EMCEL

Ingenieurbüro für Brennstoffzelle,
Wasserstofftechnologie und Elektromobilität

Düsseldorf Airport DUS



Quelle: Christian Winzenhöler, c.winzenhoeler@winzenhoeler-reisen.de



Quelle: https://www.aerointernational.de, Bild: DUS



Machbarkeitsstudie zur „Einsatzmöglichkeit von Bussen mit emissionsfreien Antrieben“ am Flughafen Düsseldorf

Ergebnisdokumentation

Marius Schneider & Nicolò Queirazza

Düsseldorf | 31. März 2025

Machbarkeitsstudie zur „Einsatzmöglichkeit von Bussen mit emissionsfreien Antrieben“ am Flughafen Düsseldorf

Gefördert durch:

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

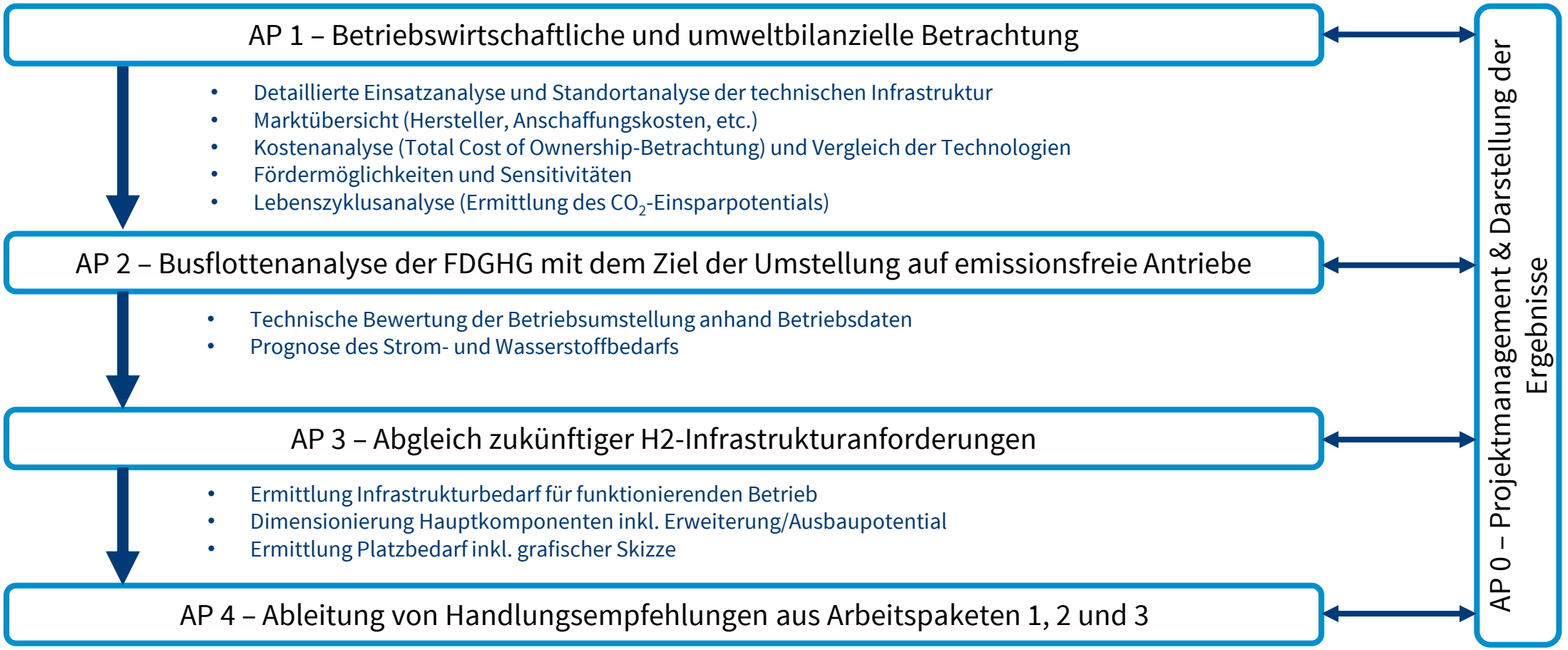
Autor*innen:
Marius Schneider (EMCEL GmbH)
Nicolò Queirazza (EMCEL GmbH)

Agenda

1. Aufgabenstellung
2. Alternative Antriebstechnologien
3. Marktübersicht Flughafenbusse
4. Bestands- und Einsatzanalyse
5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (TCO-Betrachtung)
6. Lebenszyklusanalyse (CO2-Emissionen)
7. Zukünftige Infrastrukturanforderungen
8. Handlungsempfehlung und Fazit

1. Aufgabenstellung

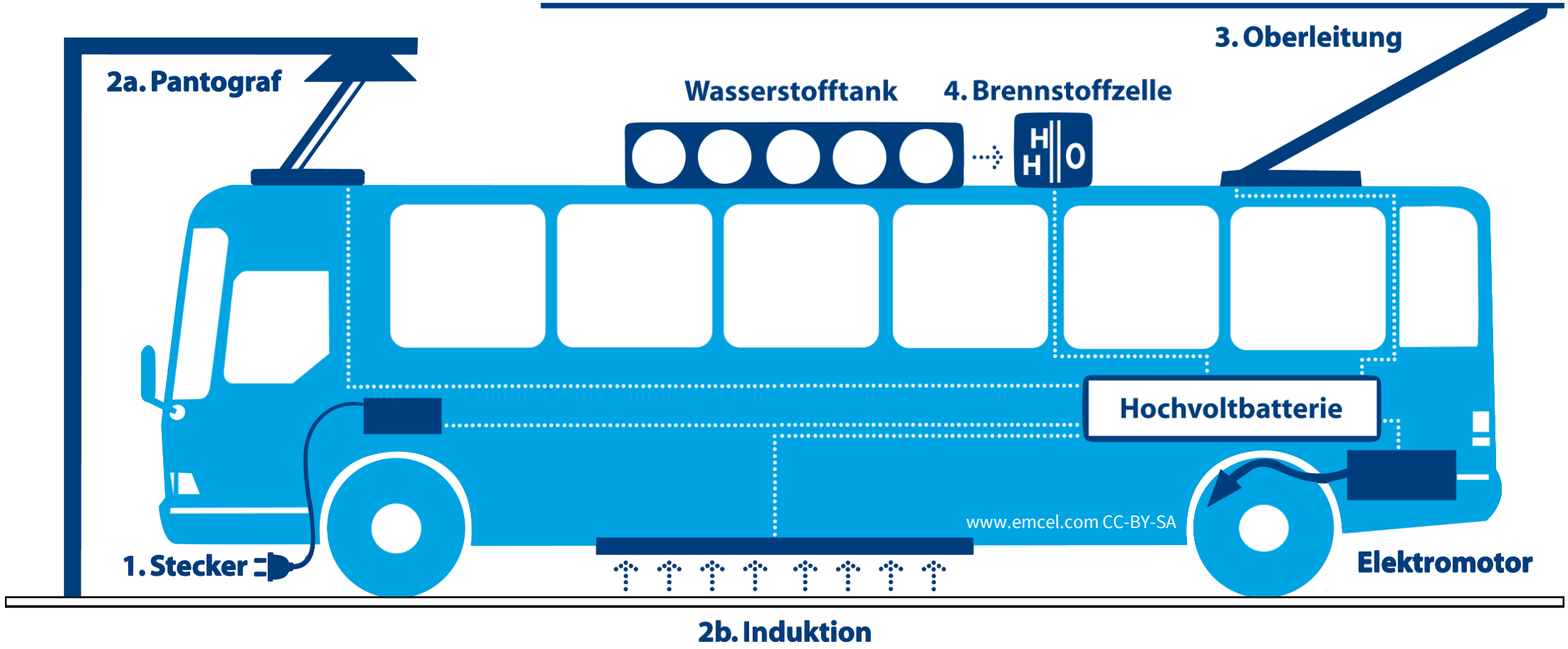
1. Aufgabenstellung



2. Alternative Antriebstechnologien

2. Alternative Antriebstechnologien

E-Busse



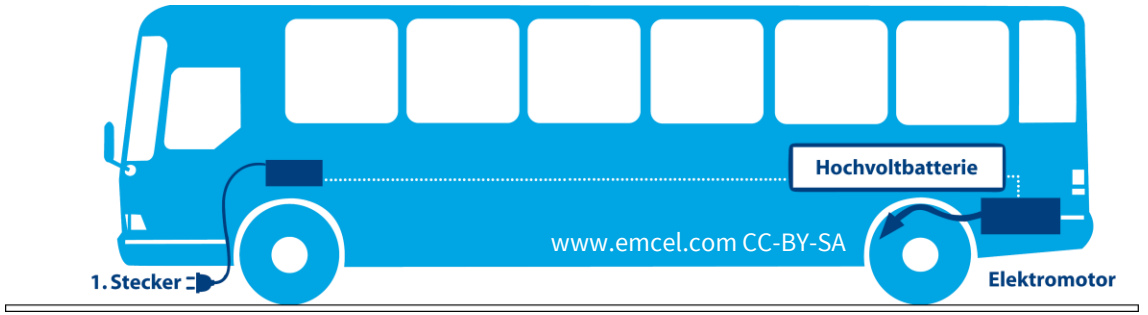
In Abhängigkeit der lokalen Randbedingungen sind alle Technologien sinnvoll!

2. Alternative Antriebstechnologien

Depotlader (Nachtlader, Volllader)

Vorteile

- ⊕ Niedrige Einstiegshürde
- ⊕ Flexibel einsetzbar



Nachteile

- ⊖ Reichweite ca. 250 km
- ⊖ Reichweite mit nicht elektrischer Zusatzheizung ca. 330 km
- ⊖ Reichweite stark abhängig von Umgebungsbedingungen

Konsequenz / mögliche Lösung

- › Linien teilen / kürzen
- › Mehr Fahrzeuge (mehr Fahrer)
- › Ggf. Zwischenladungen über Mittag

2. Alternative Antriebstechnologien

Gelegenheitslader (Teillader)

Vorteile

- „Unendliche“ Reichweite
- Kleinere Batterien als bei Volllader

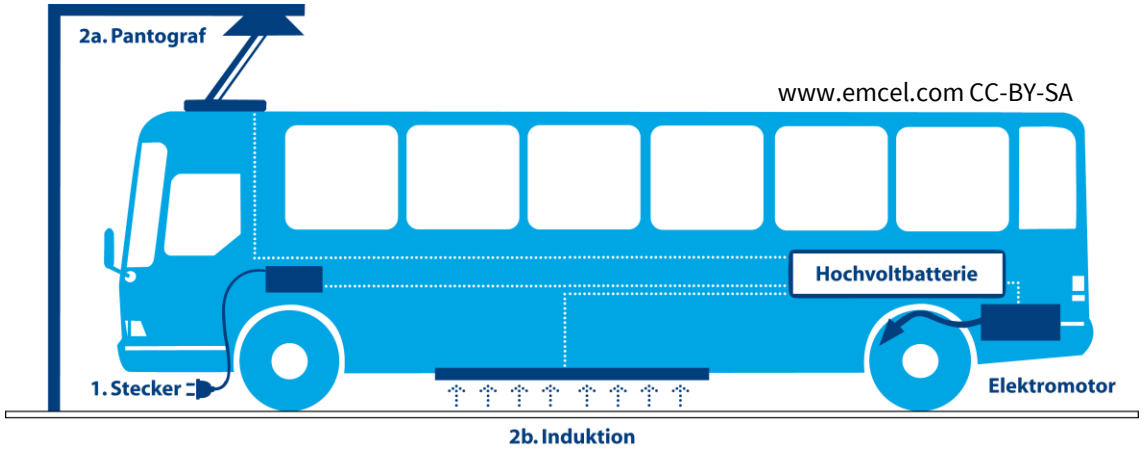
Nachteile

- Benötigt Wendezeit ca. 10 Min. (abh. von der Linie)
- Flexibilität / Linienwechsel eingeschränkt

Konsequenz / mögliche Lösung

› Festlegung auf eine Linie

› Anpassung von Fahrplan und Wendezeit



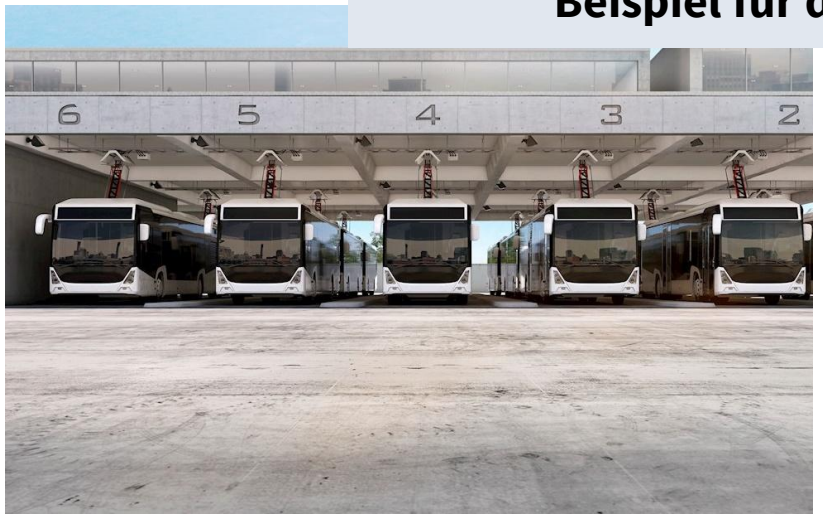
2. Alternative Antriebstechnologien

Ladeinfrastruktur





Beispiel für die Aufstellung





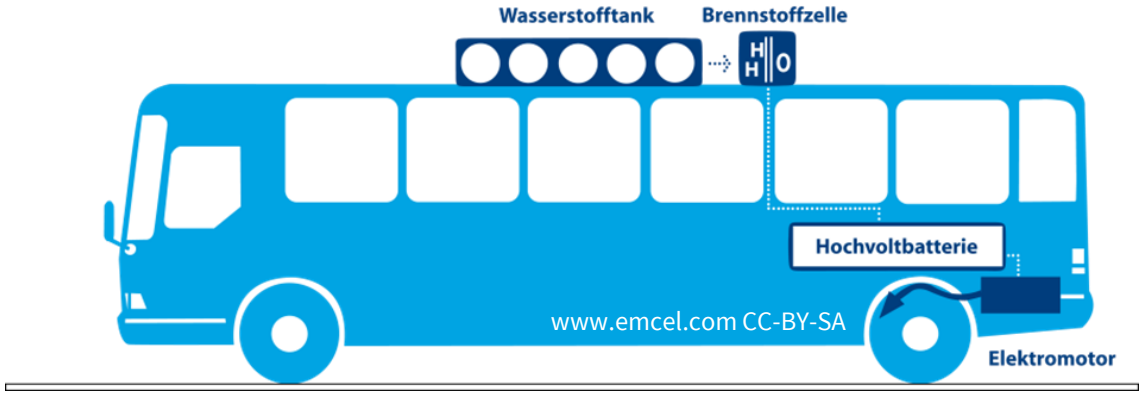
Quelle:
BVG
electrive.net
ABB
VDL

2. Alternative Antriebstechnologien

Brennstoffzelle

Vorteile

- ⊕ Reichweite bis ca. 400 km
- ⊕ Streckenplanung wie bei Dieselbussen
- ⊕ Flexibel einsetzbar



Nachteile

- ⊖ Anschaffungskosten (Stand heute)
- ⊖ Aufbau eigener Wasserstoffinfrastruktur (Einstiegskosten)

Konsequenz / mögliche Lösung

› Gemeinsame Nutzung von Wasserstofftankstellen, auch öffentlich

› Wasserstofftankstelle als Betreibermodell

4. Bestands- und Einsatzanalyse

4. Bestands- und Einsatzanalyse

Methodik der Analyse

Analyse der aktuellen Betriebsdaten

› Ermittlung der Laufleistungen, Betriebsstunden und Energieverbrauch im Worst-Case anhand der Datengrundlage

Ermittlung der erforderlichen Energie für Batterie- und BZ-Busse

› Ableitung des Energiebedarfs aus dem Worst-Case-Szenario

Ableitung der technischen Anforderungen an Fahrzeuge und Infrastruktur

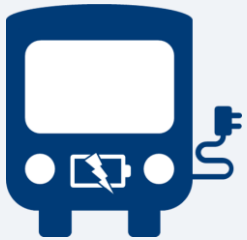
› Ermittlung der Batteriegröße, Ladeleistungen, Tankstellenparameter, Netzanschlüsse

→ Technische und betriebliche Bewertung der Umstellung auf alternative Antriebe

4. Bestands- und Einsatzanalyse

Auslegung: Depotlader und Brennstoffzellenbus

Depotlader



- Durchschnittliche Ladezeit ca. 6 h
- Ø-Batteriekapazität von ca. 250 kWh sinnvoll
- Ø-Ladeleistung pro Bus ca. 100 kW sinnvoll

} Puffer eingerechnet, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten

- Bei einer 100 % - Umstellung wird eine Anschlussleistung von ca. 3,0 MVA* benötigt (Worst-Case)

BZ-Bus



- Wasserstoffbedarf von ca. 11 kg/d pro Bus erforderlich
- Je nach Fahrzeugauslegung muss nicht täglich getankt werden
- Bei einer 100 % - Umstellung werden ca. 350 kg H2 pro Tag benötigt (Worst-Case)
  → Ca. 1 Trailer pro Tag (HRS mit H2-Anlieferung)
- Anschlussleistung < 1 MVA

*Inkl. 10% Leistungsfaktor Scheinleistung, 85% Transformatorauslastung, Gleichzeitigkeitsfaktor 0,7 (intelligentes Lademanagement) – Weiteres Optimierungspotential gegeben!

4. Bestands- und Einsatzanalyse

Exkurs: Ladekonzept

Laden mittels Stecker



Quelle: https://www.electrive.net/2022/11/23/mainz-23-e-gelenkbusse-von-man-starten-linienbetrieb/

+ Geringere Kosten
+ Einfache Einführung bei geringer Stückzahl
+ Standard bei Flughafenbussen
– Keine Automatisierung
– Erhöhter Platzbedarf
– Weniger Komfort für Ladepersonal/Fahrpersonal
– Ggf. Beeinträchtigung freie Durchfahrt/Fluchtwege

Laden mittels Pantograph



Quelle: VDL

+ Keine herumliegenden/hängenden Kabel
+ Automatisierte Kopplung möglich
+ Platzersparnis
+ Bei großen Flotten einfachere Handhabung
– Erhöhte Kosten[1]
– Mehr Planungsaufwand
– Zusätzliche Fahrzeughöhen (bis ca. 0,2m)[2]

[1] Bis zu ca. 25.000 € je Ladepunkt, abhängig vom Pantographensystem und des Ständerwerks
[2] abhängig vom Fahrzeug sowie vom Pantographensystem

4. Bestands- und Einsatzanalyse

Exkurs: Tankstellenkonzept

Best-Practice-Beispiel Heidelberg

- Betriebshoftankstelle der rnv* in Heidelberg
- Ebenso öffentliche Nutzung möglich
- Kapazität über 1.000 kg_{H2} pro Tag
- Versorgung der BZ-Rex-Busse der rnv sowie PKW, LKW und Abfallsammelfahrzeuge der Region



*rnv Rhein-Neckar-Verkehr GmbH

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (TCO-Betrachtung)

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Annahmen TCO-Betrachtung

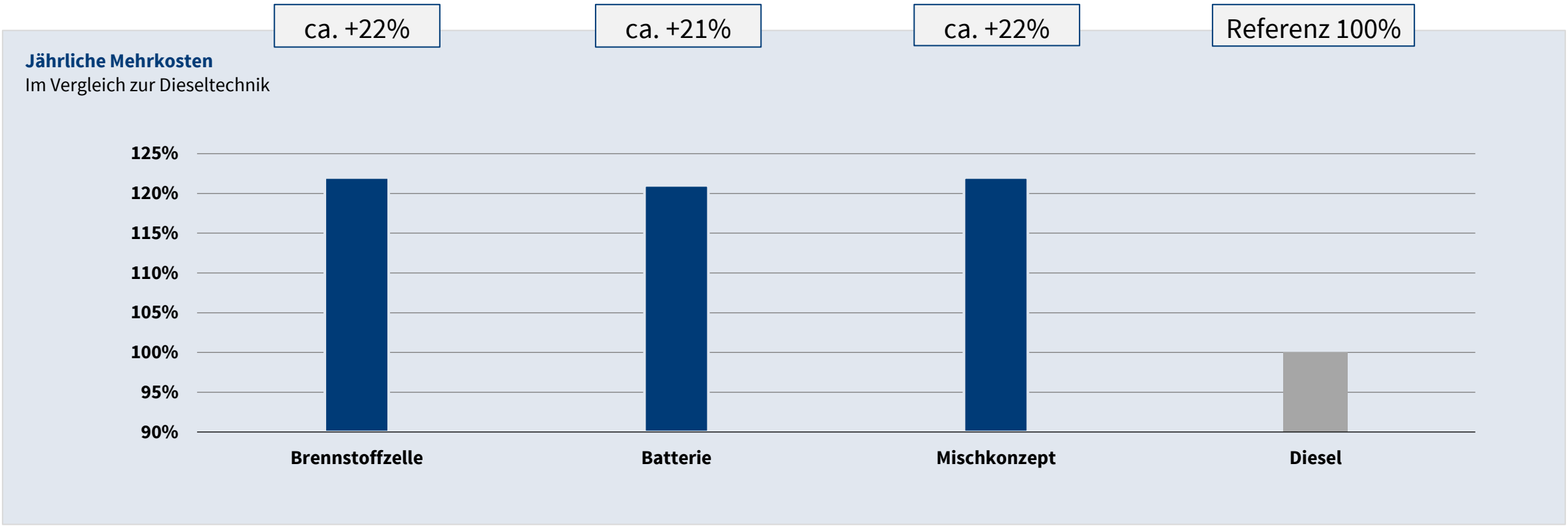
Annahmen 100 % Umstellung der Flotte

- Abschreibungsdauer Fahrzeuge: 9 Jahre
- Abschreibungsdauer Infrastruktur: 10 Jahre
- Vergleich zwischen:
  100 % Batterie (Nachtladung),
  100 % Brennstoffzelle,
  50/50 Mischflotte aus Depotladung und Brennstoffzelle
- Förderung:
  - Aktuell stehen keine passenden Fördermodelle zur Verfügung
  - Die NRW-Förderung für Elektrobusse ist auf den ÖPNV beschränkt
  - Förderquoten 60 % Fahrzeugmehrkosten, 90 % Infrastrukturkosten

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ergebnisse TCO-Betrachtung – 50/50 Mischflotte

Jährliche Mehrkosten im Vergleich zur Dieseltechnik (ohne Förderung)



Mit aktuellen Annahmen und Unsicherheiten wird Kostenparität von BZ und Depotladung erreicht

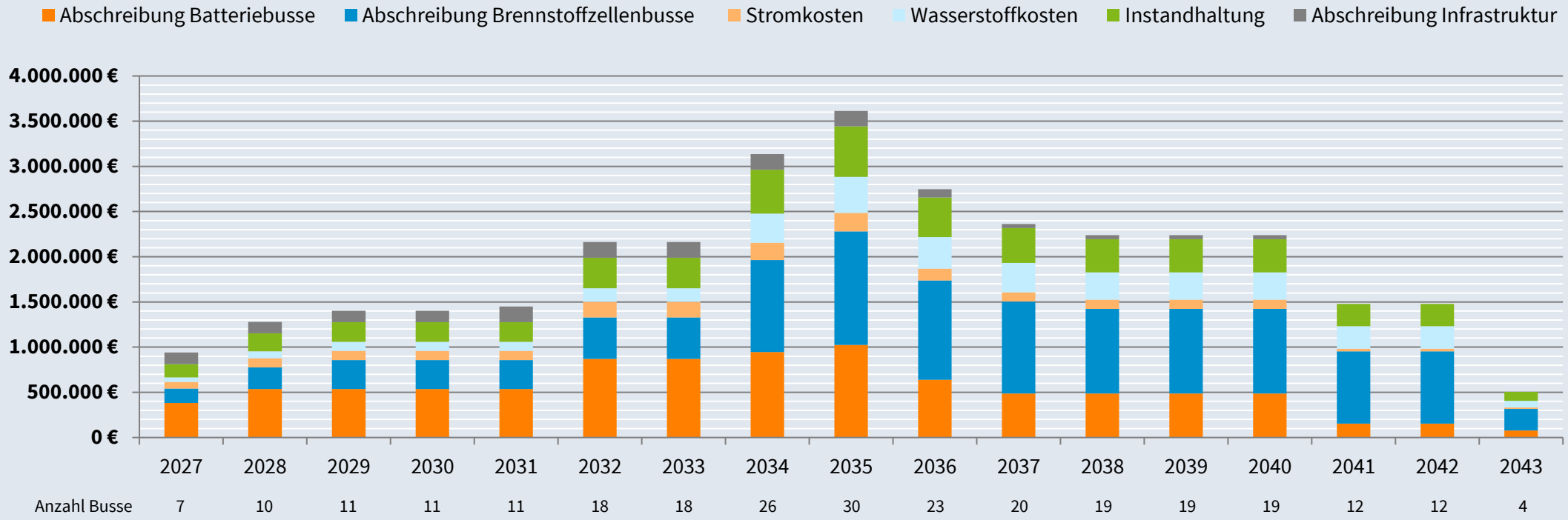
→ Mischflotte bietet Vorteil der Flexibilität

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ergebnisse TCO-Betrachtung – 50/50 Mischflotte

Jährliche Kosten (ohne Förderung, ohne Personalkosten)

Jährliche Kosten (ohne Förderung, ohne Personalkosten)
Beispiel: Mischkonzept

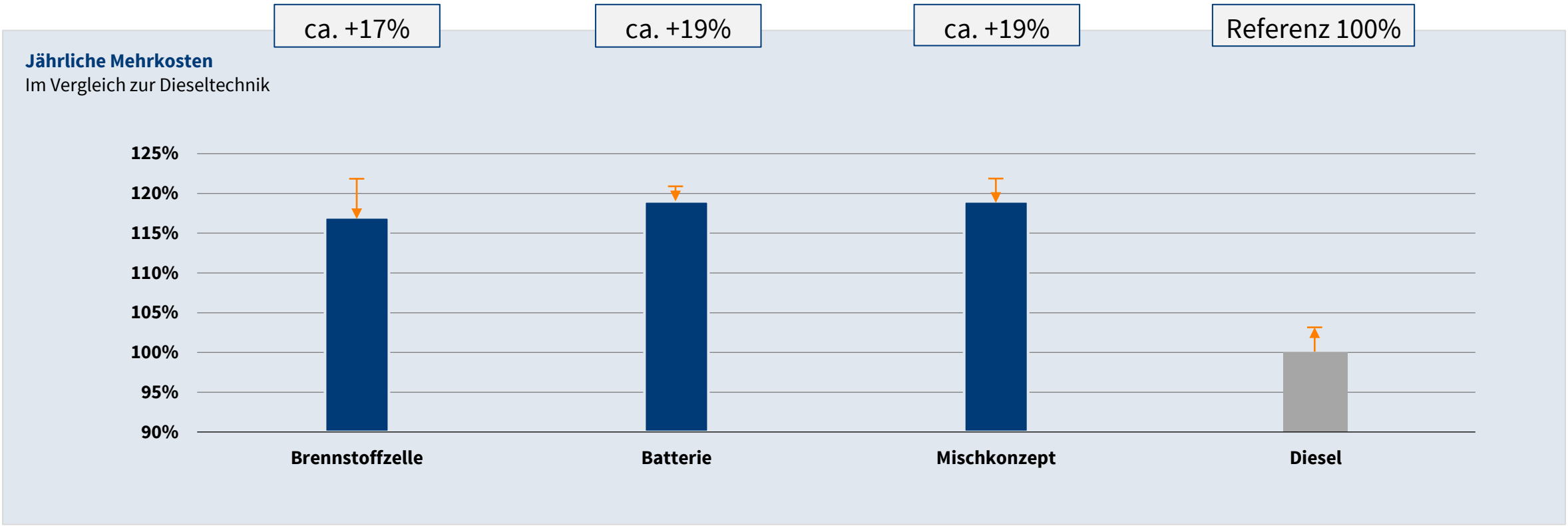


Personalkosten sind nicht berücksichtigt

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Sensitivitätsbetrachtung – 50/50 Mischflotte

Jährliche Mehrkosten im Vergleich zur Dieseltechnik (ohne Förderung)

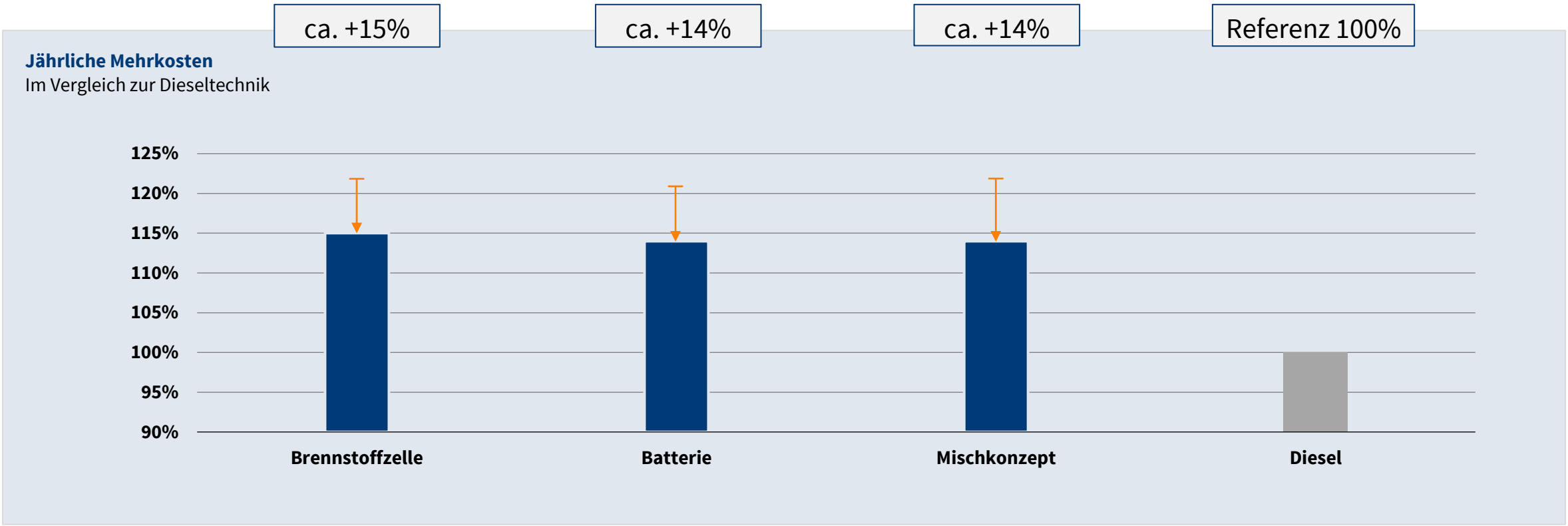


Veränderung der Energiekosten: H_2-Preis -5 €/kg_{H2} ; Strompreis -0,05 €/kWh; Dieselpreis +0,5 €/Liter

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Sensitivitätsbetrachtung – 50/50 Mischflotte

Jährliche Mehrkosten im Vergleich zur Dieseltechnik (ohne Förderung)

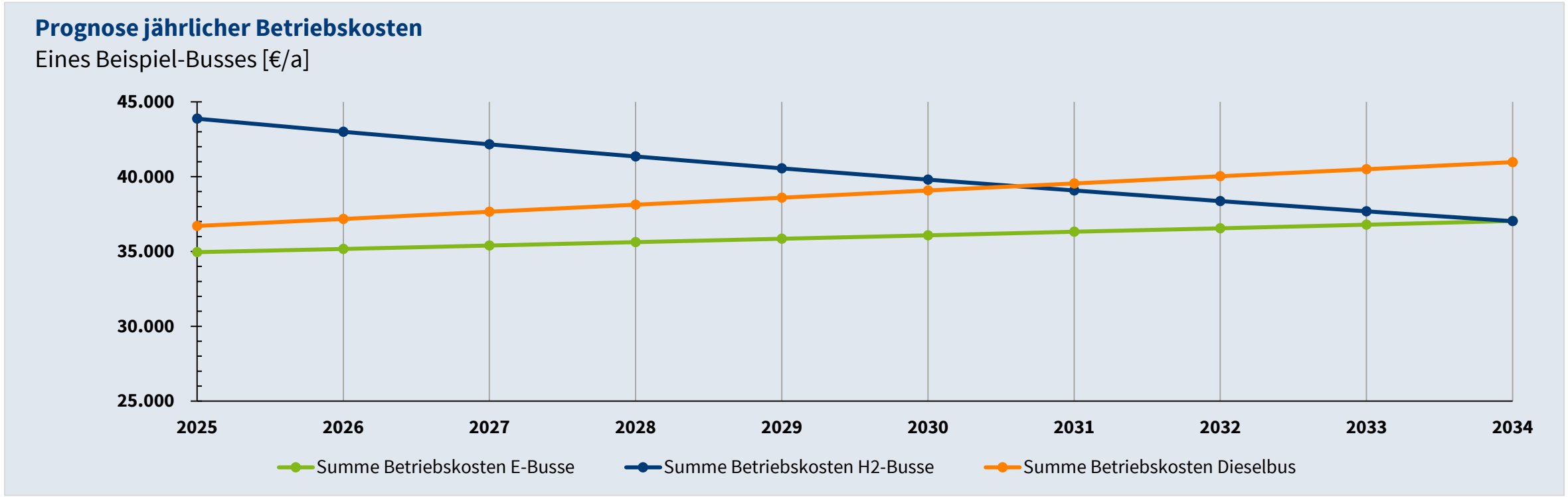


Reduzierung der Fahrzeugkosten (Batterie und Wasserstoff): -20%

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Sensitivitätsbetrachtung – 50/50 Mischflotte

Prognose jährliche Betriebskosten eines Beispiel-Busses (ohne Förderung)



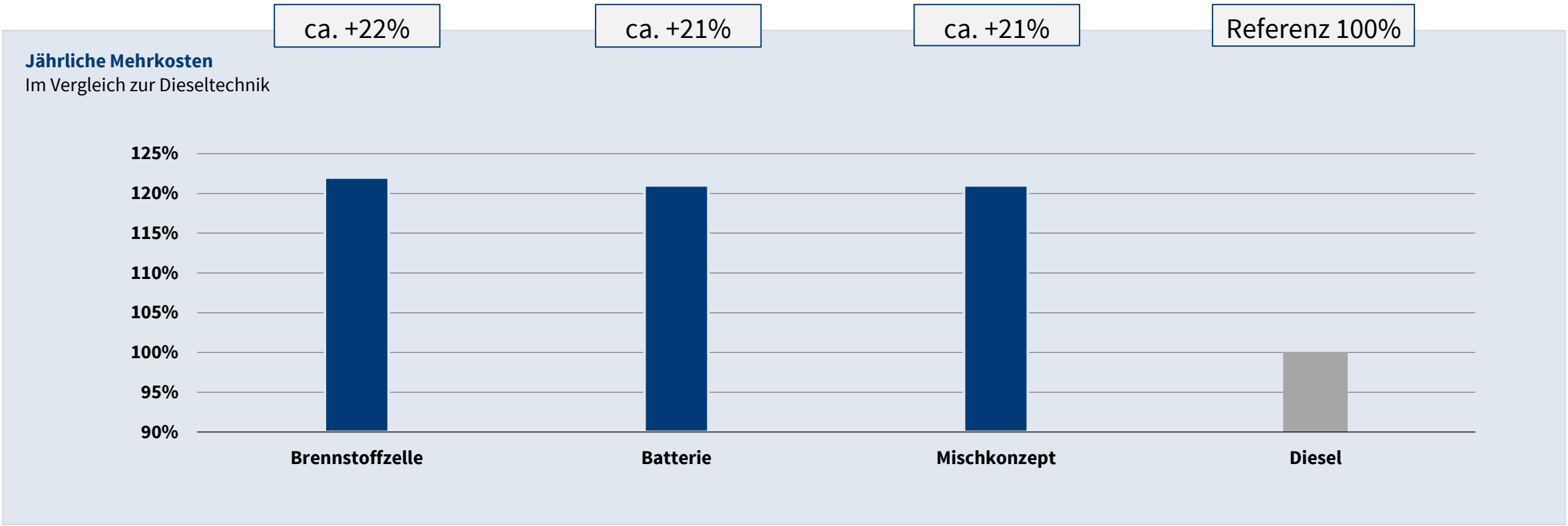
5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (TCO-Betrachtung)

5.1 Zusatzszenario 80/20 Mischflotte

5.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ergebnisse TCO-Betrachtung – 80/20 Mischflotte

Jährliche Mehrkosten im Vergleich zur Dieseltechnik (ohne Förderung)



Mit aktuellen Annahmen und Unsicherheiten wird Kostenparität von BZ und Depotladung erreicht

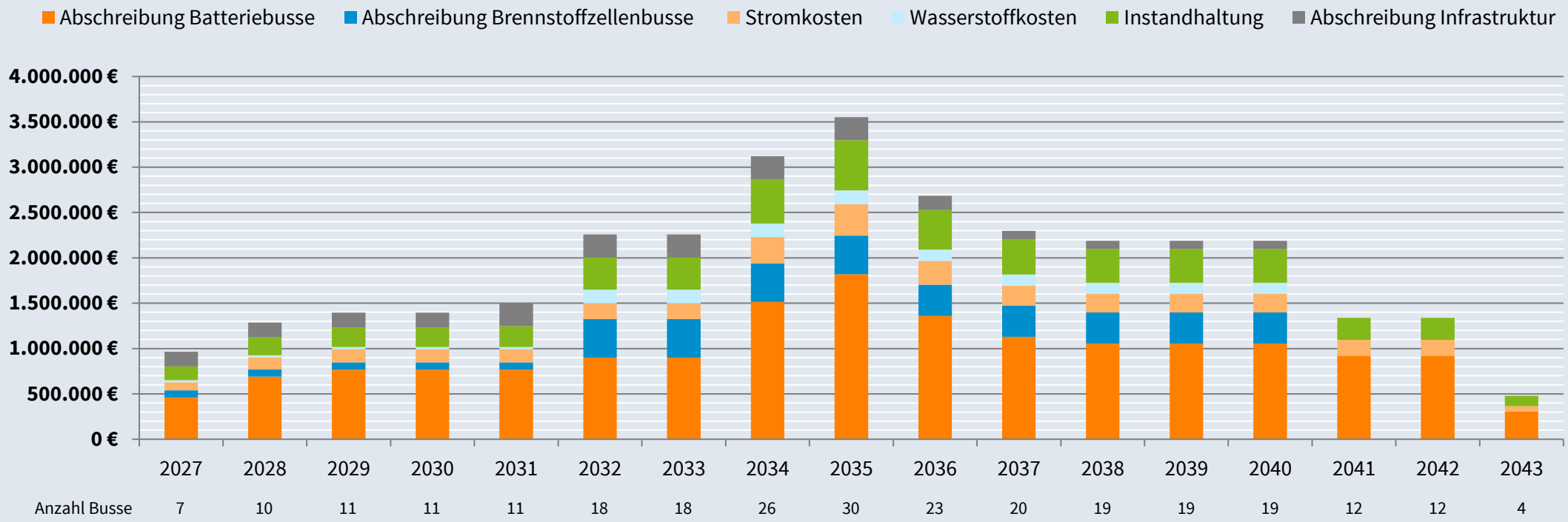
→ Mischflotte bietet Vorteil der Flexibilität

5.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ergebnisse TCO-Betrachtung – 80/20 Mischflotte

Jährliche Kosten (ohne Förderung, ohne Personalkosten)

Jährliche Kosten (ohne Förderung, ohne Personalkosten)
Beispiel: Mischkonzept



Personalkosten sind nicht berücksichtigt

6. Lebenszyklusanalyse (CO_2-Emissionen)

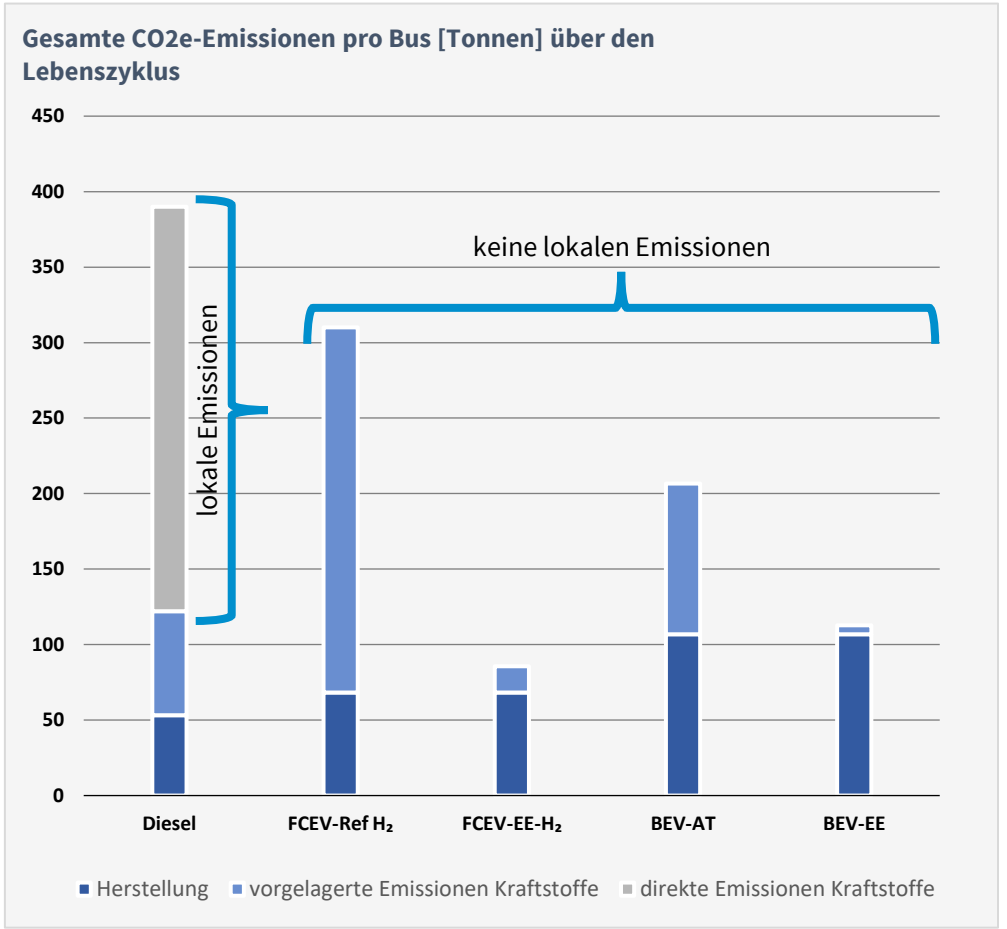
6. Lebenszyklusanalyse

Ermittlung des CO_2-Einsparpotentials

- Alternative Antriebe (BZ und Depotladung) verursachen nur globale Emissionen, keine lokalen
- Vorgelagerte Kraftstoffemissionen variieren sehr mit dem Anteil erneuerbarer Energien

Einsparpotentiale im Vergleich zu Diesel über Lebensdauer:

- Brennstoffzelle (erneuerbarer H_2): ca. 300t CO_2e pro Bus
- Batterie (erneuerbarer Strom): ca. 280t CO_2e pro Bus



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von REP-0801, Umweltbundesamt GmbH (Österreich)
Annahmen: Jährliche Fahrleistung von ca. 25.000 km und Lebensdauer Bus von 12 Jahren

6. Lebenszyklusanalyse

Ermittlung des CO_2-Einsparpotentials

Emissionen aus der Entsorgung sind noch schwer abzuschätzen

- Faktoren wie die Recyclingrate der Materialien und weitere Nutzung der Batterien (Second Life) haben einen großen Einfluss
  - i.d.R. führen diese Maßnahmen bei Elektrofahrzeugen zu Emissionseinsparungen, die von der Herstellungsquote abgezogen werden können
- Die CO_2e-Emissionen der Entsorgung von E-Fahrzeugen werden durch zwei wesentliche Aspekte beeinflusst:
  1. Emissionen und Primärenergiebedarf für Sammlung, Demontage und Recycling von Fahrzeugen zu Sekundärmaterial
  2. Gutschriften für die Substitution von Primärmaterial bei der Herstellung durch recyceltes Sekundärmaterial

- Bei der Entsorgung können bestimmte Materialien (Stahl-, Aluminium-, Kupfermix) mit einer Recyclingquote von ca. 60 % recycelt werden[1]
- Für Batterien kann davon ausgegangen werden, dass ca. 97 % der Batterien ins Material-Recyclen gehen und ca. 3 % für Second-Life genutzt werden
  - Durch das Recycling von Batterien können die CO2e-Emissionen bei der Herstellung neuer Batterien um ca. 10 % reduziert werden

[1] Daten auf Basis von PKW
Quelle: Estimated Greenhouse Gas Emissions and Primary Energy Demand of Passenger Vehicles – 2nd edition Green NCAP 2022

6. Zwischenfazit Technologiebewertung

- Umstellung auf Mischflotte bietet aus technisch-betrieblicher Sicht hohes Potential
  - Vorteile von beiden Technologien kombinieren
  - Flexible und technologieoffene Einführung von E-Bussen (Markt- und Technologieentwicklung beobachten)
  - Infrastrukturelle Vorteile: z.B. Geringere Netzanschlussleistung erforderlich
- Kostenparität der alternativen Antriebe spricht ebenfalls für Mischflotte
  - Einen großen Einfluss haben u.a. die zukünftigen Fahrzeugkosten, Energiekosten (Diesel-/Strom-/H2-Preise) sowie mögliche Förderungen → Mischflotte bietet Flexibilität
- Marktangebot der alternativen Antriebe hinsichtlich Fahrzeughöhe und Wendekreis bleibt schwer einzuschätzen (einzelne Modelle verfügbar/angekündigt)
- Umstellung auf alternative Antriebe bietet hohes CO_2-Einsparungspotential
  → Heutige Mehrbelastung aus Herstellung wird im Betrieb deutlich kompensiert

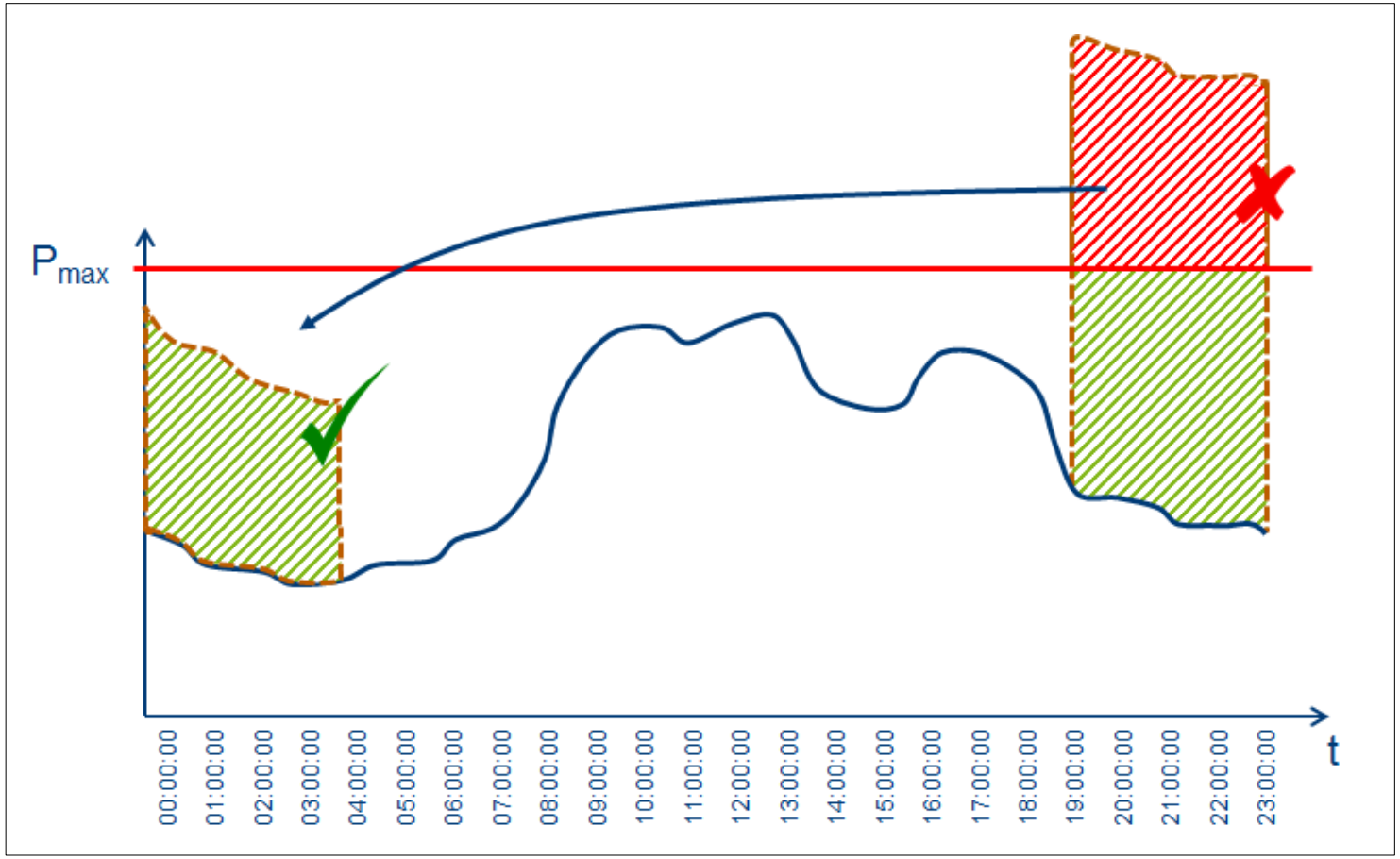
7. Zukünftige Infrastrukturanforderungen
7.1 Ladeinfrastruktur

7.1 Ladeinfrastruktur

Lademanagementsystem LMS

Intelligentes Lademanagement

- Möglichkeit zur Reduzierung der maximalen Anschlussleistung
- Ladeleistung und Ladevorgänge in Abhängigkeit vom Fahrplan gesteuert
- Beispiel möglicher Optimierung:
  1 MVA ohne Lademanagement
  → 0,6 MVA mit Lademanagement



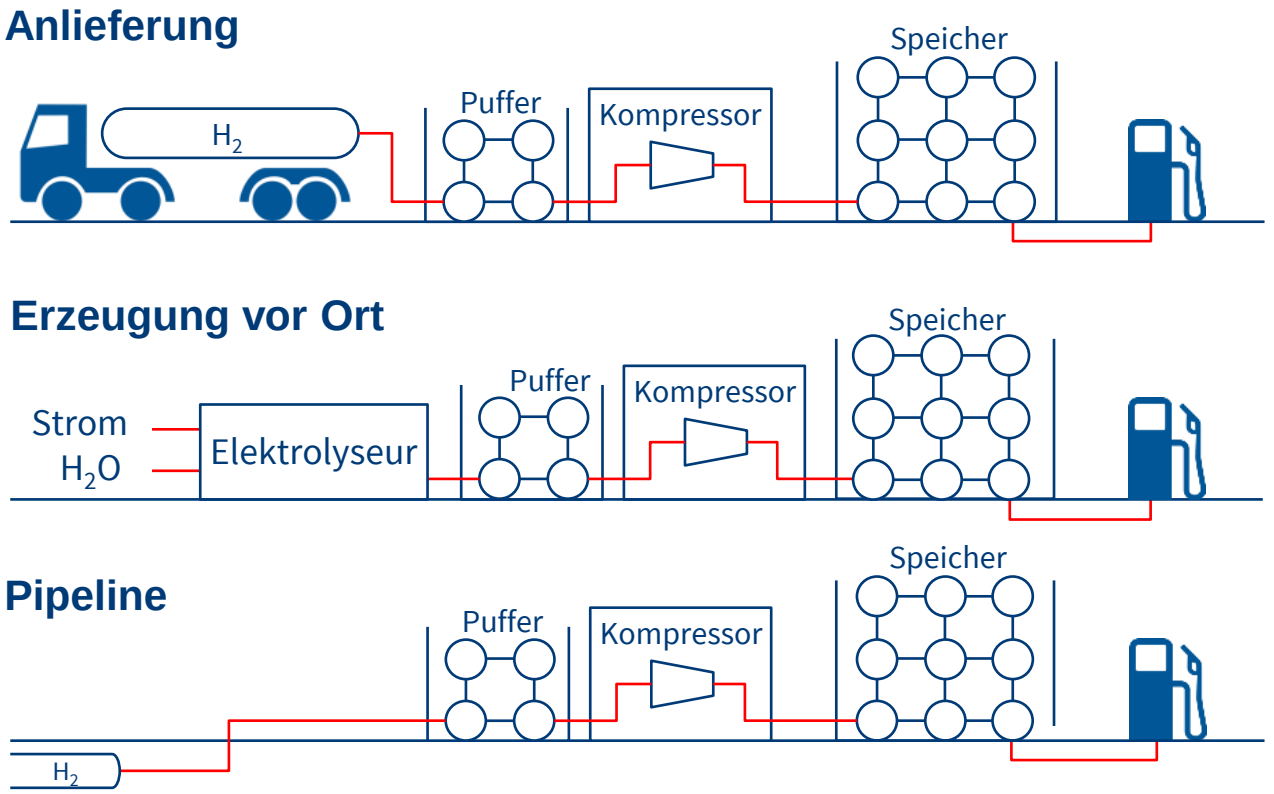
7. Zukünftige Infrastrukturanforderungen
7.2 H_2-Tankstelle

7.2 H_2-Tankstelle

Allgemeine Beschreibung von Tankstellenarten

Versorgung von Wasserstofftankstellen

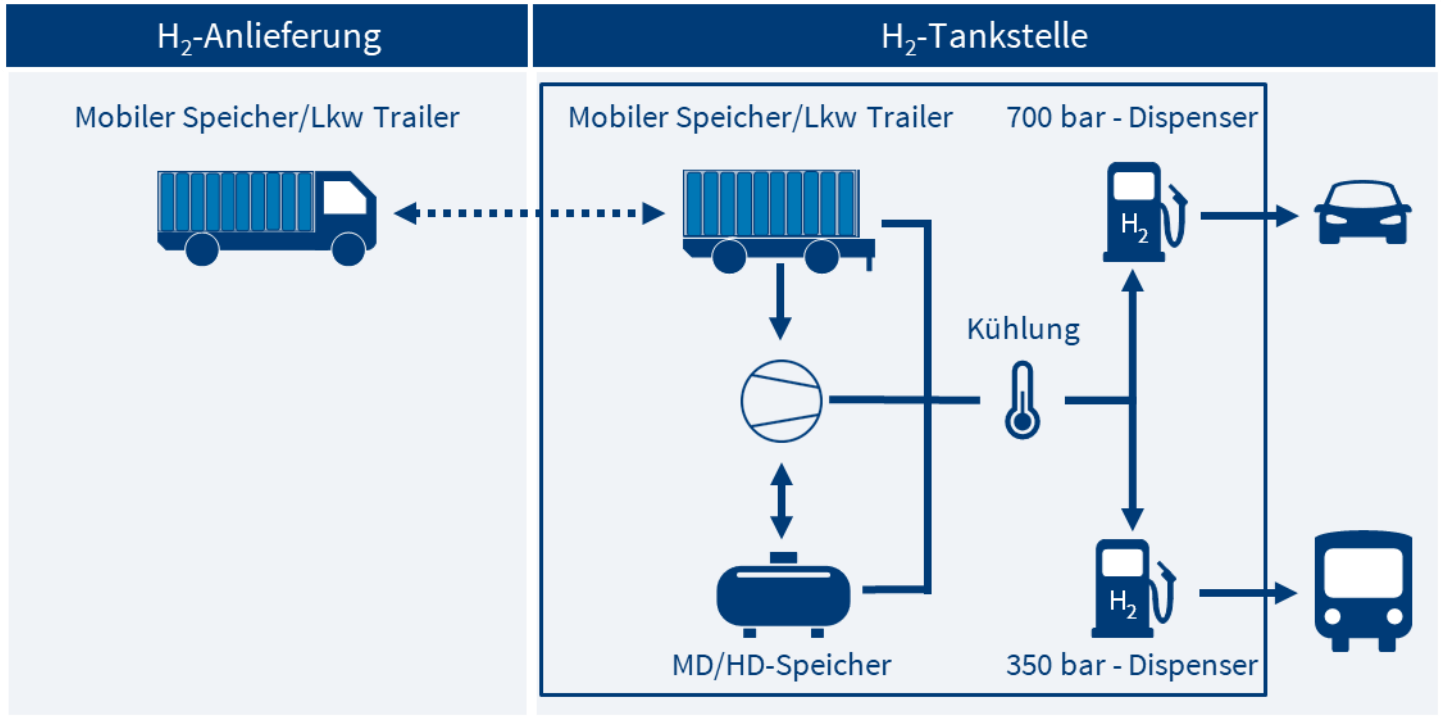
- Heute: typischerweise Anlieferung per Trailer (gasförmig, flüssig)
- Wasserstoff kann ebenfalls direkt am Standort per Elektrolyse erzeugt werden
- Zukünftig sollen Tankstellen an ein breit ausgebautes H_2-Pipelinenetz (z.B. Wasserstoffkernnetz) angeschlossen werden
- Mischformen aller Anlieferungsarten möglich



7.2 H_2-Tankstelle

Allgemeine Beschreibung von Tankstellenarten

Anlieferungsoption 1: Trailer als mobiler Speicher



Verfahrensbeschreibung

- H_2-Anlieferung per Lkw-Trailer (200 - 500 bar) und ggf. Überströmen in MD-Speicher
- Kompression auf 500 bzw. 900 bar zur Speicherung im MD- und HD-Speicher
- Betankung u.a. vom mobilen Speicher, MD-Speicher (500 bar) und/oder HD-Speicher (900 bar) zum Fahrzeugtank (350/700 bar) per Überströmen

\+ Energieeffiziente Nutzung des Trailer-Anlieferungsdrucks

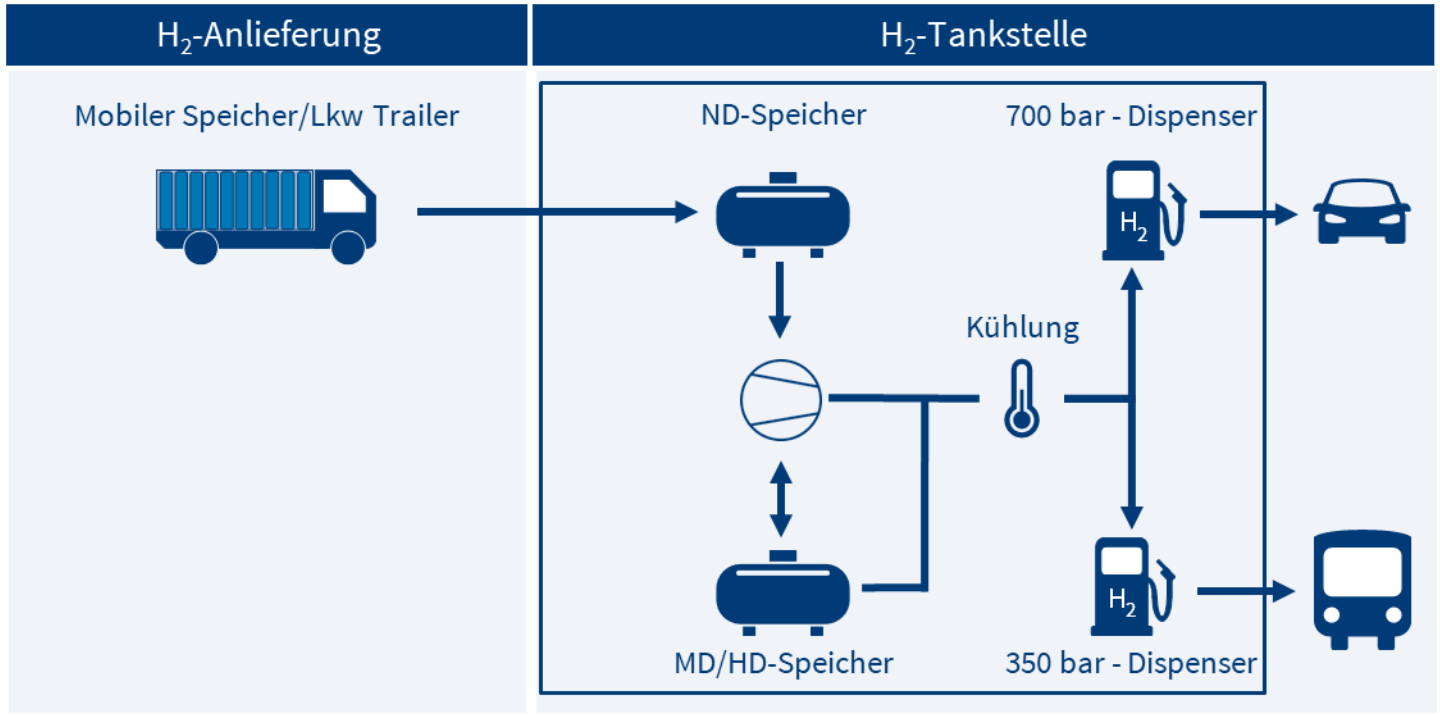
\+ Einfache Performancesteigerung durch zusätzliche H_2-Trailer od. höhere Anlieferungsfrequenz

– Höherer Platzbedarf durch dauerhafte Abladepositionen der Trailer inkl. Rangierfläche

7.2 H_2-Tankstelle

Allgemeine Beschreibung von Tankstellenarten

Anlieferungsoption 2: Kurze Trailer Standzeit



Verfahrensbeschreibung

- H_2-Anlieferung per Lkw-Trailer (200 – 500 bar) und Befüllung des ND-Speicher (ca. 40 bar) per Überströmen.
- Kompression von 40 bar auf 500 bzw. 900 bar zur Speicherung im MD- und HD-Speicher
- Betankung u.a. vom MD-Speicher (500 bar) und/oder HD-Speicher (900 bar) zum Fahrzeugtank (350/700 bar) per Überströmen

\+ Platzeinsparendes Aufstellungskonzept durch den Einsatz von ND-Turmspeicher möglich. 10 – 20 % weniger Fläche im vgl. zu Anlieferungsoption 1

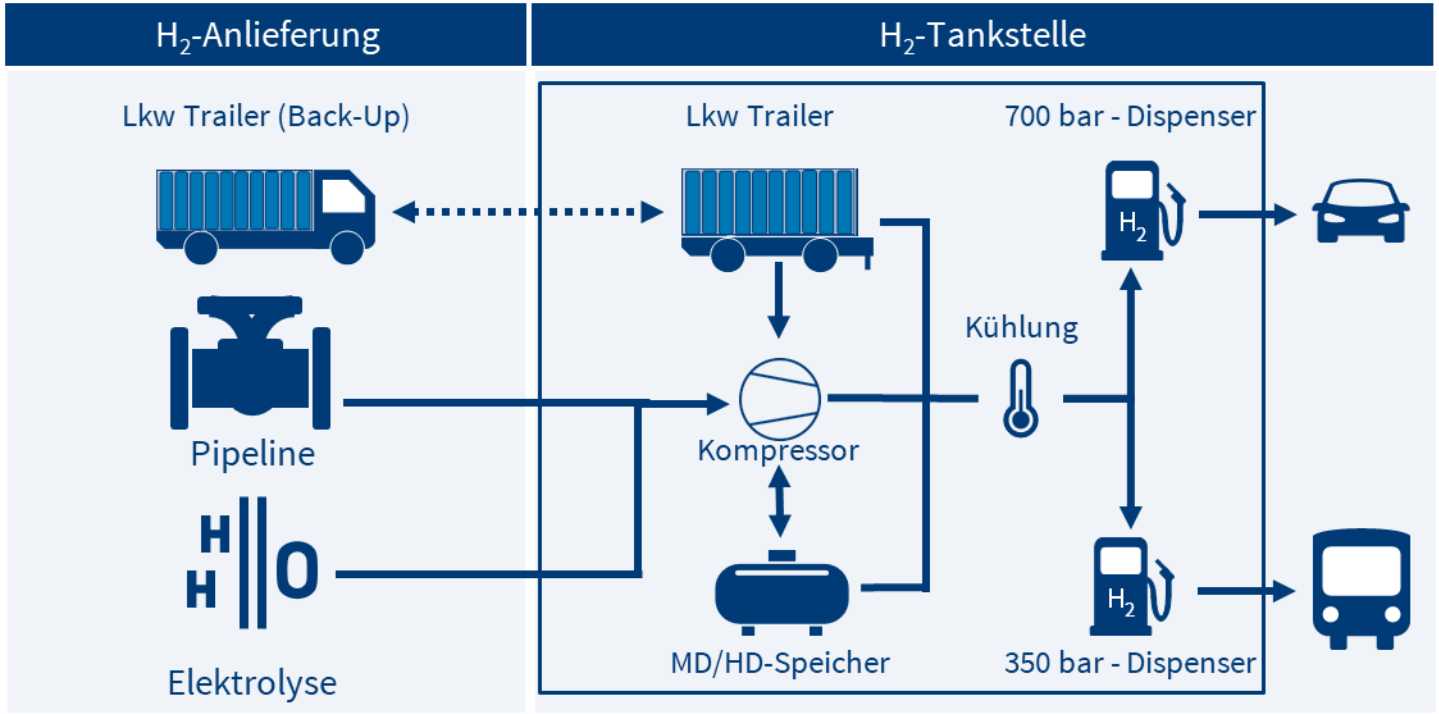
\+ Kurze Standzeiten des H_2-Trailers

– Druckniveau des Trailers wird energetisch nicht genutzt. Mind. 20 - 30 % höherer Energiebedarf in vgl. zu Anlieferungsoption 1

7.2 H_2-Tankstelle

Allgemeine Beschreibung von Tankstellenarten

Mischformen: Trailer als mobiler Speicher + Elektrolyse/Pipeline vor Ort



Verfahrensbeschreibung

- Ausgangsdruck Elektrolyse ca. 40 bar
- Ausgangsdruck Pipeline ca. 60 bar
- H_2 aus Elektrolyseur und Pipeline wird direkt komprimiert

\+ Energieeffiziente Nutzung des Trailer-Anlieferungsdrucks

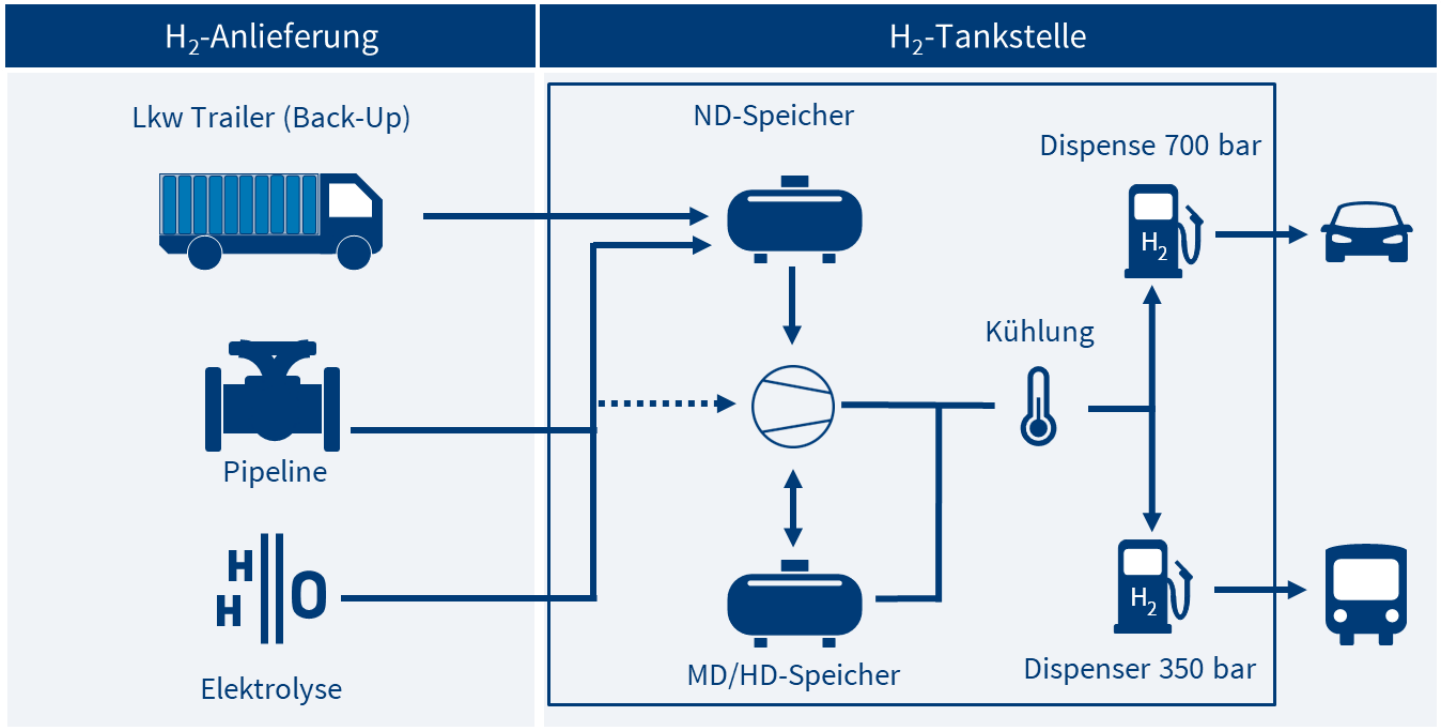
\+ Einfache Performancesteigerung durch zusätzliche H_2-Trailer oder höhere Anlieferungsfrequenz

– Höherer Platzbedarf durch dauerhafte Abladepositionen der Trailer inkl. Rangierfläche

7.2 H_2-Tankstelle

Allgemeine Beschreibung von Tankstellenarten

Mischformen: Kurze Trailer Standzeit + Elektrolyse/Pipeline vor Ort



Verfahrensbeschreibung

- Ausgangsdruck Elektrolyse ca. 40 bar
- Ausgangsdruck Pipeline ca. 60 bar
- H_2 aus Elektrolyseur oder Pipeline wird idealerweise direkt in ND-Speicher geleitet (ohne Kompression)

\+ Platzeinsparendes Aufstellungskonzept durch den Einsatz von ND-Turmspeicher möglich. 10 – 20 % weniger Fläche im vgl. zu Anlieferungsoption 1

\+ Kurze Standzeiten des H_2-Trailers

– Druckniveau des Trailers wird energetisch nicht genutzt. Mind. 20 - 30 % höherer Energiebedarf in vgl. zu Anlieferungsoption 1

7.2 H_2-Tankstelle
Anforderungen und Dimensionierung Hauptkomponenten

Ansätze zur Ausfallsicherung

- Möglichst hohe H_2-Lagermenge zur Überbrückung von Liefer-/Produktionsengpässen
  - \+ Überbrückung bei Einschränkungen der Anlieferung/Erzeugung
  - – Ausfall technischer Komponenten (Kompressoren, Dispenser) wird nicht kompensiert
  - – Hohe Lagermengen vor Ort (Platzbedarf, Kosten, Störfallverordnung)
- Absicherung des Bedarfs durch redundante Quellen (z.B. Anlieferung, Pipeline, Eigenerzeugung)
  - \+ Reduzierung der benötigten Lagermenge
  - \+ Verringerung der Abhängigkeit von Lieferanten
  - – Erhöhter Planungsaufwand, Platzbedarf, Kosten
- Redundante Auslegung einzelner „kritischer“ Anlagenkomponenten (z.B. Kompressoren, Dispenser)
  - \+ Kompensation Ausfall technischer Komponenten
  - \+ Unabhängig von zur Verfügung stehender Lagermenge
  - – Erhöhter Platzbedarf, Kosten

7.2 H_2-Tankstelle

Anforderungen und Dimensionierung Hauptkomponenten

Anzahl Dispenser / Betankungsdauer

› Berücksichtigung: Redundante Auslegung (Ausfallsicherheit)

Anzahl Dispenser [n]	Betankungsdurchsatz* [kg_{H2}/h]
1	ca. 140 (ca. 4 Busse)
2	ca. 280 (ca. 8 Busse)
3	ca. 420 (ca. 12 Busse)
4	ca. 560 (ca. 16 Busse)

*unter Berücksichtigung von 10 min Betankung für 35kg_{H2} und 5 min Rangieren

→ **Empfehlung: Mindestens 2 Dispenser (350 bar) luftseitig**

→ **Darüber hinaus 2 Dispenser (je einmal 350 und 700 bar) landseitig**

7.2 H_2-Tankstelle

Anforderungen und Dimensionierung Hauptkomponenten | Endausbaustufe

Komponente	Anzahl	Aufstellfläche pro Einheit [m^2]	Sicherheits- & Schutzabstände[1] [m]
Kompressoreinheit (à 2 Kompressoren)	1 – 2	Ca. 30	3
Hochdruckspeicher stationär (Typ IV, 900 bar à 30 kg)	2	Ca. 7,5	5
Mitteldruckspeicher stationär (Typ IV, 500 bar à 1.000 kg)	2	Ca. 30	5
Mitteldruckspeicher mobil (Typ IV, 500 bar à 1.000 kg)	1	Ca. 30	5
Kühleinheit (ca. 50 kW)	4	Ca. 7,5	3
H_2-Anlieferungstafel	2	Ca. 2	3
Trailer-Abladeplatz (Sattelzug)	2	Ca. 60	5
Lkw-Rangierfläche (Wenderadius ca. 12,5 m)	2	Ca. 250	-
Dispenser 350 bar (2 x luftseitig, 1 x landseitig)	3	Ca. 2	3
Dispenser 700 bar (landseitig)	1	Ca. 2	3
Busbetankungsfläche	4	Ca. 45	1
Transformatoreinheit (1.000 kVA)	1	Ca. 6	-
Pipeline-Übergabestation	1	Ca. 7,5	3

[1]TRGS 751 Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Füllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen

7.2 H_2-Tankstelle

Anforderungen und Dimensionierung Hauptkomponenten | 1. Ausbaustufe

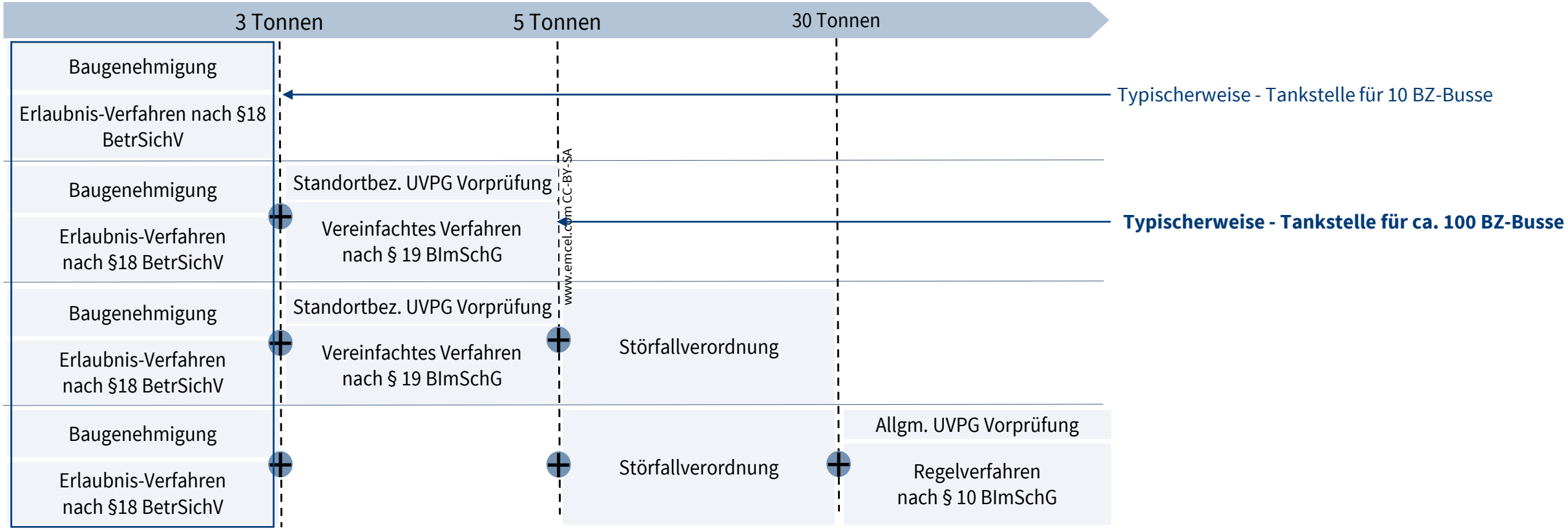
Komponente	Anzahl	Aufstellfläche pro Einheit [m^2]	Sicherheits- & Schutzabstände[1] [m]
Kompressoreinheit (à 2 Kompressoren)	**1**	Ca. 30	3
Hochdruckspeicher stationär (Typ IV, 900 bar à 30 kg)	**1**	Ca. 7,5	5
Mitteldruckspeicher stationär (Typ IV, 500 bar à 1.000 kg)	**1**	Ca. 30	5
Mitteldruckspeicher mobil (Typ IV, 500 bar à 1.000 kg)	1	Ca. 30	5
Kühleinheit (ca. 50 kW)	**2 – 3**	Ca. 7,5	3
H_2-Anlieferungstafel	2	Ca. 2	3
Trailer-Abladeplatz (Sattelzug)	2	Ca. 60	5
Lkw-Rangierfläche (Wenderadius ca. 12,5 m)	2	Ca. 250	-
Dispenser 350 bar (**1** x luftseitig, 1 x landseitig)	**2**	Ca. 2	3
Dispenser 700 bar (landseitig)	1	Ca. 2	3
Busbetankungsfläche	**3**	Ca. 45	1
Transformatoreinheit (1.000 kVA)	**0,5**	Ca. 6	-
Pipeline-Übergabestation	1	Ca. 7,5	3

[1]TRGS 751 Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Füllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen

7.2 H_2-Tankstelle

Genehmigungsverfahren in Abhängigkeit der gelagerten Wasserstoffmenge

Notwendige Genehmigungsverfahren für Wasserstofftankstellen, in Abhängigkeit der vor Ort gelagerten Wasserstoffmenge



7. Zukünftige Infrastrukturanforderungen
7.3 Elektrolyse

7.3 Elektrolyse

Grobe Auslegung einer Vor-Ort-Produktion

Wasserstoffproduktion vor Ort

- Vor-Ort-Elektrolyse kann Wasserstoffanlieferungen ersetzen
- Durchschnittliche Wasserstoffproduktion einer 1 MW Elektrolyseanlage: ca. 18 kg/h
- Elektrolyseleistung von Betriebsweise und Strombezug abhängig (Erneuerbarer Strom, Netzstrom usw.)

⊕ Versorgungssicherheit durch Eigenversorgung

⊕ Vermeidung von Lieferverkehr

⊖ Erhöhte Anschlussleistung und Platzbedarf benötigt

Planbarkeit des Strompreises ausschlaggebend für Wirtschaftlichkeit!

[1]Annahmen: 8.100 VLS pro Jahr

7.3 Elektrolyse

Genehmigungsverfahren in Abhängigkeit der gelagerten Wasserstoffmenge

Die erforderlichen Genehmigungsverfahren hängen von der H_2-Lagermenge vor Ort ab:

H_2-Lagermenge	< 3 t	Ab 3 t	Ab 5 t
H_2-Tankstelle	Baugenehmigungsverfahren + Erlaubnis-Verfahren nach § 18 BetrSichV	Baugenehmigungsverfahren + Erlaubnis-Verfahren nach § 18 BetrSichV + Vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG inkl. standortbezogene Vorprüfung nach UVPG	Baugenehmigungsverfahren + Erlaubnis-Verfahren nach § 18 BetrSichV + Vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG inkl. standortbezogene Vorprüfung nach UVPG + Störfallverordnung 12. BImSchV
Elektrolyseur < 5MW	+ Kein zusätzliches Verfahren erforderlich	+ Kein zusätzliches Verfahren erforderlich	+ Kein zusätzliches Verfahren erforderlich
Elektrolyseur >5MW	Vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG inkl. standortbezogene Vorprüfung nach UVPG		
Elektrolyseur Produktionskapazität >50t/d	Förmliches Verfahren nach § 10 BImSchG inkl. allgemeine Vorprüfung nach UVPG		

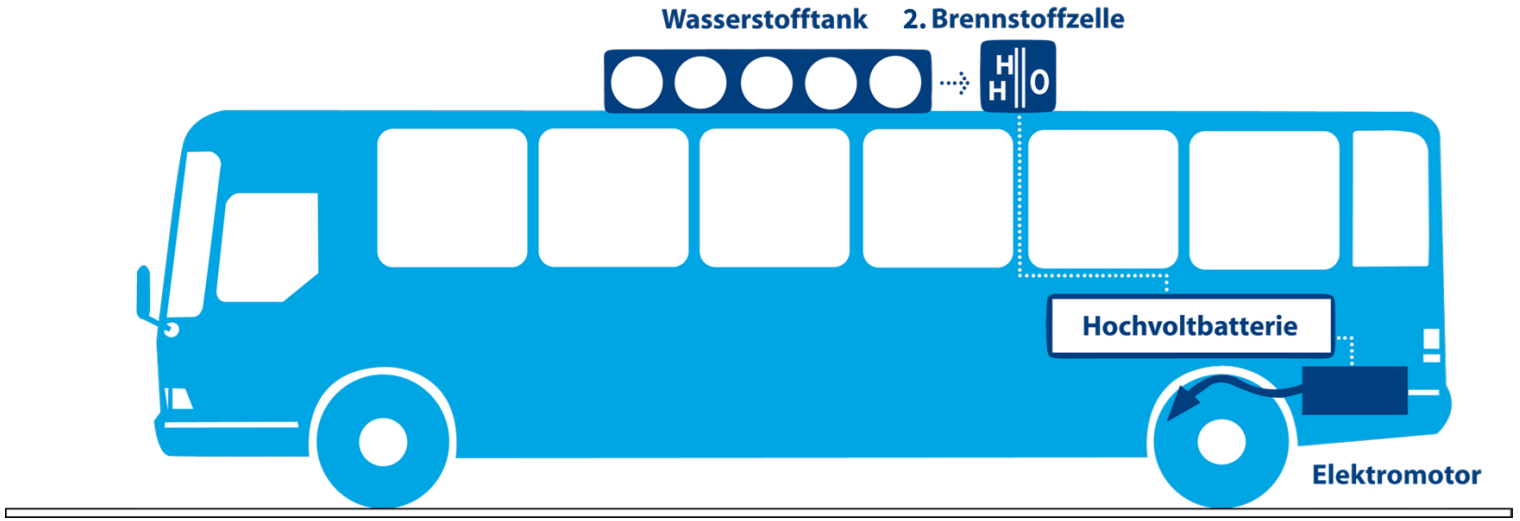
www.emcel.com, November 2024, CC-BY-SA

7. Zukünftige Infrastrukturanforderungen
7.4 Anforderungen Sicherheitskonzept der Werkstatt

Wasserstoff als Kraftstoff

- Untere und obere Konzentrationsgrenze für eine Zündung: **4 % - 74 %** in Luft
- Zündungstemperatur: **560 °C**
- Minimale Zündenergie: **0,02 mJ**
- Dichte: **0,089 kg/m³** (Luft: 1,225 kg/m³)

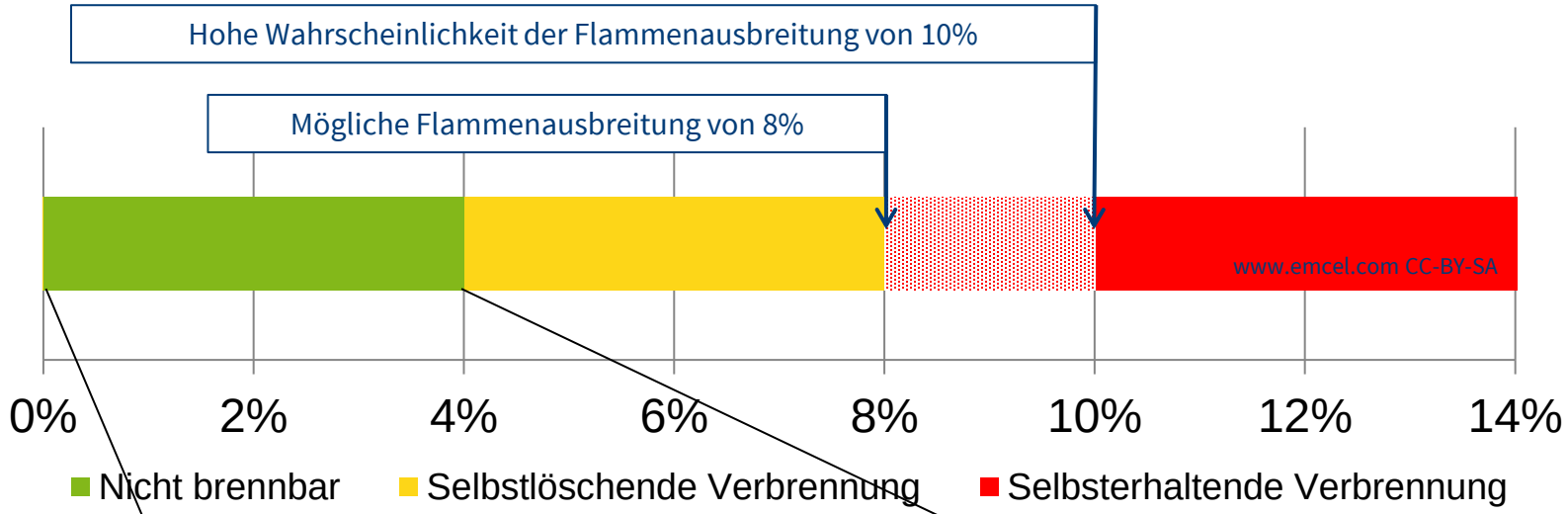
- Ähnlichkeiten zu Erdgas (etablierter Kraftstoff)
- Schnelle Verflüchtigung in Luft als Vorteil im Umgang



7.4 Anforderungen Sicherheitskonzept der Werkstatt

Wartung und Instandhaltung von H2-Fahrzeugen | Grundlagen

Wasserstoffkonzentration in der Luft [Vol.%]



Vergleich untere Explosionsgrenze (UEG) mit absoluter H_2-Konzentration und Alarmstufen

www.emcel.com CC-BY-SA

	OK	Warnung	Alarm	
$\%H_2$ in Luft	0%	0,8%	1,6%	4%
Zugehörige %UEG	0%	20%	40%	100%

7.4 Anforderungen Sicherheitskonzept der Werkstatt

Wartung und Instandhaltung von H2-Fahrzeugen | Allgemeine Vorgehensweise

Vermeidung der Entstehung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre

Voraussetzung: Technische Dichtheit des H_2-Fahrzeuges

- Zulassung der Fahrzeuge nach europäischen bzw. internationalen Richtlinien → Bestätigung durch den Hersteller
- Für Arbeiten an Prototypen- oder Entwicklungsfahrzeugen sind zusätzliche Maßnahmen zu treffen

Allgemeine Vorgehensweise

- Besteht der Anlass die technische Dichtheit anzuzweifeln (z.B. Kollision / Feuer / Manipulation /Betriebsstörung / Fehlermeldung /etc.) darf das Fahrzeug nicht in die Werkstatt eingefahren werden

  → Prüfung der technischen Dichtheit und Berücksichtigung der Herstellerangaben
- Ist die bestehende technische Dichtheit des BZ-Fahrzeuges nicht anzuzweifeln ist keine weitere Prüfung durchzuführen. In Abhängigkeit der auszuführenden Tätigkeit, darf das BZ-Fahrzeug anschließend in die entsprechenden Werkstattbereiche

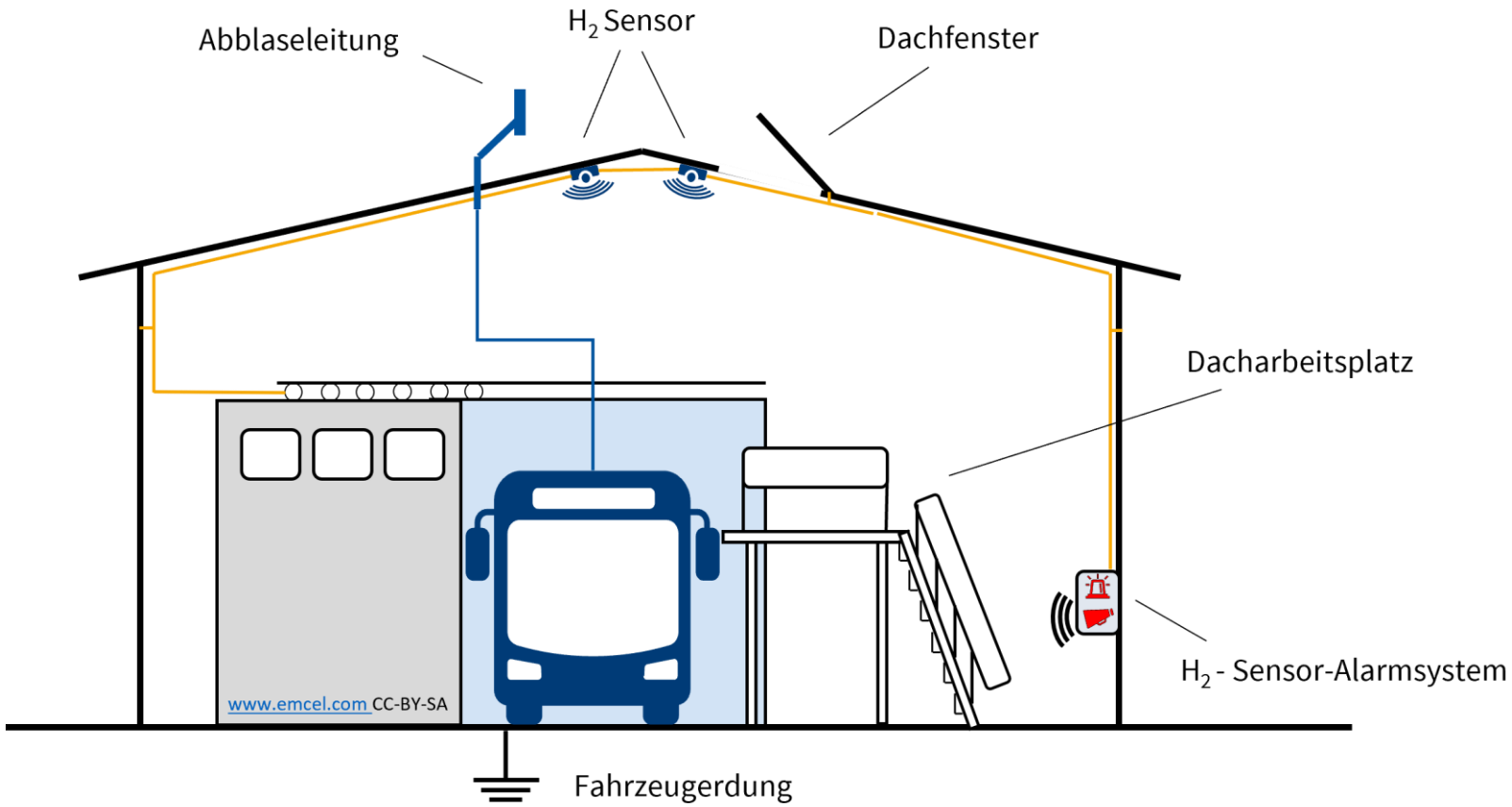
7.4 Anforderungen Sicherheitskonzept der Werkstatt

Wartung und Instandhaltung von H2-Fahrzeugen | Arbeiten am Fahrzeug

Einteilung der Arbeiten: Welche Arbeiten sollen an den Fahrzeugen durchgeführt werden?

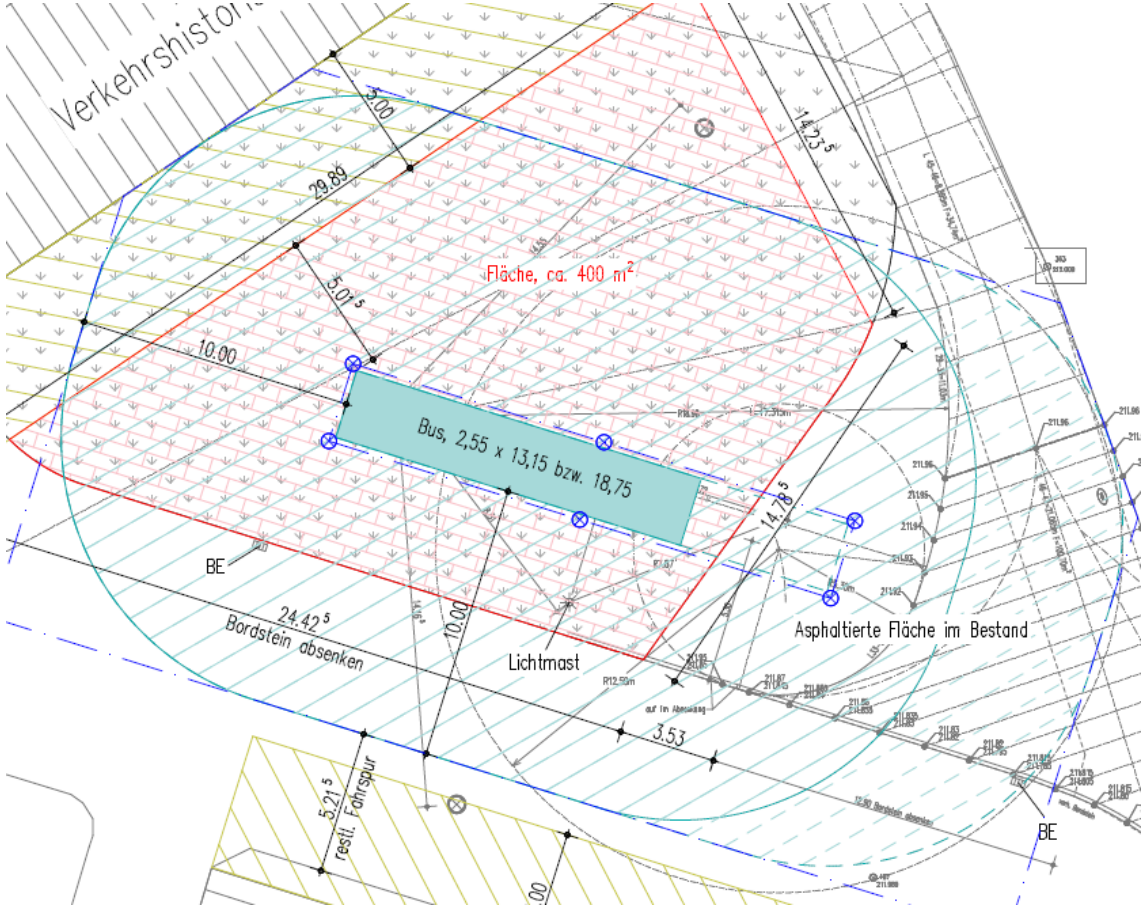
Konventionelle Arbeiten	Arbeiten am Brennstoffzellensystem und/oder am Wasserstofftanksystem	Betrieb des BZ-Systems in der Werkstatt
› Arbeiten unabhängig der Antriebsart, wie Service- und Routinearbeiten (z.B. Reinigung, Reifenwechsel, Karosseriearbeite, etc.) und Arbeiten am Bordnetz (12 V- oder 24 V-System)	› Arbeiten an gasführenden Komponenten, wie z.B. Rohrleitungen und Ventile › inklusive Mittel- und Hochdruckleitungen › Ggf. konventionellen Arbeiten (z.B. Schweißarbeiten) in der Nähe von Wasserstoff führenden Komponenten	› typischerweise Arbeiten zu Testzwecken, bei denen das BZ-System über einen längeren Zeitraum betrieben werden muss › **Nicht gemeint** ist die **Ein- und Ausfahrt des Fahrzeugs** in die Halle
↓	↓	↓
Keine Maßnahmen / spezieller Werkstattbereich erforderlich	**Wasserstoff-Werkstatt(-Bereich) mit entsprechenden Maßnahmen erforderlich**	

Typische technische Ertüchtigungsmaßnahmen



7.4 Anforderungen Sicherheitskonzept der Werkstatt

Wartung und Instandhaltung von H2-Fahrzeugen | Havarieplatz



Quelle: WSW-Wuppertal Vorplanung-Quarantäneplatz

Abstellen auf dem Havarieplatz

- Ein sicherer Abstellplatz ist einzurichten, für Fahrzeuge mit unklaren Fahrzeugzustand (z.B. nicht techn. dicht, defekte HV-Batterie)
- Fahrzeuge werden an einem voraus festgelegten Platz abgestellt und ein Radius von 5 m wird mit einem Absperrband abgesteckt
  (Platz muss im Bedarfsfall verfügbar sein)
- An diesem Punkt kann auch ggf. mit entsprechender Abblasevorrichtung der Wasserstoff abgelassen werden.
  →Hier müssen die genauen Abstände in einer Gefährdungsbeurteilung bzw. Ex-Schutzdokument definiert werden.

7.4 Anforderungen Sicherheitskonzept der Werkstatt

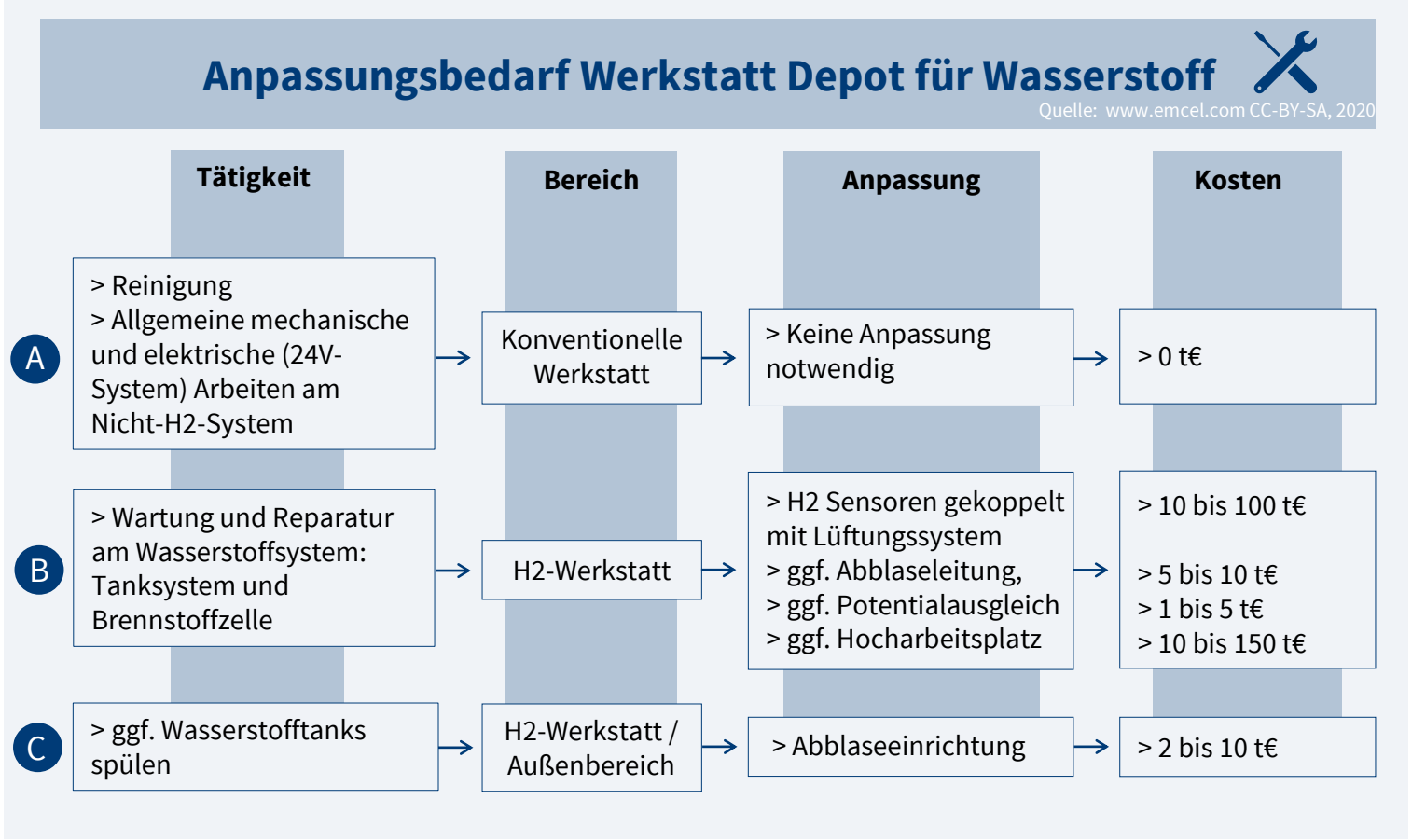
Wartung und Instandhaltung von H2-Fahrzeugen | Ertüchtigungsmaßnahmen

Werkstatt

- Ertüchtigung für Wasserstoff / Hochvolt
- Spezial-, Diagnosewerkzeug
- Dacharbeitsplätze, Deckenkran, Hebebühne, etc.

Freifläche/Hoffläche

- Havarieplatz



8. Handlungsempfehlung und Fazit

8. Handlungsempfehlung und Fazit

Handlungsempfehlung

- Es wird empfohlen die Busflotte auf eine Mischflotte aus Batterie- und Wasserstoffbussen umzustellen.
- Die Umstellung auf alternative Antriebe ist unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Unsicherheiten mit Mehrkosten verbunden, welche sich v.a. aus den heute noch höheren Fahrzeug- und Infrastrukturkosten ergeben.
  - Die Betriebskosten von batterieelektrischen Bussen liegen heute schon unterhalb der konventioneller Dieselbusse und auch die Betriebskosten der Wasserstoffbusse werden sich mittelfristig den Batteriebussen angleichen (Prognose Stand heute).
- Trotz Mehrkosten tragen Batterie- und Wasserstoffbusse zur Erreichung der Ziele (Klimaneutralität bis 2035, Reduzierung der Emissionen auf netto null bis 2045) bei, da sie im Betrieb keine CO_2-Emissionen verursachen und die globalen Emissionen über den Lebenszyklus somit heute schon geringer sind als bei Dieselbussen.
  - Das Einsparpotential gegenüber Dieselbussen ist mit ca. 300t CO_2e (Wasserstoff) und 280t CO_2e (Batterie) vergleichbar.
- Die Versorgung der H2-Tankstelle wird kurz- bis mittelfristig über Trailer realisiert werden. Perspektivisch können auch andere Konzepte in Betracht gezogen werden.

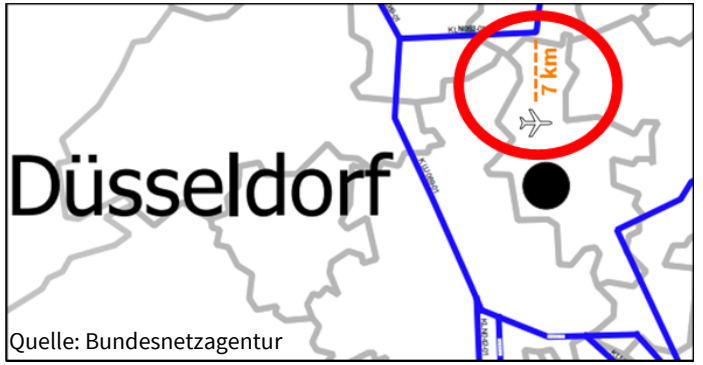
8. Handlungsempfehlung und Fazit

Potential der Mischflotte

- Die Mischflotte bietet flexible und technologieoffene Einführung von E-Bussen (Markt- und Technologieentwicklung beobachten)
- Infrastrukturelle Vorteile: z.B. Aktuelle Abstellflächen der Busse weiterhin nutzen
- Die Mischflotte bietet Flexibilität, um auf zukünftigen Fahrzeugkosten, Energiekosten sowie mögliche Förderungen zu reagieren.

8. Handlungsempfehlung und Fazit

Ausblick



- Flughäfen werden als potenzielle H_2-Abnehmer im Umfeld von H_2-Hubs bzw. dem Wasserstoffkernnetz gesehen[1]
  - Daher können sie bei der Identifizierung von z.B. H_2-Hub-Standorten eine wichtige Rolle spielen
- Mittels H_2-Hubs können mehrere Abnehmer aus einer zentralen Quelle per Trailer versorgt werden (u.a. Flughäfen)
  - Reduzierung von Investitionskosten für Stichleitungen (max. 10 km) zum H_2-Kernnetz
  - Skaleneffekte durch Bündelung von Dienstleistungen
  - Reduzierung der Wasserstoff-Transportkosten durch Nähe zum H_2-Hub

[1] NOW und dena, Versorgung der H_2-Tankstelleninfrastruktur in Deutschland über ein H_2-Pipeline-Netz, Juni 2024

EMCEL Ingenieurbüro für Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität

Düsseldorf Airport DUS

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

… damit Ihre Energiewende gelingt!

Marius Schneider
Fon +49 (0) 221 29 26 95-230
Fax +49 (0)221 29 26 95 –229
marius.schneider@emcel.com

EMCEL GmbH
Am Wassermann 28a
50829 Köln
www.emcel.com

Ihre Ansprechpartner



Marius Schneider

Projektleiter Elektromobilität

Kontakt

Tel +49(0) 221.29 26 95-230

marius.schneider@emcel.com



Nicolò Queirazza

Teamleitung Elektromobilität

Kontakt

Tel +49(0) 221.29 26 95-213

nicolo.queirazza@emcel.com

Copyright

EMCEL GmbH
Am Wassermann 28a
50829 Köln

Die in dieser Präsentation aufgeführten Gedanken, Ideen und Aktionen sind in ihrer Gesamtheit, sowie einzeln und in jeder daraus abgeleiteten Form geistiges Eigentum der EMCEL GmbH und unterliegen den geltenden Urhebergesetzen.

Die Verwirklichung von Ideen und Ideenansätzen ist nur mit vorheriger vertraglicher Vereinbarung mit dem Rechteinhaber möglich.

Die ganze oder teilweise Vervielfältigung sowie jede Weitergabe an Dritte ist nicht gestattet. Der Empfänger dieser Unterlagen haftet bei unberechtigter Verwendung oder Weitergabe an Dritte für daraus entstehenden Schaden.

Dem Empfänger werden durch die Überlassung der Unterlagen keine Nutzungsrechte eingeräumt. EMCEL GmbH widerspricht durch die Überlassung der Unterlagen ausdrücklich einer wirtschaftlichen Verwertung durch den Empfänger. EMCEL GmbH behält sich in jedem Fall der Zuwiderhandlung die Geltendmachung von Schadensersatzansprüchen vor.

Der Empfänger dieser Unterlagen bestätigt durch Entgegennahme der Unterlagen absolute Vertraulichkeit und absolutes Stillschweigen über die darin genannten Ideen und Vorschläge zu wahren.

Disclaimer

Alle angegebenen Preise sind als Richtpreise zu verstehen. Die Preise sind derzeit am Markt üblich. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass den angegeben Preisen keine spezifischen Angebote mit einem detaillierten Lastenheft zugrunde liegen. (Stand März 2025)