



BERICHT

Titel: **Bewertung von konventionellen und alternativen Antrieben für den Rheinland-Pfalz Takt 2030 unter besonderer Betrachtung des Pilotprojekts „Pfalznetz“**

Kurztitel: **Alternative Antriebskonzepte Pfalznetz**

Auftraggeber: Zweckverband SchienenPersonenNahVerkehr
Rheinland-Pfalz Süd
Herrn Michael Heilmann
Bahnhofstraße 1
67655 Kaiserslautern

Auftragnehmer: Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik
Professur für Elektrische Bahnen

Bearbeiter: Nyascha Thomas Wittemann, Franz Meinelt

Berichtsnummer: 2019/005/EB

Datum: Dresden, den 24.07.2019

Bericht enthält aus Gründen des Schutzes von Wettbewerbern geschwärzte Passagen.

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	8
1 Ausgangslage und Zielsetzung	9
2 Marktübersicht Antriebsarten	11
2.1 Mögliche Technologien für das Pfalznetz.....	11
2.2 Fahrzeug- und Anlagenkonzepte für den SPNV	12
2.2.1 Dieseltriebwagen (DMU)	12
2.2.2 Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU).....	13
2.2.3 Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode).....	17
2.2.4 Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge	19
2.2.5 Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU).....	22
2.3 Infrastrukturbedarf der einzelnen Technologien.....	25
2.3.1 Dieseltriebwagen & Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid	25
2.3.2 Oberleitungs-/ Batterie- & Diesel-/ Batterie Hybrid	25
2.3.3 Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid.....	28
3 Wirtschaftliche Betrachtung	31
3.1 Untersuchungsmethodik	31
3.1.1 Randbedingungen	31
3.1.2 Ablauf der Untersuchung.....	31
3.2 Definition der Bewertungsszenarien	32
3.2.1 Linienspezifische Parameter.....	32
3.2.2 Betrachtungszeiträume und Varianten der Infrastrukturfinanzierung.....	33
3.3 LCC-Berechnungen	34
3.3.1 Zielsetzung der LCC-Analyse.....	34

3.3.2	Normen- und Vorschriftenlage	34
3.3.3	Lebenszyklusphasen und Berechnungsmethode	36
3.3.4	Kapitalwertmethode	37
3.3.5	Restwert eines Investitionsgutes	39
3.3.6	Kalkulationszins	40
3.4	Ermittlung aller Einzelkosten.....	42
3.4.1	Übersicht der betrachteten Kostenpositionen	42
3.4.2	Fahrzeugkosten	44
3.4.3	Infrastrukturkosten	54
3.5	Bestimmung der LCC für unterschiedliche Szenarien.....	55
3.5.1	Umlegung von Gesamtkosten auf Linien.....	55
3.5.2	Linien spezifische Betrachtung	57
3.5.3	Gesamtnetz betrachtung	63
3.5.4	Auswirkung einer Streckenelektrifizierung Neustadt - Wörth.....	65
4	Bewertung der CO₂-Emissionen im Betrieb	67
4.1	Aufgabenstellung und Ausgangslage.....	67
4.2	Bestimmung des Energiebedarfs je Technologie.....	68
4.3	Überführung in CO ₂ -Emissionen Je Linie bzw. Gesamtnetz	68
5	Zusammenfassung und Fazit.....	70
5.1	Wirtschaftliche Bewertung.....	70
5.2	Kostentreiber	70
5.3	Ökologische Bewertung	71
5.4	Empfehlung zur Technologieentscheidung.....	71
	Quellen- und Literaturverzeichnis.....	72
A	Gesamtkapitalwerte im Pfalznetz	77
A.1	35 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur	77
A.2	35 Jahre Betrachtungszeit exklusive Infrastruktur.....	78
A.3	22,5 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur	78
A.4	22,5 Jahre Betrachtungszeitraum exklusive Infrastruktur	79

B	Linien spezifische Auswertung Neustadt-Karlsruhe	79
B.1	Kapitalwertverlauf RN-RK	79
B.2	Kostenpositionen RN-RK	80
B.3	Kapitalwertverlauf RN-RK (differenziert)	81
C	Linien spezifische Auswertung Landau-Pirmasens	82
C.1	Kapitalwertverlauf RLA-SPS	82
C.2	Kostenpositionen RLA-SPS	83
C.3	Kapitalwertverlauf RLA-SPS (differenziert)	84
D	Linien spezifische Auswertung Winden-Bad Bergzabern	85
D.1	Kapitalwertverlauf RWND-RBZB	85
D.2	Kostenpositionen RWND-RBZB	86
D.3	Kapitalwertverlauf RWND-RBZB (differenziert)	87
E	Linien spezifische Auswertung Kaiserslautern-Kusel	88
E.1	Kapitalwertverlauf SKL-SKUS	88
E.2	Kostenposition SKL-SKUS	89
E.3	Kapitalwertverlauf SKL-SKUS (differenziert)	90
F	Linien spezifische Auswertung Kaiserslautern-Lauterecken	91
F.1	Kapitalwertverlauf SKL-SLKG	91
F.2	Kostenpositionen SKL-SLKG	92
F.3	Kapitalwertverlauf SKL-SLKG (Differenziert)	93
G	Linien spezifische Auswertung Kaiserslautern-Primasens	94
G.1	Kapitalwertverlauf SKL-SPS	94
G.2	Kostenpositionen SKL-SPS	95
G.3	Kapitalwertverlauf SKL-SPS (differenziert)	96
H	Linien spezifische Auswertung Saarbrücken-Pirmasens	97
H.1	Kapitalwertverlauf SSH-SPS	97
H.2	Kostenpositionen SSH-SPS	98
H.3	Kapitalwertverlauf SSH-SPS (differenziert)	99

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1 Antriebsstrang dieselmechanisch (schematisch)	12
Abb. 2-2 Beispiel Bestandsfahrzeug Siemens Desiro Classic, Baureihe 642	13
Abb. 2-3 Beispiel Neufahrzeug Alstom Lint 54, Baureihe 622	13
Abb. 2-4 Antriebsstrang klassischer elektrischer Elektrotriebzug (schematisch)	14
Abb. 2-5 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)	14
Abb. 2-6 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)	15
Abb. 2-7 Beispiel Siemens Cityjet Eco	16
Abb. 2-8 Beispiel Bombardier Talent 3 BEMU	16
Abb. 2-9 Beispiel Stadler Flirt Akku	16
Abb. 2-10 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Oberleitungsbetrieb (schematisch)	17
Abb. 2-11 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Dieselbetrieb (schematisch)	18
Abb. 2-12 Beispiel Stadler Flirt für Greater Anglia, GB	18
Abb. 2-13 Unterbringung der Komponenten der zweiten Traktionsart in weiterem Wagenkasten	18
Abb. 2-14 Beispiel Alstom Coradia Polyvalent.....	19
Abb. 2-15 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)	20
Abb. 2-16 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Diesel-/ Batterie-Hybrid- Betrieb (schematisch)	21
Abb. 2-17 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)	21

Abb. 2-18 Beispiel DB Erzgebirgsbahn EcoTrain mit Oberleitungs-Nachladung (Fotomontage)	22
Abb. 2-19 Antriebsstrang eines Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid	23
Abb. 2-20 Beispiel Alstom iLint	23
Abb. 2-21 Beispiel Siemens Mireo Plus H (Fotomontage)	24
Abb. 2-22 Beispiel Stadler H ₂ -Triebzug Zillertalbahn, Österreich (Fotomontage).....	24
Abb. 2-23 Vorgesehene Ladeinfrastruktur, Los 1 Pfalznetz (rote Strecke: elektrifiziert)	26
Abb. 2-24 Vorgesehene Wasserstoffinfrastruktur, Los 1 Pfalznetz.....	30
Abb. 3-1 Vorgehensweise zur Bestimmung technologiespezifischer Kapitalwerte.....	32
Abb. 3-2 Schematische Darstellung der Kapitalwertberechnung.....	38
Abb. 3-3 schematische Betrachtung des Restwertverlaufes.....	39
Abb. 3-4 Fahrzeugkostenstruktur.....	42
Abb. 3-5 Infrastrukturkostenstruktur	43
Abb. 3-6 Streckeneinteilung (Beispiel)	49
Abb. 3-7 Betrachtete Strecken im Pfalznetz	55
Abb. 3-8 Entwicklung der Kapitalwerte der einzelnen Linien.....	57
Abb. 3-9 Kostenpositionen Saarbrücken-Pirmasens in jährlicher Betrachtung.....	61
Abb. 3-10 Kapitalwertentwicklung Saarbrücken-Pirmasens (differenziert)	62
Abb. 3-11 Kapitalwerte im Gesamtnetz (35 Jahre Betrachtungszeit)	63
Abb. 3-12 Kapitalwerte im Gesamtnetz (22,5 Jahre Betrachtungszeitraum)	64
Abb. 3-13 Kapitalwerte im Gesamtnetz (Elektrifizierung Neustadt-Wörth)	66

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1 Maßgebliche Längen der nichtelektrifizierten Abschnitte pro Linie.....	27
Tabelle 3-1 Parameter für die Kapitalwertberechnung	37
Tabelle 3-2 Parameter der Restwertbetrachtung	40
Tabelle 3-3 Parameter für die Bildung des Kalkulationszinssatzes.....	41
Tabelle 3-4 Parameter der Kostenpositionen	43
Tabelle 3-5 Kostensätze zur Berechnung der Fahrzeugkostenanteile für verschiedene Antriebskonzepte	44
Tabelle 3-6 Parameter der Zyklenfestigkeit.....	47
Tabelle 3-7 Intervallindikatoren der Fahrzeugkosten	48
Tabelle 3-8 Parameter der Traktionsenergieberechnung	50
Tabelle 3-9 Angesezte Größen zur Traktionsenergiekostenberechnung	51
Tabelle 3-10 Parameter der Tankfahrten.....	52
Tabelle 3-11 Parameter zur Berechnung der Triebfahrzeugführerkosten	52
Tabelle 3-12 Bedienungskadenz und LKW-km je Wasserstoff-Tankstelle.....	52
Tabelle 3-13 Kostensätze und Intervallindikator für die Dieseltankstelle.....	54
Tabelle 3-14 Streckendaten.....	56
Tabelle 3-15 Aufteilung der Ladeinfrastrukturmaßnahmen	56
Tabelle 3-16 Kapitalwertübersicht des Gesamtnetzes für alle Betrachtungsvarianten.....	64
Tabelle 4-1 CO ₂ -Emissionen des Gesamtnetzes für alle Technologien über 22,5 Jahre	69

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

BEMU	Battery electric multiple unit (Oberleitungs-/ Batterie-Hybridtriebwagen)
BZ	Brennstoffzelle
CO ₂	Kohlenstoffdioxid, chemische Verbindung
DB (AG)	Deutsche Bahn (Aktiengesellschaft)
DMU	Diesel multiple unit (Dieseltriebwagen)
EB	Elektrische Bahnen
EMU	Electric multiple unit (Elektrotriebwagen)
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FCMU	Fuel cell multiple unit (Wasserstoff-/ Batterie-Hybridtriebwagen)
HU	Hauptuntersuchung
H ₂	Wasserstoff, chemisches Element
kW	Kilowatt (Einheit einer Leistung)
kWh	Kilowattstunde (Einheit einer Energiemenge)
LFP	Lithiumbasiert Akkumulatortechnologie Lithiumeisenphosphat
LTO	Lithiumbasiert Akkumulatortechnologie Lithiumtitanatoxid
NMC	Lithiumbasiert Akkumulatortechnologie Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide
TUD	Technische Universität Dresden
ZSPNV RLP	Zweckverband SchienenPersonenNahVerkehr Rheinland-Pfalz

1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

Der Zweckverband SchienenPersonenNahVerkehr Rheinland-Pfalz Süd (ZSPNV Süd) organisiert als Aufgabenträger den SPNV im südlichen Rheinland-Pfalz mit dem Ziel, in den kommenden Jahren zur Ausschreibung anstehende Verkehrsleistungen im schienengebundenen Regionalverkehr wo möglich und sinnvoll mit vollständig elektrischen oder anderen emissionsarmen Fahrzeug-Antriebskonzepten neu zu vergeben.

Auf elektrifizierten Strecken sind leistungsstarke, effiziente und instandhaltungsarme elektrische Fahrzeugantriebe mit umrichter gespeisten Drehstrommotoren seit vielen Jahren Standard. Auf nichtelektrifizierten Strecken dominieren aktuell dieselmechanische und dieselhydraulische Antriebe. Gründe für den Einsatz von Dieselfahrzeugen sind einerseits die niedrigen Leistungsanforderungen mit akzeptablen Reichweiten und andererseits die geringen Infrastrukturanforderungen.

Allerdings sind Verbrennungsantriebe mit lokalen CO₂-, Schadstoff- und Lärmemissionen behaftet. Zudem kostet derzeit die Traktionsenergie am Rad bei elektrischem Betrieb weniger als die Hälfte als bei Dieselbetrieb, was trotz annähernd gleicher Beschaffungskosten pro Kilowattstunde am deutlich höheren Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs liegt. Darüber hinaus bieten elektrische Traktionsantriebe grundsätzlich die Möglichkeit der Rekuperation von Bremsenergie, auf nichtelektrifizierten Strecken müssen dann allerdings Energiespeicher auf den Fahrzeugen mitgeführt werden. Diese eröffnen wiederum die Möglichkeit des abschnittsweise emissionsfreien Fahrens, etwa in Gebieten mit Abgas- oder Lärmschutzanforderungen sowie bei Tunnelbetrieb. Klassische Streckenelektrifizierungen mit Oberleitungen als Alternative zum Dieselbetrieb lohnen sich wirtschaftlich jedoch erst bei Verkehrsleistungen über 10 - 20 Mio. Bruttotonnen pro Jahr.

Im Kontext der aktuellen umweltpolitischen Diskussion und langfristiger wirtschaftlicher Überlegungen besteht deshalb Handlungsbedarf für bisher nichtelektrifizierte Bahnverkehre. Hier versprechen die schon am Markt verfügbaren alternativen Antriebslösungen auch ohne vollständige Streckenelektrifizierungen einen emissionsarmen, umweltfreundlicheren Betrieb. Der Bahnbetrieb in Rheinland-Pfalz soll so noch ökologischer werden, wofür zunächst das Pfalznetz auf alternative Antriebe umgestellt werden soll.

Planungshorizont für die Umsetzung ist der sogenannte Rheinland-Pfalz-Takt 2030. Beginn der ersten Verkehrsverträge bei diesen Ausschreibungen ist der Fahrplanwechsel im Dezember 2024, ab dem das Los 1 des Pfalznetzes mit insgesamt sieben Linien stufenweise in Betrieb gehen soll.

Der ZSPNV Süd hat dazu eine Studie an die TU Dresden, Professur Elektrische Bahnen, zur Bewertung alternativer Antriebstechnologien vergeben.

Im Rahmen der Studie wird deshalb eine ganzheitliche Analyse des Netzes und der zur Auswahl stehenden Antriebstechnologien durchgeführt. Betrachtet werden betriebliche,

technische, wirtschaftliche und ökologische Parameter. Die Potenziale sowie daraus folgende Umsetzungsanforderungen der einzelnen alternativen Antriebstechnologien werden definiert und in einem gesamtwirtschaftlichen Ansatz mit Beachtung aller relevanten Kosten für Infrastruktur, Betrieb und Fahrzeug bewertet.

Zunächst wird eine Marktanalyse durchgeführt, die Aspekte der Marktverfügbarkeit, Beispielfahrzeuge und Randbedingungen zur Zuverlässigkeit sowie zur Reichweite aufzeigt. Die Markterkundung dient auch zur Präzisierung der vorliegenden Kostenparameter, insbesondere der Beschaffungs- und Instandhaltungskosten von Fahrzeugen und Infrastruktur bei einem Beschaffungsrahmen von 50 – 70 Fahrzeugeinheiten.

Insbesondere von Interesse ist es, die wirtschaftlichen, bahnbetrieblichen, infrastrukturellen und instandhaltungstechnischen Aspekte monetär in einer Lebenszykluskostenanalyse (LCC-Analyse) zu bewerten. Dies erfolgt jeweils für eine maximale Vertragslaufzeit von 22,5 Jahren und eine Fahrzeuglebensdauer von 35 Jahren.

Die zum Betrieb erforderlichen Energieversorgungsanlagen je Antriebsart werden inklusive der jeweiligen Vor- und Nachteile analysiert, insbesondere deren notwendige Standorte zur Abwicklung eines stabilen Betriebes. Dies erfolgt unter anderem auf Basis einer bereits vorliegenden Studie des Netzbetreibers zur Nachladeinfrastruktur.

In einem letzten Schritt werden die CO₂-Emissionen der einzelnen Technologien quantitativ bestimmt. Die Effekte auf die Emission von Schadstoffen werden zudem im Zuge der Technologiebeschreibungen erläutert.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, eine Technologieempfehlung für die Ausschreibung mit einheitlicher alternativer Antriebstechnologie zur Verfügung zu stellen. Sie soll es den Entscheidungsträgern des Aufgabenträgers ZSPNV Süd ermöglichen, die für das Pfalznetz optimale alternative Antriebstechnologie auszuwählen.

2 MARKTÜBERSICHT ANTRIEBSARTEN

2.1 MÖGLICHE TECHNOLOGIEN FÜR DAS PFALZNETZ

Das Pfalznetz umfasst im ab 2024 neu vergebenen Los 1 insgesamt sieben Nahverkehrslinien, auf denen 50 bis 60 Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Grundsätzlich bieten sich dafür folgende technologische Optionen an:

- Weiterbetrieb mit klassischen Dieselfahrzeugen
 - Referenzfall als Basis für Kostenvergleich
 - Einsatz ohne zusätzliche Infrastruktur möglich
- Einsatz klassischer Elektrofahrzeuge
 - Streckenelektrifizierung des Gesamtnetzes erforderlich
- Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge
 - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Energiespeicher
 - Nachlade-Infrastruktur erforderlich (vorhandene Oberleitung und zusätzliche Ladeabschnitte bzw. -stationen)
- Oberleitungs-/ Diesel-Hybridfahrzeuge (sog. Dual-Mode-Fahrzeuge)
 - Fahrzeugausrüstung ohne elektrischen Energiespeicher
 - Einsatz ohne zusätzliche Infrastruktur möglich
- Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge
 - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb und Energiespeicher sowie Dieselmotor
 - Nachlade-Infrastruktur erforderlich (vorhandene Oberleitung und zusätzliche Ladeabschnitte)
- Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge
 - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb und Energiespeicher sowie Brennstoffzelle
 - Wasserstoff-Tankinfrastruktur und -logistik erforderlich

Aufgrund der zu hohen Kosten für eine Gesamtelektrifizierung des Netzes und die daraus resultierende geringe Wahrscheinlichkeit der Umsetzung ist eine Betrachtung des Einsatzes klassischer Elektrofahrzeuge kein Untersuchungsgegenstand.

Die vorliegende Studie vergleicht in Abstimmung mit dem Auftraggeber, dem Zweckverband Schienenpersonennahverkehr Rheinland-Pfalz, die verschiedenen Technologien auf Basis einer einheitlichen Fahrzeuggröße von ca. 145-170 Sitzplätzen.

Hinweis:

Im Rahmen dieser Studie wird der Begriff „Batterie“, der allgemein nur einen nicht wieder aufladbaren chemischen Energiespeicher beschreibt, entsprechend allgemeiner Gepflogenheiten als Synonym für den wieder aufladbaren „Akkumulator/ Akku“ verwendet.

2.2 FAHRZEUG- UND ANLAGENKONZEPTE FÜR DEN SPNV

2.2.1 Dieseltriebwagen (DMU)

Klassische Dieseltriebwagen mit geringer Leistung (bis max. 1 MW) stellen den Stand der Technik im Nahverkehr auf Nebenbahnen dar. Sie verfügen über meist mehrere kompakte und als gesamte Einheit schnell austauschbare Traktionsanlagen bestehend aus Motor, Getriebe, Kühlung etc., die in sogenannten PowerPacks zusammengefasst sind.

Funktionsweise Klassischer Dieseltriebwagen als Bestands- bzw. Referenzfahrzeug



Abb. 2-1 Antriebsstrang dieselmechanisch (schematisch)

Traktion:

Die Traktionsenergie wird vom Dieselmotor über einen mechanischen (in Einzelfällen auch elektrischen) Antriebsstrang zum Rad übertragen.

Bremsen:

Die Bremsenergie wird durch verschleißfreie Retarder (in Einzelfällen bei elektrischem Antriebsstrang auch Bremswiderstände) in Wärme gewandelt bzw. durch mechanische Bremsen aufgebracht. Die Wiederverwendung der Bremsenergie durch Speicherung ist nicht möglich.

Betrieblich bietet die Technologie Vorteile. Eine hohe Reichweite von über 1000 km zwischen dem Tanken und eine flächendeckend vorhandene, technologisch einfache und kostengünstige Tankinfrastruktur ermöglichen einen flexiblen Einsatz auf allen Strecken. Dies gilt auch bei Veränderungen im Liniennetz, bei einer Umsetzung in andere Netze aufgrund von Betreiberwechseln sowie für Umleitungen/ Linienkürzungen bei Baustellen.

Die technologisch einfache Umsetzung des Antriebes im Fahrzeug ermöglicht es außerdem, kurze und leichte Fahrzeuge zu bauen sowie niedrige Streckenklassen zu befahren. Besonders auf Nebenbahnen sind die Streckenklassen A (Radsatzlast < 16 t/Radsatz) und B (Radsatzlast < 18 t/Radsatz) anzutreffen. Kurze Fahrzeuge mit geringer Sitzplatzkapazität können vor allem auf wenig ausgelasteten Strecken die Betriebskosten senken. Die geringe Masse und der daraus folgend niedrigere Energiebedarf sowie weniger Drehgestelle und Traktionsanlagen (günstigere Instandhaltung) führen im Vergleich zu längeren Fahrzeugen zu geringeren Betriebskosten. Zudem können kurze Bahnsteiglängen eingehalten werden.

Größter Nachteil sind die Emissionen von Schadstoffen wie Stickoxiden (NOx) und Kleinstpartikeln (Feinstaub/ PM) sowie des klimaschädlichen Gases CO₂. Werden ab 2019 Neufahrzeuge in Betrieb genommen, so müssen diese den EU- Emissionsstandard Stage V erfüllen [1]. Dieser reduziert die Schadstoffemissionen erheblich verglichen mit Fahrzeugen mit Betriebsbeginn vor 1999 (Gültigkeitsbeginn des Emissionsstandards Stage 1).

Die Emission von CO₂ ist jedoch ausschließlich von der Verbrauchsmenge des Kraftstoffs abhängig. In diesem Bereich sind bei heutigen Dieselmotoren bereits nahezu alle physikalischen Grenzen ausgeschöpft, deshalb kann allenfalls von einer begrenzten Reduzierung der CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Neufahrzeugen ausgegangen werden. Hinzu kommen erheblich Schallemissionen, vor allem im Beschleunigungsvorgang. Verursacht werden diese durch erhöhte Drehzahlen der Dieselmotoren. Auch im Stillstand werden die tieffrequenten Motorengeräusche gegebenenfalls als störend wahrgenommen, ein Abschalten der Motoren ist aber häufig wegen der weiter notwendigen Heizung/Klimatisierung nicht möglich.

Fahrzeugbeispiele Dieseltriebswagen



Abb. 2-2 Beispiel Bestandsfahrzeug Siemens Desiro Classic, Baureihe 642

Foto: Professur für Elektrische Bahnen, Hans-Jochen Kriesel

Der Fahrzeugtyp steht beispielhaft für mehrere Bestands-Fahrzeugtypen verschiedener Hersteller, wie diese in vielen Dieselnetzen (u.A. auch im Pfalznetz) im Einsatz stehen. Sie wurden ab Ende der 1990er-Jahre bis ins neue Jahrtausend hinein in mittleren dreistelligen Stückzahlen je Baureihe beschafft. Die Fahrzeuge bieten noch ausreichend guten Fahrgastkomfort (Laufruhe, Klimaanlage, Barrierefreiheit), bei einem weiteren mehrjährigen Einsatz bietet sich jedoch eine Fahrgastraumauffrischung (Redesign) an. Sie erfüllen noch keinen EU-weit gültigen Emissionsstandard.

Ein Einsatz für mindestens eine Hauptuntersuchungsperiode (8 Jahre) ist technisch gut möglich.



Abb. 2-3 Beispiel Neufahrzeug Alstom Lint 54, Baureihe 622

Foto: bahnbilder.de, Hans-Peter Kurz

Neufahrzeuge in klassischer Dieseltriebwagen-technik sind weiterhin beziehbar. Auf dem deutschen Markt bieten aktuell Alstom mit der Lint-Fahrzeugplattform sowie Pesa mit der Link-Plattform solche Triebwagen in ein- bis dreiteiliger Ausführung an. Die Sitzplatzanzahl variiert dabei zwischen ca. 70 (Einteiler) bis ca. 300 (Dreiteiler). Sie erfüllen die aktuellen Emissionsstandards, die für eine Zulassung in Deutschland Voraussetzung sind (EU Standard Stage IIIB bzw. V). Die üblichen Komfortmerkmale von modernen Schienenfahrzeugen sind vorhanden.

2.2.2 Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU)

Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge sind klassische Elektrotriebwagen, die um einen energiereichen chemischen Energiespeicher erweitert wurden. Dieser kann bei Fahrt und im Stand an der Oberleitung geladen werden und stellt auf oberleitungsfreien Abschnitten die gesamte benötigte Energie (Traktion, Hilfsbetriebe, Heizung bzw. Klimatisierung) für das Fahrzeug zur Verfügung. Bei vorhandener Elektrifizierung wird die Oberleitung wie bei einem Elektrotriebzug als Energiequelle genutzt. Bei Elektrifizierungsperspektiven

zu befahrender Strecken ist die Technologie zudem aufwärtskompatibel, da die Oberleitung dann auch dort zum Fahren und Laden genutzt werden kann.

Herausforderung ist, ausreichend Energieinhalt speichern zu können, um auch größere oberleitungslose Distanzen (40 – 80 km) zu überbrücken. Die Fahrzeughersteller setzen aktuell auf drei verschiedene Zelltechnologien (Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide NMC, Lithium-Titanat-Oxid LTO, Lithium-Eisen-Phosphat LFP), die sich in Energiedichte (Energieinhalt pro Masse bzw. pro Volumen), Leistungsfähigkeit beim Entladen bzw. Laden (Lade- und Entladeleistung, ausgedrückt in der C-Rate), Alterungsverhalten (Lebensdauer) sowie Beschaffungskosten je Kilowattstunde (kWh) Energieinhalt unterscheiden.

Funktionsweise Klassischer Elektrotriebzüge als Ausgangsbasis für den Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid sowie den Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid



Abb. 2-4 Antriebsstrang klassischer elektrischer Elektrotriebzug (schematisch)

Traktion:

Die Traktionsenergie wird aus der Oberleitung über Stromabnehmer, Transformator und Stromrichter zu den elektrischen Fahrmotoren übertragen. Die kontinuierliche, leistungsfähige Energieversorgung aus der Oberleitung ermöglicht hohe Geschwindigkeiten, schnelle Beschleunigung und geringe Traktionsenergiekosten.

Bremsen:

Beim Bremsen kann das Fahrzeug die Bremsenergie durch die als Generator arbeitenden Fahrmotoren wiedergewinnen/rekuperieren, diese in die Oberleitung zurückspeisen und so anderen Fahrzeugen bereitstellen. Ein Teil der Bremsenergie wird direkt für die Verbraucher (maßgeblich Heizung, Klimaanlage) im Fahrzeug weiterverwendet.

Oberleitungsbetrieb

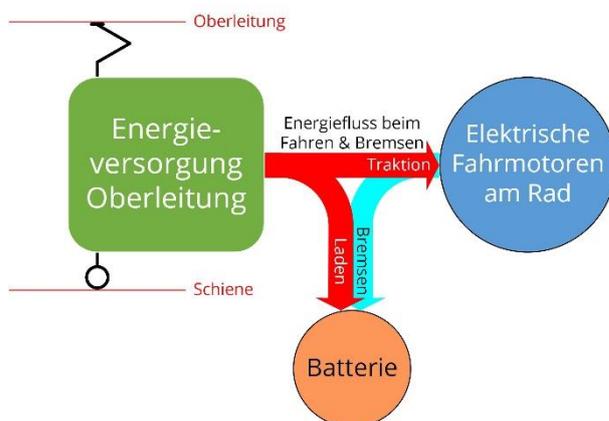


Abb. 2-5 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

Traktion:

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid nicht wesentlich vom klassischen Elektrotriebzug. Erweitert wird dieser jedoch um das Laden der Batterie aus der Oberleitung sowohl im Stillstand als auch in Fahrt.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird jedoch bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur auf dem Fahrzeug nicht benötigte Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist.

Batteriebetrieb

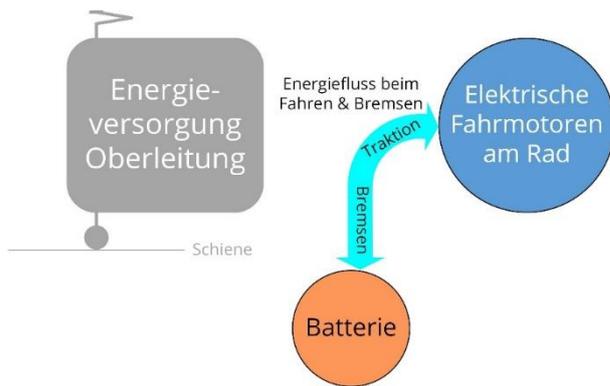


Abb. 2-6 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)

Traktion:

Der Energiebedarf für Traktion sowie für alle weiteren Verbraucher im Fahrzeug wird aus der Batterie gedeckt. Die Reichweite hängt dabei maßgeblich von Topografie, Geschwindigkeits- und Fahrplanprofil, Außentemperaturen, Fahrzeugmasse und batterie-spezifischen Größen ab.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden der Batterie bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nicht benötigte Energie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder in Reibungsbremsen verschleißbehaftet in Wärme gewandelt.

Die Oberleitungs-/ Batterie-Hybridtechnologie lässt höhere Fahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungswerte erwarten als diese mit Dieseltriebwagen möglich sind. Dies gilt insbesondere im Betrieb unter Oberleitung, da die Fahrzeuge hier als klassische Elektrotriebwagen verkehren. Da sich die Beschleunigungszeiten verkürzen können, wird eine Teilnahme am dichten Takt auf elektrifizierten Hauptstrecken möglich. Gegebenenfalls gibt es ebenso Fahrzeitverkürzungen auf im Batteriebetrieb befahrenen Abschnitten.

Die Ladeleistung der Fahrzeuge liegt im Stillstand bei ca. 1,0 ... 1,2 MW pro Stromabnehmer. Sie wird dabei durch den maximal möglichen Stillstandsstrom von 80 A [2] über die Kontaktstelle Oberleitung-Stromabnehmerschleifleiste begrenzt, da diese sonst zu heiß wird. Je nach Batterietechnologie und deren maximal möglicher Ladeleistung kann die Leistung in Fahrt jedoch deutlich höher liegen. Es sind im Stillstand so Ladezeiten für das volle Aufladen der Batterie von 10 bis 15 min realistisch, in Fahrt kann diese geringer ausfallen.

Neue Anforderungen ergeben sich bei der Betriebsumstellung auf Fahrzeuge solchen Typs durch höhere zu erwartende Radsatzlasten. Die ca. 10 % höhere Masse durch die Ergänzung der Batterien im Vergleich zum Basiselektrofahrzeug sowie die ohnehin höhere Masse der elektrischen Komponenten (insbes. Trafo & Stromrichter) im Vergleich zum Dieseltriebwagen verursachen eine insgesamt erhöhte Fahrzeugmasse.

Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid



Abb. 2-7 Beispiel Siemens Cityjet Eco

Foto: Siemens AG

Das Fahrzeug existiert bereits als Prototyp und wird in Zusammenarbeit mit den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB AG) zurzeit erfolgreich erprobt. Es wurde aus einer laufenden Produktionslinie klassischer Elektrotriebwagen der Desiro Mainline Fahrzeugplattform für die ÖBB AG entnommen. Diese Plattform ist für Deutschland nicht mehr bei Ausschreibungen verfügbar. Als Ersatz wird von Siemens die Fahrzeugplattform Mireo in einer Variante „Plus B“ angeboten. Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo-Plattform befinden sich derzeit im Zulassungsverfahren für die S-Bahn Rhein-Neckar [3].

Es ist 75,2 m lang und verfügt über 244 Sitzplätze. Als Batterietechnologie werden LTO-Zellen eingesetzt. Die regelmäßige Reichweite wird vom Hersteller mit bis zu 80 km angegeben [4]. Dies ist bei einem Batterieenergieinhalt der verwendeten Batterietechnologie von aktuell 528 kWh [5] realistisch. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batteriebetrieb 120 km/h, unter Oberleitung 140 km/h [5].



Abb. 2-8 Beispiel Bombardier Talent 3 BEMU

Foto: Bombardier

Das Fahrzeug existiert bereits als Prototyp, die Entwicklung wurde mit Fördergeldern des Bundes unterstützt. Es wurde aus einer laufenden Produktionslinie klassischer Elektrotriebwagen für Baden-Württemberg entnommen. Die Zulassung ist bisher nicht erfolgt, ein Ersteinsatz im Probebetrieb soll für eine Tochter der DB AG in der Alb-Bodensee-Region noch in 2019 erfolgen [6].

Es ist 56,2 m lang und verfügt über 155 Sitzplätze. Als Batterietechnologie werden NMC-Zellen eingesetzt. Die regelmäßige Reichweite wird vom Hersteller mit bis zu 40 km angegeben [6]. Dies ist bei einem Batterieenergieinhalt der verwendeten Batterietechnologie von aktuell 300 kWh realistisch [7] (bis 440 kWh nach [7] technisch möglich). Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batteriebetrieb 120 km/h, unter Oberleitung 160 km/h.



Abb. 2-9 Beispiel Stadler Flirt Akku

Foto: Stadler

Das Fahrzeug existiert bereits und ist eine Eigenentwicklung der Firma Stadler. Laut Medienmitteilung des Herstellers verfügt das Fahrzeug bereits über eine Zulassung für den Personenverkehr [8]. Die Entwicklung wurde mit Fördermitteln des Bundes unterstützt.

Es ist 58,6 m lang und verfügt über 154 Sitzplätze. Nach Aussagen des Herstellers sind sowohl LFP- als auch LTO-Zellen für die Installation im Fahrzeug geeignet. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batterie- und Oberleitungsbetrieb 140 km/h [8].

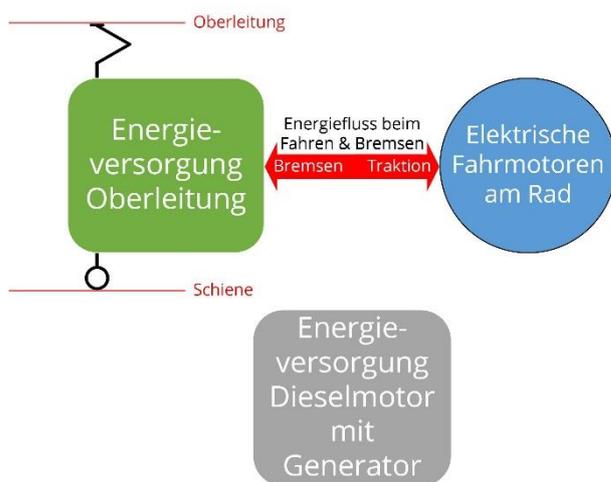
2.2.3 Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode)

Bei Oberleitungs-/ Diesel-Hybridfahrzeugen handelt es sich um Züge, die sowohl als vollwertiges Oberleitungsfahrzeug als auch als vollwertiges Dieselfahrzeug eingesetzt werden können. Sie verfügen über keinen elektrischen Traktionsenergiespeicher und kommen ausschließlich mit langjährig erprobten Standardkomponenten aus. Durch die in Teilen doppelte Fahrzeugausrüstung für zwei getrennte Systeme haben die Fahrzeuge eine hohe Masse (bis zu Streckenklasse C2 mit bis zu 20 t Radsatzlast).

Betrieblich bieten die Fahrzeuge jedoch Vorteile bei Linienläufen mit Streckenabschnitten in beiden Systemen, da ein Übergang fließend, mit marginalem Zeitaufwand und hoher Flexibilität durchgeführt werden kann. Eine Reichweiteneinschränkung gibt es nur durch die Menge getankten Dieselkraftstoffs, die jedoch für Fahrzeugumläufe meist unkritisch ist.

Funktionsweise Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode)

Oberleitungsbetrieb



Traktion:

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid nicht vom klassischen Elektrotriebwagen.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren und diese in die Fahrleitung zurückspeisen. Ein Teil der Bremsenergie wird direkt für alle Verbraucher (insbesondere Heizung, Klimaanlage) im Fahrzeug weiterverwendet.

Abb. 2-10 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

Der Fahrzeugtyp behält die Dieselantriebstechnik auf den nicht elektrifizierten Strecken bei, was ggf. zu einer ablehnenden Haltung bei Trägern öffentlicher Belange und Anwohnen führt. Die CO₂-Emissionen steigen durch die höhere Fahrzeugmasse für die Doppelausstattung der zwei Systeme und das dadurch längere Fahrzeug; die Schadstoffemissionen entsprechen bei Neufahrzeugen jedoch dem aktuellen Emissionsstandard Stage V. Eine Speicherung rekuperierter elektrischer Bremsenergie ist mangels Energiespeicher nicht möglich, lediglich die direkte Nutzung für Verbraucher wie Heizung und Klimaanlage ist vorgesehen.

Dieselbetrieb

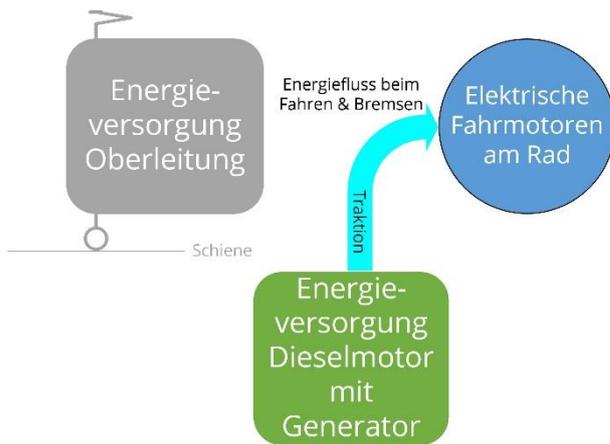


Abb. 2-11 Antriebsstrang Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Dieselbetrieb (schematisch)

Traktion:

Die Fahrzeuge sind auf der Basis klassischer Elektrotriebzüge aufgebaut. Sie führen für den Betrieb auf nichtelektrifizierten Strecken Dieselmotor-Generator-Einheiten also mobile Bereitsteller elektrischer Energie mit. Dies entspricht dem Prinzip der die-selektischen Leistungsübertragung leistungsstärkerer Dieseltriebfahrzeuge.

Der Energiebedarf für Traktion sowie für die weiteren Verbraucher im Fahrzeug wird aus mehreren (meist auf dem Dach angebrachten) Dieselmotor-Generator-Einheiten und elektrischer Leistungsübertragung gedeckt.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Ein Teil der wiedergewonnenen Energie wird direkt für die Verbraucher im Fahrzeug weiterverwendet. Nicht benötigte Bremsenergie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder verschleißbehaftet mit Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode)



Abb. 2-12 Beispiel Stadler Flirt für Greater Anglia, GB

Foto: Stadler



Abb. 2-13 Unterbringung der Komponenten der zweiten Traktionsart in weiterem Wagenkasten

Quelle: bahnonline.ch, Jürg D. Lüthard

Der Fahrzeugtyp existiert bereits als Serienfahrzeug und durchläuft zurzeit die Zulassungsprozesse in Großbritannien, ein Einsatz ist noch in 2019 geplant. Es basiert auf der Fahrzeugplattform Flirt, die auch in Deutschland angeboten wird.

Für die Umsetzung des Dual-mode-Betriebes wird ein klassischer Elektrotriebzug um einen kurzen Wagenkasten ergänzt, in dem die Dieselmotor-Generatorsätze zur Bereitstellung elektrischer Energie untergebracht sind. Das Konzept repräsentiert eine der beiden Einbaumöglichkeiten für leistungsstarke Dieselmotor-Generatorsätze. Sie wird in Großbritannien vor allem deshalb notwendig, weil das zulässige Fahrzeugumgrenzungsprofil deutlich kleiner als in Mitteleuropa ist. Eine Unterbringung der Diesel-Antriebsanlagen auf dem Dach scheidet dort aus.

Die Technologie ermöglicht grundsätzlich auch den nachträglichen Austausch der Dieselmotor-Generatorsätze durch Batterien zur Gestaltung eines Oberleitungs-/ Batterie-Hybridzuges.



Abb. 2-14 Beispiel Alstom Coradia Polyvalent

Quelle: Par Yoyo697 — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56332543>

Der Fahrzeugtyp wird in Frankreich in verschiedenen Ausführungen bereits seit mehreren Jahren im Regional- und Fernverkehr eingesetzt. Verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen in Länge, Ausstattung und Leistung sind möglich.

Nahezu die gesamte Antriebstechnik bis auf die elektrischen Fahrmotoren ist auf dem Dach des Fahrzeugs untergebracht, auch die Dieselmotor-Generator-Sätze für den Dieselbetrieb. Die Fahrzeuge existieren in vier- und sechsteiliger Ausführung mit ca. 220 bzw. ca. 350 Sitzplätzen. Die Fahrzeuge haben im Dieselbetrieb eine geringere Leistung (ca. 50 % thermisch) als elektrisch, erreichen jedoch in beiden Betriebsmodi 160 km/h Höchstgeschwindigkeit [9].

Die Fahrzeugtechnologie kommt in Europa vor allem in Frankreich bereits seit mehreren Jahren zur Anwendung. Dort sind mehr als 150 Fahrzeuge des Typs Alstom Coradia Polyvalent (Markenname Régionalis) im Einsatz, die als Oberleitungs-/ Diesel-Hybride ausgeführt sind. Die Fahrzeuge sind aktuell nur für den Betrieb mit einer Wechselspannung von 25 kV 50 Hz, einer Gleichspannung von 1,5 kV und den Dieselbetrieb ausgelegt. Fahrzeuge für den grenzüberschreitenden Verkehr in die Schweiz, dessen Oberleitung wie in Deutschland mit 15 kV 16,7 Hz gespeist wird, jedoch ohne Dieselmotor, werden bereits für den Schweizer Einsatz gebaut und könnten technologisch auch als Oberleitungs-/ Diesel-Hybride konzipiert werden.

Die Fahrzeugtechnologie ist unabhängig von Entwicklungen am Batteriemarkt. Ein nachträglicher Ersatz der Dieselmotor-Generator-Sätze durch chemische Energiespeicher ist bei Verfügbarkeit leistungsfähigerer Batterien (v. A. Reichweite) jedoch technisch möglich.

Eine Zulassung für ein Fahrzeug dieser Technologie liegt in Deutschland bisher nicht vor, jedoch hat die Verbandsversammlung des Zweckverbandes Schienenpersonennahverkehr Rheinland-Pfalz vom 17.05.2019 die finanzielle Unterstützung entsprechender Entwicklungs- und Zulassungsbestrebungen der Région Grand Est, Frankreich beschlossen [10].

2.2.4 Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge

Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge entsprechen einem Hybridkonzept, wie man es aus dem Automobilbau als Plug-In-Hybrid kennt. Ein elektrischer Antriebsstrang wird durch Dieselmotor-Generator-Einheiten mit elektrischer Energie versorgt. Der Dieselmotor kann einen Teil des Leistungsbedarfes des Zuges decken (Wegfall einer oder zweier Dieselmotor-Generator-Sätze beim Umbau auf Hybrid). Äquivalent dazu befindet sich eine Batterie im Fahrzeug, die den verbleibenden Leistungsbedarf deckt. Grundbedingung ist, dass die Batterie jederzeit ausreichend geladen ist, um selbst zum Traktionsleistungsbedarf des Fahrzeugs beitragen zu können. Die Batterie kann dafür vor oder während

einer Fahrt durch Einspeisung von außen (Oberleitung, Stecker) oder den Dieselmotor nachgeladen werden. Im Zusammenspiel von Dieselmotor und Batterie steht so immer genügend Traktions- und Nebenverbraucherleistung zur Verfügung. Je nach von außen nachgeladener Energiemenge wird ein entsprechender Anteil des Energiebedarfes im Laufe einer Zugfahrt aus der Batterie bzw. aus der Dieselmotor-Generator-Einheit bereitgestellt.

Diesel-/ Batterie-Hybrid

Oberleitungsbetrieb

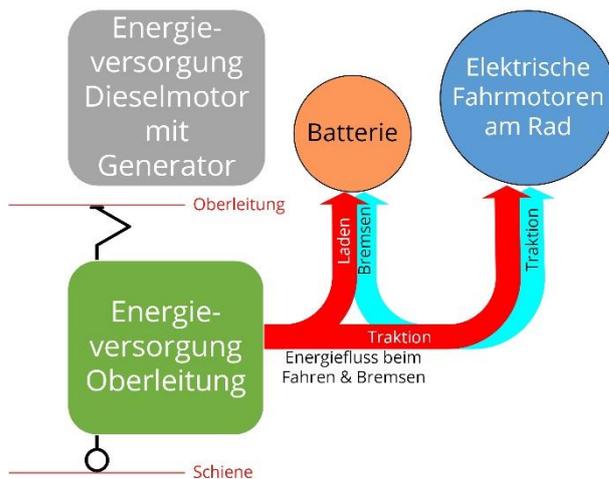


Abb. 2-15 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

Traktion:

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Diesel-/ Batterie-Hybrid nicht wesentlich vom klassischen Elektrotriebzug. Erweitert wird dieser jedoch um das Laden der Batterie aus der Oberleitung sowohl im Stillstand als auch in Fahrt.

Das Konzept eignet sich besonders für den Umbau von bestehenden Dieseltriebzügen. Diese haben meist wenig Reserve für zusätzliche Massen im bzw. am Fahrzeug. Ein Transformator zum Betrieb an der Oberleitung mit 15 kV und 16,7 Hz, wie in Deutschland üblich, hat eine hohe Masse. Zur Massereduzierung kann eine geringere Leistung beitragen. Diese ist dann nur zum Nachladen ausreichend, nicht jedoch gleichzeitig als Traktionsenergiequelle während der Fahrt. Je nach Umsetzung des Konzepts kann es deshalb vorkommen, dass auch bei Fahrt mit angelegtem Stromabnehmer unter Oberleitung ein Teil des Traktionsleistungsbedarfs aus Batterie oder Dieselmotor bereitgestellt werden muss.

Das Konzept kann außerdem vorsehen, die Batterie über eine leistungsfähige Steckertlösung aufzuladen. Sie kann dann jedoch ausschließlich im Stand wieder aufgeladen werden, eine Fahrt während des Ladens ist nicht möglich. Diese Einschränkung kann betriebliche Nachteile (Standzeit für Ladung, wenig Reichweite) hervorrufen.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist, verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt..

Diesel-/ Batterie-Hybridbetrieb

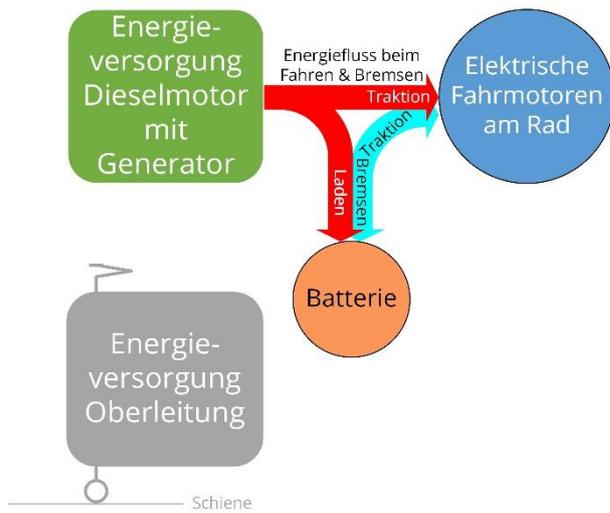


Abb. 2-16 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Diesel-/ Batterie-Hybrid-Betrieb (schematisch)

Traktion:

Die Fahrzeuge führen für den Betrieb auf nichtelektrifizierten Strecken Dieselmotor-Generator-Einheiten also mobile Bereitsteller elektrischer Energie mit. Dies entspricht dem Prinzip der dieselektrischen Leistungsübertragung leistungsstärkerer Dieseltreibfahrzeuge. Sie decken mit der Batterie gemeinsam den Traktions- und Zusatzleistungsbedarf des Fahrzeugs und können so meistens im optimalen Drehzahlbereich betrieben werden, da die Batterie wechselnde Leistungen bereitstellt, während der Motor die Grundlast trägt. Wenn keine Ladeinfrastruktur vorhanden ist, dienen die Dieselmotor-Generator-Sätze auch als Nachlademöglichkeit für die Batterie, allerdings mit ungünstigem Wirkungsgrad.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

Batteriebetrieb

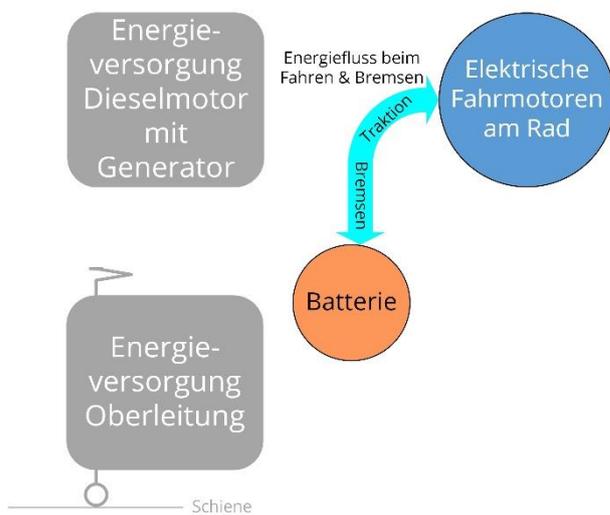


Abb. 2-17 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)

Traktion:

Für Abschnitte, auf denen Geräusch- und Schadstoffemissionen als besonders unerwünscht eingestuft werden (Bahnhofsauflahrten, Ortsdurchfahrten, Nähe Krankenhäuser, Schulen, etc.), kann auf den Dieselmotor verzichtet und nur aus der Batterie gefahren werden. Die Traktionsart wird vor allem durch die Energiemenge der Batterie begrenzt, ggf. wird das Beschleunigungsverhalten im oberen Geschwindigkeitsbereich durch die Batterieleistung begrenzt.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur nicht benötigte Energie wird verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch mechanische Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

Diesel-/ Batterie-Hybride sind vor allem für Umbaukonzepte interessant, ein Neubau von Fahrzeugen ist bei den in Deutschland vertretenen Herstellern nicht angekündigt. Ziel des Umbaus ist vor allem eine mögliche Weiternutzung noch nicht am Lebensdauerende befindlicher Dieseltreibwagen, die bei Ausschreibungen durch den Verlust von Verkehrs-

verträgen freigesetzt werden. Aufgabenträger können für Neuverträge heute die Rekupe-
rationsfähigkeit der Fahrzeuge, also die Möglichkeit der Rückgewinnung der beim Bremsen
freiwerdenden Energie, vorschreiben. Reine dieselmechanisch angetriebene Fahr-
zeuge können dies technologisch nicht, sodass sie sich für eine Bewerbung ohne Umbau
nicht eignen.

Fahrzeugbeispiele Diesel-/ Batterie-Hybrid



Abb. 2-18 Beispiel DB Erzgebirgsbahn EcoTrain
mit Oberleitungs-Nachladung (Fotomontage)

Fotomontage: Falk Angermann, Professur für Elektrische Bahnen

Der Fahrzeugtyp steht beispielhaft für ein solches Umbaukonzept, bei dem Fahrzeuge der Plattform
Siemens Desiro Classic bei der DB Erzgebirgsbahn unter dem Produktnamen EcoTrain zu Diesel-/ Bat-
terie-Hybriden umgebaut wird. Der Hybridantrieb wird technologisch umgesetzt, indem ein neues
PowerPack mit einem Dieselmotor-Generator-Satz und integriertem elektrischem Fahrmotor einen
der Dieselmotoren ersetzt. Der zweite Dieselmotor wird durch einen Batteriesatz und einen weiteren
elektrischen Fahrmotor ersetzt. Der Dieselmotor hat eine ähnliche Leistung wie die vorher verbau-
ten Anlagen. Der Energiegehalt der Lithium-Ionen-NMC-Batterien beträgt ca. 150 kWh.

Zur Nachladung der Batterie wird in einer ersten Stufe des Projekts eine Steckerlösung auf Basis ei-
nes bahnzugelassenen Standards (UIC 552) einge-
setzt, wenn nötig kann zudem mit dem Dieselmotor nachgeladen werden. In einer zweiten Stufe soll
das Fahrzeug einen Stromabnehmer zur Nachla-
dung der Batterie aus der Oberleitung erhalten,
der im Fahrzeug für die Steckerladung integrierte
Transformator ist dafür bereits ausgelegt.

2.2.5 Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU)

Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge wandeln in einer Brennstoffzelle im Wasserstoff
gespeicherte Energie in Kombination mit Luftsauerstoff im Prozess der sogenannten kal-
ten Verbrennung in elektrische Energie um. Diese wiederum wird dann in einem Elektro-
motor in mechanische Energie umgewandelt. Abgas ist Wasserdampf bzw. kondensiertes
Wasser. Da in einem elektrischen Netzwerk immer eine ausgeglichene Energiebilanz zwi-
schen Leistungsangebot und -bezug herrschen muss, Brennstoffzellen jedoch zur Redu-
zierung der Alterungserscheinungen immer möglichst in einem konstanten Leistungsbe-
reich belastet werden [11], muss für den ständig schwankenden Leistungsbedarf ein Zwi-
schenspeicher integriert werden. Insbesondere bei Traktionsspitzen übernimmt dieser
die wechselnden Lasten. Hierzu verfügt der Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid über Batterien.

Leistungsfähige Brennstoffzellen sind für den nutzbaren Betrieb als Stapel aus mehreren
Zellen aufgebaut, von denen jede einzelne für sich eine Brennstoffzelle darstellt. Diese
Stapel werden Stacks genannt, die einzelnen Zellen sind darin in Reihe geschaltet. Die

Stapelung ist notwendig, um eine ausreichend hohe Spannung am Systemausgang des Stacks bereitstellen zu können. Eine Alterung tritt bei Brennstoffzellen maßgeblich an der protonenleitenden Membran im Innern der Zelle auf. Bei einer Instandhaltung werden deshalb vor allem die Zellmembranen überarbeitet bzw. getauscht, die Zellumgebung kann bestehen bleiben. Die Standdauer der Zellmembran wird im Sinne dieser Studie als Lebensdauer bezeichnet.

Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid

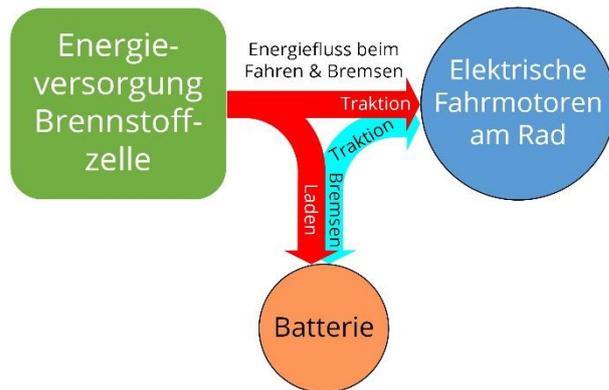


Abb. 2-19 Antriebsstrang eines Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid

Traktion:

Der Leistungsbedarf wird durch ein Zusammenspiel der Batterie und der Brennstoffzelle (BZ) gedeckt. Vor allem bei Leistungsspitzen für Beschleunigungsphasen werden dabei große Anteile aus der Batterie entnommen, da die Leistung der BZ kleiner ist als jene des Antriebes. In traktionsarmen Phasen wird die Batterie wieder aus der BZ aufgeladen. Der benötigte Wasserstoff wird in Tanks mitgeführt, die unter mehreren 100 Bar Druck stehen und den Wasserstoff so in großen Mengen speichern können.

Bremsen:

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nicht benötigte Energie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder in Reibungsbremsen verschleißbehaftet in Wärme gewandelt. Bei in Betrieb befindliche BZ lädt diese während des Bremsvorgangs die Batterie zudem weiter auf.

Fahrzeugbeispiele Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid



Abb. 2-20 Beispiel Alstom iLint

Foto: Stadler

Der Fahrzeugtyp ist seit 2018 im planmäßigen Fahrgasteinsatz mit zwei Vorserienfahrzeugen in Norddeutschland. Er basiert auf der Dieseltriebwagenplattform Coradia Lint der Firma Alstom. Die PowerPacks des Fahrzeugs wurden durch Elektromotoren ersetzt. Die Beschleunigungswerte entsprechen annähernd jenen von Dieseltriebzügen.

Das Fahrzeug verfügt über 176 Sitzplätze, ist 54,3 m lang und hat eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Die elektrische Energie stellen zwei PEM Brennstoffzelleneinheiten (PEM – Proton Exchange Membrane Fuel Cell) auf dem Dach, jeweils bestehend aus mehreren Brennstoffzellenstacks, bereit.



Abb. 2-21 Beispiel Siemens Mireo Plus H (Fotomontage)

Foto: Siemens AG

Diese bringen in Zusammenspiel mit zwei Fahrzeugbatterien die nötige Traktionsleistung auf. Nach Herstellerangaben haben die Brennstoffzellen jeweils eine Leistung von 200 kW, der Energieinhalt der zwei Batterien liegt bei insgesamt 220 kWh. Ca. 260 kg_{netto} Wasserstoff sorgen für eine Reichweite im Bereich der Dieseltriebzüge zwischen 800 und 1000 km pro Tankfüllung. Eine Überarbeitung der Brennstoffzellenmembran hat nach Aussage des Fahrzeugherstellers nach 15.000 h (~20.000 h Betriebsstunden des Zuges) zu erfolgen, dies entspricht circa 4 bis 5 Jahren. Hersteller der Brennstoffzellen ist Hydrogenics.

Das Fahrzeugkonzept basiert auf der Mireo-Plattform der Firma Siemens. Ein Prototyp existiert bisher nicht, die Entwicklung der nötigen Brennstoffzellen ist jedoch mit dem vorgesehenen Hersteller Ballard bereits angestoßen. Als Wasserstofffahrzeug wird der Mireo in der Variante „Plus H“ angeboten. Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo-Plattform befinden sich derzeit im Zulassungsverfahren für die S-Bahn Rhein-Neckar [3].

Das Fahrzeug soll über zwei Traktionsanlagen mit den jeweils zugehörigen Batterien und Brennstoffzellen verfügen, 160 km/h erreichen und als 2-Wagen-Zug mit 120 bzw. 3-Wagen-Zug mit 165 Sitzplätzen angeboten werden und über bis zu 600 km bzw. 900 km Reichweite verfügen [12].

Angestrebt wird nach Aussage des Brennstoffzellenanbieters Ballard, die notwendige Überarbeitung der Brennstoffzellenmembran erst nach circa 30.000 h [11] (~40.000 h Betriebsstunden des Zuges), durchzuführen, dies entspricht 7 - 9 Jahren.



Abb. 2-22 Beispiel Stadler H₂-Triebzug Zillertalbahn, Österreich (Fotomontage)

Quelle: https://www.meinbezirk.at/tirol/c-lokales/infoveranstaltung-bzgl-zillertalbahn_a3182976

Der Fahrzeugtyp wird als Schmalspurfahrzeug für die Zillertalbahn in Österreich entwickelt. Er soll als vierteiliger Gliedertriebzug ausgeführt werden und ab 2020 für erste Testfahrten verfügbar sein, geplante Betriebsaufnahme ist im Jahr 2022.

Das Fahrzeug soll über vier Brennstoffzellen mit jeweils ca. 100 kW Leistung sowie über zwei Energiespeicher verfügen. Die Energiespeicher bestehen jeweils aus einer hybriden Struktur (Batterie plus Kondensator) mit ca. 80 bis 100 kWh Energieinhalt. Die Druckbehälter sollen ca. 150 kg_{netto} Wasserstoff mitführen können, sodass einmaliges Tanken pro Tag für den Fahrzeugumlauf ausreichend ist [13].

Das Fahrzeug ist für einen Einsatz im normalspurigen Eisenbahnnetz nicht geeignet, die Wasserstofftechnologie kann jedoch übertragen werden.

2.3 INFRASTRUKTURBEDARF DER EINZELNEN TECHNOLOGIEN

2.3.1 Dieseltriebwagen & Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid

Für die beiden Technologien wird davon ausgegangen, dass diese keine weitere Infrastruktur benötigen, da Tankstellen für die heutige Leistungserbringung im Netz mit Diesel bereits benötigt werden und vorhanden sind. Tankstellen finden sich in Saarbrücken, Kaiserslautern, Primasens Hbf, Neustadt und Karlsruhe. Gleiches gilt für die schon im Netz vorhandene Oberleitung. Diese wird ohne Ausbau als gegeben angenommen.

2.3.2 Oberleitungs-/ Batterie- & Diesel-/ Batterie Hybrid

Die Technologie der Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge benötigt zum Nachladen der Fahrzeugenergiespeicher Nachladeinfrastruktur. Dies gilt ebenso für einen wirtschaftlichen Betrieb der Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge. Dort könnte jedoch teilweise auf Ladeinfrastruktur verzichtet werden, wenn über den Dieselmotor geladen werden kann. Das vorhandene dichte Oberleitungsnetz (rund 60 % [14] aller deutschen Netzkilometer sind elektrifiziert) bietet neben der notwendigen Infrastruktur einen vorhandenen technischen, regulatorischen und normativen Rahmen, den auch die am Markt befindlichen Elektrotriebwagen mit und ohne Energiespeicher vollständig erfüllen. Die deutsche Bahnstromversorgung hat mit ca. 3.500 MW Erzeugerleistung ausreichend Leistungsreserve, um auch batterieelektrische Fahrzeuge im Stand und während der Fahrt unter Oberleitung aufladen zu können, außerdem kann die Energie mit 11 bis 12 ct/kWh [15] im zentralen Bahnnetz erheblich günstiger bezogen werden als aus dem Landesnetz (17 – 20 ct/kWh [16]).

Die Verfügbarkeit von Oberleitung als Lademöglichkeit charakterisiert auch das Netz in der vorliegenden Studie. Die Strecken abgehend von Kaiserslautern, Landstuhl, Neustadt, Karlsruhe und Saarbrücken haben dort bereits Zugang zum Oberleitungsnetz, wie die rot dargestellten Streckenabschnitte in Abb. 2-23 zeigen, sodass Oberleitungs-/ Batterie-Hybride dort geladen werden können. Die Streckenabschnitte Kaiserslautern – Landstuhl sowie Karlsruhe – Wörth können mit Speisung aus der Oberleitung befahren werden.

Eine Untersuchung der zu überbrückenden Distanzen zu den Endpunkten der einzelnen Linien zeigt jedoch, dass die Linien nicht ohne weitere Lademöglichkeit hin- und zurück durchgehend betrieblich stabil und bei wirtschaftlich tragbarer Lebensdauer der Batterien befahren werden können. Für die Linien Landau – Pirmasens sowie Winden – Bad Bergzabern gilt zudem, dass diese keinen Zugang zum elektrifizierten Netz haben. Dies würde sich erst durch eine Elektrifizierung der Strecke Wörth – Neustadt ändern.

Für die vorliegende Studie lag den Autoren eine Untersuchung der DB Energie GmbH vor. Dies Arbeit für die in Frage kommende Abschnitte und Bahnhöfe im Untersuchungsgebiet

des Pfalznetzes Umsetzungsmöglichkeiten von Ladeinfrastruktur mit konkreten Mengengerüsten und Kosten für verschiedene Stations-Leistungen der Anlagen sowie die Umsetzbarkeit inklusive Hürden heraus [17]. Randbedingung für die Untersuchung der DB Energie waren die Versorgung mit 15 kV, 16,7 Hz sowie Ladeleistungen von 2,5 und 5 MW. Angeschlossen wird eine solche Ladestation an die Landesenergieversorgung (50 Hz) am Mittelspannungsnetz. Sie besteht auf der Landesnetzseite aus einer Mittelspannungsschaltanlage und einem Transformator, der die Spannung heruntersetzt. Es folgt der Umrichter, der die 50 Hz zu 16,7 Hz Wechselspannung umformt. Im Anschluss an den Umrichter muss die Spannung auf die übliche Fahrleitungsspannung wieder mit einem Transformator heraufgesetzt werden und wird dann über eine Schaltanlage in die gleisnahe Ladeinfrastruktur eingespeist. In der Untersuchung der DB Netz AG wird dort von einer Ausführung ähnlich einer klassischen Oberleitungsanlage, die nur im Bahnhof errichtet wird, ausgegangen.

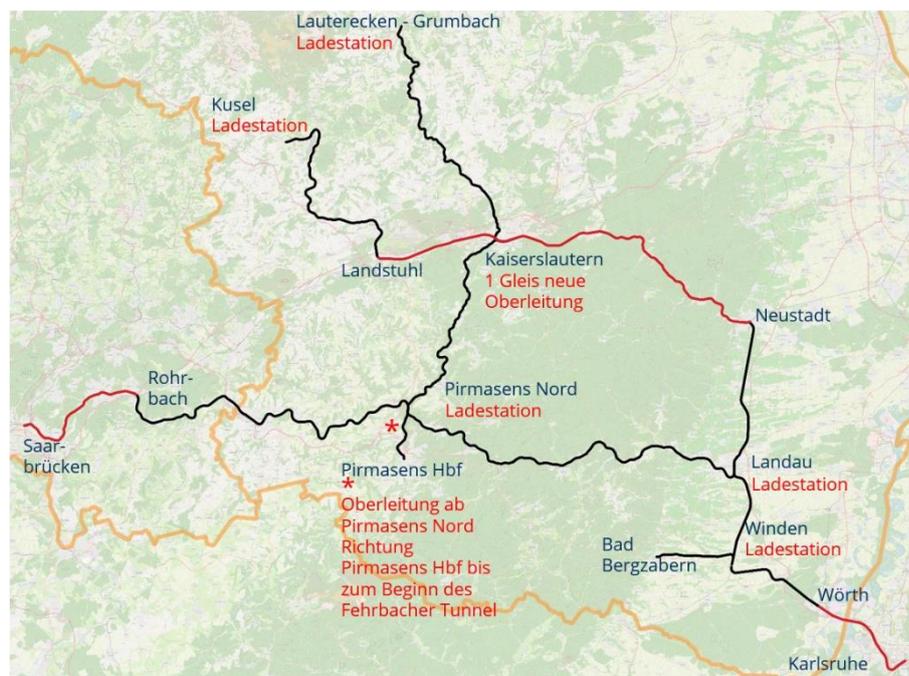


Abb. 2-23 Vorgesehene Ladeinfrastruktur, Los 1 Pfalznetz (rote Strecke: elektrifiziert)

Für den Betrieb des Loses 1 des Pfalznetzes notwendige Bahnhöfe bzw. Streckenabschnitte mit Ladeinfrastruktur wurden im Rahmen dieses Gutachtens identifiziert und mit den durch die DB Netz AG angegebenen Werten in die Kostenstruktur eingerechnet. Dazu wurde zunächst eine Plausibilitätsprüfung mit den an der Professur für Elektrische Bahnen verfügbaren Kostenstrukturen für Umrichter, Oberleitungsanlagen etc. der Untersuchung durchgeführt. Diese ergab, dass die Kostenstruktur in der Untersuchung der DB Netz AG als plausibel unter Berücksichtigung konservativer (also hoher) Preisannahmen anzusehen ist. In Abstimmung mit dem ZSPNV Rheinland-Pfalz Süd wird die Ladeinfrastruktur bei der Kostenberechnung mit einer hohen Ausstattungsgüte gewählt, sodass sie bis zu 5 MW Ladeleistung jederzeit zur Verfügung stellen kann.

Rahmenbedingungen für die Standortbestimmung der Ladeinfrastruktur waren:

- Die einzusetzenden Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge haben eine regelmäßige Reichweite im Batteriebetrieb von 50 bis 60 km (aktuell realistischer Wert), die auch bei gealterten Batterien überbrückt werden kann.
- Jede Linie im Los 1 soll stabil mit den Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen befahren werden können, sodass auch Linien eine Ladestation erhalten, die nicht bereits einen Endpunkt im elektrifizierten Netz aufweisen.
- Linienendpunkte mehr als 25 km (ergibt 50 km hin- und zurück) vom Ausgangsbahnhof entfernt werden zur Abwicklung eines stabilen Betriebs mit einer Nachlademöglichkeit ausgerüstet. Zum stabilen Betrieb zählen auch Faktoren wie mögliche Bauzustände, planmäßige- und außerplanmäßige Streckensperrungen mit eingekürztem Betrieb, Verstärkerleistungen, die ggf. nur einen der Endpunkte der Linie erreichen etc. (siehe Tabelle)
- Die Standorte werden so gewählt, dass sie keine langen Aufenthaltszeiten an Zwischenstationen der Linien nötig machen und so planmäßige Haltezeiten nicht erheblich verlängert werden müssen.
- Die Eingriffe in Landschaft und Lebensräume sollen so gering wie möglich sein.

Tabelle 2-1 Maßgebliche Längen der nichtelektrifizierten Abschnitte pro Linie [18]

Linie	Länge nichtelektrifizierter Abschnitt [km]
(Kaiserslautern –) Landstuhl – Kusel	28,7
Kaiserslautern – Lauterecken-Grumbach	33,3
Kaiserslautern – Pirmasens Hbf	27,2 (+ 6,8 Pirmasens Nord – Hbf)
(Saarbrücken –) Rohrbach – Pirmasens Hbf	43,2 (+ 6,8 Pirmasens Nord – Hbf)
Landau – Pirmasens Hbf	47,7 (+ 6,8 Pirmasens Nord – Hbf)
(Karlsruhe –) Wörth – Neustadt	44,9
Winden – Bad Bergzabern	10,0

Tabelle 2-1 zeigt, dass außer auf der Linie Winden – Bad Bergzabern bei allen anderen Linien unter den oben genannten Randbedingungen an jedem Endpunkt der Linie ein Nachlademöglichkeit vorhanden sein muss. Die Linienendpunkte an elektrifizierten Strecken (Kaiserslautern, Landstuhl, Saarbrücken, Rohrbach, Karlsruhe, Wörth, Neustadt) werden dabei als Lademöglichkeit als gegeben angenommen.

Als Bahnhöfe bzw. Linienendpunkte, an denen Ladeinfrastruktur nachgerüstet werden muss, verbleiben wie in Abb. 2-23 dargestellt Kusel, Lauterecken-Grumbach, Pirmasens Nord, Landau sowie Winden. Winden wird Bad Bergzabern vorgezogen, da hier bei einer perspektivischen Elektrifizierung von Wörth nach Neustadt die Ladeinfrastruktur ersetzt bzw. in die neue Oberleitungsanlage integriert werden kann. Außerdem ergibt dies eine

zusätzliche Nachlademöglichkeit auf der Linie Karlsruhe-Neustadt für betriebliche Sonderfälle.

Die Aufenthaltszeiten von aktuell drei bis vier Minuten in Pirmasens Nord reichen, da nahezu alle Fahrten Richtung Pirmasens Hbf durchgebunden sind, für eine vollständige Aufladung der Fahrzeuge nicht aus. Diese ist jedoch für eine Überbrückung der nicht elektrifizierten Abschnitte der Rückleistungen auf den Linien nach Rohrbach, Kaiserslautern und Landau notwendig. Deshalb ist eine längere Ladezeit in Linienstern Pirmasens umzusetzen. Hierzu bietet sich eine an die Ladeinfrastruktur in Pirmasens Nord anschließende Oberleitung auf dem von allen Linien befahrenen Streckenabschnitt Richtung Pirmasens Hbf an. Eine Berechnung der Fahrzeit von Pirmasens Nord bis zum Tunnelportal des neuen Fehrbacher Tunnels ergibt eine Fahrzeit von circa vier Minuten, sodass sich daraus durch die Durchfahrt an der Oberleitung in beide Richtungen eine gesamte zusätzliche Ladezeit von acht Minuten ergibt. Summiert mit den Aufenthaltszeiten in Pirmasens Nord ergeben sich ausreichende nachgeladene Energiemengen in den Batterien zur Überbrückung der nichtelektrifizierten Streckenabschnitte ab Pirmasens Nord. Eine technisch aufwändige Weiterführung der Elektrifizierung im Fehrbacher Tunnel (eingeschränkter Lichtraum) wird so zudem vermieden.

2.3.3 Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid

Brennstoffzellenfahrzeuge bieten ebenfalls die Möglichkeit, lokal vollständig emissionsfrei zu verkehren. Ihr Vorteil liegt dabei vor allem in den hohen Reichweiten ohne Notwendigkeit des Nachtankens oder der Nachladung. Größte Herausforderung ist aktuell die ausreichende und stabile Versorgung mit Wasserstoff. Es gibt dabei verschiedene Verfahren zur Herstellung, die entweder CO₂-neutral (Wasser-bzw. Chloralkali-Elektrolyse mit CO₂-neutralem Strom) oder CO₂-emittierend (Reformation von Erdgas/ anderen Kohlenwasserstoffen, Wasser- bzw. Chloralkali-Elektrolyse ohne CO₂-neutralen Strom) industriell Anwendung finden. Diese finden meist zentral in großen Anlagen mit hoher Ausstoßmenge Anwendung, Elektrolyseure für Wasser-Elektrolyse sind aber auch dezentral in kleinen Anlagen gleisnah realisierbar. Für die dezentrale Wasserstoffversorgung bietet sich in windreichen Regionen auch eine Sektorkopplung mit der Erzeugerwirtschaft der Windenergie als Speichermöglichkeit für überschüssige elektrische Energie an.

Für die Umsetzung im Pfalznetz konnte im Rahmen dieser Studie auf ein Konzept der Kooperationspartner eines Wasserstofffahrzeugherstellers zurückgegriffen werden. Dieses sieht vor, den Wasserstoff zentral in einer großindustriellen Anlage zusätzlich zum dort ohnehin benötigten Prozessgas Wasserstoff mit Chlor-Alkalie-Elektrolyse bzw. Dampfreaktion zu produzieren. Für die Aufbereitung als tankbares Gas soll eine entsprechende Anlage durch den Chemieparkbetreiber in [REDACTED] errichtet werden. Mit speziellen Hochdruck-LKW-Trailern (> 350 Bar bis 700 Bar Druck) wird das Gas auf dem Straßenweg mit perspektivisch geplanten CO₂-neutralen LKW zu den gleisnahen Tank-

stellen transportiert, wo nur noch Druckminderer bzw. Tankanlagen/ Dispenser vorhanden sind. Die vorgesehenen Hochdrucktrailer sind nach Aussage der konzepterstellenden Firma noch zu entwickeln, das gleiche gilt für mit Wasserstoff betriebene LKW. Ein Zeithorizont hierfür ist nicht bekannt. Es ist damit zu rechnen, dass die Belieferung zunächst mit Diesel betriebenen LKW und Trailern mit niedrigerem Druck (ca. 350 Bar) erfolgt. Die so verminderte Kapazität der Trailer führt zu häufigerer Belieferung der Tankstellen. Die häufigeren LKW-Fahrten lassen für diesen Zeitraum vorübergehend einen Anstieg der Kosten und des CO₂-Ausstoßes erwarten. Dies wird in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Die Prüfung der notwendigen Tankstellenstandorte muss maßgeblich betrieblich erfolgen, da die Reichweite der Fahrzeuge für einen Tagesumlauf in den überwiegenden Fällen ausreicht. Bei Prüfung der Umlaufpläne ist festzustellen (diese beschreiben, wann welches Fahrzeug wo ist bzw. welche Zugleistung es fährt und enthält auch Reinigungs- und Tankzeiten), dass nachts die Fahrzeuge heute überwiegend in Neustadt, Karlsruhe, Kaiserslautern, Pirmasens und Saarbrücken abgestellt werden, vereinzelt auch anderen Standorten. In der Nacht werden sie dort betankt.

Folgende Kriterien für eine Standortwahl wurden berücksichtigt:

- Es kommen nur Standorte in Frage, an denen Linien planmäßig enden bzw. beginnen, sodass keine Linienläufe gebrochen werden müssen oder nächtliche Überführungen entlang der Linie nicht erforderlich werden.
- Es sollten möglichst viele Tageseinsätze der Fahrzeuge am Standort beginnen bzw. enden, sodass in der Nachtpause die Fahrzeuge lokal betankt werden können.
- Die Standorte der Tankstellen sollten in der Nähe zur Herstellungsanlage liegen um die Überführungskosten und -risiken des Wasserstoffs zu minimieren.
- Die Umgestaltung der heutigen Umlaufpläne ist ggf. notwendig und zulässig, daraus kann ein Fahrzeugmehrbedarf resultieren. Dieser wird nicht mitbetrachtet.

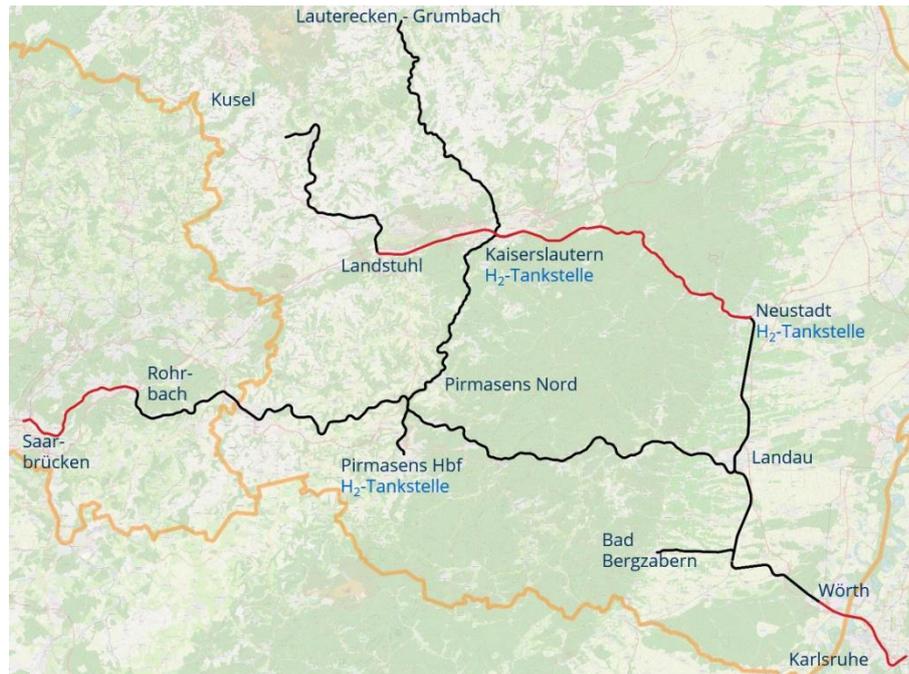


Abb. 2-24 Vorgesehene Wasserstoffinfrastruktur, Los 1 Pfalznetz

Das Ergebnis der Standortwahl ist in Abb. 2-24 dargestellt. Die Prüfung der Standorte ergab (ohne Berücksichtigung eines ggf. notwendigen geänderten Umlaufplans) geplante Tankstellenstandorte in:

- Kaiserslautern für die von dort ausgehenden Linien nach Kusel, Lauterecken-Grumbach sowie teilweise Pirmasens.
- Neustadt (Weinstraße) maßgeblich für die Linie Karlsruhe-Neustadt sowie Winden-Bad Bergzabern.
- Pirmasens Nord für von dort ausgehenden Linien nach Saarbrücken und Landau sowie teilweise Kaiserslautern.

Da die Fahrzeuge in den heutigen Umlaufplänen freizügig zwischen den Linien getauscht werden, ergeben sich ggf. auch Überschneidungen der für die Linie genutzten Tankstellen. Die Ortsauswahl entspricht jener eines Herstellers von Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeugen.

3 WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG

3.1 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

3.1.1 Randbedingungen

Alle Betrachtungen zur Beurteilung der Investitionsvorhaben in alternative Antriebssysteme unterliegen den spezifischen Randbedingungen des Pfalznetzes. Dazu gehören die Streckengegebenheiten und der betriebliche Ablauf auf Grundlage der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Umlaufpläne.

Zur Bewertung der untersuchten Antriebskonzepte wird die Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus herangezogen. Die hierfür genutzte Kapitalwertmethode ist im Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

Die zur Ermittlung der Fahrzeug- und Infrastrukturkostenanteile benötigten Einzelkosten werden im Abschnitt 3.4 ausführlich hergeleitet.

Die sich für die untersuchten Fahrzeug- und Antriebskonzepte ergebenden Kapitalwerte werden in Abschnitt 3.5 berechnet. Hierbei wird unterschieden, ob die Infrastrukturkosten vom Aufgabenträger getragen werden müssen oder durch Dritte finanziert werden.

Die Ergebnisse der Kapitalwertberechnung werden im Abschnitt 3.5 aus wirtschaftlicher Sicht bewertet. Dabei ergibt sich eine Rangfolge der betrachteten Technologien hinsichtlich ihrer Kapitalwerte für jede einzelne Strecke. Das gesamtheitliche Betrachtungsergebnis des Netzes resultiert aus der Summierung der Einzelkapitalwerte pro Strecke.

3.1.2 Ablauf der Untersuchung

Zur Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Technologie im Pfalznetz wird ein dreistufiges Verfahren angewendet, das in Abb. 3-1 dargestellt ist.

Zuerst wird eine Analyse des zu untersuchenden Loses 1 des Pfalznetzes durchgeführt, die Aussagen über den aktuell dort stattfindenden Betrieb, vorhandene Infrastruktur, benötigte Fahrzeuganzahlen etc. bereitstellt. Diese Analyse wird für jede einzelne Linie des Netzes durchgeführt.

Anschließend wird in der zweiten Stufe des Verfahrens linienspezifisch die jeweils wirtschaftlich optimal einzusetzende Technologie ermittelt. Für die verschiedenen Linien werden dabei je nach Betrachtungszeitraum unterschiedliche Optima erwartet.

Die Ergebnisse der linienspezifischen Untersuchungen werden in der dritten Stufe des Verfahrens zu einer netzweiten Gesamtsumme je Technologie zusammengeführt, die Aussagen über Wirtschaftlichkeit jeder Technologie für das Gesamtnetz ermöglicht.

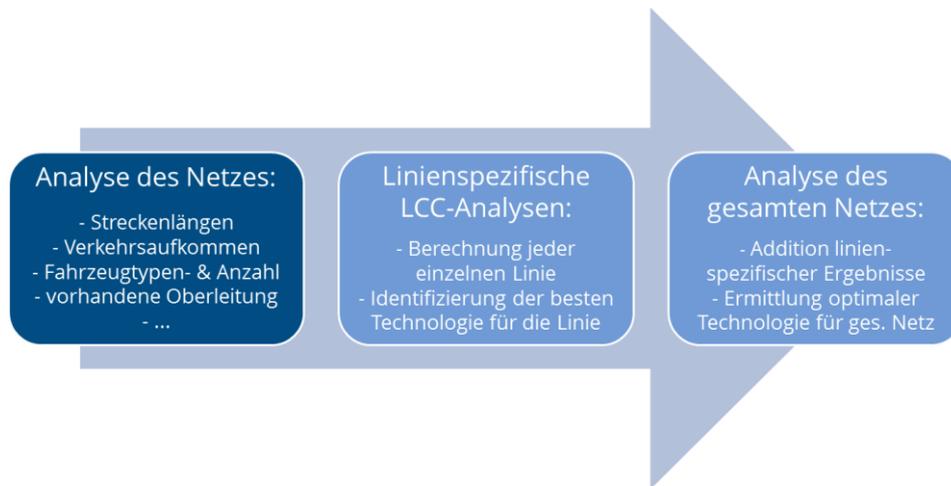


Abb. 3-1 Vorgehensweise zur Bestimmung technologiespezifischer Kapitalwerte

3.2 DEFINITION DER BEWERTUNGSSZENARIOEN

3.2.1 Linienspezifische Parameter

Die betrachteten Linien im Netz werden hinsichtlich ihrer topologischen und betrieblichen Gegebenheiten bewertet. Zudem fließen die vorhandene Infrastruktur und geplante Infrastrukturmaßnahmen in die Bewertung ein.

Die verschiedenen Linien unterscheiden sich hinsichtlich folgender Kriterien:

- Linienlänge
- Elektrifizierungsgrad
- tägliche Einsatzdauer der Fahrzeuge
- Anzahl der Fahrzeuge im Betrieb
- tägliche Fahrzeugkilometer
- Tankfahrten pro Woche
- vorhandene Infrastruktur und geplante Infrastrukturmaßnahmen

Alle betrieblichen Daten, wie **Einsatzdauer und Anzahl der Fahrzeuge** sowie **Fahrzeugkilometer pro Tag** sind abgeleitete Parameter aus den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Umlaufplänen. Daraus ergibt sich ein linienspezifisches Belastungsprofil.

Zur Ermittlung der genannten Parameter wurden aus den Fahrzeugumlaufplänen sowohl jene Fahrzeuge ermittelt, die den gesamten Tag dieselbe Linie befahren als auch Verstärkerfahrzeuge für den Berufsverkehr, die auch Linienläufe wechseln und nur zeitweise zum Einsatz kommen. Die Anzahl aller Fahrten beider Gruppen werden addiert und ermöglichen anschließend in Abhängigkeit der Linienlänge die täglichen Fahrzeugkilometer der Linie zu ermitteln. Die Betriebszeit vom fahrplanmäßigen Beginn bis zum fahrplanmäßigen Ende des Umlauftages wurde durch einen dreißigminütigen Vorbereitungs- und

Abschlussdienst ergänzt und um Betriebspausen reduziert. Die an Wochenenden veränderten täglichen Fahrzeugkilometer wurden durch eine anteilige Gewichtung berücksichtigt. Die Mittelwerte aus den Fahrzeugkilometern und den Betriebszeiten der Fahrzeuge je Linie bilden die allgemeinen Betriebsdaten ab.

Durch vom Auftraggeber beigestellte Studien bzw. Kontakte zu Herstellern wurden notwendige **Infrastrukturmaßnahmen zur Nachladung bzw. Betankung** für das gesamte Netz ermittelt und für die Untersuchung übernommen. Die Validierung dieser Angaben durch die TU Dresden ist im Abschnitt 2.3 beschrieben. Die Maßnahmen betreffen Oberleitungs- bzw. Wasserstoffbereitstellungsanlagen und werden für die Untersuchung als gegebene Randbedingungen eingestuft, die je Linie anteilig in die Kostenanalysen einfließen. So setzt sich beispielsweise der **Elektrifizierungsgrad** der einzelnen Linien aus der vorhandenen Elektrifizierung und den zusätzlichen Oberleitungs-/ Ladestationsmaßnahmen zusammen.

Die Anzahl der **Tankfahrten** bestimmt maßgeblich die Tankkosten (Personalkosten, anteiliger Verbrauch) für die jeweiligen Fahrzeugsysteme. Die Anzahl hängt von der Linienlänge und der Reichweite der Fahrzeugsysteme ab und wird für jede Linie gesondert bestimmt.

3.2.2 Betrachtungszeiträume und Varianten der Infrastrukturfinanzierung

In Absprache mit dem Auftraggeber sind folgende Szenarien pro betrachteter Strecke zu beurteilen:

- Betrachtungsdauer 23 Jahre (maximale Verkehrsvertragslaufzeit)
- Betrachtungsdauer 35 Jahre (maximale Fahrzeuglebensdauer)

In beiden Fällen werden die Betrachtungen sowohl inklusive als auch exklusive der Infrastrukturkosten durchgeführt, sodass insgesamt vier Hauptvarianten ergeben.

Bei der Betrachtung eines Verkehrsvertrags mit 22,5 Jahren Laufzeit wird ein Betrachtungszeitraum von 23 Jahren veranschlagt, da aufgrund der Darstellung der Kapitalwerte zum Abschluss jeden Jahres es nicht möglich ist, halbe Jahre zu betrachten. Diese Betrachtungsweise verändert die Aussagekraft der Ergebnisse nicht. Die Betrachtungsdauer von 35 Jahren spiegelt die allgemeine Lebensdauer eines Schienenfahrzeugs wieder.

Für beide Betrachtungszeiträume finden die Infrastrukturkosten explizit Berücksichtigung, um über die fahrzeugspezifischen Kosten hinaus das vollständige System in einer volkswirtschaftlichen Gesamtkostenanalyse zu bewerten.

Die Betrachtung ohne Infrastrukturkosten hingegen beschreibt jeweils ein Szenario, bei dem systemspezifische Infrastrukturmaßnahmen durch den Infrastrukturbetreiber,

Dritte oder durch Förderungen bereitgestellt werden. Bei den auf Ladeinfrastruktur angewiesenen Technologien wird so die Investition für diese Betrachtungsvariante als bereits erfolgt angesetzt. Für den Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid gilt jedoch die Besonderheit, dass im angegebenen Wasserstoffpreis eines potentiellen Lieferanten bereits alle Infrastrukturkosten enthalten sind. Infolgedessen muss der Wasserstoffpreis für eine Betrachtung exklusive Infrastruktur angepasst werden. Aufgrund der ermittelten Infrastrukturkosten für Wasserstofftankstellen, die Erzeugeranlage inkl. Abfüllung, die Transportkosten sowie das netzweite Verbrauchsvolumen aller Wasserstofffahrzeuge im Betrachtungszeitraum ergibt sich eine Preisanpassung ohne Wasserstoffbereitstellungskosten. Die Errechnung des Wertes wird im Abschnitt 3.4.2.7 näher beschrieben.

3.3 LCC-BERECHNUNGEN

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 hat das Ziel der Feststellung einer relativen Vorteilhaftigkeit sich ausschließender Investitionsvorhaben unter bestimmten Voraussetzungen. Voraussetzung der relativen ist die absolute Vorteilhaftigkeit. [19]

Zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit kommt das Modell der dynamischen Investitionsrechnung zum Einsatz. Aufgrund der Berücksichtigung des Zinseszinses und der Teuerungsrate bei zeitlich unterschiedlichem Anfall von Ein- bzw. Auszahlungen in einer langen Betrachtungsdauer können aussagekräftige Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit einer Investition vorgenommen werden. Die Kapitalwertmethode stellt entsprechend empirischer Studien ein hierbei häufig verwendetes Berechnungsverfahren innerhalb der Investitionsrechnung dar. [19] [20]

Die sich ausschließenden Investitionsvorhaben im Sinne dieser Untersuchung bestehen aus den verschiedenen Technologieoptionen. Für diese wird eine relative Vorteilhaftigkeit ermittelt, indem für jede Technologie ein Kapitalwert für den gesamten Lebenszyklus bestimmt wird. Dieser umfasst alle **Kosten, die im Lebenszyklus anfallen**, sodass der **geringste Kapitalwert** in dieser Untersuchung der **relativ vorteilhafteste** ist.

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, der normativ einheitlich gültig ist. Für die durchzuführende Untersuchung wurden daher in Abschnitt 3.1.1 Rahmenbedingungen definiert, die für die Lebenszykluskostenanalyse unterschied-

licher Antriebssysteme unter Berücksichtigung der zugehörigen Infrastruktur angewendet werden. Die einzelnen Arbeitsschritte orientieren sich an den nachfolgend aufgeführten Normen:

- 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 sowie Entsorgungskosten zusammenfassen lassen.

Neben der Möglichkeit zur Identifikation von Kostentreibern auf die Dauer des Lebenszyklus mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wird übereinstimmend die finanzmathematische Berechnung nach dem **dynamischen Investitionsberechnungsverfahren** genannt. Das auch **Kapitalwertmethode** genannte Verfahren wird als Grundprinzip für alle Methoden der Investitionsbeurteilung vorgestellt und besitzt gemäß [19], [20], [21] u. a. folgende Charakteristika:

- Bezug der Zahlungen auf den Beginn (Jahr 0) des Betrachtungszeitraumes (sogenannter Barwert bzw. Gegenwartswert)
 - durch Abzinsung (Diskontierung), wenn die Zahlung zeitlich nach dem Beginn des Betrachtungszeitraumes erfolgt,
 - durch Aufzinsung (Askontierung), wenn die Zahlung zeitlich vor dem Beginn des Betrachtungszeitraumes erfolgt.
- Anfall der laufenden Ein- und Auszahlungen zum Ende der jeweiligen Periode (z. B. eines Jahres)
- wahlweise: Anfall der Anschaffungsauszahlung zeitlich vor dem Beginn des Betrachtungszeitraumes ODER Anfall der Anschaffungsauszahlung zu Beginn der ersten Periode (Jahr 0)
- Einheitlicher Kalkulationszins 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“ [19]

- Berücksichtigung der Differenzinvestition, wenn verschiedene sich ausschließende Investitionsalternativen unterschiedliche Anschaffungsausgaben sowie Lebensdauern aufweisen
 - Kriterium eines relativen wirtschaftlichen Vorteils,
 - Voraussetzung ist, dass die unterschiedlichen Investitionsalternativen einen absoluten wirtschaftlichen Vorteil nach Ende der Lebenszyklusdauer aufweisen, d. h. es wird angesetzt, dass es bei jeder untersuchten Technologie per se Sinn ergibt, die Investition zu tätigen,
 - Einheitlicher Betrachtungszeitraum,
 - Berücksichtigung von Nachfolgeinvestitionen bei unterschiedlicher Lebensdauer,
 - Berücksichtigung von Liquidationserlösen (Restwert) der noch funktionsfähigen Anlagen.

3.3.3 Lebenszyklusphasen und Berechnungsmethode

Grundsätzlich setzt sich der Lebenszyklus eines Produkts aus sechs Hauptphasen zusammen [22]:

- a) Konzept und Definition
- b) Entwurf und Entwicklung
- c) Herstellung
- d) Einbau
- e) Betrieb und Instandhaltung
- f) Entsorgung

In Bezug auf die schwierig zu ermittelten Teilkosten der Hauptphasen a) bis d) werden diese zu **Anschaffungskosten** und die Hauptphase e) zu **Besitzkosten** zusammengefasst. Da es nicht möglich ist plausible Vorhersagen zu treffen, welche Kosten bei neuartigen (bisher teils nur als Konzept existierenden) Antriebskonzepten für die **Entsorgung bzw. Verwertung** anfallen würden, werden diese Kostenteile in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

Übergeordnet entfallen alle Zahlungen und Faktoren, die für jede Investitionsalternative gleich sind bzw. „keine einfach anwendbaren Prüfkriterien zur eindeutigen Feststellung der Notwendigkeit [...] zur Verfügung stehen“. [19] Somit entfallen unter anderem Betrachtungen von:

- Versicherungszahlungen
- Umsatzsteuerzahlungen
- Einnahmen durch den Betrieb

- Trassenkosten
- Zugpersonalkosten (außer für Tankfahrten)
- Abstellkosten
- Reinigungskosten

Zudem entfällt die Betrachtung von Tilgungszahlungen und Zinsaufwände aufgrund der Annahme, dass für die Anschaffungszahlungen kein Fremdkapital aufgenommen werden muss.

Zusammenfassend betrachtet die Untersuchung den zeitlichen Verlauf der anfallenden Beschaffungs- und Besitzkosten unterteilt in Fahrzeug- und Infrastrukturkosten unter Berücksichtigung der Restwerte.

3.3.4 Kapitalwertmethode

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt bildet die Kapitalwertmethode den Kern der LCC-Analyse. Der Kapitalwert ist der Geldvermögenszuwachs „den das Investitionsobjekt zu Beginn des Planungszeitraumes unter Berücksichtigung von Zinsen erbringt“ [22].

Die Berechnung erfolgt über die Aufsummierung der Anschaffungszahlungen, dem Barwert der Rückflüsse und dem Barwert des Restwertes (vgl. Gl. (3-1) und Gl. (3-2)).

$$KW = -AZ_0 + BW_{RF} + BW_{RW} \quad \text{Gl. (3-1)}$$

$$KW = -AZ_0 + \sum_{t=1}^{LD} \left(\frac{EZ_t - AZ_t}{(1 + i/100)^t} \right) + \frac{RW_{LD}}{(1 + i/100)^{LD}} \quad \text{Gl. (3-2)}$$

$$i = \frac{100 \cdot (i_n - r)}{r + 100} \quad \text{Gl. (3-3)}$$

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	€
i	Kalkulationszinssatz	%
t	Zeitpunkt	a
RW_{LD}	Restwert am Betrachtungsdauerende	€

LD	Betrachtungsdauerende	a
BW_{RF}	Barwert der Rückflüsse	€
BW_{RW}	Barwert des Restwertes	€

Die Anschaffungszahlung ist eine zum Bezugszeitpunkt fällige Einmalzahlung und ist als Kostenposition positiv zu betrachten. Der Barwert des Restwertes berechnet sich zum Betrachtungsdauerende. Die Barwerte der Rückflüsse errechnen sich aus der Differenz von Ein- (Erlöse) und Auszahlungen (Kosten). Aufgrund der ausschließlichen Betrachtungen der Auszahlungen bildet der Barwert der Rückflüsse lediglich die abgezinste Kosten ab. Hinsichtlich dieser Methode und aus Darstellungsgründen werden die Anschaffungs- und Auszahlungen positiv abgetragen. Darüber hinaus wird der Kapitalwert zum Betrachtungszeitraumende um den Barwert des Restwertes vermindert. Die Abb. 3-2 zeigt schematisch die Berechnungsmethode des Kapitalwertes.

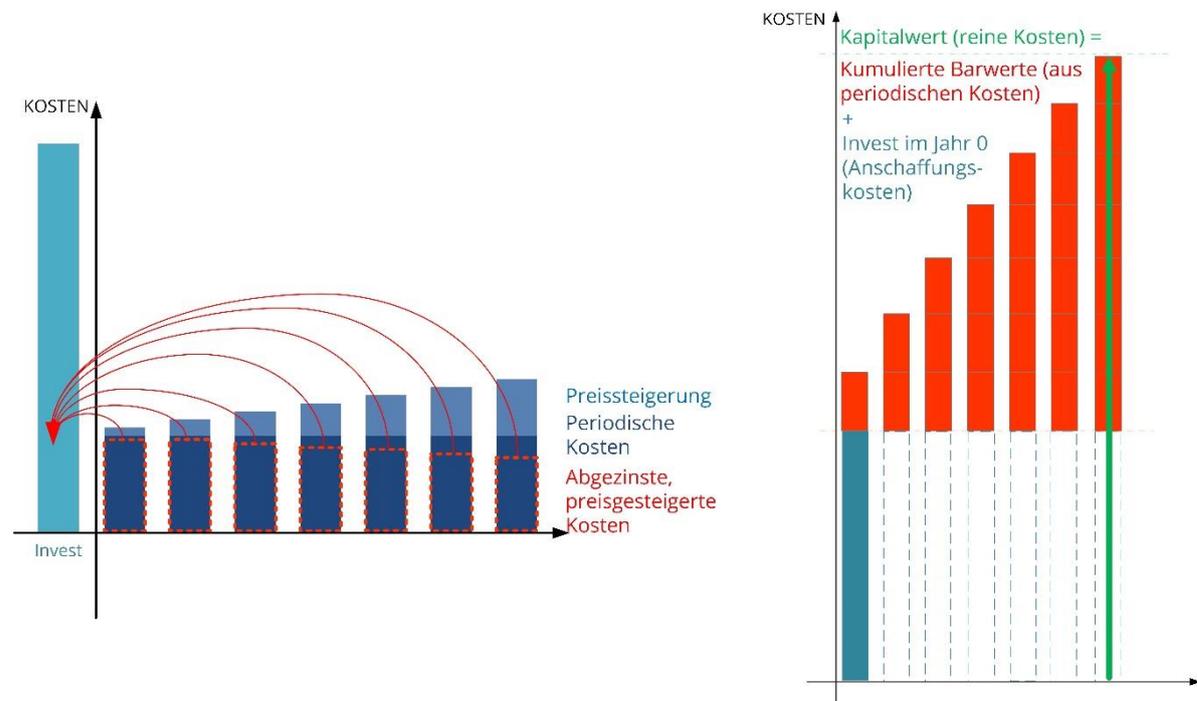


Abb. 3-2 Schematische Darstellung der Kapitalwertberechnung

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird das Vorteilhaftigkeitskriterium der LCC-Analyse nach der Kapitalwertmethode herangezogen, welches lautet:

Im Falle einer Differenzinvestition ist diejenige Investitionsalternative mit dem höheren Kapitalwert vorteilhafter gegenüber der anderen Investitionsalternative (*relative Vorteilhaftigkeit*). Aufgrund der hier positiv gewählten Darstellung der Auszahlungen ist in der in Abb. 3-2 dargestellten Betrachtung das System mit dem **niedrigeren Kapitalwert das relativ Vorteilhaftere**.

Demnach setzt sich der Kapitalwert hauptsächlich aus den Auszahlungen über die Lebenszyklusdauer zusammen. Infolge der Differenzinvestitionsrechnung kann ausschließlich die relative Vorteilhaftigkeit eines Produktes gegenüber dem zu vergleichenden Produkt ermittelt werden. (vgl. [19]).

3.3.5 Restwert eines Investitionsgutes

Aufgrund einer möglichen Benachteiligung investitionsintensiver Antriebssysteme bei kurzen Betrachtungszeiträumen oder verschiedener Lebensdauern ist es wichtig, den Restwert einer Investition dem Berechnungssystem zu zuordnen. Der Restwert setzt sich zum Betrachtungszeitende ausfolgenden Kostenpositionen zusammen:

- Fahrzeugrestwert
- Infrastrukturrestwerte (Tankstellen, Oberleitung, Ladestationen)

Der Restwert bildet den **betriebswirtschaftlichen** und **nicht den erzielbaren Wert** des Investitionsgutes ab. Davon ausgehend ist er abhängig vom Abschreibungszeitraum der jeweiligen Kostenposition. Der betriebswirtschaftliche Wertverfall wird als eine linear fallende Gerade angenommen, beginnend beim Investitionszeitpunkte in Höhe des Investitionsvolumens und endend beim Erreichen der Abschreibungsdauer. Dem entgegen steht die reale Lebensdauer einer Investition, beispielsweise die Schienenfahrzeugslebensdauer von bis zu 35 Jahren. Zwischen der Reinvestition der jeweiligen Kostenposition erst nach Erreichen der Lebensdauer und dem Erreichen des Abschreibungszeitraumes beträgt der Restwert der Investition buchhalterisch null.

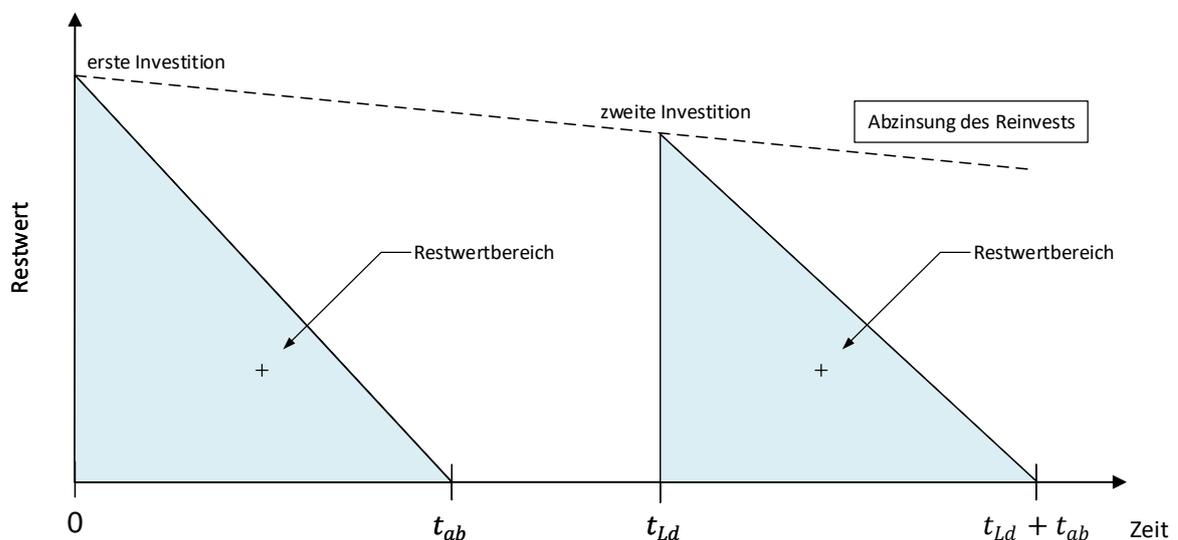


Abb. 3-3 schematische Betrachtung des Restwertverlaufes

Abb. 3-3 zeigt den beschriebenen Verlauf der Restwerte für aufeinanderfolgende Investitionen. Die farbige gekennzeichneten Flächen markieren den Bereich noch vorhandener Restwerte. Die Reinvestition unterliegt der Abzinsung gemäß der Gl. (3-2).

Tabelle 3-2 Parameter der Restwertbetrachtung

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
t_{ab}	Abschreibungszeitraum	a
t_{Ld}	Lebensdauer	a

Jegliche Abschreibungszeiträume für Infrastrukturmaßnahmen werden nach Absprache mit dem Auftraggeber aufgrund der Vergleichbarkeit mit 15 Jahren angenommen. Darüber hinaus werden alle Fahrzeuge auf 20 Jahre abgeschrieben. Lediglich der Diesel-/ Batterie-Hybrid wird aufgrund der geringen Restlebensdauer (angesetzt: 10 Jahre) nach dem Umbau bereits nach fünf Jahren abgeschrieben. Nach der Reinvestition gilt auch für diesen ein Abschreibungszeitraum von 20 Jahren und eine 35-jährige Lebensdauer des Fahrzeugs.

3.3.6 Kalkulationszins

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 [23].

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 die Entwicklung der Weltwirtschaft oder die Intensität des Wettbewerbs. [24]

Im arithmetischen Mittel (01/1999 bis 02/2019) betrug der Zinssatz der EZB für Hauptrefinanzierungsgeschäfte 1,86 Prozent. Im arithmetischen Mittel der letzten 10 Jahre betrug der Zinssatz der EZB für Hauptrefinanzierungsgeschäfte 0,5 Prozent. Der aktuelle Zinssatz liegt seit 03/2016 bei 0,00 Prozent. [25]

Der Kapitalmarktzinssatz in Deutschland betrug im Mittel der letzten 10 Jahre 2,84 Prozent. Der aktuelle Zinssatz liegt bei 0,4 Prozent. [23]

Der Nominalzinssatz für die LCC-Analyse wird mit 2,0 Prozent angenommen. Es ist davon auszugehen, dass der Leitzins der EZB innerhalb der Betrachtungszeiträume (23 u. 35 Jahre) wieder steigt. Abhängig vom Zeitpunkt des Anstiegs ist es realistisch, dass er wieder in den Bereich der vorherigen Werte steigt (1,5 – 2,5 %). Aufgrund der aktuellen Zinslage kann keine genauere Annahme auf Grundlage des Wirtschaftsintervalls getroffen werden.

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 (auch bezeichnet als Preisänderungssatz/ Teuerungsrate/ Zahlungsänderungssatz/ Inflationsrate) berücksichtigen. Jene gibt an, um wieviel Prozent die Zahlung in 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 Wertänderung der Zahlungen darf 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.

Für die vorliegende Studie ist es deshalb 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 nicht als Basis der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsrechnung gewählt, da eine präzisere Prognose für einzelne Kostenpositionen mit hohen Unsicherheiten behaftet ist.

In der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsanalyse wird eine Preissteigerungsrate von 1,5 Prozent p. a. gewählt. Jene entspricht damit der derzeitigen Inflationsrate (02/2019: 1,5 %) und liegt 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 Gl. (3-3) der Kapitalwertmethode.

Tabelle 3-3 Parameter für die Bildung des Kalkulationszinssatzes

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

3.4 ERMITTLUNG ALLER EINZELKOSTEN

3.4.1 Übersicht der betrachteten Kostenpositionen

Um der Komplexität der untersuchten Antriebssysteme gerecht zu werden ist es nötig, Kostenpositionen vergleichbar und zugleich zugeschnitten auf das Antriebssystem zu bilden. In den Abb. 3-4 und Abb. 3-5 sind die Kostenstrukturen schematisch anhand der DIN 60300 dargestellt [22]. Jede Kostenposition, die keine jährlichen auftretenden Kosten verursacht, wird mit Hilfe eines Intervallindicators zeitbasiert betrachtet. Beispielsweise sind die Anschaffungskosten des Fuhrparks zu Beginn der Betrachtung zu entrichten und wiederkehrend mit dem Erreichen der Fahrzeuglebensdauer. Somit ist die Lebensdauer des Fahrzeugs der Intervallindikator. Die jeweiligen Kostenpositionen und Intervallindikatoren sind in Tabelle 3-4 aufgeführt.

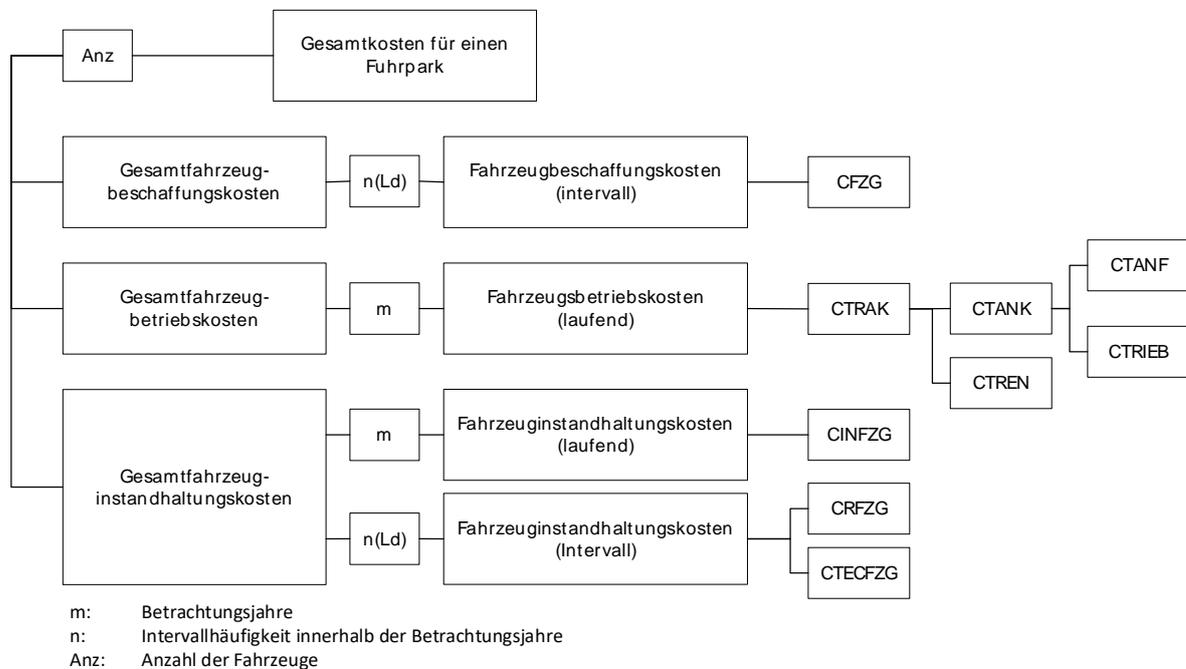


Abb. 3-4 Fahrzeugkostenstruktur

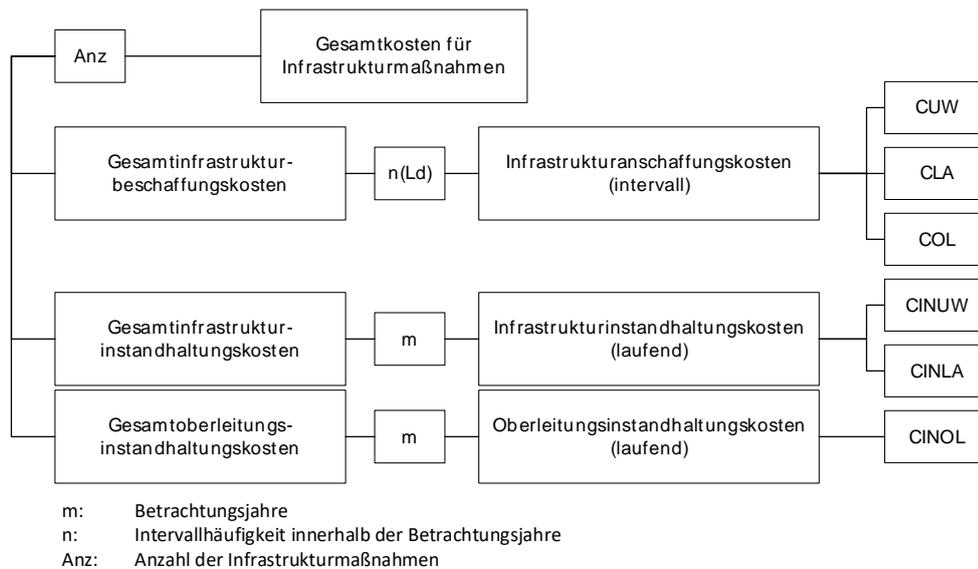


Abb. 3-5 Infrastrukturkostenstruktur

Tabelle 3-4 Parameter der Kostenpositionen

Kostenposition	Intervallindikator	Abkürzung
Fahrzeugsanschaffung [€]	Lebensdauer	CFZG
Fahrzeuginstandhaltung [€/km]	-	CINFZG
Traktionskosten [€]	-	CTRAK
Tankkosten [€]	-	CTANK
Tankfahrt [-]	-	CTANF
Triebfahrzeugführer [€/h]	-	CTRIEB
Traktionsenergie [€/kWh, €/l, €/kg]	-	CTREN
Fahrzeugrevision [€]	Revisionsintervall	CRFZG
Technologieaustausch [€,€/kWh]	Lebensdauer/Laufleistung	CTECFZG
Unterwerkanschaffung [€]	Lebensdauer	CUW
Ladestationsanschaffung [€]	Lebensdauer	CLA
Oberleitungsanschaffung [€]	Lebensdauer	COL
Unterwerksinstandhaltung [€/a]	-	CINUW
Ladestationsinstandhaltung [€/a]	-	CINLA
Oberleitungsinstandhaltung [€/a/km]	-	CINOL

3.4.2 Fahrzeugkosten

3.4.2.1 Beschaffungskosten

Tabelle 3-5 führt die Beschaffungskosten nach den betrachteten Antriebssystemen auf. Dabei sind in Abstimmung mit dem Aufgabenträger vergleichbare Fahrzeuggrößen für alle Technologien mit ca. 145-170 Sitzplätzen zugrunde gelegt.

Die angegebenen Werte entstammen der Datenbasis der Professur für Elektrische Bahnen, die u. A. durch Auswertungen von Fahrzeugbeschaffungen der vergangenen Jahre im gesamten Bundesgebiet und Kontakte zu Herstellern gewonnen wurde. Die Fahrzeuganschaffungskosten wurden dabei auf das Ausschreibungsjahr des Pfalznetzes mittels der für die Untersuchung angenommenen Preissteigerungsrate angepasst. Dabei werden potentielle Förderungen einzelner Fahrzeuge nicht berücksichtigt.

Eine Besonderheit bildet der Diesel-/ Batterie-Hybrid. Dieses Fahrzeug beruht auf einem Umbau eines Bestandfahrzeuges und ist in der Erstinvestition vergleichsweise günstig, die Restlebensdauer wird jedoch mit nur noch zehn Jahren angesetzt. In allen nachfolgenden Investitionen muss jedoch ebenfalls das gesamte Fahrzeug neu beschafft werden.

Tabelle 3-5 Kostensätze zur Berechnung der Fahrzeugkostenanteile für verschiedene Antriebskonzepte

Versorgungsart	Dieseltriebzug	Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid	Diesel-/ Batterie-Hybrid	Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid	Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid
Fahrzeugbeschaffung [Mio. €]	■	■	■	■	■
nachfolgende Fahrzeugbeschaffung [Mio. €]	■	■	■	■	■
Instandhaltung pro Fahrzeug [€/km]	■	■	■	■	■*
Fahrzeugrevision bei HU [T€]	■	■	■	■	*
Austausch der PowerPacks [T€]	■	-	■	■	-
Austausch der Traktionsbatterien [T€]	-	■	■	-	*
Austausch der Brennstoffzellen [T€]	-	-	-	-	*

* Beim Wasserstoff-/Batterie-Hybrid sind Austauschkosten für Traktionsbatterien und Brennstoffzellen sowie Revisionskosten in den Instandhaltungskosten inkludiert.

Die Höhe der Beschaffungskosten sowie Anteile der Kosten für die Instandhaltung richten sich maßgeblich nach der Anzahl der zu beschaffenden Fahrzeuge, da hier Skaleneffekte erzielt werden. Als Basis der Untersuchung wurde deshalb für das gesamte Netz eine einheitliche Antriebstechnologie angesetzt. Mehrere Technologien im Netz führen zu höheren Kosten. Eine einheitliche Fahrzeugflotte sichert eine erhöhte Wirtschaftlichkeit und die Flexibilität des Betriebs unabhängig von Technologie. Die oben angegebenen Kosten referenzieren deshalb auf das Gesamtvolumen der im Netz benötigten Fahrzeuge.

3.4.2.2 Laufende Instandhaltungskosten

Die laufenden Instandhaltungskosten bilden die betriebsnahe Instandhaltung (Inspektion, Wartung, planmäßige und außerplanmäßige Instandsetzung) ab. Die angegebenen Werte entstammen der Datenbasis der Professur für Elektrische Bahnen, die u.A. durch Auswertungen von Instandhaltungsaufwendungen mehrerer Betreiber gewonnen wurden. Für neue Hybridtechnologien wie Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid, Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid und Diesel-/ Batterie-Hybrid wurden die Prognosen der Hersteller verwendet.

Das Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeug bildet in den Kostenannahmen der Instandhaltungskosten eine Ausnahme. Laut der Angabe eines am Markt befindlichen Herstellers ist es möglich über einen Full-Service-Vertrag einen Instandhaltungspreis von ■■■ €/km für den Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid anzusetzen. Darin beinhaltet sind alle Instandhaltungs- und Revisionskosten. Diese Besonderheit betrifft ebenfalls alle auszuführenden Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen an den Brennstoffzellen und Traktionsbatterien, d. h. der Austausch von Brennstoffzellmembran, Filtern oder Batteriezellen ist bereits im genannten Preis berücksichtigt. Folglich können diese Kostenpositionen nicht mehr mit dem oben erläuterten Intervallindikator betrachtet werden. Somit fallen die Kostenpositionen Instandhaltung, Revision, Brennstoffzellen- und Batterietausch unter der Kostenposition Instandhaltung zusammen und werden nicht einzeln ausgewiesen. Der angegebene Wert von ■■■ €/km konnte durch an der Professur für Elektrische Bahnen vorhandene Daten zur Kostenstruktur der anfallenden Instandhaltungs- und Reinvestitionskosten plausibilisiert werden. Er wird deshalb für die Berechnungen der Kapitalwerte herangezogen.

3.4.2.3 Revisionskosten für Hauptuntersuchung (HU)

Für die Revisionskosten, die alle acht Jahre im Zuge der Hauptuntersuchung anfallen, liegen der Professur für Elektrische Bahnen Kostensätze von Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) vor. Die Hauptuntersuchungskosten eines Dieseltriebzuges belaufen sich auf ca. ■■■■ € und sind damit ca. ■■■■ € teurer als bei einem Elektrotriebzug. Aufgrund der unzureichenden Datenlage und Felderfahrung für die Hybridsysteme werden Vereinfachungen getroffen. Es wird davon ausgegangen, dass der Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid ähnliche Revisionskosten verursacht wie ein Elektrotriebzug, da die zusätzlichen Aufwendungen für den Batterieteil in den zyklischen Tauschkosten abgebildet sind.

Für die anderen Hybridsysteme wird der Mittelwert aus beiden Revisionskostensätzen gebildet.

3.4.2.4 Kostensätze für den Austausch von Technologiekomponenten

- PowerPacks

Erfahrungen von EVU zeigen, dass der Austausch **eines** Power Packs ca. [REDACTED] € kostet. Der Tausch erfolgt abhängig von der Fahrzeug-Laufleistung nach ca. [REDACTED] km. Vergleichend mit den Traktionsenergiekosten richtet sich das Austauschintervall nach dem Antriebssystem und den Infrastrukturgegebenheiten. Daher ist das Tauschintervall des verbliebenen PowerPacks eines Diesel-/ Batterie-Hybrid abhängig von der Batterienutzung größer als das eines herkömmlichen Dieselfahrzeuges.

- Traktionsbatterien

Lithium-Ionen-Zellen aller Technologien (siehe auch Abschnitt 2.2.3) altern je nach Betriebsverfahren sowie betrieblichen Anforderungen und Belastungen schneller oder langsamer. Vier Größen sind dafür maßgeblich:

- Anzahl der Lade- und Entladezyklen (enthalten darin sind Voll- und Teilzyklen)
- Entladetiefe der Batterie (DoD – Depth of Discharge; Anteil des gespeicherten Energieinhalts, der beim Entladen regelmäßig im Betrieb entnommen wird)
- Temperatur in der Zelle (konstant im optimalen Bereich oder ständig wechselnd)
- Entnommene Leistung bzw. Stromhöhe in der Zelle (wirkt v. a. auf Temperatur)

Hinzu kommt die kalendarische Alterung der Zellen. Jede dieser Größen wirkt sich bei unterschiedlichen Batterie- und Antriebstechnologien mehr oder weniger stark auf deren Lebensdauerverhalten aus. Im Hinblick auf den Umfang dieser Studie können deshalb nur qualifizierte Abschätzungen getroffen werden. Basis für die Abschätzung ist eine für alle Fahrzeuge des Netzes gleich energiereich angenommene Batterie je Fahrzeug, auch wenn auf manchen Linien geringere Batteriegrößen ausreichend wären. Ziel ist, die hohe betriebliche Flexibilität zum Tausch der Fahrzeuge zwischen den Linien zu erhalten.

Nach Daten der Professur für Elektrische Bahnen müssen spezifische Kosten von ca. [REDACTED] €/ kWh bei der Neuanschaffung einer Lithium-Ionen-NMC-Batterie angenommen werden. Dies führt zu hohen zyklisch anfallenden Kosten des Batterietauschs, sodass dessen Häufigkeit eine hohe Bedeutung bei wirtschaftlichen Analysen zukommt. Die Herausforderung besteht darin, die Lebensdauer der Batterien für die verschiedenen Antriebssysteme abzuschätzen. Diese liegt immer deutlich unterhalb der Fahrzeuglebensdauer.

Die Batteriebelastung des **Diesel-/ Batterie-Hybrid** kann stark nach betrieblichen Anforderungen schwanken. Dazu ist es entscheidend, in welchem Ausmaß der Energiespeicher als Primärenergiequelle genutzt wird. Das bedeutet, dass in einem oberleitungsfreien Abschnitt zunächst die Batterie entsprechend ihres Ausnutzungsgrades zur Energiebereitstellung genutzt wird und erst nachrangig das PowerPack mit dem Dieselmotor. Es wird

angenommen, dass bei einer 50%-Ausnutzung des Energiespeichers eine Lebensdauer des Speichers von sieben Jahren erreicht wird. Steigt die Ausnutzung, sinkt die Lebensdauer im entsprechenden Verhältnis. Die Batteriegröße wird einheitlich mit 150 kWh angesetzt.

Der **Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid** besitzt für diese Untersuchung einen NMC-Energiespeicher mit hohem Energiegehalt von 600 kWh. Das führt im Hinblick auf die spezifischen Batteriekosten zu hohen Austauschkosten für die Batterie. Aufgrund dessen muss eine Lebensdauerdifferenzierung anhand der Belastung durchgeführt werden. Grundlage für die Differenzierung bildet der Ansatz, dass die Fahrt vom Start- zum Zielbahnhof näherungsweise einem vollständigen Batteriezyklus entspricht. Das bedeutet, die Batterie entlädt sich entsprechend der durch die Strecke hervorgerufenen Belastung und wird im Zielbahnhof wieder vollständig aufgeladen. Jede Batterie besitzt eine Zyklenfestigkeit, die vom Hersteller angegeben wird. Diese ist wiederum abhängig vom sogenannten „depth of discharge“ (DoD). Der DoD gibt das Verhältnis der Entladetiefe zur Gesamtkapazität der Batterie an. So ist es möglich, bei einer bestimmten Entladetiefe die Anzahl der verfügbaren Zyklen zu bestimmen. Daraus folgend kann die Lebensdauer berechnet werden. Die Zyklenfestigkeit unterliegt folgender Formel [26]:

$$N = \frac{1}{DoD^2} \cdot C \quad \text{Gl. (3-4)}$$

Tabelle 3-6 Parameter der Zyklenfestigkeit

Parameter	Bezeichnung	Einheit
N	Zyklenanzahl	–
DoD	depth of discharge (Entladetiefe)	%

Die zyklische Belastung der Batterie ist präzise nur durch eine exakte Simulation des Fahrspiels zu ermitteln. Dies würde den Rahmen dieser Untersuchung sprengen. Jedoch können basierend auf früheren Simulationen an der Professur für Elektrische Bahnen belastbare Annahmen zu den Zyklenzahlen im Pfalznetz linienspezifisch getroffen werden. Die Zyklenfestigkeiten weichen zwischen den verschiedenen Batterie-Herstellern ab, anhand der gewählten Annahmen lassen sich jedoch durch Studien plausibilisierte Lebensdauern berechnen. Dieser werden anschließend für die LCC-Analyse umgesetzt.

Die Tabelle 3-7 zeigt die Intervallindikatoren und die Lebensdauern der untersuchten Technologien.

Tabelle 3-7 Intervallindikatoren der Fahrzeugkosten

Intervallindikator					
	Dieseltreibzug	Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid	Diesel-/ Batterie-Hybrid	Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid	Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid
Fahrzeuglebensdauer [a]	35	35	10/35	35	35
Instandhaltungsintervall [a]	1	1	1	1	1
Fahrzeugrevisionsintervall [a]	8	8	8	8	8*
Laufleistung des Power Packs [T km]	■	-	■	■	-
Batterielebensdauer	-	■**	7	-	■*
Betriebsstunden eines Brennstoffzellen Stack [h]	-	-	-	-	■*

* Angaben für Wasserstoff-/Batterie-Hybrid informativ, da im Lebensdauermodell über Instandhaltungskosten abgebildet.

** Je Linie eine Lebensdauer in diesem Lebensdauerband angenommen

3.4.2.5 Einfluss der Batteriealterung beim Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid auf die Kostenbetrachtung

Die auf Basis der zu erwartenden Vollzyklenanzahl je Linie variierend angesetzten Lebensdauern bei Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen für eine 600-kWh-NMC-Batterie je Fahrzeug ergeben im Mittelwert der Linien 7-8 a Lebensdauer. Grundlage ist ein freizügiger Einsatz der Fahrzeuge auf allen Linien im Netz (umlaufbedingt heute so gegeben). Die Lebensdauer kann bei jedoch bei Zellen mit LTO- bzw. LFP-Technologie stark abweichen.

Insbesondere die jeweils sehr unterschiedlichen Lebensdauern und Invest- bzw. Reinvestkosten der Batterie-Technologien wirken sich stark auf die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der einzelnen Batterie-Technologien bei unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen aus. Für die Gesamtbewertung in einem Ausschreibungsverfahren wird es so notwendig, dass die Restbetriebsdauern der Batterien nach Verkehrsvertragsauslauf mit in die Bewertung einbezogen werden. Dies ist zielführend, da die Betrachtungszeiträume einer Wirtschaftlichkeitsrechnung und die gewählte Verkehrsvertragslaufzeit meist abweichend von der Lebensdauer (oder einem Vielfachen davon) der Batterien bestimmter Technologie sind. Steht bei einer Batterie-Technologie kurz vor Ende des Verkehrsvertrages eine Neubeschaffung an, so würde diese rechnerisch bei Außerachtlassung des Restwertes deutlich

höhere Kosten verursachen, als eine Batterie, die passend zum Vertragsende ihr Nutzungsdauerende erreicht. Sinnvoll kann hier eine Wiedereinsatzgarantie für die Fahrzeuge im Zielnetz oder die Betrachtung der Restwerte der Batterien auf dem Fahrzeug sein, die dann in die Kostenrechnung als Einzahlung einfließen können. Es wird so die Weiternutzbarkeit des Fahrzeugs bzw. der Komponente Batterie mit berücksichtigt.

3.4.2.6 Traktionskosten

Grundsätzlich setzen sich die Traktionskosten aus Traktionsenergie- und Tankkosten zusammen.

Die Betrachtung der **Traktionsenergiekosten** erfolgt antriebspezifisch. Die Linie unterteilt sich hinsichtlich der vorhandenen Infrastrukturen und örtlichen Begebenheiten, wie in Abb. 3-6 gezeigt, in elektrifizierte (L1) und nicht elektrifizierte (L2 bzw. L3) Abschnitte. Je nach betrachtetem System und Streckenabschnitt unterscheidet sich der Energiebedarfswert. Dementsprechend variieren die Traktionsenergiekosten. Die Gesamttraktionsenergiekosten (vgl. Gl. (3-5)) setzen sich dabei aus den einzeln berechneten Traktionsenergiekosten der in den unterschiedlichen Betriebsarten (Dieselbetrieb, Oberleitungsbetrieb, Batteriebetrieb, Diesel-/ Batterie-Hybridbetrieb, Wasserstoff-/ Batterie-Hybridbetrieb) je Technologie befahrenen Linienabschnitte zusammen.

Unterschieden werden elektrifizierte und nicht elektrifizierte Abschnitte. Die Traktionsenergiekosten des Oberleitungs-/ Batterie-Hybrids für im Batteriebetrieb befahrene Abschnitte teilen sich entsprechend der Anteile der nachgeladenen Energie aus der Oberleitung bzw. aus Ladestationen auf. Die Traktionsenergiekosten für Oberleitungs-/ Diesel-Hybride werden im Oberleitungsbetrieb wie bei Elektrotriebzügen, im Dieselbetrieb wie bei Dieseltriebzügen angesetzt. Beim Diesel-/ Batterie-Hybrid teilen sich diese für im Batteriebetrieb befahrene Abschnitte anteilig in Traktionsenergiekosten aus der extern geladenen Batterie und dem Dieselmotor auf. Für Wasserstoff-/ Batterie-Hybride werden für die gesamte Linie einheitliche Traktionsenergiekosten angesetzt.

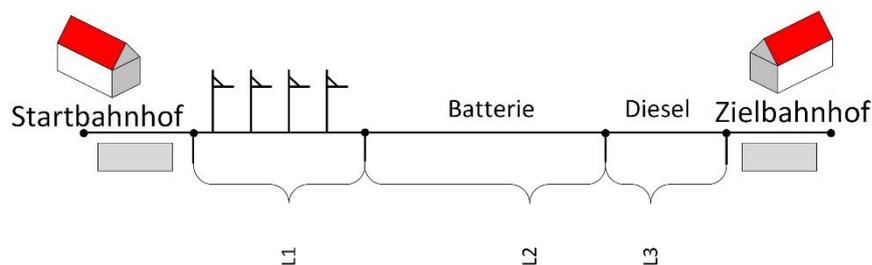


Abb. 3-6 Streckeneinteilung (Beispiel)

$$Kost_{energie} = \frac{Fzg_{km}}{L_{Str}} \cdot \sum Kost_{energie}(Antrieb, L_x) \quad \text{Gl. (3-5)}$$

$$Kost_{energie}(Antrieb) = ver_{Fzg} \cdot preis_{energie} \cdot L_x \quad \text{Gl. (3-6)}$$

Tabelle 3-8 Parameter der Traktionsenergieberechnung

Parameter	Bezeichnung	Einheit
$Kost_{energie}$	Traktionsenergiekosten	€/a
ver_{Fzg}	antriebsspezifischer Energiebedarf	$\frac{Wh}{km}$, $\frac{l}{km}$, $\frac{kg}{km}$
$preis_{energie}$	antriebsspezifischer Energiepreis	$\frac{€}{l}$, $\frac{€}{kg}$, $\frac{€}{kWh}$
L_{Str}	Gesamtlinienlänge	km
Fzg_{km}	Fahrzeugkilometer	km/a
L_x	Streckenabschnitt	km

Sind die Traktionsenergiekosten für eine einzelne Fahrt bestimmt, werden diese mit der Befahrungshäufigkeit der Linie (vgl. Gl. (3-6)) pro Jahr und Fahrzeug multipliziert. Es ergeben sich die Gesamttraktionsenergiekosten je Technologie und Jahr.

Aufgrund der an der Professur Elektrische Bahnen vorliegenden Energiebedarfswerte für Elektrotriebzüge in unterschiedlichen Einsatzfällen und Topologien können die Energiebedarfswerte der anderen Technologien über statische Wirkungsgradketten auch für die charakteristische Topologie des Pfalznetzes hinreichend genau bestimmt werden.

Der angesetzte Referenzwert für den Energiebedarf spiegelt einen Regionalbahnverkehr wieder, d.h. kurze Haltestellenabstände mit hohen Beschleunigungswerten und steigungsreicher Topologie.

Der Energiebedarf bei Fahrt unter Oberleitung wird mit dem spezifischen Referenzbedarfswert des Elektrotriebzuges angesetzt.

Für Fahrten im Batteriebetrieb wird anhand der Wirkungsgradkette des Batteriestranges mit einem Aufschlag von ca. 10 % gerechnet. Aufgrund der nicht exakt bestimmbar Aufteilung zwischen Oberleitungsladung und Ladung an der Ladestation wird angesetzt, dass die Batterie zu 50 % aus dem Bahnstromnetz und zu 50 % aus dem öffentlichen Netz geladen wird, wenn an einem Ende der Linie eine klassische Oberleitung zur Verfügung steht. Steht an keinem Ende eine Oberleitung zur Verfügung, wird die Ladung zu 100 % an einer Ladestation aus dem öffentlichen Netz angesetzt.

Der Quotient der Wirkungsgrade von Elektro- und Dieseltriebwagen ergibt einen Faktor von 2,7, mit dem der Referenzbedarfswert des Elektrotriebzuges für alle Dieselbetriebe beaufschlagt wird. Da es einem Dieseltriebzug nicht möglich ist Energie zu rekuperieren, wird darüber hinaus eine Erhöhung des Energiebedarfs um weitere 30 % unterstellt. Für den Diesel-/ Batterie-Hybrid entfällt dieser Aufschlag von 30 %, da er die Rekuperationsenergie in den Batterien zwischenspeichern kann.

Der Energiebedarf des Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeugs liegt als gegebener Wert von einem potentiellen Hersteller vor. Die genannten und hergeleiteten Werte sind in der Tabelle 3-9 dargestellt.

Tabelle 3-9 Angesezte Größen zur Traktionsenergiekostenberechnung

Bezeichnung	Wert	Einheit
Energiebedarf Elektrotriebzug	■	Wh/tkm
Energiebedarf Dieselfahrzeug	■	l/km
Energiebedarf Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid	■	kg/km
Bahnstrompreis	■	€/kWh
öffentlicher Strompreis	■	€/kWh
Dieselpreis	■	€/l
Wasserstoffpreis	■/■*	€/kg
Batteriewirkungsgrad	0,91	-
Batterieumrichter-Wirkungsgrad	0,98	-
Gesamtwirkungsgrad Elektrotriebwagen (Stromabnehmer – Rad)	0,8	-
Gesamtwirkungsgrad Verbrennungstriebwagen (Dieseltank – Rad)	0,3	-

* ohne Infrastrukturbetrachtung

Die **Tankkosten** sind in Tankfahrt- und Triebfahrzeugführerkosten (vgl. Gl. (3-7) und Gl. (3-8)) untergliedert.

$$Kost_{trak} = Kost_{energie} + Kost_{tank} \quad \text{Gl. (3-7)}$$

$$Kost_{tank} = Kost_{Fahrt} + Kost_{Tf} \quad \text{Gl. (3-8)}$$

Die **Tankfahrtkosten** berücksichtigen die zusätzlichen Kosten, die durch die Fahrt zur Tankinfrastruktur entstehen. Die Ermittlung erfolgt anhand des spezifischen Verbrauchs des jeweiligen Antriebssystems. Der Professur für Elektrische Bahnen liegen Daten von EVU vor aus denen hervorgeht, dass für Tankfahrten von Dieselfahrzeugen ein Mehraufwand von 3 % hinsichtlich der gefahrenen Gesamtkilometer berücksichtigt werden muss. Auf dieser Grundlage werden alle kraftstoffbenötigenden Systeme (Diesel und aufgrund ähnlicher Reichweiten und Tankzeiten auch Wasserstoff) mit diesem Mehraufwand, in Bezug auf die mit diesem Kraftstoff zusätzlich zurückgelegte Strecke, beaufschlagt. Die

Ausnahme bildet der Diesel-/ Batterie-Hybrid, der aufgrund seines Energiespeichers weniger Dieselkraftstoff und daher auch weniger Tankfahrten benötigt.

Tabelle 3-10 Parameter der Tankfahrten

System	Tankfahrten
Dieseltriebzug; Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid; Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid	3 %
Diesel-/ Batterie-Hybrid	2 %

Des Weiteren zählen zu den Tankkosten auch die **Triebfahrzeugführerkosten**. Diese Kostenposition berücksichtigt ausschließlich den zeitlichen Mehraufwand, den ein Triebfahrzeugführer benötigt um die Tankfahrt und den Tankvorgang zu bewältigen. Die Triebfahrzeugführerkosten werden wie folgt ermittelt:

$$Kost_{Tf} = Lohn_{Tf} \cdot Anz_{tank} \cdot zeit_{tank} \cdot zeit_{fzg_{nutz}} \quad \text{Gl. (3-9)}$$

Tabelle 3-11 Parameter zur Berechnung der Triebfahrzeugführerkosten

Parameter	Bezeichnung	Einheit
$Lohn_{Tf}$	Lohn des Triebfahrzeugführers	€/h
Anz_{tank}	Anzahl der Tankvorgänge	1/7d
$zeit_{tank}$	Tankdauer	h
$zeit_{fzg_{nutz}}$	Fahrzeugnutzungsdauer	d/a

Laut der Eisenbahn- und Verkehrsgesellschaft sind 30 €/h für einen Triebfahrzeugführer zu berücksichtigen. Für den gesamten Tankvorgang inklusive Fahrzeugzuführung wird eine Stunde veranschlagt. Abhängig von der Reichweite des Antriebssystems und der Betriebsbedingungen variiert die Anzahl der Tankvorgänge pro Woche je nach Linie.

3.4.2.7 Wasserstoffpreis inklusive und exklusive Infrastrukturkosten

Das Konzept eines möglichen Lieferanten für das Pfalznetz sieht die Belieferung mit Wasserstoff aus einer zentralen Produktionsanlage in [REDACTED] mit Spezial-Hochdrucktrailern vor (siehe auch Abschnitt 3.4.3.3). In Neustadt, Pirmasens und Kaiserslautern sind Tankstellen vorgesehen, die aus den Trailern direkt versorgt werden und über Dispenser die Schienenfahrzeuge befüllen. Die Bedienungshäufigkeit und die resultierenden Fahrzeugkilometer der LKW zu den Tankstellen sind im Folgenden beschrieben:

Tabelle 3-12 Bedienungskadenz und LKW-km je Wasserstoff-Tankstelle

Tankstelle	geplante Belieferung der Tankstelle/ Tag	km je Richtung	km/Tag
Pirmasens	■	■	■
Neustadt	■	■	■

Kaiserslautern	■	■	■
Summe			■

Werden die täglichen Tankfahrten auf Jahreszeiträume hochgerechnet, so ergeben sich im Jahr ca. 325.000 LKW-km zur Belieferung der Tankstellen des Pfalznetzes. Pro LKW-Kilometer kann hierfür ein bestimmter Kostensatz angesetzt werden. Dieser deckt die Kosten des gesamten Fahrzeugbetriebs inklusive Anschaffung, Personalkosten, Kraftstoff etc. und wird mit ca. 1,75 € im Mittel verschiedener Speditionsangaben angenommen.

Dieser Wert gilt jedoch maßgeblich für klassische LKW-Transporte ohne spezielle Hochdrucktrailer. Es muss deshalb eine Abschätzung getroffen werden, welcher Kostenanteil auf die Anschaffung des Spezialtrailers entfällt. Dessen Instandhaltung wird als gleich zu den klassischen Trailern angenommen. Unter Berücksichtigung eines geschätzten Anschaffungswertes der Spezialtrailer von ca. 200.000 € und der Standardtrailer von ca. 50.000 €, einer Lebensdauer derselben von 12 Jahren und der zu erwartenden Jahresleistung ergibt sich ein neuer Preis pro Kilometer von ca. 2,13 €/km.

Neben den Transportkosten entstehen Kosten für die Erstinvestition in die gleisnahen Tankstellen (■ Mio. €) sowie eine Abfüllanlage am Produktionsstandort (■ Mio. €) [27], woraus sich Gesamtkosten von ca. ■ Mio. € ergeben. Jährlich entstehen zudem ca. ■ € Instandhaltungskosten bei einem üblichen Satz von 0,5 % der Erstinvestition.

Zur Traktionsenergiekostenermittlung wird die Gesamtverbrauchsmenge an Wasserstoff für das Pfalznetz pro Jahr ermittelt. Legt man die gesamten Transportkosten der Tankstellenbelieferung, die Erstinvestitionskosten sowie die Instandhaltungskosten auf den Gesamtverbrauch von 22,5 Jahren Betrachtungszeitraum um, so ergibt sich eine Preisreduktion pro kg Wasserstoff von ca. 2,01 €. Der Wasserstoffpreis kann deshalb ausgehend von einem Bezugspreises von ■ €/kg inklusive Infrastruktur mit ■ €/kg exklusive Infrastruktur angenommen werden.

Voraussetzung ist die Verfügbarkeit der Hochdruck-LKW-Trailer. Nach Quellen des ILK Dresden [27] führt eine Steigerung des Drucks von 350 auf 700 bar zu einer Erhöhung der gespeicherten Wasserstoffmenge bei gleichem Volumen um ca. 70 % bei 20°C. Wird von einer Übergangslösung mit Standard-Druck-Trailern zur Versorgung ausgegangen und die absolut benötigte Gesamt-Wasserstoffmenge im Netz angesetzt, so ergeben sich pro Tag statt ■ ca. ■ LKW-Fahrten. Dies entspricht einer Steigerung um ca. 1500 Fahrten pro Jahr. Eine Bestätigung für die angesetzte Anzahl der LKW-Fahrten findet sich in einer Veröffentlichung der Linde AG [28], die ca. 350 kg Wasserstoffinhalt für einen Standard-Druck-Trailer bei 350 bar ansetzt. Dies stimmt mit den berechneten Werten überein.

Wie bereits im Abschnitt 2.3.3 erläutert werden die zumindest zeitweise erhöhten Kosten und die erhöhten CO₂-Emissionen durch die zu erwartende höherer Anzahl an LKW-Fahrten in dieser Studie nicht berücksichtigt.

3.4.3 Infrastrukturkosten

Die Infrastrukturkosten ergeben sich aus den Streckengegebenheiten und den erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen für das jeweilige System.

3.4.3.1 Tankstellenkosten

Alle betrachteten Systeme, mit Ausnahme des Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid, benötigen Tankstellen zur Kraftstoffversorgung. Das Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeug benötigt gemäß den plausibilisierten Herstellerangaben (siehe Abschnitt 2.3.3) drei Tankstellen für das betrachtete Netz. Wie bereits beschrieben enthält der Wasserstoffpreis die gesamten Infrastrukturkosten, somit fallen diese aus der Betrachtung als ausweisbare Größe heraus und werden als Energiekosten dargestellt.

Anhand der aktuellen Situation im Netz sind mindestens ebenfalls drei Dieseltankstellen nötig, die anteilig auf die Linien umgelegt werden. Die Kostensätze und Intervallindikatoren sind in Tabelle 3-13 angegeben. Die angeführten Kosten ergeben sich aus Daten der Professur für Elektrische Bahnen. Da das Alter der bestehenden Dieseltankstellen nicht bekannt ist, wurde für die LCC-Betrachtung von einer Neuerrichtung zu Vertragsstart ausgegangen.

Tabelle 3-13 Kostensätze und Intervallindikator für die Dieseltankstelle

Bezeichnung	Wert	Einheit
Investitionskosten	█	€
Reinvestitionskosten	█	€
Betriebskosten	█	€/a
Lebensdauer	25	a
Abschreibungszeitraum	15	a

3.4.3.2 Infrastrukturkosten für Ladestationen

Alle Infrastrukturmaßnahmen, die nach Netzanalyse im Abschnitt 2.3.2 notwendig sind werden im Folgenden als Kosten für Ladestationen zusammengefasst. Die Kosten differenzieren sich in die Errichtungskosten für Oberleitungsanlagen und Energieversorgungsanlagen sowie deren Betriebskosten. Aufgrund der linienspezifischen Betrachtung werden alle durch die Linie in Anspruch genommenen Infrastrukturen anteilig auf die jeweils betrachtete Linie kostenmäßig umgelegt.

Die Betriebskosten der Energieversorgungscomponenten werden nach Expertenschätzung mit 0,5 % der Erstinvestitionen angenommen. Das Reinvestitionsvolumen berechnet sich aus den zu erneuernden Komponenten, nachdem diese ihre Lebensdauer erreicht haben. Beispielhaft müssen Netzanschlusskosten nur einmalig betrachtet werden und entfallen zum Zeitpunkt einer Reinvestition.

Untersuchungen der Professur für Elektrische Bahnen zeigen, dass sich die Betriebskosten für eine Oberleitungsanlage auf ca. 3100 €/km im Jahr belaufen. Die Lebensdauer bzw. der Abschreibungszeitraum einer Oberleitung wird mit 50 Jahren angesetzt, was dem Abschreibungsrahmen der AfA-Tabellen des Bundesministeriums für Finanzen entspricht.

3.4.3.3 Infrastrukturkosten für Wasserstoff

Aufgrund des angesetzten Preismodells sind die Infrastrukturkosten für Wasserstoff im spezifischen Wasserstoffpreis abgebildet und werden nicht separat ausgewiesen.

3.5 BESTIMMUNG DER LCC FÜR UNTERSCHIEDLICHE SZENARIEN

3.5.1 Umlegung von Gesamtkosten auf Linien

Die LCC-Analyse erfolgt für jede einzelne Linie. Über die Betrachtungszeit summieren sich die Einzelkapitalwerte zu einem Gesamtkapitalwert für das gesamte Netz auf. Die betrachteten Linien und ihre bahnbetrieblichen Abkürzungen der begrenzenden Betriebsstellen sind der Abb. 3-7 zu entnehmen.

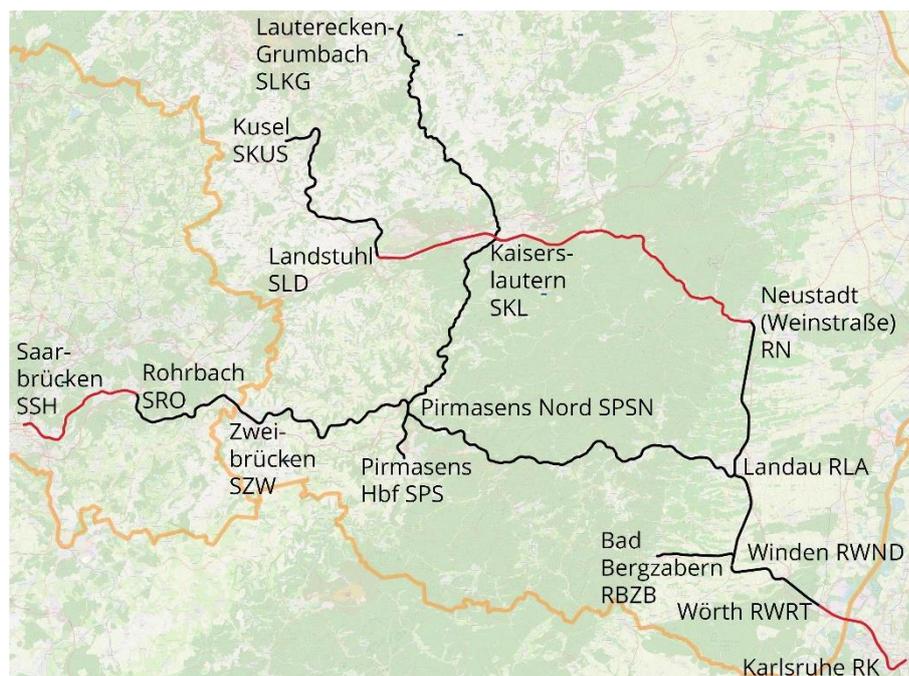


Abb. 3-7 Betrachtete Strecken im Pfalznetz

Die Einzelbetrachtung per Linie erfordert, dass die Infrastrukturmaßnahmen für das gesamte Netz wirtschaftlich zu gleichen Teilen auf die jeweiligen beteiligten bzw. profitierenden Linien verteilt werden müssen. Beispielsweise teilen sich alle Infrastrukturkosten für den Bahnhof Pirmasens Nord sowie die anschließende Elektrifizierung bis zum Fehrbacher Tunnel auf die Linien Kaiserslautern – Pirmasens, Landau – Pirmasens und Saarbrücken – Pirmasens auf. Sich ergebende Zusatzelektrifizierungen werden durch eine Addition in der Tabelle 3-14 hervorgehoben. Des Weiteren wurden die Anzahl der Fahrzeuge

und die Fahrleistung aus den aktuellen Umlaufplänen entnommen. Dabei sind auf der Linie Karlsruhe – Neustadt alle durchgebundenen Leistungen nach Wissembourg in den Kostensätzen enthalten. Die Streckendaten selbst beruhen auf den Daten des Open-Data-Portals der DB AG (Quelle Karte: OpenStreetMap).

Tabelle 3-14 Streckendaten

Linie	SKL-SKUS	SKL-SLKG	SKL-SPS	SSH-SPS	RLA-SPS	RK-RN	RWND-RBZB
Länge [km]	44,2	34,5	35,9	66,6	54,5	57,9	10
Elektrifiziert [km]	15,5	1,2	1,9+3,3	16,6+3,3	3,3	13	0
Anzahl Fahrzeuge	7	4	6	7	9	22	1
Fahrleistung [km/d]	219,9	289,73	216,27	357,05	217,53	289,73	398
Tankfahrten [1/7d]	3	2	2	3,5	3	3,5	3,5

Die Infrastrukturmaßnahmen sind in Tabelle 3-15 aufgelistet und den einzelnen Linien zugeordnet.

Tabelle 3-15 Aufteilung der Ladeinfrastrukturmaßnahmen

Linie	Ladungsmöglichkeit	Investition in Ladeinfrastruktur (anteilig) [€]	H ₂ -Tankstellen
SKL-SKUS	<ul style="list-style-type: none"> Strecke Kaiserslautern-Landstuhl Bf Kusel (neu) 	<ul style="list-style-type: none"> Kusel 4,17 Mio. 	<ul style="list-style-type: none"> Kaiserslautern
SKL-SLKG	<ul style="list-style-type: none"> Bf Kaiserslautern Bf Lauterecken-Grumbach (neu) 	<ul style="list-style-type: none"> Kaiserslautern (1 Gleis) 35 Tsd. Lauterecken-Grumbach 4,24 Mio. 	<ul style="list-style-type: none"> Kaiserslautern
SKL-SPS	<ul style="list-style-type: none"> Bf Kaiserslautern Strecke Pirmasens-Pirmasens Nord (neu) 	<ul style="list-style-type: none"> Pirmasens Hbf-Pirmasens Nord 2,39 Mio. 	<ul style="list-style-type: none"> Kaiserslautern Pirmasens
SSH-SPS	<ul style="list-style-type: none"> Strecke Saarbrücken-Rohrbach Strecke Pirmasens-Pirmasens Nord (neu) 	<ul style="list-style-type: none"> Pirmasens Hbf-Pirmasens Nord 2,39 Mio. 	<ul style="list-style-type: none"> Pirmasens
RLA-SPS	<ul style="list-style-type: none"> Bf Landau (neu) Strecke Pirmasens-Pirmasens Nord (neu) 	<ul style="list-style-type: none"> Bf Landau 3,6 Mio. Pirmasens Hbf-Pirmasens Nord 2,39 Mio. 	<ul style="list-style-type: none"> Pirmasens

RK- RN	<ul style="list-style-type: none"> • Strecke Karlsruhe-Wörth • Bf Landau (neu) • Bf Winden (neu) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bf Landau 3,6 Mio. • Bf Winden 2,43 Mio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Neustadt
RWND- RBZB	<ul style="list-style-type: none"> • Bf Winden (neu) • Bf Bad Bergzabern (neu) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bf Winden 2,43 Mio. • Bf Bad Bergzabern 42 Tsd.(nur Elektrant für Nachtabstellung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Neustadt (Weinstr.)

3.5.2 Linienspezifische Betrachtung

Aufgrund der Vielzahl an berechneten Daten wird stellvertretend die Strecke Saarbrücken – Pirmasens dargestellt. Abb. 3-8 zeigt die Kapitalwertentwicklung entlang des Betrachtungszeitraums. Die betrachtete Strecke ist knapp 67 km lang und zu ca. 30 % elektrifiziert.

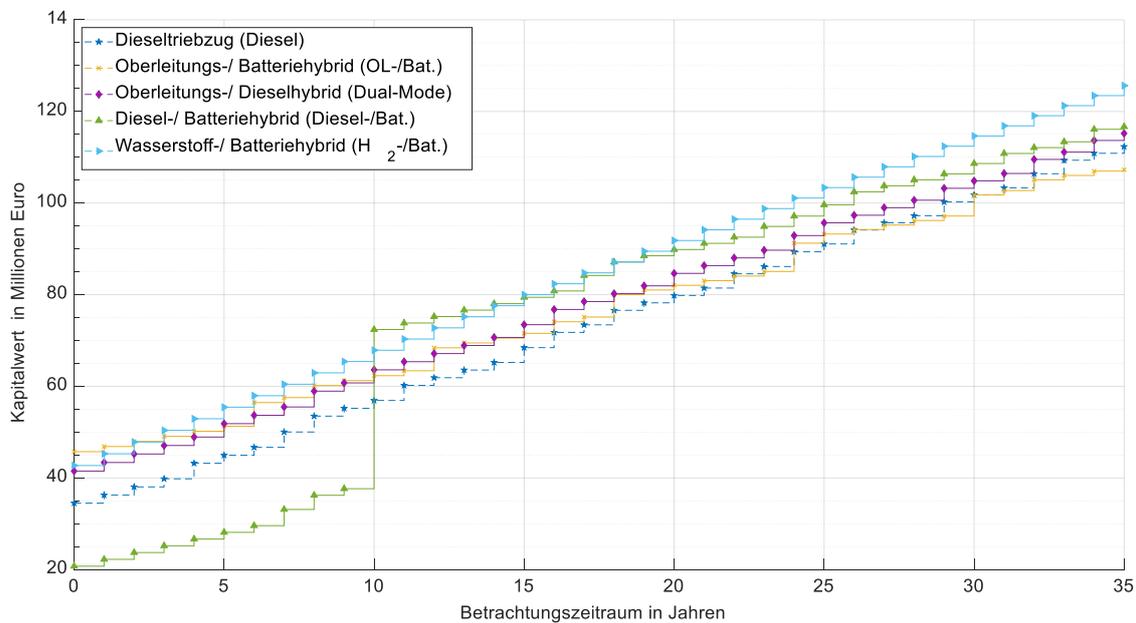


Abb. 3-8 Entwicklung der Kapitalwerte der einzelnen Linien

3.5.2.1 Dieselfahrzeug

Der Dieseltriebzug ist bezüglich der Erstinvestition das günstigste Neufahrzeug. Der noch günstigere Diesel-/ Batterie-Hybrid ist als Umbaufahrzeug in dieser Kostenposition nicht mit einem Neufahrzeug vergleichbar. Zudem benötigt das Dieselfahrzeug, abgesehen von einigen wenigen Tankstellen, keine zusätzliche Infrastruktur. Aufgrund der fehlenden Re-kuperationsfähigkeit gegenüber anderen Systemen und einem relativ hohen Energiebedarf sind die jährlichen Traktionsenergiekosten vergleichsweise hoch. Dagegen fallen keine kostenintensiven Tauschzyklen von Hochtechnologiekomponenten wie Batterien an. Lediglich die PowerPacks müssen nach Erreichen ihrer Laufleistung überholt werden.

Aufgrund der hohen Lebensdauer von 35 Jahren für ein Fahrzeug muss keine Reinvestition desselben durchgeführt werden. Zusammenfassend profitiert der Dieselizeug vom geringen Erstinvestitionsvolumen und kompensiert so teilweise die Energiebedarfskosten.

3.5.2.2 Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid

Das größte Erstinvestitionsvolumen benötigt der Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid. Vor allem durch die Fahrzeuginvestitionskosten und die Investitionen in die benötigte Infrastruktur zur Herstellung der Betriebsfähigkeit liegt das System oberhalb aller anderen betrachteten Systeme. Trotz dieses anfänglichen Nachteils ergibt sich für das System der niedrigste Kapitalwert und damit im Lebenszyklus die preiswerteste Alternative auf der betrachteten Linie. Die Technologie profitiert vom guten Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs, der sich in niedrigen Energiebedarfen widerspiegelt. Zudem profitiert das System von bereits elektrifizierten Streckenabschnitten, die einen preisgünstigen Energiebezug aus der Oberleitung ermöglichen. Im Gegensatz dazu ist der Energiebezug aus singularer Ladeinfrastruktur, versorgt aus dem öffentlichen Landesnetz, um ca. 67 % preisintensiver. Aufgrund des hohen Elektrifizierungsgrades auf dieser Strecke können die Traktionsenergiekosten die erheblichen Tauschkosten der Batterien kompensieren. Das Konzept bedarf eines vergleichsweise hohen Investitionsvolumens, ist jedoch über 35 Jahre Betrachtungsdauer die vorteilhafteste Technologie auf dieser Linie.

3.5.2.3 Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-Mode)

Der Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-Mode) ist das betrieblich flexibelste alternative Antriebssystem. Diese Flexibilität erfordert sowohl beim Fahrzeuginvestitionsvolumen als auch bei der Fahrzeugmasse Kompromisse. Die Technologie kann jedoch auf die nicht notwendigen Infrastrukturmaßnahmen zurückgreifen. Diese umfassen lediglich wenige Dieseltankstellen als Reinvestition im Lebenszyklus und sind identisch zum Dieselfahrzeug. Die Vorteilhaftigkeit der Technologie hängt stark vom Elektrifizierungsgrad der Linie ab. Unter einer bestehenden Oberleitung erreicht das System in Bezug auf die Energiebedarfskosten Werte ähnlich denen eines Elektrotriebzuges. Die höhere Fahrzeugmasse lässt jedoch trotzdem den Energiebedarf steigen. Aufgrund der höheren Masse liegt der Energiebedarf im Dieselbetrieb ebenfalls oberhalb dessen eines konventionellen Dieselfahrzeugs. Auf der betrachteten Linie reicht der bereits elektrifizierte Abschnitt von Saarbrücken nach Rohrbach nicht aus, um die Fahrzeuginvestitionskosten und den erhöhten Energiebedarf im Dieselbetrieb zu kompensieren. Somit liegt der Kapitalwert nach 35 Jahren Betrachtungsdauer auf dieser Strecke höher als der des Dieselfahrzeugs.

3.5.2.4 Diesel-/ Batterie-Hybrid

Der Diesel-/ Batterie-Hybrid folgt der Konzeptidee eines umgebauten Bestandsfahrzeugs. Aufgrund dessen liegen die Erstinvestitionskosten erheblich unter denen der anderen Systeme, trotz benötigter Ladeinfrastrukturmaßnahmen. Obwohl es möglich ist elektrisch, batterieelektrisch und dieselektrisch zu fahren, kann das System die geringen Anfangsinvestitionen nicht langfristig nutzen, da der Fuhrpark bereits nach 10 Jahren

durch Neufahrzeuge ersetzt werden muss. Angesichts der niedrigen Traktionsenergiekosten durch Nachladung aus der Oberleitung bzw. Ladestationen kann das System wirtschaftlich an die Vergleichssysteme heranrücken, jedoch liegt der Kapitalwert über den bereits erläuterten Technologien.

3.5.2.5 Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid

Der Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid benötigt hat ein ähnliches Fahrzeuginvestitionsvolumen wie die anderen Neufahrzeuge abgesehen vom Dieseltreibwagen, zunächst jedoch keine vom Aufgabenträger zu leistenden Infrastrukturmaßnahmen, da diese im Wasserstoffbezugspreis enthalten sind. Somit liegt das System zu Beginn unterhalb des Oberleitungs-/ Batterie-Hybrids. Wie der Dieseltzug kann der Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid die vorhandene Elektrifizierung nicht nutzen. In Kombination mit den höheren Bezugskosten für die Traktionsenergie durch den Wasserstoffpreis von ■■■ €/kg verglichen mit Diesel und elektrischer Energie steigt der Kapitalwert überproportional.

Des Weiteren liegen die Instandhaltungskosten oberhalb jener der anderen Systeme. In diesen Kosten ist bereits der Tausch bzw. die Revision der Hochtechnologiekomponenten (Batterie, Brennstoffzelle, Hochdrucksysteme) enthalten. Die zu den anderen Technologien ähnliche Erstinvestition und die gleichzeitig höheren Betriebskosten für Energie und Instandhaltung führen dazu, dass der Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid auf dieser Linie wirtschaftlich keine Vorteile aufweist.

3.5.2.6 Nichtausweisung der Restwerte der einzelnen Technologien

Wie im Abschnitt 3.3.5 erläutert, entstehen durch Betrachtungsdauern unterhalb des Abschreibungszeitraums buchhalterische Restwerte der Investitionsgüter, die dem Kapitalwert als Einnahmen gutgeschrieben werden können.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde auf die Darstellung derselben in den Auswertungen verzichtet, da außer bei der Technologie Diesel-/ Batterie-Hybrid keine nennenswerten und entscheidungsrelevanten Restwerte zu berücksichtigen sind. Grund hierfür ist, dass die Abschreibungsdauern meist kleiner oder gleich 20 Jahre betragen. Die Erlösung eines Restwerts für Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge im Jahr 2047 (22,5 Jahre Vertragslaufzeit ab 2024) ist in Anbetracht der Diesel-Diskussion eher unwahrscheinlich.

3.5.2.7 Zusammenfassung zur Strecke Saarbrücken-Pirmasens

Die betrachtete Linie dient nur zur Verdeutlichung der Vorgehensweise. Die Darstellungsform aus den Abb. 3-8, Abb. 3-9 und Abb. 3-10 finden sich im Anhang für jede Linie des Pfalznetzes wieder. Das hier dargestellte Ergebnis lässt sich wegen der unterschiedlichen Randbedingungen nicht auf alle Linien des Netzes oder das Gesamtnetz verallgemeinern.

Bereits bei der Betrachtung dieser einen Linie zeigt sich jedoch der hohe Einfluss des Elektrifizierungsgrades mit den dort erreichbaren niedrigen Energiebezugskosten sowie im Falle des Diesel-/ Batterie-Hybrid der Einfluss der kurzen Restlebensdauer der Fahr-

zeuge. Im Falle des Dieseltriebzuges kann der starke Einfluss von Energiepreis und Wirkungsgradkette auf den Energiebedarf und die Traktionsenergiekosten aufgezeigt werden.

Besonders hervorzuheben ist außerdem, dass die Kosten zum Tausch der Hochtechnologiekomponenten beim Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid (dort in den Instandhaltungskosten enthalten) sowie beim Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid wie erwartet als Kostentreiber zu identifizieren sind.

Die sich ergebenden Kapitalwerte einer Linie zum Ende des Betrachtungszeitraumes dienen später als Summand je Linie für den Gesamtkapitalwert je Technologie für das Gesamtnetz.

Um die Nachvollziehbarkeit der Betrachtungen der einzelnen Kostenpositionen und deren Einfluss auf den Kapitalwert zu verbessern, wurden zusätzlich zur Darstellung in Abb. 3-8, die einen genauen Rückschluss auf die Entwicklung der Kapitalwerte mit direkter Vergleichbarkeit der einzelnen Technologien je Jahr ermöglicht, zwei weitere Diagramme (Abb. 3-9, Abb. 3-10) erstellt. Abb. 3-8 ermöglicht außerdem Aussagen, ab wann sich eine Technologie gegenüber einer anderen Technologie als vorteilhafter erweist, die Gesamtkosten also günstiger geworden sind.

Abb. 3-8, Abb. 3-9 und Abb. 3-10 ermöglichen zudem, jahresgenau die jeweils zu zahlenden Kosten nach Kostenpositionen aufzuschlüsseln. Dies ermöglicht auch Rückschlüsse auf Erneuerungszyklen in verschiedenen Kostenpositionen je Linie und Technologie. Aus Darstellungsgründen wurde eine logarithmische Achseneinteilung für die Kosten gewählt.

Bereits aus der Darstellung der Kostenpositionen in Abb. 3-9 lassen sich einzelne Kostentreiber ermitteln, jedoch erst die Abb. 3-10 kann diese übersichtlich durch die Höhe der jeweiligen Kostenverlaufsanteile aufzeigen. Aufgrund der Gestalt der Graphen ist erkennbar, dass die Fahrzeuginvestitionen nur einen kleinen Anteil der Kapitalwertdifferenz zwischen den Technologien ausmachen, da alle Fahrzeugbeschaffungskosten der Hybridsysteme in ähnlichen Preisbereichen liegen. Lediglich der Diesel-/ Batterie-Hybrid liegt in Bezug auf der Reinvestition der Fahrzeuge über den Investitionsvolumina anderer Technologien. Der starke Einfluss des Austausches der Batterien des Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid sticht deutlich hervor.

Wie erwartet zeigt sich der geringere Kostenanteil für den elektrischen Traktionsenergiebezug im Gegensatz zu kraftstoffabhängigen Systemen. Je länger der Betrachtungszeitraum andauert umso maßgeblicher wird der Einfluss der Energiebedarfskosten auf den Gesamtkapitalwert.

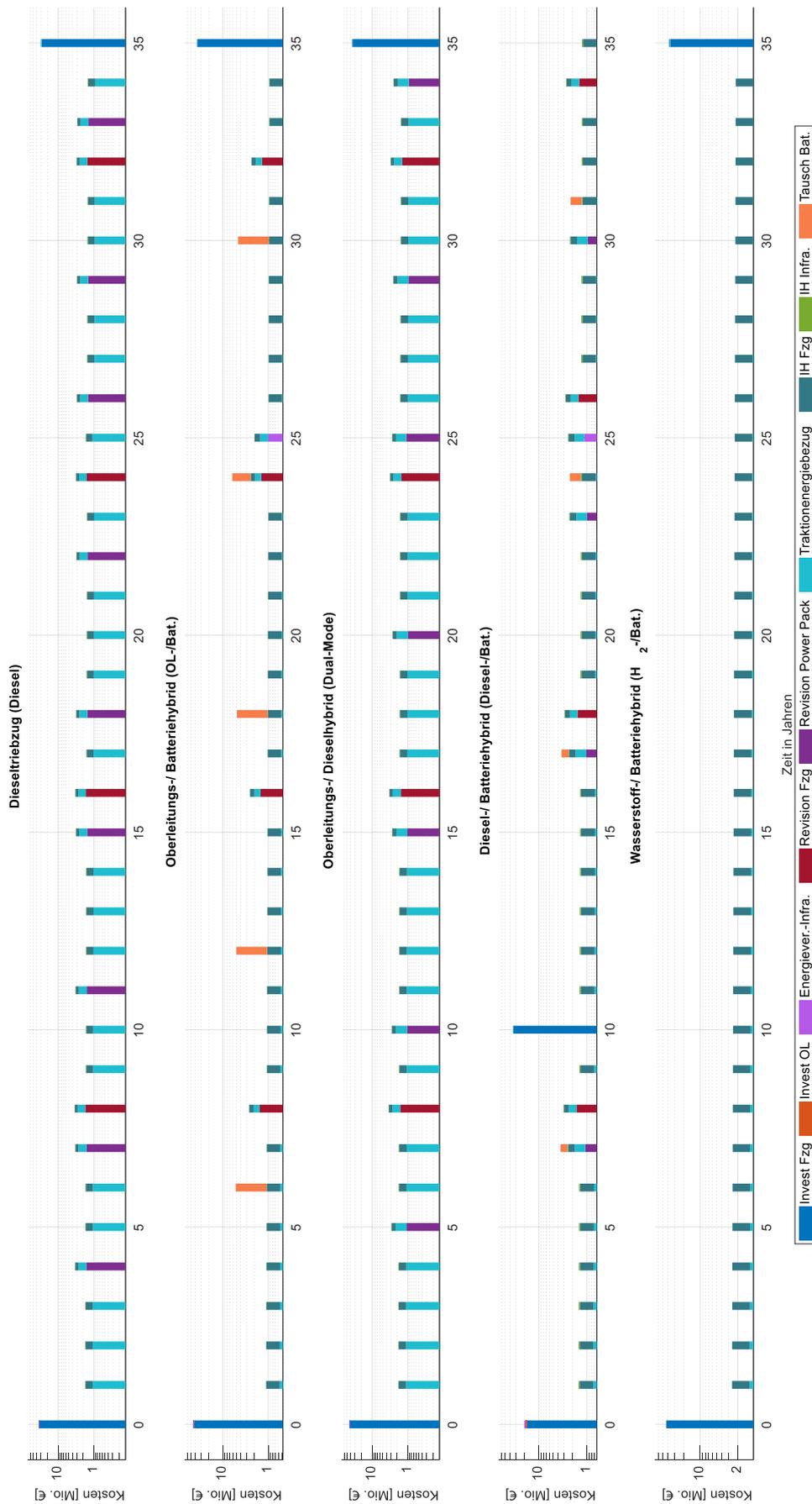


Abb. 3-9 Kostenpositionen Saarbrücken-Pirmasens in jährlicher Betrachtung

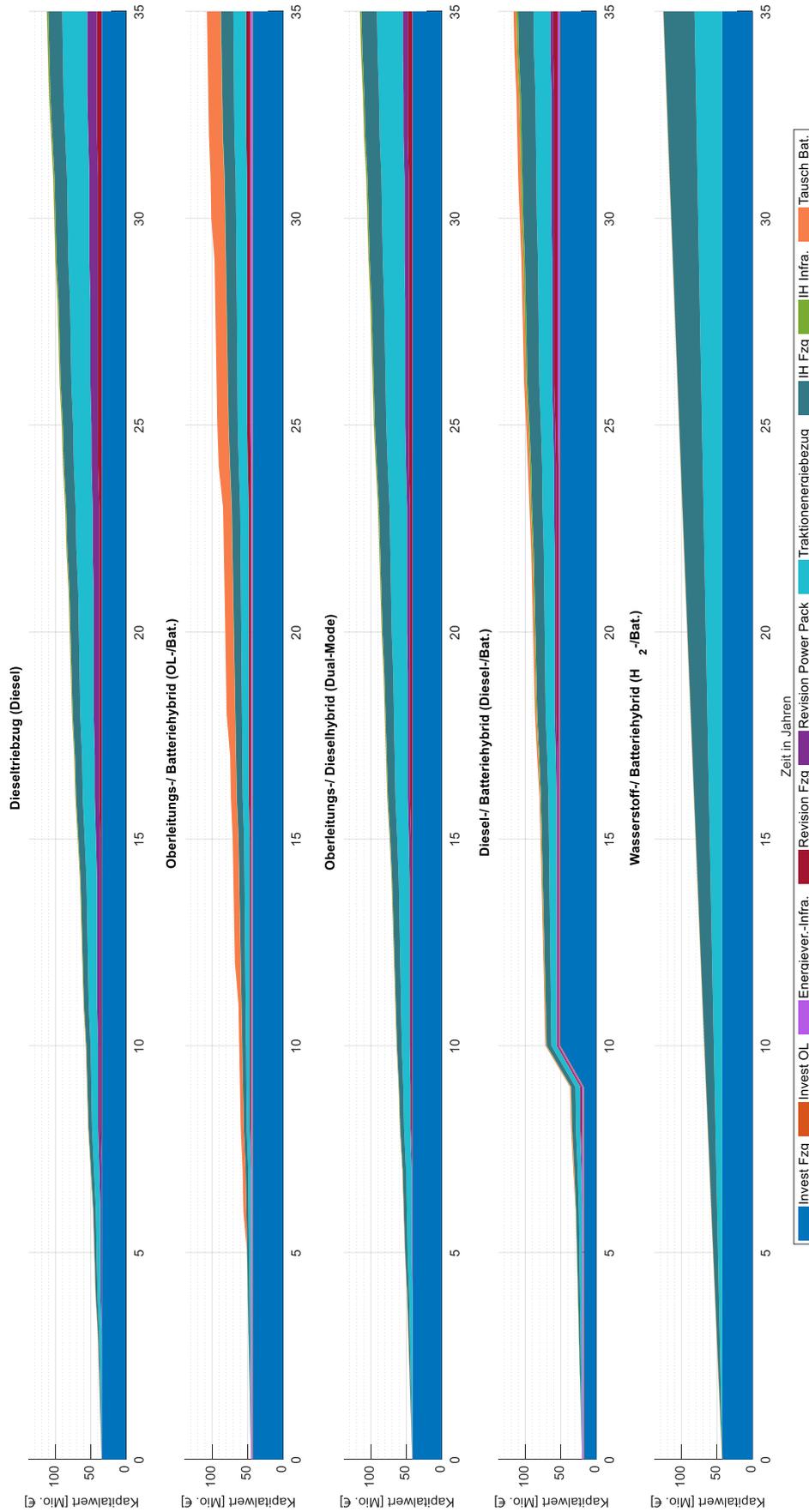


Abb. 3-10 Kapitalwertentwicklung Saarbrücken-Pirmasens (differenziert)

3.5.3 Gesamtnetz Betrachtung

Die Gesamtbetrachtung erfolgt differenziert nach den Betrachtungszeiträumen (35 und 22,5 Jahre) sowie nach den Infrastrukturrandbedingungen (Kostenrechnung inklusive bzw. exklusive Infrastruktur). Die Darstellungen sind in gezoomter Form abgebildet, d. h. nicht bei 0 € beginnend, da die hohen Gesamtsummen eine Differenzierung der Technologien sonst erschweren. Die Gesamtdarstellungen sind in differenzierter Form nochmals im Anhang dargestellt und zeigen den Anteil der einzelnen Linien am Kapitalwert.

3.5.3.1 Betrachtungszeitraum 35 Jahre

Die Gesamtbetrachtung über 35 Jahre in Abb. 3-11 zeigt, dass der Dieselzug den höchsten wirtschaftlichen Vorteil bietet. Von alternativen Antrieben kann der Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid den geringsten Kapitalwert erzielen. Unter der Voraussetzung der Übernahme der Infrastrukturmaßnahmen durch Dritte schneidet der Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid bereits am vorteilhaftesten ab, d. h. sogar besser als der Dieseltriebzug.

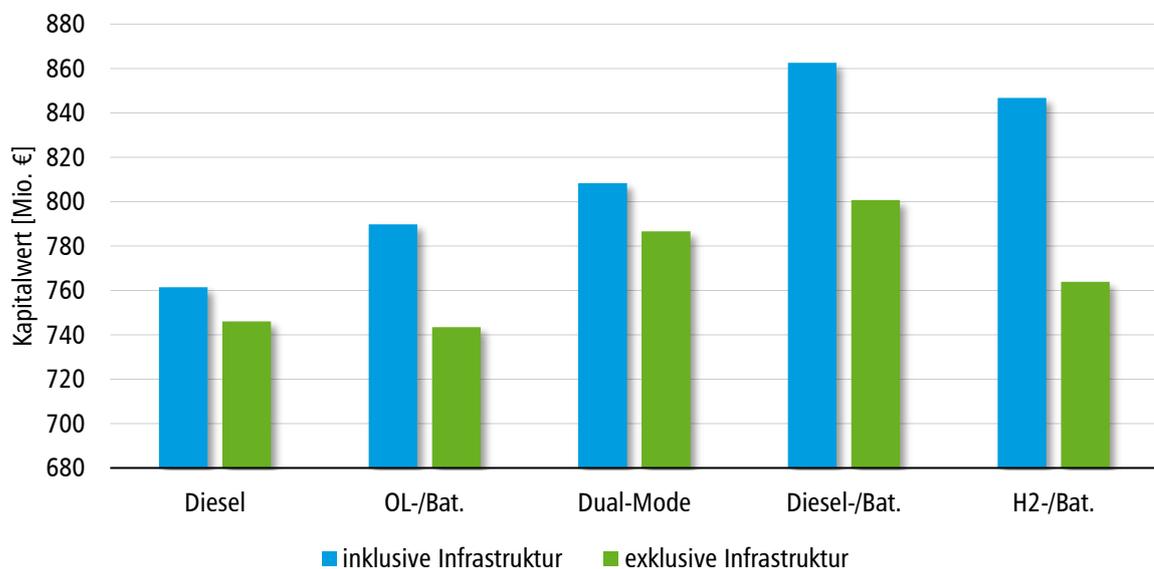


Abb. 3-11 Kapitalwerte im Gesamtnetz (35 Jahre Betrachtungszeit)

3.5.3.2 Betrachtungszeitraum 22,5 Jahre

Bei der Betrachtung für die maximale Dauer eines Verkehrsvertrages ergibt sich ein ähnliches Bild, wie Abb. 3-12 zeigt.

Im Hinblick auf die Zusammensetzung des Gesamtkapitalwertes aus den Einzelkapitalwerten (siehe auch Anhang A.4) stellt die Strecke Karlsruhe – Neustadt den größten Kostenanteil dar. Die Linie umfasst ca. 58 km und wird pro Tag von 22 Fahrzeugen mit hoher Laufleistung befahren. Aufgrund der hohen Fahrzeugzahlen spielen die begrenzten Lebensdauern der Hochtechnologiekomponenten eine übergeordnete Rolle. Hinzu kommt in der Gesamtnetz Betrachtung der hohe Einfluss der Traktionsenergiekosten. Beide sind die maßgeblichen Indikatoren für die Kapitalwertsteigerung.

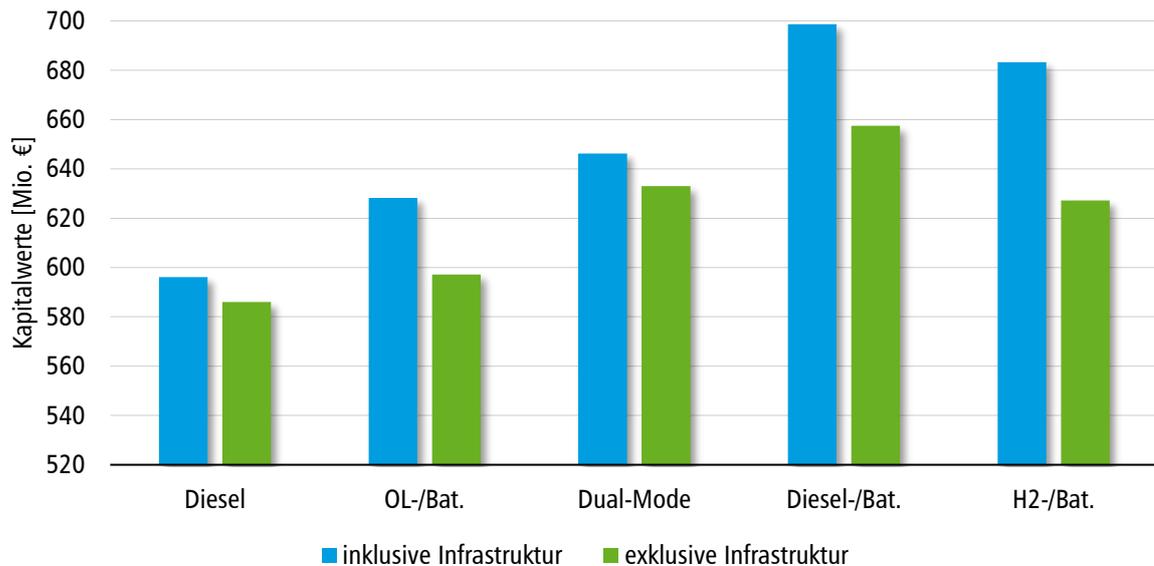


Abb. 3-12 Kapitalwerte im Gesamtnetz (22,5 Jahre Betrachtungszeitraum)

Tabelle 3-16 fasst die Kapitalwerte der verschiedenen Betrachtungszeiträume jeweils inklusive und exklusive Infrastruktur zusammen. Die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid gegenüber den anderen betrachteten alternativen Antriebssystemen wird deutlich. Diese Technologie wurde deshalb als insgesamt am wirtschaftlich vorteilhaftesten für das Pfalznetz ermittelt.

Tabelle 3-16 Kapitalwertübersicht des Gesamtnetzes für alle Betrachtungsvarianten

	35 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	35 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]	22,5 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	22,5 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]
Dieseltriebzug	761,4	746	596,1	586
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid	789,7	743,4	628,2	597,2
Zweikraftzug (Dual-mode)	808,3	786,6	646,2	633
Diesel-/ Batterie-Hybrid	862,5	800,7	698,6*	657,5*
H2-/Batterie-Hybrid	846,7	763,9	683,2	627,2

*jedoch hoher Fahrzeugrestwert enthalten

Über einen Betrachtungszeitraum von **35 Jahren** sind Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge inklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten 18 - 72 Millionen Euro günstiger als der Betrieb mit Neufahrzeugen anderer alternativer Antriebstechnologien. Im selben

Betrachtungszeitraum exklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten ist die Technologie 20 - 57 Millionen Euro günstiger als andere alternative Technologien.

Über einen Betrachtungszeitraum von **22,5 Jahren** ist die Technologie inklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten 18 - 70 Millionen Euro günstiger. Im selben Betrachtungszeitraum exklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten ist die Technologie 30 - 60 Millionen Euro günstiger.

3.5.4 Auswirkung einer Streckenelektrifizierung Neustadt - Wörth

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus Abschnitt 3.5.3 wurde zusätzlich eine Variantenuntersuchung zu einer Strecke durchgeführt. Dabei wurde die Elektrifizierung der Strecke von Wörth nach Neustadt unterstellt. Folgende Randbedingungen ergeben sich dafür:

- Betrachtungszeitraum 22,5 Jahre, da die Elektrifizierung nicht zu Beginn des Verkehrsvertrages zu erwarten ist
- vollelektrisches Fahren auf der Linie Neustadt – Karlsruhe
- günstiger Bahnstrombezug für die Linie Winden – Bad Bergzabern möglich
- günstiger Bahnstrombezug in Landau für die Linie nach Pirmasens möglich
- ein Flügelkonzept, wie es heute in Landau besteht, wird wieder möglich
- zur Beibehaltung der betrieblichen Flexibilität werden die Batterien in den Fahrzeugen auch für die Strecke Karlsruhe-Neustadt belassen, ihre Lebensdauererwartung jedoch auf 10 Jahre erhöht
- Betrachtung ohne Infrastrukturkosten, da die Strecke bereits zur Elektrifizierung vorgesehen ist

Die Auswirkungen dieser Ansätze können der Darstellung in Abb. 3-13 entnommen werden. Die Elektrifizierung ergibt einen deutlichen wirtschaftlichen Vorteil für die Oberleitungs-/ Batterie-Hybride und Dual-Mode-Fahrzeuge. Neben der deutlich günstiger zu befahrenden Linie Neustadt – Karlsruhe ergeben sich zusätzlich für Fahrzeuge mit Traktionsbatterieladung aus der Oberleitung niedrigere Energiebezugspreise für die Linien nach Bad Bergzabern und Pirmasens.

Die deutlichste Kapitalwertänderung weist der Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-Mode) auf. Das System profitiert besonders aufgrund der hohen Anzahl der Fahrzeugkilometer auf dieser Linie, die nun rein elektrisch statt ausschließlich mit Diesel gefahren werden können. Der Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid profitiert maßgeblich vom deutlich niedrigeren Energiebezugspreis der Linien Karlsruhe – Neustadt, Landau – Pirmasens und Winden – Bad Bergzabern sowie von der Entlastung der Batterien und den folglich größeren Tauschzyklen derselben.

Der Diesel-/ Batterie-Hybrid profitiert ebenfalls von der Elektrifizierung, ist jedoch durch den hohen Ausgangskapitalwert für die zweimalige Fahrzeugbeschaffung weiterhin wirtschaftlich schlechter als die anderen Systeme.

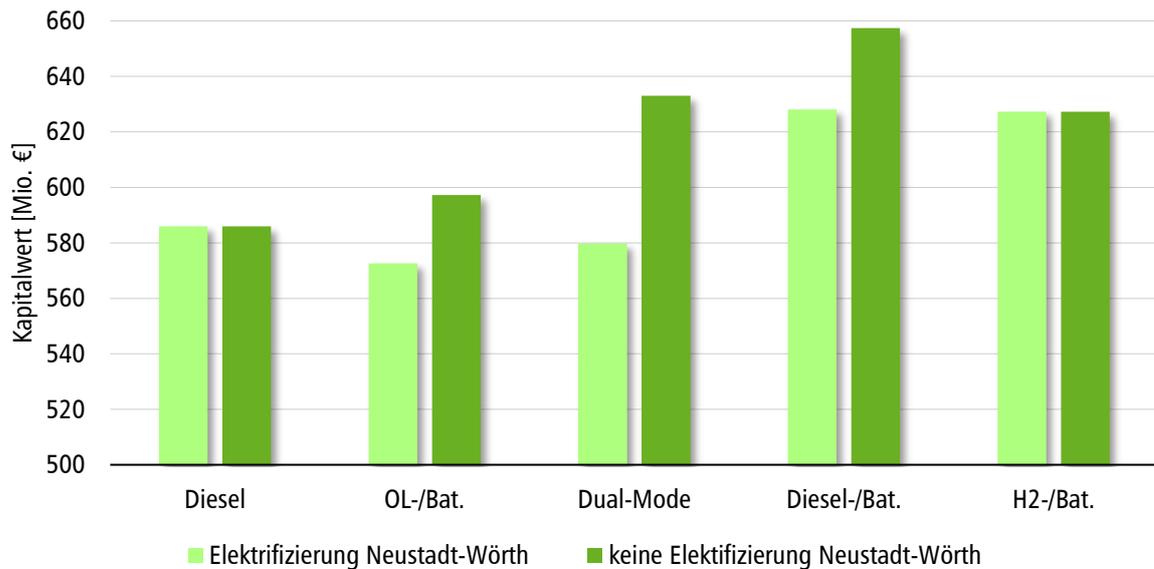


Abb. 3-13 Kapitalwerte im Gesamtnetz (Elektrifizierung Neustadt-Wörth)

Wichtigstes Ergebnis der Variantenuntersuchung ist, dass der Verkehr im Gesamtnetz bei einer Elektrifizierung der Strecke Wörth – Neustadt mit Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen **kostengünstiger** wird als eine Beibehaltung des Dieselbetriebs.

Von der zu erwartenden Elektrifizierung können nur die zu einem steigenden Elektrifizierungsanteil kompatible Fahrzeugtechnologien in ihrer Kostenstruktur profitieren. Die Gewährleistung der Aufwärtskompatibilität ist deshalb bei der im Pfalznetz anstehenden Fahrzeugbeschaffung und der vorhandenen Elektrifizierungsperspektive ein maßgebendes Kriterium.

4 BEWERTUNG DER CO₂-EMISSIONEN IM BETRIEB

4.1 AUFGABENSTELLUNG UND AUSGANGSLAGE

Ziel ist die Einschätzung möglicher Reduktionspotentiale der CO₂-Emissionen der verschiedenen alternativen Antriebstechnologien. Die Professur für Elektrische Bahnen verfügt hierzu über ein Softwaretool, das gleichzeitig die Ermittlung der CO₂-Emission aller Technologien, auch bei Variationen der Eingangsparameter, ermöglicht.

Zunächst müssen die CO₂-Emissionsfaktoren jedes Energiebereitstellers bestimmt werden:

- Beim Bezug elektrischer Energie aus dem Oberleitungsnetz ergeben sich die CO₂-Emissionen aus Emissionswerten entsprechend des Energiemixes des zentralen 16,7-Hz-Bahnstromnetzes.
- Beim Bezug elektrischer Energie aus den Ladestationen wird vom Energiemix des Landesnetzes (50-Hz-Versorgungsnetz) ausgegangen.
- Die Emissionswerte für elektrische Energie sind nach Prognosen verschiedener Institute bzw. der DB Energie dynamisiert bis 2030. Sie sinken also zunächst, werden dann jedoch als konstant angenommen.
- Für die Verbrennung von Dieselmotoren werden der direkte Emissionswert aus der Verbrennung des Kraftstoffs sowie weitere Emissionsfaktoren angesetzt, die einerseits durch die Herstellung des Kraftstoffes entstehen, andererseits werden auch die Emissionen anderer Gasverbindungen neben CO₂ in ihrer Wirkung für den Treibhauseffekt eingerechnet. Dies entspricht üblichen Bewertungsverfahren.
- Die CO₂-Emissionen von Wasserstoff ergeben sich aus dem jeweiligen Herstellungsprozess des Gases. Eine Abfrage eines potentiellen Lieferanten von Wasserstoff für das Pfalznetz ergab, dass dort maßgeblich Chloralkali-Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff genutzt wird. In der Betrachtung des CO₂-Abrucks je produzierter Einheit wird durch den Hersteller die CO₂-Emissions-Aufteilung nach dem wirtschaftlichen Wert des Gases bestimmt. Dies führt zu rechnerisch niedrigen Emissionswerten für den Wasserstoff, da Chlor und Natronlauge als weitere Produkte des Prozesses erheblich werthaltiger als Wasserstoff sind und damit höhere CO₂-Anteile erhalten.

Neben den CO₂-Faktoren in gCO₂/kWh ist es notwendig, den Energiebedarf der Fahrzeuge im Pfalznetz je Linie und Technologie abzuschätzen und auf die neuen Technologien zu übertragen.

Eine Betrachtung der Herstellungsemissionen der Fahrzeuge wird aufgrund der erwarteten Neubeschaffung aller Fahrzeuge nicht vorgenommen.

4.2 BESTIMMUNG DES ENERGIEBEDARFS JE TECHNOLOGIE

Die Professur für Elektrische Bahnen verfügt über umfangreiches gemessenes Datenmaterial zu den Energiebedarfswerten elektrisch geführter Zugläufe aller Zugarten und Netztopologien. Über eine Umrechnung in spezifische Werte pro Kilometer und Tonne Fahrzeugmasse kann dieser Wert auch in größere und kleinere Fahrzeugeinheiten überführt werden. Durch Abgleich der beiden Größen Zugart und Netztopologie mit den Linien des Pfalznetzes können diese bekannten Energiebedarfswerte anderer Linien in Deutschland als Referenzwerte für das Pfalznetz genutzt werden.

Sind die elektrischen Energiebedarfswerte eines im Pfalznetz verkehrenden Elektrotriebzuges am Stromabnehmer derart bestimmt, kann über statische Wirkungsgradketten der mechanische Energiebedarf am Rad berechnet werden. Es ergibt sich ein streckenspezifischer mechanischer Grundenergiebedarf, der bei angenommenem ähnlichem Fahrprofil pro Tonne Fahrzeuggewicht und Kilometer für jede Technologie annähernd gleich ist. Lediglich für die nicht rekuperationsfähigen Technologien der Dieseltriebzüge und Oberleitungs-/ Diesel-Hybride muss ein Faktor, der die nicht wiedernutzbare Energie repräsentiert, aufgeschlagen werden. Sind die mechanischen Grundenergiebedarfe am Rad derart bestimmt, kann wiederum über statische Wirkungsgradketten der Energiebedarf aus der jeweiligen Energiequelle berechnet werden. Im Ergebnis bildet sich für jede Technologie und jede Linie ein Energiebedarfswert, der in kWh/km angegeben werden kann und den Energiebedarf ab Tankeingang bzw. Stromabnehmer darstellt.

Der Energiebedarfswert wird dann entsprechend der jeweils vorhandenen Energiebereitersteller (Dieselmotor mit Generator, Oberleitung, Ladestation, Brennstoffzelle) technologie- und linienspezifisch aufgeteilt. Ergebnis ist ein Energiewert in kWh der Abnahmemenge je Erzeuger.

Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit des Verzichts auf Simulationen und die daraus folgende schnelle und trotzdem ausreichend valide Ermittlung der Einsparpotentiale einzelner Technologien auf einer Linie oder im Netz.

4.3 ÜBERFÜHRUNG IN CO₂-EMISSIONEN JE LINIE BZW. GESAMTNETZ

Der Energiewert je Erzeuger in kWh aus Abschnitt 4.2 wird mit den CO₂-Emissionsfaktoren in gCO₂/kWh aus Abschnitt 4.1 multipliziert, sodass sich je Linie und Technologie ein Emissionswert pro Jahr Vertragslaufzeit ergibt. Diese Jahreswerte werden über der maximale Vertragslaufzeit von 22,5 Jahren aufsummiert. Längere Zeiträume werden nicht berücksichtigt, da die Prognosen dann zu geringe Präzision aufweisen.

Summiert man die Gesamtwerte aller Linien auf, so ergeben sich die Emissionen je Technologie für das gesamte betrachtete Netz in 22,5 Jahren in absoluten Zahlen.

Wie Tabelle 4-1 zeigt, können nahezu alle Technologien CO₂-Einsparungen erreichen, lediglich der Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid erreicht aufgrund des geringen Gesamtelektrifizierungsgrades des Netzes und seiner hohen Masse nur den Status Quo.

Tabelle 4-1 CO₂-Emissionen des Gesamtnetzes für alle Technologien über 22,5 Jahre

Angaben in Tonnen CO ₂	Dieseltreibzug	Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid	Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode)	Diesel-/ Batterie-Hybrid	Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid
RK-RN	203.613	73.683	203.594	105.857	61.701
RLA-SPS	60.802	21.791	68.832	35.634	18.425
RWND-RBZB	12.361	4.430	13.993	7.244	3.746
SKL-SKUS	47.806	17.807	44.108	23.005	14.487
SKL-SLKG	35.992	12.412	40.130	20.925	10.907
SKL-SPS	40.300	13.969	44.470	23.173	12.212
SSH-SPS	77.621	28.249	76.479	39.775	23.522
Summe für 22,5 Jahre:	478.494	172.340	491.606	255.613	144.999
Prozentuale Einsparung:	0%	64%	-3%	47%	70%

Den höchsten Einsparungsgrad mit gut 70 % erreicht der Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid, gefolgt vom Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid mit ca. 64 %. Der verhältnismäßig hohe Emissionswert für Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge resultiert aus den noch immer hohen Anteilen elektrischer Energie, die durch Braun- bzw. Steinkohlekraftwerke ins Netz eingespeist werden. Die CO₂-Emissionen des Bahnstrommixes liegen unter jenen des Landesnetzes mit circa 486 gCO₂/kWh [28], sind jedoch mit rund 350 gCO₂/kWh [29] in 2017 immer noch hoch.

Bei Umstellung der Wasserstoffproduktion auf elektrolytische Verfahren mit CO₂-neutralem Strom bzw. bei Bezug von CO₂-neutralem Strom zur Fahrt und Nachladung an der Oberleitung und an Ladestationen haben beide Technologien die Möglichkeit, kurzfristig vollständig CO₂-emissionsfrei zu werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

5.1 WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

Oberleitungs-/ Batterie-Hybride sind in der Gesamtnetzbetrachtung im Vergleich der alternativen Antriebssysteme am wirtschaftlichsten. Der Gesamtkapitalwert des Systems liegt nahe an dem der Bestandstechnologie mit Dieseltriebzügen, dessen Kapitalwert als Referenz dient. In drei von vier Fällen bleiben Dieseltriebzüge allerdings weiterhin noch die wirtschaftlichste Technologie.

Besonders vorteilhaft sind Oberleitungs-/ Batterie-Hybride bei bereits vorhandener Elektrifizierung, da die Ladung der Traktionsbatterien dort an der Oberleitung erfolgt. Dies ermöglicht einen kostengünstigen Energiebezug, was insbesondere bei hohen Laufleistungen maßgebliche Auswirkungen hat. Bei vorhandener Elektrifizierungsperspektive ermöglicht die Technologie zudem eine Nutzung ergänzender Streckenelektrifizierung nach Vertragsbeginn. Diese würde den wirtschaftlichen Vorteil weiter erhöhen.

Der wirtschaftliche Vorteil nimmt über längere Betrachtungszeiträume (Betrachtungsdauer bis zu 35 Jahren) zu. Insbesondere der hohe Wirkungsgrad vollelektrischer Systeme verbunden mit günstigen Energiebezugskosten wirkt sich bei längerfristigen Betrachtungen auf den Kapitalwert aus. Zudem sind alle Fahrzeugtechnologien nach Ende des langen Betrachtungszeitraums vollständig abgeschrieben.

5.2 KOSTENTREIBER

Den größten Einfluss auf die Rangfolge der Technologien haben die Traktionsenergiekosten. Dabei sind spezifische Energiekosten und Antriebswirkungsgrade entscheidend für die Effizienz und damit die Wirtschaftlichkeit des Systems. Im Hinblick auf lange Lebensdauern und hohe Laufleistungen der Fahrzeuge ist diese Kostenposition sehr relevant, da schon kleine Kostenvorteile und große Energiebedarfe über den langen Zeitraum maßgebliche Auswirkungen haben.

Entgegen der allgemeinen Erwartungen haben die Fahrzeugbeschaffungskosten nur einen geringen Einfluss auf die Rangfolge der Hybridsysteme und verursachen aufgrund der langen Lebensdauern der Fahrzeuge nur geringe Differenzen beim Kapitalwert.

Dem gegenüber ist der belastungsabhängige Tausch von Hochtechnologiekomponenten wie Batterien, PowerPacks und Brennstoffzellen ein Kostentreiber. Dabei spielen vor allem die Lebensdauer bzw. die Laufleistung der Komponenten eine maßgebliche Rolle. Zu erwartenden Weiterentwicklungen können die Wirtschaftlichkeit zudem positiv beeinflussen.

5.3 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

In der Studie wurden die betrieblichen CO₂-Emissionen aller Antriebstechnologien miteinander verglichen. Wasserstoff-/ Batterie- und Oberleitungs-/ Batterie-Hybride erreichen jeweils eine Einsparung um ca. 2/3 der Emissionen im Vergleich zur Dieseltraktion. Das Ziel, den Betrieb des Loses 1 des Pfalznetzes deutlich ökologischer zu gestalten, kann durch beide Technologien erreicht werden. Sie bieten zudem die Möglichkeit zukünftig nahezu vollständig emissionsfrei zu verkehren.

Die Untersuchung bestätigt die ökologischen Ambitionen der Antriebstechnologieumstellung im Pfalznetz.

5.4 EMPFEHLUNG ZUR TECHNOLOGIEENTSCHEIDUNG

Unter Berücksichtigung aller untersuchten Randbedingungen sehen die Gutachter Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge als die wirtschaftlichste alternative Antriebstechnologie im Pfalznetz an.

Diese Empfehlung stützt sich auf Ergebnisse der Kapitalwertberechnung verschiedener alternativer Antriebstechnologien. Diese zeigt, dass die Oberleitungs-/ Batterie-Hybride bereits eine Wettbewerbsfähigkeit mit der Bestandstechnologie der Dieselfahrzeuge erreichen. Außerdem berücksichtigt sie die CO₂-Emissions-Bewertung, die das ökologische Ziel der Traktionsartänderung im Pfalznetz bestätigt. Schließlich ist die empfohlene Technologie aufwärtskompatibel zu weiteren Elektrifizierungsvorhaben im Pfalznetz und darüber hinaus.

Die kostenintensivste Linie im Untersuchungsgebiet ist die Verbindung von Karlsruhe nach Neustadt (Weinstraße). Diese Strecke weist eine hohe tägliche Zugkilometerleistung bei gleichzeitiger hoher Fahrzeuganzahl auf. Diese Linie hat im Abschnitt von Wörth nach Neustadt bisher keine Oberleitung, jedoch eine Elektrifizierungsperspektive für den gesamten Abschnitt. Würde diese kostenintensivste Strecke im Pfalznetz durchgehend elektrifiziert, steigt die Wirtschaftlichkeit des gesamten Netzbetriebes. Insgesamt wäre damit der Betrieb mit Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen sogar wirtschaftlicher als der Dieselbetrieb.

Alle Ergebnisse gelten unter der Randbedingung, dass eine einheitliche Fahrzeugtechnologie im gesamten Los 1 des Pfalznetzes zum Einsatz kommt.

QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Ecopoint DieselNet, „Dieselnet.com,“ Ecopoint Inc., [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>. [Zugriff am 22 Mai 2019].
- [2] DKE/UK 351.2: Ortsfeste Anlagen, Norm DIN EN 50367 (VDE 0115-605):2017-01 Tabelle 5, Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2017.
- [3] Verkehrsverbund Rhein-Neckar, „Vertrag über die Verkehrsleistungen zur S-Bahn Rhein-Neckar Los 2 unterzeichnet,“ Verkehrsverbund Rhein-Neckar, Mannheim, 2017.
- [4] M. Kessler, „Futurezone 14-Tonnen-Akku statt Diesel: ÖBB testen Öko-Zug ab 2019,“ Futurezone GmbH, 10 September 2018. [Online]. Available: <https://futurezone.at/b2b/14-tonnen-akku-statt-diesel-oebb-testen-oeko-zug-ab-2019/400114013>.
- [5] Siemens AG, „Factsheet Desiro ML ÖBB Cityjet eco,“ Siemens AG, München, 2018.
- [6] Internationales Verkehrswesen, „Internationales Verkehrswesen - Bombardier und TU Berlin: Innovativer Batteriezug ab 2019 im Testbetrieb,“ Trialog Publishers Verlagsgesellschaft, [Online]. Available: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/batteriezug-ab-2019-im-testbetrieb/>. [Zugriff am 22 Mai 2019].
- [7] J. Frintert, „Golem.de,“ Golem Media GmbH, [Online]. Available: <https://www.golem.de/news/bombardier-und-tu-berlin-triebzug-mit-akku-soll-dieselzuege-ersetzen-1808-136240.html>. [Zugriff am 22 Mai 2019].
- [8] Stadler Deutschland, „Medienmitteilung Stadler lässt den FLIRT von der Leine,“ Stadler Deutschland, Berlin, 2018.
- [9] Alstom, „Product sheet Coradia Polyvalent Low-floor electric or dual-mode multiple unit,“ Alstom, Saint-Ouen, 2015.
- [10] ZSPNV RLP Süd, „59.Verbandsversammlung am 17.05.2019Öffentliche Sitzung,“ ZSPNV Rheinland-Pfalz Süd, Bad Dürkheim, 2019.
- [11] O. Uluc, „Wasserstoff als Energieträger, Ballard Power Systems,“ in *DMG Seminar E1*, Berlin, 2018.

- [12] J. Steinbauer, „Mireo - Ein starker Zug wird jetzt noch stärker,“ München, 2019.
- [13] H. Schreiner, „Strategische Überlegungen der Zillertalbahn zum Einsatz von Wasserstoff als Energieträger,“ in *DMG Seminar E1*, Berlin, 2018.
- [14] Deutsche Bahn AG, *Infrastrukturzustandsbericht 2016*, Berlin: Deutsche Bahn AG, 2017.
- [15] DB Energie GmbH, „Preistabelle DB Energie Bahnstrompreise Mittelspannung,“ DB AG, Berlin, 2019.
- [16] Eurostat/statista.com, „Statista - Industriestrompreis in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2017 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde),“ Statista GmbH, Juni 2018. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/>.
- [17] DB Energie GmbH, *Machbarkeitsstudie - Aufbau einer Ladeinfrastruktur für alternative Fahrzeugkonzepte (Akkuzüge) im Pfalznetz*, Karlsruhe: DB Energie GmbH, 2018.
- [18] Verlag Schweers + Wall GmbH, *Eisenbahnatlas Deutschland*, Köln: Verlag Schweers + Wall GmbH, 2017.
- [19] H. Blom, K. Lüdner und S. C., *Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*, München: Franz Vahlen, 2012.
- [20] J. Grae und K.-D. Däumler, *Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung*, Ettenheim: Neue Wirtschafts-Briefe GmbH&Co.KG, 2007.
- [21] U. Götze, *Investitionsrechnung. Modell und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*, Berlin: Springer Verlag, 2008.
- [22] D. E. 60300-3-3, *Zuverlässigkeitsmanagement-Teil 3-3: Anwendungsleitfaden-Lebenszykluskosten*, 2005.
- [23] Ö. Nationalbank, „(n.d.). Entwicklung des Kapitalmarktzinssatzes in Deutschland in den Jahren von 1975 bis 2018.,“ Statista, 2019. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/201419/umfrage/entwicklung-des-kapitalmarktzinssatzes-in-deutschland/>. [Zugriff am 14.3.2019].

- [24] D. Bundesbank, „Die Geldpolitik des Eurosystems,“ [Online]. Available: <https://www.bundesbank.de/de/service/schule-und-bildung/schuelerbuch-geld-und-geldpolitik-digital/die-geldpolitik-des-eurosystems--613884>. [Zugriff am 15 März 2019].
- [25] D. Bundesbank, „(n.d.). Entwicklung des Zinssatzes der Europäischen Zentralbank für das Hauptrefinanzierungsgeschäft von 1999 bis 2018,“ Statista, November 2018. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/201216/umfrage/ezb-zinssatz-fuer-das-hauptrefinanzierungsgeschaeft-seit-1999/>. [Zugriff am 14 März 2019].
- [26] D.-I. M. Melzer, Entwicklung von Werkzeugen zur automatisierten Traktionsspeicherdimensionierung auf dieselelektrisch angetriebenen Schienfahrzeugen, Universität: Dissertation, 2013.
- [27] J. Klier, M. Rattey, G. Kaiser, M. Klupsch, A. Kade, M. Schneider und R. Herzog, „Anew cryogenic high-pressure H₂test area: First results,“ in *Proceedings of the 12th IIR International Conference*, Dresden, 2012.
- [28] D. J. Wolf, „Die neuen Entwicklungen der Technik - Elemente der Wasserstoff-Infrastruktur von der Herstellung bis zum Tank,“ in *Medienforum Deutscher Wasserstofftag - eine Initiative des VDI Wissensforums und der Linde AG*, München, 2003.
- [29] Umweltbundesamt Deutschland, „CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter,“ April 2019. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-sinken>.
- [30] DB AG, „DB AG - Umwelt-Vorreiter - Klimaschutz - Daten und Fakten,“ DB AG, [Online]. Available: <https://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/umweltvorreiter/datenfakten/klimaschutz-1183660>. [Zugriff am 23 Mai 2018].
- [31] Benutzer:Guenson, „Wikipedia,“ 23 November 2011. [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Guenson/Bilder>.
- [32] T. Dresden, Innovation hat Tradition, Dresden: Verleger, 2011, p. 1 ff..
- [33] S. Bundesamt, „Inflationsrate in Deutschland von 1992 bis 2018 (Veränderung des Verbraucherpreisindex gegenüber Vorjahr),“ Statista, 20019. [Online]. Available:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindexes-zum-vorjahr/>. [Zugriff am 14 März 2019].

- [34] C. Höhne, „Life Cycle Costing - Systematisierung bestehender Studien,“ *Dresdner Beiträge zur Lehre der betrieblichen Umweltökonomie*, p. Nr. 37, 2009.
- [35] Statistisches Bundesamt, Betriebsdaten des Schienenverkehrs 2016, Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2017.
- [36] DB Netz AG, „Info-Broschüre DB Netze Infrastruktur,“ DB AG, Berlin, 2018.

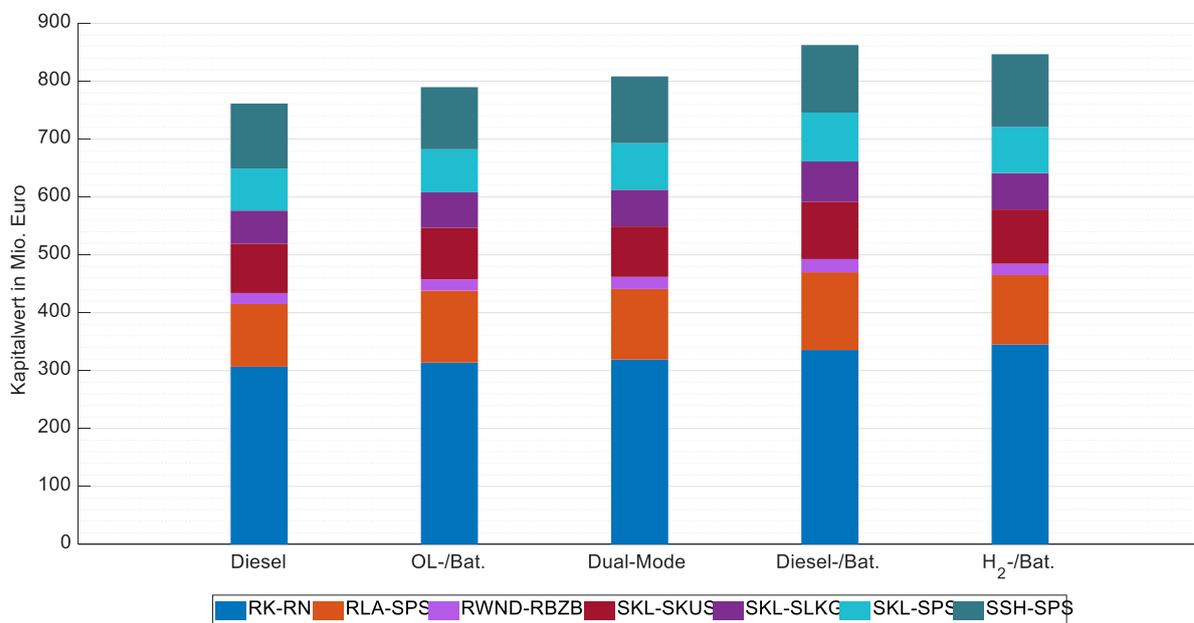
ANHANG

A	Gesamtkapitalwerte im Pfalznetz	77
A.1	35 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur	77
A.2	35 Jahre Betrachtungszeit exklusive Infrastruktur	78
A.3	22,5 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur	78
A.4	22,5 Jahre Betrachtungszeitraum exklusive Infrastruktur	79
B	Linienspezifische Auswertung Neustadt-Karlsruhe.....	79
B.1	Kapitalwertverlauf RN-RK.....	79
B.2	Kostenpositionen RN-RK.....	80
B.3	Kapitalwertverlauf RN-RK (differenziert)	81
C	Linienspezifische Auswertung Landau-Pirmasens	82
C.1	Kapitalwertverlauf RLA-SPS.....	82
C.2	Kostenpositionen RLA-SPS	83
C.3	Kapitalwertverlauf RLA-SPS (differenziert)	84
D	Linienspezifische Auswertung Winden-Bad Bergzabern	85
D.1	Kapitalwertverlauf RWND-RBZB	85
D.2	Kostenpositionen RWND-RBZB.....	86
D.3	Kapitalwertverlauf RWND-RBZB (differenziert).....	87
E	Linienspezifische Auswertung Kaiserslautern-Kusel	88
E.1	Kapitalwertverlauf SKL-SKUS	88
E.2	Kostenposition SKL-SKUS	89
E.3	Kapitalwertverlauf SKL-SKUS (differenziert).....	90
F	Linienspezifische Auswertung Kaiserslautern-Lauterecken.....	91
F.1	Kapitalwertverlauf SKL-SLKG	91
F.2	Kostenpositionen SKL-SLKG.....	92
F.3	Kapitalwertverlauf SKL-SLKG (Differenziert).....	93
G	Linienspezifische Auswertung Kaiserslautern-Primasens	94
G.1	Kapitalwertverlauf SKL-SPS	94
G.2	Kostenpositionen SKL-SPS.....	95
G.3	Kapitalwertverlauf SKL-SPS (differenziert).....	96

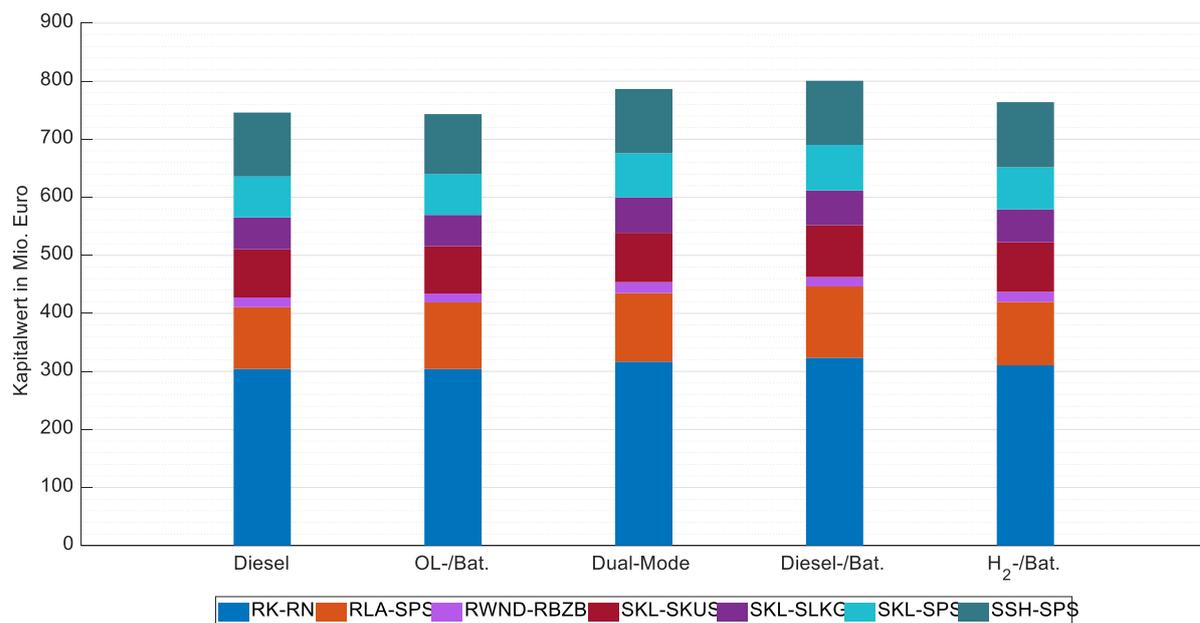
H	Linien spezifische Auswertung Saarbrücken-Pirmasens.....	97
H.1	Kapitalwertverlauf SSH-SPS.....	97
H.2	Kostenpositionen Ssh-SPS.....	98
H.3	Kapitalwertverlauf SSH-SPS (differenziert)	99

A GESAMTKAPITALWERTE IM PFALZNETZ

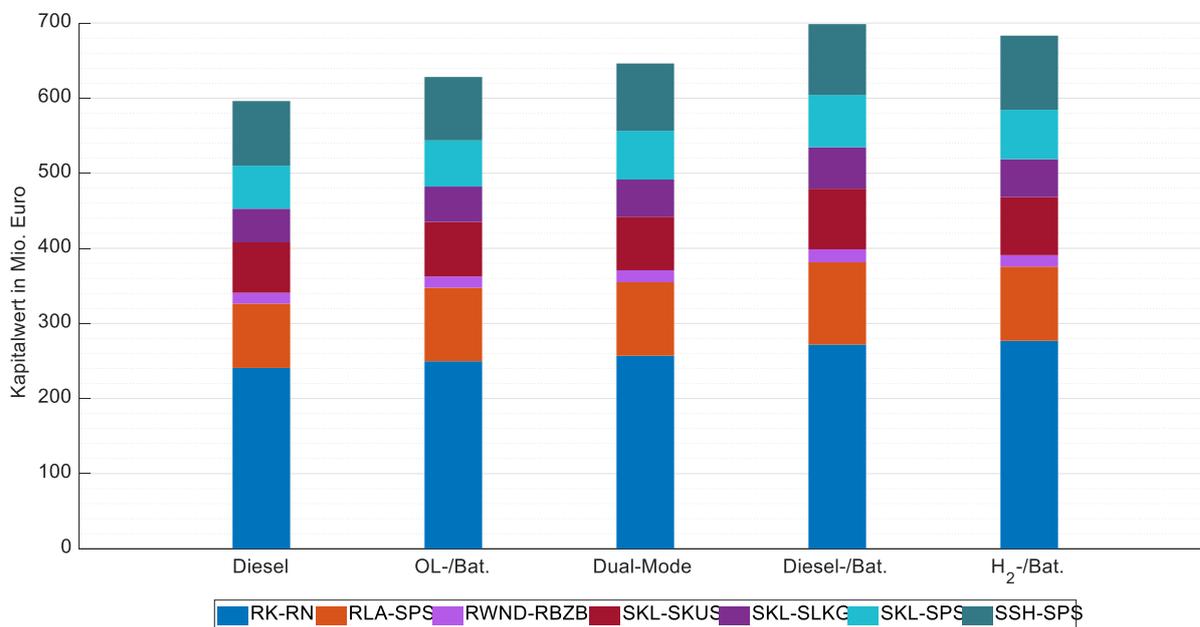
A.1 35 JAHRE BETRACHTUNGSZEIT INKLUSIVE INFRASTRUKTUR



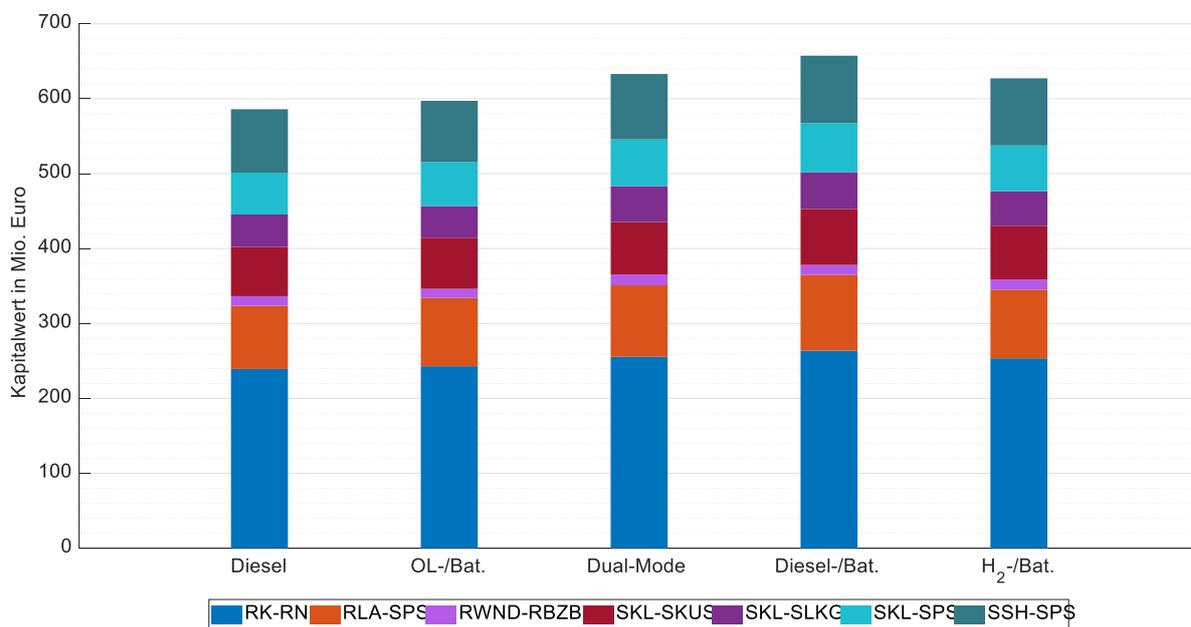
A.2 35 JAHRE BETRACHTUNGSZEIT EXKLUSIVE INFRASTRUKTUR



A.3 22,5 JAHRE BETRACHTUNGSZEIT INKLUSIVE INFRASTRUKTUR

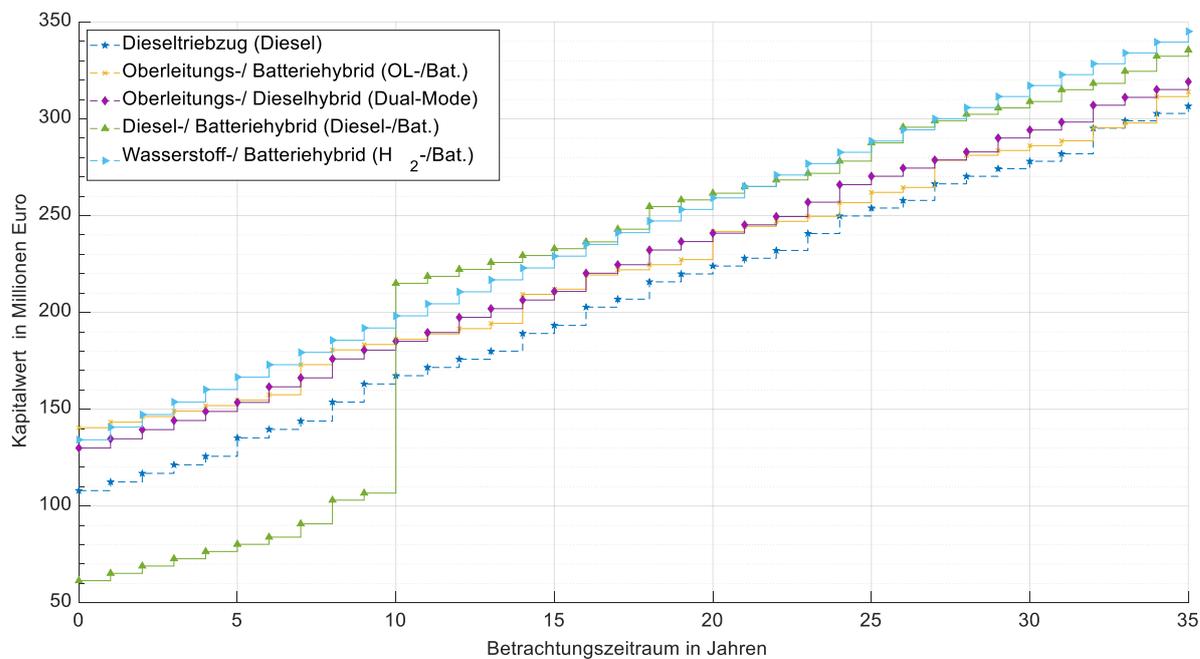


A.4 22,5 JAHRE BETRACHTUNGSZEITRAUM EXKLUSIVE INFRA-STRUKTUR

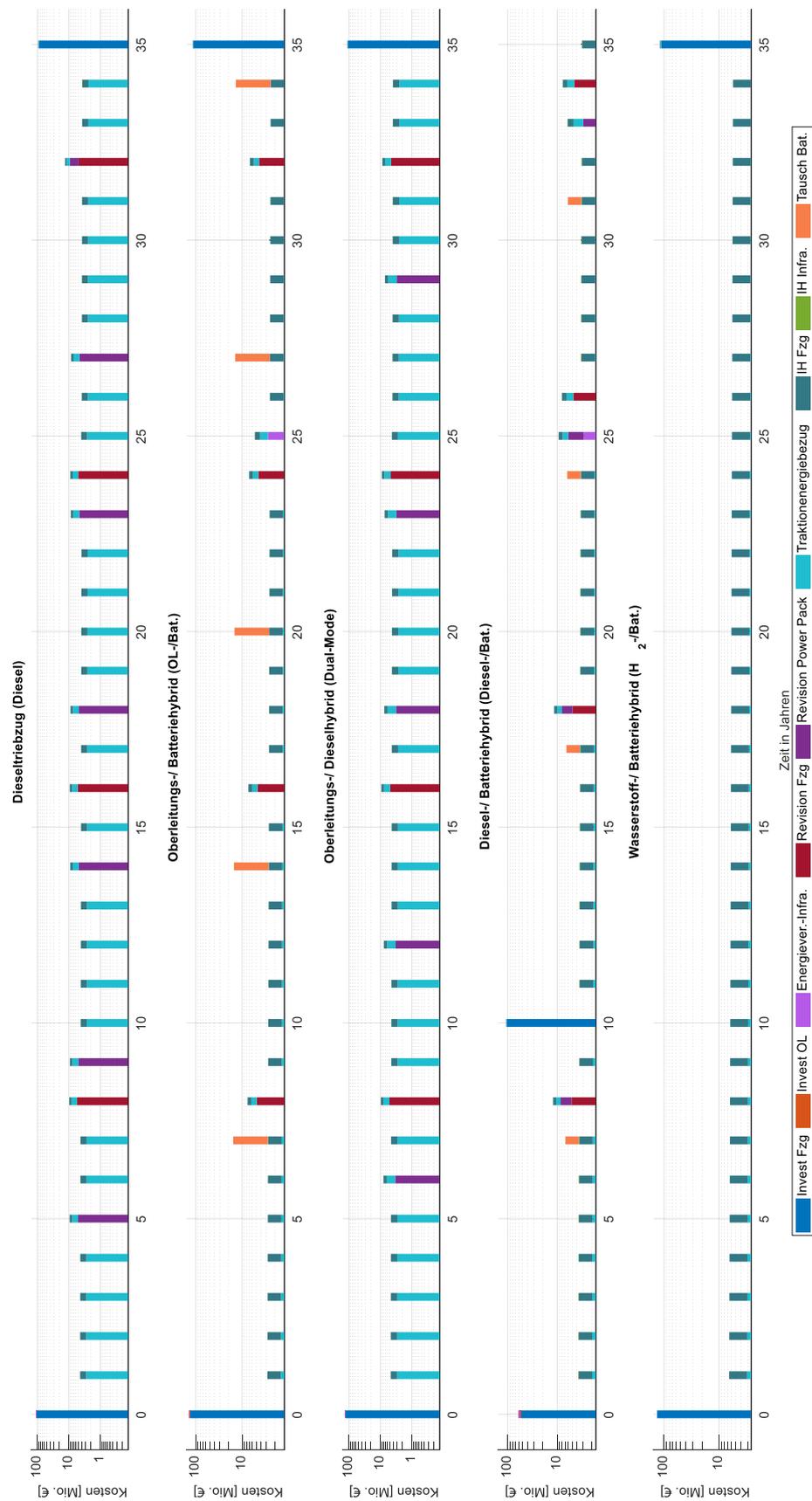


B LINIENSPEZIFISCHE AUSWERTUNG NEUSTADT-KARLSRUHE

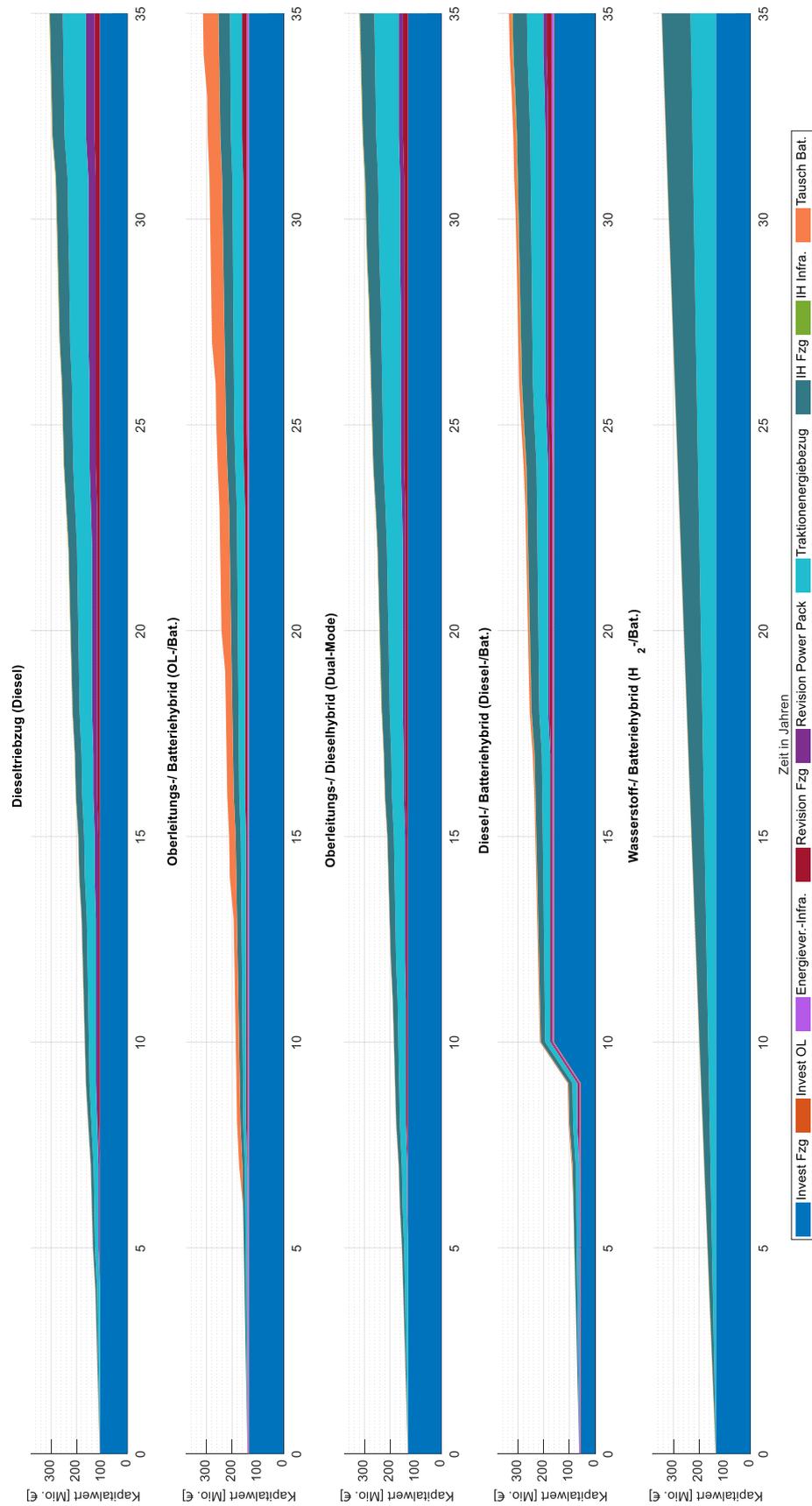
B.1 KAPITALWERTVERLAUF RN-RK



B.2 KOSTENPOSITIONEN RN-RK

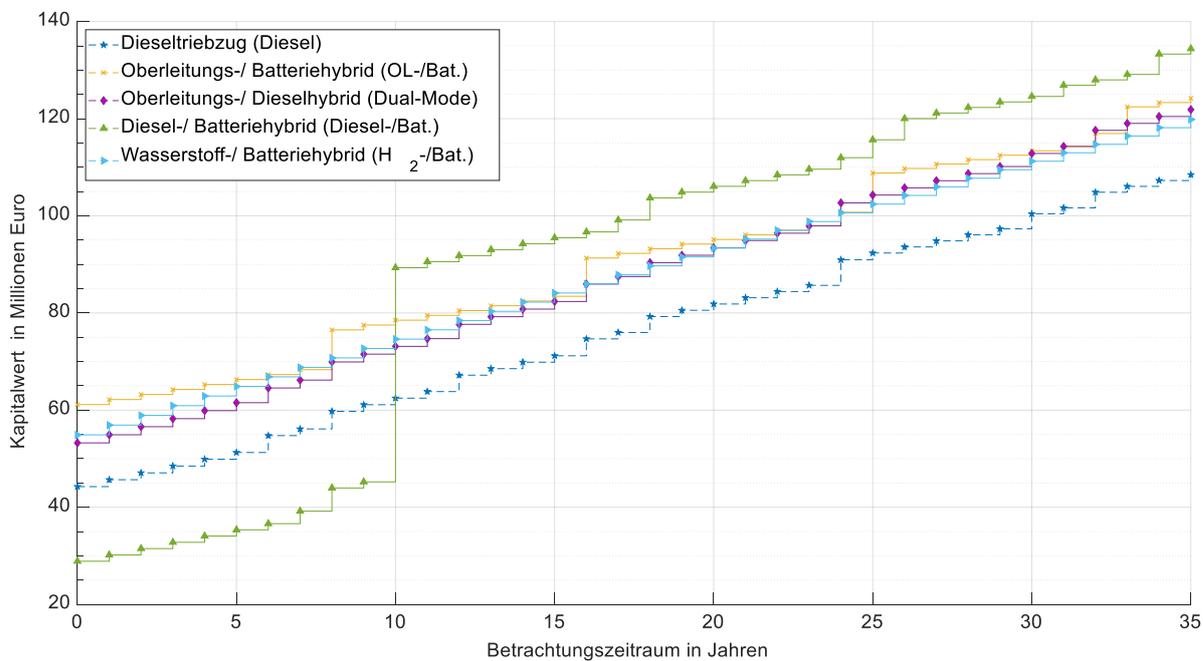


B.3 KAPITALWERTVERLAUF RN-RK (DIFFERENZIIERT)

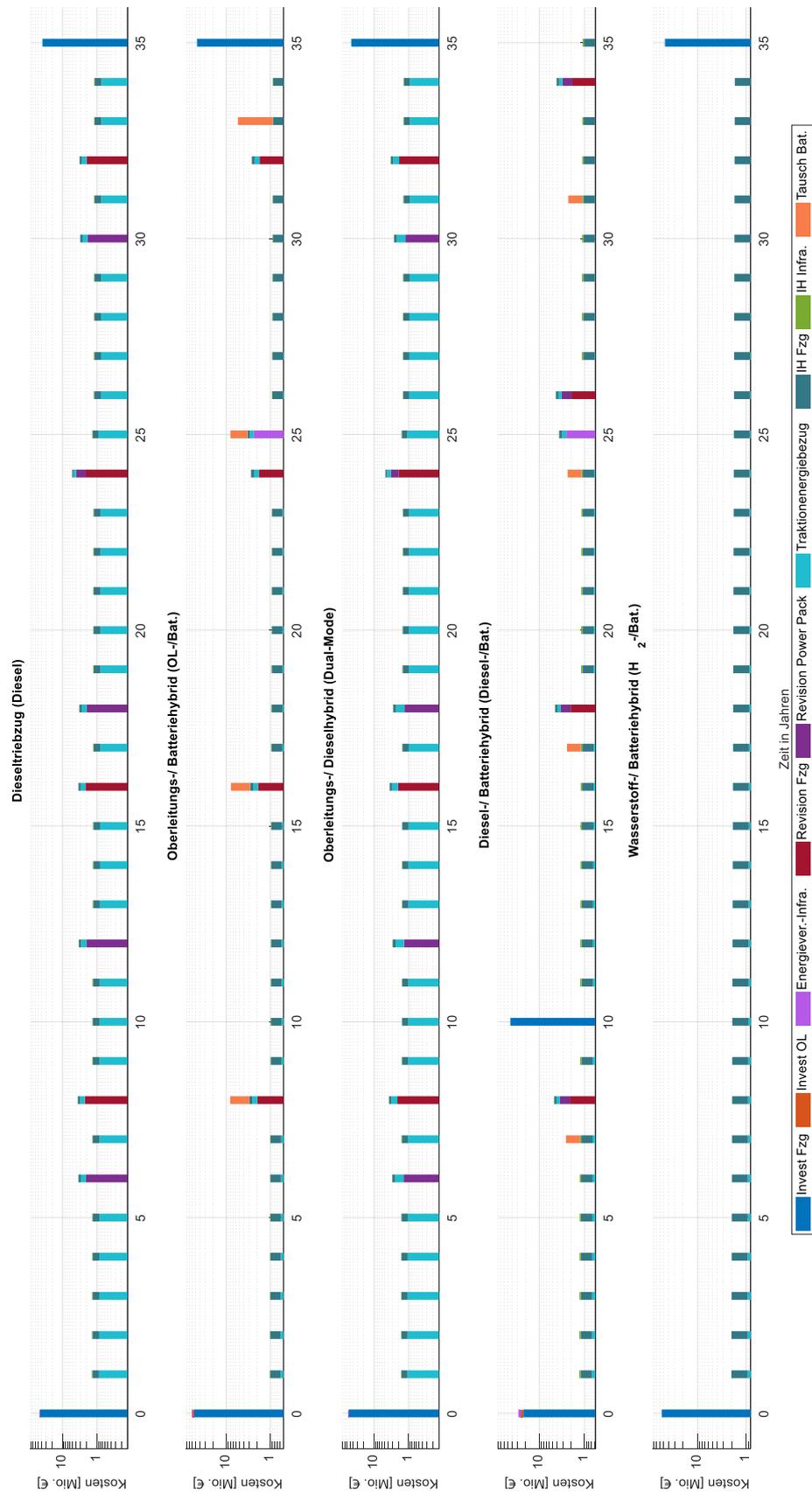


C LINIENSPEZIFISCHE AUSWERTUNG LANDAU-PIRMASENS

C.1 KAPITALWERTVERLAUF RLA-SPS

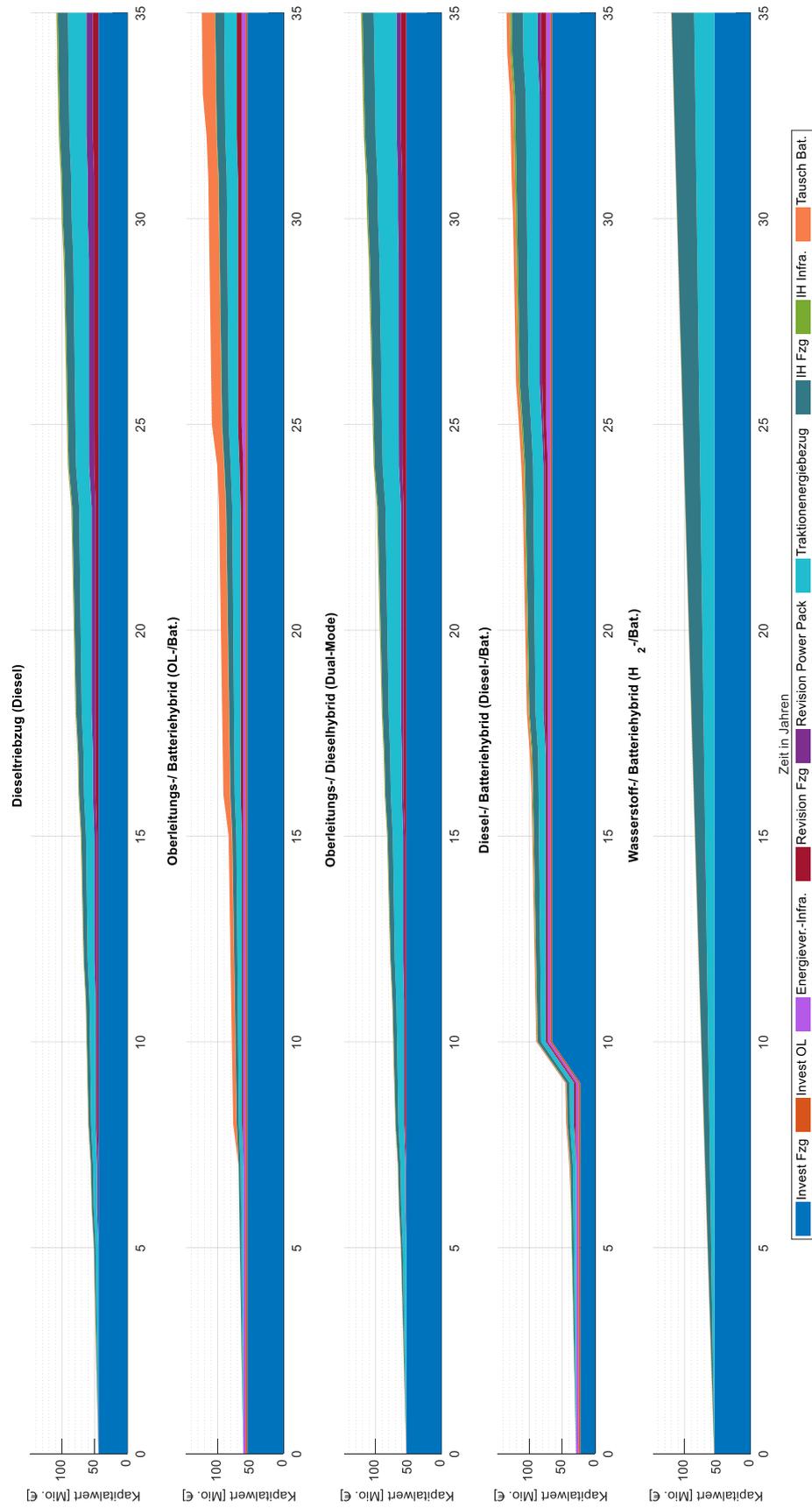


C.2 KOSTENPOSITIONEN RLA-SPS



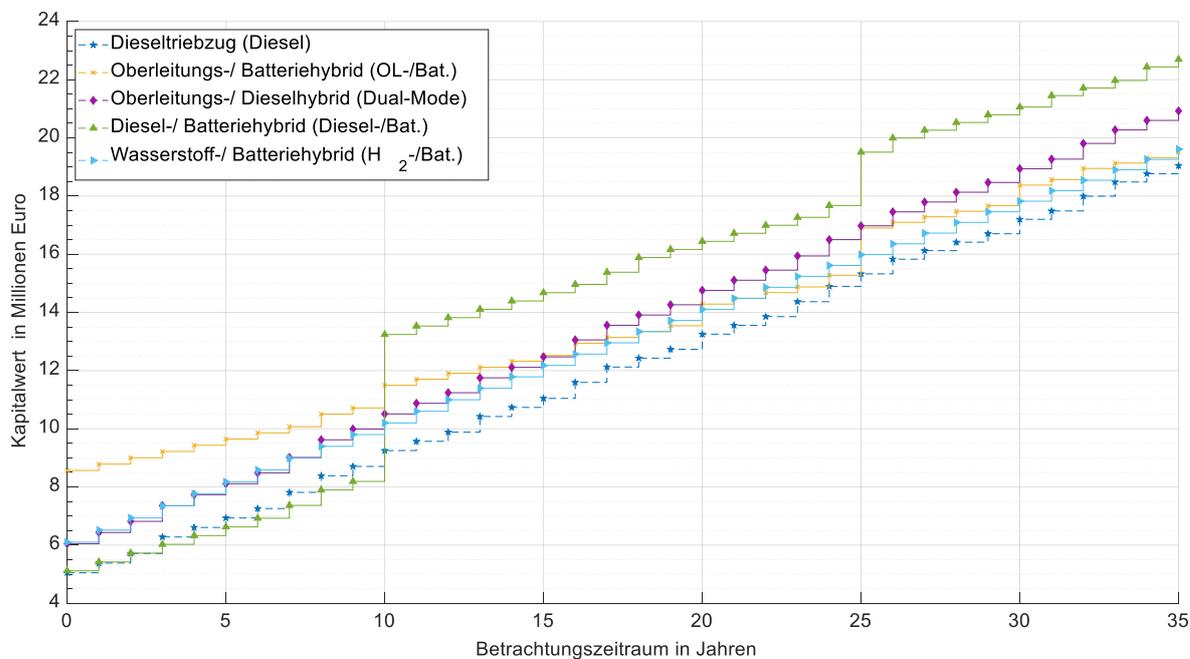
C.3

KAPITALWERTVERLAUF RLA-SPS (DIFFERENZIERT)

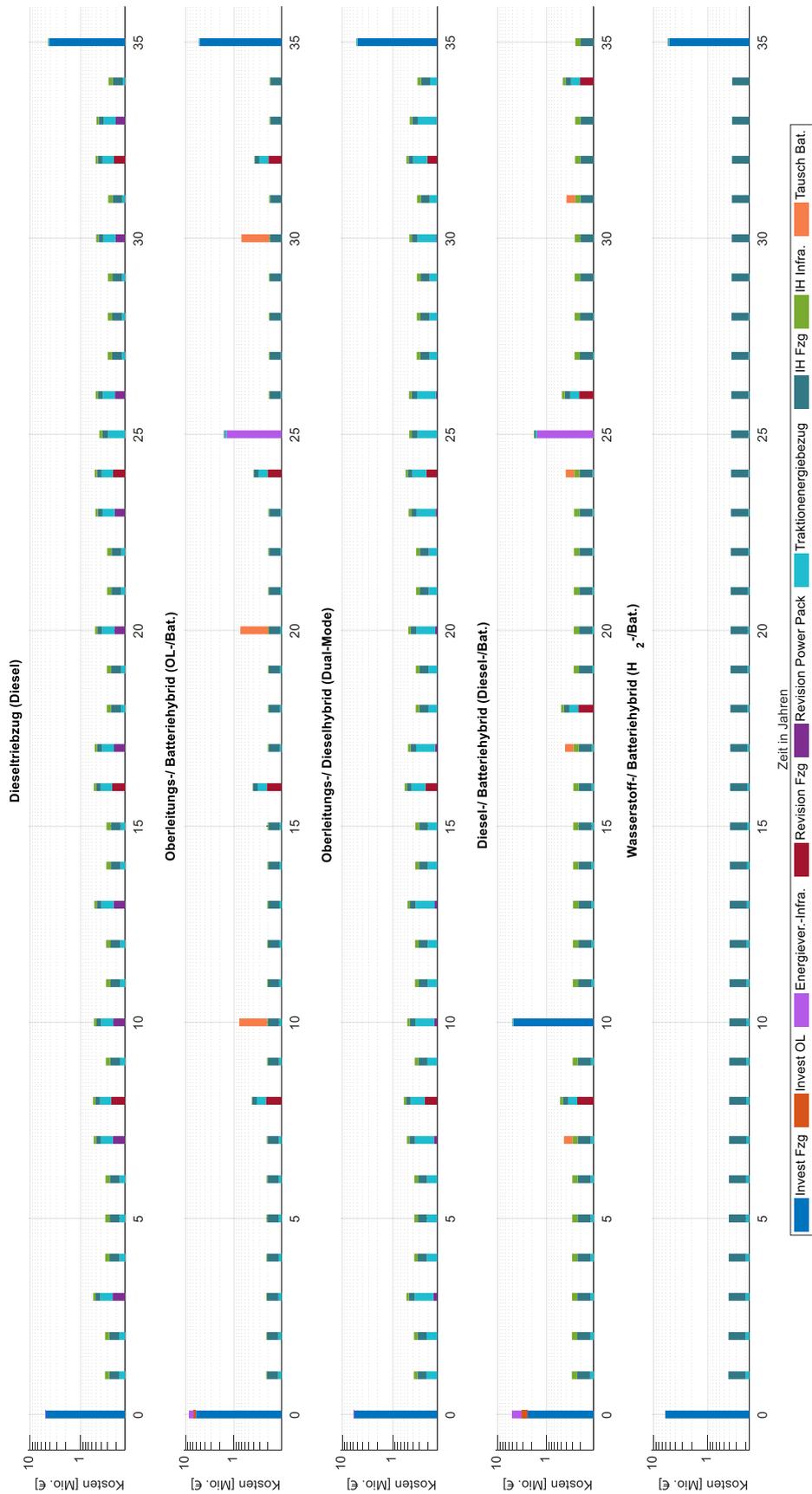


D LINIENSPEZIFISCHE AUSWERTUNG WINDEN-BAD BERGZABERN

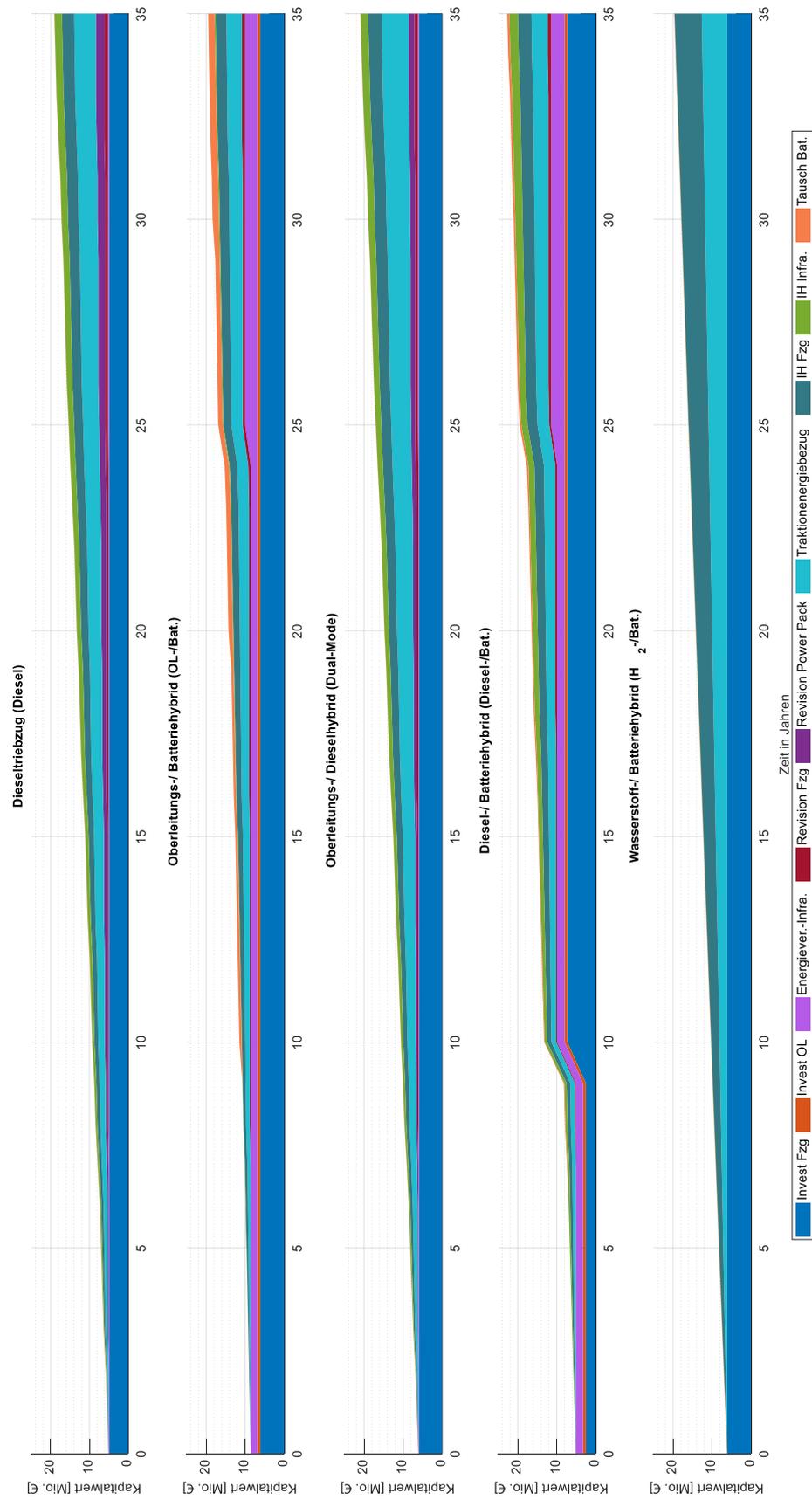
D.1 KAPITALWERTVERLAUF RWND-RBZB



D.2 KOSTENPOSITIONEN RWND-RBZB

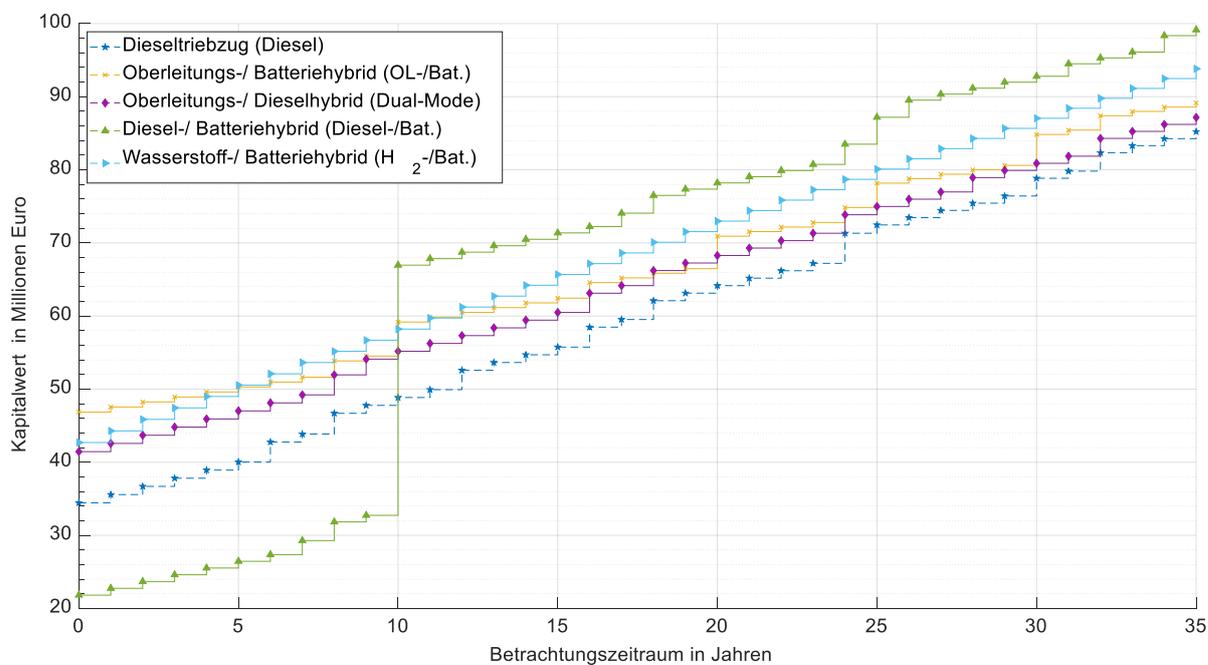


D.3 KAPITALWERTVERLAUF RWND-RBZB (DIFFERENZIERT)

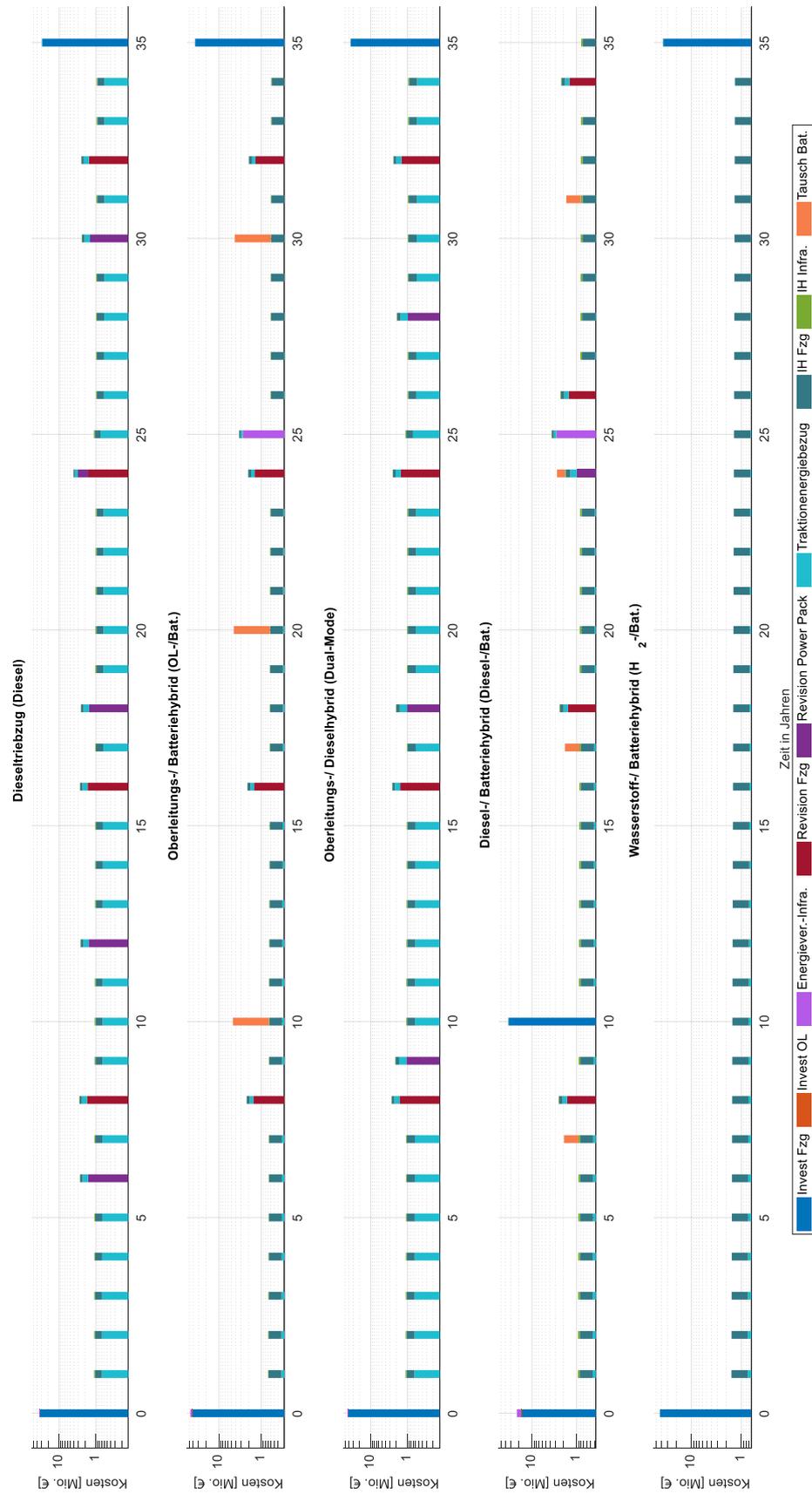


E LINIENSPEZIFISCHE AUSWERTUNG KAISERSLAUTERN-KU-SEL

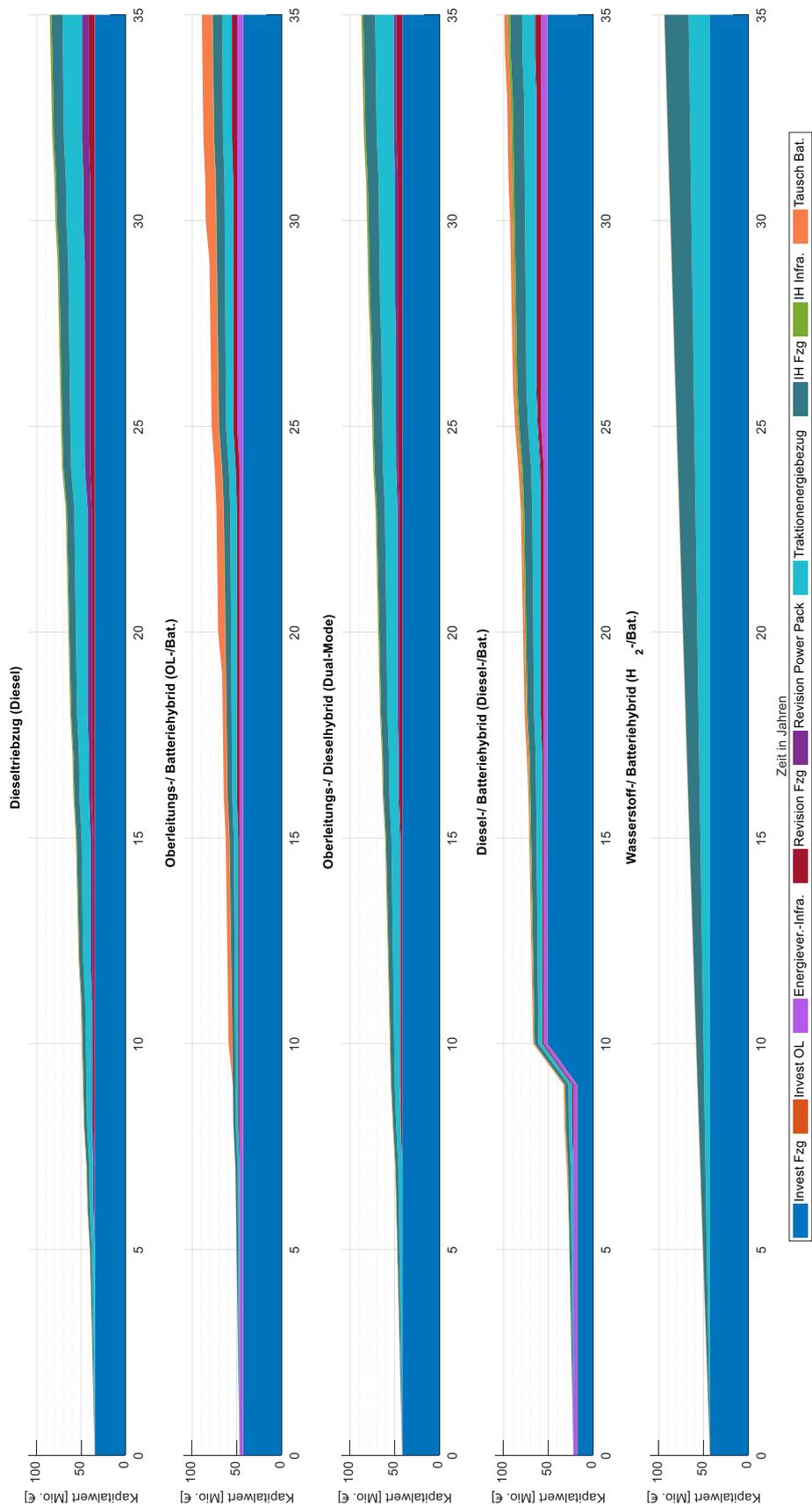
E.1 KAPITALWERTVERLAUF SKL-SKUS



E.2 KOSTENPOSITION SKL-SKUS

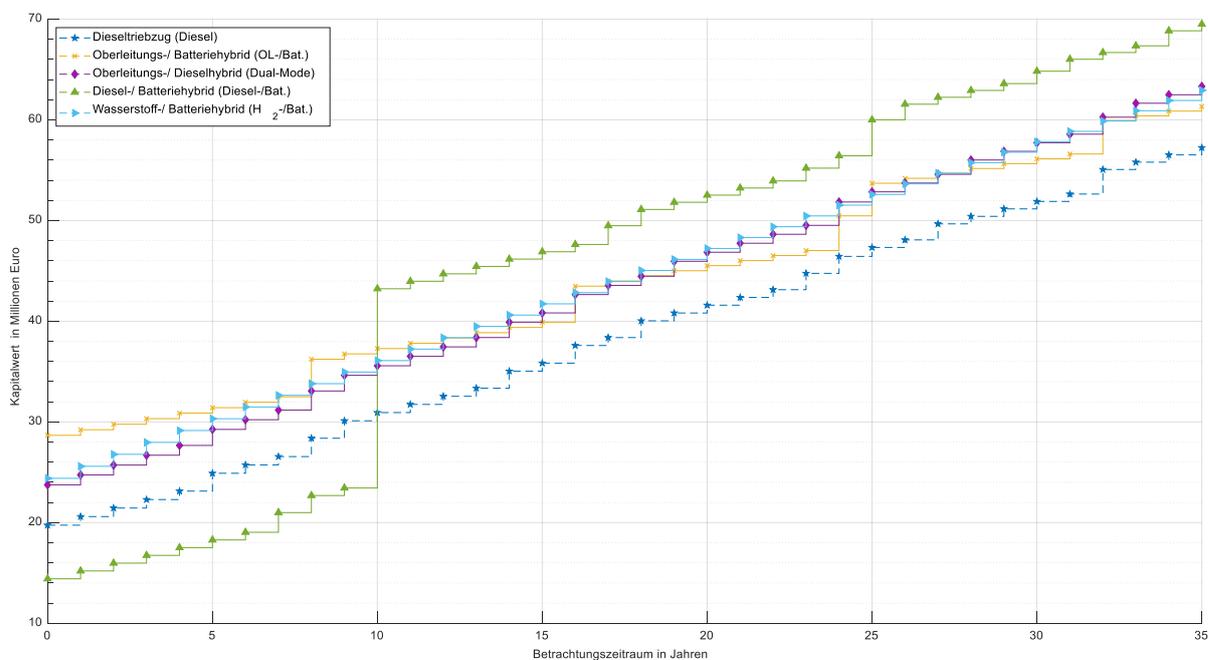


E.3 KAPITALWERTVERLAUF SKL-SKUS (DIFFERENZIIERT)

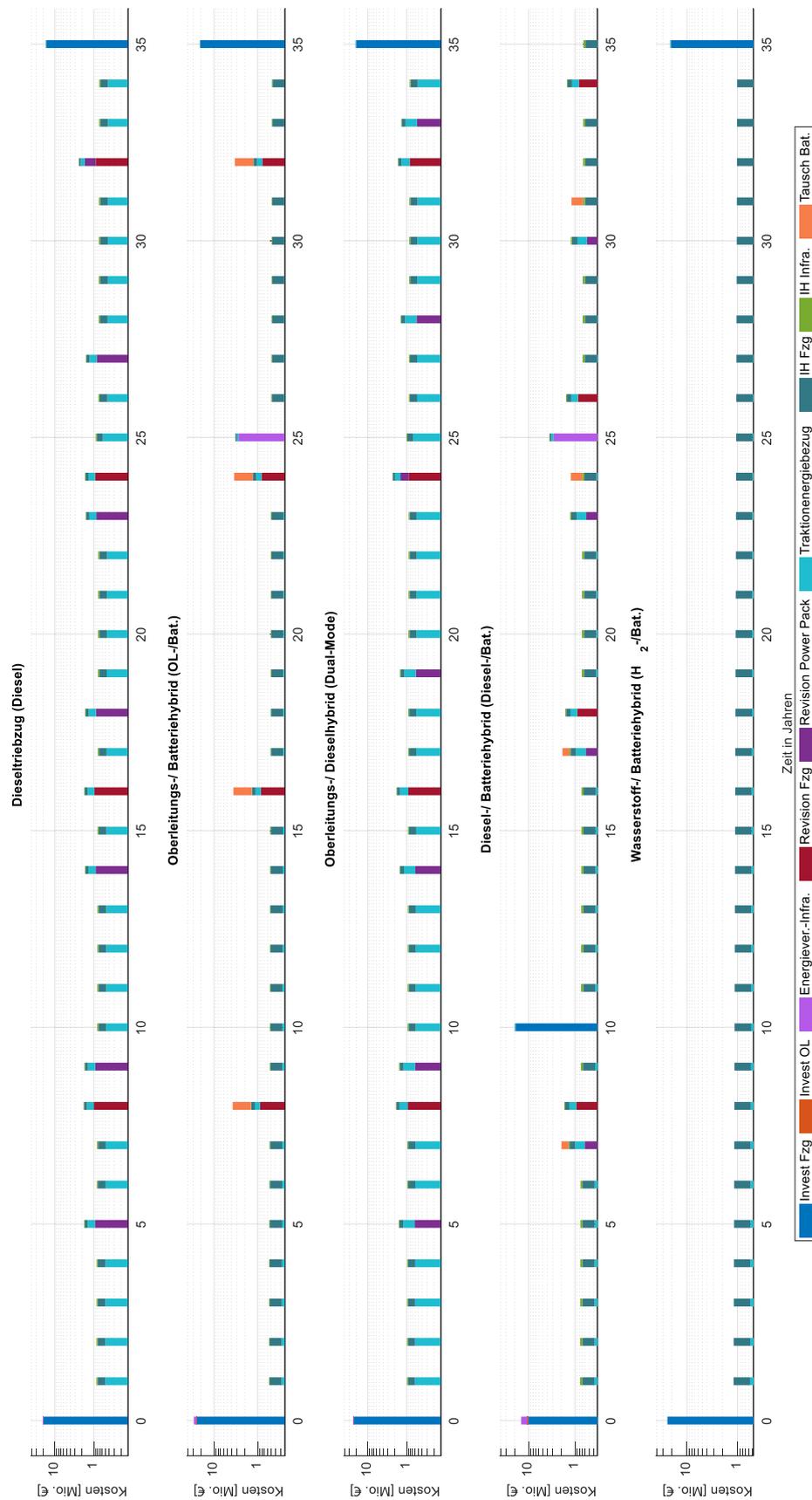


F LINIENSPEZIFISCHE AUSWERTUNG KAISERSLAUTERN-LAUTERECKEN

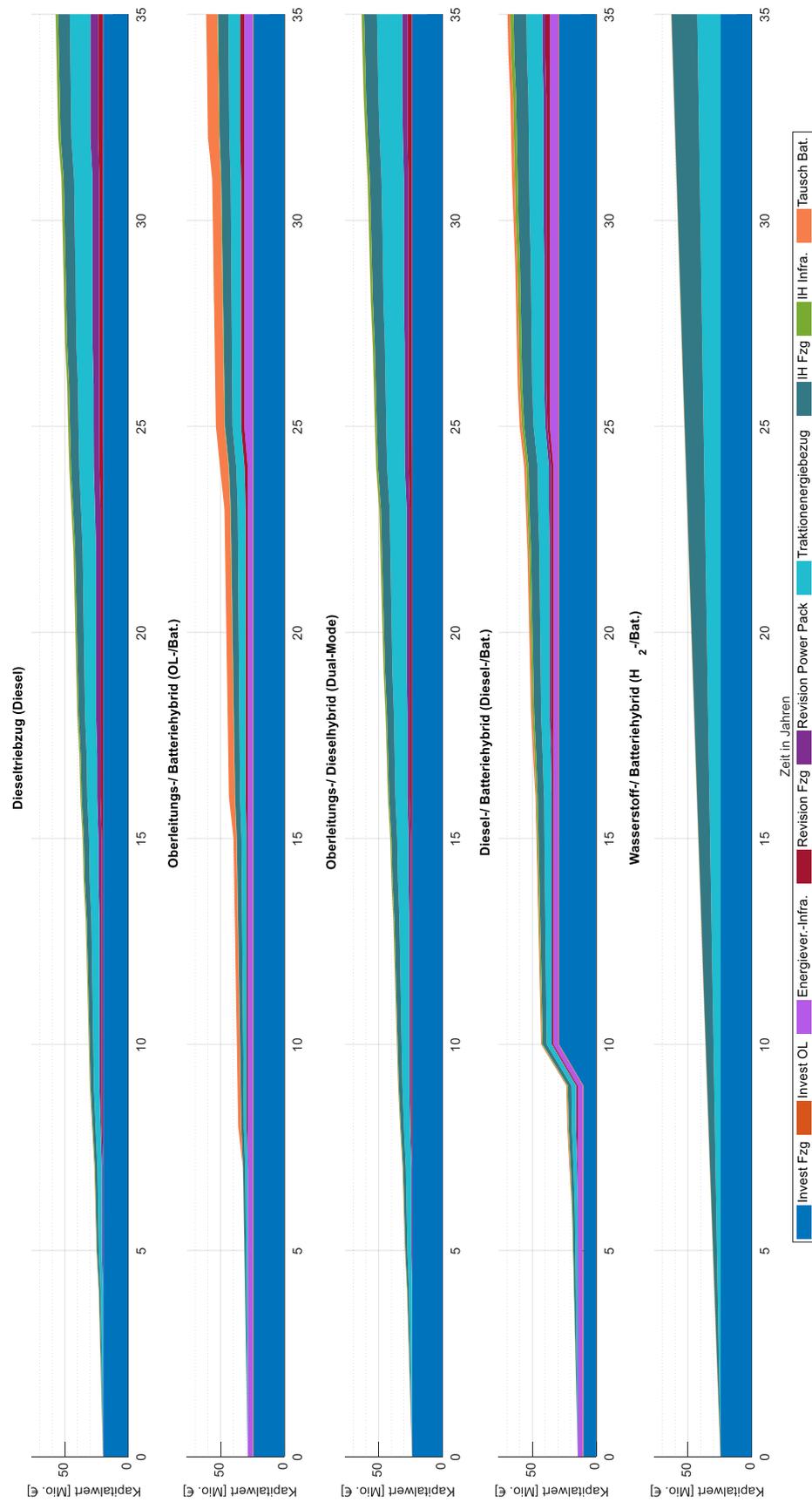
F.1 KAPITALWERTVERLAUF SKL-SLKG



F.2 KOSTENPOSITIONEN SKL-SLKG

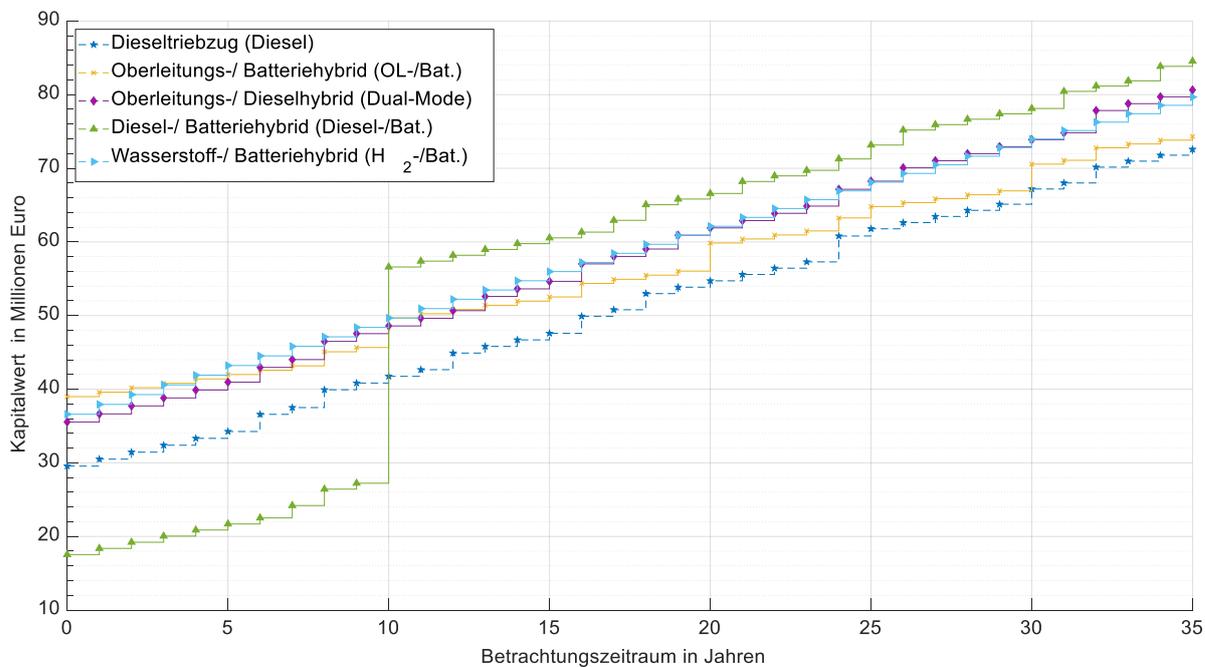


F.3 KAPITALWERTVERLAUF SKL-SLKG (DIFFERENZIIERT)

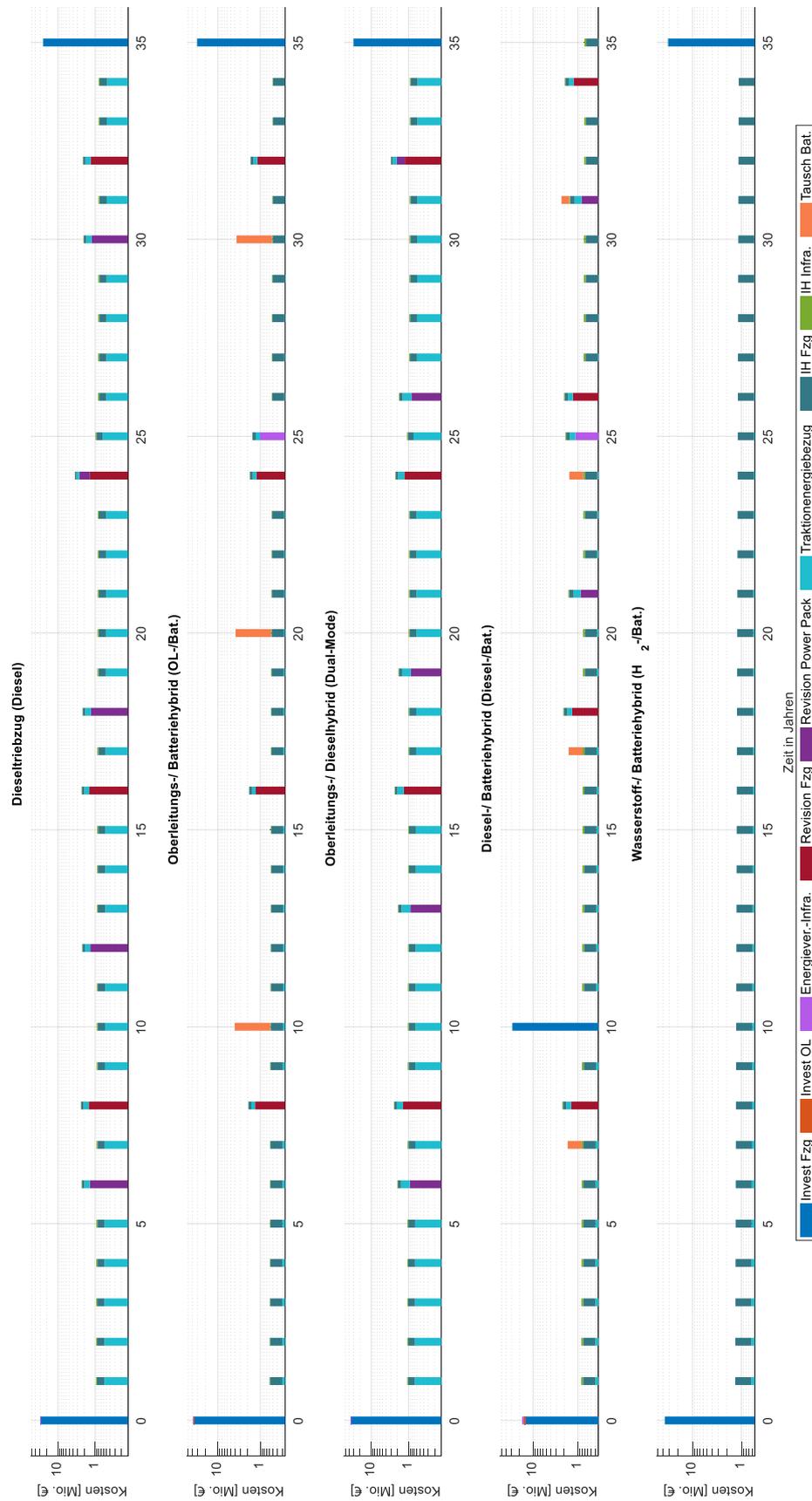


G LINIENSPEZIFISCHE AUSWERTUNG KAISERSLAUTERN-PRIMASENS

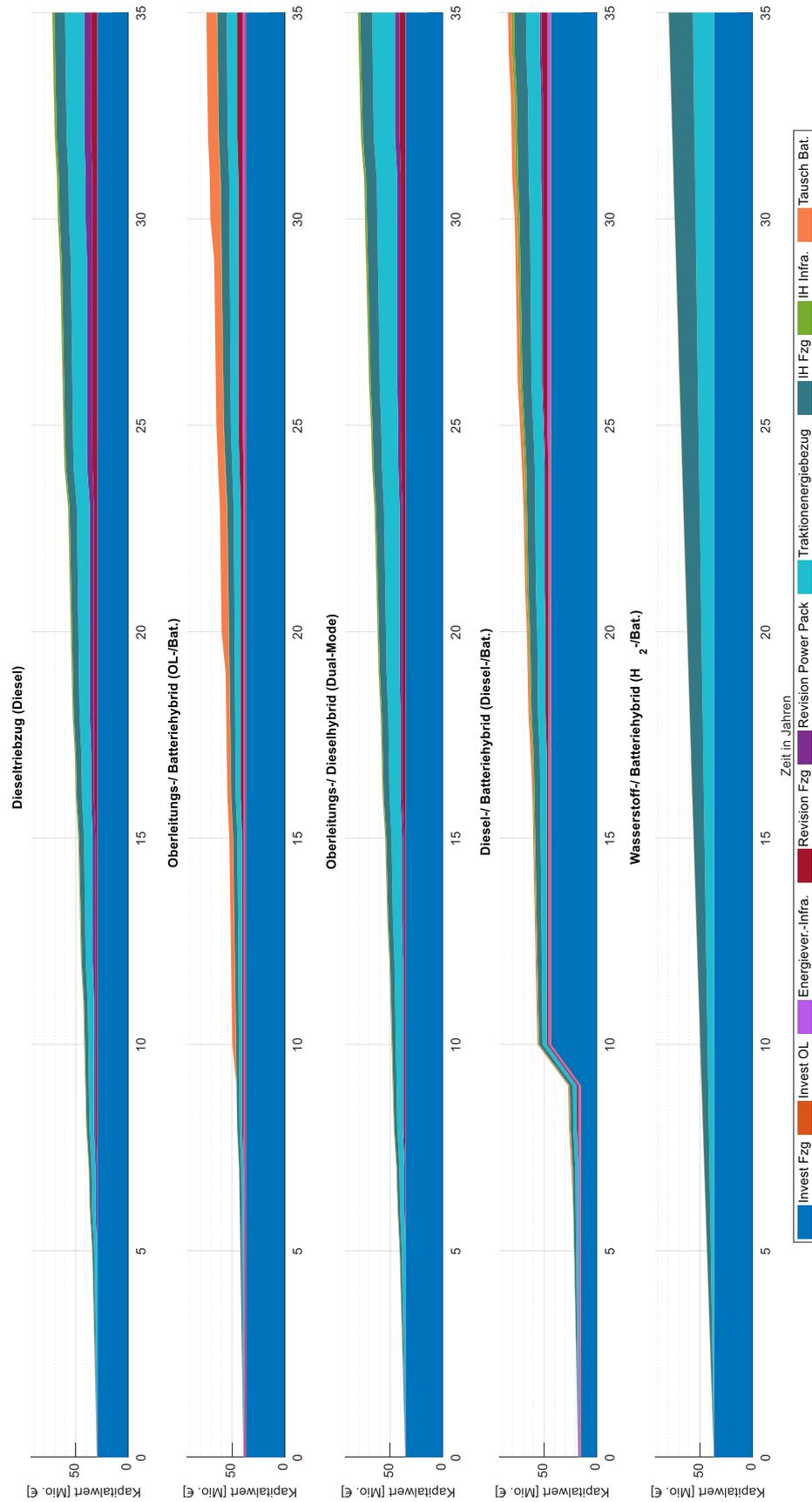
G.1 KAPITALWERTVERLAUF SKL-SPS



G.2 KOSTENPOSITIONEN SKL-SPS

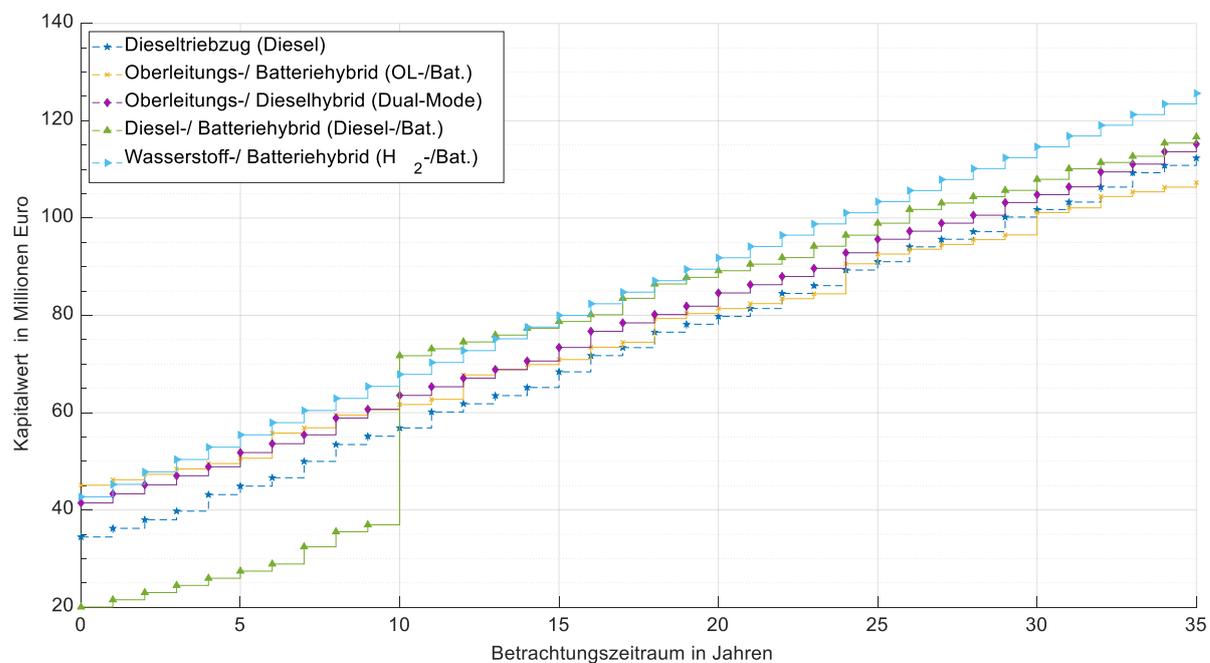


G.3 KAPITALWERTVERLAUF SKL-SPS (DIFFERENZIERT)

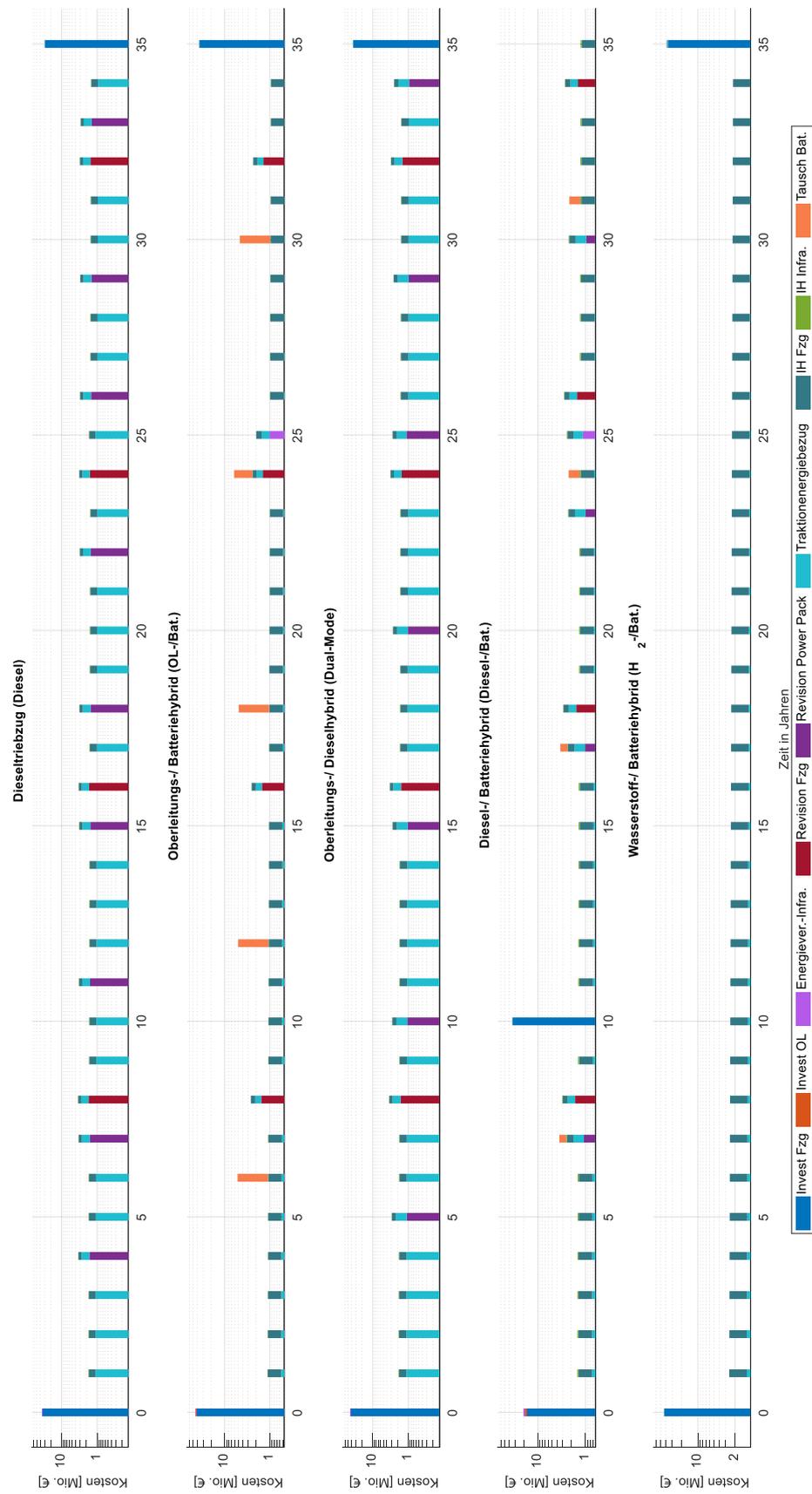


H LINIENSPEZIFISCHE AUSWERTUNG SAARBRÜCKEN-PIRMASSENS

H.1 KAPITALWERTVERLAUF SSH-SPS



H.2 KOSTENPOSITIONEN SSH-SPS



H.3 KAPITALWERTVERLAUF SSH-SPS (DIFFERENZIERT)

