

BERICHT

Titel:	Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV
Kurztitel:	Technische und wirtschaftliche Bewertung alternativer Antriebskonzepte
Auftraggeber:	Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH (BEG)
Auftragnehmer:	Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik Professur für Elektrische Bahnen
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. André Müller
Berichtsnummer:	2017-EB-008-1
Datum:	Dresden, den 03.11.2017

Freigabe

DATUM	VERSION	ÄNDERUNG/AKTUALISIERUNG
03.11.2017	2017/EB-008-1	Neuerstellung

Erstellt: Dipl.-Ing. André Müller

03.11.2017
Datum, Unterschrift

Freigegeben: Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

03.11.2017
Datum, Unterschrift

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	7
1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	8
2 Technische Bewertung	9
2.1 Technologiebeschreibung alternativer Antriebskonzepte	9
2.1.1 Fahrzeug- und Anlagenkonzepte für den SPNV	9
2.1.2 Technologie- und Betriebserfahrungen mit hybriden Antriebskonzepten.....	12
2.2 Nutzungspotenziale	14
2.2.1 Verkehrliche Nutzungspotenziale.....	14
2.2.2 Bahnbetriebliche Nutzungspotenziale.....	14
2.2.3 Umweltorientierte Nutzungspotenziale	15
2.2.4 Imageorientierte Nutzungspotenziale	15
2.2.5 Instandhaltungstechnische Nutzungspotenziale.....	15
2.2.6 Wirtschaftliche Nutzungspotenziale	15
2.3 Infrastrukturanforderungen.....	16
Elektrotriebzug (ohne Speicher).....	16
Dieseltriebzug (ohne Speicher)	16
OL-/ Batterie-Hybrid.....	16
OL-/ Diesel-Hybrid	16
Diesel-/ Batterie-Hybrid.....	16
H2-/ Batterie-Hybrid	16
2.4 Anforderungen an Betriebsführung und Instandhaltung	17
2.4.1 Betriebsführung	17
2.4.2 Instandhaltung	17
2.5 Auswahl geeigneter Antriebskonzepte für den bayerischen SPNV.....	18
3 Wirtschaftliche Bewertung	19

3.1	Methodik	19
3.2	Definition der Bewertungsszenarien	19
3.3	LCC-Berechnungstool.....	20
3.3.1	Zielsetzung der LCC-Analyse	20
3.3.2	Normen- und Vorschriftenlage.....	21
3.3.3	Lebenszyklusphasen und Berechnungsmethode	22
3.4	Ermittlung aller Einzelkosten	25
3.4.1	Vorgabewerte für das Berechnungstool	26
3.4.2	Fahrzeugkosten	27
3.4.3	Infrastrukturkosten	33
3.5	Bestimmung der LCC für unterschiedliche Szenarien	34
3.6	Betriebswirtschaftliche Bewertung	42
4	Zusammenfassung.....	44
	Literaturverzeichnis.....	46

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1 Prinzipschaltbild, Antriebssystem des EV-E301	9
Abb. 2-2 EV-E301	10
Abb. 2-3 Alstom Coradia Polyvalent.....	10
Abb. 2-4 Prinzipschaltbild des EcoTrain	11
Abb. 2-5 Prinzipschaltbild, Antriebssystem des KuMoYa E995 mit Brennstoffzelle.....	12
Abb. 2-6 Alstom Coradia iLint	12
Abb. 3-1 Batteriealterung in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad als Primärenergiequelle.....	29
Abb. 3-2 spezifische Kosten für das Nachladen der Batterie für Diesel-/ Batterie- Hybridantriebe	31
Abb. 3-3 Kapitalwertverläufe der Antriebskonzepte für ½-Takt bei einer Startelektrifizierung von 0%	41

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1 für die Untersuchung ausgewählte alternative Antriebskonzepte.....	18
Tabelle 3-1 Parameter für die Kapitalwertberechnung.....	23
Tabelle 3-2 Parameter für die Bildung des Kalkulationszinssatzes	25
Tabelle 3-3 Kostensätze zur Berechnung der Fahrzeugkostenanteile für verschiedene Antriebskonzepte.....	27
Tabelle 3-4 Kostenanteile für Tankfahrten von Dieseltreibfahrzeugen	31
Tabelle 3-5 Infrastrukturbedingungen für unterschiedliche Antriebskonzepte	33
Tabelle 3-6 Kostenkennwerte zur Bestimmung der Infrastrukturkosten	33
Tabelle 3-7 Kapitalwerte der Antriebskonzepte nach 76 Jahren, 1/2h-Takt.....	35
Tabelle 3-8 Kapitalwerte der Antriebskonzepte nach 76 Jahren, 1h-Takt.....	37
Tabelle 3-9 Kapitalwerte der Antriebskonzepte nach 76 Jahren, 2h-Takt.....	39

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Verwendete Abkürzungen

BEG	Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
LCC	Life Cycle Costs
OL	Oberleitung
SPNV	Schienenpersonennahverkehr

Verwendete Formelzeichen

t_{Uml}	Umlaufdauer
t_{Ein}	Einsatzdauer
t_{Takt}	Taktzeit
L	Resultierende, sich im Laufe eines Jahres ergebende Fahrleistung
l_{Str}	Streckenlänge
n_{Betr}	Benötigte Fahrzeuganzahl für den Betrieb
v	Geschwindigkeit
$\eta_{ET,VT}$	Gesamtwirkungsgrad der ET- bzw. VT-Antriebskonfiguration
KW	Kapitalwert
AZ_0	Anschaffungsauszahlung zum Zeitpunkt $t = 0$ Jahre
EZ_t	Einzahlung zum Zeitpunkt t
AZ_t	Auszahlung/ Kosten zum Zeitpunkt t
i	Kalkulationszinssatz
t	Zeitpunkt
RW_{LD}	Restwert am Betrachtungsdauerende
LD	Betrachtungsdauerende
BW_{RF}	Barwert der Rückflüsse
BW_{RW}	Barwert des Restwerts

1 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Die Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH BEG organisiert als Aufgabenträger den gesamten SPNV im Freistaat Bayern mit dem Ziel, bis zum Jahr 2023 sämtliche Verkehrsleistungen im schienengebundenen Regionalverkehr durch die BEG wettbewerblich zu vergeben. Um Chancengleichheit für potentielle Wettbewerber zu garantieren müssen im Vorfeld Anforderungen an die einzusetzenden Fahrzeuge benannt werden.

Da sich Streckenelektrifizierungen nur bei erhöhter Verkehrsleistung wirtschaftlich lohnen, dominieren auf nichtelektrifizierten Strecken immer noch die Dieselantriebe. Gründe sind zum einen die geringeren Leistungsanforderungen bei akzeptablen Reichweiten und zum anderen die deutlich reduzierten Anforderungen an die Infrastruktur.

Allerdings sind die Traktionsenergiekosten eines Dieselfahrzeugs gegenüber einem konventionellen Elektrotriebzug aufgrund des deutlich geringeren Wirkungsgrades des Antriebs und der nicht vorhandenen Möglichkeit die Bremsenergie zu rekuperieren ungefähr doppelt so hoch.

Der Einsatz von Schienenfahrzeugen mit alternativen (Hybrid-)Antrieben bietet nach heutiger Auffassung neben der Möglichkeit neuer Betriebsszenarien auch Chancen zu einem ökonomischeren und ökologischeren Betrieb auf bisher nicht elektrifizierten Bahnstrecken. Zudem ergibt sich damit auch für elektrische Fahrzeuge grundsätzlich die Möglichkeit zum abschnittsweise oberleitungsfreien Fahren und somit die Chance, teure Elektrifizierungsprojekte zu vermeiden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden technische, betriebliche und ökonomische Potenziale sowie die Umsetzungsanforderungen alternativer, emissionsarmer Antriebs- und Energieversorgungskonzepte für den bayerischen SPNV analysiert.

2 TECHNISCHE BEWERTUNG

2.1 TECHNOLOGIEBESCHREIBUNG ALTERNATIVER ANTRIEBSKONZEPTE

2.1.1 Fahrzeug- und Anlagenkonzepte für den SPNV

Nachfolgend werden die wichtigsten alternativen Fahrzeugantriebskonzepte für Triebzüge des SPNV kurz vorgestellt. Als Prämisse für die Auswahl im Sinne der vorliegenden Studie gilt die Beschaffbarkeit derartiger Fahrzeuge im Zeitraum bis 2020.

OL-/ Batterie-Hybrid

OL-/ Batterie-Hybrid Triebzüge sind Fahrzeuge deren elektrischer Antrieb um einen Energiespeicher auf Basis von Akkumulatoren erweitert wurde. Abbildung 2-1 zeigt beispielhaft, wie dies beim japanischen Triebzug EV-E301 umgesetzt ist.

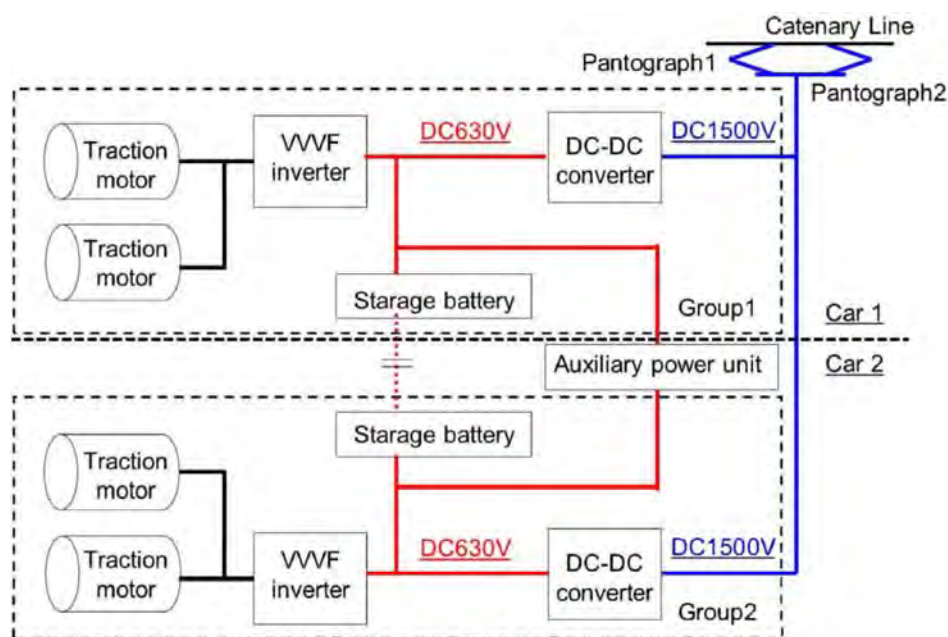


Abb. 2-1 Prinzipschaltbild, Antriebssystem des EV-E301

Quelle: [1]

Der Triebzug EV-E301 ist für den Betrieb an Fahrleitung mit DC 1,5 kV ausgelegt. Die auf dem Fahrzeug verbauten Akkumulatoren haben einen Energieinhalt von 190 kWh und ermöglichen damit die oberleitungsfreie Überbrückung einer Reichweite von 60 km. Abbildung 2-2 zeigt das Fahrzeug im Zustand der externen Nachladung.

Neben dem Übergang auf nicht elektrifizierte Strecken ohne den Einsatz eines Dieselmotors ermöglichen die Akkumulatoren eine Nutzung der Rekuperation von Bremsarbeit und eine Verbesserung der Fahrdynamik. Der Entfall des Dieselantriebs soll Netzweit zu einer Reduzierung von Kraftstoffbedarf und Emissionen sowie zu einer Vereinfachung der Instandhaltung

führen. Schlussendlich wird eine Flottenbereinigung angestrebt, nach der keine Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antrieb mehr im Einsatz sein sollen.

Ähnliche Fahrzeugkonzepte existieren in Deutschland mit dem Triebzug Talent 3 der Firma Bombardier und dem Triebzug MIREO von Siemens.



Abb. 2-2 EV-E301

Quelle: [1]

OL-/ Diesel-Hybrid

OL-/ Diesel-Hybrid Triebzüge, auch Dual Mode Triebzüge genannt, wie der Alstom Coradia Polyvalent oder der Stadler Flirt bimodal verfügen i. d. R. über ein Antriebssystem mit elektrischer und dieselektrischer Leistungsbereitstellung für den Streckenbetrieb. Im Falle des Alstom Coradia Polyvalent (Abbildung 2-3) erfolgt die elektrische Leistungsübertragung aus der Oberleitung über den Pantografen. Alle für Frankreich bestimmten Züge können unter 25 kV 50 Hz Wechselspannung und 1,5 kV Gleichspannung fahren. Die 17 zukünftig grenzüberschreitend in die Schweiz verkehrenden Züge sollen auch unter 15 kV 16,7 Hz Wechselspannung fahren können [2].



Abb. 2-3 Alstom Coradia Polyvalent

Quelle: [2]

Diesel-/ Batterie-Hybrid

Diesel-/ Batterie-Hybrid Triebzüge sind Fahrzeuge, deren dieselektrischer Antrieb um einen Energiespeicher erweitert wurde. In dieser Studie sind dies Li-Ionen-Akkumulatoren. Abbildung 2-4 zeigt beispielhaft, wie dies beim EcoTrain der DB Regio umgesetzt wurde.

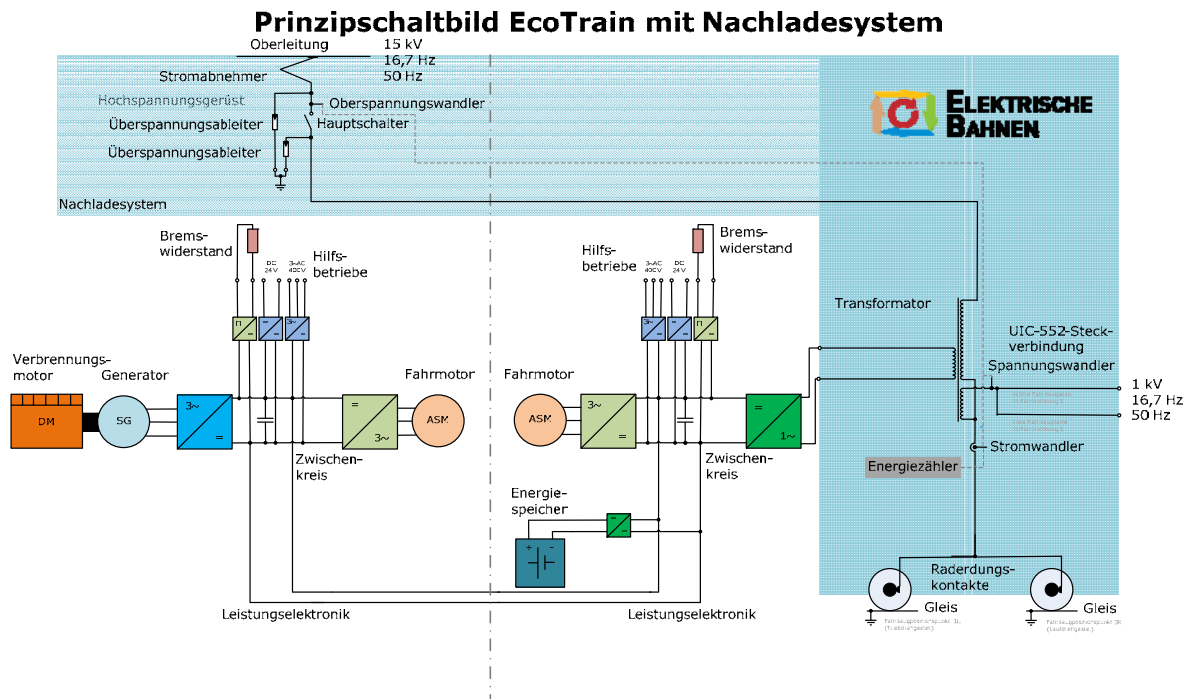


Abb. 2-4 Prinzipschaltbild des EcoTrain

Quelle: [3]

Der Akkumulator hat einen Energieinhalt von 150 kWh und ermöglicht neben einer Verringerung von Kraftstoffbedarf und Emissionen das Abschalten des Dieselmotors während der Halte und während des Fahrens mit verringerter Leistungsanforderung, eine Vereinfachung der Instandhaltung sowie eine Verbesserung der Fahrdynamik im oberen Leistungsbereich durch Kombination von Diesel- und Batterieantrieb.

H2-/ Batterie-Hybrid

H2-/ Batterie-Hybrid Triebzüge sind Fahrzeuge, die statt eines Dieselmotors eine Brennstoffzelle als Hauptenergiequelle verwenden. Abbildung 2-5 zeigt beispielhaft, wie dies beim japanischen KuMoYa E995 umgesetzt wurde. Um die im Traktionsprozess auftretenden Leistungsspitzen abdecken zu können, wird die Brennstoffzelle mit Energiespeichern kombiniert. In dieser Studie sind dies Li-Ion-Akkumulatoren. Beim KuMoYa E995 ist ein Energiespeicher mit einer Leistung von 340 kW bei einem Energieinhalt von 19,5 kWh installiert.

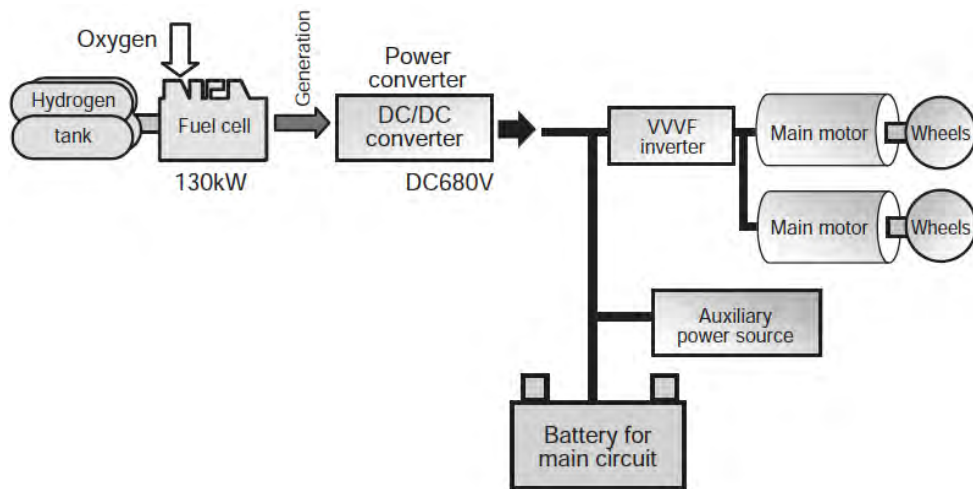


Abb. 2-5 Prinzipschaltbild, Antriebssystem des KuMoYa E995 mit Brennstoffzelle

Quelle: [3] angepasst

Brennstoffzellen haben bei der Herstellung des Wasserstoffs aus erneuerbaren Energien den Vorteil, dass die Emissionen (Schadstoffe, CO_2) reduziert werden. Gleichfalls werden die Lärmemissionen im Fahrbetrieb durch eine Brennstoffzelle verringert.

Ein gleichartiges Fahrzeugkonzept bietet die Firma Alstom in Deutschland mit dem Triebzug iLint an.



Abb. 2-6 Alstom Coradia iLint [4]

2.1.2 Technologie- und Betriebserfahrungen mit hybriden Antriebskonzepten

Der Zeitraum, in dem moderne alternative (Hybrid-)Antriebe für Schienenfahrzeuge des SPNV im Einsatz sind, ist aktuell noch extrem kurz. Lediglich mit Dual-Mode-Fahrzeugen (OL-/ Diesel-Hybrid) gibt es aus Frankreich etwas umfangreichere Flottenerfahrungen, bei allen anderen Antriebssystemen existieren noch keine belastbaren bzw. öffentlich zugänglichen Informationen.

Im Folgenden werden daher zunächst die jeweiligen, aus zahlreichen Untersuchungen der Professur Elektrische Bahnen ermittelten Zielstellungen und erwarteten Vorteile hybrider Antriebskonzepte aufgeführt.

Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid

- bekannte Vorteile (ggü. konventionellem Elektrotriebzug)
 - Erweiterung des Einsatzbereiches durch abschnittsweises batterieelektrisches Fahren auf nichtelektrifizierten Strecken
 - Bremsenergie-rückspeisung auch bei Betrieb ohne Fahrleitung
 - umsteigefreie Verbindungen Stadt – Land
 - Flottenbereinigung
 - Verbesserung der Spannungshaltung im Oberleitungsnetz durch geringeren Leistungsbezug (Peak Shaving)
 - Reduzierung der Spitzenleistung der Fahrleitungen und Unterwerke um bis zu 13 %

OL-/Diesel-Hybrid

- bekannte Vorteile (ggü. konventionellem Elektrotriebzug)
 - Erweiterung des Einsatzbereiches durch abschnittsweisen Dieselbetrieb auf nichtelektrifizierten Strecken
 - umsteigefreie Verbindungen Stadt – Land
 - Flottenbereinigung

Diesel-/ Batterie-Hybrid

- bekannte Vorteile (ggü. konventionellem Dieselantrieb)
 - 14 – 33 % Rekuperation (der Traktionsenergie)
 - 10 – 20 % Kraftstoffeinsparung gegenüber vergleichbarem Dieseltriebzug
 - bis zu 30 % weniger Schadstoff- und CO₂-Ausstoß
 - Verringerung der Lärmemissionen bei Ausfahrt aus Stationen um 20 – 30 dB
 - erhöhter Fahrkomfort
 - verbesserte Fahrdynamik
 - Reduzierung der Dieselmotor-Betriebsstunden, damit verringerter Instandhaltungsaufwand

H2-/ Batterie-Hybrid

- bekannte Vorteile (ggü. konventionellem Dieselantrieb)
 - Möglichkeit der Rekuperation
 - 20 – 40% Energieeinsparung gegenüber vergleichbarem Dieseltriebzug
 - wenn Wasserstoff vollständig aus erneuerbaren Energien → klimaneutraler Verkehr
 - Verringerung der Lärmemissionen
 - erhöhter Fahrkomfort

Neben den aufgeführten Vorteilen die für alle Varianten gelten und den Projektzielen gilt es aus heutiger Sicht anzumerken, dass

- es sich in der Mehrzahl der ausgeführten Projekte noch um Prototypen und Kleinserien handelt,
- es bisher kaum verlässliche Angaben zur Wirtschaftlichkeit der recherchierten Fahrzeugkonzepte gibt,
- fast alle betrachteten Projekte vorrangig auf die Verringerung der Emissionen und des Energiebedarfs – also umweltpolitische Kriterien – abzielen,
- die Fahrdynamik aktuell kein herausragendes Zielkriterium ist – sie soll lediglich nicht schlechter sein als bisher,
- Nachteile, Restriktionen und Probleme in den Veröffentlichungen selten beschrieben werden,
- die für den Fahrzeugbetrieb und die Instandhaltung erforderlichen Infrastrukturanlagen kaum Erwähnung finden und
- es zur Frage der Umrüstung von Bestandsfahrzeugen vs. der Beschaffung von Neufahrzeugen keine konkreten Aussagen gibt.

2.2 NUTZUNGSPOTENZIALE

Aus dem Einsatz von alternativen Antrieben für Schienenfahrzeuge ergeben sich die nachfolgend beschriebenen Nutzungspotenziale:

2.2.1 Verkehrliche Nutzungspotenziale

- Erreichbarkeit
 - Durchbinden von Verkehren in die Innenstadt
- Modal Split
 - Erhöhung des SPV-Anteils durch attraktivere Verbindungen

2.2.2 Bahnbetriebliche Nutzungspotenziale

- fahrplan- und umlauftechnisch
 - Vertakten von Umland- und S-Bahn-Verkehren durch bessere Fahrdynamik
 - Durchbinden von Verkehren und damit weniger Fahrzeuge/Personal
 - Flügeln von Verkehren auf elektrifizierten und nicht elektrifizierten Strecken
- Vermeiden von Einfahrverboten
 - durch den Einsatz elektrischer bzw. batterieelektrischer Fahrzeuge können Einfahrverbote in bspw. Tunnel und Bahnhofshallen vermieden werden
- fahrdynamisch
 - Boosten bei E- und D-Fahrzeugen
 - Verringerung der Belegungszeiten der Streckenabschnitte
- Notfallprotokolle
 - Räumen der Strecke (insbesondere Tunnel/Weichen/Kreuzungen) bei Ausfall eines Fahrleitungsabschnitts

- flexibler Einsatz des Fahrpersonals
 - durch einen Fahrzeugpark mit wenigen unterschiedlichen Baureihen und einheitlicher Bedienung ist das Fahrpersonal flexibler einsetzbar und die Ausbildung einfacher, da weniger Lizenzen für verschiedene Baureihen erworben werden müssen

2.2.3 Umweltorientierte Nutzungspotenziale

- Emissionen
 - Verringerung von Abgas-, Lärm- und Partikelemissionen
- Ästhetik
 - fahrleitungsfrei im Innenstadtbereich

2.2.4 Imageorientierte Nutzungspotenziale

- umsteigefreie Verbindungen
 - höhere Attraktivität des Schienenpersonenverkehrs
- umweltverträglichere Außenwirkung
 - umweltfreundliches Image durch Verminderung des Anteils bzw. Entfall der Dieseltraktion

2.2.5 Instandhaltungstechnische Nutzungspotenziale

- fahrzeug- und antriebstechnisch
 - Verringerung der Komponentenvielfalt durch Entfall der Verbrennungstechnologien und Vereinheitlichung der Antriebstopologien (modulare Standardtopologie für alle Fahrzeuge auf Plattformbasis)
- flottentechnisch
 - Flottenbereinigung durch Entfall von brennkraftbetriebenen Triebfahrzeugen
- vereinfachte Instandhaltung
 - Vereinfachung und Vereinheitlichung der Instandhaltung
 - größere Instandhaltungsintervalle
 - weniger Fahrzeugzuführungen in die Instandhaltungswerke
 - längere Instandhaltungsintervalle durch Verringerung der Betriebsstundenzahl auch des Dieselmotors, falls noch vorhanden

2.2.6 Wirtschaftliche Nutzungspotenziale

- höhere Einnahmen für EVUs/Aufgabenträger
 - durch höheren Modal Split und damit mehr Fahrgäste können die EVUs höhere Einnahmen erzielen → siehe verkehrliche und imageorientierte Nutzungspotenziale
- Reduzierung von Investitionskosten
 - geringe Investitionskosten durch Einsparung kostenintensiver Fahrleitungs- und Bahnstromanlagen
 - geringere Investitionen in elektrische Fahrzeuge mit längeren Lebenszyklen

- geringere Betriebskosten
 - geringere Instandhaltungskosten durch verminderte Nutzung bzw. Entfall der Dieselmotoren
 - geringere Energiekosten durch höhere Wirkungsgrade der elektrischen Antriebe und Nutzung der Rekuperation)

2.3 INFRASTRUKTURANFORDERUNGEN

Neben den fahrzeugseitigen Parametern müssen für den technischen und wirtschaftlichen Vergleich der in 2.2.1 vorgestellten Antriebskonzepte auch Effekte, welche sich aus der jeweils benötigten Infrastruktur ergeben, berücksichtigt werden. Die jeweils benötigten Anlagen und zu schaffenden betrieblichen Voraussetzungen werden im Folgenden kurz beschrieben.

Elektrotriebzug (ohne Speicher)

- Bahnstromanlagen (Erzeugung, Übertragung, Verteilung)
- 100% durchgehende Oberleitung
- Rückstromführung
- Erdung und Potenzialausgleich
- EMV-Maßnahmen

Dieseltriebzug (ohne Speicher)

- Dieseltankstellen (optional: AdBlue-Tankanlagen)
- Logistik zur Versorgung der Tankanlagen

OL-/ Batterie-Hybrid

- siehe Elektrotriebzug
- aber: Oberleitung nur abschnittsweise erforderlich

OL-/ Diesel-Hybrid

- benötigt die gleichen Infrastrukturanlagen wie der OL-/ Batteriehybrid und der konventionelle Dieseltriebzug

Diesel-/ Batterie-Hybrid

- siehe Dieseltriebzug
- Nachladeinfrastruktur für Betrieb, Abstellung und Depot → in der vorliegenden Untersuchung: Betrieb über Pantograf/ Oberleitung, Abstellung/ Depot: Kabeleinspeisung über Stecker + Netzanschluss

H2-/ Batterie-Hybrid

- Wasserstofftankstellen
- Logistik zur Versorgung der Tankanlagen

- Nachladeinfrastruktur für Betrieb, Abstellung und Depot
 - in der vorliegenden Untersuchung: Kabeleinspeisung über Stecker + Netzanschluss

2.4 ANFORDERUNGEN AN BETRIEBSFÜHRUNG UND IN- STANDHALTUNG

2.4.1 Betriebsführung

Sollen Fahrzeugflotten künftig um Fahrzeuge mit hybrider oder dualer Antriebsstruktur ergänzt oder komplett umgestellt werden, müssen – sofern die aktuelle Struktur der Wettbewerbsnetze im SPNV unverändert bleiben und aktuelle Fahrpläne nicht verändert werden sollen – folgende die Betriebsführung beeinflussende Sachverhalte bedacht werden:

- Umlaufgestaltung
 - Werden Fahrzeuge mit einer gegenüber bisherigen Dieselfahrzeugen geringeren Höchstgeschwindigkeit oder Beschleunigung eingesetzt, muss überprüft werden, ob der aktuelle Fahrplan eingehalten werden kann.
 - Beim Einsatz hybrider Antriebsstrukturen mit Batteriespeichern muss je Umlauf eine Nachladezeit von ca. 20 Minuten (abhängig von Batteriekapazität und Entladungstiefe) berücksichtigt werden
 - OL-/ Batterie-Hybrid: Aufladen beim Fahren oder im Stillstand unter Oberleitung → keine zusätzliche Ladezeit im Umlauf
 - Diesel-/ Batterie-Hybrid: → Aufladen über Pantograf (derzeit nur im Stand) oder über das Power Pack (ineffizient!) möglich
 - H2-/ Batterie-Hybrid → Aufladen nur im Stand oder über Brennstoffzelle (ineffizient!) möglich
- ggf. Schaffung von Abstellpositionen notwendig
 - einschließlich der in 2.3 beschriebenen konduktiven Nachlademöglichkeit

2.4.2 Instandhaltung

Aus der Beschaffung von Fahrzeugen mit hybrider Antriebsstruktur ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Instandhaltungswerkstätten:

- Die Lage der Instandhaltungsstützpunkte mit der erforderlichen Ausrüstung muss betrieblich sinnvoll in das Netz integriert werden.
- Vorhandene Depots müssen mit der für die Instandhaltung notwendigen spezifischen Ausrüstung nachgerüstet werden.
- Außerdem benötigen Depots die notwendige Nachlade- und Tankinfrastruktur für die Hybridfahrzeuge.
- Das Werkstattpersonal muss entsprechend qualifiziert werden.
- Bei Wasserstoff-Fahrzeugen muss die Werkstattinfrastruktur speziellen Anforderungen des Brand- und Explosionsschutzes genügen.

2.5 AUSWAHL GEEIGNETER ANTRIEBSKONZEPTE FÜR DEN BAYERISCHEN SPNV

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Antriebskonzepte für Triebzüge untersucht, die die folgenden Voraussetzungen erfüllen:

- Die Systeme müssen dem bahntechnischen Vorschriftenwerk in Deutschland genügen.
- Die Fahrzeuge müssen zum typischen betrieblichem Einsatzprofil des SPNV in Bayern passen.
- Die Fahrzeuge müssen bis zum Jahr 2020 am Markt verfügbar sein.
- Das Infrastrukturkonzept muss technisch umsetzbar sein.
- Die Systeme müssen dem typischen SPNV-Betreiberkonzept für Fahrzeuge und Infrastrukturanlagen genügen.

Zur Begrenzung des Untersuchungsaufwands wurde entschieden, für jedes Antriebskonzept je ein bis 2020 verfügbares Fahrzeug auszuwählen. Bei der Auswahl wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die Triebzüge sich bezüglich ihrer geometrischen Abmessungen und der Anzahl verfügbarer Sitzplätze ähnlich sind. Die Wahl fiel auf eine zweiteilige Grundeinheit. Sofern die ausgewählten Fahrzeugprodukte davon abweichen, wurden die spezifischen Parameter auf eine zweiteilige Einheit umgerechnet. In Tabelle 2-1 sind neben den ausgewählten Produkten deren betriebsrelevante Parameter und der aktuelle Entwicklungsstand dargestellt.

Tabelle 2-1 für die Untersuchung ausgewählte alternative Antriebskonzepte

Versorgungsart	Produkt	v_{\max}	Reichweite ohne Einspeisung	Entwicklungsstand
Elektrotriebzug	ET 442.0	160 km/h	0 km	Serienfahrzeug
Dieselttriebzug	VT 642	120 km/h	1.000 km	Serienfahrzeug
OL-/ Batterie-Hybrid	Bombardier Talent 3	160 km/h	60 – 80 km	Konzept
OL-/ Diesel-Hybrid	Alstom Polyvalent	160 km/h	1.000 km	Serienfahrzeug
Diesel-/ Batterie-Hybrid	Eco Train DM&Bat&Panto	120 km/h	800 – 1.000 km	Prototyp im Umbau
H2-/ Batterie-Hybrid	Alstom iLint	140 km/h	400 – 750 km	Prototyp in Erprobung

3 WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

3.1 METHODIK

Da die wirtschaftlichen Kenndaten aufgrund mangelnder Felderfahrungen mit alternativen Antrieben insbesondere zu den Antriebs- und Nachladesystemen mit Unsicherheiten behaftet sind, soll der Vergleich der in 2.5 vorgestellten Antriebskonzepte zunächst unter „klinischen“ Bedingungen erfolgen. Das dafür zu Grunde gelegte Betriebskonzept, die zugehörige Modellstrecke und weitere für den Vergleich benötigte Parameter werden in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Zur Bewertung der untersuchten Antriebskonzepte wird die Wirtschaftlichkeit im Lebenszyklus herangezogen. Die hierfür genutzte Kapitalwertmethode ist in Abschnitt 3.3 beschrieben.

Die zur Ermittlung der Fahrzeug- und Infrastrukturkostenanteile benötigten Einzelkosten werden in Abschnitt 3.4 ausführlich beschrieben bzw. nachvollziehbar hergeleitet.

Die sich für die untersuchten Fahrzeug- und Antriebskonzepte ergebenden Kapitalwerte werden in Abschnitt 3.5 berechnet. Hierfür werden auch unterschiedliche Elektrifizierungsszenarien zugrunde gelegt, um den Einfluss bestehender Infrastrukturen abzubilden.

Die Ergebnisse der Kapitalwertberechnungen werden im abschließenden Abschnitt 3.6 aus betriebswirtschaftlicher Sicht bewertet. Dabei werden jeweils für unterschiedliche betriebliche und infrastrukturelle Randbedingungen spezifische Rangfolgen der Antriebskonzepte gebildet, so dass eine Auswahl für definierte Strecken und Betriebsprogramme erfolgen kann.

3.2 DEFINITION DER BEWERTUNGSSZENARIEN

Wie oben erwähnt soll der Vergleich der Antriebskonzepte auf einer „klinischen Teststrecke“ durchgeführt werden.

Dafür müssen zunächst ein für den bayerischen SPNV typisches Betriebskonzept und eine entsprechende Modellstrecke definiert werden. Die notwendigen Festlegungen werden im Folgenden stichpunktartig beschrieben:

- Als Modellstrecke wurde die sowohl für den RE- als auch für den RB-Betrieb geeignete und schon häufig von der Professur Elektrische Bahnen untersuchte Strecke Dresden-Görlitz ausgewählt, da zu dieser umfangreiches Datenmaterial vorliegt.
 - Streckenlänge ca. 100 km
 - Mittleres Geschwindigkeitsniveau für RB- 60 km/h und für RE-Fahrzeuge 80 km/h
- Nach Gleichung (1) ergibt dies eine Umlaufdauer von 4 h und die Einsatzdauer pro Tag wird auf 10 h festgesetzt.

- Die Größe des benötigten Fuhrparks ergibt sich für die drei folgenden Fahrplankt-Szenarien unter Verwendung von Gleichung (2):
 - 2-h-Takt: Fahrzeugbedarf 2 für den Betrieb + 17% Reservefahrzeuge
 - 1-h-Takt: Fahrzeugbedarf 4 für den Betrieb + 17% Reservefahrzeuge
 - 30-Min-Takt: Fahrzeugbedarf 8 für den Betrieb + 17% Reservefahrzeuge
- Die Fahrleistung je Fahrzeug und Jahr ergibt nach Gleichung (3) ca. 156.000 km
- Für einen sinnvollen Vergleich wurde für alle Antriebskonzepte der Einsatz zweiteiliger Triebzüge als Grundeinheit angenommen. Bei Triebzügen, die nicht als Zweiteiler verfügbar sind, bspw. der Alstom Coradia Polyvalent, wird die Gefäßgröße und die Fahrzeugmasse geeignet umgerechnet.
- Zudem werden in Abschnitt 3.5 verschiedene Szenarien bezüglich des bereits vorhandenen Streckenelektrifizierungsgrads untersucht: 0%, 20%, 50% und 80%.
- Zudem wird angenommen, dass Dieseltriebzüge und H2-/ Batterie-Hybridtriebzüge zusätzlich zur Fahrleistung 3% und mit den Batterie-/ Diesel-Hybridtriebzügen zusätzliche 2% Tankfahrten zu erbringen sind.

Bestimmungsgleichung für die Umlaufdauer t_{uml} :

$$t_{uml} = \left(\frac{l_{str}}{v} + \frac{1}{3} h \right) \cdot 2 \quad (1)$$

Bestimmungsgleichung für die Anzahl benötigter Fahrzeuge:

$$n_{Betr} = \frac{t_{uml}}{t_{takt}} \quad (2)$$

Bestimmung der resultierenden Fahrleistung je Fahrzeug und Jahr:

$$L = \frac{t_{Ein}/t_{uml} \cdot 2 \cdot l_{str} \cdot 365 \cdot n_{Betr}}{n_{Betr} + n_{Betr} \cdot (17/100)} \quad (3)$$

3.3 LCC-BERECHNUNGSTOOL

3.3.1 Zielsetzung der LCC-Analyse

Die Investitionsrechnung dient generell der Vorbereitung von Investitionsentscheidungen, nimmt jedoch selbst keine quantifizierbare Entscheidung vorweg. Die nachstehende Untersuchung soll der Beantwortung folgender Frage dienen: Welches der sich gegenseitig ausschließenden Investitionsvorhaben ist unter bestimmten Voraussetzungen das relativ vorteilhafteste? Die relative Vorteilhaftigkeit setzt dabei die absolute Vorteilhaftigkeit jedes betrachteten Investitionsprojektes voraus, um dessen Realisierung zu rechtfertigen. [6]

Die Lebenszykluskostenanalyse (LCC) beruht in der nachstehenden Untersuchung auf dem Modell der dynamischen Investitionsrechnung. Durch die Berücksichtigung des Zinseszins beim zeitlich unterschiedlichen Anfall von Zahlungen in einer langen Betrachtungsdauer können aussagefähige Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit einer Investition ermittelt werden. Die

Kapitalwertmethode stellt entsprechend empirischer Studien ein hierbei häufig verwendetes Berechnungsverfahren innerhalb der Investitionsrechnung dar [6], [7]

Die Verwendung statischer Verfahren der einzelwirtschaftlichen, finanziellen Investitionsrechnung gäbe dabei ausschließlich eine Näherung für die Ergebnisse einer dynamischen Berechnung wieder und wird daher nachfolgend nicht betrachtet. [6]

3.3.2 Normen- und Vorschriftenlage

Derzeit gibt es unterschiedliche Normen und Vorschriften zur Anwendung einer Lebenszykluskostenanalyse. Jedoch gibt es nach [8] keinen standardisierten Ablauf, welcher normativ einheitlich gültig ist. Für die durchzuführende Untersuchung wurden daher in Abschnitt 3.2 Rahmenbedingungen definiert, die für die Lebenszykluskostenanalyse unterschiedlicher Antriebssysteme unter Berücksichtigung der zugehörigen Infrastruktur benötigt werden. Die einzelnen Arbeitsschritte orientieren sich an den nachfolgend aufgeführten Normen [8]:

- DIN EN 60300-3-3:2004 Zuverlässigkeitsmanagement Teil 3-3: Anwendungsleitfaden-Lebenszykluskosten
- VDI Richtlinie 6025:2012 Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen
- VDMA Einheitsblatt 34160:2006-06 Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen (inkl. VDMA 34160 Berichtigung 1:2007-03)
- VDI Richtlinie 2884:2005-12 Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von LCC Life-Cycle-Costing
- VDI Richtlinie 2693:1996 Blatt 1 Investitionsrechnung bei Materialflussplanungen mit Hilfe statischer und dynamischer Rechenverfahren

In allen Normen werden die auftretenden Gesamtkosten in unterschiedliche Phasen unterteilt, die sich vereinfacht in Beschaffungskosten, Betriebs- und Instandhaltungskosten und Entsorgungskosten zusammenfassen lassen. Neben der Möglichkeit zur Identifikation von Kostentreibern mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wird übereinstimmend die finanzmathematische Berechnung nach dem dynamischen Investitionsberechnungsverfahren genannt. Die Kapitalwertmethode wird als Grundprinzip für alle Methoden der Investitionsbeurteilung vorgestellt und besitzt gemäß [6], [7], [9] u.a. folgende Charakteristika:

- Bezug der Zahlungen auf den Beginn (Jahr 0) des Betrachtungszeitraumes (Barwert bzw. Gegenwartswert)
 - durch Abzinsung (Diskontierung), wenn die Zahlung zeitlich nach dem Beginn des Betrachtungszeitraumes erfolgt,
 - durch Aufzinsung, wenn die Zahlung zeitlich vor dem Beginn des Betrachtungszeitraumes erfolgt.
- Anfall der laufenden Ein- und Auszahlungen zum Ende der jeweiligen Periode
- Anfall der Anschaffungsauszahlung zu Beginn der ersten Periode (Jahr 0)
- Einheitlicher Kalkulationszinssatz i
- Existenz des sogenannten vollkommenen Kapitalmarktes

- „die für Investitionszwecke zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel sind nicht beschränkt – zum (einheitlichen und vom einzelnen Investor nicht beeinflussbaren) Kapitalmarktzinssatz können jederzeit Mittel aufgenommen werden, und – es können unbeschränkt Finanzinvestitionen zum [...] Kapitalmarktzinssatz getätigt werden“ [6]
- Berücksichtigung der Differenzinvestition, wenn beide sich ausschließenden Investitionsalternativen unterschiedliche Anschaffungsausgaben sowie Lebensdauern aufweisen
 - Kriterium des relativen wirtschaftlichen Vorteils,
 - Voraussetzung ist, dass die unterschiedlichen Investitionsalternativen einen absoluten wirtschaftlichen Vorteil nach Ende der Lebenszyklusdauer aufweisen,
 - Einheitlicher Betrachtungszeitraum,
 - Berücksichtigung von Nachfolgeinvestitionen bei unterschiedlicher Lebensdauer,
 - Berücksichtigung von Liquidationserlösen (Restwert) der noch funktionsfähigen Anlagen.

3.3.3 Lebenszyklusphasen und Berechnungsmethode

Um die Übersichtlichkeit des Kapitalwertverlaufs, trotz der großen Komplexität der untersuchten Antriebskonzepte zu wahren, wird auf die Erstellung eines aufwändig gegliederten Kostenstrukturplanes [10] in dem die zu betrachtenden Kostenpositionen nach dem zeitlichen Auftritt in einzelne Lebenszyklusphasen zu unterteilen sind, verzichtet. Stattdessen werden die

- Traktionskosten,
- Fahrzeuginstandhaltungskosten,
- Austauschkosten für das Power Pack, die Brennstoffzelle und die Batterie,
- Betriebskosten der Infrastrukturanlagen.

in jährlich aufzubringende Kosten umgerechnet. Einnahmen resultierend aus dem Betrieb des Verkehrssystems werden nicht betrachtet, da angenommen wird, dass jene für alle Investitionsmaßnahmen gleich groß sind (vgl. Prinzip gleicher Einnahmereihen [6] , S.64f.).

Ausschließlich die Fahrzeug-Erstbeschaffungs- und Wiederbeschaffungskosten und die Beschaffungskosten für zusätzlich benötigte Infrastruktur werden entsprechend ihres zeitlichen Auftritts berücksichtigt.

Es wird angenommen, dass in den Beschaffungskosten bereits die schwierig zu erfassenden Teilkosten für

- Forschung und Entwicklung bzw. Design,
- Rohstoffgewinnung,
- Produktion,
- Distribution und Transport und
- Konstruktion (Berücksichtigung der Betriebserschwernisse).

enthalten sind. Da es nicht möglich ist, plausibel vorherzusagen, welche Kosten bei neuartigen (bisher teils nur als Konzept existierenden) Antriebskonzepten für

- Rückbau,
- Entsorgung/ Verwertung,
- Restwert der Fahrzeuge vor dem Ablauf der Lebensdauer.

anfallen würden, werden diese Kostenanteile in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

Ebenso werden folgende Zahlungen und Faktoren

- Versicherungszahlungen
- Steuerzahlungen und Steuersätze

in der LCC-Analyse nicht berücksichtigt, da von der Annahme ausgegangen wird, dass jene für beide Investitionsalternativen gleich sind bzw. „keine einfach anwendbaren Prüfkriterien zur eindeutigen Feststellung der Notwendigkeit [...] zur Verfügung stehen“ [6], S. 103:

Es wird ferner angenommen, dass für die Anschaffungsauszahlung kein Fremdkapital aufgenommen wird und dementsprechend keine Tilgungszahlungen (Annuitäten) und Zinsaufwände erforderlich sind.

In Absprache mit dem Auftraggeber wird als Betrachtungszeitraum für die Lebenszyklusdauer die mittlere Lebensdauer der Maste und Fundamente mit 76 Jahren gewählt [11] und die Lebensdauer für die unterschiedlichen Antriebskonzepte wie folgt festgelegt:

- Dieseltriebzüge – 25 Jahre
- Elektro- und Hybridfahrzeuge – 35 Jahre.

Die Summe der abgezinsten Zahlungen über den Betrachtungszeitraum (Barwert der Rückflüsse) zuzüglich des Barwertes des Liquidationserlöses wird um die Anschaffungsauszahlung vermindert, wodurch sich der Kapitalwert einer Investition für eine Lebenszyklusdauer ergibt (vgl. Gleichung (4) und (5)). Er wird als Geldvermögenszuwachs interpretiert, „den das Investitionsobjekt zu Beginn des Planungszeitraumes unter Berücksichtigung von Zinsen erbringt“ [9].

$$KW = -AZ_0 + BW_{RF} + BW_{RW} \quad (4)$$

$$KW = -AZ_0 + \sum_{t=1}^{LD} \left(\frac{EZ_t - AZ_t}{(1 + i/100)^t} \right) + \frac{RW_{LD}}{(1 + i/100)^{LD}} \quad (5)$$

$$i = \frac{100 \cdot (i_n - r)}{r + 100} \quad (6)$$

Tabelle 3-1 Parameter für die Kapitalwertberechnung

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
KW	Kapitalwert	€
AZ_0	Anschaffungsauszahlung zum Zeitpunkt $t = 0$ Jahre	€
EZ_t	Einzahlung zum Zeitpunkt t	€
AZ_t	Auszahlung/ Kosten zum Zeitpunkt t	€

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
i	Kalkulationszinssatz	%
t	Zeitpunkt	a
RW_{LD}	Restwert am Betrachtungsdauerende	€
LD	Betrachtungsdauerende	a
BW_{RF}	Barwert der Rückflüsse	€
BW_{RW}	Barwert des Restwerts	€

Das Vorteilhaftigkeitskriterium der LCC-Analyse nach der Kapitalwertmethode lautet:

Eine Investition ist absolut wirtschaftlich vorteilhaft, wenn der Kapitalwert größer als Null ist, demnach einen positiven Wert annimmt. Im Falle einer Differenzinvestition ist diejenige Investitionsalternative mit dem höheren Kapitalwert vorteilhafter gegenüber der anderen Investitionsalternative (*relative Vorteilhaftigkeit*).

Demnach setzt sich der Kapitalwert hauptsächlich aus den Auszahlungen über die Lebenszyklusdauer zusammen. Der Kapitalwert der jeweiligen Investitionsalternative nimmt demnach einen negativen Wert an. Infolge der Differenzinvestitionsrechnung kann ausschließlich die relative Vorteilhaftigkeit eines Produktes gegenüber dem zu vergleichenden Produkt ermittelt werden. Die absolute Vorteilhaftigkeit der einzelnen zu vergleichenden Investitionsmaßnahmen wird nachfolgend aufgrund der reinen Kostenbetrachtung als zweifellos angenommen (vgl. [6], S.64f.).

Der reale Kalkulationszinssatz setzt sich aus dem Nominalzinssatz und der Preissteigerungsrate zusammen. Der Nominalzinssatz berücksichtigt den Zinssatz, bei dem eine geforderte Mindestverzinsung pro Jahr erwirtschaftet wird (meist zwischen 5% und 12%). Es ist hierbei sinnvoll, die Kenngröße des Leitzinses der Europäischen Zentralbank (EZB) zu nutzen. Dieser beeinflusst im Wesentlichen die allgemeine Zinsentwicklung. Als Leitzinsen im Eurosystem gelten die Zinssätze für das Hauptrefinanzierungsgeschäft, für die Einlagefazilität und für die Spitzenrefinanzierungsfazilität. Diese sind Zinssätze kurzfristiger Interbankenkredite. Sie haben ebenso einen Einfluss auf die längerfristigen Zinssätze, die sogenannten Kapitalmarktzinsen. Aufgrund der Vielzahl der zu unterscheidenden langfristigen Zinssätze wird häufig die Rendite der umlaufenden festverzinslichen Wertpapiere als Kapitalmarktzinssatz verwendet [12].

Das streng korrelierende Regulierungsausmaß der durch die Zentralbank festgelegten Leitzinsen auf die kurzfristigen Zinsen, kann nicht im gleichen Maße auf die Gestaltung der langfristigen Zinssätze übertragen werden. Weitere Einflüsse sind zum einen die Entwicklung der Weltwirtschaft oder die Intensität des Wettbewerbs. [13]

Im arithmetischen Mittel (01/1999 bis 08/2017) betrug der Zinssatz der EZB für Hauptrefinanzierungsgeschäfte 2,22 Prozent. Im arithmetischen Mittel der letzten 10 Jahre betrug der Zinssatz der EZB für Hauptrefinanzierungsgeschäfte 1,71 Prozent. Der aktuelle Zinssatz liegt in 08/2017 bei 0,05 Prozent. [13]

Der Kapitalmarktzinssatz in Deutschland betrug im Mittel der letzten 10 Jahre 2,9 Prozent. Der aktuelle Zinssatz liegt bei 1,16 Prozent. [12]

Der Nominalzinssatz für die LCC-Analyse wird mit 2,0 Prozent angenommen und lehnt sich somit an die berechneten arithmetischen Mittelwerte für kurzfristige und langfristige Zinsen an.

Da der Betrachtungszeitraum in der vorliegenden LCC-Analyse sehr groß ist, ist es wichtig Preisänderungen für wiederkehrende Zahlungen zu berücksichtigen. Dies lässt sich in Form einer Preisänderungsrate (Preisänderungssatz/ Teuerungsrate/ Zahlungsänderungssatz/ Inflationsrate) berücksichtigen. Jene gibt an, um wieviel Prozent die Zahlung der Folgeperiode höher oder niedriger ist, als die Zahlung in der Periode zuvor. Die Schätzung der Preisänderungsrate ist insbesondere bei langen Betrachtungszeiträumen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse mit Unsicherheiten behaftet. Aufgrund des exponentiellen Verlaufs der Zahlungen, sollte diese nicht zu hoch angesetzt werden, um unrealistisch hohe Beträge am Ende des Betrachtungszeitraums zu vermeiden. Es ist zudem zu erwarten, dass die Preisentwicklung in der Vergangenheit keine direkte Übertragung auf die zukünftige Preisentwicklung zulässt.

Es ist für die vorliegende Studie zweckmäßig, die Inflationsrate zu Grunde zu legen. Die Änderung des Verbraucherpreisindex dient insbesondere der Messung der gesamtwirtschaftlichen Preisstabilität. Eine Differenzierung der Preisänderungsraten der einzelnen Kostenpositionen wird der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsrechnung aufgrund der hohen Unsicherheit der Prognose nicht als Basis gewählt.

In der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsanalyse wird eine Preissteigerungsrate von 1,5 Prozent gewählt. Jene liegt damit über der derzeitigen Inflationsrate (08/2017) und geringfügig unterhalb der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen durchschnittlichen Inflationsrate der letzten 10 Jahre.

Entsprechend der obigen Ausführung ergeben sich nachfolgende Parameter für die Bildung des Kalkulationszinssatzes gemäß Gleichung (4.1) der Kapitalwertmethode.

Tabelle 3-2 Parameter für die Bildung des Kalkulationszinssatzes

Parameter	Nominalzins	Preissteigerungsrate	Kalkulationszinssatz
Zinssatz in %	2,00	1,50	0,49

3.4 ERMITTLUNG ALLER EINZELKOSTEN

Im aktuellen Kapitel wird beschrieben, wie die für die im Abschnitt 3.3 beschriebene vereinfachte LCC-Berechnung benötigten Einzelkosten ermittelt wurden.

Das LCC-Berechnungstool der Professur Elektrische Bahnen musste für die Untersuchung geeignet angepasst werden. Dafür werden folgende Kostenanteile im Lebenszyklus berücksichtigt:

- Beschaffungskosten der Fahrzeuge, inklusive der Antriebs- und Speichertechnik [□]

- Beschaffungskosten für die je Antriebskonzept benötigte Infrastruktur [€]
- Re-Investitionskosten für Fahrzeug-, Speicher- und Antriebskomponenten [€]
- Betriebskosten für die Fahrzeuge als spezifische Kosten
 - Traktionsenergie [€/km]
 - Laufende Instandhaltungskosten [€/km]
 - Kosten für zyklische Revisionen [€/a]
- Betriebskosten für die Infrastruktur als spezifische Kosten
 - Instandhaltungskosten für Oberleitungs- und Bahnstromanlagen [€/a]
 - Instandhaltungskosten für Tank- und Nachladeeinrichtungen [€/a]

Dagegen werden außer für Tankfahrten die folgenden in allen Vergleichsszenarien identisch anzunehmenden Kosten nicht berücksichtigt:

- Trassenpreise
- Personalkosten

3.4.1 Vorgabewerte für das Berechnungstool

In Kapitel 3.2 wurden bereits die Randbedingungen bezüglich des Streckenaufbaus und des angenommenen Betriebsprogramms vorgestellt. Diese Parameter werden dem LCC-Berechnungsprogramm als „feste“ Vorgabewerte übergeben. Zusammengefasst sind dies die folgenden Parameter:

- Gesamtstreckenlänge,
- Umlaufdauer,
- Einsatzdauer der Fahrzeuge pro Tag,
- sich ergebende Fuhrparkgröße für den Betrieb, einschließlich der benötigten Reserve,
- Resultierende Fahrleistung pro Jahr.

Zusätzlich können verschiedene Szenarien untersucht werden, indem dem Programm folgende als „flexibel“ betrachtete Parameter übergeben werden:

- der vorhandene Streckenelektrifizierungsgrad,
- der Streckenanteil, der elektrifiziert werden muss, damit OL-/ Batterie-Hybrid Triebzüge sicher betrieben werden können,
- der Streckenanteil welcher mit dem hinterlegten Elektrifizierungskostensatz elektrifiziert werden kann,
- für den verbleibenden, infolge querender Ingenieurbauwerke, Tunnel, etc. schwierig zu elektrifizierender Streckenanteile kann ein Erschwernisfaktor vorgegeben werden.

Durch offen gestaltete Schnittstellen ist es möglich in die Toolbox zukünftig, bereits an der Professur vorhandene Fahrplan- und Energiebedarfs-Simulationsprogramme zu integrieren. Da rechenintensive Simulationen nicht Bestandteil der Untersuchung sein sollten, wurde in der vorliegenden Arbeit auf diese Zusatzoption verzichtet.

3.4.2 Fahrzeugkosten

Zur Bestimmung des Fahrzeugkostenanteils am sich ergebenden Kapitalwert zum Betrachtungsdauerende werden die in Tabelle 3-3 dargestellten, empirisch bestimmte oder an der Professur vorliegende Kostenwerte verwendet.

Tabelle 3-3 Kostensätze zur Berechnung der Fahrzeugkostenanteile für verschiedene Antriebskonzepte

Versorgungsart	Fahrzeugbeschaffung [€]	Traktionsenergie [€/km]	Tankfahrten [€/km]	Nachladen der Batterie [€/km]	Instandhaltung je Fahrzeugteil [€/km]	Fahrzeugrevision bei HU [€/8a]	Austausch des PowerPacks [€/km]	Austausch der Batterie [€/km]	Austausch der Brennstoffzelle [€/km]
Dieseltriebzug	4.300.000	1,146	0,377	-	0,340	260.000	0,346	-	-
Elektrotriebzug	3.200.000	0,3024	-	-	0,23	230.000	-	-	-
OL-/Batterie-Hybrid	4.300.000	0,3384	-	0	0,23	230.000	-	0,1072 ... 0,3574	-
OL-/ Diesel-Hybrid	4.700.000	0,378 / 1,504	0,2513	-	0,285	245.000	0 ... 0,346	-	-
Diesel-/ Batterie Hybrid	4.450.000	0,396 / 0,9920	0,2513	0 ... 0,1980	0,285	245.000	0,2075	0,1072 ... 0,3574	-
H2-/ Batterie-Hybrid	5.300.000	1,365	0,4524	0,0282	0,2992	245.000	-	0,1604	0,6259

Traktionsenergiekosten

Ausgangspunkt für die Berechnung der spezifischen Traktionsenergiekosten ist der durchschnittliche Energiebedarf eines zweiteiligen **ET 442.0**. Dieser verbraucht, bei einer Dienstmasse von 84 t, ca. 30 Wh/tkm. Die benötigte Energie wird direkt aus der Oberleitung zu einem Preis von 0,12 €/kWh bezogen. Zusammengefasst ergeben sich somit spezifische Traktionsenergiekosten von 0,3024 €/km. Wie alle modernen Elektrotriebzüge kann der ET 442.0 die Bremsenergie rekuperieren. Deshalb unterscheiden sich die Kosten für die beiden im Nahverkehr anzutreffenden Betriebskonzepte RE- und RB-Betrieb nur unwesentlich und können näherungsweise als identisch angenommen werden.

Unter Verwendung des Energieinhalts eines Liter Dieselkraftstoffs, welcher näherungsweise für 1,20 €/l bezogen wird, lassen sich die Energiekosten für Diesel zu 0,1237 €/kWh bestimmen. Aus dem Wirkungsgradverhältnis der kompletten Antriebskonfigurationen von Elektrotriebzügen gegenüber Dieseltriebzügen

$$\frac{\eta_{ET}}{\eta_{VT}} = \frac{0,8}{0,3} = 2,7 \quad (7)$$

können die spezifischen Traktionsenergiekosten für einen Dieseltriebzug bestimmt werden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass der **VT 642** nur 80 t wiegt und der Energieverbrauch durch nicht mögliches Rekuperieren 30% schlechter dem des Elektrotriebzuges ist. Die spezifischen Energiekosten für ein RE-Fahrzeug und für ein RB-Fahrzeug 1,23 €/km ergeben sich zu 1,15 €/km bzw. 1,23 €/km.

Die ermittelten Werte decken sich mit den Angaben verschiedener Fahrzeugbetreiber. Der Ansatz eignet sich demnach auch für die Ermittlung der spezifischen Traktionsenergiekosten der zu untersuchenden Hybridkonzepte und gleichzeitig stellt gleichzeitig sicher, dass die Triebzüge sich bezüglich ihrer geometrischen Abmessungen und der Anzahl verfügbarer Sitzplätze ähnlich sind.

Beim ausgewählten **OL-/ Batterie-Hybrid**, dem **Talent 3**, wird der beschriebene Ansatz verwendet und dabei das Mehrgewicht in Folge des zusätzlich mitgeführten Energiespeichers und dessen Wirkungsgrads beim Laden/Entladen berücksichtigt. Die Kosten für zusätzliches Nachladen der Batterie wurden vernachlässigt, da angenommen wird, dass das Fahrzeug im Betrieb unter Fahrdracht die Batterie nachlädt. Somit ergeben sich gegenüber dem klassischen Elektrotriebzug (siehe Tabelle 3-3) minimale Mehrkosten.

Auch beim **OL-/ Diesel-Hybrid**, dem **Alstom Polyvalent** wird das Gewicht für die zusätzlich benötigte Antriebstechnologie beachtet, so dass nur zwischen den Kosten für den Betrieb unter Oberleitung und auf nichtelektrifizierter Strecke unterschieden werden muss (siehe Tabelle 3-3).

Auf gleiche Art werden die Traktionsenergiekosten des **Diesel-/ Batterie-Hybrid**, dem **EcoTrain**, ermittelt. Neben den gegenüber dem VT 642 mitgeführten Zusatzmassen für die erweiterte Traktionsausrüstung mussten die Kosten für den Bezug der Traktionsenergie sinnvoll angepasst werden. Muss die Nachladeinfrastruktur an bisher nicht elektrifizierten Haltepunkten installiert werden muss bei der Berechnung der spezifischen Traktionsenergiekosten bedacht werden, dass nicht immer die Möglichkeit besteht die Energie aus dem Bahnstromnetz, zu Kosten von 0,12 €/kWh, zu beschaffen. Für die Energiebeschaffung aus dem öffentlichen Netz werden Kosten von 0,20 €/kWh angenommen. Es wird ein Split des Bezuges zu 2/3 aus dem Bahnstromnetz und zu 1/3 aus dem öffentlichen Netz unterstellt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3-3 festgehaltenen Kostensätze.

Abschließend werden die Traktionsenergiekosten für die **H2-/ Batterie-Hybrid** Triebzüge, stellvertretend für den **iLint** von Alstom, bestimmt. Entsprechend der NOW-Studie [14] ergibt sich für die Wasserstoffgewinnung mittels Dampfreformer und Transport mit einem LH₂-LKW ein Preis von: 6,5 €/kg. Langfristig geht man bei Alstom davon aus, dass sich der Preis bei entsprechend großen Abnahmemengen zu 5,0 €/kg einstellen wird [Experten-gespräch Prof Stephan]. Aufgrund des langen Betrachtungszeitraums (76 Jahre) bei der Berechnung der Kosten über dem Lebenszyklus, werden die Traktionsenergiekosten mit letztgenanntem Kostensatz bestimmt.

Nachlade- und Austauschkosten der Batterie

Für die Batteriehybridkonzepte OL-/ Batterie-Hybrid, Diesel-/ Batterie-Hybrid und H2-/ Batterie-Hybrid fallen (erhebliche) Mehrkosten für den notwendigen Austausch des mitgeführten Energiespeichers, einschließlich dessen Zusatzeinrichtungen an. Wird dieser Speicher nur innerhalb des optimalen Nutzungsbereichs betrieben, muss er alle acht Jahre zur Revision ausgetauscht werden. In der vorliegenden Arbeit wurde vereinfachend unterstellt, dass die Lebensdauer des Energiespeichers genau dann acht Jahre beträgt wenn er ausschließlich zum Rekuprieren der Bremsenergie und anschließender Nutzung dieser benutzt wird. Sieht dagegen das Energiespeichermanagement eine verstärkte Nutzung des Speichers als Primärenergiequelle vor, so verkürzt sich die Lebensdauer.

Für H2-/ Batterie-Hybrid-Triebzüge wird unterstellt, dass die Batterie kontinuierlichen Lade- und Entladeprozessen unterliegt, da die Brennstoffzelle im Betrieb kontinuierliche Leistung, unabhängig vom Energiebedarf des Fahrzeugs, liefert. Der mitgeführte Energiespeicher dient demnach als Puffer und es kann vereinfachend angenommen werden, dass die Alterung der Batterie mit einer konstanten Funktion abbildbar ist. Unter Annahme der maximalen Lebensdauer von 8 Jahren und von Reinvestitionskosten für Energiespeicher von 1.000 €/kWh bei einer installierten Kapazität von 200 kWh [12] ergeben sich die spezifischen Kosten von 0,1604 €/km für den Austausch des Energiespeichers eines Brennstoffzellenfahrzeugs.

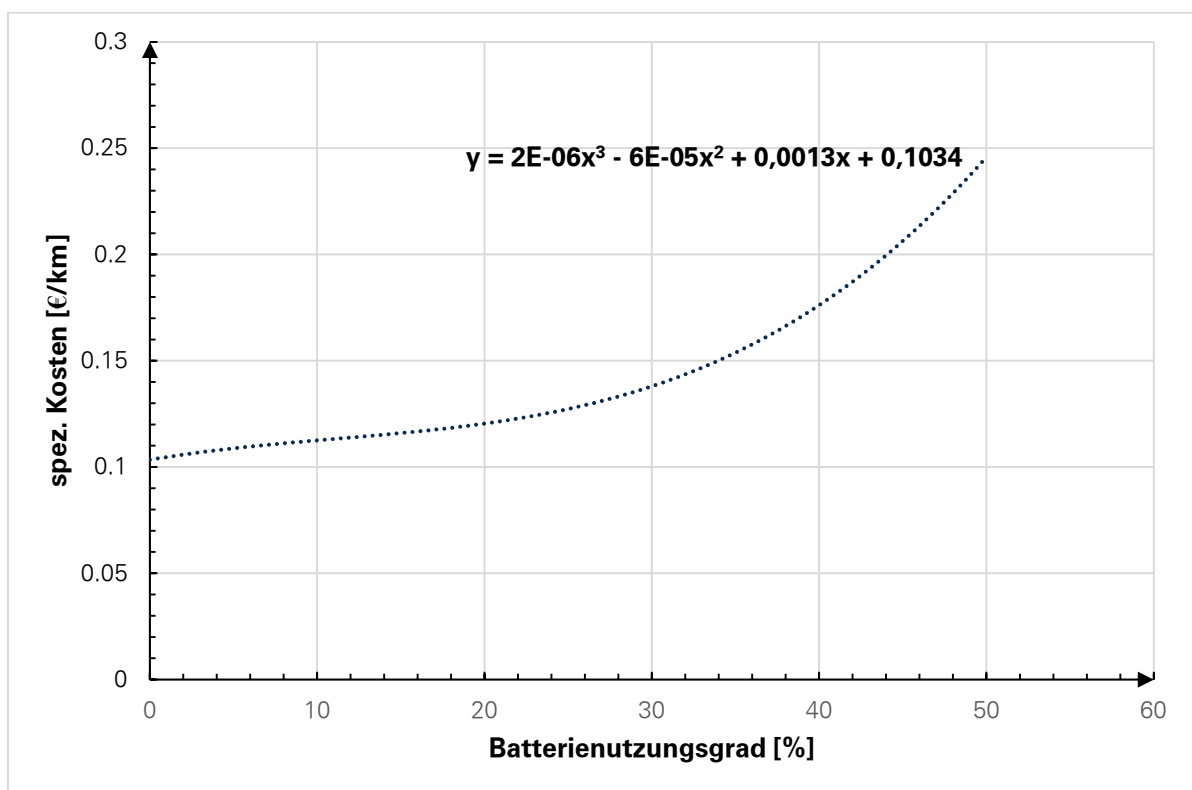


Abb. 3-1 Batteriealterung in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad als Primärenergiequelle

In die Ermittlung der Kosten für den Austausch der Energiespeicher von OL-/ Batterie-Hybrid- und Diesel-/ Batterie-Hybrid-Triebzüge fließen weitere Überlegungen ein. Da der Gesamtenergiebedarf eines RB Fahrzeuges auf der „klinischen Strecke“ mit $E_{bed,RE} = 30 \text{ Wh}/84t * 100km = 357 \text{ kWh}$ die max. verfügbare Energie der Batterien von 150 kWh [9]

deutlich übersteigt, wird angenommen, dass das Fahrzeug maximal 50% (zusätzlich zur genutzten Rekuperationsenergie) der benötigten Antriebsenergie aus dem E-Speicher nutzen. Aktuelle Studien der Professur Elektrische Bahnen belegen, dass sich die Lebensdauern bei Ausnutzung der maximalen Entladungstiefe signifikant, auf näherungsweise 3 Jahre verkürzen. In zahlreichen Simulationen hat die Professur empirische Verläufe der Batteriealterung in Abhängigkeit von deren Entladungstiefe ermittelt und die Ergebnisse mit Hilfe sogenannter Paretofronten dargestellt. Um den Aufwand für die vorliegende Arbeit auf ein sinnvolles Maß zu begrenzen, werden die Funktionsverläufe ausgewertet und daraus ein Batteriealterungsfaktor hergeleitet. Dieser kann zwischen den oben beschriebenen Randbedingungen (minimale und maximale Lebensdauer) als Polynomfunktion, wie in Abbildung 3-2 zu sehen, dargestellt werden und es ergeben sich mit oben genanntem Kostensatz für die Reinvestitionskosten, spezifische Kosten zwischen $0,1072 \text{ €/km}$ und $0,3574 \text{ €/km}$.

Auch durch das Nachladen entstehen spezifische Kosten, die in den Auswertungen in Abschnitt 3.5 und Kapitel 4 zu den Traktionsenergiekosten hinzuaddiert wurden. Bei den OL-/ Batterie-Hybridfahrzeugen werden diese Kosten, wie bereits erwähnt, vernachlässigt, da angenommen wird, dass das Fahrzeug während der Fahrt unter Fahrdrat die Batterie nachlädt.

Beim Diesel-/ Batterie-Hybrid können diese Kosten nicht vernachlässigt werden, da die Energiespeicher in Abhängigkeit von der zugelassenen Entladetiefe an den entsprechenden Stationen wieder nachgeladen werden müssen. In Abbildung 3-2 ist der Verlauf der spezifischen Kosten in Abhängigkeit des Nutzungsgrades der Batterie als Primärenergiequelle für die 100 km lange „klinische Teststrecke“ dargestellt. Es wird wiederum von dem bei der Beschreibung der Traktionsenergiekosten des EcoTrain hergeleiteten Kostensatz für die Beschaffung der Energie zu einem Teil aus dem Bahnstromnetz und zum Teil aus dem Landesnetz von $0,1467 \text{ €/kWh}$ ausgegangen.

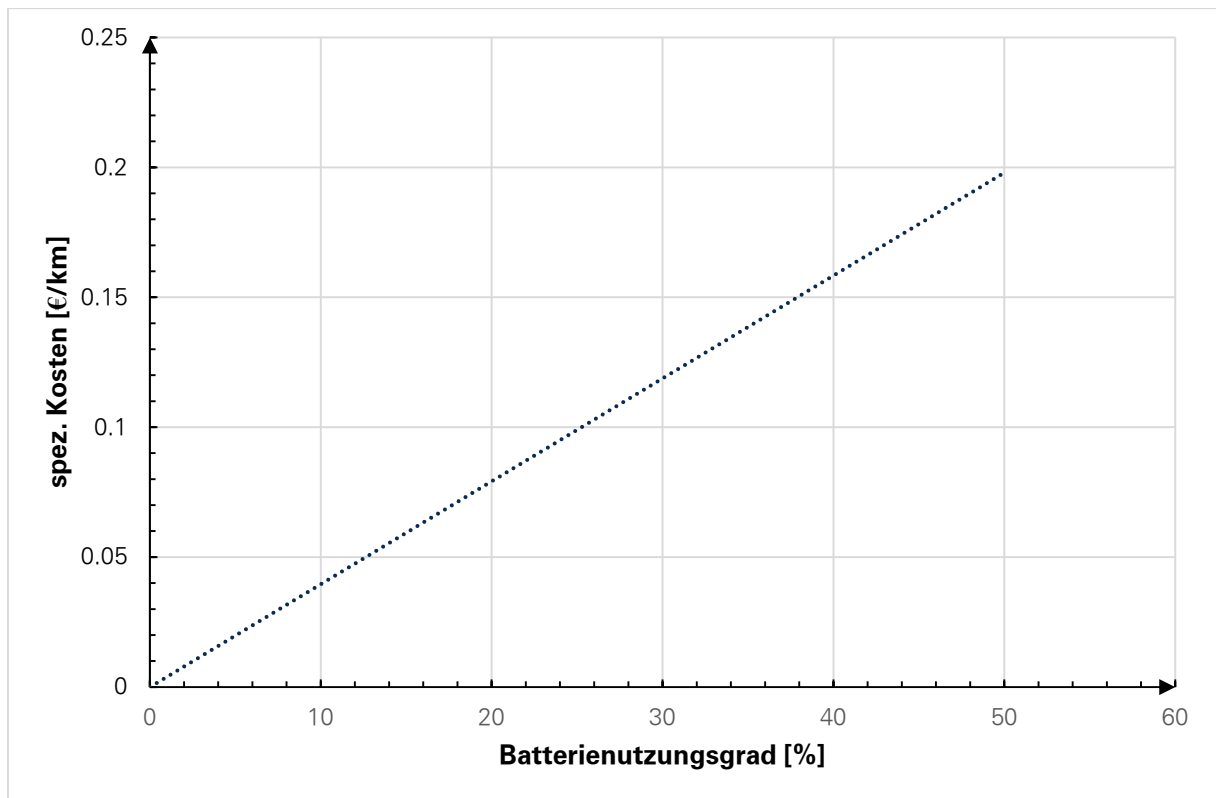


Abb. 3-2 spezifische Kosten für das Nachladen der Batterie für Diesel-/ Batterie-Hybridantriebe

Für das Nachladen des Brennstoffzellenfahrzeugs wird angenommen, dass die komplette Energie aus dem Landesnetz zu Kosten von $0,20 \text{ €/kWh}$ bezogen werden muss und dass auf 100 km ungefähr 14.12 kWh Energie nachgeladen werden müssen.

Kosten für Tankfahrten

Für Diesel- und Brennstoffzellenfahrzeuge wird angenommen, dass sie zusätzlich zu den Betriebskilometern 3% Mehraufwand für das Tanken benötigen.

Aus an der Professur Elektrische Bahnen verfügbaren Angaben verschiedener EVU's geht hervor, dass bei Dieselfahrzeugen zusätzlich zu den Betriebskilometern ein Mehraufwand von ca. 3% infolge von Tankfahrten zu berücksichtigen ist. Auch für diese zusätzlich zu erbringende Fahrleistung müssen Trassengebühren entrichtet und die Triebfahrzeugführer bezahlt werden. Außerdem fallen noch durch das Fahrzeug selbst verursachte Zusatzkosten an. Tabelle 3-4 zeigt die recherchierten Kostensätze.

Tabelle 3-4 Kostenanteile für Tankfahrten von Dieseltreibfahrzeugen

	Spez. Kosten [€/km]
Trassengebühr	0,153
Tf-Kosten	0,042
Fahrzeugkosten	0,182
Summe	0,377

Für H2-/ Batterie-Hybridfahrzeuge ergibt sich aufgrund der verkürzten Reichweite näherungsweise ein Mehraufwand von 20% gegenüber dem Betrieb von Dieseltriebzügen.

Für Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge wird lediglich ein Mehraufwand von 2% angenommen, da sich der Verbrauch an Dieselkraftstoff durch den mitgeführten Energiespeicher drastisch reduziert. Die sich ergebenden spezifischen Kosten können Tabelle 3-3 entnommen werden.

Fahrzeuginstandhaltungs- und Revisionskosten im Zuge der HU

Auch für die Revisionskosten, die alle acht Jahre im Zuge der Hauptuntersuchung anfallen, liegen der Professur Elektrische Bahnen Kostensätze von EVU's vor. So ist die Hauptuntersuchung eines Dieseltriebzugs mit 260.000 € teurer als die eines Elektrotriebzuges, mit 230.000 €. Da zu den Hybridkonzepten diesbezüglich noch keinerlei Felderfahrten gemacht wurden, wird vereinfachend angenommen, dass für OL-/ Batterie-Hybridfahrzeuge der selbe Kostensatz wie für konventionelle Elektrotriebzüge anzuwenden ist und für alle anderen Fahrzeugkonzepte, die zusätzliche Diesel- oder Brennstoffzellen-Traktionsausrüstung benötigen, der Mittelwert aus beiden Kostensätzen anzunehmen ist.

Kostensätze für den Austausch des Power Packs

Felderfahrten der EVU zeigen, dass der Austausch des Power Packs ungefähr 166.000 € kostet und dass dieser beim konventionellen Dieseltriebzug bei Jahreslaufleistungen von ca. 160.000 km alle drei Jahre durchzuführen ist. Der sich daraus ergebende Kostensatz kann wiederum Tabelle 3-3 entnommen werden. Für den Diesel-/ Batterie-Hybrid gibt es diesbezüglich noch keine Erfahrungen, so dass hier vereinfachend angenommen wird, dass der Power Pack infolge der Entlastung durch den Energiespeicher nur noch alle 5 Jahre ausgetauscht werden muss.

Beim OL-/Diesel-Hybrid hängt der Verschleiß des Power Packs vom Anteil der Streckenelektrifizierung ab. Vereinfachend wird angenommen, dass bei 0% Streckenelektrifizierung das Power Pack ebenso wie beim Dieseltriebzug alle 3 Jahre gewechselt werden muss, da dann ausschließlich Dieselbetrieb vorherrscht. Dagegen wird angenommen, dass bei 100% Streckenelektrifizierung das Power Pack genauso lange funktionsfähig ist wie das Fahrzeug selbst, also 35 Jahre. Zwischen diesen beiden Randpunkten wird der Verlauf der Lebensdauer des Power Packs in Abhängigkeit von der Streckenelektrifizierung linear angenommen und es ergibt sich der in Tabelle 3-3 angegebene Kostensatz.

Kosten für den Austausch der Brennstoffzelle

Die Berechnung der spezifischen Wiederbeschaffungskosten für Brennstoffzellenstacks erweist sich als schwierig, da bisher keinerlei Langzeituntersuchungen durchgeführt werden konnten. Die Angaben bezüglich Kostensätzen und möglicher Betriebsstunden variieren in Abhängigkeit der Quelle stark.

Die unterstellten Kostensätze in der vorliegenden Arbeit stützen sich auf ein Expertengespräch mit einem Mitarbeiter des Brennstoffzellenlieferanten, welcher u.a. die Brennstoffzellenstacks für den Alstom iLint liefert. Im iLint sind zwei Brennstoffzellenstacks mit einer Leistung von je 200 kW installiert. Außerdem wurde angegeben, dass mit moderner Technologie heute zwischen 10.000 und 20.000 Betriebsstunden möglich sind. Angenommen wird ein

Mittelwert von 15.000 Betriebsstunden. Resultierend bedeutet dies eine mögliche Einsatzdauer unter den „klinischen Testbedingungen“ von 4,2 Jahren. Bei einem heute realisierbaren Kostensatz von 1.000 €/kW installierter Leistung ergeben sich die spezifischen Kosten für den vorzeitigen Wechsel der Brennstoffzellenstacks zu 0,6259 €/km.

3.4.3 Infrastrukturkosten

Tabelle 3-5 Infrastrukturbedingungen für unterschiedliche Antriebskonzepte

Antriebskonzept	Produktbeispiel	Benötigte Infrastruktur
Elektrotriebzug	ET 442.0	Oberleitung (OL) durchgängig
Dieselttriebzug	VT 642	1 Dieseltankstelle
OL-/ Batterie-Hybrid	Bombardier Talent 3	OL abschnittsweise
OL-/ Diesel-Hybrid	Alstom Polyvalent	OL abschnittsweise 1 Dieseltankstelle
Diesel-/ Batterie-Hybrid	Eco Train (DM&Bat&Panto)	OL partiell 1 Dieseltankstelle + 2 Ladestationen
H2-/ Batterie-Hybrid	Alstom iLint	2 H2-Tankstellen 2 Ladestationen

Die zu untersuchenden Antriebskonzepte zeichnen sich nicht nur durch die Verschiedenheit der Antriebsstruktur aus. Vielmehr stellt jedes Konzept, entsprechend Tabelle 3-4, ganz eigene Bedingungen an die Streckeninfrastruktur.

Tabelle 3-6 Kostenkennwerte zur Bestimmung der Infrastrukturkosten

Kostenfaktor	Kosten
Beschaffungskosten Dieseltankstelle	350.000 €
Betriebskosten Dieseltankstelle	20.000 €/a
Beschaffungskosten Wasserstofftankstelle	1.000.000 €
Betriebskosten Wasserstofftankstelle	30.000 €/a
Spez. Beschaffungskosten OL-Anlage	610.000 €/km
Spez. Beschaffungskosten Unterwerk+Netzanschluss	137.500 €/km
Betriebskosten OL-Anlage	200.000 €/a
Betriebskosten Unterwerk+Bahnstromanlagen	50.000 €/a
Beschaffungskosten Ladestation für EcoTrain	200.000 €
Betriebskosten Ladestation EcoTrain	2.000 €/a

Zur Bestimmung des Infrastrukturkostenanteils am sich ergebenden Kapitalwert zum Betrachtungsdauerende sind die in Tabelle 3-5 dargestellten, von der Professur Elektrische Bahnen in verschiedenen Machbarkeitsstudien und Instandhaltungsanalysen ermittelten Kennwerte, im LCC-Berechnungstool hinterlegt. Die Kennwerte für die benötigte Wasserstoffinfrastruktur wurden überschlägig aus [12] ermittelt.

Die abgebildeten Kostenanteile für die Streckenelektrifizierung entsprechen dem mittleren, in verschiedenen Studien der Professur Elektrische Bahnen durch Auswertung (kürzlich) abgeschlossener Elektrifizierungsprojekte, ermittelten Kostensatz. In den Studien wurden die nachfolgend aufgeführten Überlegungen berücksichtigt, um auch im konkreten Einzelfall die zu erwartenden Kosten möglichst exakt vorherbestimmen zu können:

- Kategorisierung nach Streckencharakter (Trassierung, Höchstgeschwindigkeit, Anzahl der Gleise,...),
- je Streckenkategorie, Erstellung von benötigten Mengengerüsten gemäß Mastverteilung, Mastausstattung, Bedarf unterschiedlicher Fundamenttypen, Kettenwerkslänge, Anzahl von Festpunkten, Isolatoren, ...,
- Mengengerüst für Unterwerke, Bahnstromleitungen bzw. Umrichterwerke,
- für die Einzelkomponenten liegen am Lehrstuhl Kostensätze führender Unternehmen für Bahnelektrifizierungs- und Stromversorgungssysteme vor.
- Für schwieriger zu elektrifizierende Streckenabschnitte – bspw. durch querende Ingenieurbauwerke, Brücken oder Tunnel – wird ein an die äußeren Randbedingungen anpassbarer Erschwernisfaktor verwendet. Auch dieser wurde überschlägig aus bereits realisierten Projekten ermittelt.

3.5 BESTIMMUNG DER LCC FÜR UNTERSCHIEDLICHE SZENARIEN

Die Tabellen 3-6 bis 3-8 zeigen die Ergebnisse der Untersuchung für die unterschiedlichen in Abschnitt 3.2 beschriebenen Betriebsprogramme – 1/2h-Takt, 1h-Takt und 2h-Takt. Demzufolge sind die Fahrzeugkostenanteile beim Betrieb im 1/2h-Takt deutlich größer, da dafür ein größerer Fuhrpark benötigt wird und in Folge die Fahrzeugbeschaffungskosten aber auch die Traktionsenergiekosten, die Fahrzeug-Instandhaltungskosten und die Kosten für den vorzeitigen Austausch verschiedener Komponenten der Antriebsanlage zunehmen.

Die dargestellten Kostenanteile bzw. Gesamtkosten für die entsprechenden Antriebskonfigurationen entsprechen dem sich über einen Lebensdauerzyklus von 76 Jahren einstellenden Kapitalwert.

Die Tabellen 3-8 bis 3-10 beinhalten jeweils zwei Ergebnisblöcke, die mit 70% bzw. 85% leicht elektrifizierbarer Strecke überschrieben sind. Hintergrund dieser Unterteilung ist der Gedanke, dass sich die Kosten der klassischen Streckenelektrifizierung über weite Strecken mit dem in Abschnitt 3.4.3 angegebenen Wert bestimmen lassen, es aber Streckenabschnitte gibt, die deutlich teurer sind. Im linken Block wird bspw. angenommen, dass nur 70% der Strecke leicht elektrifizierbar sind. Das heißt, der in Abschnitt 3.4.3 angegebene Kostensatz wird zur Bestimmung der Elektrifizierungskosten verwendet. Die restlichen 30% sind deutlich schwieriger zu elektrifizieren und es entstehen Mehrkosten. Im dargestellten Beispiel wurde ein Erschwernisfaktor von 4,0 gewählt, was bedeutet, dass die Kosten für diese Abschnitte viermal so hoch sind.

Diese Unterteilung wird außerdem genutzt, um den erwarteten Vorteil der OL-/Batterie-Hybridfahrzeuge genauer zu untersuchen. Vorausgesetzt, die Abschnitte sind kürzer als die in Tabelle 2-1 angenommenen Reichweiten ohne Einspeisung, so fallen für diesen Abschnitt für besagte OL-/Batterie-Hybridfahrzeuge keine zusätzlichen Infrastrukturkosten an (weder Beschaffungskosten noch Betriebskosten). Nach [9] ist aber zu beachten, dass bei 100% Auslastung der Sitzplätze nur mit einer Reichweite von 30-40 km geplant werden kann. Da die Teststrecke 100 km lang ist, heißt dies im Umkehrschluss, dass im linken Ergebnisblock 30 km nicht elektrifiziert sind und somit im zulässigen OL-frei befahrbaren Bereich liegen.

Außerdem sind in den Blöcken unterschiedliche Startelektrifizierungsgrade zwischen 0% und 80% angegeben, wodurch sich signifikante Unterschiede bezüglich der Infrastrukturkosten für elektrische Fahrzeuge ergeben.

In den Zeilen werden je Antriebskonzept die Einzelkostenanteile angegeben und nochmals in Fahrzeugkostenanteil und Infrastrukturkostenanteil gegliedert. Beim OL-/ Diesel-Hybrid (Diesel-Elektrischer Triebzug) fällt die zusätzliche Zeile „neuer Elektrifizierungsgrad“ ins Auge. Das ist der Tatsache geschuldet, dass das LCC-Berechnungstool für jedes Betriebsszenario automatisch den kostenoptimalen Elektrifizierungsgrad für OL-/ Diesel-Hybrid-Fahrzeuge bestimmt. In Folge der geringeren Traktionsenergiekosten des Fahrzeugs unter Oberleitung kann es also vorkommen, dass es günstiger ist, die erheblichen Beschaffungskosten für eine (Teil-)Streckenelektrifizierung aufzubringen, da sich diese über die günstigeren Traktionsenergiekosten amortisieren. Oder es ergibt sich, dass die Beschaffungskosten für eine Teilelektrifizierung zu hoch sind und günstiger ist, die höheren Traktionsenergiekosten des Dieselantriebs zu bezahlen.

Des Weiteren wurden die Gesamtkosten des vergleichsweise günstigsten Antriebskonzepts grün und die des vergleichsweise teuersten rot markiert.

Anzumerken ist außerdem, dass es sich für den Diesel-/Batterie-Hybrid in allen Berechnungen als günstigste Variante erwiesen hat, die Batterie zu 30% (zusätzlich zum „Rekuperationsbetrieb“) als Primärenergiequelle für den Antrieb zu nutzen. Dies kann mit den in 3.4.2 getroffenen Annahmen begründet werden, ist aber nicht Gegenstand der Untersuchung und wurde deshalb nicht eingehender untersucht.

Tabelle 3-7 Kapitalwerte der Antriebskonzepte nach 76 Jahren, 1/2h-Takt

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 1/2h-Takt Elektrifizierungsschwerneisfaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
Dieseltriebzug VT 642	Fahrzeugkosten	135.164	135.164	135.164	135.164	135.164	135.164	135.164	135.164	135.164
	Traktionskosten	120.265	120.265	120.265	120.265	120.265	120.265	120.265	120.265	120.265
	Instandhaltungskosten	82.056	82.056	82.056	82.056	82.056	82.056	82.056	82.056	82.056
	Austausch PP/BZE	31.944	31.944	31.944	31.944	31.944	31.944	31.944	31.944	31.944
	neue Infrastruktur	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Betrieb Infrastruktur	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 1/2h-Takt Elektrifizierungsschwerfaktors für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
	Fahrzeugkostenanteil	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%
	Infrastrukturkostenanteil	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
	Gesamtkosten	370.695	370.695	370.695	370.695	370.695	370.695	370.695	370.695	370.695
Elektrotriebzug ET 442	Fahrzeugkosten	76.405	76.405	76.405	76.405	76.405	76.405	76.405	76.405	76.405
	Traktionskosten	23.874	23.874	23.874	23.874	23.874	23.874	23.874	23.874	23.874
	Instandhaltungskosten	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885
	Austausch PP/BZE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	neue Infrastruktur	123.025	98.420	61.513	24.605	93.888	75.110	46.944	18.778	9.389
	Betrieb Infrastruktur	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816
	Fahrzeugkostenanteil	53,3%	58,1%	67,2%	79,6%	59,0%	63,5%	71,6%	82,1%	86,3%
	Infrastrukturkostenanteil	46,7%	41,9%	32,8%	20,4%	41,0%	36,5%	28,4%	17,9%	13,7%
Gesamtkosten	297.005	272.400	235.493	198.585	267.868	249.090	220.924	192.758	183.369	
Batterie-Elektrischer Triebzug Talent III	Fahrzeugkosten	102.670	102.670	102.670	102.670	102.670	102.670	102.670	102.670	102.670
	Traktionskosten	26.716	26.716	26.716	26.716	26.716	26.716	26.716	26.716	26.716
	Instandhaltungskosten	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885	57.885
	Austausch PP/BZE	39.478	39.478	39.478	16.150	13.159	13.159	13.159	13.159	12.191
	neue Infrastruktur	45.325	32.375	12.950	0.000	55.038	42.087	22.663	3.237	0.000
	Betrieb Infrastruktur	11.072	11.072	11.072	12.653	13.444	13.444	13.444	13.444	14.235
	Fahrzeugkostenanteil	80,1%	83,9%	90,4%	94,1%	74,5%	78,3%	84,7%	92,3%	93,3%
	Infrastrukturkostenanteil	19,9%	16,1%	9,6%	5,9%	25,5%	21,7%	15,3%	7,7%	6,7%
Gesamtkosten	283.145	270.195	250.770	216.073	268.911	255.961	236.536	217.111	213.696	
Diesel-Elektrischer Triebzug Polyvalent	Fahrzeugkosten	112.220	112.220	112.220	112.220	112.220	112.220	112.220	112.220	112.220
	Traktionskosten	65.454	65.454	65.454	53.583	47.648	47.648	47.648	47.648	41.713
	Instandhaltungskosten	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785
	Austausch PP/BZE	3.773	3.773	3.773	3.351	3.173	3.173	3.173	3.173	3.014
	neue Infrastruktur	45.325	32.375	12.950	0.000	55.038	42.087	22.663	3.237	0.000
	Betrieb Infrastruktur	12.337	12.337	12.337	13.919	14.709	14.709	14.709	14.709	15.500
	neuer Elektrifizierungsgrad	70%	70%	70%	80%	85%	85%	85%	85%	85%
	Fahrzeugkostenanteil	59,8%	58,1%	55,1%	50,3%	58,2%	56,3%	53,2%	49,6%	47,5%
	Infrastrukturkostenanteil	4,0%	4,2%	4,4%	5,5%	4,8%	5,1%	5,4%	5,8%	6,4%
Gesamtkosten	309.894	296.944	277.519	253.858	303.573	290.623	271.198	251.773	243.232	
Diesel-Batterie Triebzug EcoTrain	Fahrzeugkosten	106.251	106.251	106.251	106.251	106.251	106.251	106.251	106.251	106.251
	Traktionskosten	93.421	93.421	93.421	93.421	93.421	93.421	93.421	93.421	93.421
	Instandhaltungskosten	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785	70.785
	Austausch PP/BZE	32.424	32.424	32.424	32.424	32.424	32.424	32.424	32.424	32.424

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 1/2h-Takt Elektrifizierungerschwerisfaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
	neue Infrastruktur	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
	Betrieb Infrastruktur	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518
	Fahrzeugkostenanteil	99,4%	99,4%	99,4%	99,4%	99,4%	99,4%	99,4%	99,4%	99,4%
	Infrastrukturkostenanteil	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	Gesamtkosten	304.799	304.799	304.799	304.799	304.799	304.799	304.799	304.799	304.799
Brennstoffzellen Triebzug ilint	Fahrzeugkosten	126.547	126.547	126.547	126.547	126.547	126.547	126.547	126.547	126.547
	Traktionskosten	120.827	120.827	120.827	120.827	120.827	120.827	120.827	120.827	120.827
	Instandhaltungskosten	73.408	73.408	73.408	73.408	73.408	73.408	73.408	73.408	73.408
	Austausch PP/BZE	72.442	72.442	72.442	72.442	72.442	72.442	72.442	72.442	72.442
	neue Infrastruktur	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
	Betrieb Infrastruktur	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796
	Fahrzeugkostenanteil	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%
	Infrastrukturkostenanteil	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
	Gesamtkosten	399.020	399.020	399.020	399.020	399.020	399.020	399.020	399.020	399.020

Tabelle 3-8 Kapitalwerte der Antriebskonzepte nach 76 Jahren, 1h-Takt

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 1h-Takt Elektrifizierungerschwerisfaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
Dieseltriebzug VT 642	Fahrzeugkosten	67.582	67.582	67.582	67.582	67.582	67.582	67.582	67.582	67.582
	Traktionskosten	60.133	60.133	60.133	60.133	60.133	60.133	60.133	60.133	60.133
	Instandhaltungskosten	41.028	41.028	41.028	41.028	41.028	41.028	41.028	41.028	41.028
	Austausch PP/BZE	15.972	15.972	15.972	15.972	15.972	15.972	15.972	15.972	15.972
	neue Infrastruktur	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Betrieb Infrastruktur	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265
	Fahrzeugkostenanteil	99,3%	99,3%	99,3%	99,3%	99,3%	99,3%	99,3%	99,3%	99,3%
Infrastrukturkostenanteil	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	
	Gesamtkosten	185.980	185.980	185.980	185.980	185.980	185.980	185.980	185.980	185.980
Elektrotriebzug ET 442	Fahrzeugkosten	38.203	38.203	38.203	38.203	38.203	38.203	38.203	38.203	38.203
	Traktionskosten	11.937	11.937	11.937	11.937	11.937	11.937	11.937	11.937	11.937
	Instandhaltungskosten	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942
	Austausch PP/BZE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 1h-Takt Elektrifizierungserschwernefaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
	neue Infrastruktur	123.025	98.420	61.513	24.605	93.888	75.110	46.944	18.778	9.389
	Betrieb Infrastruktur	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816
	Fahrzeugkostenanteil	36,3%	40,9%	50,6%	66,2%	41,9%	46,5%	55,8%	69,6%	75,8%
	Infrastrukturkostenanteil	63,7%	59,1%	49,4%	33,8%	58,1%	53,5%	44,2%	30,4%	24,2%
	Gesamtkosten	217.923	193.318	156.411	119.503	188.786	170.008	141.842	113.676	104.287
Batterie-Elektrischer Triebzug Talent III	Fahrzeugkosten	51.335	51.335	51.335	51.335	51.335	51.335	51.335	51.335	51.335
	Traktionskosten	13.358	13.358	13.358	13.358	13.358	13.358	13.358	13.358	13.358
	Instandhaltungskosten	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942	28.942
	Austausch PP/BZE	19.739	19.739	19.739	8.075	6.580	6.580	6.580	6.580	6.580
	neue Infrastruktur	45.325	32.375	12.950	0.000	55.038	42.087	22.663	3.237	0.000
	Betrieb Infrastruktur	11.072	11.072	11.072	11.072	13.444	13.444	13.444	13.444	14.235
	Fahrzeugkostenanteil	66,8%	72,3%	82,5%	88,9%	59,4%	64,3%	73,5%	85,7%	87,9%
	Infrastrukturkostenanteil	33,2%	27,7%	17,5%	9,7%	40,6%	35,7%	26,5%	14,3%	12,5%
	Gesamtkosten	169.771	156.821	137.396	114.363	168.696	155.746	136.321	116.896	113.965
Diesel-Elektrischer Triebzug Polyvalent	Fahrzeugkosten	56.110	56.110	56.110	56.110	56.110	56.110	56.110	56.110	56.110
	Traktionskosten	64.184	62.403	44.597	26.792	64.184	62.403	44.597	26.792	20.856
	Instandhaltungskosten	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393
	Austausch PP/BZE	5.677	5.097	2.522	1.675	5.677	5.097	2.522	1.675	1.507
	neue Infrastruktur	11.008	0.000	0.000	0.000	11.008	0.000	0.000	0.000	0.000
	Betrieb Infrastruktur	3.954	4.429	9.174	13.919	3.954	4.429	9.174	13.919	15.500
	neuer Elektrifizierungsgrad	17%	20%	50%	80%	17%	20%	50%	80%	90%
	Fahrzeugkostenanteil	65,9%	63,0%	55,8%	47,7%	65,9%	63,0%	55,8%	47,7%	44,6%
	Infrastrukturkostenanteil	2,2%	2,7%	6,2%	10,4%	2,2%	2,7%	6,2%	10,4%	12,0%
Gesamtkosten	176.325	163.432	147.796	133.888	176.325	163.432	147.796	133.888	129.366	
Diesel-Batterie Triebzug EcoTrain	Fahrzeugkosten	53.126	53.126	53.126	53.126	53.126	53.126	53.126	53.126	53.126
	Traktionskosten	46.710	46.710	46.710	46.710	46.710	46.710	46.710	46.710	46.710
	Instandhaltungskosten	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393	35.393
	Austausch PP/BZE	16.212	16.212	16.212	16.212	16.212	16.212	16.212	16.212	16.212
	neue Infrastruktur	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
	Betrieb Infrastruktur	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518
	Fahrzeugkostenanteil	98,7%	98,7%	98,7%	98,7%	98,7%	98,7%	98,7%	98,7%	98,7%
	Infrastrukturkostenanteil	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Gesamtkosten	153.359	153.359	153.359	153.359	153.359	153.359	153.359	153.359	153.359	
	Fahrzeugkosten	63.273	63.273	63.273	63.273	63.273	63.273	63.273	63.273	63.273
	Traktionskosten	60.414	60.414	60.414	60.414	60.414	60.414	60.414	60.414	60.414

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 1h-Takt Elektrifizierungserschwernefaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
Brennstoffzellen Triebzug iLint	Instandhaltungskosten	36.704	36.704	36.704	36.704	36.704	36.704	36.704	36.704	36.704
	Austausch PP/BZE	36.221	36.221	36.221	36.221	36.221	36.221	36.221	36.221	36.221
	neue Infrastruktur	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
	Betrieb Infrastruktur	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796
	Fahrzeugkostenanteil	97,1%	97,1%	97,1%	97,1%	97,1%	97,1%	97,1%	97,1%	97,1%
	Infrastrukturkostenanteil	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%
Gesamtkosten		202.408	202.408	202.408	202.408	202.408	202.408	202.408	202.408	202.408

Tabelle 3-9 Kapitalwerte der Antriebskonzepte nach 76 Jahren, 2h-Takt

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 2h-Takt Elektrifizierungserschwernefaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
Dieseltriebzug VT 642	Fahrzeugkosten	33.791	33.791	33.791	33.791	33.791	33.791	33.791	33.791	33.791
	Traktionskosten	30.066	30.066	30.066	30.066	30.066	30.066	30.066	30.066	30.066
	Instandhaltungskosten	20.514	20.514	20.514	20.514	20.514	20.514	20.514	20.514	20.514
	Austausch PP/BZE	7.986	7.986	7.986	7.986	7.986	7.986	7.986	7.986	7.986
	neue Infrastruktur	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Betrieb Infrastruktur	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265
	Fahrzeugkostenanteil	98,6%	98,6%	98,6%	98,6%	98,6%	98,6%	98,6%	98,6%	98,6%
	Infrastrukturkostenanteil	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%
	Gesamtkosten		93.623	93.623	93.623	93.623	93.623	93.623	93.623	93.623
Elektrotriebzug ET 442	Fahrzeugkosten	19.101	19.101	19.101	19.101	19.101	19.101	19.101	19.101	19.101
	Traktionskosten	5.968	5.968	5.968	5.968	5.968	5.968	5.968	5.968	5.968
	Instandhaltungskosten	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471
	Austausch PP/BZE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	neue Infrastruktur	123.025	98.420	61.513	24.605	93.888	75.110	46.944	18.778	9.389
	Betrieb Infrastruktur	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816	15.816
	Fahrzeugkostenanteil	22,2%	25,7%	33,8%	49,4%	26,5%	30,3%	38,7%	53,3%	61,1%
	Infrastrukturkostenanteil	77,8%	74,3%	66,2%	50,6%	73,5%	69,7%	61,3%	46,7%	38,9%
	Gesamtkosten		178.382	153.777	116.870	79.962	149.245	130.467	102.301	74.135
Elektrotriebzug ET 442	Fahrzeugkosten	25.667	25.667	25.667	25.667	25.667	25.667	25.667	25.667	25.667
	Traktionskosten	6.679	6.679	6.679	6.679	6.679	6.679	6.679	6.679	6.679

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 2h-Takt Elektrifizierungserschwerisfaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
Batterie-Elektrischer Triebzug Talent III	Instandhaltungskosten	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471	14.471
	Austausch PP/BZE	9.869	9.869	9.869	9.869	3.290	3.290	3.290	3.290	3.048
	neue Infrastruktur	45.325	32.375	12.950	0.000	55.038	42.087	22.663	12.950	0.000
	Betrieb Infrastruktur	11.072	11.072	11.072	12.653	13.444	13.444	13.444	11.072	14.235
	Fahrzeugkostenanteil	50,1%	56,6%	70,2%	89,3%	42,3%	47,4%	58,1%	75,0%	77,8%
	Infrastrukturkostenanteil	49,9%	43,4%	29,8%	19,9%	57,7%	52,6%	41,9%	36,0%	22,2%
	Gesamtkosten	113.084	100.134	80.709	63.508	118.589	105.639	86.214	66.789	64.100
Diesel-Elektrischer Triebzug Polyvalent	Fahrzeugkosten	28.055	28.055	28.055	28.055	28.055	28.055	28.055	28.055	28.055
	Traktionskosten	36.246	31.201	22.299	13.396	36.246	31.201	22.299	13.396	10.428
	Instandhaltungskosten	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696
	Austausch PP/BZE	6.050	2.549	1.261	0.838	6.050	2.549	1.261	0.838	0.753
	neue Infrastruktur	1.942	0.000	0.000	0.000	1.942	0.000	0.000	0.000	0.000
	Betrieb Infrastruktur	1.740	4.429	9.174	13.919	1.740	4.429	9.174	13.919	15.500
	neuer Elektrifizierungsgrad	3%	20%	50%	80%	3%	20%	50%	80%	90%
	Fahrzeugkostenanteil	67,5%	61,3%	52,6%	42,1%	67,5%	61,3%	52,6%	42,1%	38,8%
Infrastrukturkostenanteil	1,9%	5,3%	11,7%	18,8%	1,9%	5,3%	11,7%	18,8%	21,4%	
Gesamtkosten	91.730	83.930	78.485	73.903	91.730	83.930	78.485	73.903	72.433	
Diesel-Batterie Triebzug EcoTrain	Fahrzeugkosten	26.563	26.563	26.563	26.563	26.563	26.563	26.563	26.563	26.563
	Traktionskosten	23.355	23.355	23.355	23.355	23.355	23.355	23.355	23.355	23.355
	Instandhaltungskosten	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696	17.696
	Austausch PP/BZE	8.106	8.106	8.106	8.106	8.106	8.106	8.106	8.106	8.106
	neue Infrastruktur	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
	Betrieb Infrastruktur	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518	1.518
	Fahrzeugkostenanteil	97,5%	97,5%	97,5%	97,5%	97,5%	97,5%	97,5%	97,5%	97,5%
	Infrastrukturkostenanteil	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Gesamtkosten	77.639	77.639	77.639	77.639	77.639	77.639	77.639	77.639	77.639	
Brennstoffzellen Triebzug iLint	Fahrzeugkosten	31.637	31.637	31.637	31.637	31.637	31.637	31.637	31.637	31.637
	Traktionskosten	30.207	30.207	30.207	30.207	30.207	30.207	30.207	30.207	30.207
	Instandhaltungskosten	18.352	18.352	18.352	18.352	18.352	18.352	18.352	18.352	18.352
	Austausch PP/BZE	18.111	18.111	18.111	18.111	18.111	18.111	18.111	18.111	18.111
	neue Infrastruktur	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
	Betrieb Infrastruktur	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796	3.796
	Fahrzeugkostenanteil	94,4%	94,4%	94,4%	94,4%	94,4%	94,4%	94,4%	94,4%	94,4%

LCC-Betrachtung Kosten in Mio EUR für 76 Jahre										
Betriebsprogramm: 2h-Takt Elektrifizierungserschwerisfaktor für schwer elektrifizierbare Strecke: 4,0										
bereits elektrifizierte Strecke		70% leicht elektrifizierbare Strecke				85% leicht elektrifizierbare Strecke				
		0%	20%	50%	80%	0%	20%	50%	80%	90%
	Infrastrukturkostenanteil	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%
	Gesamtkosten	104.102	104.102	104.102	104.102	104.102	104.102	104.102	104.102	104.102

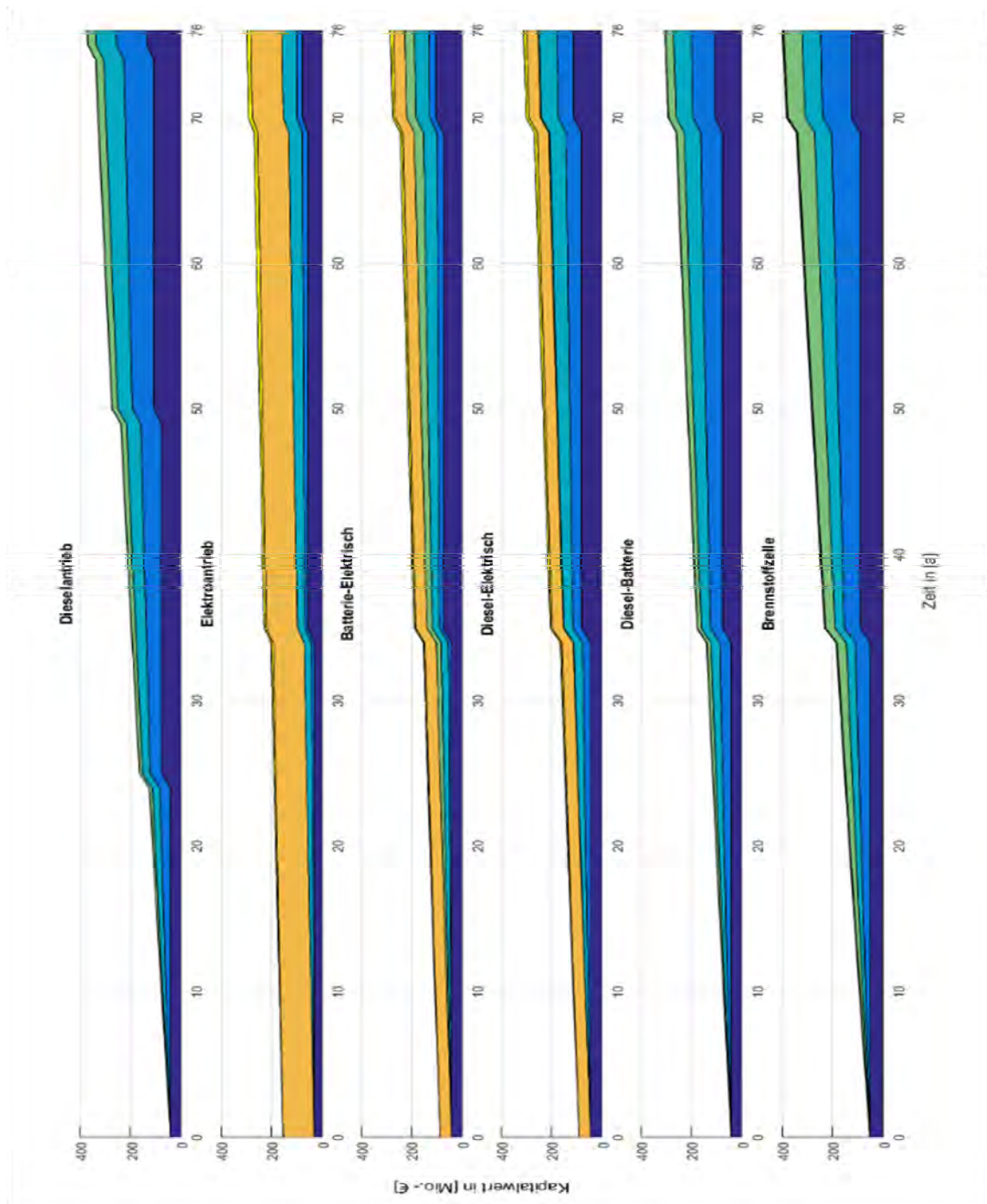


Abb. 3-3 Kapitalwertverläufe der Antriebskonzepte für 1/2-Takt bei einer Startelektrifizierung von 0%

Dem Auftraggeber wurden zudem zu allen untersuchten Szenarien die Kapitalwertverläufe, mit deren Hilfe unter anderem abgeschätzt werden kann, nach wie vielen Jahren ein Antriebskonzept gegenüber einem anderen Konzept sich aus Kostensicht als vorteilhaft erweist. Beispielfhaft zeigt Abbildung 3-3 die Kapitalwertverläufe der Antriebskonzepte, die sich bei 1/2h-Takt und einer Startelektrifizierung von 0% ergeben.

3.6 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

Wird der Betrieb mit hohen Taktzahlen (ab einem Angebot im Stundentakt) durchgeführt, so zeigen die Ergebnisse in Tabelle 3-6 einen deutlichen Vorteil der Elektrotraktion. Das Ergebnis entspricht somit den Erwartungen, dass sich bei großem Verkehrsaufkommen die Elektrotraktion aufgrund günstigerer Traktionsenergiekosten und günstigerer Instandhaltungskosten durchsetzt.

Beachtenswert ist, dass sich das OL-/Batterie-Hybridkonzept als vorteilhaft erweist, wenn die Strecke nur einen geringen Anfangselektrifizierungsgrad aufweist und es verhältnismäßig lange, schwierig zu elektrifizierende Teilabschnitte, gibt. Gegenüber dem konventionellen Dieseltriebzug erweist sich auch der OL-/Diesel-Hybrid als wesentlich günstiger. Die Dieselantriebstechnologie im konventionellen Dieseltriebzug aber auch im Diesel-/ Batterie-Hybrid erweist sich bei großem Verkehrsaufkommen als betriebswirtschaftlich nachteilig. Als betriebswirtschaftlich ungünstigstes Konzept erweist sich der Einsatz des H2-/ Batterie-Hybridantriebs.

Beim unterstellten 1h-Takt (Tabelle 3-7) verschieben sich die Vorteile allmählich in Richtung Diesel-/ Batterie-Hybridkonzept, welches sich bei einem geringen Elektrifizierungsgrad der Strecke als günstigste Alternative darstellt. Das ist in erster Linie dem Umstand zu verdanken, dass bei diesem Konzept außer den beiden betriebswirtschaftlich zu vernachlässigenden Nachladstationen keine weiteren Investitionen in die Infrastruktur getätigt werden müssen. Gegenüber dem 1/2h-Takt können sich die zu tätigen Mehraufwendungen bei der Beschaffung der Infrastruktur für elektrische Fahrzeugkonzepte aufgrund der geringeren Fuhrparkgröße nicht mehr über die günstigeren Fahrzeugkosten amortisieren. Ist jedoch schon ein größerer Streckenanteil elektrifiziert, rechnen sich wiederum die elektrischen Antriebskonzepte entsprechend obigen Ausführungen. Auch diesmal erweist sich der OL-/ Diesel-Hybrid bei allen Szenarien als günstige Alternative zum Dieselantriebskonzept und die Zahlen zeigen, dass er bei allen Ausgangsszenarien eine vergleichsweise günstige Alternative darstellt, auch wenn er nie das betriebswirtschaftliche Optimum darstellt. Auch hier erweist sich das H2-/ Batterie-Hybridantriebskonzept als betriebswirtschaftlich nachteilig.

Beim 2h-Takt (Tabelle 3-8) zeigt sich, dass sich der Vorteil der Elektrotraktion erst bei sehr hohen, bereits vorhandenen Elektrifizierungsgraden positiv auswirkt und dann der Einsatz von OL-Hybriden Antrieben gegenüber der Komplettelektrifizierung immer vorzuziehen ist. Als betriebswirtschaftlich sinnvollste Variante erscheint bei niedrigem Elektrifizierungsgrad wiederum das Diesel-/Batterie-Hybridkonzept, weil hier auf die Installation einer kostenintensiven OL-Anlage verzichtet werden kann. Auch der OL-/ Diesel-Hybrid erweist sich hier über alle

Szenarien hinweg als günstige Alternative. Auch hier erweist sich das H2-/ Batterie-Hybridantriebskonzept als betriebswirtschaftlich nachteilig.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Mit den Ergebnissen aus den Kapiteln 1 bis 3 wird Institutionen und Fachbereichen des öffentlichen Verkehrs und darüber hinaus Interessierten ein umfassendes Rüstzeug zur Verfügung gestellt, anhand dessen Eisenbahnstrecken unter individuellen räumlichen Randbedingungen und Anforderungen im Hinblick auf die zuvor skizzierten „Alternativen Antriebskonzepte“ bewertet werden können.

Die in Kapitel 3 durchgeführten Vergleiche der Kapitalwertentwicklungen unterschiedlicher Antriebskonzepte über den Lebenszyklus von 76 Jahren lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Als besondere Kostentreiber erwiesen sich:

- die Traktionsenergiekosten (spezifische Energiepreise, Antriebswirkungsgrad),
- der Belastungsabhängige Austausch von Antriebs- und Speicherkomponenten (PowerPack, Batterie, Brennstoffzelle),
- die Lebensdauer der Fahrzeuge (Häufigkeit der Wiederbeschaffung),
- die Infrastrukturkosten für Elektrifizierung (Investition und Betrieb), wenn der vorhandene Elektrifizierungsgrad gering ist.

Geringen Einfluss auf die Rangfolge haben die Fahrzeugbeschaffungspreise und die zyklischen Revisionen.

Bezüglich der Betriebsprogramme zeigte sich folgender Einfluss:

- Die tägliche Fahrzeugbetriebsleistung hat wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis (Umlauf-Kilometer, Taktichte, Bespannung).
- Die Betriebsart (RE oder RB) hat vorrangig Einfluss auf die Betriebskosten bei Dieselfahrzeugen und bei Wasserstofffahrzeugen. Bei E-Fahrzeugen ist dieser Einfluss vernachlässigbar.

Zu den Hybridkonzepten kann festgehalten werden:

- OL-/ Batterie-Hybridfahrzeuge sind bei erschwerter Elektrifizierung vorteilhaft.
- Ohne Elektrifizierungsperspektive ist Diesel-/ Batterie-Hybrid wirtschaftlich, wenn an Endpunkten vorrangig aus der Oberleitung nachgeladen werden kann.
- Brennstoffzelle-/ Batterie-Hybrid ist nahezu in allen Szenarien am teuersten (trotz H2-günstiger Ansätze für Fahrzeugbeschaffung, Re-Invest für Brennstoffzelle und H2-Beschaffungspreis).

Bezüglich der Elektrifizierungswürdigkeit bleibt festzuhalten:

- Bei Taktverkehren < 1 h Regio lohnt sich langfristig immer die Elektrifizierung. Bei größerer Verkehrsleistung (höhere Betriebsdauer oder Doppeltraktion) trifft dies auch schon bei 1-h-Takt zu.
- Eine teure OL-Infrastruktur amortisiert sich über deutlich günstigere Fahrzeugbetriebskosten.

- Die OL-Infrastruktur steht auch für andere Verkehre (Cargo, Fernverkehr) zur Verfügung.
- Szenarien mit vorhandener Teilelektrifizierung sind günstig für Hybridkonzepte mit oberleitungsabhängiger E-Traktion (OL-/ Batteriehybrid, OL-/ Dieselhybrid).

Aus der Technologieanalyse ergaben sich folgende Trends:

- Alle Hybridantriebe haben spezifische Einsatzprofile (inkl. Infrastrukturbedarf).
- Alle Fahrzeuge mit Traktionsbatterien sind wirtschaftlich noch nicht verifiziert.
- Brennstoffzellenfahrzeuge haben aktuell das größte Risikopotenzial (Wirtschaftlichkeit Batterie + Brennstoffzelle, Tank- und Werkstattinfrastruktur, Einsatz unter OL sicherheitstechnisch zu überprüfen).
- Das Thema Wasserstoff im Bahnbereich erfordert momentan den größten Zulassungsvorlauf für die Fahrzeuge und auch für die Infrastruktur.
- Antriebskonzepte mit kombiniertem Diesel- und Elektroantrieb versprechen eine schnelle wirtschaftliche Erfolgsbilanz (geringes Technologierisiko, keine zusätzliche Infrastruktur). Die Einsatzfelder sind aber begrenzt.

Bezüglich der Erprobungszeiträume von hybriden Antriebskonzepten gilt es folgendes zu bedenken:

- Vor dem Serieneinsatz sind ausreichende Erprobungszeiträume auch im Alltagsbetrieb erforderlich.
- Es muss mit eingeschränkter Verfügbarkeit gerechnet werden (Vorhaltung von Ersatzfahrzeugen, Öffentlichkeitsarbeit, ...)

Als Fazit auf die Frage, welche moderne Antriebstechnologie unter welchen Randbedingungen am geeignetsten erscheint, kann im Ergebnis der Untersuchungen festgestellt werden:

- Langfristig ist für Regio-Verkehre mit mindestens 1-h-Takt und Fahrzeuggrößen >2 Einheiten die Streckenelektrifizierung am wirtschaftlichsten.
- Für schnelle Effekte sind Konzepte auf Basis vorhandener Antriebstechnologien (OL-/ Diesel-Hybrid) zweckmäßig, wenn es bereits Elektrifizierungsanteile gibt.
- Mittelfristig sind Konzepte mit batteriegestützten elektrischen Antrieben (OL-/ Batterie-Hybrid, Diesel-/ Batteriehybrid) am günstigsten, sofern sich Elektrifizierungsanteile nicht schnell erhöhen lassen.
- Für Verkehre ohne Elektrifizierungsperspektive sind Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge wirtschaftlicher als ein reiner Dieselfahrzeugbetrieb.
- Wenn sich die Austauschkosten für Brennstoffzellen-Stacks und Traktionsbatterien deutlich verringern lassen, werden auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge wirtschaftlicher sein als Dieselfahrzeuge.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kono, Shiraki, Yokoyama und Furata, Catenary and Storage Batterie Hybrid System for Electric Railcar Series EV-E301, Hiroshima: International Power Electronics Conference, Mai 2014.
- [2] Alstom. [Online]. Available: <http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/coradia-polyvalent-regional-train/>. [Zugriff am 24 Juni 2017].
- [3] F. Angermann, Internes Dokument Professur Elektrische Bahnen, Dresden: TU Dresden, 2017.
- [4] Abiko, „Development of Hybrid Railcars and Catenary and Batteriepowered Hybrid Railcar System,“ *JR East Technical Review*, 23 März 2013.
- [5] „Alstom enthüllt auf der InnoTrans seinen emissionsfreien Zug Coradia iLint,“ Alstom, 20 September 2016. [Online]. Available: <http://www.alstom.com/de/press-centre/2016/9/alstom-enthullt-auf-der-innotrans-seinen-emissionsfreien-zug-coradia-ilint/>. [Zugriff am 19 Mai 2017].
- [6] H. Blom, K. Lüdner und S. C., Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung, München: Verlag Franz Vahlen, 2012.
- [7] K.-D. Däumler und J. Grae, Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung, Ettenheim: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe GmbH&Co. KG, 2007.
- [8] C. Höhne, „Life Cycle Costing - Systematisierung bestehender Studien,“ *Dresdner Beiträge zur Lehre der betrieblichen Umweltökonomie. Umweltleistungsmessung*, Bde. %1 von %2Nr. 37/2009, Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Nr. ISSN 1611-9185, p. 28, 2009.
- [9] U. Götze, Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [10] H. C., Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszykluskostenorientierung in Unternehmen, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2010.

- [11] F. Kießling, R. Puschmann und S. A., Fahrleitungen elektrischer Bahnen. Planen, Berechnung, Erlangen: SiemensAG. Publics Publishing Verlag, 2014.
- [12] S. Ö. Nationalbank, „Entwicklung des Kapitalmarktzinssatzes in Deutschland in den Jahren 1975 bis 2016,“ 2017. [Online]. Available: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/201719/umfrage/entwicklungdes_kapitalmarktzinssatzes-in-deutschland/. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [13] D. Bundesbank, „Die Geldpolitik des Eurosystems. Die Übertragung geldpolitischer Impulse,“ [Online]. Available: http://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Dossier/Service/schule_und_bildung_kapitel_6.html?notFirst=true&docId=145112#chap. [Zugriff am 20 Juni 2017].
- [14] NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, „Alstom enthüllt auf der Inno Trans seinen emissionsfreien Zug Coradia iLint,“ Alstom, 2016 September 2016. [Online]. Available: <http://www.alstom.com/de/press-centre/2016/9/alstom-enthullt-auf-der-innotrans-seinen-emissionsfreien-zug-coradia-ilint/>. [Zugriff am 16 Mai 2017].
- [15] B. Transportation, „Batterietriebzug BEMU,“ in *Sales Germany*, Oktober 2016.
- [16] L. T., A. G und G. S, „Demand Side Management in a High Decentralized Energy Future,“ in *45th International Universities Power Engineering Conference*, ISBN 978-0-9565570-2-5, 31.8.-3.9.2010.
- [17] C. Gellings, „The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities,“ *Proceedings of the IEEE*, Bd. 73, Nr. ISSN-1558-2256, p. H. 10, 1985.