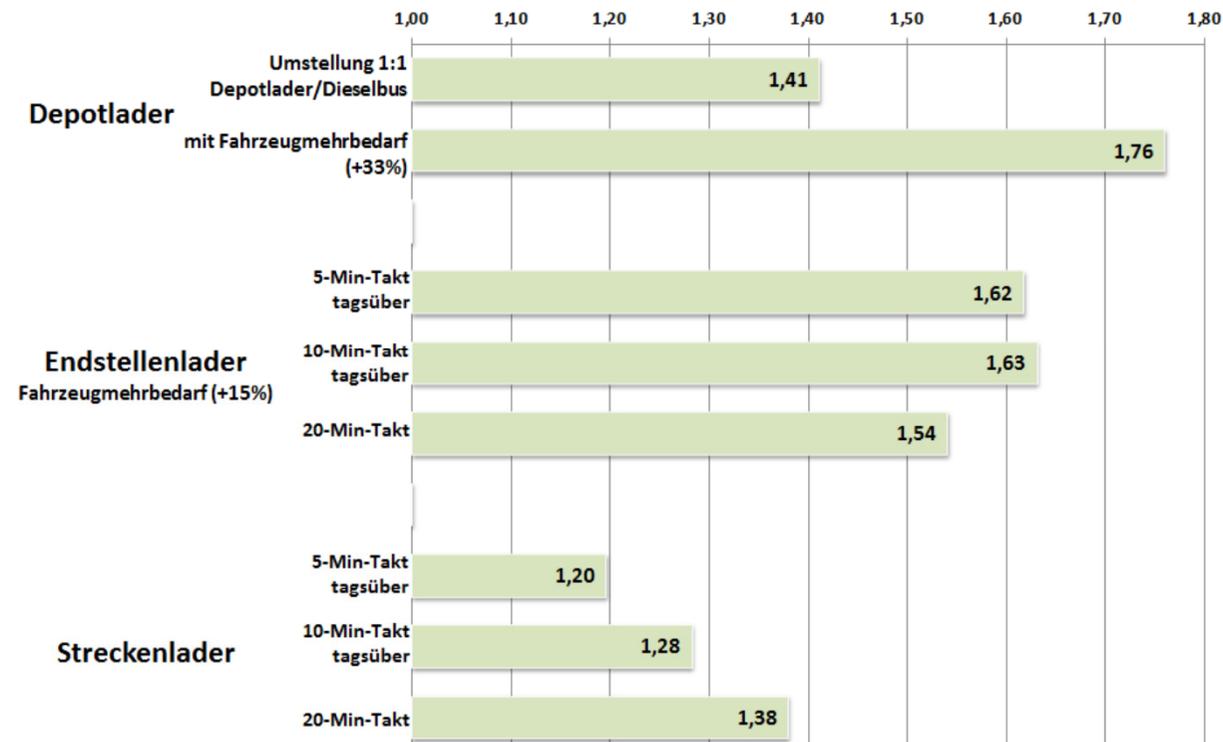


Kostenvergleich mit Berücksichtigung der Abschreibung der E-Fahrzeuge, der notwendigen Ladeinfrastruktur im Depot und ggf. im Stadtbereich und der Personal-, Energie- und Instandhaltungskosten für eine 15 km lange Musterlinie. Die Mehrkosten wegen des zusätzlichen Flächenverbrauchs werden nicht berücksichtigt.

BETRIEBSKOSTEN ELEKTRO-GELENKBUS FÜR 15 KM MUSTERLINIE

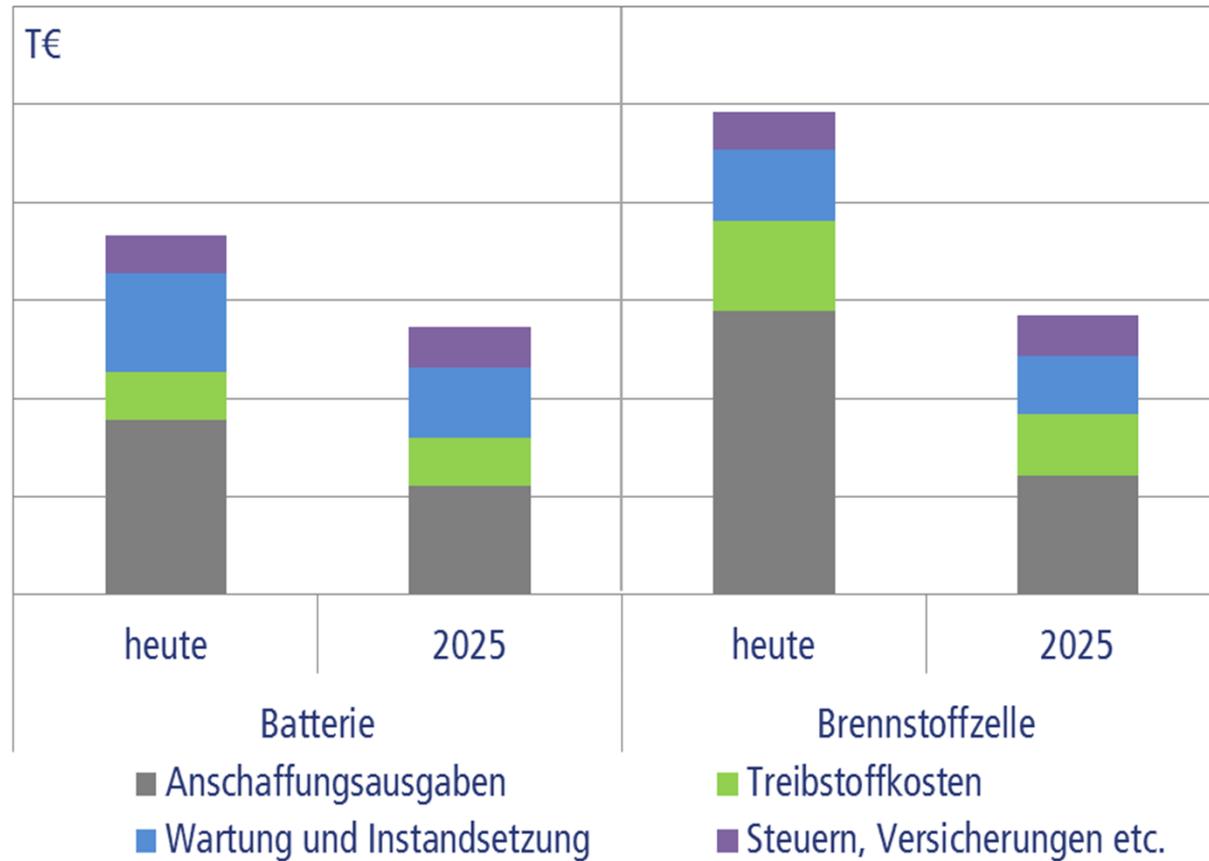
Betriebskostenfaktor im Vergleich zu Dieselbussen
nach Ladekonzept und Einsatzbereich (Stand 2018, Gelenkbus)

Aufsetzpunkt (1,0) = Betriebskosten Diesel-Gelenkbus



Kostenvergleich mit Berücksichtigung der Abschreibung der E-Fahrzeuge, der notwendigen Ladeinfrastruktur im Depot und ggf. im Stadtbereich und der Personal-, Energie- und Instandhaltungskosten für eine 15 km lange Musterlinie. Die Mehrkosten wegen des zusätzlichen Flächenverbrauchs werden nicht berücksichtigt.

ENTWICKLUNG DER KOSTEN



GLIEDERUNG

- Ziele und Rahmenbedingungen
- Verkehrliche und betriebliche Aspekte
 - ortsfeste Infrastruktur zur Energiezufuhr
 - Liniennetz- und Fahrplangestaltung
 - Fahrzeugeinsatz
 - Personaleinsatz
 - Betriebskosten
- **Erfahrungen, Bewertungen und Empfehlungen**

VERLÄSSLICHKEIT TANKSTELLE UND FAHRZEUGE (CUTE)

- Tankstelle
 - Alle Tankstellen (mit einer Ausnahme) waren im Zeitraum von zwei Jahren zu mehr als 80% verfügbar.
 - Die Mehrzahl davon über 90%
 - Die Verlässlichkeit bezogen auf komplette Betankung war geringer
- Fahrzeuge
 - Die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge stieg kontinuierlich im Laufe des Projektes
 - In Hamburg steigerte sich der Einsatz wie folgt:
 - ❖ Zuerst auf Abschnitten der Linie 24 in Randlage, stets in Nähe von Betriebshof und Tankstelle Hamburg Hummelsbüttel
 - ❖ Dann Einsatz auf der MetroBus-Linie 6 zwischen U-Borgweg und City, stets zwei Fahrzeuge als betriebliche Verstärkung im “Doppelpack”
 - ❖ Danach Einsatz auf der MetroBus-Linie 6 ohne Verstärker

BUSLEITSTELLE UND BETRIEBSLENKUNG HAMBURG



→ Die Wasserstoffbusse fügten sich bald in den Betriebsalltag ein

ERFAHRUNGSWERTE (CUTE)

- Betriebsdauer: 2 Jahre
- Anzahl Wasserstoffbusse: 27 in 9 Städten
- Laufleistung: 865.000 km
- Betriebliche Einsatzdauer: 64.000 Stunden
- Laufleistung der Wasserstoffbusse variierte stark zwischen 40.000 und 140.000 km bzw. 3.300 und 10.000 Einsatzstunden in der jeweiligen Stadt
- Tagestemperaturen zwischen 39 °C down to -16 °C,
- Luftfeuchtigkeit zwischen 13 % und 100 %.
- Maximale Steigung 8,5%
- Die maximale Lebensdauer einer einzelnen Brennstoffzelle betrug 3.200 Einsatzstunden.
- Sicherheit: Es kam in keinem Unternehmen zu einem Unfall.

ZUFRIEDENHEITSWERTE (CUTE)

- Fahrer: Die Fahrzeuge wurden von zahlreichen Fahrern eingesetzt. Die Zufriedenheit war sehr hoch.
- Betriebspersonal: Die Werkstatt wurde mit neuen Aufgaben konfrontiert. Nach entsprechender Einweisung durch den Hersteller (EVO-Bus) entwickelte das Personal sich selbstständig weiter.
- Fahrgäste: Im Rahmen von CUTE nutzten gut 4 Millionen Fahrgäste die Wasserstoffbusse. Sie waren sehr beliebt (neue Technologie, leise) und manche Fahrgäste warteten gezielt auf einen Wasserstoffbus. Manche nutzen die Fahrt um sich anhand der im Fahrzeug installierten technischen Beschreibung weiterzubilden, manche erfreuten sich auch an der Wasserdampffontäne.
- Betreiber: Der Einsatz von Wasserstoff wird von den Betreibern als nicht gefährlicher eingestuft als konventionelle Kraftstoffe. Betreiber, die Erfahrungen mit Erdgasbussen und entsprechenden Betankungsanlagen hatten, sahen keine4 grundlegenden Unterschiede zwischen Gas- und Wasserstofftankstellen.

WAS BEDEUTET DIE UMSTELLUNG AUF WASSERSTOFF?

FAZIT

- Die Politik muss den öffentlichen Verkehr elektrifizieren. Ohne einen attraktiven, sehr gut nachgefragten ÖPNV sind Klimaziele niemals zu erreichen.
- Die Art des elektrischen Antriebs hängt von betrieblichen Besonderheiten und der Knappheit der Ressourcen ab.
- Wasserstoff hat sich als Antriebsstoff im ÖPNV bewährt. Er ist für den Dauerbetrieb mit seinen Anforderungen (hohe Laufleistung, kurze Betankung, geringes Gewicht) gut geeignet.
- Wasserstoffbusse sind (mit grünem Strom) 100% CO₂-frei, leise und somit extrem umweltfreundlich
- Ein Parallelbetrieb von zwei Antriebsarten ist auf Dauer nicht bezahlbar“, Klaus Röder, Fahrzeugchef der Stadtwerke Augsburg.
- Die Politik darf die Verkehrsunternehmen nicht mit den Anforderungen im Regen stehen lassen.

Danke



RS Consult Holding UG

Erfolge erfahren

BACKUP

FEIJI BUSSE MIT SINOXYENERGY-BZ-SYSTEMEN IN YUNFU, GUANGDONG, CHINA

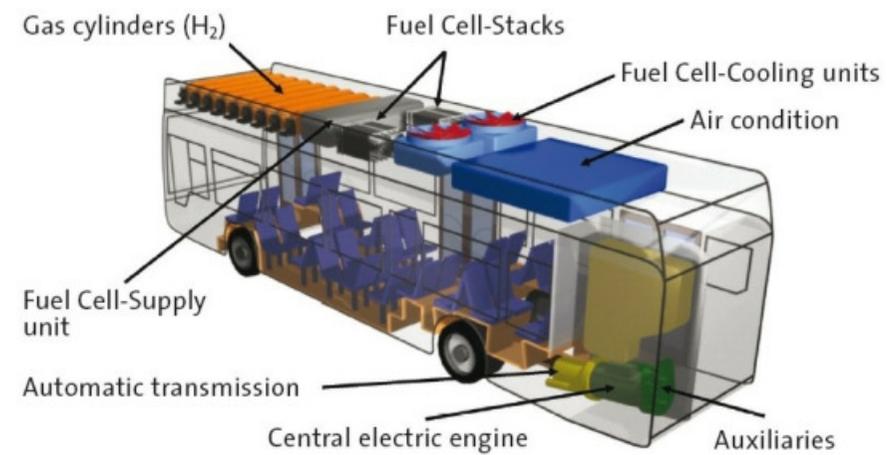


Produktionskapazität für Feiji Bus etwa 5.000 Busse/ Jahr ab 2018 [eines von 10 chinesischen BZ-Busherstellern]

Preis 11 m Bus ca. 3 MRMB (ca. 380k€)



KOMPONENTEN DES WASSERSTOFFBUSSES



LIFE CYCLE

