

Dekarbonisierung des städtischen ÖV

Luzern, 22.03.2019

Christoph Schaaffkamp, Fabien Laurent

Agenda

Einführung: Motivation zur Dekarbonisierung

Ausgangslage Berlin

Technologie: Stand der Technik

Bewertung des Umweltnutzens

Bewertung der Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung)

Zeitvorlauf zur Dekarbonisierung

Erkenntnisse des Falls Berlin und Unterschiede zur Schweiz

Diskussion

Motivation der Dekarbonisierung

Der große Kontext: Klimawandel, Folgen und Maßnahmen

(nahezu) sicher (>99%):
Temperaturanstieg

sehr wahrscheinlich (>90%):
Verschwinden Gletscher, Extremwetter,
kein Schnee, Erde tw. unbewohnbar

wahrscheinlich (>66%):
Globale Wirkungen: Hunger, Flucht

unklar (>50%): Andere Bedingungen
z.B. für Teile der Landwirtschaft

Was hilft dagegen?



- „nachhaltiges Wirtschaften“/ Dekarbonisierung. Zentrale Bedeutung: Umfang und Geschwindigkeit
- Erfordert Kombination aus Verhaltens- und technologischen Änderungen sowie Vermeidung falscher Investitionsentscheidungen
- Wert von End-of-pipe Ansätzen (CO₂- Engineering und andere Technologien zur Reduzierung der Erderwärmung) fraglich

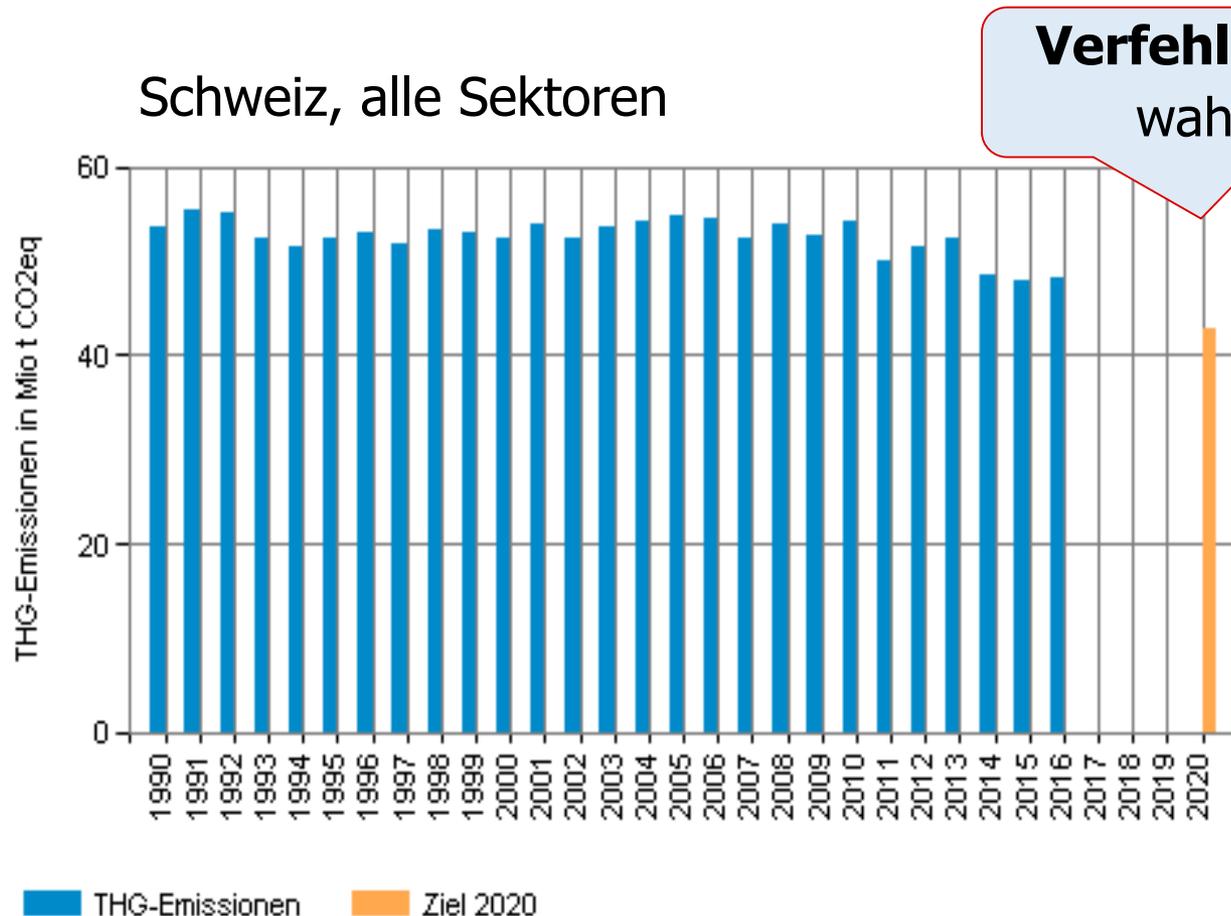
Motivation zur Dekarbonisierung

Was bedeutet dann die Dekarbonisierung?

- **Klimaschutz!** → **Umfassender Transformationsprozess** in allen Sektoren:
 - Ausstieg aus fossilen Energien (*D: – 95-100% bis 2050*)
 - Nutzung erneuerbarer Energiequellen: Grüner Strom, Biomasse
- **für den ÖV**
 - Umstellung auf nicht-fossile **Antriebsenergien**
 - Und: (weitere) **Verlagerung** des Verkehrs auf umweltfreundliche Verkehrsträger (**ÖV**, Langsamverkehr)

Motivation zur Dekarbonisierung

Schweiz: Es gibt auch hier noch viel zu tun...



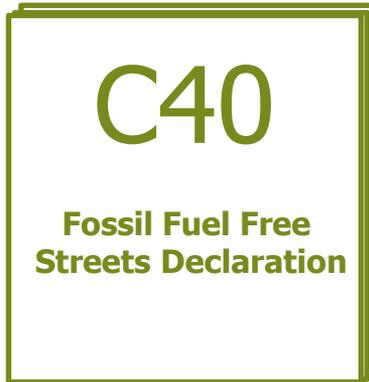
Verfehlung Ziel 2020
wahrscheinlich.

Verkehr: +3 %
CO₂-Emissionen
zwischen 1990 und
2016

Totalrevision CO₂-
Gesetz:
Wieviel Biss?
(noch offen);
Wirkung CO₂-
Handelssystem

Motivation zur Dekarbonisierung

Der politische Wille für die Umstellung des Busverkehrs auf alternative Antriebe verbreitet sich global



„Ab 2025 nur noch Null-Emissions-Busse beschaffen, bis 2030 einen wesentlichen Teil der Stadt in eine emissionsfreie Zone umwandeln“
Paris, London, Los Angeles, Tokyo, Mexico City, Kopenhagen, Rom, Vancouver, Cape Town... (26 Städte, Stand 12.2018)

Gesetzl. Beschaffungsvorgaben ab ca. 2022 für saubere/zero emission Busse

Ab 2020 nur noch saubere Busse beschaffen

100 % saubere Busflotte bis 2025

100 % saubere Busflotte bis 2030

Laufende Novellierung Clean Vehicle Directive (Europäische Union)

Hamburg, Kopenhagen (2019), Moskau (2021)

Paris (RATP), Kopenhagen, Amsterdam

Los Angeles, Berlin, Niederlande (auch Überlandverkehr)

Motivation zur Dekarbonisierung

Auch die Schweiz macht vorwärts

Postulat des Nationalrats vom 11.03.2019 für die Mitfinanzierung ökologischerer Busse:

"Der Bund soll aufzeigen, wie er eine Anschubfinanzierung leisten und einen Teil dieser Mehrkosten übernehmen will. Weil die Kosten mittelfristig bei höheren Stückzahlen sinken werden, soll die Unterstützung befristet sein."



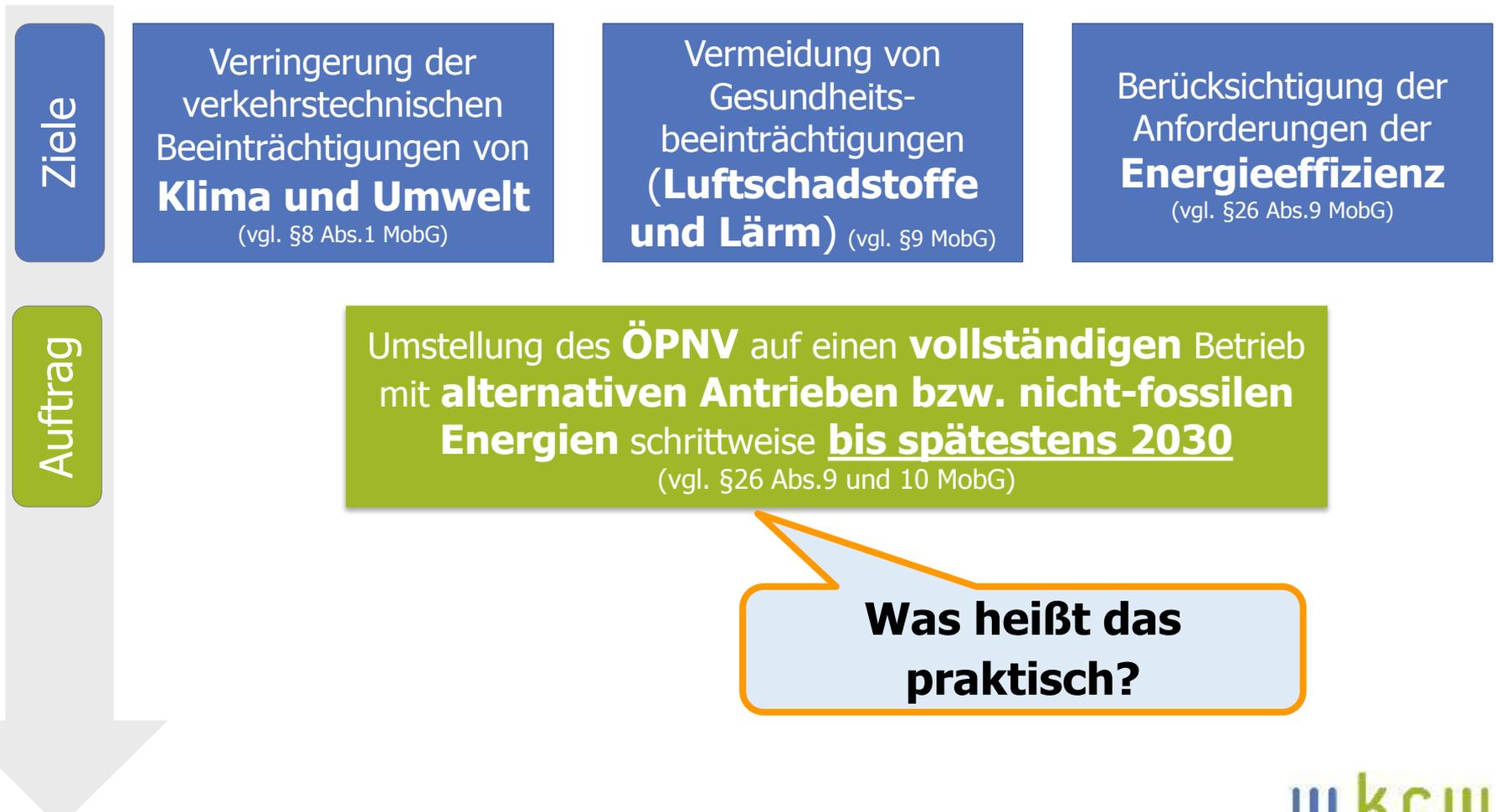
Keystone-SDA

Bild: Parlamentsdienste 3003 Bern

Motivation zur Dekarbonisierung

Beispiel Berlin: vollständige Dekarbonisierung

Anforderungen des neuen **Berliner Mobilitätsgesetzes** (Juni 2018)



Agenda

Einführung: Motivation zur Dekarbonisierung

Ausgangslage Berlin

Technologie: Stand der Technik

Bewertung des Umweltnutzens

Bewertung der Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung)

Zeitvorlauf zur Dekarbonisierung

Erkenntnisse des Falls Berlin und Unterschiede zur Schweiz

Diskussion

Ausgangslage Berlin

Berlin: Struktur des ÖPNV

BVG

Zwei Hauptbetreiber:

Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)



U-Bahn (145 km Netzlänge)



Omnibus (1180 km Netzlänge)



Tram (190 km Netzlänge)



Fähre (6 Linien)

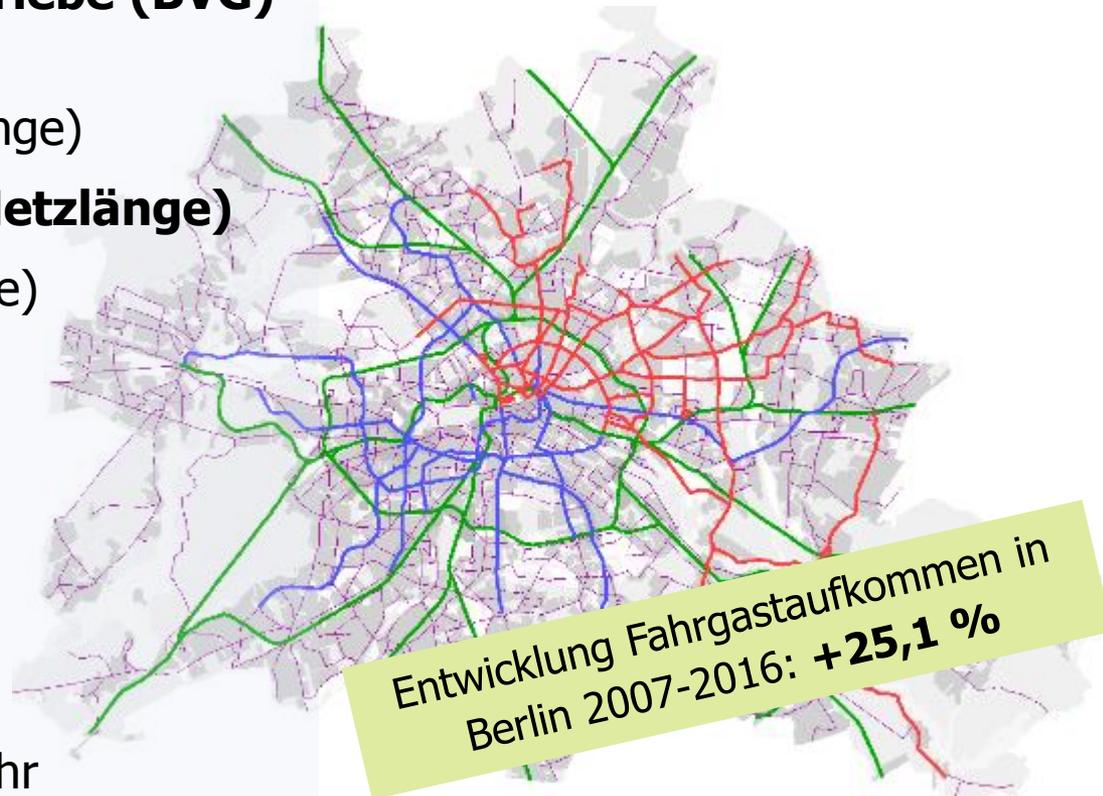


S-Bahn Berlin GmbH

(257 km Netzlänge)



Eisenbahnregionalverkehr



Zahlenspiegel 2018 der BVG und Berliner Nahverkehrsplan 2019-2023

Bild: CNB

Ausgangslage Berlin

Berlin: Betriebliche Anforderungen im Busverkehr



Größter Omnibusbetrieb Deutschlands:

Ca. **1500 Busse** (inkl. Subunternehmen)

- 515 x Standardbus (davon 5 elektrisch)
- 560 x Gelenkbus
- 415 x Doppeldecker

Lange Umläufe bis zu über 400 km und über 24 Stunden

Ø Laufleistung/Bus: 60.000 km p.a.

Dichte Linientakte (von 4- bis 20-Minuten-Takt)

Mehrleistungsprognose Bus 2019-2030: + **7,9 Mio. km (+8,5 %)**

Flache Topographie

Keine nennenswerte Abfallenergiequellen

Zahlenspiegel 2018 der BVG + Subunternehmen (ca. 100 Fahrzeuge)
Berliner Nahverkehrsplan 2019-2023

Ausgangslage Berlin

Berlin: Politische Rahmenbedingungen

Anforderungen des neuen **Berliner Mobilitätsgesetzes** (Juni 2018)



Ausgangslage Berlin

Erste Erkenntnisse

Umsetzung des Beschlusses der
Dekarbonisierung



Strategische Optimierungsaufgabe!

Ziele

Die strategische Planung der Dekarbonisierung ist eine Optimierungsaufgabe zwischen verschiedenen Parametern

Technische Reife

Verfügbarkeit einsatzfähiger Fahrzeuge, Zuverlässigkeit, Störungsresilienz

Betriebliche Flexibilität

Laufleistung, Kapazität, Betriebseffizienz (Fahrplan und Personal)

Umweltnutzen

Verringerung von Treibhausgasemissionen und Schadstoffen, Lärm, Primärenergieeffizienz

Systemwirtschaftlichkeit

Lebenszykluskosten (LCC) und Investitionen

Zeitvorlauf

Abwägung politische Realisierungswünsche vs. Fristen für Fahrzeuge, Infrastruktur (Planung, Ausschreibungen, Genehmigungen, Bau)

Stadtgestaltung

Integration des neuen Systems in die Stadt (Flächensparsamkeit, Ästhetik Infrastruktur)

Agenda

Einführung: Motivation zur Dekarbonisierung

Ausgangslage Berlin

Technologie: Stand der Technik

Bewertung des Umweltnutzens

Bewertung der Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung)

Zeitvorlauf zur Dekarbonisierung

Erkenntnisse des Falls Berlin und Unterschiede zur Schweiz

Diskussion

Stand der Technik

Nicht-fossile Antriebstechnologien



Obus



Depotlader



Endstellenlader



Streckenlader



Brennstoffzelle



Gasbus

Stand der Technik

Nicht-fossile Antriebstechnologien



Obus

Depotlader

Endstellenlader

Streckenlader

Brennstoffzelle

Gasbus

Reife Technologie
(300 Städte mit
Obus-Betrieb in der
Welt)

Erste serienreife
Solobusse 2019
hergestellt (Solaris,
Daimler)

Größere Gelenkbus-
flotten schon in
Betrieb
(Amsterdam...)

Für große Fahrzeuge
(bis 24m) verfügbar
(Hess/Swisstrolley+,
Van Hool, Solaris)

Derzeit nur in
Pilotprojekten in
Einsatz (Solo- und
Gelenkbusse)

Reife Technologie,
Erdgasbusse in vielen
Städten in Einsatz

Unbegrenzte
Reichweite,
Spurgebunden

150 km Reichweite
garantiert, Heizung
fossil betrieben

50-60 km Reichwei-
te, kurze Nachladung
an Endstellen

15-20 km Reichwei-
te, Nachladung
während der Fahrt
unter Oberleitung

>300 km Reichweite
Hohe Energie- und
Instandhaltungs-
kosten

>300 km Reichweite

Lokal nicht
emissionsfrei

Kein Mehrbedarf an
Fahrzeugen

Bei langen Umläufen:
Mehrbedarf
Fahrzeuge und
Personal (+20-50 %)

Fahrzeugmehrbedarf
wegen Ladezeit bei
ca. 10-20 %

Kein Mehrbedarf an
Fahrzeugen

Geringer Fahrzeug-
mehrbedarf bei sehr
langen Umläufen

Geringer Fahrzeug-
mehrbedarf bei sehr
langen Umläufen

Aufwändige
Infrastruktur
(Kreuzungen...)

Betriebshof-
management, mehr
Flächenbedarf

An Endpunkte
gebunden
Infrastrukturbedarf

Oberleitungsgebun-
dener Anteil Fahrt-
strecke: 40-60 %

Tankstelle und
Lagerung von H₂

Tankstelle

Fahrzeugkosten:
ca. Faktor 2 ggü.
Diesel

Fahrzeugkosten:
ca. Faktor 2,3 ggü.
Diesel

Fahrzeugkosten:
ca. Faktor 2,3 ggü.
Diesel

Fahrzeugkosten:
ca. Faktor 2,3 ggü.
Diesel

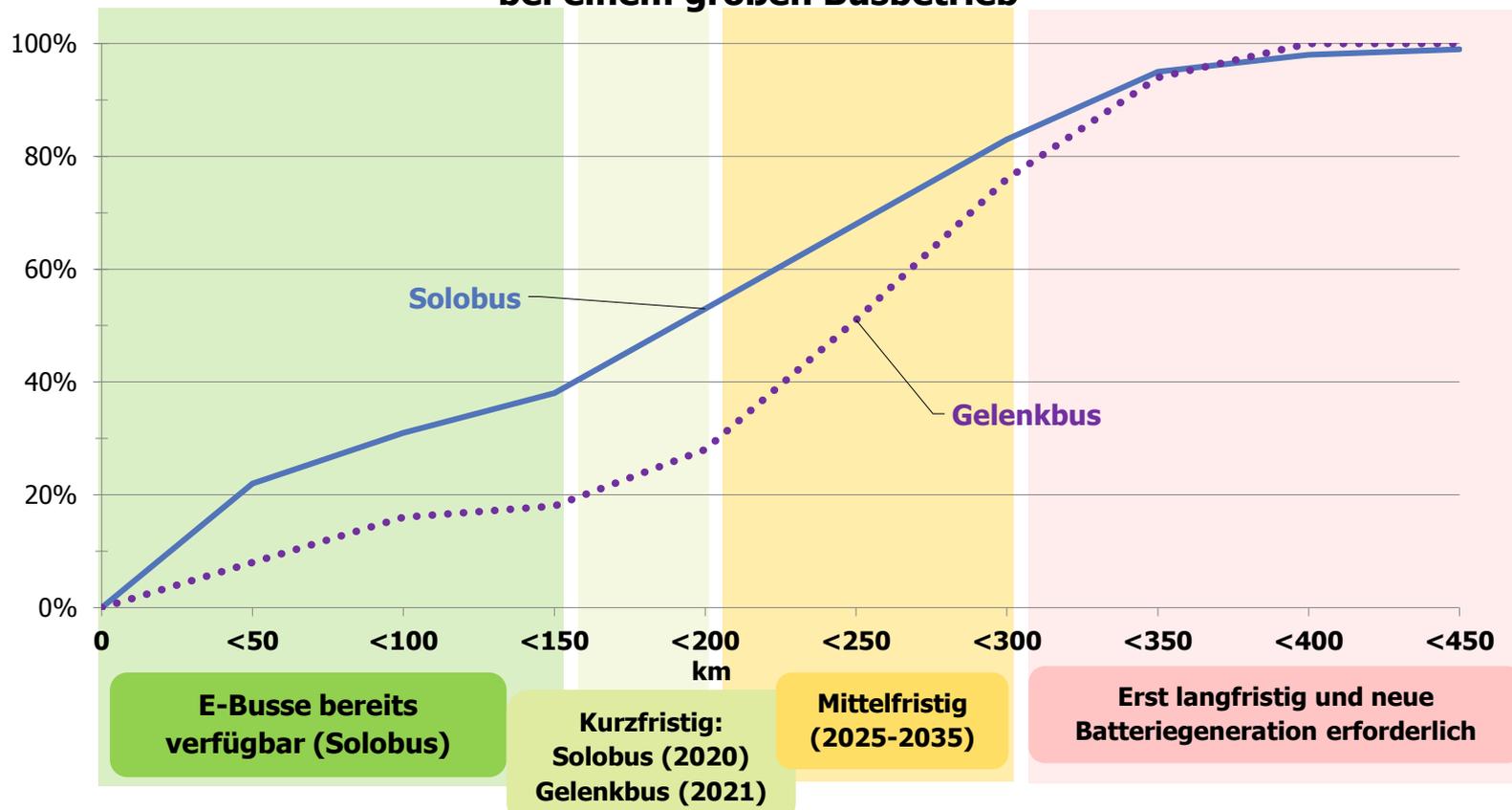
Fahrzeugkosten:
ca. Faktor 2,5 ggü.
Diesel

Fahrzeugkosten:
ca. Faktor 1,2 ggü.
Diesel

Stand der Technik

Depotlader: Reichweite

Aufteilung Umlauflängen auf einem Wochentag bei einem großen Busbetrieb



Ladeinfrastruktur in der Stadt (Ladepunkt, Oberleitung) bei langen Umläufen und großen Fahrzeugen erforderlich (oder sonst erheblicher Fahrzeug-, Personal- und Flächenmehrbedarf)

Agenda

Einführung: Motivation zur Dekarbonisierung

Ausgangslage Berlin

Technologie: Stand der Technik

Bewertung des Umweltnutzens

Bewertung der Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung)

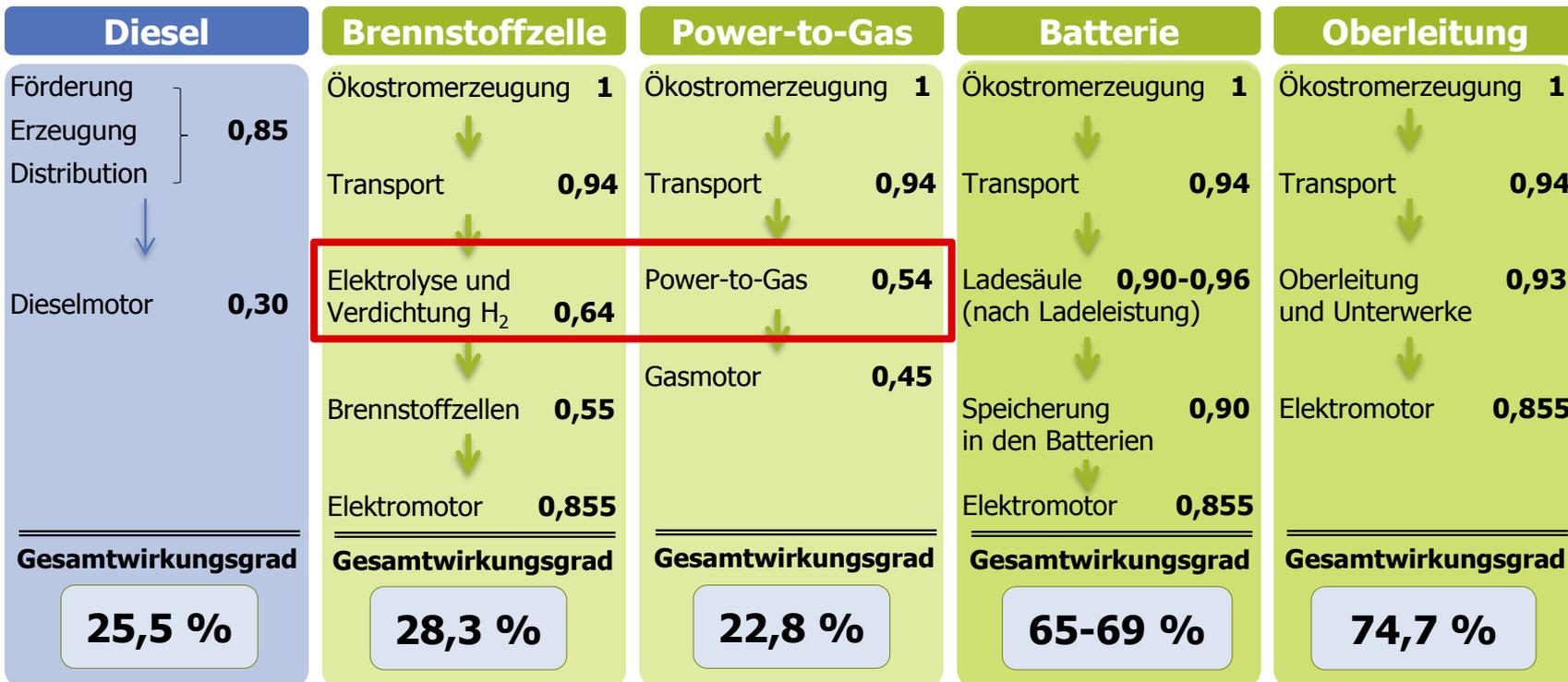
Zeitvorlauf zur Dekarbonisierung

Erkenntnisse des Falls Berlin und Unterschiede zur Schweiz

Diskussion

Bewertung des Umweltnutzens

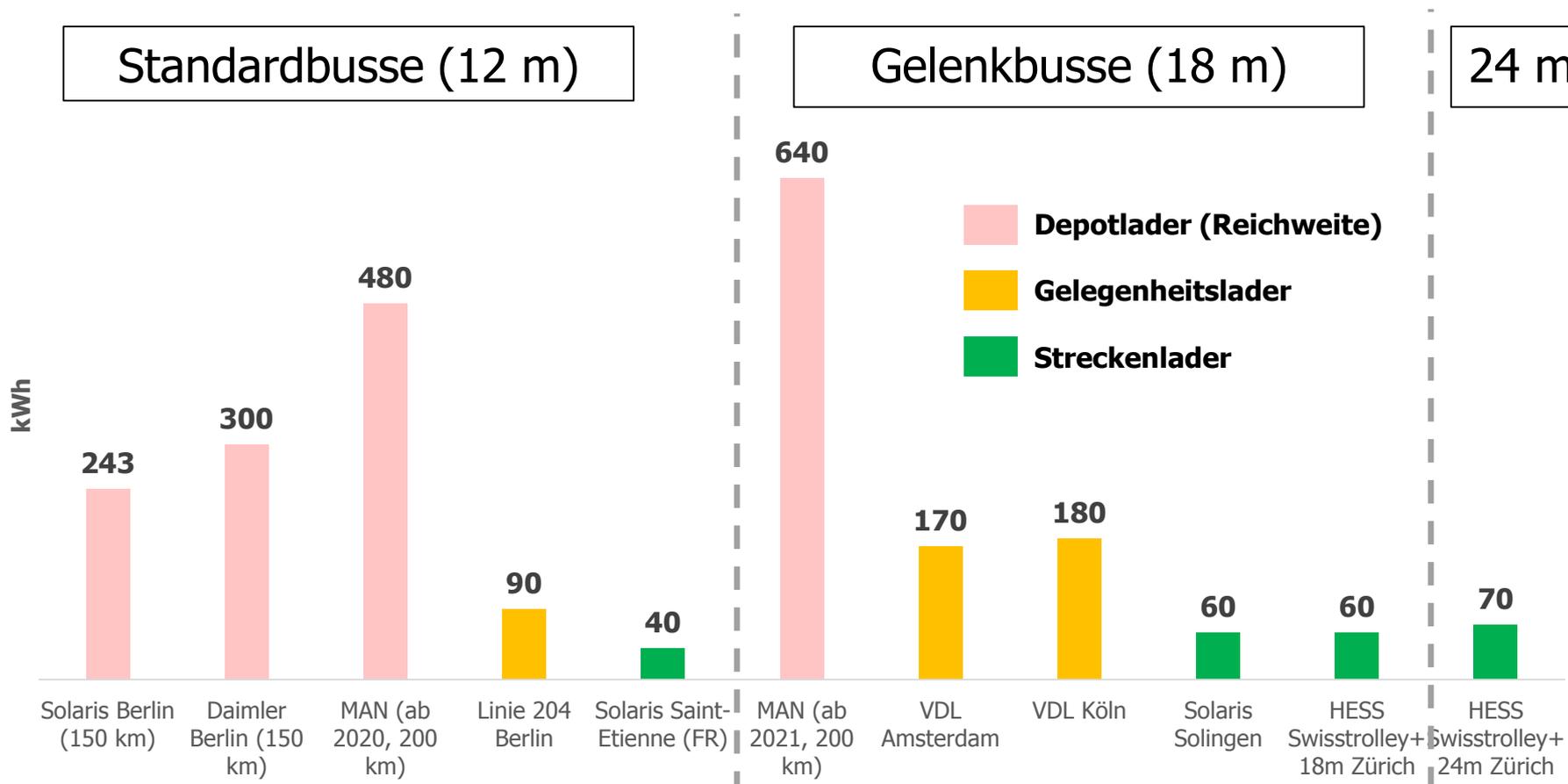
Energieeffizienz bei Elektrobussen besonders hoch



Anmerkung: Bei der Nutzung Methan und Wasserstoff als Abfallerzeugnissen für Brennstoffzellen- und Gasbusse verbessert sich der Primärenergiewirkungsgrad dieser Technologien deutlich, da die Kraftstoffe nicht aus Strom erzeugt werden müssen

Bewertung des Umweltnutzens

Batteriekapazitätsbedarf (kWh)



Hinweis: Das ergebende Batteriegewicht hängt von der Energiedichte der Batterie ab. Bei Depotladern werden i.d.R. Li-Ion NMC-Batterien mit hoher Energiedichte genutzt. Gelegenheits- und Streckenlader werden mit leistungsstarken LTO-Batterien ausgerüstet. Gemäß den aktuellen am Markt verfügbaren Batteriemodulen weisen NMC-Batterien 2 bis 2,5 höhere Energiedichten als LTO-Batterien auf.

Agenda

Einführung: Motivation zur Dekarbonisierung

Ausgangslage Berlin

Technologie: Stand der Technik

Bewertung des Umweltnutzens

Bewertung der Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung)

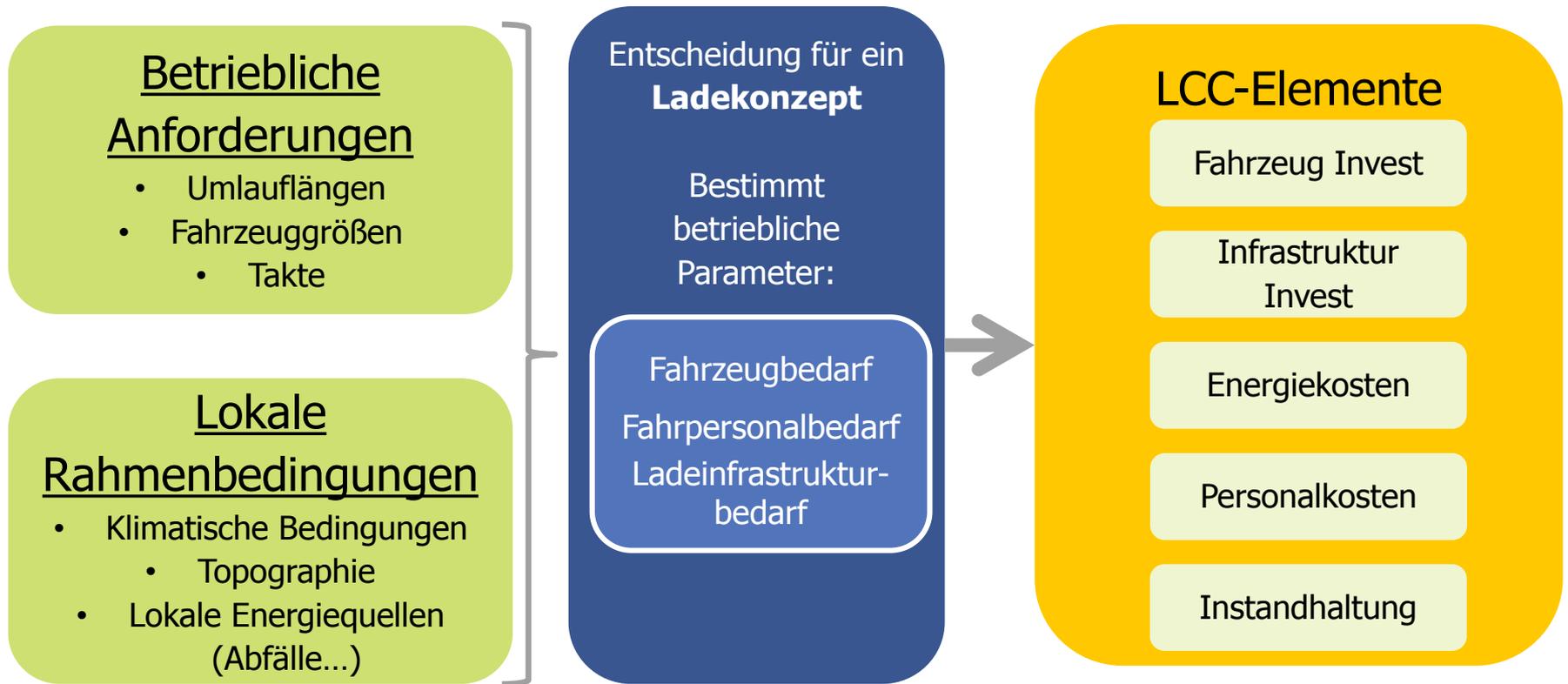
Zeitvorlauf zur Dekarbonisierung

Erkenntnisse des Falls Berlin und Unterschiede zur Schweiz

Diskussion

Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Schlüsselkriterien für Lebenszykluskosten (LCC)



Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Mehrere Betriebsszenarien werden untersucht

Untersuchung der LCC-Kosten pro Bus-km im Vergleich zum Dieselbetrieb:

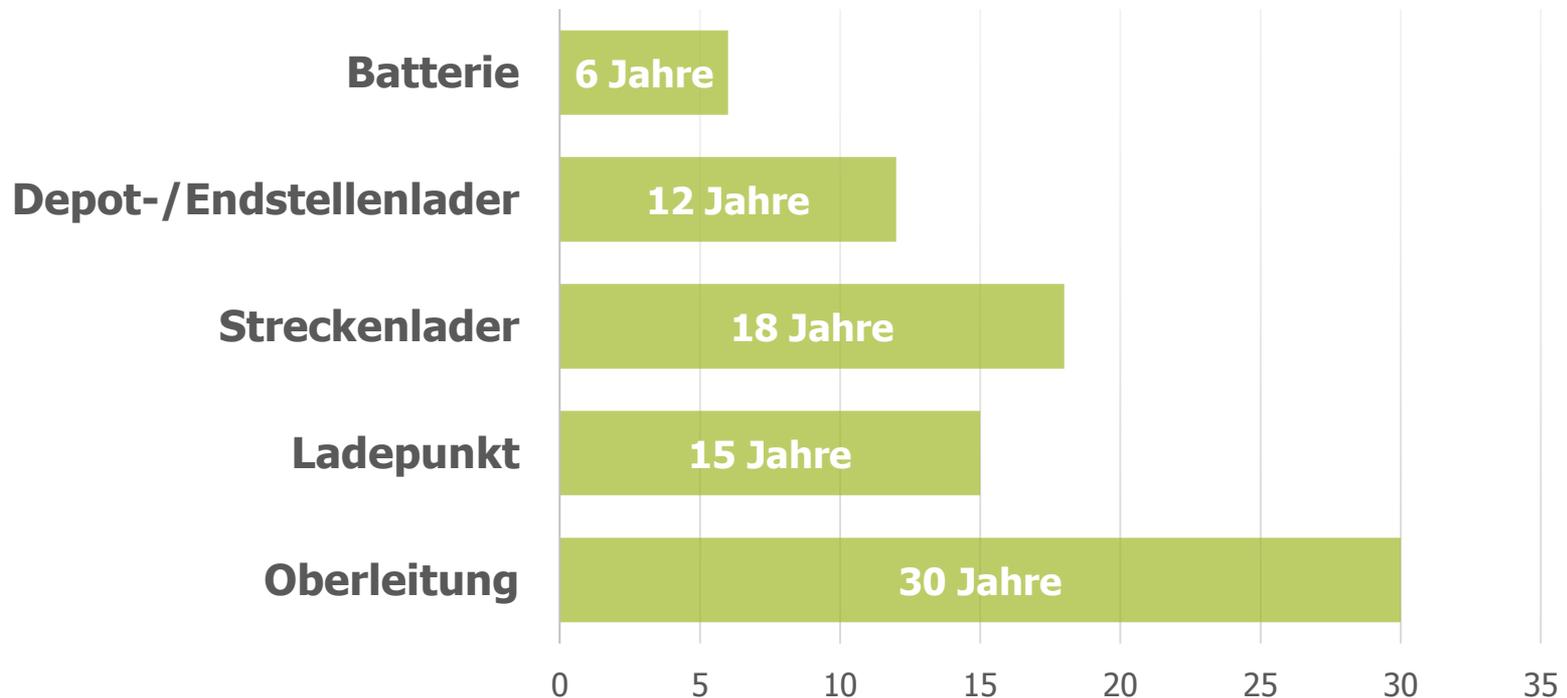
- Fiktive 15 km-lange Linie mit 2 Endstellen
- Mehrere Betriebsszenarien untersucht:

Betriebsszenarien	Grundlinie (60 Fahrten/Tag)	Standardlinie (100 Fahrten/Tag)	Laststarke Linie (180 Fahrten/Tag)
Takt (Auslegung des Fahrzeugbedarfs)	20-Min-Takt	10-Min-Takt	5-Min-Takt
Ladepunkte im Betriebshof	1 pro Fahrzeug	1 pro Fahrzeug	1 pro Fahrzeug
Schnellladesäulen pro Endstelle für Endstellenladung	1	2	3
Oberleitungsanteil Streckenladung*	50 %	50 %	50 %

* Bedarf hängt von der Verteilung der Oberleitungsstrecken im Linienvorlauf ab. Bei dem Betrieb eines Busnetzes können Synergien durch die gemeinsame Nutzung der Oberleitungen für mehrere Linien (Stammstrecken) erzielt werden, wodurch der Netzanteil an Oberleitung deutlich unter 50% liegen wird

Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die Kapitalkosten der Systemelementen werden auf ihre Abschreibungsdauer verteilt



Bewertung der Wirtschaftlichkeit

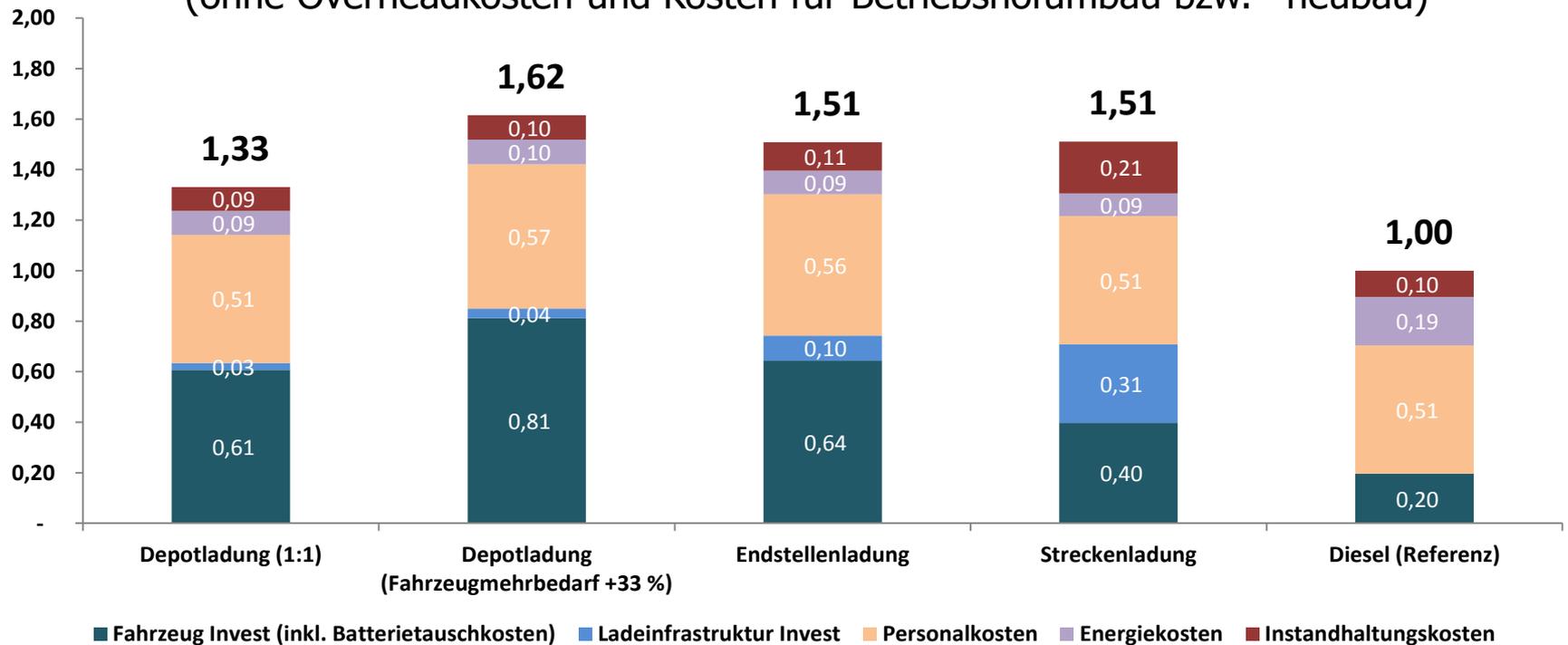
Mehrkosten Betrieb E-Bus ggü. Diesel



Grundlinie

20-Min-Takt (60 Fahrten/Tag)

Kostenstruktur nach Ladekonzept (Gelenkbus, Stand 2018, Diesel = 1)
(ohne Overheadkosten und Kosten für Betriebshofumbau bzw. -neubau)



KCW, eigene Berechnungen am Beispiel einer 15 km-langen Buslinie im Großstadtverkehr auf Basis von Literaturangaben und eigener Marktkenntnis



Bewertung der Wirtschaftlichkeit

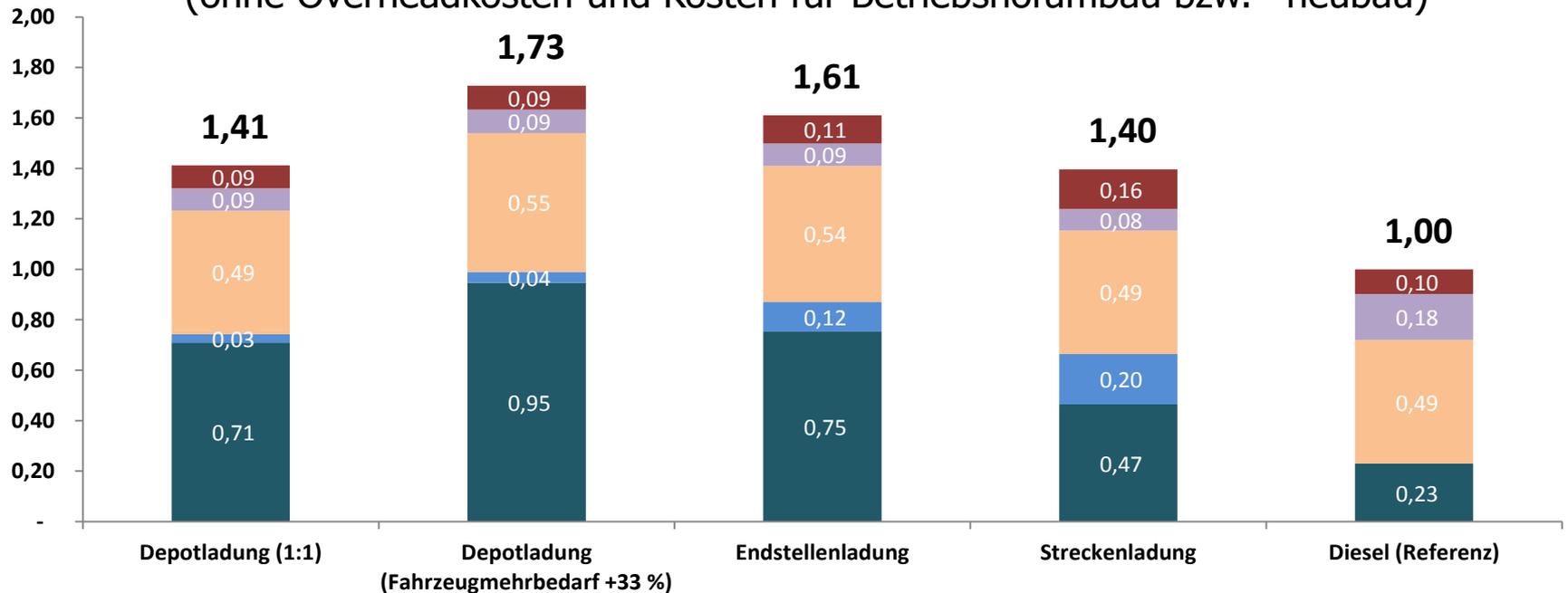
Mehrkosten Betrieb E-Bus ggü. Diesel



Standardlinie

10-Min-Takt (100 Fahrten/Tag)

Kostenstruktur nach Ladekonzept (Gelenkbus, Stand 2018, Diesel = 1)
(ohne Overheadkosten und Kosten für Betriebshofumbau bzw. -neubau)



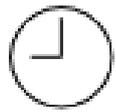
■ Fahrzeug Invest (inkl. Batterietauschkosten) ■ Ladeinfrastruktur Invest ■ Personalkosten ■ Energiekosten ■ Instandhaltungskosten

KCW, eigene Berechnungen am Beispiel einer 15 km-langen Buslinie im Großstadtverkehr auf Basis von Literaturangaben und eigener Marktkenntnis



Bewertung der Wirtschaftlichkeit

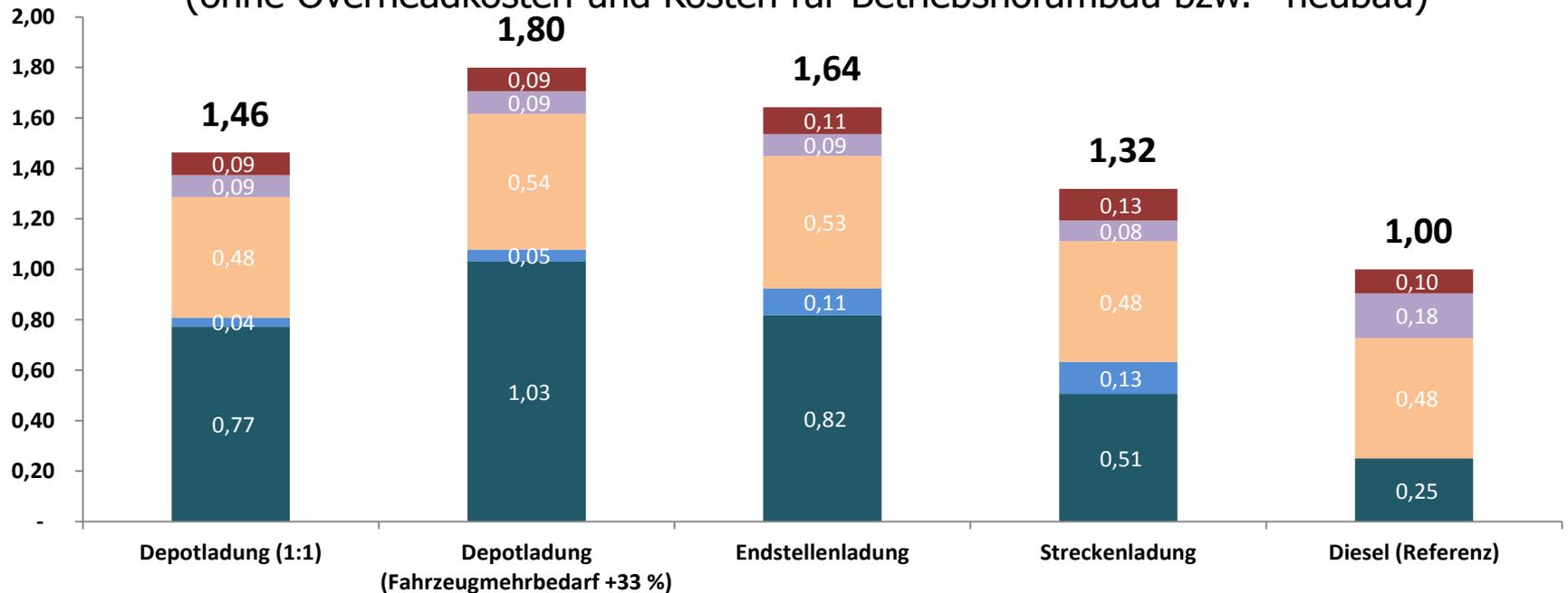
Mehrkosten Betrieb E-Bus ggü. Diesel



Laststarke Linie

5-Min-Takt (180 Fahrten/Tag)

Kostenstruktur nach Ladekonzept (Gelenkbus, Stand 2018, Diesel = 1)
(ohne Overheadkosten und Kosten für Betriebshofumbau bzw. -neubau)



■ Fahrzeug Invest (inkl. Batterietauschkosten) ■ Ladeinfrastruktur Invest ■ Personalkosten ■ Energiekosten ■ Instandhaltungskosten

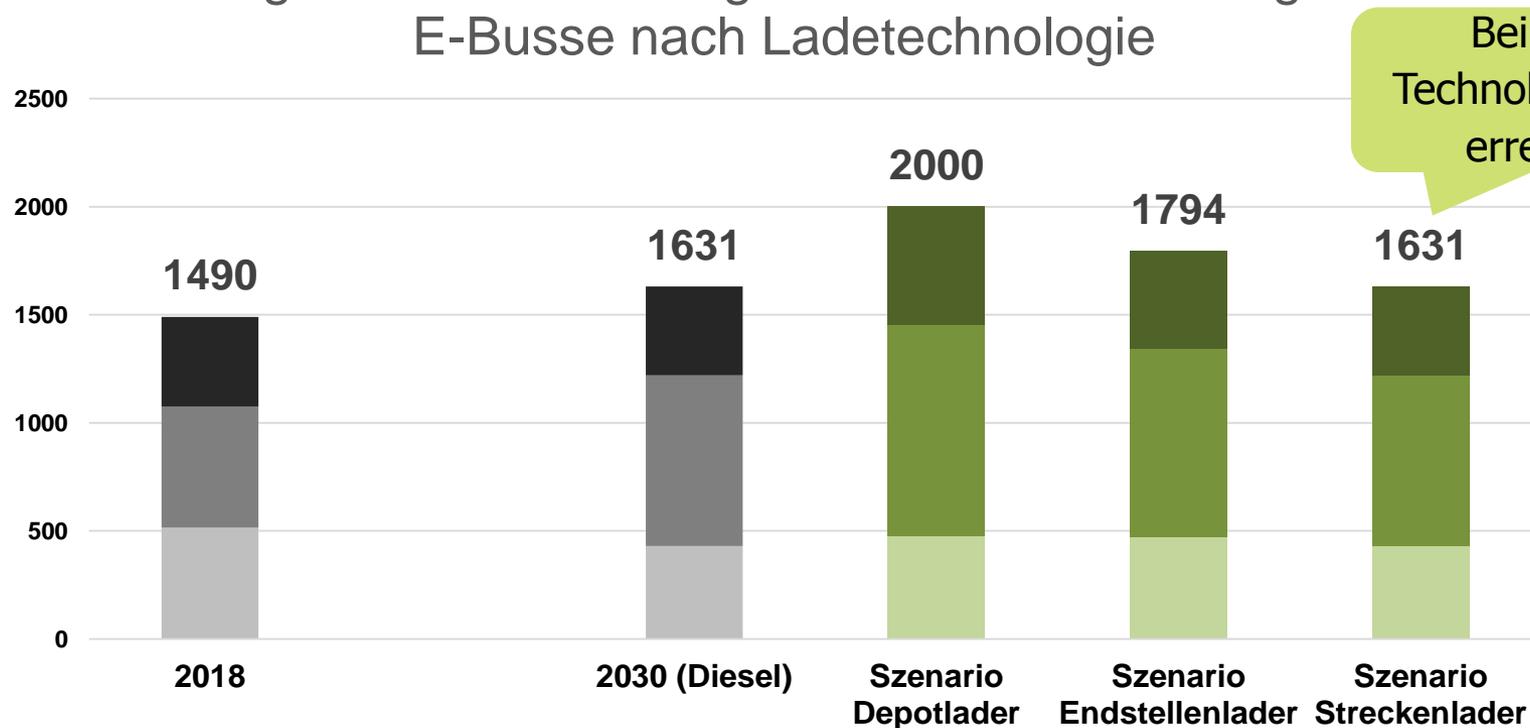
KCW, eigene Berechnungen am Beispiel einer 15 km-langen Buslinie im Großstadtverkehr auf Basis von Literaturangaben und eigener Marktkenntnis



Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Prognose Fahrzeugbedarf

Prognose des Fahrzeugbedarfs bei Umstellung auf E-Busse nach Ladetechnologie



Bei Mix an Technologien auch erreichbar!

■ Standardbus ■ Gelenkbus ■ Doppeldecker

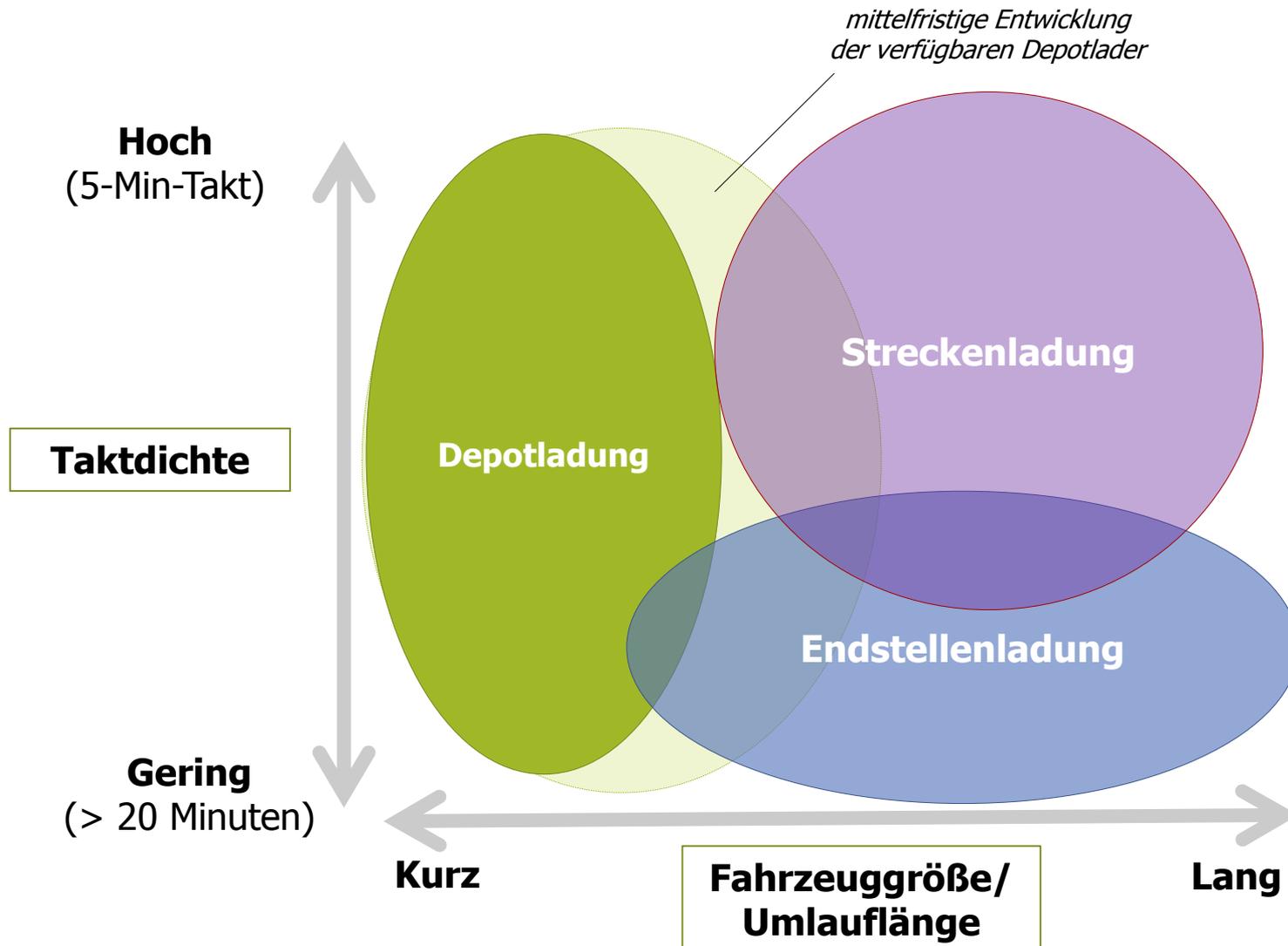
Annahmen: Vorausgesetzt der Verfügbarkeit eines derzeit noch nicht entwickelten drei-achsigen Doppeldeckers für Berlin mit der jeweiligen Technologie.

Es wurde angenommen, dass Umläufe >250 km beim Standardbus, >200 km beim Gelenkbus ohne Fahrzeugmehrbedarf durch Depotlader im Jahr 2030 übernommen werden können



Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Stärken der Ladekonzepte je nach Einsatzbereich



Agenda

Einführung: Motivation zur Dekarbonisierung

Ausgangslage Berlin

Technologie: Stand der Technik

Bewertung des Umweltnutzens

Bewertung der Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung)

Zeitvorlauf zur Dekarbonisierung

Erkenntnisse des Falls Berlin und Unterschiede zur Schweiz

Diskussion

Zeitvorlauf Dekarbonisierung des städtischen ÖV

Phasen ... und Risiken ...

- Grundlagenermittlung (Technologiemix, Migrationspfad)
- Sicherung der Finanzierung
- Stromnetzanalyse
- Fahrzeuge
 - Ausschreibung/Vergabe/Lieferung
- Qualifiziertes Personal gewinnen (Arbeitsmarkt!)
 - u.a. Kfz-Mechatroniker → Starkstromelektriker
- Implementierung der (Lade-)Infrastruktur
 - auch: Planung/Genehmigung (Beteiligung)/Bau
- Testbetrieb („Pilotlinie“)
 - Kinderkrankheiten lösen, Erfahrung sammeln

Zeitvorlauf Dekarbonisierung des städtischen ÖV

E-Fahrzeuge brauchen neue Infrastruktur

Umstellung Betriebshöfe

- Ladeinfrastruktur
- Werkstätte
- Erhöhung Anschlussleistung ans Stromnetz
- IT

Versorgungsstromnetz

- Sicherung der Strombereitstellung
- Anpassung des Netzes an der neuen Nachfrage

Neubau Betriebshöfe

- Flächenmehrbedarf wegen der notwendigen Ladeinfrastruktur und des Fahrzeugmehrbedarfs

Ladeinfrastruktur in der Stadt

- Erhöhter Genehmigungsaufwand
- Flächenkonflikt/Stadtbildaspekte
- Anschluss ans Stromnetz

Zeitvorlauf Dekarbonisierung des städtischen ÖV

Neue Infrastruktur braucht Zeitvorlauf

Zeitvorlauf Planung, Genehmigung, Bau, Inbetriebnahme:

Einführung einer Pilotlinie mit E-Bussen und entsprechender Ladeinfrastruktur	Ca. 3 Jahre
Vollständiger Umbau Betriebshof	Min. 3 Jahre
Neuer Betriebshof bei großen Depotlader-Flotten mit Fahrzeugmehrbedarf	Min. 8 Jahre
Errichtung von Schnellladepunkten an Endstellen	Min. 2-3 Jahre
Errichtung von Oberleitungsstrecken	Min. 4-5 Jahre

Agenda

Einführung: Motivation zur Dekarbonisierung

Ausgangslage Berlin

Technologie: Stand der Technik

Bewertung des Umweltnutzens

Bewertung der Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung)

Zeitvorlauf zur Dekarbonisierung

Erkenntnisse aus Berlin/Unterschiede zur Schweiz

Diskussion

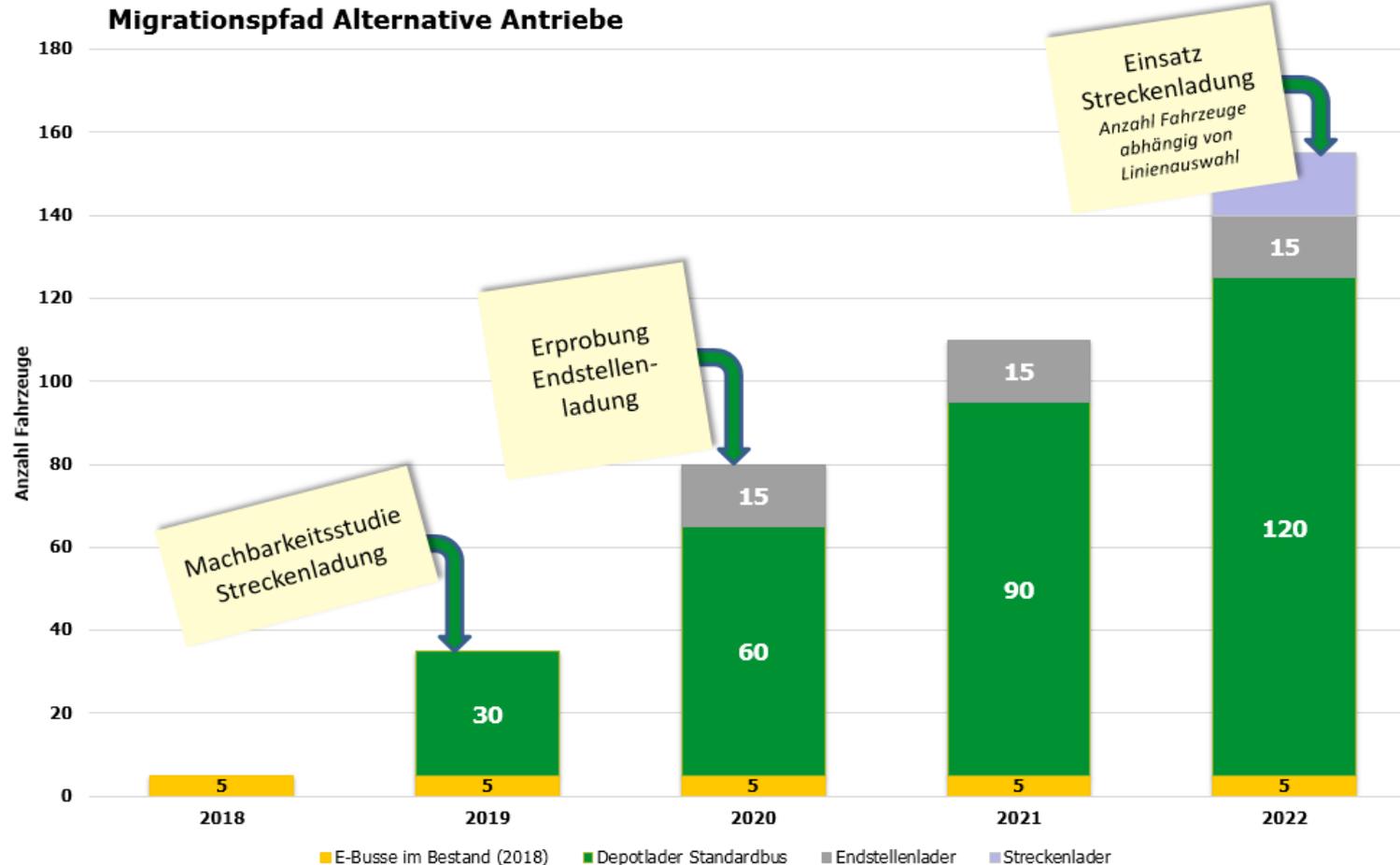
Erkenntnisse aus Berlin

Wesentliche Schlussfolgerungen

- Vielfältige Anforderungen im Berliner Busverkehr → **Technologiemix**, sonst enormer Fahrzeugmehrbedarf
- **Streckenladung:** aus technologischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht klare Vorteile bei hoch frequentierten Berliner Buslinien
- **Umstellung bis 2030:** in Anbetracht der Zeitvorläufe aller Technologien eine Herausforderung
- Emissionsfreier **drei-achsiger Doppeldecker:** noch gar nicht entwickelt

Erkenntnisse aus Berlin

Strategie für den Einstieg

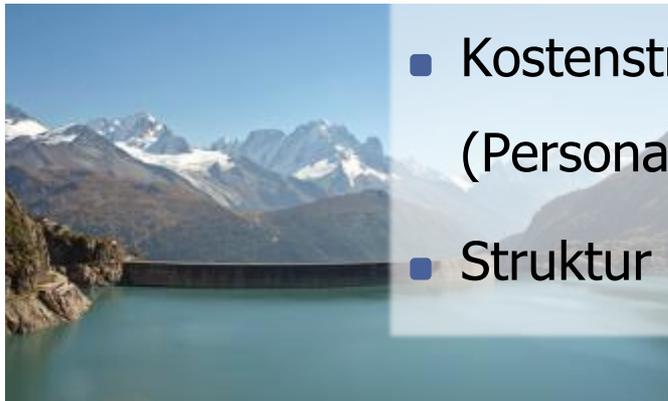


Erkenntnisse aus Berlin

Unterschiede zu Schweizer Stadtverkehren



- Topographie
- Bebauungsdichte



- Kostenstruktur
(Personalkosten, Energiekosten...)
- Struktur der Energieversorgung



Bild 1: Stadtpolizei St. Gallen

Bild 2: Ate-bus.ch (Buslinie 701 VBZ über Wittikon nach Maur)

Bild 3: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Bild 4: Transfair (GAV Branche Öffentlicher Verkehr)

Erkenntnisse aus Berlin

Weitere wesentliche Unterschiede zur Schweiz



- Akzeptanz für Ladeinfrastruktur (Flächenverfügbarkeit, O-Bus in der Schweiz bekannt)



- Recht/Governance ÖV
- Politisches System
- Stärke der Umweltpolitik
- Förderung und Finanzierung



energie-schweiz für Gemeinden

Bild 1: Parlamentsdienste 3003 Bern

Bild 2: VBL, online

Bild 3: Akademie für Sport und Gesundheit, online

Bild 4: energie-schweiz, online

Übertragbarkeit der Berliner Erfahrungen

Fazit der bisherigen Analysen

- **Strategische Analyse** dringend zu empfehlen.
- **Technologiemix** spiegelt unterschiedliche Einsatzbedingungen.
- **Direkte elektrische Energieversorgung** in vielen Konstellationen des städtischen ÖV wirtschaftlich und technisch am besten geeignet
- **Technologische Reife** der Antriebe im Moment sehr unterschiedlich
- Dekarbonisierung verschärft den **Handlungsdruck**
- Umstellung = **Herausforderung** in jeder Hinsicht
- **Verkehrsverlagerung** nicht vergessen!

Swisstrolley 5?

