

# Bewertung unterschiedlicher Konzepte zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn in Tirol



**Positionspapier mit dem Stand der Technik von 2023**

unter Berücksichtigung der Weiterentwicklung alternativer Antriebssysteme im Schienenfahrzeugbau seit 2018 im Zusammenwirken mit infrastrukturellen und betrieblichen Anforderungen.



© ZVG, Internet-Startseite [www.zillertalbahn.at](http://www.zillertalbahn.at)

#### **Autoren**

Manfred Vohla, Lehrgangsleitung „Rolling Stock Engineering“ FH Technikum Wien Academy  
Günter Emberger, Forschungsbereich für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, TU Wien

unter Mitarbeit von  
Bernhard Rüger, Forschungsbereich für Spurgebundene Verkehrssysteme Systeme, TU Wien

Wien, Mai 2024

# INHALT

|          |                                                                               |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>KURZZUSAMMENFASSUNG</b>                                                    | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>AUSGANGSLAGE</b>                                                           | <b>7</b>  |
| 2.1      | Einleitung und technisches Grundverständnis                                   | 7         |
| 2.2      | Aus der Anbot-Erstellung                                                      | 8         |
| 2.3      | Hintergrund und Ausgangslage                                                  | 8         |
| 2.4      | Durchzuführende Arbeitsschritte                                               | 9         |
| 2.5      | Zugrundeliegende, unveränderte Annahmen                                       | 9         |
| 2.6      | Innovative Vorzeigeregion                                                     | 11        |
| <b>3</b> | <b>ANALYSE EXISTIERENDER STUDIENERGEBNISSE TEXT</b>                           | <b>12</b> |
| 3.1      | KCW Prüfung des Angebotes der ZVB (25.05.2020) [6]                            | 12        |
|          | Vollkosten-Kalkulation, p11:                                                  | 12        |
| 3.2      | KCW Annex zum Variantenvergleich(19.07.2023) [8]                              | 13        |
|          | Elektrifizierungsgesamtkosten, p7                                             | 13        |
|          | Zweigleisiger Ausbau Schlitters – Gagering, p11                               | 14        |
|          | Streckenlänge – Oberleitungslänge, p19                                        | 14        |
|          | Dampf-Abschlag, p22- p24                                                      | 14        |
|          | Oberleitungskosten ÖBB-Regionalbahnen, p27                                    | 15        |
|          | Oberleitungskosten schätzung Zillertal. p28                                   | 15        |
|          | Oberleitungskosten bei Schmalspurbahnen, 29                                   | 16        |
| 3.3      | FCP Elektrifizierung der Zillertalbahn (17.05.2023) [11]                      | 16        |
|          | Oberleitungsparameter, p8                                                     | 16        |
|          | TSI-konforme Oberleitung, p9                                                  | 16        |
|          | Oberleitung ÖBB Type 1.2 für 120km/h, p9                                      | 16        |
|          | Alternative Oberleitungsbauart, p-                                            | 17        |
|          | Parameter, p9:                                                                | 18        |
|          | Strom- und Datenleitungsquerungen, Brücken, p11, p12, p17                     | 23        |
| 3.4      | FCP Elektrifizierung der Pinzgaubahn (01.05.2020) [12]                        | 25        |
| 3.5      | Studie HyCentA (22.12.2023) [13]                                              | 26        |
|          | Energieverbrauch, p5                                                          | 26        |
|          | Betriebskosten, p6                                                            | 26        |
|          | Spez. Energieverbrauch, p14, p15                                              | 27        |
|          | Wirkungsgrade, p14                                                            | 28        |
|          | Fahrleitung-Lebensdauer                                                       | 28        |
| 3.6      | Studie Prose: Bericht Restnutzungsdauer ZVB (27.01.2022) [16]                 | 29        |
|          | Management-Summary, p4                                                        | 29        |
|          | Fahrzeug-Instandhaltungskosten, p16                                           | 29        |
|          | Obsoleszenz, p19                                                              | 30        |
| 3.7      | Studie Molinari: Mobilität der Zukunft – Antriebssysteme ZVB (13.01.2017) [9] | 30        |
|          | Zusammenfassung Antriebskonzepte, p193                                        | 31        |
|          | Energiekosten, p188                                                           | 32        |
| 3.8      | Vergaberechtliche Gegenüberstellung (11.07.2023) [17]                         | 32        |
|          | Innerer Antrieb, p1                                                           | 32        |
|          | Technologie-Entscheidung, p16                                                 | 32        |
|          | Neuausschreibung, p16                                                         | 33        |

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>WEITERENTWICKLUNGEN ALTERNATIVER ANTRIEBSTECHNIK</b>  | <b>36</b> |
| 4.1      | Wasserstofftechnik und Brennstoffzellen                  | 38        |
| 4.2      | Akkumulatoren für dynamischen und statischen Betrieb     | 39        |
|          | Auslegungsgrundsätze                                     | 39        |
|          | Batterie-Zellchemien                                     | 41        |
|          | Preisentwicklung                                         | 43        |
|          | Technische Weiterentwicklungen                           | 43        |
|          | Trends                                                   | 43        |
| <b>5</b> | <b>BETRIEBSSZENARIEN UND ZUGRUNDELIEGENDE KONZEPTE</b>   | <b>44</b> |
| 5.1      | Betriebsparameter                                        | 44        |
|          | Zuglänge                                                 | 44        |
|          | Anzahl Führerstände:                                     | 45        |
|          | Anzahl Zugseinheiten                                     | 45        |
|          | Lage des Schwerpunktes                                   | 45        |
| 5.2      | Szenario Sz0 Dieselbetrieb neu (Referenz)                | 46        |
| 5.3      | Szenario Sz1 Vollelektrifizierung                        | 48        |
| 5.4      | Szenario Sz2 Wasserstoff-Zug                             | 52        |
| 5.5      | Szenario Sz3 Akkumulatoren-Zug                           | 54        |
| 5.6      | Szenario Sz4 Akku-Hybrid-Zug                             | 58        |
| 5.7      | Szenario Sz5 Akku-Hybrid-Zug optimiert                   | 59        |
|          | Szenario Sz5b mit zusätzlichen Oberleitungsabschnitten   | 61        |
|          | Schrittweises annähern an Sz1 Vollelektrifizierung       | 61        |
| 5.8      | Güterverkehr Jenbach – Fügen                             | 61        |
|          | Dieselbetrieb beibehalten mit eigenen Loks oder Leihloks | 62        |
|          | Vollelektrisch mit Triebwagen                            | 63        |
|          | Vollelektrisch mit E-Lok                                 | 65        |
|          | Akku-Hybrid mit E-Lok                                    | 65        |
|          | Biomasse-Antrieb                                         | 65        |
|          | Industrie-Abdampf-Antrieb                                | 65        |
|          | Transport H2                                             | 66        |
| 5.9      | Infrastruktur bei Hybrid-Konzepten                       | 67        |
|          | Oberleitung Jenbach – Fügen (Sz4)                        | 68        |
|          | Oberleitung Doppelspurinseln (Sz5)                       | 68        |
|          | Oberleitung Jenbach – Strass i.Z. und Bhf. Mayrhofen     | 70        |
|          | Oberleitung eingleisige Streckenabschnitte               | 70        |
|          | Oberleitung Doppelspurinseln plus                        | 71        |
|          | Oberleitung bei späterem Infrastrukturausbau             | 71        |
|          | Optische Verträglichkeit der Oberleitung                 | 72        |
| 5.10     | Zusammenfassung Antriebsszenarien                        | 77        |
| <b>6</b> | <b>BEURTEILUNGSINDIKATOREN</b>                           | <b>81</b> |
| <b>7</b> | <b>BETRIEBSSIMULATION</b>                                | <b>82</b> |
| 7.1      | mit RailSys                                              | 82        |
| 7.2      | mit Open Track                                           | 82        |
| 7.3      | mit traktionsabhängiger Differenzierung                  | 84        |

|           |                                                                          |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8</b>  | <b>NUMERISCHER KONZEPTVERGLEICH</b>                                      | <b>85</b>  |
| 8.1       | Basispunkt der Modellparameter                                           | 87         |
| 8.2       | Sensitivitätsanalyse: Halbierung Oberleitung-Investkosten                | 88         |
| 8.3       | Sensitivitätsanalyse: Verdopplung Primärenergiekosten                    | 89         |
| 8.4       | Sensitivitätsanalyse: Kapazitätserhöhung Doppeltraktion                  | 90         |
| 8.5       | Sensitivitätsanalyse: Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung             | 91         |
| 8.6       | Sensitivitätsanalyse: Wasserstoff-Sonderpreis                            | 92         |
| 8.7       | Sensitivitätsanalyse: Nachhaltigkeit 60 Jahre                            | 93         |
| 8.8       | Sensitivitätsanalyse: Lange Wende, 7 Züge für reinen Akku-Betrieb        | 93         |
| 8.9       | Überblick Sensitivitätsanalysen                                          | 95         |
|           | Gesamtüberblick tabellarisch                                             | 96         |
|           | Mittelwert über diff. Gesamtkosten pro Sitzplatzkilometer in % (Prio. 3) | 97         |
|           | Mittelwert über diff. Gesamtkosten pro Zugkilometer (Prio. 2)            | 98         |
|           | Mittelwert über die differentiellen Betriebskosten (Prio. 1)             | 98         |
| <b>9</b>  | <b>VERGLEICHBARE DEKARBONISIERUNGSKONZEPTE</b>                           | <b>100</b> |
| 9.1       | Realisierte Dekarbonisierungsprojekte in Österreich                      | 100        |
|           | Umrüstung Verschublokomotive der ÖBB Rh 1063 [19] [46]                   | 100        |
|           | Einsatz von Nahverkehrstriebwagen auf Regionalbahnen [19] [46]           | 100        |
|           | Neue Instandhaltungsfahrzeuge [19] [47]                                  | 101        |
| 9.2       | Akademische Dekarbonisierungsstudien in Österreich                       | 101        |
|           | Dekarbonisierung aller ÖBB Regionalbahnen bis 2029 [10] [48]             | 102        |
|           | Dekarbonisierung Norwegische Hauptbahnen [44] [45]                       | 102        |
|           | Zukünftige Betriebskonzepte am Knoten Wiener Neustadt [26] [27]          | 104        |
|           | Emissionsfreier Betrieb der Schneeberg-Zahnradbahn [40] [49]             | 106        |
|           | FHTW Wasserstofftag [50] [51] [52] [53] [54] [55]                        | 108        |
| 9.3       | Internationale Dekarbonisierungsprojekte                                 | 110        |
|           | Auflistung von Schienenfahrzeugen alternativer Antriebskonzepte          | 111        |
| <b>10</b> | <b>ZUSAMMENFASSUNG &amp; AUSBLICK</b>                                    | <b>112</b> |
| 10.1      | Resumee                                                                  | 112        |
|           | Fahrzeuge                                                                | 112        |
|           | Infrastruktur                                                            | 113        |
|           | Synergien                                                                | 113        |
|           | Studien                                                                  | 114        |
| 10.2      | Offene Punkte                                                            | 114        |
| 10.3      | Nächsten Schritte                                                        | 115        |
| 10.4      | Management-Summary                                                       | 115        |
| <b>11</b> | <b>LITERATURVERZEICHNIS</b>                                              | <b>116</b> |

# 1 Kurzzusammenfassung

Nachdem sich die vergleichende Analyse bestehender Studien als unbefriedigend herausgestellt hat, wurden fünf „normierte“ Konzepte gegenübergestellt, die alle auf dem unbestrittenen elektromotorischen Antrieb beruhen. Die Konzepte unterscheiden sich demnach in der Frage, wie die benötigte Energie für Traktion und Nebenbetriebe (Steuerung, Licht, Klima, etc.) im Zug verfügbar gemacht wird.

Die bisher zwei genauer untersuchten Konzepte, nämlich der Erzeugung von Strom durch Brennstoffzellen im Zug („Wasserstoffzug“) und Zuführung des Stroms durch eine permanent verfügbare Oberleitung („Elektrotriebzug“, voll-elektrisch“), werden um den in einigen Studien angeführten reinen Akku-Zug und zwei Hybridkonzepte ergänzt. Um eine Vergleichbarkeit zu erzielen, werden diese fünf Antriebskonzepte „normalisiert“.

Die Hybridkonzepte als jüngster Stand der Technik, der 2018 so noch nicht verfügbar war, können ein alternatives dauerhaftes Betriebskonzept darstellen. Gleichzeitig bleibt die Option eines vollelektrischen Betriebes gewahrt. Ein derartiges Hybridkonzept ist dann sinnvoll, wenn Zeit, Raum oder Finanzmittel für den Bau einer durchgehenden Oberleitung nicht ausreichend verfügbar sind. Die unterschiedlichen Hybridkonzepte stellen eine Schlüsseltechnologie dar, wenn die Dekarbonisierung des Dieselmotors durch permanent von außen gespeisten Elektrobetrieb nicht erfolgen kann und ein Teil der benötigten Energie mitgeführt werden muss, wobei die Vorteile des Elektrobetriebs für Betrieb, Fahrgäste und Umwelt jedoch sofort abrufbar sind.

Die Gegebenheiten der Zillertalbahn lassen ein auf den stop-and-go-Verkehr optimiertes Akku-Hybrid-Konzept am vorteilhaftesten erscheinen, speziell als kurzfristige Lösung in Hinblick auf eine gesellschaftlich akzeptable Vorgangsweise.

Die Möglichkeit einer Vollelektrifizierung soll aufgrund des dichten Nahverkehrsangebotes des Zillertaler Mobilitätsplans [1] in Hinblick auf Flexibilität mit den günstigsten Betriebskosten als zukünftige Möglichkeit erhalten bleiben. Ein reines Akku-Konzept bedingt mindestens einen, nach heutiger Betriebspraxis jedoch zwei Züge mehr und verursacht deutlich höhere Betriebskosten. Für das Akku- und das Akku-Hybrid-Konzept ist die Umsetzung der Ladeinfrastruktur noch im Detail zu untersuchen, ebenso wie die endgültige Anzahl der Fahrzeuge auf Basis langfristiger Betriebskonzepte noch festzulegen ist.

Jede heute zu tätige Entscheidung muss den Zeitraum von mind. 30 Jahren und alle in diesem Zeitraum denkbaren Zusatzinvestitionen berücksichtigen. Eine spätere, neuerliche Systemumstellung darf nicht zum Totalverlust heutiger Investitionen führen, sondern muss durch eine offene Systemarchitektur bereits jetzt berücksichtigt werden.

## Hinweis 1:

die in dieser Studie getätigten vergleichenden, quantitativen Aussagen basieren auf einem differenziellen Rechenmodell, das mit den jüngsten verfügbaren Zahlen als Eingangsparameter arbeitet. Liegen zu einem späteren Zeitpunkt präzisere Daten oder verbindliche Angebote von potenziellen Lieferanten vor, können diese auf Anfrage berücksichtigt werden.

Das Einholen neuer, verbindlicher Angebote war weder Bestandteil des Studienauftrages, noch wäre es für einen reinen Systemvergleich den Lieferanten zumutbar.

Die fahrdynamische Simulation inkl. ermittelter Traktionsenergiebedarf weichen von dem differentiellen Rechenmodell ab. Ein Zusammenführen dieser beiden Zugänge ist möglich, nicht aber in dieser Studie

## Hinweis 2:

In dieser Studie wird wiederholt auf nicht öffentlich zugängliche Dokumente verwiesen. Dokumente, die vertrauensvoll und für andere Zwecke den Autoren überlassen worden sind, aber in der Gesamtsicht nicht vernachlässigt werden dürfen. Dieses Vertrauen darf nicht missbraucht werden. Dort, wo die Urheber dieser Dokumente erreichbar waren, konnte die Freigabe für diesen Zweck erwirkt werden. Eine Veröffentlichung dieser vertraulichen Studienquellen kann deshalb nicht gutgeheißen werden, ebenso das Zitieren von Eingangsparameter, Zeichnungen oder Quellen. Die Veröffentlichung dieser Studie der TU Wien kann nur in einer um diese vertraulichen Quellen bereinigten Version bei sonst unverändertem Inhalt erfolgen.

Die von den Autoren eigenständig ermittelten Berechnungsergebnisse, Interpretationen und Folgerungen unterliegen dieser Art von Vertraulichkeit nicht.

## 2 Ausgangslage

### 2.1 Einleitung und technisches Grundverständnis

Die vergleichende Beurteilung bisher erstellter Studien zu einem zukünftigen, dekarbonisierten Betrieb der Zillertalbahn stellt sich als äußerst schwierig heraus, da diese Studien auf einer Vielzahl kaum vergleichbarer Annahmen beruhen. In den zu Verfügung gestellten Management-Zusammenfassungen sind teilweise die zugrunde gelegten Parameter nicht nachvollziehbar.

Deshalb wurde eine Vorgangsweise gewählt, die die verschiedenen Antriebskonzepte in „normierter“ Form gegenüberstellt und an denen die vorhandenen Studien gespiegelt werden können.

Anhand dieser „normierten“ Antriebskonzepte können durch Sensitivitätsanalysen der angenommenen Erfahrungswerte deren Relevanz ermittelt werden. Für wenig relevante Parameter werden die Annahmen genügen, für relevante Parameter müssen deren Annahmen auf Aktualität überprüft werden.

Unter Fachleuten besteht Einigkeit, dass die beste, effektivste und zukunftssträchtigste Traktionsform der elektromotorische Antrieb ist, also die Triebäder durch elektrische, rotierende Fahrmotoren bewegt werden. Deshalb wird dieser Grundkonsens nicht weiter in Frage gestellt und hier auch nicht erörtert.

Weniger Einigkeit besteht darin, wie die elektrische Energie für Fahrmotoren und Nebenbetriebe im Fahrzeug zu Verfügung gestellt werden soll. Also welcher Anteil des Kraftwerks, das die Primärenergie „Zillertaler Wasserkraft“ in Antriebsstrom für die Fahrmotoren wandelt, mobil im Fahrzeug oder stationär neben der Strecke untergebracht werden soll.

Grundsätzlich ist erstens speziell für häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge eines dichten Nahverkehrsangebotes wie im Zillertal (und zukünftig noch vermehrt im „Zillertaler Mobilitätsplan“), also einem klassischen stop-and-go-Verkehrs, das Axiom der geringsten zu beschleunigenden Masse (Fahrzeuggewicht) zu berücksichtigen. Jedes kg mehr an Fahrzeuggewicht verursacht höheren Energieverbrauch im Betrieb der folgenden mind. 30 Jahre der Fahrzeuglebensdauer.

Zweitens ist das Mitführen der benötigten Energie immer ein Nachteil gegenüber dem kontinuierlichen Zuführen der Energie, weil sich die zu beherrschende Masse des Fahrzeuges und damit bei der Eisenbahn die Kräfte zwischen Rad und Schiene über eine Betriebsperiode verändern. Kann die mitgeführte Energie nicht unterflur (z.B. Dieseltank) oder im Dachbereich (z.B. Akkumulatoren, wenn es die Lage des Schwerpunkts zulässt) mitgeführt werden, wird die Beförderungskapazität des Fahrzeuges – und damit die Wirtschaftlichkeit des Bahnbetriebes – reduziert, sowie die Bahnsteiglänge oftmals nicht voll ausgenutzt (z.B. Lokomotiven bei Kreuzungsstationen).

Beide Argumente sprechen deshalb für eine Vollelektrifizierung der Strecke, der allerdings die Errichtungs- und Unterhaltskosten der Oberleitung (bei U-Bahnen der dritten Schiene) entgegengestellt werden müssen. Diese Fragestellung ist über 120 Jahre alt und wurde außerhalb städtischer Straßenbahnbetriebe in Österreich erstmals bei der Stubaitalbahn 1904 und dann bei der Mariazellerbahn 1910 beantwortet. Bei welchem Betriebsprogramm sich eine Vollelektrifizierung lohnt, ist klassisch für jeden Eisenbahnbetriebsfall spezifisch zu untersuchen. Unter Fachleuten gilt für Standardfälle die 1h-Regel, also Verkehre werktäglich im Ein-Stunden-Takt rechtfertigen eine durchgehende Oberleitung, ein Zwei-Stunden-Takt muss genauer angeschaut werden, ein geringeres Verkehrsaufkommen muss wie alle anderen Nicht-Standard-Fälle im Einzelfall untersucht werden, wobei der Güterverkehr zu berücksichtigen ist. Zusätzlich sind Aspekte der Energieversorgung und des betrieblichen Bahnnetzes zu berücksichtigen.

Die Entscheidung für elektrischen Betrieb erfordert auch eine Entscheidung über das verwendete Energieübertragungssystem, also die Stromart, Fahrleitungsspannung und ggf. Frequenz. Hier ist die gute Übertragbarkeit des hochgespannten Einphasenwechselstroms der Einfachheit einer Gleichstromanlage gegenüberzustellen (dreipolige Drehstromsysteme scheiden heute wegen der aufwändigen Oberleitung aus). In modernen Umrichter-Fahrzeugen (seit den 1980er Jahren) wird der Primärstrom stets in einen Gleichspannungs-Zwischenkreis umgeformt, aus dem dann frequenzgesteuerter Fahrstrom für die Traktionsmotoren gewonnen wird. Der Übertragungsvorteil des auf 15 kV oder 25 kV hochgespannten Wechselstroms wird mit der Masse, Platzbedarf und Kühlung des Haupttransformators erkaufte. Dies lohnt sich bei weiten Entfernungen und geringer Zugfolge, nicht jedoch im städtischen Nahverkehr (Straßenbahnen, U-Bahnen) mit hoher Infrastrukturdichte und stop-and-go-Verkehr.

Für die aktuellen und zukünftigen Gegebenheiten der Zillertalbahn als nicht vernetzte Schmalspurbahn mittlerer Streckenlänge und mit hoher zu erwartender Zuverlässigkeit stellt dies einen Grenzbereich dar. In den „normierten“ Antriebskonzepten wurde eine 1,5 kV DC Gleichstrom-Versorgung als gängiger Stand der Technik angenommen, dies aus drei Gründen: ersten erscheint die Abweichung zu anderen Stromsystemen leicht als Differenz darstellbar und von der Größenordnung im Fall der Zillertalbahn nicht primär entscheidend zu sein, zweitens kommt eine 1500 V Speisung (nominal) zwei in Serie geschalteten Battery-Packs von je 800V DC (nominal) des Hybridantriebskonzeptes und Wasserstoffzug-Traktionsbatterie sehr nahe, d.h. Bauform und Größe von DC/DC-Stellern können dank der kleinen Spannungsdifferenzen klein ausfallen und der Transformator ersatzlos entfallen, und drittens ist die Direkteinspeisung von Bahnstrom („ÖBB-Strom“ mit 15kV 16,7Hz) mit gewissen, kaum bewertbaren Unwägbarkeiten verknüpft: die Zillertalbahn begibt sich in ein Abhängigkeitsverhältnis, welches jedoch durch geeignete Verträge gemildert werden kann. Die Zuverlässigkeit bedingt nicht nur eine Speiseleitung vom Unterwerk Wörgl, sondern auch eine Speiseleitung im Zillertal zu einem zweiten Einspeisepunkt im Großraum Zell am Ziller oder Mayrhofen. Die Vorteile der Nutzung lokaler Energie (u.a. nächtlicher Überschussstrom) aus dem Kraftwerk Mayrhofen entfallen.

## 2.2 Aus der Anbot-Erstellung

In der Anbot-Erstellung für die „Bewertung unterschiedlicher Konzepte für die Umsetzung des Projekts „Dekarbonisierung Zillertalbahn“ [2] wurde festgehalten:

*In bisherigen Untersuchungen zur Dekarbonisierung der heute – bis auf Nostalgiefahrten – ausschließlich mit Diesel-Verbrennungsfahrzeugen betriebenen Zillertalbahn wurden im Wesentlichen die Konzepte „Vollelektrifizierung“ und „reiner Wasserstoffbetrieb“ untersucht.*

*Aufgrund der technischen Weiterentwicklung und des zunehmenden Wissens um alternative Antriebstechniken sollen nun bisher nicht im Detail berücksichtigte Antriebsvarianten unter den spezifischen betrieblichen, geografischen und zeitlichen Randbedingungen im Zillertal vergleichend untersucht werden.*

*Der vorgeschlagene Zeit- und Kostenrahmen der Bewertung lässt eine vergleichende Beurteilung unterschiedlicher Konzepte zu, nicht aber eine absolute und belastbare Vollkostenermittlung. Dazu wären umfangreiche Ausarbeitungen und Angebote von Zivilingenieuren, Bauunternehmen und Fahrzeugbauern erforderlich, was einen logischen zweiten Schritt darstellt. Branchenübliche Schätzungen und Erfahrungswerte scheinen für eine differenzierte Bewertung der Konzepte ausreichend.*

## 2.3 Hintergrund und Ausgangslage

Die teilweise widersprüchlichen Aussagen vorhandener Studien und der Zeitpunkt der Erstellung hat zu einer Ausgangslage geführt, der folgendermaßen in [2] zusammengefasst worden ist:

*Seit mehreren Jahren wird über Dekarbonisierung der Zillertalbahn (Schmalspurbahn) beraten. Dabei wurden im Laufe der Zeit unterschiedlichste Varianten angedacht und auch geprüft. Bisher war und ist die Intention, eine mit Wasserstoff angetriebene Bahn ins Zillertal umzusetzen. Seit 2018 wurde diese Lösung favorisiert, um lokal produzierten grünen Wasserstoff (also durch Elektrolyse mit Strom aus Wasser hergestellt), durch kostengünstigen Überschussstrom gewinnen, nutzen zu können.*

*Im Frühjahr 2023 wurde von der Fa. KCW ein Gutachten fertiggestellt, welches die Umsetzung der Wasserstoffbahn mit der Variante durchgängige Oberleitung vergleicht. In diesem Gutachten wurde die Bewertung ausschließlich auf die beiden angeführten Varianten eingeschränkt.*

*In diesem Gutachten sind zusätzliche Fragen aufgetaucht, die im Rahmen der Untersuchung beantwortet werden sollen.*

*Der Auftraggeber möchte aufbauend auf den bisherigen Gutachten, eine abschließende Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit des Projekts „Dekarbonisierung der Zillertalbahn“ beauftragen.*

*Dabei sollen Kriterien wie Investitionskosten, laufende Kosten, Zeit, Energieeffizienz, technisches Risiko, etc. bewertet werden.*

Neben konkreten Fragen zu den bisher erstellten Expertisen, sollten explizit auch die Varianten Akku-Zug und Hybridzug analysiert werden.

## 2.4 Durchzuführende Arbeitsschritte

Um die Fragestellung bearbeiten zu können schlägt der Auftragnehmer folgende Arbeitsschritte vor [2]:

- 1) *Sichtung und Zusammenfassung der existierenden Studien*  
(Gutachten werden bei Auftragserteilung vom Auftraggeber bereitgestellt)
- 2) *Beantwortung offener Fragen bzgl. der existierenden Studienergebnisse*
- 3) *Analyse der angewandten Bewertungsverfahren in den vorher genannten Studien*
- 4) *Ausarbeitung von Szenario Akku-Zug*
- 5) *Ausarbeitung Szenario Hybrid-Zug (Oberleitung optimiert)*
- 6) *Durchführung einer Betriebssimulation für diverse Szenarien*
- 7) *Ableitung bzw. Abschätzung der Indikatoren für*
  - a. *Investitionskosten,*
  - b. *laufende Kosten,*
  - c. *Zeitbedarf zur Umsetzung,*
  - d. *Energieeffizienz bzw. Energieaufwand für Planbetrieb,*
  - e. *technisches Risiko,*
  - f. *etc.**vergleichend zu anderen Konzepten und - bei vorliegenden Daten - zum Ist-Zustand.*
- 8) *Zusammenfassender Endbericht*

## 2.5 Zugrundeliegende, unveränderte Annahmen

Das bestehende Betriebskonzept im Betriebsjahr 2024 (10. 12. 2023 bis 14. 12. 2024) sieht im Wesentlichen einen Halbstundentakt mit Betriebszeiten von 05:45 bis 20:45 (talauswärts) bzw. 6:30 bis 21:00 Uhr (taleinwärts) vor. Die hier befindlichen Reisezeiten dienen lediglich der Kalibrierung der fahrdynamischen Berechnung der zu untersuchenden Antriebskonzepte.

# 310

Jenbach

Mayrhofen

**ZILLERTALBAHN**  
 zug · bus · dampf

Schmalspurbahn

Alle Züge 2.Klasse

|               |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
|---------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Innsbruck Hbf | ab | 5:50 | 6:20 | 7:05 | 7:40 | 7:50 | 8:05 | 8:50 | 9:40 | 9:50 | 10:05 | 10:20 | 10:50 | 11:40 | 11:50 | 12:05 | 12:20 | 13:40 | 13:50 | 14:20 | 14:50 | 15:40 | 15:50 | 16:20 | 16:30 | 16:40 | 16:50 | 17:00 | 17:10 | 17:20 | 17:30 | 17:40 | 17:50 | 18:00 | 18:10 | 18:20 | 18:30 | 18:40 | 18:50 | 19:00 | 19:10 | 19:20 | 19:30 | 19:40 | 19:50 | 20:00 | 20:10 | 20:20 | 20:30 | 20:40 | 20:50 | 21:00 | 21:10 | 21:20 | 21:30 | 21:40 | 21:50 | 22:00 | 22:10 | 22:20 | 22:30 | 22:40 | 22:50 | 23:00 | 23:10 | 23:20 | 23:30 | 23:40 | 23:50 | 24:00 | 24:10 | 24:20 | 24:30 | 24:40 | 24:50 | 25:00 | 25:10 | 25:20 | 25:30 | 25:40 | 25:50 | 26:00 | 26:10 | 26:20 | 26:30 | 26:40 | 26:50 | 27:00 | 27:10 | 27:20 | 27:30 | 27:40 | 27:50 | 28:00 | 28:10 | 28:20 | 28:30 | 28:40 | 28:50 | 29:00 | 29:10 | 29:20 | 29:30 | 29:40 | 29:50 | 30:00 | 30:10 | 30:20 | 30:30 | 30:40 | 30:50 | 31:00 | 31:10 | 31:20 | 31:30 | 31:40 | 31:50 | 32:00 | 32:10 | 32:20 | 32:30 | 32:40 | 32:50 | 33:00 | 33:10 | 33:20 | 33:30 | 33:40 | 33:50 | 34:00 | 34:10 | 34:20 | 34:30 | 34:40 | 34:50 | 35:00 | 35:10 | 35:20 | 35:30 | 35:40 | 35:50 | 36:00 | 36:10 | 36:20 | 36:30 | 36:40 | 36:50 | 37:00 | 37:10 | 37:20 | 37:30 | 37:40 | 37:50 | 38:00 | 38:10 | 38:20 | 38:30 | 38:40 | 38:50 | 39:00 | 39:10 | 39:20 | 39:30 | 39:40 | 39:50 | 40:00 | 40:10 | 40:20 | 40:30 | 40:40 | 40:50 | 41:00 | 41:10 | 41:20 | 41:30 | 41:40 | 41:50 | 42:00 | 42:10 | 42:20 | 42:30 | 42:40 | 42:50 | 43:00 | 43:10 | 43:20 | 43:30 | 43:40 | 43:50 | 44:00 | 44:10 | 44:20 | 44:30 | 44:40 | 44:50 | 45:00 | 45:10 | 45:20 | 45:30 | 45:40 | 45:50 | 46:00 | 46:10 | 46:20 | 46:30 | 46:40 | 46:50 | 47:00 | 47:10 | 47:20 | 47:30 | 47:40 | 47:50 | 48:00 | 48:10 | 48:20 | 48:30 | 48:40 | 48:50 | 49:00 | 49:10 | 49:20 | 49:30 | 49:40 | 49:50 | 50:00 | 50:10 | 50:20 | 50:30 | 50:40 | 50:50 | 51:00 | 51:10 | 51:20 | 51:30 | 51:40 | 51:50 | 52:00 | 52:10 | 52:20 | 52:30 | 52:40 | 52:50 | 53:00 | 53:10 | 53:20 | 53:30 | 53:40 | 53:50 | 54:00 | 54:10 | 54:20 | 54:30 | 54:40 | 54:50 | 55:00 | 55:10 | 55:20 | 55:30 | 55:40 | 55:50 | 56:00 | 56:10 | 56:20 | 56:30 | 56:40 | 56:50 | 57:00 | 57:10 | 57:20 | 57:30 | 57:40 | 57:50 | 58:00 | 58:10 | 58:20 | 58:30 | 58:40 | 58:50 | 59:00 | 59:10 | 59:20 | 59:30 | 59:40 | 59:50 | 60:00 | 60:10 | 60:20 | 60:30 | 60:40 | 60:50 | 61:00 | 61:10 | 61:20 | 61:30 | 61:40 | 61:50 | 62:00 | 62:10 | 62:20 | 62:30 | 62:40 | 62:50 | 63:00 | 63:10 | 63:20 | 63:30 | 63:40 | 63:50 | 64:00 | 64:10 | 64:20 | 64:30 | 64:40 | 64:50 | 65:00 | 65:10 | 65:20 | 65:30 | 65:40 | 65:50 | 66:00 | 66:10 | 66:20 | 66:30 | 66:40 | 66:50 | 67:00 | 67:10 | 67:20 | 67:30 | 67:40 | 67:50 | 68:00 | 68:10 | 68:20 | 68:30 | 68:40 | 68:50 | 69:00 | 69:10 | 69:20 | 69:30 | 69:40 | 69:50 | 70:00 | 70:10 | 70:20 | 70:30 | 70:40 | 70:50 | 71:00 | 71:10 | 71:20 | 71:30 | 71:40 | 71:50 | 72:00 | 72:10 | 72:20 | 72:30 | 72:40 | 72:50 | 73:00 | 73:10 | 73:20 | 73:30 | 73:40 | 73:50 | 74:00 | 74:10 | 74:20 | 74:30 | 74:40 | 74:50 | 75:00 | 75:10 | 75:20 | 75:30 | 75:40 | 75:50 | 76:00 | 76:10 | 76:20 | 76:30 | 76:40 | 76:50 | 77:00 | 77:10 | 77:20 | 77:30 | 77:40 | 77:50 | 78:00 | 78:10 | 78:20 | 78:30 | 78:40 | 78:50 | 79:00 | 79:10 | 79:20 | 79:30 | 79:40 | 79:50 | 80:00 | 80:10 | 80:20 | 80:30 | 80:40 | 80:50 | 81:00 | 81:10 | 81:20 | 81:30 | 81:40 | 81:50 | 82:00 | 82:10 | 82:20 | 82:30 | 82:40 | 82:50 | 83:00 | 83:10 | 83:20 | 83:30 | 83:40 | 83:50 | 84:00 | 84:10 | 84:20 | 84:30 | 84:40 | 84:50 | 85:00 | 85:10 | 85:20 | 85:30 | 85:40 | 85:50 | 86:00 | 86:10 | 86:20 | 86:30 | 86:40 | 86:50 | 87:00 | 87:10 | 87:20 | 87:30 | 87:40 | 87:50 | 88:00 | 88:10 | 88:20 | 88:30 | 88:40 | 88:50 | 89:00 | 89:10 | 89:20 | 89:30 | 89:40 | 89:50 | 90:00 | 90:10 | 90:20 | 90:30 | 90:40 | 90:50 | 91:00 | 91:10 | 91:20 | 91:30 | 91:40 | 91:50 | 92:00 | 92:10 | 92:20 | 92:30 | 92:40 | 92:50 | 93:00 | 93:10 | 93:20 | 93:30 | 93:40 | 93:50 | 94:00 | 94:10 | 94:20 | 94:30 | 94:40 | 94:50 | 95:00 | 95:10 | 95:20 | 95:30 | 95:40 | 95:50 | 96:00 | 96:10 | 96:20 | 96:30 | 96:40 | 96:50 | 97:00 | 97:10 | 97:20 | 97:30 | 97:40 | 97:50 | 98:00 | 98:10 | 98:20 | 98:30 | 98:40 | 98:50 | 99:00 | 99:10 | 99:20 | 99:30 | 99:40 | 99:50 | 100:00 | 100:10 | 100:20 | 100:30 | 100:40 | 100:50 | 101:00 | 101:10 | 101:20 | 101:30 | 101:40 | 101:50 | 102:00 | 102:10 | 102:20 | 102:30 | 102:40 | 102:50 | 103:00 | 103:10 | 103:20 | 103:30 | 103:40 | 103:50 | 104:00 | 104:10 | 104:20 | 104:30 | 104:40 | 104:50 | 105:00 | 105:10 | 105:20 | 105:30 | 105:40 | 105:50 | 106:00 | 106:10 | 106:20 | 106:30 | 106:40 | 106:50 | 107:00 | 107:10 | 107:20 | 107:30 | 107:40 | 107:50 | 108:00 | 108:10 | 108:20 | 108:30 | 108:40 | 108:50 | 109:00 | 109:10 | 109:20 | 109:30 | 109:40 | 109:50 | 110:00 | 110:10 | 110:20 | 110:30 | 110:40 | 110:50 | 111:00 | 111:10 | 111:20 | 111:30 | 111:40 | 111:50 | 112:00 | 112:10 | 112:20 | 112:30 | 112:40 | 112:50 | 113:00 | 113:10 | 113:20 | 113:30 | 113:40 | 113:50 | 114:00 | 114:10 | 114:20 | 114:30 | 114:40 | 114:50 | 115:00 | 115:10 | 115:20 | 115:30 | 115:40 | 115:50 | 116:00 | 116:10 | 116:20 | 116:30 | 116:40 | 116:50 | 117:00 | 117:10 | 117:20 | 117:30 | 117:40 | 117:50 | 118:00 | 118:10 | 118:20 | 118:30 | 118:40 | 118:50 | 119:00 | 119:10 | 119:20 | 119:30 | 119:40 | 119:50 | 120:00 | 120:10 | 120:20 | 120:30 | 120:40 | 120:50 | 121:00 | 121:10 | 121:20 | 121:30 | 121:40 | 121:50 | 122:00 | 122:10 | 122:20 | 122:30 | 122:40 | 122:50 | 123:00 | 123:10 | 123:20 | 123:30 | 123:40 | 123:50 | 124:00 | 124:10 | 124:20 | 124:30 | 124:40 | 124:50 | 125:00 | 125:10 | 125:20 | 125:30 | 125:40 | 125:50 | 126:00 | 126:10 | 126:20 | 126:30 | 126:40 | 126:50 | 127:00 | 127:10 | 127:20 | 127:30 | 127:40 | 127:50 | 128:00 | 128:10 | 128:20 | 128:30 | 128:40 | 128:50 | 129:00 | 129:10 | 129:20 | 129:30 | 129:40 | 129:50 | 130:00 | 130:10 | 130:20 | 130:30 | 130:40 | 130:50 | 131:00 | 131:10 | 131:20 | 131:30 | 131:40 | 131:50 | 132:00 | 132:10 | 132:20 | 132:30 | 132:40 | 132:50 | 133:00 | 133:10 | 133:20 | 133:30 | 133:40 | 133:50 | 134:00 | 134:10 | 134:20 | 134:30 | 134:40 | 134:50 | 135:00 | 135:10 | 135:20 | 135:30 | 135:40 | 135:50 | 136:00 | 136:10 | 136:20 | 136:30 | 136:40 | 136:50 | 137:00 | 137:10 | 137:20 | 137:30 | 137:40 | 137:50 | 138:00 | 138:10 | 138:20 | 138:30 | 138:40 | 138:50 | 139:00 | 139:10 | 139:20 | 139:30 | 139:40 | 139:50 | 140:00 | 140:10 | 140:20 | 140:30 | 140:40 | 140:50 | 141:00 | 141:10 | 141:20 | 141:30 | 141:40 | 141:50 | 142:00 | 142:10 | 142:20 | 142:30 | 142:40 | 142:50 | 143:00 | 143:10 | 143:20 | 143:30 | 143:40 | 143:50 | 144:00 | 144:10 | 144:20 | 144:30 | 144:40 | 144:50 | 145:00 | 145:10 | 145:20 | 145:30 | 145:40 | 145:50 | 146:00 | 146:10 | 146:20 | 146:30 | 146:40 | 146:50 | 147:00 | 147:10 | 147:20 | 147:30 | 147:40 | 147:50 | 148:00 | 148:10 | 148:20 | 148:30 | 148:40 | 148:50 | 149:00 | 149:10 | 149:20 | 149:30 | 149:40 | 149:50 | 150:00 | 150:10 | 150:20 | 150:30 | 150:40 | 150:50 | 151:00 | 151:10 | 151:20 | 151:30 | 151:40 | 151:50 | 152:00 | 152:10 | 152:20 | 152:30 | 152:40 | 152:50 | 153:00 | 153:10 | 153:20 | 153:30 | 153:40 | 153:50 | 154:00 | 154:10 | 154:20 | 154:30 | 154:40 | 154:50 | 155:00 | 155:10 | 155:20 | 155:30 | 155:40 | 155:50 | 156:00 | 156:10 | 156:20 | 156:30 | 156:40 | 156:50 | 157:00 | 157:10 | 157:20 | 157:30 | 157:40 | 157:50 | 158:00 | 158:10 | 158:20 | 158:30 | 158:40 | 158:50 | 159:00 | 159:10 | 159:20 | 159:30 | 159:40 | 159:50 | 160:00 | 160:10 | 160:20 | 160:30 | 160:40 | 160:50 | 161:00 | 161:10 | 161:20 | 161:30 | 161:40 | 161:50 | 162:00 | 162:10 | 162:20 | 162:30 | 162:40 | 162:50 | 163:00 | 163:10 | 163:20 | 163:30 | 163:40 | 163:50 | 164:00 | 164:10 | 164:20 | 164:30 | 164:40 | 164:50 | 165:00 | 165:10 | 165:20 | 165:30 | 165:40 | 165:50 | 166:00 | 166:10 | 166:20 | 166:30 | 166:40 | 166:50 | 167:00 | 167:10 | 167:20 | 167:30 | 167:40 | 167:50 | 168:00 | 168:10 | 168:20 | 168:30 | 168:40 | 168:50 | 169:00 | 169:10 | 169:20 | 169:30 | 169:40 | 169:50 | 170:00 | 170:10 | 170:20 | 170:30 | 170:40 | 170:50 | 171:00 | 171:10 | 171:20 | 171:30 | 171:40 | 171:50 | 172:00 | 172:10 | 172:20 | 172:30 | 172:40 | 172:50 | 173:00 | 173:10 | 173:20 | 173:30 | 173:40 | 173:50 | 174:00 | 174:10 | 174:20 | 174:30 | 174:40 | 174:50 | 175:00 | 175:10 | 175:20 | 175:30 | 175:40 | 175:50 | 176:00 | 176:10 | 176:20 | 176:30 | 176:40 | 176:50 | 177:00 | 177:10 | 177:20 | 177:30 | 177:40 | 177:50 | 178:00 | 178:10 | 178:20 | 178:30 | 178:40 | 178:50 | 179:00 | 179:10 | 179:20 | 179:30 | 179:40 | 179:50 | 180:00 | 180:10 | 180:20 | 180:30 | 180:40 | 180:50 | 181:00 | 181:10 | 181:20 | 181:30 | 181:40 | 181:50 | 182:00 | 182:10 | 182:20 | 182:30 | 182:40 | 182:50 | 183:00 | 183:10 | 183:20 | 183:30 | 183:40 | 183:50 | 184:00 | 184:10 | 184:20 | 184:30 | 184:40 | 184:50 | 185:00 | 185:10 | 185:20 | 185:30 | 185:40 | 185:50 | 186:00 | 186:10 | 186:20 | 186:30 | 186:40 | 186:50 | 187:00 | 187:10 | 187:20 | 187:30 | 187:40 | 187:50 | 188:00 | 188:10 | 188:20 | 188:30 | 188:40 | 188:50 | 189:00 | 189:10 | 189:20 | 189:30 | 189:40 | 189:50 | 190:00 | 190:10 | 190:20 | 190:30 | 190:40 | 190:50 | 191:00 | 191:10 | 191:20 | 191:30 | 191:40 | 191:50 | 192:00 | 192:10 | 192:20 | 192:30 | 192:40 | 192:50 | 193:00 | 193:10 | 193:20 | 193:30 | 193:40 | 193:50 | 194:00 | 194:10 | 194:20 | 194:30 | 194:40 | 194:50 | 195:00 | 195:10 | 195:20 | 195:30 | 195:40 | 195:50 | 196:00 | 196:10 | 196:20 | 196:30 | 196:40 | 196:50 | 197:00 | 197:10 | 197:20 | 197:30 | 197:40 | 197:50 | 198:00 | 198:10 | 198:20 | 198:30 | 198:40 | 198:50 | 199:00 | 199:10 | 199:20 | 199:30 | 199:40 | 199:50 | 200:00 | 200:10 | 200:20 | 200:30 | 200:40 | 200:50 | 201:00 | 201:10 | 201:20 | 201:30 | 201:40 | 201:50 | 202:00 | 202:10 | 202:20 | 202:30 | 202:40 | 202:50 |  |
|---------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|

In Anlehnung an [2] werden einige Klarstellungen und Einschränkungen vorgenommen. Das Betriebskonzept, das der Studie hier zugrunde gelegt wird, entspricht im Personennahverkehr dem veröffentlichten „Zillertaler Mobilitätsplan“ [1], geht also über den Fahrplan 2024 weit hinaus.

Das in der Berechnung der „normierten Antriebskonzepte“ zugrunde gelegte Betriebskonzept umfasst

- Halbstundentakt werktäglich von 5:30 bis 24:00
  - 37 Zugspaare am Werktag
  - 30 Zugspaare an Samstagen
  - 30 Zugspaare an Sonn- und Feiertagen (Annahme: 12 Feiertage an Werktagen)
- 33,4 tägliche Zugspaare im Wochenmittel
- 12185 Zugspaare im Jahr (bisher ca. 9855)
- 772 553 km/a Zugskilometer pro Jahr (andere Quellen 770 880 km/a [4])

Soll der Verstärker-Verkehr aus touristischen Gründen Montag bis Sonntag (täglich) angeboten werden, kann das mit 34 Zugspaaren (786 704 km/a) dargestellt oder durch additive Berücksichtigung der reinen Betriebskosten (Kap. 8.1, Abbildung 73, Zeile 4) mit 23 141 km/a pro Zugpaar berücksichtigt werden. Deshalb Priorisierung nach Kap. 6.

Der bereits 2014 untersuchte Viertelstundentakt (15 min-Takt) an Werktagen tagsüber wird hingegen nicht berechnet, geht aber in die Argumentation bezüglich Flexibilität der zukünftigen Betriebsführung ein.

Die für den Wasserstoff-Betrieb vorgeschlagenen Angebotsverbesserungen werden im Wesentlichen hier unverändert übernommen und nicht neuerlich zu Diskussion gestellt. Das Angebot ist für den Vergleich unabhängig von der Antriebsart und für alle untersuchten Antriebsarten gleich.

Die bereits öffentlich vorgestellten Ausbauvorhaben in Strecken und Bahnhöfe (z.B. Anbindung Zillertal Arena Zell – Aschau, Ortsdurchfahrt Zell am Ziller, zweigleisiger Ausbau Schlitters – Gagering, ...) werden unverändert übernommen und nicht neuerlich zu Diskussion gestellt, soweit sie nicht nur aufgrund einer bestimmten Antriebsart betriebsbedingt notwendig sind.

Eine Umspurung der Gesamtstrecke auf Normalspur von 1435mm Spurweite wird gemäß Voruntersuchungen des Auftraggebers [5] in dieser TUW-Studie nicht behandelt. Ebenso ist der Güterverkehr nicht Studiengegenstand und wurde nur in Bezug auf Synergien zu Personenverkehrskonzepten berücksichtigt.

Der Schwerpunkt der Analyse liegt aufgrund der ungleich höheren Verkehrsleistung auf dem Personennahverkehr im Halbstundentakt (30 min-Takt). Der Güterverkehr bis Fügen wird ergänzend behandelt. Der Dampf-Nostalgieverkehr wird nur in Hinblick auf seine fortgesetzte Machbarkeit behandelt.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Zuführung der Primärenergie zur elektrischen Antriebstechnik auf das Angebot werden durch Betriebssimulationen abgeschätzt.

Die Synergien im lokalen Busbetrieb und im Betrieb von Pistenfahrzeugen werden analysiert.

Die Möglichkeiten der Nutzung von lokalem, kostengünstigem Überschussstrom werden analysiert.

Die verkehrspolitischen Auswirkungen der Null-Lösung (Auslaufbetrieb ohne Investitionen) nach 2027 werden nicht behandelt. Die verkehrspolitischen Auswirkungen einer langen Betriebsunterbrechung aufgrund verspäteter Fahrzeuganschaffung oder Infrastrukturanpassung werden nicht behandelt.

## 2.6 Innovative Vorzeigeregion

Die lokale Erzeugung von Wasserstoff sowie der Wasserstoffbetrieb der Bahn im Zillertal wurden öffentlich in den Kontext einer technisch-innovativen Vorzeigeregion gestellt.

Auf die Vermarktbarkeit alternativer untersuchter Konzepte wird derart eingegangen, dass deren innovative Ausprägungen und deren Vorteile im Vergleich zu den heutigen State-of-the-Art-Lösungen angeführt werden. Es wird jedoch kein neues Marketingkonzept erstellt.

### 3 Analyse existierender Studienergebnisse Text

Im folgenden Kapitel wird auf eine Reihe vorhandener Studien eingegangen, die dort enthaltenen Annahmen und Schlüsse interpretiert und vom Autorenteam kommentiert. Des Weiteren werden „offene Fragen“ des Auftraggebers hinsichtlich der vorhandenen Studien und die Analyse der bisher angewandten Bewertungsverfahren in das Kapitel integriert und relevante Informationen und Parameter für die differentielle Kostenvergleichsrechnung aus den vorhandenen Studien abgeleitet.

#### 3.1 KCW Prüfung des Angebotes der ZVB (25.05.2020) [6]

##### Vollkosten-Kalkulation, p11:

(H2: 11.12.2019, EmA: 19.12.2019).

⇒ 14,16 €/Zkm

| H2- und E-Traktion im Vergleich                   | Jahresmittelwert 15a |                   |              |              | Jahresmittelw Jahresmittelwert 30a |                   |                   |              |              |
|---------------------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------|--------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|
|                                                   | H2                   | E                 | H2           | E            | H2                                 | E                 | EOA               | H2           | E            |
|                                                   | EUR/a                | EUR/a             | EUR/Zkm      | EUR/Zkm      | EUR/a                              | EUR/a             | EUR/a             | EUR/Zkm      | EUR/Zkm      |
| Personalaufwand                                   | 5.419.067            | 5.419.067         | 7,08         | 7,08         | 6.150.516                          | 6.150.516         | 6.150.516         | 8,04         | 8,04         |
| Kapitaldienst Fahrzeuge                           | 3.189.120            | 2.690.819         | 4,17         | 3,52         | 2.555.876                          | 2.156.519         | 2.102.674         | 3,34         | 2,82         |
| Aufwendungen für Material und bezogene Leistungen | 9.249.783            | 8.259.614         | 12,09        | 10,79        | 11.610.336                         | 10.676.596        | 6.253.816         | 15,17        | 13,95        |
| Kapitaldienst Werkstattadaptierung                | 430.794              | 430.794           | 0,56         | 0,56         | 279.364                            | 279.364           | 314.697           | 0,37         | 0,37         |
| Sonstige betriebliche Aufwendungen                | 1.280.523            | 1.690.384         | 1,67         | 2,21         | 1.411.584                          | 1.616.515         | 1.632.070         | 1,84         | 2,11         |
| Abschreibungen                                    | 212.938              | 212.938           | 0,28         | 0,28         | 215.838                            | 215.838           | 215.838           | 0,28         | 0,28         |
| IBE (Ohne Erhaltungs-MIP STRECKE)                 | 1.482.296            | 2.117.467         | 1,94         | 2,77         | 1.754.335                          | 2.439.027         | 2.439.027         | 2,29         | 3,19         |
| Umsatzrendite                                     | 829.656              | 800.641           | 1,08         | 1,05         | 983.383                            | 946.942           | 728.348           | 1,29         | 1,24         |
| <b>Vertragssumme</b>                              | <b>22.094.178</b>    | <b>21.621.725</b> | <b>28,87</b> | <b>28,26</b> | <b>24.961.231</b>                  | <b>24.481.318</b> | <b>19.836.985</b> | <b>32,62</b> | <b>31,99</b> |
| <b>Delta zu H2</b>                                |                      | <b>-472.453</b>   |              | <b>-0,62</b> |                                    | <b>-479.914</b>   | <b>-5.124.246</b> |              | <b>-0,63</b> |
| Fahrgelderlöse                                    | 0                    | 0                 | 0,00         | 0,00         | 0                                  | 0                 | 0                 | 0,00         | 0,00         |
| Standard-MIP                                      | 5.647.676            | 5.647.676         | 7,38         | 7,38         | 6.119.024                          | 6.119.024         | 6.119.024         | 8,00         | 8,00         |
| Sonder-MIP neutral (betriebsnotwendig)            | 2.057.552            | 2.057.552         | 2,69         | 2,69         | 1.028.776                          | 1.028.776         | 1.028.776         | 1,34         | 1,34         |
| Sonder-MIP antriebspezifisch                      | 1.313.756            | 2.612.455         | 1,72         | 3,41         | 827.613                            | 2.056.674         | 2.300.777         | 1,08         | 2,69         |
| Zwischenfinanzierungskosten                       | 137.827              | 160.030           | 0,18         | 0,21         | 68.699                             | 78.842            | 85.166            | 0,09         | 0,10         |
| <b>Vertragssumme + MIP (exkl. Weiteres)</b>       | <b>31.250.988</b>    | <b>32.099.438</b> | <b>40,84</b> | <b>41,95</b> | <b>33.005.344</b>                  | <b>33.764.634</b> | <b>29.370.729</b> | <b>43,13</b> | <b>44,13</b> |
| Sonder-MIP neutral (weitere)                      | 3.986.384            | 3.986.384         | 5,21         | 5,21         | 2.121.243                          | 2.121.243         | 2.121.243         | 2,77         | 2,77         |
| Zwischenfinanzierungskosten - weitere             | 52.677               | 52.677            | 0,07         | 0,07         | 26.178                             | 26.178            | 26.178            | 0,03         | 0,03         |
| <b>Vertragssumme + MIP</b>                        | <b>35.290.050</b>    | <b>36.138.499</b> | <b>46,12</b> | <b>47,23</b> | <b>35.152.765</b>                  | <b>35.912.055</b> | <b>31.518.150</b> | <b>45,94</b> | <b>46,93</b> |
| <b>Delta zu H2</b>                                |                      | <b>848.449</b>    |              | <b>1,11</b>  |                                    | <b>759.290</b>    | <b>-3.634.615</b> |              | <b>0,99</b>  |

⇒ 8,75  
€/Zkm

⇒ 8,76  
€/Zkm

⇒ 8,12  
€/Zkm

Abbildung 3: Vollkosten aus KCW Studie 2019, [6] p11

##### Kommentar:

Ein Abgleich des „E“-Konzeptes über 30 Jahre mit dem Basispunkt der Berechnungen in Kap. 8.1 über 30 Jahre zeigt eine gute Übereinstimmung im Bereich der das Antriebskonzept betreffenden differentiellen Betriebskosten, wenn die rot markierten Positionen nicht berücksichtigt werden (Personalaufwand, Material und bezogene Leistungen, Umsatzrendite), ergeben sich variable Betriebskosten von 8,76 €/Zkm. Da jedoch die Energiekosten wohl unter „bezogenen Leistungen“ zu finden sind, entstehen variable Betriebskosten von 22,81 €/Zkm, was als zu hoch angesehen wird.

Im Geschäftsbericht der Zillertalbahn 2021 werden für die Schienenverkehrssparte 11 Mio. € Umsatz ausgewiesen, für 19.500 Zugsfahrten je 31,7 km. Setzt man den Umsatz bis auf eine kleine Marge mit den Kosten gleich, dann ergeben sich Vollkosten von 17,8 €/Zkm (inkl. Güterverkehr), also rund 17 €/Zkm.

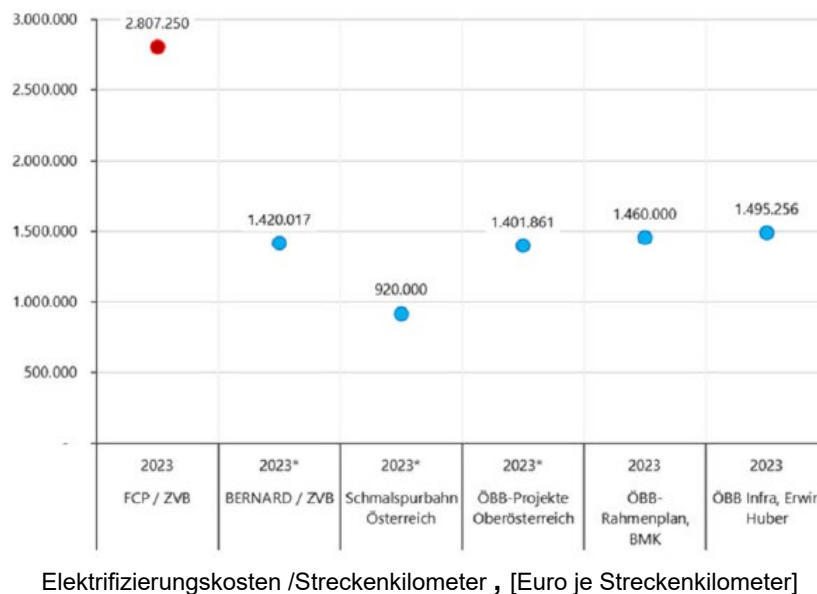
Die Primärenergiekosten sind für das H2-Konzept um knapp 934 k€/a MIP (Mittelfristige Investitionsplanung) höher angegeben, jedoch für die „sonstigen betrieblichen Aufwendungen“ um 205 k€/a, für das IBE (Infrastruktur Benutzungs-entgelt) um 685 k€/a und für die antriebspezifischen Sonder-MIP um 1.229 k€/a geringer ausgewiesen. Dem sind nach Stand 2023 verwendeten Parameter z.B. ein rückgerechneter Risikoaufschlag im Bereich Wartungsvertrag von rund 1.675 k€/a in [7] gegenüberzustellen (ohne zyklischem Tausch von Akkus und Brennstoffzellen). Auch die signifikante Anhebung des IBE und der Sonder-MIP von zusammen 1.914 k€/a erstaunen: entweder wird die Höherwertigkeit einer

elektrifizierten Bahnstrecke über das IBE an den Eigentümer der Fahrleitung abgegolten oder die zusätzlichen Investitionen und Unterhaltsleistungen eines MIPs berücksichtigt. Hier erscheinen diese Aufwendungen unter zwei Positionen.

Den Primärenergiekosten unter „Aufwendungen für Material und bezogene Leistungen“ liegt wohl ein Sondervertrag über 30 Jahre zugrunde. Bei 772.000 Zkm/a stehen bei gleichem Primärenergiekosten von 0,15 €/kWh 3.515 k€/a im H2-Konzept 839 k€/a im E-Konzept gegenüber, also ein Differenz von 2.676 k€/a. Ausgewiesen werden aber nur 934 k€/a.

### 3.2 KCW Annex zum Variantenvergleich(19.07.2023) [8]

#### Elektrifizierungsgesamtkosten, p7



Kommentar:

Aus Abbildung 74 können folgende Kennwerte ermittelt werden (wobei hier noch veraltete Gleislängen zugrunde gelegt sind):

- |                                          |                      |                         |
|------------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| • Sz1: 50,2 mio (42,7km Gleislänge)      | ⇒ 1,17 mio€/Gleis-km | ⇒ 1,58 mio€/Strecken-km |
| • Sz4: 21,0 mio (16,0km Gleislänge) tlw. | ⇒ 1,31 mio€/Gleis-km | ⇒ 0,66 mio€/Strecken-km |
| • Sz5: 27,4 mio (19,6km Gleislänge) tlw. | ⇒ 1,38 mio€/Gleis-km | ⇒ 0,86 mio€/Strecken-km |

Mit den Gleislängen aus Abbildung 57 ändern sich die Kennwerte zu

- |                                          |                      |                         |
|------------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| • Sz1: 52,8 mio (45,3km Gleislänge)      | ⇒ 1,17 mio€/Gleis-km | ⇒ 1,67 mio€/Strecken-km |
| • Sz4: 18,5 mio (13,5km Gleislänge) tlw. | ⇒ 1,37 mio€/Gleis-km | ⇒ 0,58 mio€/Strecken-km |
| • Sz5: 28,3 mio (20,5km Gleislänge) tlw. | ⇒ 1,38 mio€/Gleis-km | ⇒ 0,89 mio€/Strecken-km |

Diese Kosten beinhalten nicht nur die Fahrleitung, sondern auch die entsprechende Anzahl Unterwerke. Die Streuung von 1,17 mio€/Gkm bis 1,38 mio€/Gkm liegt zwischen den blau markierten Werten und bei weniger als der Hälfte des rot markierten Wertes der Kosten je Streckenkilometer. Die hier verwendeten Kosten überschätzen somit die blau markierten Schätzwerte.

Der Vergleich der Kosten pro Streckenkilometer kann nur für Sz1 erfolgen. 1,58 mio€/Skm bis 1,67 mio€/Skm überschätzen die blau markierten Werte im Mittel um 13,6%, sind also als konservativ zu betrachten. Eine mögliche Ursache ist die Kostenannahme von 2,5 mio€ pro Unterwerk statt 2,0 mio€ in anderen Quellen, womit Spielraum für später vorgeschlagene stationäre Energiespeicher bleibt. **Die Größenordnungen hier sind jedenfalls konservativ plausibel.**

#### Vorgriff auf [9], p193:

Ohne Grundstückskosten werden die Errichtungskosten einer 1,5 kV DC Oberleitung inkl. Unterwerke mit 19 mio€ angegeben, also 420 k€/Gkm, für 15 kV 16,7 Hz 14 mio€ (jedoch ohne Redundanzen), also 309 k€/Gkm, Preisbasis 2017.

## Zweigleisiger Ausbau Schlitters – Gagering, p11

|                                          |                                                                                           |                                                                                                                                                                        |             |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 2-gleisiger Ausbau Schlitters – Gagering | Gem. ZVB dient der Abschnitt der Fahrplanstabilisierung und soll Verspätungen minimieren. | Gem. Mitteilung des VVT ergeben sich aus der Betriebssimulation keine Anhaltspunkte dafür, dass durch die Mehrgleisigkeit ein positiver betrieblicher Effekt erwächst. | siehe 3.1.2 |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|

Kommentar:

Die fahrdynamische Betriebssimulation des Planverkehrs kann mit einer ortsfesten Kreuzungsstation und zwei offenen Streckenenden sehr gut umgehen. Da die zweite Kreuzungsstation bereits in den Doppelspurabschnitt Zell am Ziller – Ramsau im Zillertal-Hippach verlegt werden konnte, ist diese Situation bei der Zillertalbahn heute gegeben.

Nicht berücksichtigt ist der Zwangsknoten in Jenbach, der aufgrund der Anschlussbindung im Fahrplan nicht frei wählbar ist und der als hauptsächlicher Einbringer von Verspätungen zu betrachten ist. Im Sinne der Fahrplanstabilität und damit der Betriebszuverlässigkeit aus Kundensicht ist diese **Doppelspurinsel** nördlich von der heutigen Kreuzungsstation Fügen-Hart im Zillertal sehr wohl **ausgesprochen sinnvoll**. Diese zu befürwortende Qualitätsmaßnahme ist jedoch völlig **unabhängig von dem Antriebskonzept**.

Ein weiterer Vorteil ist die daraus resultierende Möglichkeit, zumindest alle planmäßig verkehrenden Züge in Fügen-Hart im Zillertal auf Gleis 1 verkehren zu lassen, was eine direkte Querung zum Bahnhofplatz und Busbahnhof ermöglicht, ohne Behinderung und Gefahr durch den Gegenzug am Nachbargleis. Der Einbau eines Mittelbahnsteigs, wie er heute bei den ÖBB aus Gründen der ferngesteuerten Betriebsleittechnik im Rahmen von Bahnhofsumbauten standardmäßig erfolgt, wird nachhaltig obsolet.

## Streckenlänge – Oberleitungslänge, p19

|    |                                                     |                                              |                               |           |
|----|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-----------|
| 0a | Streckenlänge ZVB                                   |                                              | 32,130 km                     |           |
| 0b | Ursprünglich angegebene Gleislänge ZVB              |                                              | 50,615 km                     |           |
| 0c | Tatsächliche Gleislänge ZVB                         |                                              | 48,262 km                     |           |
| 1a | Ursprüngliche Forderung ZVB bzgl. Fahrleitungslänge |                                              | 49,673 km                     |           |
| 1b | Ursprüngliche Forderung ZVB bzgl. Fahrleitungslänge | Neubauprojekte gem. ZVB (3.800 km)           | Überlappungszuschlag gem. FCP | 62,000 km |
| 2  | ksw-Gutachten 3. Mai 2023 zur Fahrleitungslänge     |                                              | 42,124 km                     |           |
| 3a | Begutachtung Fahrleitung ZVB & ksw 11. Mai 2023     | Commitment Fahrleitungslänge                 | 42,348 km                     |           |
| 3b | Begutachtung Fahrleitung ZVB & ksw 11. Mai 2023     |                                              | 43,183 km                     |           |
| 3c | Begutachtung Fahrleitung ZVB & ksw 11. Mai 2023     | Best.-<br>Neubauprojekte gem. ZVB (4.009 km) | 47,192 km                     |           |
| 3d | Begutachtung Fahrleitung ZVB & ksw 11. Mai 2023     | Neubauprojekte gem. ZVB (4.009 km)           | 46,357 km                     |           |

Kommentar:

in Abbildung 57 leiten wir mit rudimentären Methoden eine Gleislänge für die vollständige Elektrifizierung von 45,294km her. Die unter den Punkten 3a bis 3d genannten Längen erscheinen somit plausibel.

Grundsätzlich werden Oberleitungskosten per Streckenkilometer und nicht per Fahrdrahtkilometer angegeben, z.B. [10]. Auch werden Oberleitungskosten in Bahnhöfen anders bewertet als auf der freien Strecke. Die Verwendung von Turm-masten mit Querseilen in mehrgleisigen Bahnhöfen können die Kosten für Masten und Mastfundierungen reduzieren.

## Dampf-Abschlag, p22- p24

Mangels hinreichender Belege, aber auch schon angesichts der geringen Anzahl von nur ca. 100 Dampfzugfahrten im Zillertal pro Jahr, muss die von FCP unterstellte substanzielle Verkürzung der Anlagenlebensdauer zurückgewiesen werden.

Zustimmung.

## Oberleitungskosten ÖBB-Regionalbahnen, p27

| Strecke                                         | EUR/Skm (2023) |
|-------------------------------------------------|----------------|
| Wiener Neustadt – Loipersbach                   | 2,10           |
| St.Pölten – Hainfeld, Pöchlarn – Scheibbs       | 1,42           |
| Neumarkt-Kallham – Braunau, Friedburg – Braunau | 1,15           |
| Zeltweg – Pöls                                  | 2,50           |
| <b>Durchschnitt</b>                             | <b>1,46</b>    |

Kommentar:

von den ausgewählten Strecken kommt die Mattigtalbahn Steindorf b. Straßwalchen – Friedburg – Braunau aufgrund ihrer geradlinigen und flachen Ausführung ohne große Kunstbauten der Zillertalbahn am nächsten. Die Streckenlänge von rund 32 km entspricht auch der Zillertalbahn. Die Kosten von 1,15 €/Skm für sind in einer plausiblen Größenordnung für eine 15 kV 16,7Hz Oberleitung, die nach den Normalien für 25kV 50Hz ausgeführt wird.

## Oberleitungskostenschätzung Zillertal. p28

Ein deutscher Fachbeitrag<sup>19</sup> ermittelte 2019, dass „für den Neubau von Fahrleitungsanlagen im Netz der DB [...] als Mittel aller Projekte eine Bandbreite zwischen 0,80 und 1,50 Mio. EUR pro Gleiskilometer (Gkm)“ abgeleitet werden kann. „Bei Betrachtung des Beispiels der Elektrifizierung der Neubaustrecke Erfurt – Leipzig/Halle aus Herstellersicht ergibt sich bei einer Streckenlänge von ca. 122 km und einem Auftragsvolumen von 67 Mio. EUR eine durchschnittliche Summe von maximal 0,28 Mio. EUR/Gkm, wobei noch zahlreiche Nebenleistungen enthalten sind“. Valorisiert mit theoretischen 10% pro Jahr ergibt sich so ein Wert zwischen 0,60 EUR/Gkm und 2,20 EUR/Gkm. Da die Zillertalbahn weder größere Kunstbauten (Brücken, Tunnel) enthält, noch in topographisch anspruchsvollen Bereichen verkehrt, ist eine Analogie maximal im unteren Drittel bei rund **1,3 Mio. EUR/Gkm** gegeben, was sich auch mit der Erfahrung der gutachterlichen Stellungnahme von Stephan deckt.<sup>20</sup>

Kommentar:

die Herleitung der 0,6 Mio €/Gkm ist nicht nachvollziehbar. Auf Preisbasis 2023 müssten es rund 1,16 Mio €/Gkm sein. Die Nennung von 0,28 Mio €/Gkm liegt eine durchgehend zweigleisige Strecke, also 244 Gkm und keine 10% Teuerung zugrunde. Die Schätzung von 1,3 Mio €/Gkm ist als unteres Dritte begründet, erscheint uns aber doch eher hoch, speziell weil die Teuerung mit 10% pro Jahr nicht 2019 angefangen und mittlerweile deutlich abgeflacht ist und die „zahlreichen Nebenleistungen“ nicht berücksichtigt sind.

Hinweis:

in dieser TUW-Studie werden Antriebskonzepte unabhängig von der gewählten Stromversorgung untersucht. Bei der Abschätzung der Oberleitungskosten sind unterschiedliche Preise und unterschiedliche Begleitmaßnahmen zu berücksichtigen, soweit sie die Konzeptauswahl beeinflussen. Begleitmaßnahmen wie Erdungskonzepte sind mit der Oberleitung eingepreist (siehe [11] und [12]). Relevante Kostenpositionen wie Unterwerke sind gesondert ausgewiesen und kalkuliert.

Einmalige Bereitstellungskosten sind in den Kosten der Unterwerke enthalten, wiederkehrende Bereitstellungskosten (Netzgebühren, Zählpunktgebühren) sind in den mittleren Arbeitspreis integriert. Aufwendungen zur Netzstabilität obliegen dem Stromlieferanten und sind im Arbeitspreis berücksichtigt, ebenso Maßnahmen zur Handhabung der Belastung des Stromnetzes.

Vorschläge, um Verbrauchsspitzen während des Betriebes oder im Tagesverlauf zu glätten, werden in dieser TUW-Studie bei der Ausgestaltung der Unterwerke getätigt. Die dadurch verursachten Mehrkosten (Investitionen, Unterhaltung) auf Seiten der Zillertalbahn haben sich durch geringere Arbeitspreise des Primärstromes zu kompensieren. Wenn die Zillertalbahn beispielsweise in der Lage ist, den Arbeitsstrom eines Betriebstages in den erweiterten Unterwerken zu speichern, kann sie von Nachtstrompreisen und geringeren Netz-Durchleitungsgebühren profitieren. Diesen Verhandlungsergebnissen vorzugreifen erscheint nicht sinnvoll, auch weil sie nicht antriebspezifisch stark unterschiedlich sind.

## Oberleitungskosten bei Schmalspurbahnen, 29

Eine aktuelle Studie zu einer österreichischen Schmalspurbahn hat für die Elektrifizierung (Preisbasis 2020) Errichtungskosten von 27,8 Mio. ausgewiesen, wobei der Anteil der Fahrleitung (inkl. Masten, Ausleger etc.) mit 21,3 Mio. EUR angegeben wird. Zählt man zu den Errichtungskosten Planung und Unvorhergesehenes dazu, so ergeben sich für die Strecke 0,66 Mio. EUR/Skm, valorisiert (siehe auch 4.1) bedeutet das für heute **0,91 Mio. EUR/Skm**.

Dabei fanden folgende Parameter Eingang:

| Parameter            | Kostenansätze (2020) | Erläuterung                                                                       |
|----------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Elektrifizierung     | 400.000 EUR/Skm      | ÖBB-Fahrleitungstyp 1.1, Referenzpreis NÖVOG Annaberg, inkl. Naturschutzmaßnahmen |
| Unterwerk            | 2,0 Mio. EUR/Stk.    | Referenzwert ÖBB                                                                  |
| Hochspannungsleitung | 150.000 EUR/Stk.     | Je Erhöhung eines Hochspannungsmasten                                             |

Kommentar:

Diese Schätzungen und das valorisierte Ergebnis von 0,91 Mio €/Skm (Streckenkilometer, also inkl. Bahnhöfe) ist erstaunlich und liegt deutlich tiefer als die in dieser Studie hier den Berechnungen zu Grunde gelegten 1,0 Mio €/Gkm. Hinweis: in dieser Schätzung sind die Unterwerke schon berücksichtigt, während sie hier zusätzlich gerechnet werden. Deshalb ist die Sensitivitätsanalyse mit 0,5 Mio €/Gkm im Vergleich zu den hier genannten 0,4 Mio €/Gkm trotz Teuerung als realistisches Szenario zu betrachten.

### 3.3 FCP Elektrifizierung der Zillertalbahn (17.05.2023) [11]

Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH

#### Oberleitungsparameter, p8

- Die Fahrleitung soll auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h ausgelegt sein.
- Die Elektrifizierung soll unter Berücksichtigung von Tourismusanforderungen durchgeführt werden wie z.B. unauffällige Masttypen, die ins Landschaftsbild passen.
- Für die Zugfrequenz wird ein teilweiser 15 min Takt festgelegt.

Zustimmung.

#### TSI-konforme Oberleitung, p9

Im ersten Schritt wurde festgelegt, die Oberleitungsanlagen TSI konform auszuführen. Dies bringt Vorteile im Beschaffungsprozess von Fahrzeugen und Oberleitausrüstung.

Kommentar:

diese Festlegung ist für eine nichtvernetzte Schmalspurbahn nicht erforderlich und nicht vorteilhaft. Die genannten Vorteile sind weder begründet, gelten fahrzeugseitig nur für Normalspur- oder Plattformfahrzeuge und stehen infrastrukturseitig im Widerspruch zu zahlreichen Privatbahnen. TSI ist als Ausgangslage für die Zillertalbahn nicht stichhaltig.

#### Oberleitung ÖBB Type 1.2 für 120km/h, p9

|                    |                                                                          |                                                                                                    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fahrleitungssystem | Oberleitungstyp analog dem ÖBB-System - ÖBB-Type 1.2 für bis zu 120 km/h | Von der Ausführung her wird eine Type für niedrige Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h herangezogen. |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Kommentar:**

Da die neuen Fahrzeuge für eine Fahrplangeschwindigkeit von 80km/h spezifiziert sind (mit der Option auf 100km/h), wäre ein Fahrleitungssystem **ÖBB OL-Type 1.1 für 80km/h ausreichend und kostengünstiger**. Wenn tatsächlich zu einem späteren Zeitpunkt einzelne Abschnitte mit 100km/h befahren werden sollen, sind diese auszuweisen und in ihre Streckenlänge zu berücksichtigen, keinesfalls aber die Gesamtlänge der Zillertalbahn von 31,7km. Zusätzlich ist auf Basis des ÖBB Regelwerkes 50.02.03, EN50367 und EN50119, zu hinterfragen, welche Parameter der Type 1.2 Oberleitung für 100km/h in die Bauform der Type 1.1 in diesen Abschnitten bereits beim Bau berücksichtigt werden müssten (z.B. Mastabstand) und welche erst bei der Erhöhung der zulässigen Streckengeschwindigkeit nachgerüstet werden müssen (Seile, Spannungen, ...).

Eine kurze – nicht professionelle – Abklärung ergab:

1. Mastabstand bei OL-Type 1.1 im geraden Gleis 70m, bei OL-Type 1.2 jedoch 68m.
2. maximale Auslenkung in Feldmitte (zwischen zwei Masten) in Bögen bei Type 1.1 30cm, bei Type 1.2 25cm, führt zu kürzeren Mastabständen z.B. im 300m-Bogen: 40m vs. 37m.
3. Trageilematerial bei OL-Type 1.1 NiRosta 40 mm<sup>2</sup> (etwa  $\varnothing = 8$  mm) sein, bei OL-Type 1.2 CuLeg 70 mm<sup>2</sup>, Materialkosten grob 517€ /100m vs. 1580€/100m, also ca. 3x so teuer.  
bei 42km Oberleitungslänge beträgt die Differenz 420 k€

**Hinweis:**

Das Fahrleitungssystem OL-Type 1.1 wird in der aktuellen Version des ÖBB Regelwerkes 50.02.03 vom 28.06.2023 nicht mehr angeführt, in der Version vom 05.12.2019 (mit Anlagen) sehr wohl. Dies wohl deshalb, weil die TSI unter Berücksichtigung der Euro-Wippe normalspuriger Fahrzeuge eine maximale Seitenverschiebung des Fahrdrahtes von  $\pm 300$  mm vorsieht, ohne TSI-Konformität bis 160km/h jedoch  $\pm 400$  mm zulässig sind.

**Alternative Oberleitungsbauart, p-**

Es wurden keine alternativen Oberleitungsbauarten zur OL-Type 1.2 untersucht.

Kostenreduktion durch Mittelmasten in Doppelspurinsel bei gleichzeitiger Umgehung der Grundstücksproblematik für Mastfundamente.



Abbildung 4: Beispiele von Mittelmasten, links mit DC (Leonding, 3. 5. 2011), rechts mit AC-Oberleitung © [www.dokumentationszentrum-eisenbahnforschung.org](http://www.dokumentationszentrum-eisenbahnforschung.org), © Miniatur Wunderland Forum

**Parameter, p9:**

- 25kV 50Hz, 2 Unterwerke (mit Frequenzumrichter) a 3,3 Mio (p16)
- Stahlmasten mit unauffälliger Lackierung
- Überlappungen an Sektionsenden (+15%)
- 20/50 Jahre Lebensdauer, Ersatzteillager
- Fernsteuerzentrale [0,68 m] p17
- Erdungsseile (alle 20m a 4m paralleler Objekte)
- Weichenheizung und Signalanlagen-Ersatzstromversorgung p19
- Instandhaltungsmaterial (4,8 mio) p20 (Motorturmwagen => Waggon)
- Fremdgrund (2 mio) p21
- Risiko 20% p24
- Instandhaltung 7 Personen, 530k Teile, 140 MTW
- 7 – 9,5 Jahre

**Kommentare:**

für 50Hz sind keine Frequenzumrichter erforderlich, die Kosten a 3,3 mio€ sind deutlich höher als in allen anderen Quellen (2,0 bis 2,5 mio€)

Stahlmasten (ohne Speiseleitung) feuerverzinkt sind schon schlanker und damit weniger auffällig als Betonmasten, eine Lackierung oder Pulverbeschichtung von Stahlmasten ist teuer und aufwändig in der Montage, aber in Ausnahmesituationen seltene Praxis.

Fahrdraht-Überlappungen werden konventionell nicht ausgewiesen, weder bei Angabe zu Kosten pro Gleis-km oder pro Strecken-km. Kostenrelevant sind die Sektorenlänge und die erforderlichen Spannungswichte, abhängig von der Auslegungsgeschwindigkeit.

Die Lebensdauerangaben sind am deutlich unteren Ende, eigentlich jenseits davon. Andere Studien gehen von 60 bis 75 Jahre für Masten und Ausleger und 30 bis 32 (35) Jahre für den Fahrdraht bei Regionalbahnen /Stundentakt) aus. Während die Lebensdauer von der Anzahl Überschleifungen abhängig ist – und hier wäre ein 15-min-Takt auf eingleisiger Strecke, also 8 Züge pro Stunde als hoch einzuordnen, ein Halbstundentakt auf Doppelspurinsel mit 2 Überschleifungen pro Stunde als niedrig – werden in Österreich die allermeisten Oberleitungsmasten nicht wegen ihres Alters, sondern wegen Umbauten neu errichtet. Die Westbahn benutzt 2024 im Bereich Wien Hütteldorf und Wien Penzing, aber nicht nur dort, immer noch die Oberleitungsmasten und Isolatorenbauart von 1952, die also 72 Jahre alt sind.



Abbildung 5: Oberleitungsmast mit Abspannvorrichtung aus 1952, Bhf. Wien Hütteldorf – links: Originalisolatoren, rechts: ausgetauschte Isolatoren und Ausleger © 2024: MfV 20240331\_113328



Abbildung 6: Oberleitungsmittelmaste zweierlei Bauarten aus 1952, Bhf. Wien Hütteldorf – links: I-Trägermast beide Hauptgleise (Bst. 2 und 3) mit Originalisolatoren und Ausleger, rechts Gittermast mit modernisierten und originalen Isolatoren/Ausleger (Bst. 4 und 5) © 2024: MfV 20240404\_174006, 20240404\_174029



Abbildung 7: Oberleitungsmittelmaste Bauarten Maba Bhf. Wien Hütteldorf: Hauptgleise (Bst. 2 und 3) mit getauschtem Mast und Ausleger im Mischbetrieb mit der Originaloberleitung © 2024: MfV20240404\_174304



Abbildung 8: Modern Fahrzeuge (Baujahr 2021) unter Fahrleitung von 1952  
Bhf. Wien Hütteldorf: Hauptgleise (Bst. 3) © 2024: MfV 20240404\_174518, 20240404\_174536



Abbildung 9: Modern Fahrzeuge (Baujahr ab 2016) unter Fahrleitung von 1952  
Bhf. Wien Hütteldorf: Hauptgleise (Bst. 5) © 2024: MfV 20240404\_174056

Noch älter ist die Originaloberleitung der Mariazellerbahn, die 1911 in Betrieb ging. Knapp 115 Jahre nach ihrer Errichtung und trotz jahrzehntelangen mangelnden Rostschutzes verrichtet diese Infrastruktur im täglichen Planverkehr ihren Dienst. Charakteristisch sind die Bauformen mit gebogenem Ausleger für Außenzug, Gittermasten, Ausleger mit oben liegendem Tragseil, Speiseleitungen und innerhalb der Bahnhöfe die eleganten Querjoche. Bei Umbauten werden diese Masten durch Betonmasten ersetzt.



Abbildung 10: Originalfahrleitung der Mariazellerbahn von 1910  
© 2022: MfV IMGP5082, IMGP5051



Abbildung 11: links: Originalfahrleitung der Mariazellerbahn mit (demontierter) Speiseleitung von 1910  
© 2022: MfV IMGP5082, IMGP5052, rechts: gewöhnlicher Streckenmast © Niederösterreich Bahnen



Abbildung 12: Originalfahrleitung der Mariazellerbahn mit Querjochen von 1910  
Ausleger und Isolatoren wurden im Rahmen der Wartung erneuert © 24.08.2002 Herbert Ortner, wikipedia



Abbildung 13: Originalfahrleitung der Mariazellerbahn mit genieteten Gittermasten von 1910  
stillgelegter Streckenabschnitt nach Gußwerk © 2012 BikeMike, wikipedia

Fazit dieser Bilderreihe:

eine angenommene Lebensdauer der Fahrleitung von 60 Jahren ist eine sehr vorsichtige Abschätzung. Bei entsprechender Wartung, die ebenfalls mit hohen Ansätzen in der TUW-Studie berücksichtigt worden ist und die den wiederkehrenden Austausch der Verschleißteile beinhaltet, kann die technische Nutzungsdauer signifikant länger sein.

Eine Fernsteuerzentrale ist komfortabel, im Falle aber nur eines Einspeisepunktes eher obsolet. Die Kosten für die Fernansteuerung der Unterwerke sind bei den Unterwerken berücksichtigt.

Die Umstellung der Weichen- und Signalanlagenheizung kann nicht den Elektrifizierungskosten im Rahmen eines Vergleichs von Antriebskonzepten zugeschlagen werden. Es handelt sich um eine – willkommene – Qualitätsverbesserung, die bisher nicht möglich war.

Die Vorhaltung von Instandhaltungsmaterial im Umfang von 25% der Errichtungskosten ist hoch angesetzt. Ein Motorturmwagen ist nur bei rein elektrischem Betrieb, wenn keine fahrdrahtunabhängigen Triebfahrzeuge vorgehalten werden können, erforderlich. In allen anderen Fällen genügt ein Turmwagen, insbesondere wenn Akku-hybrid-Fahrzeuge oder altbrauchbare Dieselloks (für den Güterverkehr) zu Verfügung stehen.

Die Kosten für Fremdgrund sind analog zu anderen Studien als Annahme angesetzt. Gemäß infina.at liegen bei Grünland die Grundstückspreise von 1,22 bis 5,18 €/m<sup>2</sup> Grünland (2017), gemäß bodenpreise.at im Zillertal zwischen 3,60 und 24,47 €/m<sup>2</sup>. Jüngsten Verkäufen zufolge muss ein Mittelwert von 40 €/m<sup>2</sup> berücksichtigt werden, was 50 000 m<sup>2</sup> oder einen 1,6m breiten Grundstückstreifen entlang der gesamten Bahntrasse entspricht. Bei einem mittleren Mastabstand von 50 m (max. 70 m) kommen wären 634 Masten zu setzen. Ohne Berücksichtigung von Eigengrund und bei einem zugrunde gelegten Grundbedarf von großzügigen 2 x 2 m pro Mastfundament ergibt sich ein Bedarf von 2 536 m<sup>2</sup> und ein Kaufpreis von 101 k€. Die Schätzung von 2 mio€ ist also ohne nähere Erklärung als hoch zu beurteilen. Als denkbare Erklärungen können z.B. Rechtsanwalts-, Notar- und Vermessungskosten angeführt werden.

Sicherheitszuschläge mit 20% sind über den üblichen Wagniszuschlägen von 10%. Selbst unverbindliche Kostenvoranschläge dürfen nur 10 bis 15% überschritten werden und müssen sachlich begründet werden. Die Anwendung eines zusätzlichen 20%-Sicherheitszuschlags auf verbindlich eingeholte Kostenvoranschläge ist daher nicht ausreichend begründet.

7 Mann Personal erscheint zu hoch. Bei Privatbahnen ist es üblich, polyvalente Arbeitsplätze auszuschreiben. Im Störfall ist ein Fahrbetrieb nicht oder nur eingeschränkt möglich, in planmäßigen Wartungsfall sollten einzelne, ausgewählte und ausgebildetes Fachpersonal aus der bahneigenen Werkstatt mitgenutzt werden können. Bei Errichtungskosten der Fahrleitung von 19 mio€ nach [9], p193 und Wartungskosten im selben Umfang über 30 Jahre ergeben sich Jahreskosten von 633 k€/Jahr. Die hier angeführten 530 k€ plus 7 Mann (7x ~100 k€ inkl. Lohnnebenkosten) ergeben rund das Doppelte. Diese Kosten scheinen zu hoch angesetzt.

Die 7 bis 9,5 Jahre Realisierungsdauer sind unter den spezifischen Gegebenheiten für einen zwingend durchgehende Oberleitung als realistisch einzuschätzen, will man auf das Instrument der Enteignung verzichten. Für andere Konzepte, die Lücken an besonders herausfordernden Stellen zulassen (Hybrid-Konzepte), ist eine Errichtungsdauer von 2 Jahren, einer Planungsdauer- und Genehmigungsdauer von ebenfalls 2 Jahren und Vorbereitungs- und Ausschreibungsdauern von 1/2 Jahr, zusammen von 4,5 Jahren auszugehen.

## Strom- und Datenleitungsquerungen, Brücken, p11, p12, p17

| Zusammenfassung spannungsführender Teile |                                  |
|------------------------------------------|----------------------------------|
| 110 kV oder 380 kV                       | 8 Überquerungen                  |
| Mittel- oder Niederspannungsleitung      | 2 Überquerungen                  |
| Post bzw. Telekomkabel                   | 2 Überquerungen                  |
| Anzahl Maßnahmen an Überführungen        | 2 x 1 Mio. Euro = 2.000.000 Euro |
| Risikoaufschlag R1 10 %                  | 200.000 Euro                     |

Jede Querung einer die Bahntrasse in zu geringer Höhe querenden Hochspannungsleitung wird ein (!) Mast zur Erhöhung mit 180k€ inkl. Risiko eingerechnet, für jede Mittelspannungsleitung 80k€, zusammen 1,24 Mio.€. Analog wird auch für 2 Brücken (Überführungen), p12, mit weniger als 5,230 m lichter Höher über SOK (Schienenoberkante), p17, Kosten von zusammen 2,2 Mio€ ausgewiesen.

Kommentar:

neben diesen ausgewiesenen, nicht unerheblichen Kosten von zusammen 3,44 Mio€ besteht auch die Gefahr von zusätzlichen Risiken im Zeitverlauf der Umsetzung, da andere Interessenslagen außerhalb der Bahn tangiert werden. Diese Kosten und Zeitriskiken werden aber **nur bei dem Antriebskonzept vollelektrisch wirksam**.

Bei allen anderen Antriebskonzepten, namentlich auch bei den Hybrid-Konzepten, kann durch wahlweise eine der drei Möglichkeiten die Probleme für eine zeitnahe Dekarbonisierungslösung umgangen werden:

1. Unter der querenden Leitung oder Brücke ist gar keine Oberleitung vorgesehen
2. Die Fahrleitung wird für einen Mastenabstand unterbrochen (abgespannt oder geerdet in Seitenlage durchgezogen), der Stromabnehmer gesenkt, das Schienenfahrzeug verkehrt mit Schwung wie bei jedem Phasentrenner-Schutzstrecken. Ein Hybridfahrzeug kann sich „selber retten“, sollte es doch in diesem kurzen Abschnitt zum Halten kommen.
3. Die Fahrleitung wird durchgezogen, jedoch isoliert, der Stromabnehmer bleibt gehoben, der Hauptschalter getrennt, das Schienenfahrzeug verkehrt mit Schwung.

Das als kritische lichte Höhe zugrunde gelegte Maß von 5230 mm ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Oberleitungsauslegung für 25 kV geschuldet. Unter sonst gleichen Voraussetzungen wäre das entsprechende Maß bei 1,5kV DC 5015 mm, da kleinere Isolationsabstände berücksichtigt werden.

Die Mindestfahrdrathöhe über SOK beträgt **für Normalspur bei den ÖBB 4,95m** (ÖBB 50.02.03 Kap. 4.1RW), die kleinste zulässige Fahrdrathöhe beträgt 4,80m, die durch äußere Einflüsse keinesfalls unterschritten werden darf. Die Lage benachbarter Eisenbahnkreuzungen ist zu berücksichtigen. Die Zillertalbahn unterliegt als nichtvernetzte Eisenbahn nicht dem TSI Regelwerk und nicht den Vorgaben der ÖBB Infra und ist zudem eine Bestandsstrecke. Die minimal zulässige Fahrdrathöhe ist vom Schienenfahrzeughersteller für die Betriebsfälle „mit Spannung“ und „geerdet“ bekanntzugeben.

Die Straßenbahnen der Wiener Linien verkehren bei gleicher maximaler Fahrdrathöhe (6m) und 600V DC Fahrleitungsspannung bis zu einer minimal zulässigen Fahrdrathöhe von 3,72m über SOK. (Die Ausschilderung nach StVO berücksichtigt die Isolationsabstände, Toleranzen und den Ausrundungsradius der Straßenoberfläche.)

Alle drei Möglichkeiten können zudem ohne Zeitdruck im Rahmen zukünftiger Unterhaltsarbeiten durch eine durchgehende Fahrleitung ersetzt werden, z.B. durch Schotterbettabsenkungen, bedürfen aber einer Überprüfung im Einzelfall.

Hinweis:

Hybridfahrzeuge sollen so spezifiziert werden, dass sie während der Fahrt zwischen Oberleitungs- und Akku-Modus umgeschaltet werden können (ist heute der Standard). Eine vorübergehende Traktionssperre und Unterbrechung des Hilfsbetriebeumrichters (HBU) ist hinnehmbar.



Abbildung 14: Minimale Fahrdrathöhe von 3,72m über SOK bei 600V DC bei den Wiener Linien, Linie 60, Hofwiesengasse © google street view (04/2022)



Abbildung 15: Minimale Fahrdrathöhe von rund 4,5 m (Anschrift 4,40m) über SOK bei 600V DC bei den Wiener Linien, Linie 52, Linzerstraße, abgesenkt © google street view (04/2022)

### 3.4 FCP Elektrifizierung der Pinzgaubahn (01.05.2020) [12]

Diese Studie orientiert sich stark an den Gegebenheiten und Gepflogenheiten der Mariazellerbahn (NÖVOG), die sich der Oberleitungsbauart ÖBB Typ 1.1 bedient. Diese ist bei en ÖBB nicht mehr zugelassen, im Zillertal deshalb ÖBB Typ 1.2 zugrunde gelegt. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit mit 100 km/h wird gleich wie bei der Zillertalbahn angenommen, ebenso ein 15-min-Takt aus Auslegungsgrundlage. Es werden grün lackierte Masttypen vorgeschlagen.

Planungskosten werden mit 5%, Gutachterkosten mit 2% der Baukosten berücksichtigt.

Die Gesamtkosten von 42,3 mio€ für eine 52,7km lange Schmalspurbahnstrecke mit 15 Bahnhöfen betragen 802 k€/SkM oder mit 3x 10% valorisiert auf Preisbasis 2023 1,06 mio€/km.

Zur Instandhaltung sind zwei Motorturmwagen und eine Zweiwegeebühne vorgesehen. Neben anderen Ersatzmaterialien machen die initialen Instandhaltungskosten mit 8,5 mio€ exakt 40% der reinen Fahrleitungskosten von 21,3 mio€ aus.

Unterwerk werden [12] p12 mit 2 mio€ veranschlagt (2 Unterwerke [12] p15 dann 5 mio€), während sie bei der Zillertalbahn [11] p16 drei Jahre später mit 3,3 mio€ (2 x = 6,6 mio€) veranschlagt werden.

Die Kosten für Unvorhergesehenes ( [12] p16) werden bei der Pinzgaubahn mit 10% angesetzt, in der Studie für die Zillertalbahn [11] mit 20%.

Die unterschiedlichen Einschätzungen zwischen der Zillertalbahn-Studien 2023 [11] und der Pinzgaubahn-Studie 2020 [12] sind nicht nachvollziehbar. Die Pinzgaubahn-Studie erscheint uns näher an den zu erwarteten Realitäten orientiert zu sein.

Hinweis.

Aufgrund der beiden FCP-Studien [11] und [12] haben wir in dieser Studie die Kosten pro Unterwerk von ursprünglich 5 mio€ [10] auf 2,5 mio€ reduziert.

Bemerkung:

Weshalb die Kosten für eine stationäre Akku-Ladeeinheit mit 500 k€, eines Unterwerks für ein gleichartiges Fahrzeug jedoch mit 2500 k€ anzusetzen sind, konnte noch nicht begründet werden.

### 3.5 Studie HyCentA (22.12.2023) [13]

„WIVA P&G HyTrain - Technologischer, wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich von nachhaltigen Schienenfahrzeuganwendungen für das Zillertal“

#### Energieverbrauch, p5

Unter den Technologien zeigt die **Oberleitungsvariante** die höchsten Wirkungsgrade in Bezug auf die Fahrzeuge und Infrastrukturen und den geringsten Energieverbrauch von **6,5 kWh/km**. Darauf folgen die **Batterievariante** mit **7,9 kWh/km** und die **Wasserstoffvariante** (ohne Eigenproduktion von Wasserstoff) mit **14,2 kWh/km**. Die geringsten Wirkungsgrade hat die **Dieselvariante**, was sich im höchsten Energieverbrauch von **19,7 kWh/km** offenbart. Eine Sonderstellung bildet die **Wasserstoffvariante** (mit Eigenproduktion von Wasserstoff). Durch den hohen energetischen Aufwand bei der Elektrolyse und Kompression resultiert hier ein Energieverbrauch von **21,3 kWh/km**.

Kommentar:

Die Differenzierung der Technologien nach Energieverbrauch ist sinnvoll und wird hier plausibel dargestellt. Ein Vergleich mit den in dieser Studie (Abbildung 68) berechneten Werten ergibt auf Basis eines vollbesetzten Zugpaares Jenbach – Mayrhofen – Jenbach:

| Energieverbrauch                        |          | Sz0          | Sz1         | Sz2          | Sz3         | Sz4         | Sz5         |
|-----------------------------------------|----------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Traktion am Rad <small>MA-JB-MA</small> | [kWh]    | 414,4        | 390,3       | 500          | 397,0       | 398,6       | 393,9       |
| Primärenergie                           | [kWh]    | 920,9        | 410,8       | 1851,9       | 561,80      | 446,1       | 438,0       |
| Primärenergie pro km                    | [kWh/km] | <b>14,52</b> | <b>6,48</b> | <b>29,21</b> | <b>8,86</b> | <b>7,04</b> | <b>6,91</b> |
| sinngemäß nach [13] p5                  | [kWh/km] | <b>19,7</b>  | <b>6,5</b>  | <b>21,3</b>  | <b>14,2</b> | <b>--</b>   | <b>7,9</b>  |
| Abweichung                              | [%]      | +36          | 0           | -27          | -51         | +12         | (+14)       |
|                                         |          |              |             |              |             |             | (+18)       |

Dieser Vergleich zeigt, dass es einerseits bei rein elektrischem Betrieb (Sz1) unter Volllast ohne Nebenverbraucher zu einer außerordentlich guten Übereinstimmung kommt, die Berechnungsmodelle als vergleichbar angenommen werden können, andererseits eine klare Tendenz abgelesen werden kann: alle konventionellen Antriebstechnologien (Diesel, Akku) sind deutlich schlechter bewertet, während die Wasserstoffantriebstechnik **signifikant (27 bis 51%) vorteilhaft dargestellt** werden, im Ausmaß abhängig davon, ob es sich um grünen oder grauen Wasserstoff handelt.

#### Betriebskosten, p6

##### ► Kosten

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht stellt die **Dieselvariante** mit Gesamtkosten von **7,6 €/km** Stand heute die kostengünstigste Option dar. Grund sind die im Gegensatz zu den anderen Technologien wesentlich geringeren Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastrukturen. Kostenintensiver, aber auf einem vergleichbaren Level finden sich die **Oberleitungsvariante** mit **8,6 €/km** und die **Batterievariante** mit **8,8 €/km** ein. In Bezug auf die Investitionskosten, sind Oberleitungszüge günstiger als Batteriezüge. Dagegen ist die Oberleitungsinfrastruktur teurer als die Ladeinfrastruktur. Ein ähnlicher Zusammenhang gilt für die Betriebskosten. Die kostenintensivste Option unter den hier diskutierten ist die **Wasserstoffvariante**. Ohne Eigenproduktion ergeben sich Gesamtkosten von **9,4 €/km**. Mit Eigenproduktion liegen die Gesamtkosten bei **9,7 €/km**, wenngleich die Anschaffung und der Unterhalt der Elektrolyse nicht als Ausgaben beim Zugbetreiber anfallen. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass die Oberleitungsvariante die **höchsten Kosten hinsichtlich der Erstanschaffung** verursacht. Die genannten Gesamtkosten werden lediglich aufgrund der hohen Lebensdauern eines Teils der Oberleitungsinfrastruktur durch Anrechnung der Restwerte nach 30 Jahren erreicht.

Kommentar:

Ein Vergleich der Betriebskosten den in dieser Studie (Abbildung 68) berechneten Werten ergibt auf Basis eines vollbe-

setzten Zugpaares Jenbach – Mayrhofen – Jenbach (und technisch verwendeten 879 358km/a) bzw, auf Basis des Basispunktes der Modellparameter (Abbildung 74) folgende Übersicht:

| Betriebskosten                          |          | Sz0         | Sz1         | Sz2            | Sz3         | Sz4         | Sz5         |
|-----------------------------------------|----------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| Traktion am Rad <small>MA-JB-MA</small> | [k€/a]   | 1565        | 854         | 3855 1170      | 929         | 912         | 881         |
| Traktionsenergie pro km                 | [€/km]   | 1,78        | 0,97        | 4,39 1,33      | 1,05        | 1,04        | 1,00        |
| Betriebskosten oh. Fzg-Ist              | [€/km]   | 2,31        | 1,09        | 6,94           | 1,88        | 1,43        | 1,30        |
| Fzg-Instandhaltung                      | [€/km]   | 3,66        | 2,00        | 2,58           | 2,50        | 2,50        | 2,50        |
| diff. Betriebskosten gesamt             | [€/km]   | <b>6,97</b> | <b>3,09</b> | <b>8,52</b>    | <b>4,38</b> | <b>3,93</b> | <b>3,80</b> |
| diff. Gesamtkosten                      | [€/km]   | <b>9,06</b> | <b>8,75</b> | <b>14,16</b>   | <b>7,93</b> | <b>7,86</b> | <b>8,11</b> |
| sinngemäß nach [13] p6                  | [kWh/km] | <b>7,6</b>  | <b>8,6</b>  | <b>9,7 9,4</b> | <b>8,8</b>  | <b>k.A.</b> | <b>k.A.</b> |
| Abweichung Betriebsk.                   | [%]      | +9          | +178        | +14 +10        | +101        | -           | -           |
| Abweichung Gesamtk.                     | [%]      | +19         | +1,7        | -31 .. -34     | +11         |             |             |

Der Vergleich ist schwierig, weil weder die Betriebskosten noch die Gesamtkosten gleich definiert sind. Zudem dürften Vollkosten mit differentiellen Betriebskosten verglichen werden. Aus der Beschreibung in [13] kann man entnehmen, dass die Abschreibungen der Infrastruktur-Investitionskosten berücksichtigt sind (zumindest die der Oberleitung), weshalb Sz1 im ersten Vergleich der Betriebskosten derart aus dem ersten Vergleich fällt. Während beim Diesel- und Wasserstoffbetrieb eine gute Deckung im Bereich von 10% Abweichung vorliegt, werden die Betriebskosten für den Akkubetrieb doppelt so hoch eingeschätzt. Auch hier erscheinen die untersuchten Konzepte zugunsten des Wasserstoffkonzeptes deutlich nachteilig.

Im zweiten Vergleich bezüglich der differentiellen Gesamtkosten (also inkl. Investitionsabschreibungen und Instandhaltungskosten) kommt es zu einer sehr guten Übereinstimmung im Bereich vollelektrischen Antriebskonzeptes (nur 1,7% Unterschied zugunsten Wasserstoffkonzept). Die Abweichungen von 11% für den Akkubetrieb und 19% für den Dieselpetrieb liegen wohl im Rahmen der Unschärfe, nicht aber die Minderkosten von 31% bis 34% für den Wasserstoffbetrieb (grüner, grauer). Auch hier liegen die Einschätzungen weit auseinander.

Kommentar Restwertanrechnung:

Diese Betrachtung bezüglich der Oberleitung ist völlig richtig und ergibt eine gute Übereinstimmung mit unseren Werten, ebenso für die inkl. Instandhaltungskosten der Fahrzeuge:

Einzig die Ansätze für den Wasserstoffbetrieb sind deutlich zu niedrig, möglicherweise weil

- vermutlich die hohen Wartungskosten durch Stadler wohl nicht eingepreist sind.
- ein Wirkungsgrad von 76,5 % für HEMU angenommen wurde (wir rechnen mit 27%) [Kurzfassung KURZFAS-SUNG] WIVA P&G HyTrain: Technologischer, wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich von nachhaltigen Schienenfahrzeuganwendungen für das Zillertal, Seite 15)
- Wir kommen daher auf 14,24 €/km statt den 9,4 bis 9,7€/km.

Frage:

sind bei diesen Kosten auch die Fahrzeuginstandhaltungskosten berücksichtigt und wenn ja, in welchem Umfang für welches Konzept?

## Spez. Energieverbrauch, p14, p15

Tabelle 1: Spezifischer Energieverbrauch der Fahrzeuge

| DMU                      | EMU                     | BEMU                    | HEMU                     |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Fahrzeug<br>19,66 kWh/km | Fahrzeug<br>6,47 kWh/km | Fahrzeug<br>7,09 kWh/km | Fahrzeug<br>13,06 kWh/km |

Tabelle 3: Spezifischer Energieverbrauch der Infrastrukturen

| DMU                           | EMU                          | BEMU                         | HEMU                         |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Infrastruktur<br>0,005 kWh/km | Infrastruktur<br>0,00 kWh/km | Infrastruktur<br>0,79 kWh/km | Infrastruktur<br>1,17 kWh/km |

Kommentar:

Die Auflistung der spezifischen Energieverbräuche ist sehr ähnlich jener auf p5 und liefert damit ein ähnliches bis gleiches Vergleichsergebnis an Abweichungen zu dieser Studie (Abbildung 68).

| Spezifischer Energieverbrauch           |          | Sz0 DMU      | Sz1 EMU     | Sz2 HEMU                         | Sz3 BEMU    | Sz4 BEMU-hy | Sz5 BEMU-hy |
|-----------------------------------------|----------|--------------|-------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Traktion am Rad <small>MA-JB-MA</small> | [kWh]    | 414,4        | 390,3       | 500                              | 397,0       | 398,6       | 393,9       |
| Primärenergie                           | [kWh]    | 920,9        | 410,8       | 1851,9 <small>561,80</small>     | 446,1       | 438,0       | 423,2       |
| Primärenergie pro km                    | [kWh/km] | <b>14,52</b> | <b>6,48</b> | <b>29,21</b> <small>8,86</small> | <b>7,04</b> | <b>6,91</b> | <b>6,68</b> |
| sinngemäß nach [13] p14                 | [kWh/km] | 19,66        | 6,47        | 13,06                            | 7,09        | k.A.        | k.A.        |
| sinngemäß nach [13] p15                 | [kWh/km] | 0,005        | 0,00        | 1,17                             | 0,79        | k.A.        | k.A.        |
| Summe nach [13]                         | [kWh/km] | <b>19,67</b> | <b>6,47</b> | <b>14,23</b>                     | <b>7,88</b> | <b>k.A.</b> | <b>k.A.</b> |
| Abweichung                              | [%]      | +36          | 0           | -51                              | +12         | -           | -           |

Ganz offensichtlich werden die spezifischen Energieverbräuche für den HEMU (Wasserstoffzug) deutlich geringer und für alle anderen Antriebskonzepte – bis auf den voll-elektrischen EMU – höher eingeschätzt.

Frage:

wird nur der Traktions- oder der gesamte Energieverbrauch inkl. Nebenverbraucher abgenommen. Die Vergleichszahlen in dieser Studie (Abbildung 68) sind ohne explizite Nebenverbraucher. Diese fließen hier auch nicht über die Wirkungsgrade wie in Abbildung 74 ein.

## Wirkungsgrade, p14

Tabelle 2: Wirkungsgrade der Fahrzeuge und Infrastrukturen

| DMU                             | EMU                           | BEMU                                | HEMU                            |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| <u>Fahrzeug</u><br>30-40 %      | <u>Fahrzeug</u><br>80-90 %    | <u>Fahrzeug</u><br>72-81 %          | <u>Fahrzeug</u><br>40-50 %      |
| <u>Infrastruktur</u><br>85-90 % | <u>Infrastruktur</u><br>100 % | <u>Infrastruktur</u><br>87,5-92,5 % | <u>Infrastruktur</u><br>72-81 % |

Nach [14] liegt der Wirkungsgrad für H2-Elektrolyse bei ~40%, der Summenwirkungsgrad von Brennstoffzelle bis zum Rad bei 35%, multipliziert 0,14%.

| Wirkungsgrade ab Primärenergie | $\eta_{DMU}$<br>Sz0 | $\eta_{EMU}$<br>Sz1 | $\eta_{HEMU}$<br>Sz2 | $\eta_{BEMU}$<br>Sz3 | $\eta_{BEMUhyb}$<br>Sz4 | $\eta_{BEMUhybopt}$<br>Sz5 |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|
| TU-Wien (alt)                  | 0,45                | 0,95                | 0,27                 | 0,89                 | 0,91                    | 0,93                       |
| HyCentA [13]                   | 0,306               | 0,85                | 0,34                 | 0,68                 | 0,74                    | 0,80                       |
| ÖBB PV, [15]                   |                     |                     | 0,26                 |                      |                         |                            |
| nach [14]                      | k.A.                | 0,90                | 0,14                 | 0,84                 | 0,86                    | 0,88                       |
| TU-Wien (neu)                  | Diesel, 0,306       | 0,85                | 0,26                 | 0,68                 | 0,74                    | 0,80                       |

In den Berechnungen hier werden die konservativen Werte von HyCenta und für das Wasserstofffahrzeug der praktische Erfahrungswert der ÖBB von den Betriebsversuchen 2020 zugrunde gelegt. Dieser konservative Ansatz mag zukünftige Preissteigerungen der Primärstromkosten gegenüber 2020 kompensieren.

Vergleich:

mit diesen sehr konservativen Wirkungsgradansätzen steigt rechnerisch der Primärenergiebedarf an. Die abgeschätzten differentiellen Gesamtkosten liegen tendenziell geringfügig über den in [13] p6.

Frage:

sind die angegebenen Werte nur für den Traktionsstrang oder inkl. Nebenverbraucher für den Traktionsstrang oder inkl. aller Nebenverbraucher?

## Fahrleitung-Lebensdauer

Die Annahme einer Fahrleitungslebensdauer von 20 Jahren für den Fahrdrabt und 50 Jahre für Masten und Ausleger entspricht nicht der gängigen Einschätzung von mind. 30 bzw. 60Jahre. Die Fahrleitung muss dazu instandgehalten werden, die Kosten sind in den jährlichen Wartungsannahmen enthalten.

Siehe ausführliche Bemerkungen dazu in Kap. 3.3.

### 3.6 Studie Prose: Bericht Restnutzungsdauer ZVB (27.01.2022) [16]

#### Management-Summary, p4

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass sich die Fahrzeuge aktuell in einem gut erhaltenen Betriebszustand befinden. Allerdings ergeben sich kurz zusammengefasst zwei grundlegende Erkenntnisse für die nächsten Jahre:

- Die Instandhaltungsaufwände steigen kontinuierlich an. Obsoleszenz-Themen werden immer dringender und erfordern massive zusätzliche Investitionen.
- In spätestens 5 Jahren ist das Risiko so hoch, dass von einem Weiterbetrieb dringend abzuraten ist und die investierten Gelder dann verloren wären. Ein Weiterbetrieb wäre demzufolge nicht nachhaltig.

Im Sinne einer nachhaltigen Vorgangsweise empfiehlt es sich daher, den Weiterbetrieb der bestehenden Flotte nur noch für einen begrenzten Zeitraum von ca. 3 – 5 Jahren einzuplanen und bis zum Einsatzbeginn neuer Fahrzeuge den Instandhaltungsaufwand möglichst effizient und damit gering zu halten.

Kommentar:

Diesen Aussagen ist voll und ganz beizupflichten.

Die Beschaffung einer neuen Flotte ist zeitkritisch. Eine durchgehende Oberleitung ist in 4 bis 5 Jahren nicht zu errichten, die Zeitschätzung von 7 bis 9,5 Jahren nach [11] ist aufgrund der lokalen Gegebenheiten plausibel.

Eine Oberleitung auf Inselabschnitten, speziell in den Doppelspurabschnitten kann – unter Auslassung heikler Abschnitte wie Querung tiefhängender Hochspannungsleitungen – deutlich schneller errichtet werden. Eine straßenbahnähnliche Oberleitung auf Mittelmasten mit 1,5kV und Gleichrichterunterwerken ist einfacher zu errichten als eine 25kV 50Hz Oberleitung (nach [11]), die größere Isolationsabstände (bei überquerenden Brücken) und ein strikteres Erdungsmanagement benötigt.

Eine Akku-Hybrid-Lösung (mit den vorgesehenen üppig dimensionierten Akkus) kann flexibler auf Unwägbarkeiten reagieren als jede andere Lösung, die eine fertiggestellte Infrastruktur benötigt, unabhängig ob durchgehende Oberleitung oder vollständige Wasserstoffversorgung (Elektrolyse bis Betankung).

Frage:

Wie kann kurzfristig eine Neubewertung dieser Oberleitunginseln einer Teilelektrifizierung erzielt werden?

#### Fahrzeug-Instandhaltungskosten, p16

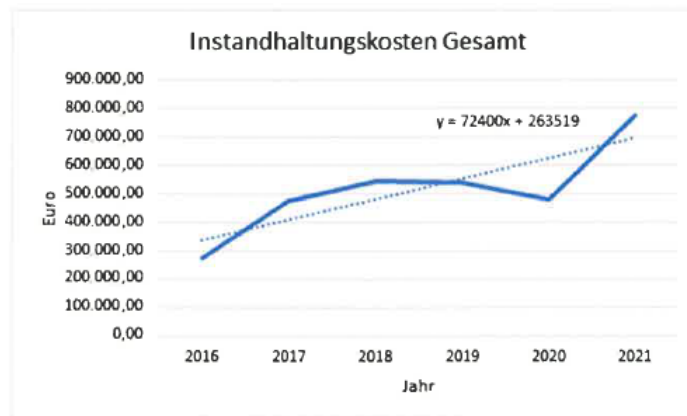


Abbildung 11: Instandhaltungskosten der gesamten Fahrzeugflotte

Diese Instandhaltungskosten umfassen „nur“ Material und zugekaufte Leistungen. Personalkosten steigen in ähnlichem Ausmaß.

Nach [14] können folgende Erfahrungswerte zur Anwendung gelangen:

- Oberleitung 15kV 0,80 €/km
- Unterwerk 15kV 400k/8a Hauptuntersuchung
- Oberleitung DC keine Angabe, vorerst wie 15kV konservativ abgeschätzt
- El. Standardfahrzeug 1,185 €/km ( $Bo' + Bo' + 2 + Bo'$ )
  - pro TDG 15 – 16 ct/km
  - pro LDG ~10 ct/km (~2/3 von TDG)

- Wagenkasten  $\Rightarrow 0,605/3 = 0,202 \text{ €/km/WK}$
- 3-tlg 750V/15kVDC  $2 \text{ €/km}$  ( $4 \times 0,16 + 2 \times 0,10$ ) bei Sonderfahrzeug, 5 Fzg/Flotte, lang (sonst  $1,445 \text{ €/km}$ )  
 $\Rightarrow 0,386 \text{ €/km/WK}$  für kleine Flotte  
 $\Rightarrow 0,586 \text{ €/km}$  für Verstärkerwagen ( $2 \times 0,10 + 0,386$ )  
 $\Rightarrow 0,586 \text{ €/km}$  für 4-Wagenzug mit 2 Triebköpfen ( $4 \times 0,16 + 4 \times 0,10 + 4 \times 0,386$ )
- Hybrid-Fzg konservativ  $2,5 - 3 \text{ €/km}$  inkl. Batterietausch (ca  $0,5 \text{ €/km}$ ),  
 Zusatzkomponenten (Chiller, Steuerungen)

| Instandhaltungs-<br>vollkosten [€/km] | WadMU<br>Sz0 | WaEMU<br>Sz1 | WaHEMU<br>Sz2 | WaBEMU<br>Sz3 | WaBEMUhyb<br>Sz4 | WaBEMUhybopt<br>Sz5 |
|---------------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|
| nach [16]                             | 1,12x3 ??    |              |               |               |                  |                     |
| Nach Angebot<br>Stadler               |              |              | 5,00          |               |                  |                     |
| nach [14]                             | 3,66+Motor   | 2,00         |               | 2,50+0,5      | 2,50+0,5         | 2,50+0,5            |
| TU-Wien                               | 3,66+Motor   | 2,00         | 5,00          | 2,5+Akku      | 2,5+Akku         | 2,5+Akku            |

Vergleich:

Zillertalbahnhof-Zug nach [14]: 4 TDG, 6 LTG, 4 WK:  $\Rightarrow 4 \times 0,16 + 6 \times 0,1 + 4 \times 0,605 = 3,66 \text{ €/km}$

Zillertalbahnhof-Flotte nach [16]: Jahresleistung 625.000, Jahresinstandsetzung-Materialkosten Flotte:  $\sim 700.000 \text{ €}$

$\Rightarrow 700.000 / 625.000 = 1,12 \text{ €/km}$  Materialkosten (exkl. Leih-Lok 23 für GV)

Nachfragen:

Personalkosten der Werkstatt. Annahme: doppelt so hoch wie Materialkosten  $1,12 \times 3$ .

Fazit:

Die Instandhaltung der (alten) Dieselflotte ist rund doppelt so teuer als die einer durchschnittlichen E-Flotte

$\Rightarrow$  die Parameter könnten plausibel sein.

## Obsoleszenz, p19

Damit ergeben sich zwei grundlegende Erkenntnisse:

- Die Instandhaltungs-Aufwände steigen massiv an. Obsoleszenz-Themen werden immer dringender und erfordern massive, zusätzlich Investitionen.
- In spätestens 5 Jahren ist das Risiko so hoch, dass von einem Weiterbetrieb der jetzigen Flotte dringend abzuraten ist und die investierten Gelder dann verloren wären (nicht nachhaltig).

PROSE empfiehlt vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Erkenntnisse aus der gegenständlichen Untersuchung, die Bestandsflotte nur noch ca. 3 bis max. 5 Jahre im regulären Personenverkehr einzusetzen.

Kommentar:

diesen Bedenken und daraus folgenden Einschätzungen wird zugestimmt und in unseren Empfehlungen explizit berücksichtigt.

## 3.7 Studie Molinari: Mobilität der Zukunft – Antriebssysteme ZVB (13.01.2017) [9]

Diese umfassende und grundsätzliche Studie wird an zahlreichen Stellen dieser Studie zitiert, weshalb hier nur auf die zentrale Zusammenfassung eingegangen wird.

## Zusammenfassung Antriebskonzepte, p193

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Ergebnis: | Hinweise:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Kosten<br>(Grundstücks- und Finanzierungskosten<br>nicht inbegriffen)                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Oberleitung DC 1500V</b><br>DC 1,5kV ab Landesnetz-Mittelspannung mit symmetrisch belastenden Gleichrichter-Unterwerken schneidet als beste*) der fünf betrachteten EN50163-Spannungen in punkto Unterwerksanzahl, Spannungsabfällen in Relation zu Spannung und Stromart, Kosten, Betriebssicherheit, Luftstrecken, 760mm-Fahrzeugbau („kein Trafo“) und „Energieautonomie 2050 mit Landesnetz“ ab.<br><br><small>*)Einsphasige 50Hz-Fahrdrahtspannungen ab Landesnetz haben eine in den meisten Aspekten eine schlechtere Bewertung erhalten. Aufgrund höherer induktiver Spannungsabfälle ist 50Hz erst ab rd. 6kV oder höher sinnvoll.</small> | 84 %      | Erprobt, Fzg. am Markt (Beispiel Stadler/Mzb, Spannung änderbar)<br><br>Alternative ÖBB 15kV 16,7Hz ab Inntal: Keine Redundanz bei Oberleitungs-Kurzschluss bzw. zusätzliche 16,7Hz Umrichter zur Eigen-erzeugung aus Landesnetz sehr kostenintensiv<br>Energieautonomie Tirol mit ÖBB-Strom „offen“.                                                           | <b>DC 1,5kV:</b><br>Errichtung 19Mio€,<br>Gesamt 30Jahre 79Mio€<br><br><b>ÖBB AC 15kV/16,7Hz<br/>(Ohne Redundanz)</b><br>Errichtung 14Mio€,<br>Gesamt 30Jahre 77Mio€                                                     |
| <b>Akku-Schnellladung (in ausgewählten Stationen)</b><br>Mit DC 1,5kV oder DC 3kV Oberleitung via Landesnetz, ggf. mit >AC 6kV 50Hz ab Landesnetz 1phasig (Nachteil: unsymmetrische Landesnetzlast und „Trafo“ am Fahrzeug notwendig)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 70 %      | Beschleunigung/Fahrt über Fahrdraht möglich (Akkuschonung / 100%-Oberleitungsfahrzeug)<br>„Kurze Wende“ bei reiner Stationsladung nicht ausreichend -> „lange Wende“-> zusätzliche Fahrzeuge ! Akkutausch ~ 6 Jahre                                                                                                                                             | Gesamt 30 Jahre 97Mio€,<br>Konzept ist ggfs. besser zu bewerten, wenn Fördermittel für die innovative Technologie generiert werden können !                                                                              |
| <b>Akku-Endbahnhofladung</b><br>Mit DC 1,5kV oder DC 3kV Oberleitung via Landesnetz, alternativ mit >AC 6kV 50Hz ab Landesnetz 1phasig (Nachteil: unsymmetrische Landesnetzlast und „Trafo“ am Fahrzeug notwendig), alternativ mit Hochstrom-Ladestecker                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 55 %      | „Kurze Wende“ zur Wiederaufladung nicht ausreichend, „lange Wende“ im Endbahnhof -> zusätzliche Fahrzeuge notwendig !<br>Für Akkutausch bis zu ~ 6 Jahre: zusätzlicher Akkuträiler oder ggf. nur als Hochflurfahrzeuge!                                                                                                                                         | Gesamtkosten 30 Jahre 126Mio€ (teures Akkusystem nach ~6 Jahren je Fzg. zu tauschen)                                                                                                                                     |
| <b>Brennstoffzelle (Wasserstoff)</b><br>Mit Onboard-Akku                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 55 %      | Fehlende Normenlage, Neuland. Alstom „iLint“ Prototyp (Vollbahnförderprojekt) geht Ende 2017 in Zulassung. Erfahrung mit 2 Prototypen im Fahrgastbetrieb 2018-2019 zu erwarten !<br>Wasserstoffdistribution oder ggf. Elektrolysewerk vor Ort bei ZVB zu klären.<br>Antriebsleistung mit Spitzenleistung aus Akku orientiert sich beim iLint an Diesel-Version. | Gesamtkosten 30 Jahre 88Mio€. (Wasserstoff-Schienenfahrzeuge werden dzt. um ca. 1 Mio€ teurer als E-Fahrzeuge in der Anschaffung geschätzt)<br>Zusätzliche 12 Monate für Prototypentwicklung im Liefertermin einzuplanen |

Abbildung 195: Zusammenfassung Antriebs-Konzepte

## Kommentar:

Die Berücksichtigung von Innovationen kann bei dominanter Gewichtung zu einer anderen Reihung als bei dominanter Gewichtung betriebswirtschaftlicher Kennzahlen führen. Diese Innovationen sind gesondert auszuweisen, wenn sie über den Konzeptvergleich hinausgehende Vorteile anderer Art darstellen und deshalb forciert werden sollen. Sonderkonditionen für die Bereitstellung von Wasserstoff sind hier nicht berücksichtigt.

Zustimmung, dass elektrischer Oberleitungsbetrieb (EMU, Sz1) die vorteilhafteste Antriebstechnik darstellt.

Zustimmung, dass nur die Spannungsversorgungen mit 1,5 kV DC und 15 kV 16,7Hz näher als potentiell beste Lösungen im Umfeld der Zillertalbahn betrachtet werden.

Zustimmung zur Aussage „DC 1,5 kV ab Landesnetz-Mittelspannung mit symmetrisch belastenden Gleichrichter-Unterwerken schneidet als beste der fünf nach EN50163-Spannungen ... und Energieautonomie ... ab“.

In dieser Studie wird kein Vergleich unterschiedlicher Stromsysteme vorgenommen, jedoch werden nachhaltige Vorschläge zu den spezifischen Gegebenheiten im Zillertal unterbreitet:

- Ergänzung der Unterwerke mit einem stationären Energiespeicher
  - zur Nutzung günstiger Überschussenergie in Nachtstunden
  - zur Nutzung des Landesnetzes (Ortsnetzes) zu Schwachlastzeiten
  - zur Vermeidung von Rückkopplungen von Spitzenlasten (Anfahren zweier Züge zeitgleich)
- Verbindung der Unterwerke mit einem zur Bahntrasse parallelen Erdkabel im Kabeltrog
- Schnittstellen
  - Einspeisung vom Ortsnetz
  - Einspeisung Bahnstrom
  - Einspeisung lokale Stromerzeugung (Photovoltaik, Windkraft, Biomasse, etc.)
  - Abgabe Ladestrom für lokalen Busbetrieb

Zustimmung, dass „Akku-Schnellladung“ über die Fahrleitung, also Akku-hybrid-Antrieb (BEMU-hy SZ4 und BEMU-hy-opt Sz5), machbar und die zweitbeste Lösung ist, die ohne zusätzliche Fahrzeuge umsetzbar ist.

Die einfachere infrastrukturseitige Umsetzung als eine durchgehende Oberleitung wird hier nicht in der Zusammenfassung angeführt, ist aber offensichtlich. Eine Berücksichtigung bei gleichzeitiger Vermeidung von Zwischenlösungen an den Bestandsfahrzeugen würde diese zweitbeste Lösung näher an die beste heranführen.

Zustimmung, dass reiner Akku-Betrieb (BEMU, Sz3) nur an dritter Stelle steht.

Vorsicht ist aus heutiger Sicht bei der Lösung mit Hochstrom-Ladestecker geboten (ÖBB lehnen diesen für planmäßiges Nachladen ab, sehen aber einen Ladestecker für Ladungserhaltung (stand-by) als praktikabel an [10].

Bedenken bezüglich des gleichwertigen Ergebnisses von Akkuzug (Sz3) und Brennstoffzelle (Wasserstoff) (HEMU, Sz2). Die zu recht angeführten Bedenken sind stimmig, jedoch erscheinen die Gesamtkosten von 88 mio€ über 30 Jahre als deutlich zu niedrig angesetzt an. Nach [7] übersteigen bereits die Anschaffungskosten der fünf Züge (Preisbasis 2023) diesen Betrag deutlich, die Kosten für 30 Jahre Betriebskosten (Instandhaltung und Primärenergie) können somit nicht abgebildet werden. Zusätzlich dürfte ein Sondervertrag mit einem Wasserstofflieferant angenommen sein, der nicht den gesamten Betrachtungszeitraum abdeckt. Der Abstand zwischen „Akku-Endbahnhofsladung“ und „Brennstoffzelle (Wasserstoff)“ müsste nach heutigem Wissensstand deutlich größer sein.

## Energiekosten, p188

Die Energiekosten von 0,15 €/kWh (TIWAG) (resp. 0,12 €/kWh (ÖBB)) werden in dieser TUW-Studie übernommen und auf Sensitivität geprüft. Zutritts- resp. einmalige Bereitstellungspreise sind in den Kosten pro Unterwerk integriert.

## 3.8 Vergaberechtliche Gegenüberstellung (11.07.2023) [17]

### Innerer Antrieb, p1

**NACHHALTIGE MOBILITÄT  
IST EINE FRAGE DES ANTRIEBS.  
VOR ALLEM DES INNEREN.**

Kommentar:

Dieser „humoristisch“ gemeinten Bemerkung ist zuzustimmen und zu bemerken, dass auch die technische Komponente dieser Aussage wesentlich ist. Die aktuell nachhaltigste Lösung in der Antriebstechnik ist der elektromotorische Antrieb, der beim Wasserstoffzug und bei allen untersuchten Vergleichskonzepten gleich und als frequenzgesteuerter Einzelachsantrieb zur Ausführung angenommen wird.

Die konzeptionellen Unterschiede bestehen in der Bereitstellung Energie im Fahrzeug und dem Gesamtwirkungsgrad von der Primärenergie bis zur erforderlichen aufzubringenden Traktionskraft auf der Schiene.

Nachhaltig ist

- der größte Wirkungsgrad der Traktionsausrüstung (u.a. Traktions-Stromrichter, Fahrmotor, Getriebe)
- die kleinsten für die Traktion erforderlichen Nebenverbraucher (z.B. Druckgasanlage, Brennstoffzellen, Traktionsbatterien, Traktionsbatterieladeeinrichtung, Heiz- und Kühlanlagen für Brennstoffzelle und Traktionsbatterien („Chiller“), Energiemanagement-Steuerungsrechner)
- den kleinstmöglichen Teil vom „Kraftwerk“ im Fahrzeug permanent mitzuführen (z.B. Energievorräte, Transformatoren), unter Abzug von Leitungsverlusten bei permanenter Energiezufuhr und Energieverbrauch bei der Herstellung von Verschleißkomponenten der Energieabnahme (z.B. Stromabnehmerschleifleisten)
- der beste Wirkungsgrad bis zur realen Nutzung von rekuperierter Bremsenergie.

## Technologie-Entscheidung, p16

Dass sich die Auftraggeberin für die H2-Technologie entschieden hat (und nicht technikoffen zB auch Batterietechnik zulässt) ist vergaberechtlich so gut wie unangreifbar (sachliche Rechtfertigung durch „Modellregion Wasserstoff“).

Kommentar:

Die TUW-Studie hat im Sinne des Studien- und Konzeptvergleichs die technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekte im (vergabe-) rechtlichen Rahmen zu bewerten. Der sorgsame Umgang mit Mitteln der öffentlichen Hand lässt auch volkswirtschaftliche Begründungen zu.

In der sachlichen Rechtfertigung, innovative Technologien erstmals einzusetzen, ist in dem extrem preissensiblen Sektor der Mobilität und speziell in dem noch sensibleren Sektor der öffentlichen Mobilität, der ohne Beauftragung und teilwei-

ser Abgeltung durch die öffentliche Hand nicht kostendeckend darstellbar ist (das gesellschaftspolitische Warum wird hier ausgeklammert), zwingend eine klare, öffentlich nachvollziehbare Abgrenzung herbeizuführen, welche Kostenanteile

- dem Angebot an öffentlicher Mobilität
- der Innovationsförderung und Modellregion-Entwicklung
- Synergien mit Dritten

zuzuschlagen sind. Diese Vorgangsweise wird auch für die hier ermittelten Vergleiche der Antriebskonzepte angeraten.

## Neuausschreibung, p16

**Wir empfehlen daher in einer Gesamtsicht die Durchführung einer gebündelten H2-Neuausschreibung von Lieferung und Instandhaltung im Rahmen eines Vergabeverfahrens** (Lösung wie in Teil 2.1 beschrieben).

Weiters empfehlen wir für den Teil 2.1, die Instandhaltungsleistungen als **optionale Leistungen** im Vertrag vorzusehen.

Kommentar:

Auch aus technischer Sicht ist eine Neuausschreibung aus drei Gründen anzuraten:

1. Änderungen in der Normenlage, also des Standes der Technik, und damit zulassungsrelevant, z.B.
  - EN16584, EN16585, EN16586 (PRM-Anforderungen)
  - EN16186-4 (Sichtanforderungen aus Führerstand)
  - EN16186-5 (wenn Ortsdurchfahrt Zell am Ziller nach StrabVO) betrieben werden soll
  - EN15227 (Kollisionssicherheit, welche Einstufung ist gefordert: Klasse I oder III; Abbildung 17)
  - EN15663 (Fahrzeugreferenzmassen)
2. Drohende Klagen bei Auftragsverteilung durch Dritte
  - Nachträgliche Änderungen in der Fahrzeugspezifikation, die auf das Wasserstofffahrzeug von Stadler „maßgeschneidert“ wahrgenommen werden könnten (z.B. Fahrzeuglänge auf 77m, nach eine Detailuntersuchung eine Länge von 76,4m ergeben hat)
  - Bisher nicht erfolgte Ausschreibung des Instandhaltungsvertrags
  - Vertrauliche Informationen, die im Rahmen dieser Untersuchung pro-aktiv lanciert worden sind
3. Preisvorteil nur bei Verständigung auf eine – zumindest optionale – gemeinsame Ausschreibung mit
  - Zillertal-Optionen (4 Züge, 5 Steuer- oder bis zu 9 Mittelwagen)
  - Pinzgaubahn
  - Murtalbahn
  - Ergänzung Mariazellerbahn (bei Stadler: viele Gleichteile, z.B. Drehgestelle zu erwarten)
  - Interessenssuche bei Schmalspurbahnbetreibern mit 750mm Spurweite und Planverkehr z.B. in Deutschland, Tschechien, Bulgarien), die bisher kein Interesse an einem Wasserstoffzug, jedoch Interesse an einem anderen Antriebskonzept offenbaren:
    - Rügenschke Bäderbahn
    - Fichtelbergbahn
    - Preßnitztalbahn (aktuell kein Planverkehr)
    - Lößnitzgrundbahn
    - Döllnitzbahn
    - Weißeritztalbahn
    - Zittauer Schmalspurbahn
    - Öchsle-Museumsschmalspurbahn (derzeit kein Planverkehr)
    - JHMD Jindřichův Hradec–Nová Bystřice, Jindřichův Hradec–Obrataň
    - CD Třemešná ve Slezsku–Osoblaha (neuer Betreiber ab Mitte 2024)
    - Rhodopenbahn (Bulgarien, 125km)

Hinweis:

Abweichungen der Pinzgaubahn im gleisnahen Lichtraumprofil sowie im Dachkantenbereich der Murtalbahn (300 mm) sind punktuell infrastrukturseitig anzugleichen, um nur die Entwicklung für eine Fahrzeugtype finanzieren zu müssen.

Hinweis:

Gelingt es, zumindest mit Pinzgau- und Murtalbahn eine gemeinsame Fahrzeugfamilie zu spezifizieren, die antriebskon-

zept-offen sein kann, jedoch mit zusätzlichem Vorteil sich auf eine gemeinsame Fahrzeugtype entsprechend dieser Vergleichsstudie festlegt, dann stehen mit den möglicherweise sehr bauähnlichen Mariazellerbahn-Fahrzeuge „Himmeltreppe“ in Österreich **rund 29 Züge zur Disposition** und ggf. Verstärkungswagen in den nächsten 10 Jahren (5+4 ZVB, 11 PzB, 6 StB, 3 MzB). Wird der schon lange hinter vorgehaltener Hand als sinnvoll eingestufte Regionalverkehr zwischen Gmünd und Weitra auf der Waldviertelbahn mit einem baugleichen modernen Akku-Hybrid-Fahrzeug angedacht (ob dazu Fahrleitung nur an den Endbahnhöfen ausreicht, ist zu klären), könnten die laufenden Betriebskosten verringert werden. Ähnliches gilt für die Waidhofner Citybahn in Waidhofen an der Ybbs, wenn diese dekarbonisiert werden soll. Dann kämen sogar 30 oder **31 Züge in Österreich** zusammen.

In dem jüngsten vorliegenden Richtpreisangebot von Stadler [7] ist das nicht berücksichtigt. Die **hohen anteiligen Entwicklungskosten** und das gesamte technische Wasserstoff-Technologierisiko sind auf nur 5 Züge verteilt.

Bei einer derartigen Stückzahl von potenziell knapp 100 Wagenkästen (zumindest dreiteilige Züge zugrunde gelegt plus Verstärkerwagen) sind zweifelsohne weitere Fahrzeughersteller an einer Ausschreibung interessiert. Stadler Bussnang hätte weiterhin die besten Startbedingungen, sind andere Antriebskonzepte von dem bisher angebotenen Wasserstoffzug mit überschaubarem Konzeptionsaufwand ableitbar und die bisherigen Angebotsvorleistungen nicht verloren:

- in früheren Angeboten vor [7] wird der nachträgliche Umbau von einem Wasserstoffzug zu einem rein elektrischen Zug für Oberleitungsbetrieb in Erwägung gezogen
- ein Akku-Hybrid-Zug auf die gleiche Traktionsbatterieausrüstung des Wasserstoffzuges zugreifen könnte
- die Trieb- und Laufdrehgestelle von der Mariazellerbahn konstruktiv vorhanden sind

Andere Anbieter, die mit Konzeption, Konstruktion und Fertigung von Schmalspurfahrzeugen für den Regionalverkehr, wenn auch nicht 760mm Spurweite, Erfahrung haben, sind (unvollständige Auflistung) z.B.:

- CAF (Beasain, Spanien)
- Heiterblick (Leipzig) + Kiepe Elektrik (Düsseldorf)
- Skoda (Pilsen, Tschechien)
- NEWAG (Nowy Sącz, Polen)
- PESA (Bydgoszcz, Polen)
- Koncar (Zagreb, Slowenien)
- CRRC (Tangshan, China)



Abbildung 16: Akku-solar-Fahrzeug der CRRC auf der vorerst 20km langen Strecke durch die Quebrada de Humahuaca in der Provinz Jujuy, Argentinien, von Volcán nach Purmamarca planmäßig seit 11.01.2024 [18]

Tabelle 1 — Kollisionssicherheits-Auslegungskategorien von Schienenfahrzeugen

| Kategorie | Definition                                                                                                                                                           | Beispiele der Fahrzeugtypen         |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| C-I       | Fahrzeuge, mit Ausnahme von städtischen Fahrzeugen und Straßenbahnen, die für den Betrieb auf internationalen, nationalen und regionalen Strecken ausgelegt sind     | Lokomotiven, Reisezugwagen und Züge |
| C-II      | Städtische Fahrzeuge, die ausschließlich für ein geschlossenes Netz ohne Bahnübergänge und ohne Schnittstellen mit dem Straßenverkehr ausgelegt sind                 | U-Bahn-Fahrzeuge                    |
| C-III     | Fahrzeuge, die für städtische und/oder regionale Netze ausgelegt sind, mit gemeinsamer Gleisbenutzung von Vollbahnstrecken und mit Schnittstellen zum Straßenverkehr | Leichttriebwagen, Regio-Stadtbahnen |
| C-IV      | Straßenbahnen                                                                                                                                                        |                                     |

Tabelle 3 — Auslegungs-Kollisionsszenarien und Kollisionshindernisse

| Kollisionssicherheits-Auslegungskategorien (siehe 5.1)                                                                                             |                            | Auslegungs-Kollisionsszenario (siehe 5.3) und Kollisionsgeschwindigkeiten $v_c$ |                                                                 |                               |                                                      |                             |                                   |                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                    |                            | 1                                                                               | 2                                                               |                               | 3                                                    |                             |                                   | 4                                                 |
|                                                                                                                                                    |                            | Frontalzusammenstoß von zwei identischen Zügeinheiten                           | Frontalzusammenstoß mit einem andersartigen Schienenfahrzeugtyp |                               | Frontalzusammenstoß mit einem großen Straßenfahrzeug |                             |                                   | Frontalzusammenstoß mit einem niedrigen Hindernis |
| Kollisionssicherheits-Auslegungskategorie (siehe Tabelle 1)                                                                                        | Detaillierte Anforderungen | Identischer Zug                                                                 | 80 t-Güterwagen (siehe C.1 und C.2)                             | 129 t-Regionalzug (siehe C.3) | 15 t deformierbares Hindernis (siehe C.4)            | 7,5 t Hindernis (siehe C.6) | 3 t starres Hindernis (siehe C.5) | Bahnräumer und Schienenräumer                     |
| C-I                                                                                                                                                | 5.4.2                      | 36 km/h <sup>a</sup>                                                            | 36 km/h <sup>a</sup>                                            | n. z.                         | $= (v_{LC} - 50 \text{ km/h}) \leq 110 \text{ km/h}$ | n. z.                       | n. z.                             | Siehe 6.5 und 6.6 für Anforderungen               |
| C-II                                                                                                                                               | 5.4.3                      | 25 km/h                                                                         | n. z.                                                           | n. z.                         | n. z.                                                | n. z.                       | n. z.                             | n. z.                                             |
| C-III                                                                                                                                              | 5.4.4                      | 25 km/h                                                                         | 25 km/h                                                         | 10 km/h                       | 25 km/h                                              | n. z.                       | n. z.                             | Siehe 6.5 und 6.6 für Anforderungen               |
| C-IV                                                                                                                                               | 5.4.5                      | 15 km/h                                                                         | n. z.                                                           | n. z.                         | n. z.                                                | 15 km/h                     | 25 km/h                           | n. z.                                             |
| ANMERKUNG n. z. = nicht zutreffend                                                                                                                 |                            |                                                                                 |                                                                 |                               |                                                      |                             |                                   |                                                   |
| <sup>a</sup> für C-I-Lokomotiven mit Schwerlastkupplung liegt die Kollisionsgeschwindigkeit der Auslegungs-Kollisionsszenarien 1 und 2 bei 20 km/h |                            |                                                                                 |                                                                 |                               |                                                      |                             |                                   |                                                   |

Abbildung 17: Auszüge aus der EN15227, Kollisionssicherheit

## 4 Weiterentwicklungen alternativer Antriebstechnik

Seit der Erstellung der meisten vorliegenden Studien zur Zillertalbahn und der Entscheidung für einen Wasserstoffzug im Zillertal im Jahr 2018 hat eine umfassende Weiterentwicklung sowohl der Brennstoffzellen-Technologie als auch der Akkumulatoren-Technologie stattgefunden.

Waren 2016 und 2018 auf der branchenführenden Fachmesse „Innotrans“ in Berlin erste alternativangetriebene Fahrzeuge ausgestellt, so fanden die betrieblichen Erprobungen und Weiterentwicklungen erst danach statt.

In Österreich konnte seither dank der betrieblichen Offenheit der ÖBB und entsprechenden Forschungsprogrammen umfassende Erfahrung unter betriebsnahen Randbedingungen gesammelt werden und damit eine führende Rolle eingenommen werden. Diese Erfahrung folgten 2018 an den Rangierlokomotiven 1063.038 (E-Hybrid mit Super Caps) und 1063.039 (E-Hybrid mit Brennstoffzelle), sowie 2020 an den Regionaltriebzügen 4746.049 („Desiro EcoJet“ E-Hybrid mit Akkumulatoren, drei-teilig) und iLint 654 101/601 (Brennstoffzellen –E-Antrieb, nicht hybrid, zwei-teilig).

|                                                              |          |  H2-Fahrzeug |  Akku-Fahrzeug |
|--------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vor- und Nachteile von Wasserstoff und Akku gegenüber Diesel | Vorteil  | CO <sub>2</sub> -Neutralität, abgasfrei, geringere Lärmemissionen                             |                                                                                                   |
|                                                              |          | keine Investitionen in Elektrifizierungsprojekte                                              |                                                                                                   |
|                                                              |          | große Reichweite (wie Dieselfahrzeuge)                                                        | Kompatibilität zum E-System                                                                       |
|                                                              |          | Einsatzkonzept wie bei Dieselmotoren                                                          | Hoher Wirkungsgrad und niedrige Betriebskosten                                                    |
|                                                              | Nachteil | hohe Fzg.-Anschaffungskosten                                                                  |                                                                                                   |
|                                                              |          | geringer energetischer Gesamtwirkungsgrad                                                     | Ladestationen an den Endpunkten                                                                   |
|                                                              |          | Systemumstellung (Gesamtsystem Wasserstoff ist zu implementieren)                             | Ladezeiten (höherer Fahrzeugbedarf)                                                               |
|                                                              |          | Hohe Betriebskosten<br>→ abhängig vom zukünftigen H <sub>2</sub> -Preis                       | betrieblich nutzbare Reichweite 30-60km<br>(je nach Topografie)                                   |

Abbildung 18: Vor- und Nachteile gängiger alternativer Antriebskonzepte nach [19] p47

Dieser Vergleich berücksichtigt reine Wasserstoff- und reine Akku-Fahrzeuge.

Die aufgelisteten Nachteile der reinen Akku-Züge lassen sich jedoch durch Akku-Hybrid-Züge ganz wesentlich entschärfen. Diese können nicht nur an Ladestationen im Stillstand am Streckenende Energie aufnehmen, sondern auf vergleichsweise kurzen Ladeinseln während des Fahrens. Diese Ladeabschnitte können bereits elektrifizierte Streckenabschnitte (im Falle des Kamptalbahnprojekts: St. Pölten – Herzogenburg und Krems – Hadersdorf am Kamp) sein, sondern auch kurze, gezielt ausgewählte nichtvernetzte Oberleitungsabschnitte, die lokal aus dem Ortsnetz gespeist werden. Idealerweise werden diese Abschnitte dort platziert, wo größter Energiebedarf besteht, der den Akku aussaugen würde, als z.B. bei kurzen steilen Rampen wie z.B. 4km am Grünbacher Sattel der Schneebergbahn.

Diese Erfahrungen führte schließlich seitens ÖBB zu einer Bestellung von bis zu 120 Akku-Hybrid-Zügen (erster Abruf 16 Fahrzeuge) für nichtelektrifizierte Regionalbahnen bei Stadler Bussnang AG mit Lieferung bis 2028 zum planmäßigen Einsatz auf nicht elektrifizierten Kamptalbahn und deren Durchbindung zur Landeshauptstadt St. Pölten.

Gleichzeitig mehren sich die Berichte, wo Bahnbetreiber ihre Wasserstoffzüge abstellen und wieder Dieselmotoren einsetzen, weil es die hohen Betriebskosten nicht anders zulassen [20] (ähnlich [21] [22]) oder Probleme den Regeleinsatz über längere Zeitabschnitte nicht zulassen [23] oder durch Akkumulatorenzüge ersetzt werden [24].

Alle renommierten europäischen Schienenfahrzeughersteller bieten mittlerweile normalspurige Akku-, Akku-Hybrid und Wasserstoff-Brennstoffzellenzüge, nicht jedoch Wasserstoff-Hybrid-Züge an.

Ein kurzer Rückblick in die Geschichte alternativer Antriebskonzepte zeigt, dass seit Anbeginn der Eisenbahn-Traktionsentwicklung verschiedenste abgasfreie Konzepte untersucht, erprobt und meist bis auf Nischenanwendungen wieder verworfen worden sind:

- |                              |                               |                                                           |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| • Bleiakkumulatoren          | chemische Energieerzeugung    | At3 (1909), DB BR 515 (1954), BR 517, DR: Rangierlok: E80 |
| • Schwungrad-Energiespeicher | kinetische Energiespeicherung | WL Wiener Linien Gyrobus (1955)                           |
| • Dampfspeicher              | thermischer Energiespeicher   | ÖMV Lok 1-5 (1973)                                        |
| • Elektrische Dampferzeugung | elektrische Kesselheizung     | SBB E3/3 8521, 8522 (1943)                                |
| • Druckluftspeicher          | elektr. od. chem. Abwärme     | Grubenbetrieb, Tunnelbau (ab 1839)                        |
| • Super Caps                 | elektr. Zwischenspeicherung   | ÖBB 1063.038 (2018)                                       |

Der vollelektrische Antrieb hat sich durchgesetzt. Dort wo die Investitionen in eine durchgängige Oberleitung nicht getätigt wurden, hat sich der Dieselantrieb (diesel-mechanisch, diesel-hydraulisch, diesel-elektrisch) durchgesetzt.

Alle Formen von Dieselantrieb leiden unter den überdurchschnittlich hohen Wartungskosten und stellen nur im Vergleich zu Dampflokomotiven eine Verbesserung dar, sind also eine rein betrieblich betrachtet teure Traktionsart für schwach ausgelastete Strecken, wo sich eine Elektrifizierung nicht lohnt oder für mittel- und stark ausgelastete Strecken, wo die Elektrifizierung – warum auch immer – nicht erfolgt.

Aus diesem Grund der hohen Wartungskosten wird der Wasserstoff-Verbrennungsmotor hier ebenso nicht betrachtet wie der umgerüstete Verbrennungsmotor für E-fuels (eco-fuels). Beide Technologien sind für bestimmte Anwendungen hilfreich und sinnvoll, nicht aber für einen planmäßigen, dichten Nahverkehr wie im Zillertal.

2019 werden die damals gängigen alternativen Antriebskonzepte zusammengestellt und beschrieben [25] und in [26] und [27] zitiert:

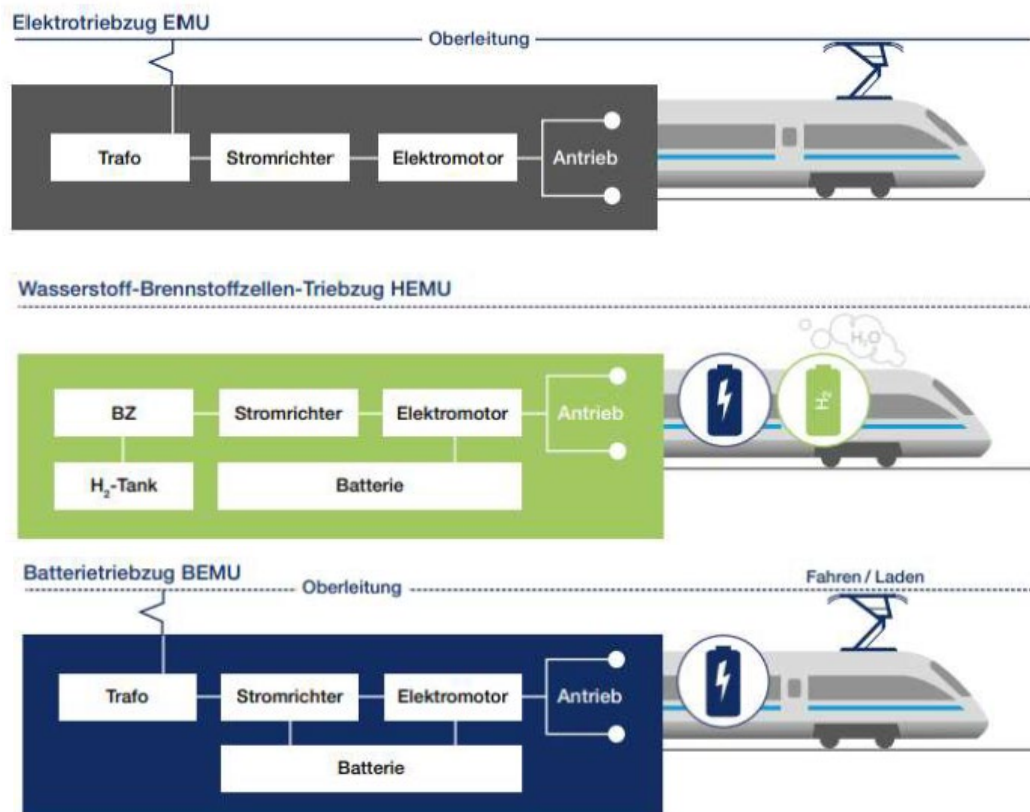


Abbildung 19: Schematischer Aufbau von EMU, FCMU/HEMU und BEMU nach [25], [26] und [27] p10

#### 4.1 Wasserstofftechnik und Brennstoffzellen

Unter Zugrundelegung elektrischer Traktionsmotoren ist die Frage nach alternativen Traktionsstromzuführung zu beantworten, wenn keine kontinuierliche Speisung durch eine Fahrleitung oder ähnliche Vorrichtungen gewährleistet werden kann. Zusätzlich zu dem Traktionsenergieverbrauch sind auch stets die Nebenverbraucher zu berücksichtigen, wobei eine ausgeklügelte Rückhalteschaltung den maximal erforderlichen Spitzenstrom während Beschleunigungsphasen oder kurzer Rampen großer Steigung zu minimieren helfen können.

Die Möglichkeit der Energiezuführung in Form von hochkomprimiertem Wasserstoff (350 bar oder 700bar) und dessen Wandlung in Brennstoffzellen (fuel cell, FC) zu elektrischem Strom ist jene Variante, die für die Zillertalbahn sehr intensiv untersucht worden ist. Zusätzlich sind eine Pufferbatterie (Traktionsbatterie), eine thermische Konditionierung und eine Ansteuerung erforderlich, um die Brennstoffzelle in ihrem idealen Arbeitspunkt kontinuierlich betreiben zu können. Die Dimensionierung der Pufferbatterie orientiert sich nicht nur an der erforderlichen Kapazität für den Energiebedarf eines maximalen Lastfalls (z.B. maximale Beschleunigung, größte Steigung mit festgelegter Beschleunigungsreserve, ...), sondern auch an dem momentan benötigten Spitzenstrom, ausgedrückt über die C-Rate, die der jeweiligen Akku-Zellenchemie zugewiesen wird. Ein Überschreiten der C-Rate führt zu überdurchschnittlicher Alterung und ist zu vermeiden.

Grundlegende Untersuchungen zum Einsatz von Brennstoffzellen in Traktionsanwendungen des Eisenbahnbetriebs finden sich in [28].

Anwendungsbeispiel von normalspurigen Wasserstoffzügen (z.B. des Siemens Mobility Mireo Plus H) können nachgelesen werden, z.B. in [29] oder betrieblich in [15].

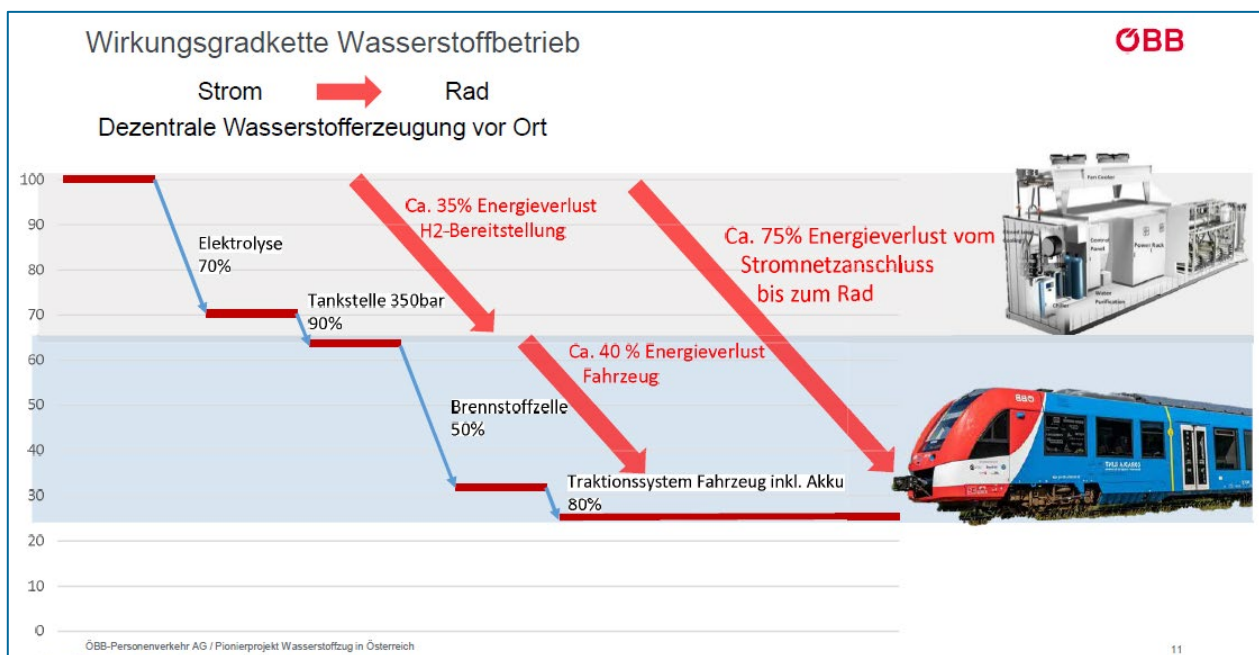


Abbildung 20: Wirkungsgradkette des Wasserstoffbetrieb nach [15] p11

Die geringe Ausbeute von rund 25% (Wirkungsgrad  $\eta_{H_2} = 25\%$ , Verlustenergie  $(1-\eta_{H_2}) = 75\%$ ) aus der Primärenergie stellt – leider – einen systemimmanenten Nachteil bei Verwendung von grünem Wasserstoff (durch Elektrolyse gewonnen) dar. Wasserstofffahrzeuge werden deshalb heute nur dann erfolgreich evaluiert, wenn

1. Wasserstoff sehr günstig zu Verfügung steht (Industrie-Abfallprodukt, Stromüberschuss-Zwischenspeicherung)
2. Mangelnde Infrastruktur zwingend große Reichweiten erfordert (z.B. ländliche Regionen der USA)

Im Zillertal und im Konzept Wasserstoffzug für das Zillertal ist zweifelsohne der erste dieser Punkte zugrunde gelegt.

Der Bezug des sehr günstigen Wasserstoffs muss dauerhaft gewährleistet sein. Branchenüblich geht man von mind. 30 Jahren Fahrzeugeinsatzdauer aus, weshalb auch die Wasserstoff-Lieferverträge zumindest auf diesen Zeithorizont zivil-

rechtlich einklagbar vereinbart sein müssen. Neben dem reinen Energiepreisunterschied müssen aber auch die Investitionen in die spezifische Fahrzeugflotte vertraglich abgesichert sein, d.h. der Restwert der Fahrzeuge und die Einnahmenverluste (Ersatzbetriebskosten) bis zur Bereitstellung von Fahrzeugen anderer Antriebskonzepte und deren Infrastruktur müssen ebenfalls vertraglich abgesichert sein. Zudem ist vertraglich sowohl mit dem Wasserstofflieferanten als auch mit dem Fahrzeuglieferanten der Wasserstofffahrzeuge vertraglich und ohne Nachteil für das Eisenbahnverkehrsunternehmen eine Regelung für die spätere Inbetriebsetzung ergänzender Züge vorzukehren, um die Kapazität des Bahnbetriebs ggf. steigender Nachfrage in den z.B. ersten 20 Betriebsjahren in gleicher Technologie zu gleichen Randbedingungen anheben zu können. D.h. werden später Wasserstoffzüge nachgebaut, dann müssen die 30 Jahre Wasserstoffliefervertrag zu diesen sehr günstigen Konditionen zumindest für die neuen Züge wieder bei null anfangen.

Diese günstigen Konditionen sind an den Industrie-Strompreis zu koppeln (also nicht eingefroren).

Ein späterer Mischbetrieb von Wasserstofffahrzeugen mit anderen emissionsfreien Fahrzeugen wird bisher nicht kostenseitig abgeschätzt, ist aber von den infrastruktureitigen Anforderungen sicher teurer als die dauerhafte Festlegung auf ein Traktionssystem (Energiesystem).

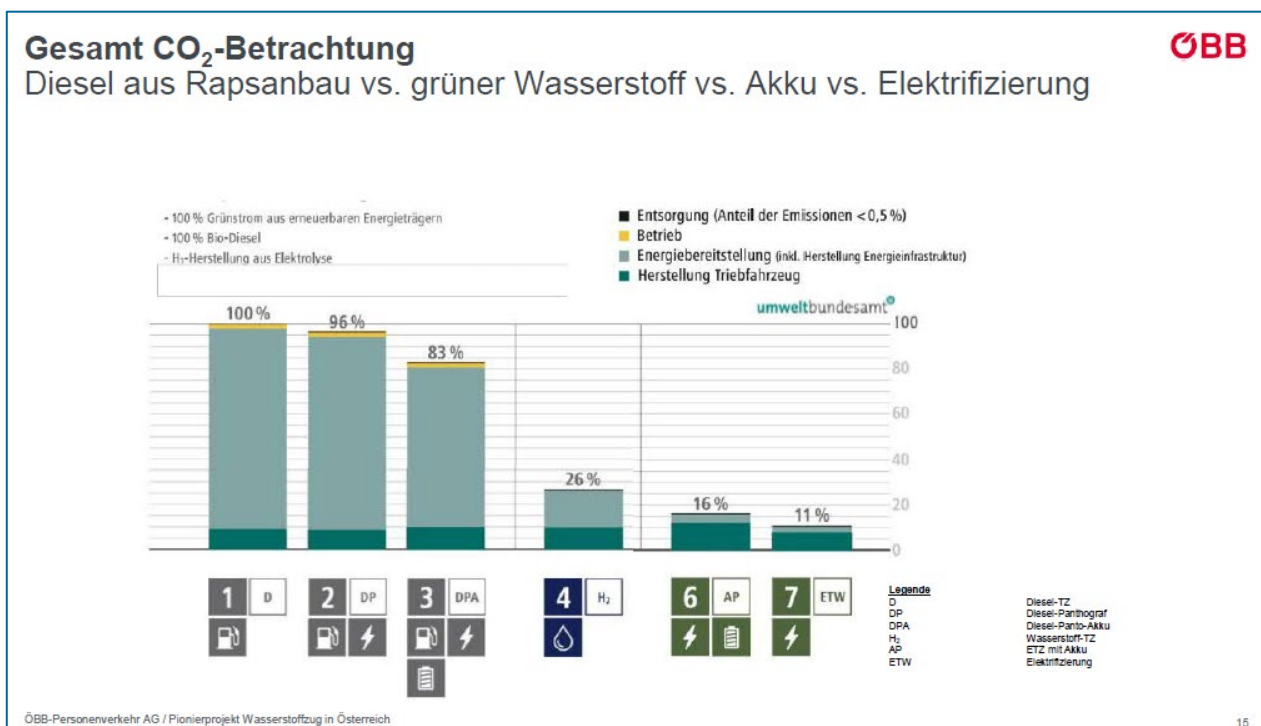


Abbildung 21: gesamt CO<sub>2</sub>-Betrachtung unterschiedlicher Antriebskonzepte, [15] p15

Aus klimapolitischen Gesichtspunkten wird selbst grünem Wasserstoff ein etwa doppelt so großer Fußabdruck im Vergleich zur Vollelektrifizierung oder Akku-Hybrid-Zügen zugeordnet, jedoch nur ein Viertel vom klassischen Dieselbetrieb [15] p15.

## 4.2 Akkumulatoren für dynamischen und statischen Betrieb

### Auslegungsgrundsätze

Zwischen der Bruttokapazität (meist die nominelle Angabe der Hersteller) und der verfügbaren Energie fürs Fahrspiel liegen als Faustregel ca. 55%. Dabei berücksichtigt man nach [30] p42, Abb. 20:

- 1) die kalendarische und nutzungsbedingte Alterung (Kapazitätsverlust)
- 2) den Ladehub nur in dem sinnvoll benutzbaren Bereich, in welchem einerseits die Batterie mit gleichmäßiger Lade- und Entladeleistung betrieben werden kann (c-Rate) und andererseits die Batterie sich „wohl fühlt“ (je nach

Bauart z.B. keine Tiefentladungen, entsprechend den Herstellerangaben bzw. der Auslegung des Herstellers für den konkreten Anwendungsfall), um eine lange Lebensdauer und entsprechend eine erhöhte Zyklenzahl zu erreichen

- 3) eine betriebliche Reserve für den Fall von unvorhersehbaren Betriebsstörungen, deren Szenarien kann man dazu viele erarbeiten kann und die schlussendlich in eine Verfügbarkeitszusage des Fahrzeugherstellers an den Fahrzeugbetreiber resultieren.

Die Auslegungskompetenz liegt beim Batteriehersteller. Er kann in seinen Auslegungen noch die eine oder andere Optimierung ersichtlich machen bzw. kann noch weitere Effekte berücksichtigen.

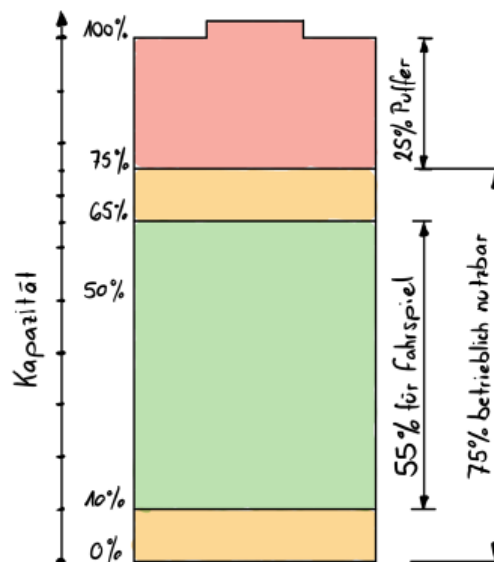


Abbildung 22: Schematische Auslegung der Batteriekapazität nach [30] p42

Grob geschätzt sind ca. 1,5 kW für das Thermalmanagement (Kühlen, Heizen) pro 50 kWh installierter Bruttokapazität der Batterie vorzusehen. Wendet man diese Abschätzung auf den 2023 bestellten Akku-Zug der FAL (Ferrovie Appulo Lucane, Bari, Italien) „TREEN“ mit 650 kWh Bruttokapazität nach [31] an, so sind dies doch immerhin beachtliche 20 kW Leistung, die permanent der Hilfsbetriebeumrichter (HBU) zu liefern hat. (Hinweis: dieser Nebenverbrauch fällt in analoger Weise auch für die Traktionsbatterie eines Wasserstoffzuges an.)

Um mindestens 8 Jahre Lebensdauer der Batterie zu erreichen, ist auf gleichmäßige Lade- und Entladezyklen bei geringen Leistungen zu achten.



Abbildung 23: Zug „TREEN“ der FAL (Ferrovie Appulo Lucane), Italien nach [31]

## Batterie-Zellchemien

**NMC** (Nickel-Mangan-Cobalt-Akkumulator oder präziser Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid ( $\text{LiNiMnCoO}_2$  oder eben kurz NMC) als Bauform der Li-ion (Lithium-Ionen-Akkumulator): für diese Zellchemie ist die INT-53 von Leclanché ein typischer Vertreter, der bereits in Schienenfahrzeugen (und Bussen) eingesetzt wird [31].

NMC-Akkupacks zeichnen sich durch hohe spezifische Energiedichte aus, weshalb sie auch für das Zahnradprojekt in [30] ausgewählt worden sind. Sie besitzen aber auch einige Nachteile, die aus der Beobachtung des ePkw- und eLkw-Marktes mittelfristig nur noch für Anwendungen Verwendung finden werden, wo das Gewicht die essentielle Größe ist. Also z.B. bei Sportwagen oder eben Zahnradbahnen und Schmalspurbahnen mit geringen zulässigen Achslasten und kurzen Zugeinheiten (der FAI „TREEN“ ist nur ein zweiteiliger Zug mit 8 Radsätzen, [31]).

**LTO** (Lithium-Titanat-Oxid-Akkumulator): die BORDLINE Max 850 HP von ABB gilt als typischer Vertreter dieser Zellchemie. Diese wird bereits in Zügen eingesetzt. Sie zeichnet sich durch hohe Zyklenzahlen und hohen C-Raten aus. Nachteilig ist die niedrige spezifische Energiedichte und der höhere Preis, der sich aber durch die höhere Lebenserwartung kompensieren kann.

**LFP** (Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator): bisher keine bekannte Anwendung in Zügen, jedoch ist es nur eine Frage der Zeit, bis diese Zellchemie den Weg in ein Schienenfahrzeug findet. Die Vorteile sind vor allem der Preis und die höhere Zyklenzahl im Vergleich zu NMC. Der Leistungsrahmen geht bis 800V und 250kW. Ein interessanter [Artikel zu LFP](#) in eLkw findet sich unter [32]. Die Entwicklung von Designwerk kann seit einigen Jahren beobachtet werden und diese Firma scheint Marktführer bei der Integration von Batterietechnik auf Pack Ebene in Bereich der eLkw zu sein. Designwerk versteht die Batterietechnik wohl als Komplettansatz auch im Zusammenspiel mit Ladetechnik, wie der [Artikel zu Ladecontainer](#) [33] zeigt.

Hier könnte eine derartige Gesamtlösung anstelle von Unterwerken vorteilhaft sein, womit dann auch gleich noch die eBusse geladen werden können. AC-seitige Netzkopplung zum Ortsnetz und auf der DC-Seite einen stationären Batteriespeicher mit genügend Kapazität (1800 kWh x 4 Stationen bei 110 kWh Verbrauch pro Fahrt Jenbach – Mayrhofen entspricht 1,5 Betriebstage bei der Zillertalbahn ohne Nachspeisung netzseitig!). Das System erlaubt auch gleich zu Beginn eine Rekuperation der Züge und nach 8 Jahren können die alten Batterien der Züge hier in der Second use Anwendung weitergenutzt werden. Eine Integration lokaler Photovoltaik (PV) analog zu [30] ist sicher einfach möglich, da schon eine DC Seite vorgesehen ist. Dieser Zusatznutzen ist aber nicht zwingend und kann später immer noch nachgerüstet werden.

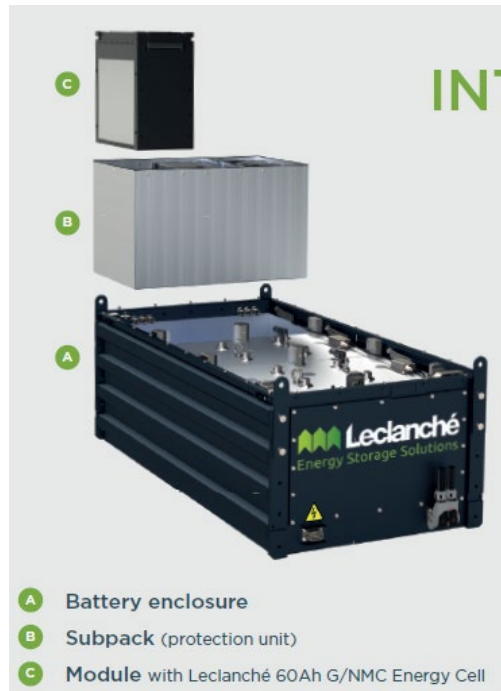


Abbildung 24: MNC Akku-Pack mit modularen Tauschkomponenten nach [34]



Abbildung 25: LTO Akku-Pack für Schienenfahrzeuganwendungen nach [35]



Abbildung 26: LFP Akku-Pack als Hochvolt-Batteriesystem für eLk-Anwendungen nach [36]

## Preisentwicklung

Siehe [1](#), [2](#) und viele weitere.

1 := <https://www.statista.com/chart/23807/lithium-ion-battery-prices/>

2 := <https://www.carexpert.com.au/car-news/ev-battery-prices-increased-this-year-for-the-first-time>

Zukünftige Entwicklungen & Trends sind nicht Bestandteil dieser Studie, in der ohnehin nur die unterschiedliche Kostenentwicklung pro zu Verfügung gestellter kWh Energie im Fahrzeug relevant wären.

## Technische Weiterentwicklungen

Tiefere Preise sind durch neue Formen der Zellchemie wie LFP bei gleichzeitig zunehmender Energiedichte zu erwarten, siehe [3](#), [4](#)

3 := <https://physicsworld.com/a/lithium-ion-batteries-break-energy-density-record/>

4:=

<https://e-engine.de/montag-special-amprius-batterie-revolution-verdoppelt-gravimetrische-und-volumetrische-energiedichte/>

## Trends

Der „second use“ von gebrauchten Akku-Zellen in stationären Anwendungen werden zunehmend häufiger und auch als Geschäftsmodell zur „Common-practice“, siehe [5](#)

5 := <https://www.electrive.net/2023/10/16/goeteborg-erhaelt-2nd-life-speicher-mit-28-mw-von-batteryloop/>

Die Bereitstellung von stationären Energiespeichern ist für die Zillertalbahn in Rahmen eines Akku-Hybrid-Konzeptes deshalb von Interesse, weil damit bei den Unterwerken günstiger (überschüssiger) Nachtstrom zum Verbrauch unter Tags zwischengespeichert werden kann. Der nächtliche Ladestrom kann zudem über das Ortsnetz erfolgen, wo zu diesen Zeiten keine Überlastung befürchtet werden muss oder betriebliche Einschränkungen in Kauf genommen werden müssen.

## 5 Betriebsszenarien und zugrundeliegende Konzepte

Der zugrunde gelegte Rahmenfahrplan mit seiner Jahreskilometerleistung von rund 772 000 Zkm ist in Kapitel 2.5 hergeleitet. Für den angestrebten Taktfahrplan im Halbstundentakt mit einem externen Knoten in Jenbach und einer Richtungsfahrzeit heute von rund 50min ergeben sich zwingend 4 Umläufe und eine Kantenzeit von 15 min. ausschlaggebend. Eine Reduktion der Anzahl Umläufe wäre nur dann darstellbar, wenn die Reisezeit zwischen den Endknoten deutlich unter 45 min reduziert werden könnte, was bei der aktuellen Infrastruktur nicht gegeben ist. Die 4 Umläufe sind somit invariant als Mindestanzahl für alle Betriebsszenarien anzunehmen.

Jede Verkürzung der Fahrzeit erfolgt in beide Fahrrichtungen etwa in gleichem Ausmaß, wodurch die geografische Lage der Kreuzungsstationen nicht beeinflusst wird, die zeitliche Lage hingegen in Richtung Knoten Jenbach rutscht zugunsten einer längeren Wendezeit in Mayrhofen. Jede Verkürzung der Fahrzeit kommt den Fahrgästen zugute, steigert die Attraktivität des Angebotes, erhöht die Fahrplanstabilität und ist mit bestehender Infrastruktur darstellbar.

Die infrastrukturseitige Einrichtung von zwei Doppelspurinseln in der Vergangenheit und einer Dritten in Planung verlegt nun alle Zugskreuzungen im Taktraster aus den Stationen auf die freie Strecke, erhöht die Fahrplanstabilität und bringt zudem Vorteile für die Spitzenbelastung einer zukünftigen Stromversorgung, weil das gleichzeitige Anfahren zweier Züge in einer Kreuzungsstation vermieden wird. Gleichzeitig ermöglicht dies das Führen „überlanger“ Züge, also Züge, die die Bahnsteiglänge und die Kreuzungsgleislänge in Kreuzungsstationen überschreiten. Dazu ist jedenfalls eine türselektive Türsteuerung vorzusehen, um bei kurzen Bahnsteigen jene Türen ohne Bahnsteig nicht freizugeben (Zu- und Ausstieg ist durch die Durchgängigkeit innerhalb einer Zugseinheit gegeben, ein Hinweis im Fahrgastinformationssystem (FIS) sowie die Lernkurve der Fahrgäste hilfreich.)

### 5.1 Betriebsparameter

#### Zuglänge

Diese positive zu bewertende Maßnahme der Doppelspurinseln hat erheblichen Einfluss auf die Möglichkeiten des Zugs- und Antriebskonzeptes, wenn eine Bahnsteiglänge von 80 m zugrunde gelegt wird:

- Die technisch notwendige Zuglänge ist aufgrund der mitgeführten „Kraftwerks-Ausrüstung“ und der Achslastbegrenzung auf 12,5 t gegeben.
- Der Wasserstoffzug in seiner angebotenen Ausführung muss 4-teilig ausgeführt werden. Die Zuglänge beträgt zwischen 75 und 80 m.
- Ein reiner Akku-Zug und die Hybrid-Zugkonzepte können 3-teilig ausgeführt werden. Die Zuglänge beträgt 55 bis 60 m.
- Ein rein elektrischer Zug kann 2-teilig (35 bis 40 m) oder als Triebwagen ausgeführt werden. Der als Referenz herangezogene Akku-Zug der FAL [31] ist bei anderer Spurweite 2-teilig ausgeführt.
- Züge mit weniger als 60 m Länge können bei Starklastbetrieb mit zusätzlichen Waggons verlängert werden. Diese Verlängerung kann bei einzelnen Kursen oder zeitweilig (saisonal) mit Steuerwagen oder bei dauerhafter Nachfragesteigerung durch Zwischenwagen erreicht werden.
- Züge mit 60 m Länge können als „überlange“ Züge in Doppeltraktion mit 120 m Länge verkehren, wobei die Türen des ersten und letzten Waggons bei 80 m-Bahnsteigen nicht freigegeben werden. Im Tourismusverkehr jedoch kann auch ein dafür ausgelegtes Fahrgastinformationssystem (FIS) nur bedingt kurze Fahrgastwechselzeiten bewirken. Neue Stationen mit hoher Touristik-Frequenz (Zillertal-Arena) sind in 120 m Länge ausführen.

Die Mindestzuglänge von 75 bis 80 m wird hinsichtlich des Schwachlastverkehrs (Randstunden, Nebensaison) kritisch betrachtet. Synergiemöglichkeiten zu anderen Schmalspurbahnen (Pinggau, Murtal, Ostdeutschland) werden geschmälert. Deshalb sind aus einem langfristigen Gesichtspunkt 3-teilige Zugskonzepte den technisch erforderlichen 4-teiligen Zugskonzepten als überlegen anzusehen, [9] p24 Kap. 4.1.1.2 e.a..

Die betriebliche Verlängerung drei-teiliger Zugskonzepte um einen zusätzlich (später) permanent eingereihten Zwischenwagen oder einen Steuerwagen für einzelne Umläufe steht dem nicht entgegen und ist antriebsseitig und fahrdynamisch in allen Konzepten vorbereitend berücksichtigt. Für die „normierten“ Zugskonzepte werden 3-teilige Zugskonfigurationen zugrunde gelegt. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Konzepte untereinander gewährleistet.

## Anzahl Führerstände:

Die Zillertalbahn weist eine sehr erhebliche Anzahl von Eisenbahnkreuzungen (EK) auf. Diese können auch bei Streckenneu- und Doppelspurausbauten nicht gänzlich und schon gar nicht kurzfristig eliminiert werden. Die Gefahr mit Fahrzeugen des motorisierten Individualverkehrs (MIV) bleibt erheblich und ist auch durch Technische Sicherungsmaßnahmen entsprechend der Eisenbahnkreuzungsverordnung EiseKrV 2012 und 2023 nicht ausreichend zu eliminieren. Kollisionen werden auch in Zukunft stattfinden und stellen ein wie im Straßenverkehr von der Gesellschaft akzeptiertes oder zu akzeptierendes Risiko dar.

Nicht akzeptierbar ist der langfristige Ausfall des ÖV-Angebotes aufgrund bei Kollisionen mit dem MIV beschädigter Zugseinheiten. Führende Steuerwagen können zumindest in dieser Fahrrichtung die Folgen von Kollisionen erheblich mildern, fällt nur ein Waggon und nicht ein ganzer Triebzug über Monate aus. Mehr als ein Neubau-Reservefahrzeug, vorgesehen für die präventive Wartung der Flotte, ist wirtschaftlich kaum vertretbar.

Ein Antriebskonzept, das mehr Führerstände ohne erhebliche betriebliche Mehrkosten ermöglicht, ist anderen Konzepten vorzuziehen. Diese Vorteile werden in dem vergleichenden Differenzkosten-Berechnungsmodell aktuell nicht berücksichtigt.

## Anzahl Zugseinheiten

Die Anzahl Zugseinheiten orientiert sich an den betrieblich erforderlichen Anzahl Umläufe (das sind mindestens 4, siehe oben) plus eine Reserveeinheit für präventive Wartung. Bei reinem Akku-Betrieb erfordert dies je nach Größe der Traktionsbatterie (für einfache Fahrt oder Hin- und Rückfahrt) und Ladezeit im Stillstand mindestens eine Zugseinheit mehr. Entsprechend der heutigen Betriebsabwicklung sind zwei zusätzliche Zugseinheiten vorzusehen (für lange Wendungen in Jenbach und Mayrhofen) – bei gleicher Transportleistung (siehe Kap. 8.8). Bei Hybrid-Konzepten kann die Ladung jedoch auf den Oberleitungsinseln während der Fahrt erfolgen. Zudem reduziert sich die nachzuladende Energiemenge.

Erwägt man mittelfristig die Führung „überlanger“ Züge in Doppeltraktion oder die 2014 diskutierte Einführung eines Viertelstundentaktes, dann sind bis zu 8 Triebzugeinheiten plus mindestens eine Reserveeinheit erforderlich. Daraus ergeben sich zwei Konsequenzen:

1. Werden die vier zusätzlichen Züge als Wasserstoffzüge deutlich später bestellt, so verlängert sich die erforderliche Garantieperiode für lokal günstigen Wasserstoff um die Jahre des späteren Bestellzeitpunktes. Die Zuglänge von 160 m stellt größere Herausforderungen an die Bahnsteige der Endbahnhöfe. Die Machbarkeit überlanger Züge ist nur schwierig sicherzustellen, es bleibt nur der Viertelstundentakt mit erhöhtem Personaleinsatz.
2. Die zusätzlichen Zugseinheiten können außerhalb der täglichen Starklastzeit den Güterverkehr nach Fügen übernehmen. Dadurch werden keine Investitionskosten dem Güterverkehr zugeschlagen, die Grenzkosten bleiben gering und diese betriebswirtschaftliche Ergänzung wird mittelfristig deswegen nicht hinterfragt werden.

Dreiteilige Triebzüge mit Verlängerungsoption und Doppeltraktionsoption sind mittelfristig flexibler und können das Führen überlanger Züge zu Starklastzeiten ohne Personalmehraufwand sicherstellen.

## Lage des Schwerpunktes

Die Zillertalbahn besitzt eine Spurweite von 760mm. Alle im Vergleich herangezogenen Fahrzeugkonzepte berücksichtigen eine Wagenkastenbreite von 2,65 m. Die sich daraus ergebende erhöhte Gefahr des Umkippens bei fahrdynamischen Wankbewegungen (aufgrund der Einfederung und Gleislagefehler) und lateraler Kräfte aufgrund von Seitenwinden bei gleichzeitig vergleichsweise großer Angriffsfläche muss durch eine tiefe Lage des Schwerpunkts kompensiert werden.

Diese Anforderung lässt schwere Aggregate am Dach nicht zu. Die gleichzeitige Forderung nach erheblichen Niederfluranteilen (Bahnsteighöhe 19cm, Fußbodenoberkante 20cm über Schienenoberkante (SOK)) lässt wiederum eine unterflurige Anordnung nur in den verbleibenden Hochflurabschnitten der Wagenkästen zu. Bei Verzicht auf einen Wechselstromtransformator zugunsten eines erhöhten Niederfluranteils verbleiben die Umrichtermodule und die Traktionsbatterien als schwere Module, die statt auf dem Dach auf Längsrahmenhöhe anstelle von Fahrgastraum im Wagenkasten hinter den Führerständen untergebracht werden. Die Wasserstoffbehälter sind ebenfalls im Wagenkasten untergebracht.

Dieser Verlust an Fahrgastraum zugunsten technischer Einrichtungen wird in der vergleichenden Berechnung berücksichtigt.

## 5.2 Szenario Sz0 Dieselbetrieb neu (Referenz)

Als Referenz für den normierten Vergleich mit anderen Antriebskonzepten werden neu angeschaffte Dieselfahrzeuge nach dem heute angewandten Betriebskonzept festgelegt (Diesellok D75-BB-SE + 3-teiliger Wendezug von Zos Vrutky). Dieses Szenario ist heute nicht zukunftssträchtig und dient hier der besseren Vergleichbarkeit mit den untersuchten Konzepten.

Die Beschreibung dieser lokomotiv-bespannter **Diesel-Wendezug** mit zwei Zwischen- u. einem Steuerwagen befindet sich in [9] p36 Kap. 4.1.4. Wesentliche Parameter sind

- Länge:  $15\text{m} + 17,5\text{m} + 17,5\text{m} + 18,5\text{m} = \mathbf{68,5m}$  ([9] 4.1.1, p19/198)
- Masse:  $50\text{t} + 24,5\text{t} + 8,6\text{t} + 24,5\text{t} + 8,6\text{t} + 26,5\text{t} + 8,7\text{t} = \mathbf{151,4t}$
- Kapazität:  $0 + 48 + [12] + (60) + 48 + [12] + (60) + 47 + [12] + (60) = 174 + (180) = \mathbf{323}$  Sitz- u. Stehplätze
- Adhäsionsmasse: **58t** (leere Betriebsmittel)
- Max. Geschwindigkeit: **80km/h**
- Motoren-Leistung: 746 kW, am Rad **500 kW** (Annahme)
- Anfahrzugkraft: **161kN**
- Bremsverzögerung: **0,8m/s<sup>2</sup>** (Annahme)

Die verfügbare Zugkraft über die Geschwindigkeit (Z-v-Diagramme) wird mit **0,65m/s<sup>2</sup>** bis 30km/h, danach abfallend auf 0,225m/s<sup>2</sup> bis 80km/h angenommen. Damit lässt sich der aktuelle Fahrplan mit 50min Reisezeit Jenbach – Mayrhofen mit vergleichbaren betrieblichen Parametern (z.B. Stationsaufenthaltszeiten, Berücksichtigung von Bedarfshaltestellen, etc. in der fahrdynamischen Simulation abgleichen.

- Länge über Kupplung 14640 mm
- Breite 2450 mm
- Höhe 3650 mm
- Gesamtgewicht 50 t
- Schienenspurweite 760 mm
- Achsfolge B'B'
- Gesamtachsstand 9600 mm
- Max. Geschwindigkeit 80 km/
- Motorleistung 746 kW
- Anfahrzugkraft 161 kN
- Betriebsvorräte 1800 l Diesel, 128 kg Sand

Abbildung 27: Parameter der Diesellok D75-BB-SE  
© [www.zagro-group.com/produkte/lokomotiven/d75-bb-se](http://www.zagro-group.com/produkte/lokomotiven/d75-bb-se)

Für die Parameter der Zwischen- und Steuerwagen wird auf die folgende Auflistungen zurückgegriffen.

| Basic technical data of steering wagon               |               |                          |
|------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Track gauge                                          |               | 760 mm                   |
| Maximum speed                                        |               | 80 km.hour <sup>-1</sup> |
| No. of places for seating                            | fixed seats   | 47                       |
|                                                      | folding seats | 12                       |
| Total length of unit (including automatic coupler)   |               | 18 500 mm                |
| Length of wagon body                                 |               | 18 000 mm                |
| Width of unit                                        |               | 2 650 mm                 |
| Height of unit from the top of rail                  |               | 3 750 mm                 |
| Wheel base of axles of the bogie                     |               | 1 750 mm                 |
| Free width of entrance doors                         |               | 1 300 mm                 |
| Height of lowered part of the floor from top of rail |               | 535 mm                   |
| Weight of wagon                                      |               | 25,6 t                   |
| Axle arrangement                                     |               | 2` 2`                    |

Abbildung 28: Parameter der Steuerwagen, © [www.zos-vrutky.sk/vozne\\_us.html](http://www.zos-vrutky.sk/vozne_us.html)

| Basic technical data of intermediate wagon           |               |                          |
|------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Track gauge                                          |               | 760 mm                   |
| Maximum speed                                        |               | 80 km.hour <sup>-1</sup> |
| No. of places for seating                            | fixed seat    | 48                       |
|                                                      | folding seats | 12                       |
| Total length of unit (including automatic coupler)   |               | 17 500 mm                |
| Length of wagon body                                 |               | 16 700 mm                |
| Width of unit                                        |               | 2 650 mm                 |
| Height of unit from top of rail                      |               | 3 750 mm                 |
| Wheel base of axles of the bogie                     |               | 1 750 mm                 |
| Free width of entrance doors                         |               | 1 300 mm                 |
| Height of lowered part of the floor from top of rail |               | 535 mm                   |
| Weight of wagon approximately                        |               | 24,5 t                   |
| Axle arrangement                                     |               | 2` 2`                    |

Abbildung 29: Parameter der Zwischenwagen © [www.zos-vrutky.sk/vozne\\_us.html](http://www.zos-vrutky.sk/vozne_us.html)

### 5.3 Szenario Sz1 Vollelektrifizierung

Vollelektrische Triebwagen gemäß [9] Kap. 4.1.1.2 können von verschiedenen Ausgangsbasen abgeleitet werden. Die wahren Fahrzeugparameter sind erst nach Auslegung eines qualifizierten Fahrzeugbauers verfügbar, die erst angefragt und mit erheblichem Aufwand ermittelt werden müssten. Einerseits sprengt das den Rahmen dieser Studie zu den Antriebskonzepten, andererseits muss für die Fahrzeugbauer ein ausschreibungsnahes Umfeld geschaffen werden. Das ist im gegebenen Fall der Zillertalbahn eine politische Aufgabe und keine technische.

Hier wird aus drei Ausgangsfahrzeugtypen eine normalisierte Vergleichsgrundlage abgeleitet

- a) Himmelstreppe Mariazellerbahn
- b) Wasserstoffzug Zillertalbahn
- c) Akku-Zug FAL

**Typ „a“ Himmelstreppe:** Als erste Bezugsbasis wird ein festgekuppelter dreiteiliger Elektrotriebzug gemäß [9] Kap.4.1.1.2, p24 Konzept 1 mit schwebenden Gelenken ähnlich den auf der Mariazellerbahn eingesetzten „Himmelstreppe“ angenommen, jedoch mit vollwertiger Bestuhlung ohne die später umgesetzten großzügigen Mehrzweckabteile. Zur Vergleichbarkeit mit anderen Betriebskonzepten und vorliegenden Studien wird eine Elektrifizierung mit 1,5 kV DC zugrunde gelegt, weshalb als Annahme 2t Fahrzeuggewicht für den Transformator abgezogen werden. Die Wagenkastenbreite beträgt 2650mm.

Dieses Fahrzeugkonzept kommt einer – gerüchteweise – angedachten Nachbestellung von 3 Einheiten für die Mariazellerbahn entgegen.

Beschreibung: voll-elektrischer 3-Teiler

- Länge: **50,8m** [9] Kap. 4.1.1.2, p24
- Masse:  $75t - 2t + 17,2 = \mathbf{90,2t}$
- Kapazität:  $116 + (113) = \mathbf{229}$  Sitz- und Stehplätze
- Adhäsionsmasse:  $4 \times 12,5t = \mathbf{50t}$  (äußere Drehgestelle)
- Max. Geschwindigkeit: **90km/h**
- installierte Leistung am Rad: **1200 kW**
- Anfahrzugkraft: **140kN**
- Bremsverzögerung: **1,0m/s<sup>2</sup>** (Annahme)
- Z-v-Diagramme: **1,0m/s<sup>2</sup>** bis 30km/h, danach abfallend auf 0,3m/s<sup>2</sup> bis 80km/h (Annahme)

|                                     |                           |
|-------------------------------------|---------------------------|
| <b>Einsatzgebiet</b>                | Mariazellerbahn           |
| <b>Spurweite</b>                    | 760 mm                    |
| <b>Bezeichnung</b>                  | ET1 – ET9 (Be 4/8)        |
| <b>Speisespannung</b>               | 6.5 kV AC, 25 Hz          |
| <b>Achsanordnung</b>                | Bo'2'2'Bo'                |
| <b>Anzahl Fahrzeuge</b>             | 9                         |
| <b>Inbetriebsetzung</b>             | 2013                      |
| <b>Sitzplätze 2. Kl. + IV-Sitze</b> | 116                       |
| <b>Klappsitze</b>                   | 11                        |
| <b>Stehplätze (4 Pers./m²)</b>      | 113                       |
| <b>Fussbodenhöhe</b>                |                           |
| Niederflur am Einstieg              | 400 mm                    |
| Hochflur                            | 980 mm                    |
| <b>Einstiegbreite</b>               | 1300 mm                   |
| <b>Längsdruckkraft</b>              | 800 kN                    |
| <b>Länge über Kupplung</b>          | 50740 mm                  |
| <b>Fahrzeugbreite</b>               | 2650 mm                   |
| <b>Drehgestellachsstand</b>         |                           |
| Motordrehgestell                    | 2200 mm                   |
| Laufdrehgestell                     | 1900 mm                   |
| <b>Triebraddurchmesser, neu</b>     | 770 mm                    |
| <b>Laufbraddurchmesser, neu</b>     | 770 mm                    |
| <b>Max. Leistung am Rad</b>         | 1200 kW                   |
| <b>Anfahrzugskraft</b>              | 140 kN                    |
| <b>Höchstgeschwindigkeit</b>        | 80 km/h (90 km/h möglich) |

Abbildung 30: Parameter der himmelstreppe, © [www.stadlerrail.com/media/pdf/tmnovog1211d.pdf](http://www.stadlerrail.com/media/pdf/tmnovog1211d.pdf)

Die Traktionsmotoren und Untersetzungsgetriebe stellen aufgrund der besonders engen Platzverhältnisse bei einer Spurweite von 760mm eine besondere Herausforderung dar, da bei konventioneller Anordnung zwischen den Radscheiben nur eine geringe Baulänge von Rotor und Stator möglich bleibt und dadurch die elektromotorische Leistung eingeschränkt wird. Der für die Himmelstreppe der Mariazellerbahn entwickelte Traktionsmotor ist fremdbelüftet, luftgekühlt und leistet bei offener Ausführung 250kW bei einem Lüftungsluftstrom von 0,4 m³/s.



Abbildung 31: Traktionsmotor TMF 42-38-4 für 760mm-Drehgestell  
©TSA [www.tsa.at/de/tsa\\_referenzen/stadler-rail-himmelstreppe-emu-fuer-mariazellerbahn](http://www.tsa.at/de/tsa_referenzen/stadler-rail-himmelstreppe-emu-fuer-mariazellerbahn)

Technische Spezifikationen Motor

| ID: TSA007122R1 |      |                   |                    |      |                    |
|-----------------|------|-------------------|--------------------|------|--------------------|
| P               | 250  | kW                | Q                  | 0,4  | m <sup>3</sup> / s |
| n               | 1964 | min <sup>-1</sup> | Δp                 | 600  | Pa                 |
| U               | 500  | V                 | n <sub>max</sub>   | 5368 | min <sup>-1</sup>  |
| I               | 378  | A                 | m                  | 580  | kg                 |
| f               | 66   | Hz                | M <sub>start</sub> | 1947 | Nm                 |

Fremdbelüftet, Luftgekühlt, Offene Ausführung

Abbildung 32: Technische Daten des Traktionsmotors TMF 42-38-4  
©TSA [www.tsa.at/de/tsa\\_referenzen/stadler-rail-himmelstreppe-emu-fuer-mariazellerbahn](http://www.tsa.at/de/tsa_referenzen/stadler-rail-himmelstreppe-emu-fuer-mariazellerbahn)

Das dreiteilige Fahrzeug Himmelstreppe besitzt die Achsfolge Bo'2'2'Bo', also vier einzeln angetriebene Radsätze in zwei Triebdrehgestellen an beiden Fahrzeugenden, zwei schwebende Gelenke und zwei Laufdrehgestelle unter dem Mittelwagen, die zusätzlich mit Magnetschienensbremsen ausgerüstet sind. Die Traktionsleistung ist zur Mitnahmen von zwei Panoramawagen ausgelegt. Alle Wagenkästen besitzen je Fahrzeugseite eine Fahrgasttür, Niederflurbereiche und jeweils drei Stufen zum Hochflurbereich. Zwei Toiletten, davon eine rollstuhltauglich, und Klappsitze sind integriert. Für die Stromabnahme sind zwei baugleiche Stromabnehmer eingebaut, im Betrieb unter 6,5kV 25Hz wird nur einer benötigt und im Regelfall der in Fahrrichtung hintere benutzt. Das später umgesetzte große Mehrzweckabteil mit Längsklappsitzen ist hier nicht berücksichtigt.

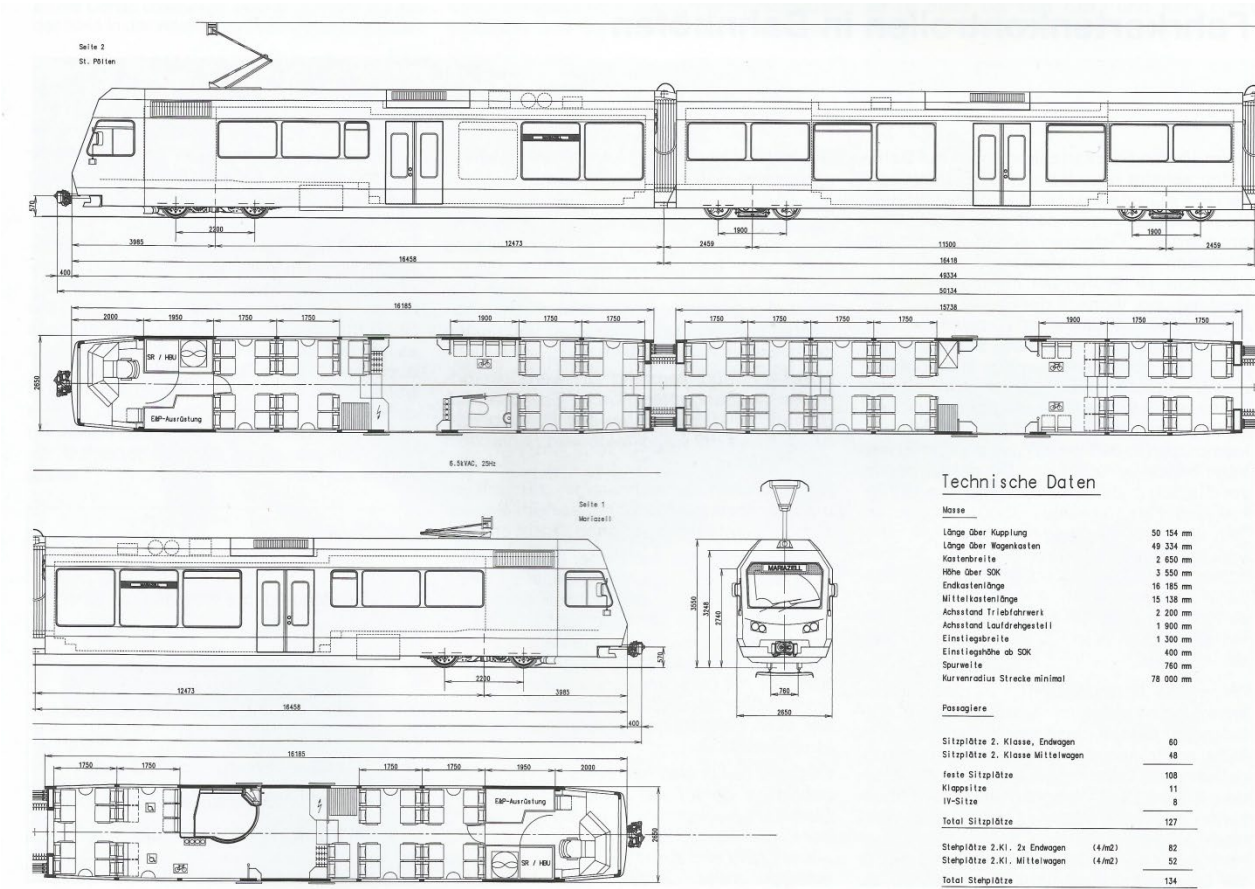


Abbildung 33: Typenskizze Himmelstreppe, Leergewicht 70t [37] p19

**Type „aa“ Himmelstreppe verlängert:** Um eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Fahrzeugkonzepten zu gewährleisten, wird in der Übersichtstabelle Abbildung 34 eine um drei Fensterteiler je 1750mm und mit je 8 Sitzplätzen ausgestattete verlängerte Variante angenommen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die für die zahlreichen im Bogen liegenden Tunnel mit keinem Lichtraumprofil der Mariazellerbahn eine optimierte Wagenkastenlänge angewandt wurde. Diese Einschränkungen der Mariazellerbahn sind für die Zillertalbahn nicht gegeben.

Für eine bessere Vergleichbarkeit kann als Konzept Typ „a“ ein zusätzlicher Steuerwagen [9] Kap. 4.1.1.2, p24, Konzept 6 ergänzt werden. Damit ändern sich die Fahrzeugparameter wie folgt:

- Länge: plus 18,5m
- Masse: plus 26,5t+8,9t,
- Kapazität: plus 58+(60) Sitzplätze.

Die stark dimensionierte Traktionsausrüstung bleibt unverändert, auch da die Zillertalbahn im Gegensatz zur Mariazellerbahn keine langen Rampen erheblicher Steigungsgradienten aufweist. Die Leistung für den stop-an-go-Verkehr der Zillertalbahn im unteren Geschwindigkeitsbereich ist ausreichend, die Anfahrtszugkraft bei Mitnahme von Verstärkerwagen nochmals genau zu dimensionieren.

**Typ „b“ Wasserstoffzug mit Stromabnehmer ohne Wasserstoff:** Alternativ kann man das im Zillertal angebotene vierteilige Wasserstofffahrzeug als Ausgangsbasis heranziehen (siehe Kap. 5.4). Dieses würde um die Hochspannungsausrüstung (2 Stromabnehmer, Hauptschalter, etc., plus 1t) ergänzt und um die Wasserstoffausrüstung (3,1t) und die Traktionsakkumulatoren (10 LTO Akku-Zellen a 560kg, ca 400kg Chiller und Ansteuerung, gesamt minus 6t) reduziert werden.

Gleichzeitig können pro Halbzug zumindest 2+1/2 Fensterachsen von Wasserstoffbehältern freigemacht werden und dadurch Platz für 2,5 x 8 x 2 = 40 Sitzplätze bei unveränderter Anzahl Stehplätze geschaffen werden. Diese zusätzlichen 40 Personen werden mit 3,2t angenommen. Ausgehend von einer Wasserstoffzug-Gesamtmasse von 158t bei 373 Personen Kapazität ergibt sich für einen rein elektrischen Vierwagenzug  $158+1-3,1-6+3,2t = 153,1t$  Gesamtmasse. Die Kapazität erhöht sich um 40 auf 413 Personen (154+40 Sitzplätze, 42 Klappsitze, 219 Stehplätze).

Die max. Radsatzlast des Wasserstoffzuges wird in [4] mit 11,3t angeführt. Diese reduziert sich durch die generelle und tendenziell gleichverteilte Lastreduktion von 158 auf 153,1t auf etwa 11t.

**Typ „bb“ ex-Wasserstoffzug dreiteilig:** Um die Vergleichbarkeit zu erhöhen kann man nun einen aus dem Wasserstoffzug abgeleiteten dreiteiligen Zug definieren. Durch Weglassen eines Mittelwagens gehen 54 Sitzplätze, 11 Klappsitze und 55 Stehplätze verloren. Die Kapazität sinkt auf 303 Personen, die Zuladung entsprechend um 8,7t. Bei angenommenen 26t Leergewicht des Zwischenwagens mit 18,6m Länge (Herleitung siehe Kap. 5.5) reduziert sich die Zugsmasse von 153,1t um 26+8,7t auf 118,4t, die Zugslänge von 76,4m auf 57,8m. Die Traktionsausrüstung würde unverändert bleiben, ebenso die acht angetriebenen Radsätze, um für spätere Verstärkerwagen ausreichend Reserve zu haben. Die Achslast von rund 11t an den Triebdrehgestellen bliebe unverändert, die der Laufdrehgestelle ergibt sich zu etwa 7,6t.

**Typ „c“ ex-Akku-Fahrzeug FAL:** Als dritte Ausgangsbasis kann das jüngst für die FAL-Bahn in Süditalien angebotene zweiteilige 950mm Akkumulatoren-Fahrzeug Anwendung finden (siehe Kap. 5.5). Durch den Entfall von 12 NMC-Akkuzellen a 530kg (und 400kg für Chiller und Steuerungen, minus 6,8t) und Ergänzung der doppelt ausgeführten Hochspannungsausrüstung (plus 1t) kann das technische Gesamtgewicht reduziert werden und es können zwei Fensterteiler für Sitzplätze (+16) bei gleichbleibender Anzahl Stehplätze freigeräumt werden. Damit ergibt sich aus 87+16 Sitzplätzen, 12 Klappsitzen und 77 Stehplätzen eine neue Kapazität von 180 Personen.

Aus den 80t Gesamtmasse ergeben sich nach Abzug der ursprünglichen 164 Personen Zuladung ein Leergewicht von 66,9t. Das neue Gesamtgewicht von 81,3t erhöht sich um 1t für die Hochspannungsausrüstung und reduziert sich um 6,8t für Akkumulatoren und Akku-Nebenbetriebe und kommt damit auf 75,5t.

Die max. Achslast von 12,5t reduziert sich um je ein Viertel des Akkugewichts (1,7t) und erhöht sich um 8 Fahrgäste (0,64t) auf rund 11,5t, wenn die Hochspannungsausrüstung über den innen liegenden Drehgestellen platziert wird. Die Laufdrehgestelle hätten Achslasten von etwa 7,4t.

**Typ „cc“ ex-Akku-Fahrzeug FAL dreiteilig:** Will man auch hier den Übergang zu einem dreiteiligen Fahrzeug mit dem Potential für einen vierten Verstärkerwagen schaffen, so muss nicht nur ein Zwischenwagen (26t, leer, 72 Sitzplätze, 16 Klappsitze, 42 Stehplätze, 19,5m lang, siehe Kap. 5.5) ergänzt werden, sondern auch die innenliegenden Laufdrehge-

stelle der motorisierten Endwagen als Triebdrehgestelle ausgeführt werden (+je 2t) und Zusatzausrüstung (je +1t). Die Fahrzeugmasse erhöht sich um  $26+9,2+2 \times 2+2 \times 1$  auf 116,7t. Anfahrzugkraft und Leistung verdoppeln sich aufgrund der Massenzunahme und der geringeren Spurweite (Länge der Fahrmotoren) nicht voll umfänglich. Dies ist auch nicht erforderlich, weshalb die bekannten Werte eingesetzt werden. Analog können auch dieselben Z-v-Kennlinien (Abbildung 36) Anwendung finden.

In der folgenden Tabelle werden die ermittelten Parameter gegenübergestellt. Im Vergleich der dreiteiligen Züge (aa, bb, cc) fällt die große Übereinstimmung von bb und cc auf, während das auf der Himmelstreppe basierende Konzept etwas tiefere Werte ergibt.

### Übersicht der berücksichtigten Herleitungen (Typen) für einen vollelektrischen Triebwagenzug

Für die weiteren Untersuchungen und Berechnungen findet als „worst case“ Annahme der Parametersatz des dreiteiligen Wasserstoffzuges mit Hochspannungsausrüstung und ohne Wasserstoff (Typ „bb“) Anwendung.

| Beschreibung   |                     | Himmels-<br>treppe | Himmels-<br>treppe<br>verlängert | Wasser-<br>stoffzug<br>ohne H <sub>2</sub> | Wasser-<br>stoffzug<br>ohne H <sub>2</sub> | Akkuzug o.<br>Akku | Akkuzug o.<br>Akku     |
|----------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|------------------------|
| Szenario Typ   |                     | „a“                | „aa“                             | „b“                                        | „bb“                                       | „c“                | „cc“                   |
| Wagenzahl      | [-]                 | 3-                 | 3                                | 4                                          | 3                                          | 2                  | 3                      |
| Achsfolge      | [-]                 | Bo'2'2'Bo'         | Bo'2'2'Bo'                       | Bo'Bo'+2'2'+<br>2'2'+Bo'Bo'                | Bo'Bo'+2'2'+<br>Bo'Bo'                     | Bo'2'+ 2'Bo'       | Bo'Bo'+2'2'+<br>Bo'Bo' |
| Länge          | [m]                 | 50,8               | 56,0                             | 76,4                                       | 57,8                                       | 36,5               | 56,0                   |
| Breite         | [mm]                | 2650               | 2650                             | 2650                                       | 2650                                       | 2500               | 2500                   |
| Masse          | [t]                 | 86,3               | 89,3                             | 153,1                                      | 118,4                                      | 75,5               | 116,7                  |
| Sitzplätze     | [-]                 | 116                | 140                              | 194                                        | 139                                        | 103                | 175                    |
| Klappsitze     | [-]                 | 11                 | 11                               | 42                                         | 31                                         | 12                 | 28                     |
| Stehplätze     | [-]                 | 113                | 125                              | 219                                        | 164                                        | 77                 | 119                    |
| Kapazität max  | [pers]              | 229                | 265                              | 413                                        | 303                                        | 180                | 294                    |
| max. RS-Last   | [t]                 | 12,5               | 12,5                             | 11t                                        | 11                                         | 11,5               | 11,5                   |
| Adhäsionsmasse | [t]                 | 50                 | 50                               | 88                                         | 88                                         | 46                 | 90                     |
| max. Geschw.   | [km/h]              | 90                 | 90                               | 100                                        | 100                                        | 100                | 100                    |
| Lstg. am Rad   | [kW]                | 1200               | 1200                             | 1400                                       | 1400                                       | 800                | 1400                   |
| Anfahrzugkraft | [kN]                | 140                | 140                              | 180                                        | 180                                        | 120                | 180                    |
| Verzögerung    | [m/s <sup>2</sup> ] | 1,0                | 1,0                              | 1,0                                        | 1,0                                        | 1,0                | 1,0                    |
| Beschleunig.   | [m/s <sup>2</sup> ] | 1,0                | 1,0                              | 1,0                                        | 1,0                                        | 1,0                | 1,0                    |

Abbildung 34: Übersicht voll-elektrische Zugskonzepte unterschiedlicher Ableitung

## 5.4 Szenario Sz2 Wasserstoff-Zug

In den bisher untersuchten Antriebskonzepten und vorliegenden Studien erscheint das Konzept eines Wasserstoff-Hybrid-Zuges nicht. Eine Begründung dafür lässt sich nicht finden, aber unter gewissen Annahmen herleiten:

Szenario 1: Wasserstoffproduktion im Zug: die über die Fahrleitung abgegriffene Energie könnte während der Fahrt zur Elektrolyse von mitgeführtem Wasser genutzt werden, um die Reichweite des Fahrzeuges weiter zu vergrößern. Dem Nutzen kürzerer oberleitungsfreier Streckenabschnitte und damit geringeren Wasserstoffverbrauchs stehen die Bevorratung des Wassers und die technische Ausrüstung zur Aufspaltung des Wassers und zur Komprimierung des gewonnenen Wasserstoffs entgegen. Zudem ist die Reichweite auf der 32km langen und flachen Zillertalbahn nicht die zentrale Herausforderung, ein ausreichender Wasserstoffvorrat für einen Tagesumlauf ist in den bisherigen Fahrzeugprojekten vorgesehen.

Szenario 2: die über die Fahrleitung abgegriffene Energie wird ausschließlich zum Nachladen der für den Wasserstoffbetrieb erforderlichen Traktionsakkumulatoren genutzt, um in den oberleitungsfreien Abschnitten einen möglichst großen Anteil aus dem Akkumulator beziehen zu können und damit den Wasserstoffverbrauch zu minimieren. Die strecken- und betriebsspezifische Optimierung der drei Antriebsarten „elektrischer Betrieb“, „Akkumulatorenbetrieb“ und „Wasserstoffbetrieb“ (also das Nachladen der Traktionsakkumulatoren durch Brennstoffzellen) müsste durchgeführt und in die Antriebssteuerung implementiert werden. Es ist denkbar, dass dieses Szenario, so es analysiert worden ist, aufgrund der betriebs- und streckenspezifischen Parameter dazu geführt hat, dass ein Nachladen der Traktionsakkumulatoren als

nicht erforderlich angesehen worden ist und so der Mehraufwand für oberleitungsseitiges oder brennstoffzellenseitiges Nachladen den Nutzen übersteigt.

Hier wird deshalb der reine Wasserstoff-Zug, wie in den bisherigen Konzepten und Studien zugrunde gelegt, betrachtet.

Die bisherige Auslegung fahrzeugbauerseitig hat ergeben, dass aufgrund der begrenzten Achslast von 12,5t ein 4-teiliges Fahrzeug mit insgesamt 8 Drehgestellen, davon vier Triebdrehgestellen erforderlich ist.

Die Wagenkastenbreite beträgt 2650mm, die Zuglänge 76,4m.



Abbildung 35: Wasserstoffzug Zillertalbahn nach [4] p1

Beschreibung: **Wasserstoffzug** 4-Teiler (Daten aus [4] p9)

- Länge: **75m** ( [9] Kap. 4.1.1.2, p24 Konzept 3)
- Masse:  $128 + 36 = 164\text{t}$
- Kapazität:  $234 + (219) = 453$  Sitz- und Stehplätze, [4] p11/41
- Adhäsionsmasse:  $8 \times 11,3\text{t} = 90,4\text{t}$  (äußere Drehgestelle)
- Max. Geschwindigkeit: **100km/h**
- installierte Leistung am Rad: **1400 kW** (8x 175kW)
- Anfahrzugkraft: **180kN** (8x 22,5kN)
- Batteriekapazität: **310kWh**
- Bremsverzögerung:  **$1,0\text{m/s}^2$**  (Annahme)
- Z-v-Diagramme:  **$1,0\text{m/s}^2$**  bis 28km/h, danach abfallend auf  $0,275\text{m/s}^2$  bis 100km/h (Annahme)

Entscheidend für alle fahrdynamischen Untersuchungen ist die verfügbare Zugkraft abhängig von der Momentangeschwindigkeit. Diese wird im Z-v-Diagramm (Abbildung 36) dargestellt und kann unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse auch als Beschleunigungsvermögen über die Geschwindigkeit (a-v-Diagramm, Abbildung 37) dargestellt werden.

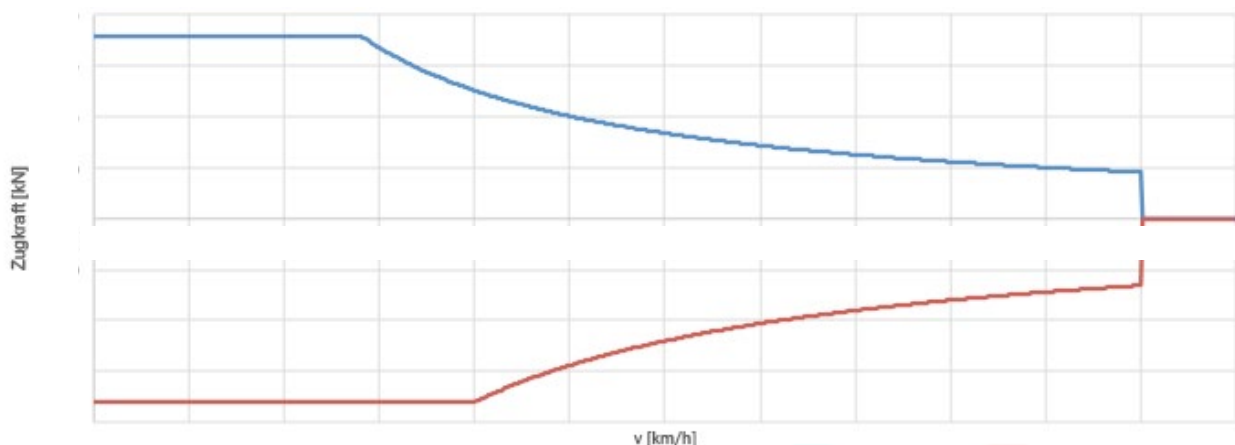


Abbildung 36: Z-v-Diagramm Wasserstoffzug, [4] p12

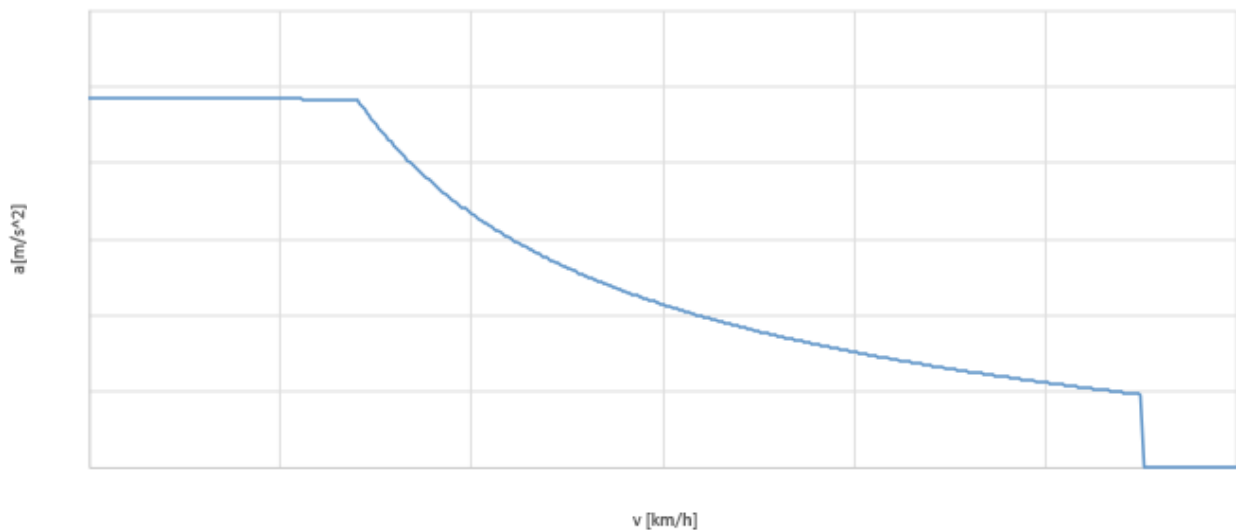


Abbildung 37: a-v-Diagramm Wasserstoffzug, [4] p13

Diese Kennlinien stellen per se noch kein „Geheimnis“ dar, sondern können als betriebliche Spezifikationen an das fahrdynamische Verhalten betrachtet werden. Relevant sind die Ausgangsgrößen bei Stillstand, die Lage des Knickpunktes, wo die Leistungsbegrenzung durch die Leistungshyperbel schlagend wird und die verfügbare Leistungsreserve (Beschleunigungsvermögen) bei Maximalgeschwindigkeit (hier 80km/h resp. 100km/h) auf ebener Strecke (oder bei Rampenstrecken mit hohen Neigungsgradienten bei bestimmten bogenabhängigen Streckengeschwindigkeiten).

In den für diese Ausarbeitung zu Verfügung gestellten Studien konnte keine Übersichtszeichnung der Letztversion des angebotenen Fahrzeuges gefunden werden. Auch Letztzahlen zur Gesamtmasse, abhängig von Sitz- und Stehplätzen, sowie die nominelle Sitzplatzkapazität liegen uns nicht in schriftlicher Form vor. Das Ansinnen nach einer gültigen Typenskizze wurde mehrfach platziert, aber nicht erfüllt. Um die daraus resultierende Unsicherheit zu minimieren und auf eine belastbare Basis zu stellen wurde, auf Abbildung 38 zurückgegriffen.

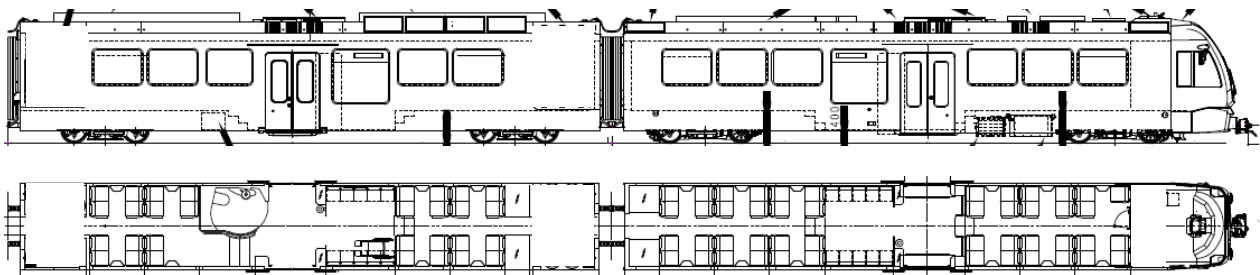


Abbildung 38: Typenskizze halber Wasserstoffzug, [4] p11

Auf Basis dieser Typenskizze ergeben sich abweichend zu der in [4] genannten Anzahl 30 + 47 Sitz- und 11 + 10 Klappsitzplätze pro Halbzug, also 154 + 42 Sitzplätze pro Zug. Mit unverändert angenommenen 219 Stehplätzen, jedoch ohne Klappsitze, ergibt sich ein Fassungsvermögen  $t$  von 373 Personen, bei einem Leergewicht von 128t und eine maximale Fahrzeugmasse von 158t.

## 5.5 Szenario Sz3 Akkumulatoren-Zug

Im März 2023 hat der schweizerische Schienenfahrzeugbauer Stadler mit der italienischen Privatbahn FAL (Ferrovie Appulo Lucane, Basilicata, Italy) einen Vertrag zur Lieferung von 5 zweiteiligen, schmalspurigen Akkumulatorenzügen (SRBE312) für die Strecke Matera – Altamura unterzeichnet. Eine aktuelle Beschreibung dieser Schmalspurbahn findet sich in [38].

Die führenden Drehgestelle unter den Maschinenräumen sind angetrieben, die innenliegenden Drehgestelle sind Laufwerkwerke (Achsfolge Bo' 2' + 2' Bo'). Kleine Ladestromabnehmer ermöglichen das Laden der Akkumulatoren in den Endstationen und im Depot. Behindertenfreundliches Einsteigen ist bei Bahnsteighöhen von 250mm möglich. [39]

Die gegenüber der Zillertalbahn abweichende Spurweite dieses Fahrzeuges von 915mm stellt aufgrund der Wagenkastenbreite von 2500mm kein unlösbares Problem dar, können die Fahrwerke gegen jene des projektierten Wasserstoffzuges mit 760mm Spurweite in erster Näherung kosten- und gewichtsneutral ausgetauscht werden. Die Energieversorgung erfolgt ausschließlich über Akkumulatoren [31]. Das Fahrzeug erfüllt alle gängigen Anforderungen zeitgemäßen Bahnverkehrs und öffentlichen Personennahverkehrs. Die Reichweite der Akkumulatoren beträgt 70km, die geschätzte Nutzungsdauer 7 Jahre. Leider gibt der Hersteller kein Gesamtgewicht an, der Vertriebsleiter von Stadler Italia, Maurizio Oberti, führt für das voll beladene Fahrzeug 80t an. Seine Angabe zur Länge von 36,5m widerspricht dem Datenblatt [39] mit 53,445m (die 36,5m erscheinen aus einer rein proportionalen Abschätzung plausibler).

Dadurch eignet sich dieses Fahrzeug sehr gut, als Vergleichsbasis herangezogen zu werden.

Liefertermin ist 2026, der Verkaufspreis für die 5 zweiteiligen Züge beträgt 45 Mio. Eur [31].



Abbildung 39: Rendering des zweiteiligen FAL-Akkumulatoren-Fahrzeuges  
© [www.ferrovie.info/images/news20/treen\\_stadler\\_0061.jpg](http://www.ferrovie.info/images/news20/treen_stadler_0061.jpg), 03.10.2023

Beschreibung: **Akkumulatorenzug 2-Teiler** (Daten aus [39] und [31])

- Länge: **36,5m**
- Masse: 66,9t + 13,1t = **80t** (rückgerechnet aus Beladung)
- Kapazität: 87 + [12] + (77) = **164** Sitz- und Stehplätze
- Adhäsionsmasse: 4x12,5t = **50t** (äußere Drehgestelle, vgl. 11,3t wie Himmelstreppe plus 1,2t Akku)
- Max. Geschwindigkeit: **100km/h** (Design 120km/h)
- installierte Leistung am Rad: **800 kW** (4x 200kW) [ggf. zu reduzieren auf 4x175kW 760mm-DG]
- Anfahrzugkraft: **120kN** (4x 30kN) [ggf zu reduzieren auf 4x 22,5kN 760mm-DG]
- Batteriekapazität: **650kWh**
- Bremsverzögerung: **1,0m/s<sup>2</sup>** (Annahme)
- Z-v-Diagramme: **0,9m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,25m/s<sup>2</sup> bis 100km/h (Analogie)

Typenskizze und Datensatz finden sich in Abbildung 40 und Abbildung 41.

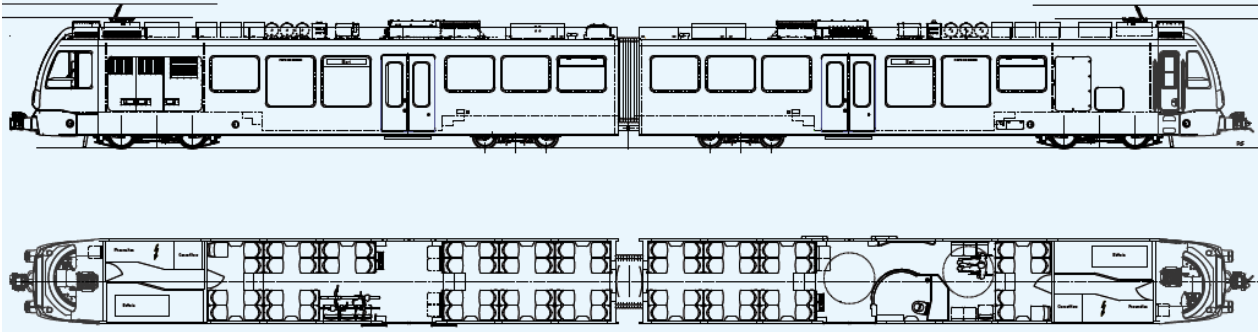


Abbildung 40: Typenskizze des zweiteiligen Batterie-Fahrzeuges der FAL, aus [39]

|                                       |                       |                                            |               |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|---------------|
| <b>Rail operator</b>                  | FAL, Basilicata Italy | <b>Length over buffers</b>                 | 53 455 mm     |
| <b>Operated line</b>                  | Matera – Altamura     | <b>Vehicle width</b>                       | 2500 mm       |
| <b>Gauge</b>                          | 950 mm                | <b>Vehicle height</b>                      | 3820 mm       |
| <b>Drive system</b>                   | Battery-electric      | <b>Bogie wheelbase</b>                     |               |
| <b>Axle arrangement</b>               | Bo' 2' + 2' Bo'       | Motor bogie                                | 2100 mm       |
| <b>Number of vehicles</b>             | 5                     | Trailer bogie                              | 1800 mm       |
| <b>Delivery</b>                       | 2026                  | <b>Wheel diameter (motor bogie)</b>        | 810 mm (new)  |
| <b>Total seats</b>                    | 87                    | <b>Wheel diameter (trailer bogie)</b>      | 685 mm (new)  |
| <b>Flip-up seats</b>                  | 12                    | <b>Traction battery capacity (approx.)</b> | 636 kWh (new) |
| <b>Standing capacity (4 pers./m²)</b> | 77                    | <b>Max. traction power to wheels</b>       | 800 kW        |
| <b>Floor height</b>                   |                       | <b>Tractive effort at start-up</b>         | 120 kN        |
| Low-floor at entrance                 | 519 mm                | <b>Acceleration at start-up</b>            | 0.9 m/s²      |
| High-floor                            | 945/1039 mm           | <b>Design speed</b>                        | 120 km/h      |
| <b>Door width</b>                     | 1300 mm               | <b>Operational speed</b>                   | 100 km/h      |

Abbildung 41: Datensatz des zweiteiligen Batterie-Fahrzeuges der FAL, aus [39]

Ausgehend von dem zweiteiligen Fahrzeug für die FAL kann ein nichtangetriebener Zwischenwagen angedacht werden, der ausschließlich mit Sitzplätzen ausgerüstet wird, da sämtliche Infrastrukturen wie Toiletten und Mehrzweckabteil in den Endwagen untergebracht sind. Dem Nahverkehrscharakter der Zillertalbahn entsprechend sind zwei Fahrgasttüren je Wagenkastenseite vorgeschlagen.

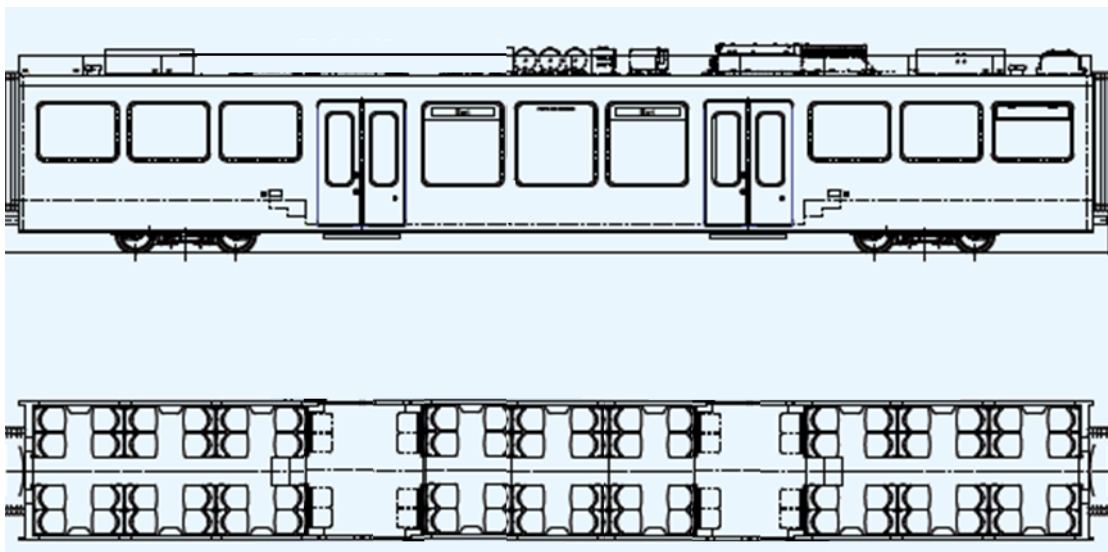


Abbildung 42: Typenskizze eines Zwischenwagenkonzeptes, © MfV

Dieser Zwischenwagen besitzt 72 Sitzplätze und 16 Klappsitze im Einstiegsbereich sowie 42 Stehplätze. Dies erhöhen die Beförderungskapazität um 114 Personen ( $72 + 42$ , 9,2 t) bzw. die Sitzplatzkapazität um 88 Plätze ( $72 + 16$ ) gemäß Abbildung 42 bei einem leeren Betriebsgewicht von rund 26 t. Diese Annahmen korrelieren auch mit den Zwischenwagen des Wasserstoffzuges (35,2t voll) bei einer Länge von 19,5 m. Bei 18 m Wagenlänge würden 8 Plätze entfallen.

Werden zusätzlich bei den angetriebenen Endwagen die Laufdrehgestelle durch Triebdrehgestelle ersetzt, müssen zusätzliche 6t Fahrzeuggewicht (2t je Triebdrehgestell, 1t Zusatzausrüstung wagenkastenseitig) angenommen werden. Damit ergibt sich ein Gesamt-Leergewicht von 72,9t für den leeren zweiteiligen Triebwagen.

Annahmen für Drehgestell-Massen bei Meterspur [40]:

Adhäsion: T-DG ~7t (Allegra),  
 L-DG ~(4 –) 4,5 t  
 $\Delta = 2,5$  (– 3 t), bei 760mm etwas geringer.  
 Zahnrad: A1-Dg ~5 t

War die Achslast der Laufdrehgestelle  $(80 - 4 \times 12,5) / 4 = 7,5$  t, so erhöhen sie sich jetzt um 3 t je Drehgestell, also um 1,5 t auf 9 t, wobei die genaue Aufteilung der Masse zwischen den beiden Triebdrehgestellen hier nicht von wesentlicher Bedeutung ist. Die Achslast des Zwischenwagens beträgt etwa 8,8t.

Beschreibung: **Akkumulatorenzug 3-Teiler**

- Länge:  $36,5\text{m} + 19,5\text{m} = \mathbf{56,0\text{m}}$
- Masse:  $(80+6)\text{t} + (26+9,2)\text{t} = \mathbf{121,2\text{t}}$
- Kapazität:  $87+(77) + 72+(42) = \mathbf{278}$  Sitz- und Stehplätze
- Adhäsionsmasse:  $4 \times 12,5\text{t} + 4 \times 9\text{t} = \mathbf{86,0\text{t}}$  (11,3t wie Himmelstreppe plus 1,2t Akku außen)
- Max. Geschwindigkeit: **100km/h** (Design 120km/h)
- installierte Leistung am Rad: **1400 kW** [ $8 \times 175\text{kW}$  760mm-DG]
- Anfahrzugkraft: **180kN** ( $4 \times 30\text{kN}$ ) [ $8 \times 22,5\text{kN}$  760mm-DG]
- Batteriekapazität: **650kWh**
- Bremsverzögerung: **1,0m/s<sup>2</sup>** (Annahme)
- Z-v-Diagramme: **0,9m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,25m/s<sup>2</sup> bis 100km/h (Analogie)

Alternativ kann man ausgehend vom 4-teiligen Wasserstoffzug (Kap. 5.4) auf einen reinen Akkumulatoren-Zug rückschließen, indem der im Wasserstoffzug vorhandene Traktionsakkumulator unverändert belassen bleibt, jedoch die gesamte Wasserstofftechnik und -behälter eliminiert werden. Dadurch werden 2+1/2 Fensterachsen in jedem Zwischenwagen frei und können durch je 20, also zusammen 40 Sitzplätze zusätzliche Kapazität ersetzt werden.

Damit ergibt sich für einen 4-Teiler und einen 3-Teiler grob abgeschätzten folgenden Parameter:

Beschreibung: **Batteriezug ex-Wasserstoffzug 4-Teiler**

- Länge: **75m**
- Masse:  $128 + 39,5 = \mathbf{164,4\text{t}}$  (mit zus. Pass., mit minus 3,1t H2-Ausrüstung s.u.)
- Kapazität:  $234+(219) + 40 = \mathbf{493}$  Sitz- und Stehplätze
- Adhäsionsmasse:  $8 \times 11,3\text{t} = \mathbf{90,4\text{t}}$  (äußere Drehgestelle)
- Max. Geschwindigkeit: **100km/h**
- installierte Leistung am Rad: 1400 kW ( $8 \times 175\text{kW}$ )
- Anfahrzugkraft: 180kN ( $8 \times 22,5\text{kN}$ )
- Batteriekapazität: 310kWh
- Bremsverzögerung: 1,0m/s<sup>2</sup> (Annahme)
- Z-v-Diagramme: 0,9m/s<sup>2</sup> bis 28km/h, danach abfallend auf 0,25m/s<sup>2</sup> bis 100km/h (Annahme)

bzw. für den 3-Teiler linear abgeschätzt (gemäß Typenskizze aus [4] p11/41

Beschreibung: **Batteriezug ex-Wasserstoffzug 3-Teiler**

- Länge:  $75 \cdot \frac{3}{4} = 57,8\text{m}$
- Masse:  $164 \cdot \frac{3}{4} = 8 \times 11,3 + 4 \times 9,2 + 127,2\text{t}$
- Kapazität:  $501 \cdot \frac{3}{4} = 174 + 162$  (gezählt) = **336** Sitz- und Stehplätze
- Adhäsionsmasse:  $8 \times 11,3\text{t} = 90,4\text{t}$  (äußere Drehgestelle)
- Max. Geschwindigkeit: **100km/h**
- installierte Leistung am Rad: 1400 kW (8x 175kW)
- Anfahrzugkraft: 180kN (8x 22,5kN)
- Batteriekapazität: 310kWh
- Bremsverzögerung: 1,0m/s<sup>2</sup> (Annahme)
- Z-v-Diagramme: 0,9m/s<sup>2</sup> bis 28km/h, danach abfallend auf 0,25m/s<sup>2</sup> bis 100km/h (Annahme)

Die Parameter passen gut mit dem aus dem FAL-Akkuzug abgeleiteten Dreiteiler zusammen. Die etwas höher Sitzplatzkapazität und das geringere Adhäsionsgewicht lassen sich durch die nur etwa halb so großen Akkumulatoren (310 kWh statt 650 kWh) plausibilisieren. Das um ca. 5t höhere Gesamtgewicht erscheint erklärbar, da die Wasserstoffausrüstung-Ausrüstung nicht abgezogen worden ist.

Welche Akkumulatorenkapazität tatsächlich für den Betrieb auf der Zillertalbahn erforderlich ist, wird in Kap. 5.7 abgeleitet.

## 5.6 Szenario Sz4 Akku-Hybrid-Zug

Der Akkumulatoren-Hybrid-Zug basiert auf dem 3-teiligen reinen Akkumulatoren-Zug, abgeleitet vom FAL-Fahrzeug (Kap. 5.5). Werden die Oberleitungsabschnitte mit 1,5kV DC gespeist, dann sind lediglich zwei Betriebsstromabnehmer (ca. 140kg) anstelle der Ladestromabnehmer und elektrotechnische Ausrüstung (Hauptschalter, Spannungsüberwachung, Verkabelung, etc.) vorzusehen. Das zusätzliche Gesamtgewicht wird mit 1t pro Zug angenommen. Bei anderen, höheren Versorgungsspannungen und bei Wechselstromversorgung sind zusätzliche Komponenten und damit zusätzliche Massen erforderlich.

Da die Traktionsbatterie des Wasserstoffzuges den Anforderungen eines Akku-Hybridzuges nach Kap. 5.4im Zillertal genügt (siehe Kap. 5.7), soll die zweifellos sinnhafte Erzeugung von Wasserstoff mit nächtlichem Stromüberschuss für die stationäre Nutzung herangezogen werden, nicht aber das Fahrzeuggewicht erhöhen und die Sitzplatzanzahl reduzieren.

Damit ergeben sich folgende Fahrzeug-Parameter:

- Beschreibung: **Akku-Hybrid-Zug 3-Teiler**
- Länge: 36,5m + 19,5m = **56,0m**
- Masse:  $(80+6)\text{t} + (26+9,2)\text{t} + 1\text{t} = 122,2\text{t}$
- Kapazität:  $87+(77) + 72+(42) = 278$  Sitz- und Stehplätze
- Adhäsionsmasse:  $4 \times 12,5\text{t} + 4 \times 9\text{t} + 1 = 87\text{t}$
- Max. Geschwindigkeit: **100km/h** (Design 120km/h)
- installierte Leistung am Rad: **1400 kW** [8x175kW 760mm-DG]
- Anfahrzugkraft: **180kN** (4x 30kN) [8x 22,5kN 760mm-DG]
- Batteriekapazität: **650kWh**
- Bremsverzögerung: **1,0m/s<sup>2</sup>** (Annahme)
- Z-v-Diagramme Elekt-Betrieb: **1,0m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,275m/s<sup>2</sup> bis 100km/h
- Z-v-Diagramme Akku-Betrieb: **0,9m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,25m/s<sup>2</sup> bis 100km/h

Die Annahme, dass eine reduzierte Beschleunigung im Akku-Betrieb auf die Akkumulatoren-Lebensdauer verlängernd wirkt, kann mit den vorliegenden Akku-Daten nicht verifiziert werden und ist später bei Projektumsetzung einzuholen. Auch können die heutigen fahrdynamischen Programme nicht (einfach) den Fahrzeitunterschied. Hier wäre entweder mühsame und fehleranfällige Handarbeit angesagt oder eine vom wissenschaftlichen Standpunkt aus interessante Weiterentwicklung der Berechnungsprogramme erforderlich. Dieser Aufwand lohnt sich zum konkreten Zeitpunkt noch nicht, da die Aussage, dass der gewünschte Fahrplan möglich ist, getätigt werden kann.

In der Folge wird auch im Akku-betrieb mit 1,0m/s<sup>2</sup> gerechnet.

- Z-v-Diagramme Akku-Betrieb: **1,0m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,275m/s<sup>2</sup> bis 100km/h

## 5.7 Szenario Sz5 Akku-Hybrid-Zug optimiert

In diesem Szenario werden im Vergleich zu Kap. 5.6 zwei Optimierungen gleichzeitig betrachtet

1. Zugrundelegung von mehr und kürzeren Oberleitungsabschnitten (Kap. 5.9)
2. Akkumulatoren mit höheren Belade-Entlade-Zyklenzahlen

Obwohl die beiden Optimierungen auch unabhängig voneinander durchzuführen sind, sind sie dem Ziel der Übersichtlichkeit geschuldet zusammengefasst. Inhaltlich ist das deshalb gerechtfertigt, weil hier pro Umlauf (2 Stunden Fahrzeit) nicht zwei, sondern acht Ladezyklen zugrunde gelegt werden, diese aber zu geringeren Varianzen im Ladungszustand „State of Charge“ (SoC) führen. Würde man in Abbildung 43 die beiden Entladephasen (der Stromverbrauch ist blau eingezeichnet) auf 8 kürzere Phasen verteilen, würde der Ladezustand SoC wohl nie unter 75% fallen, die Varianz wäre auf 15%-Punkte zwischen 75% und 90% SoC begrenzt.

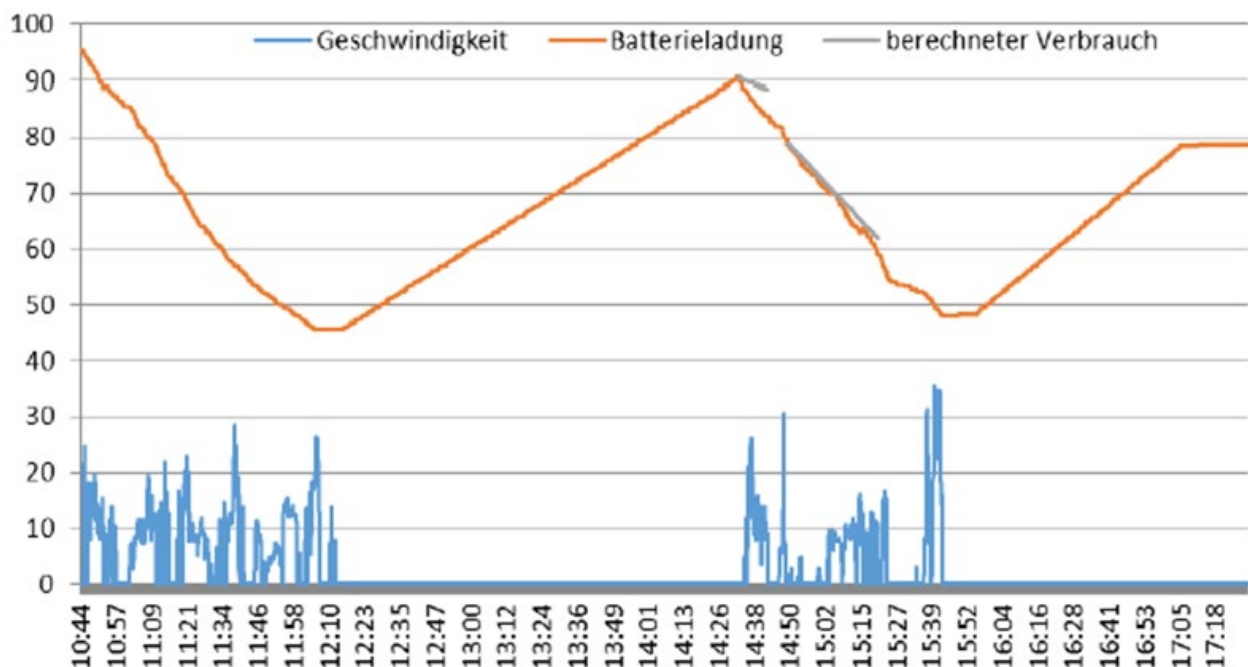


Abbildung 43: Varianz des State of Charge während Lade- und Entladephasen [19] p20

Eine Batteriekapazität von 650 kWh (Kap. 5.5) ist für einen Hybridbetrieb mit mehreren Oberleitungsabschnitten überdimensioniert. Je nach Ausgestaltung der Infrastruktur erscheinen 6 Lithium-Titanat-Oxyd-Akkumulatoren (LTO-Battery-Packs) für 264 kWh Bedarf (Jenbach – Fügen) bzw. 231 kWh (Doppelspurabschnitte) und ausreichende Entladungsrate (C-Rate) ausreichend. Damit kann die Akkumulatorenmasse bei einer spezifischen Kapazität von 30 bis 110 kWh/kg ([© de.wikipedia.org/wiki/Lithiumtitanat-Akkumulator](https://de.wikipedia.org/wiki/Lithiumtitanat-Akkumulator)) um 2 t (s.u.) reduziert werden.

Die reduzierte maximale Fahrzeugmasse von 105,6 t bzw. 104,4 t korrespondiert sehr gut mit den aus der Studie [40] abgeleiteten Masse von 102 t resp. 101 t für die Zillertalbahn.

(Gewichtsabschätzung von MzB Himmelstreppe 75 t (leer) + 17,2 t (Pers.) + 3,8 t (2 DGs) + 4,48 t = 100,48 t ~ 101 t)

### Ausgangslage FAL-Zug:

- 650 kWh nominal:
- NMC-Batterie: 12Stk a 53kWh je 530kg

- mit weniger Zyklen max. 8000 Zyklen,
- gut geeignet für seltene, lange Fahrstrecken mit entsprechenden Ladezeiten am Endpunkt
- c-Rate max. 3:  
 $650 \times 3 = 1950 \text{ kW} \times \eta$  ( $\eta \sim -5\%$  Batterie entladen,  $-1\%$  Stromrichter,  $-7\%$  Fahrmotor,  $-3\%$  Getriebe, minus HBU  $55\text{kW} - 10\%$  bis EoL (End of Life))  
 $\Rightarrow 1950 \text{ kWh} \times 0,738 \Rightarrow 1439,5 \text{ kWh}$
- Masse:  $12 \times 530\text{kg} = 6,36\text{t}$  (+2 t Equipment für 2 Einbauorte) = **8,36 t**

#### Abschätzung LTO-Akkus:

- 264 kWh
- LTO-Module 8 Stk. a 33 kWh je 560kg + 1t (zus. E-Technik für Akku, Kühlung)
- geringer Energiedichte, aber höhere Zyklenzahl, ca. 40.000 Zyklen, schonend mehr
- gut für wiederholtes Nachladen, kurze Wendezeiten, hohe Beschleunigung
- c-Rate: max. 8
- Masse:  $8 \times 560 \text{ kg} = 4,48 \text{ t}$  (+2 t Equipment für 2 Einbauorte) = **6,48 t**  
 Zugsgewicht MzB + 101,5t  $\Rightarrow \sim 102 \text{ t}$  (für Oberleitung Jenbach – Fügen)  
 231 kWh erforderlich (für 4 Oberleitungsabschnitte)  $\Rightarrow 7 \text{ LTO-Module} \Rightarrow 101 \text{ t}$ .

Unterschied LTO zu NMC:  $6,36 \text{ t} - 4,48 \text{ t} = \sim 2 \text{ t}$

#### Wasserstoffzug:

- 30 Faserverbund-Behälter a 15 kg in 6 Gestellen (a 300kg) mit 240kg H<sub>2</sub>
- 6 Brennstoffzellen a 100kW (nominal, EoL  $-10\%$  500kW) a 100 kg (bis 120 kg)
- Masse =  $30 \times 15 \text{ kg} + 6 \times 300 \text{ kg} + 240 \text{ kg} + 6 \times 100 \text{ kg} = \mathbf{3,1t}$   
 [aktuelle Stand Brennstoffzellen: 120kW = 120-160kg (in Automotive), © www.alten-germany.de]

Besitzt der Akku-Zug und der Akku-Hybrid-Zug je 12 Stück NMC-Akkumulatoren a 53kWh und 530kg Masse, so soll der optimierte Akku-Hybrid-Zug wegen der deutlich höheren Zyklenzahl auf der Zillertalbahn (Stop- and Go-Betrieb) 8 Stück LTO-Akkumulatoren a 33 kWh und 560kg bei vergleichbaren Akku-Hilfsbetrieben erhalten. Damit reduziert sich die Zugsmasse um  $8 \times 560\text{kg} - 12 \times 530\text{kg} = \sim 1,9 \text{ t}$ .

Wird das Zusatzgewicht der Stromabnehmer und der Hochspannungsausrüstung über dem inneren Triebdrehgestell angeordnet, ergeben sich zudem ideal verteilte Radsatzlasten und ein gutes Adhäsionsverhalten. Die geringere Masse optimiert den Traktionsenergieverbrauch (bei jedem Beschleunigungsvorgang).

Die Fahrzeugparameter ergeben sich damit zu:

#### Beschreibung: **Akku-Hybrid-Zug opt. 3-Teiler**

- Länge:  $36,5\text{m} + 19,5\text{m} = \mathbf{56,0\text{m}}$
- Masse:  $(80+6)\text{t} + (26+9,2)\text{t} + 1\text{t} - 1,9\text{t}$  (Akku) = **120,3t**
- Kapazität:  $87+(77) + 72+(42) = \mathbf{278}$  Sitz- und Stehplätze
- Adhäsionsmasse:  $4 \times 12,025\text{t} + 4 \times 9\text{t} + 1 = \mathbf{85,1t}$  (min 1,9t Akku außen)
- Max. Geschwindigkeit: **100km/h** (Design 120km/h)
- installierte Leistung am Rad: **1400 kW** [ $8 \times 175\text{kW}$  760mm-DG]
- Anfahrzugkraft: **180kN** ( $4 \times 30\text{kN}$ ) [ $8 \times 22,5\text{kN}$  760mm-DG]
- Batteriekapazität: **264kWh (8 x LTO)**
- Bremsverzögerung: **1,0m/s<sup>2</sup>** (Annahme)
- Z-v-Diagramme Elekt-Betrieb: **1,0m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,275m/s<sup>2</sup> bis 100km/h
- Z-v-Diagramme Akku-Betrieb: **0,9m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,25m/s<sup>2</sup> bis 100km/h bzw.
- Z-v-Diagramme Akku-Betrieb: **1,0m/s<sup>2</sup>** bis 28km/h, danach abfallend auf 0,275m/s<sup>2</sup> bis 100km/h

## Szenario Sz5b mit zusätzlichen Oberleitungsabschnitten

Werden zukünftig weitere Oberleitungsabschnitte u.a. im Zusammenhang mit einem zweigleisigen Ausbau in Erwägung gezogen ([41], ab 2024 Schlitters – Gagering), dann ist das im Sinne dieser Betrachtungen der Akkumulatorenauslegung nur vorteilhaft.

Die Varianz der SoC sinkt, dadurch erhöht sich die Anzahl Ladezyklen bis zum EoL-Kriterium (Kapazitätsverlust von 10%), die Lebensdauer der Akkus erhöht sich.

Die zu erwartenden Effekte können nur auf Basis der beim Akku-Hersteller ermittelten Daten hochgerechnet werden, wenn konkrete Betriebsdaten als Eingangsgrößen zu Verfügung gestellt werden. Dies ist erst nach einer grundlegenden Konzeptentscheidung sinnvoll.

Die jetzt in Sz5 zugrunde gelegten Parameter sind somit als konservativ anzusehen.

## Schrittweises annähern an Sz1 Vollelektrifizierung

Mit den Szenarien Sz4 und Sz5 bleibt die Option einer späteren Vollelektrifizierung gewahrt.

Keine der getätigten Investitionen sind verloren, da ein Pufferakkumulator im Fahrzeug Vorteile bei der Rekuperation der Bremsenergie bringt. Ein Rückspeisen ins Netz bei Gleichstrom-Betrieb bedingt zusätzliche Komponenten in den Unterwerken und verursacht Übertragungsverluste im Vergleich zur Speicherung lokal im Fahrzeug und benötigt gleichzeitig einen Verbraucher anderswo im Netz.

Am schrittweisen Weg zur Vollelektrifizierung sinkt der tatsächliche Bedarf an Speicherkapazität der Akkus, wobei stets der längste oberleitungsfreie Abschnitt mit den meisten Haltestellen und/oder Steigungen auslegungsrelevant bleibt. Das bedeutet aber auch, dass die Lebenszykluszeit der Akkumulatoren dadurch verlängert werden kann, dass der Grenzwert von EoL (End of Life, angenommen mit 10% Kapazitätsverlust gegenüber Nominal) gemeinsam mit dem erforderlichen Nominalwert zu kleineren Kapazitäten hin verschoben werden kann.

Eine zeitliche Synchronisierung von Oberleitungsausbau und Akkumulatorenalterung ist sinnvoll, ein entsprechendes Monitoring der Akkumulatoren-Kapazitäten von Einsatzbeginn an baut Wissen auf und hilft vorteilhafte Entscheidungen zu treffen.

Durch die schrittweise Annäherung an die Vollelektrifizierung können auch infrastruktureitig Vorteile erwachsen, dass besonders anspruchsvolle Stellen (Grundstücksproblematik, Überführungsbrücken, Hochspannungsleitungen) vorerst ausgespart werden können und diese sich im Laufe der Jahre ggf. von selber entschärfen oder entfallen, z.B. durch Brückenneubau oder Anpassungen der Leitungen. Der fehlende Zeitdruck stärkt zudem die Verhandlungsposition der Zillertalbahn.

Die jetzt in Sz4 und Sz5 zugrunde gelegten infrastruktureitigen Berechnungsparameter sind somit als konservativ anzusehen.

## 5.8 Güterverkehr Jenbach – Fügen

Der Güterverkehr der Zillertalbahn beschränkt sich derzeit auf die Bedienung des Sägewerkes Binder in Fügen. Nach mehreren verschiedenen Bedienmodi (mit Rollwagen und einzeln aufgerollten Normalspurgüterwagen) und zwischenzeitlicher Stilllegung wird seit dem 17. 05. 2021 ein moderner Holzverkehr in beiden Fahrrichtungen zwischen Jenbach und Fügen angeboten. Dieser Güterverkehr basiert auf aufgerollten („aufgeschemelten“) Schiebewardwagen und auf adaptierten Rollwagen, die mit offenen Holzcontainern ergänzt wurden und als Rungenwagen bezeichnet werden können. Gekuppelt werden diese Wagen untereinander und gegenüber der Lokomotive mit einer Koppelstange, die zudem als Bremsluftleitung dient. Jeder 6- bis 8-Wagen-Zug besitzt an den Zugsenden massive Schutzgitter als Ladegutanschlag (Abbildung 44). Diese Container werden nicht mit der Fracht in Jenbach, sondern mit schwerem Gerät (Abbildung 45) in effizienter Form auf die Normalspurgüterwagen des parallelliegenden Gleises verladen.

Dieser Güterverkehr bedingt eine Fahrleitungshöhe von 6,2 m im Abschnitt Jenbach – Fügen und bei Anwendung von Mittelmasten im Zweigleisabschnitt Schlitters – Gagering einen rund 15cm erweiterten Gleisabstand. Für den Abschnitt hinter Fügen soll Container-basierter Güterverkehr mit Fahrleitungsregelhöhe 5 m potentiell möglich bleiben.

In dieser Studie soll an dieser Form nichts hinterfragt werden, die Verkehrsleistung ist in Entfernung und Zuganzahl gering im Vergleich zum Personenverkehr. Eine Dekarbonisierung, die ein neues Triebfahrzeug benötigt, wird kritisch gesehen, werden doch die Grenzkosten pro Betriebsfall signifikant angehoben. Dies als Abschätzung ohne hinterlegte Berechnung.



Abbildung 44: Erster Güterzug aus Rollwagen am 17.05.2021 [4] p38



Abbildung 45: Beladung des ersten Güterzuges am 17.05.2021 [4] p39

### Dieselbetrieb beibehalten mit eigenen Loks oder Leihloks

Als Übergangslösung, bis ausreichend dekarbonisierte Fahrzeuge verfügbar sind, ist eine Fortführung des Güterverkehrs in gewohnter Form empfehlenswert. Dazu stehen (standen) vier dieselhydraulische Lokomotiven D13 bis D16 der Firma Gmeindner mit Baujahren 2004 und 2007 zu Verfügung. 2018 ist Lok D13 der Pinzgaubahn verkauft worden und steht dort als Vs84 in Diensten, um im Gegenzug einen bisher geleasteten Dieseltriebwagen für den Personenverkehr übernehmen zu können.

Da alle drei verfügbaren Gmeinder-Loks für den Personenverkehr erforderlich sind und ältere Dieselloks nicht die erforderliche Effizienz erzielen können, wird auf eine geliehene Lok der Steiermarkbahn, die VL23 zurückgegriffen (Abbildung 46). Diese kann mit vollsynthetischem HVO 100 Treibstoff nach EN 15940 umweltfreundlich betrieben werden (+30%).



Abbildung 46: Güterzug der ZVB mit Leihlok VL23 der StB, 16. 05. 2023, © Michael Schröder, [www.knipserl.at](http://www.knipserl.at)

Aus Sicht dieser Antriebskonzeptstudie zur Dekarbonisierung ist dies ein guter und gangbarer Weg, speziell als „absolute Rückfallebene“. Für die Zeit nach Erreichen der wirtschaftlichen Lebensdauer dieser Diesellokomotiven bzw. für den Fall stark ansteigender Strafbesteuerung von CO<sub>2</sub>-äquivalenten Abgaben sind langfristig Alternativen anzudenken.

### Vollelektrisch mit Triebwagen

Werden für die dekarbonisierte Zillertalbahn 5 Exemplare von Wasserstoff- oder Akku-Hybrid-Zügen angeschafft, sind diese in vier Umläufen inkl. Reserve planmäßig ausgelastet. Eine regelmäßige Nutzung im Güterverkehr kann – unabhängig von traktionstechnischen Parametern (Zugkraft) – nicht sichergestellt werden.

Werden in einer zweiten Beschaffungsphase zur Abdeckung von Auslastungsspitzen im Personenverkehr vier weitere, gleichartige Züge angeschafft, gilt diese Aussage nicht mehr. Betrieblich ist der Zweigleisabschnitt Schlitters – Gagering notwendig. Die Mit-Nutzung von Triebzügen zur reinen Güterbeförderung vermeidet die Anschaffung einer eigenen „GV-Flotte“ an Triebfahrzeugen (Einzelstück, hohe Kosten pro km). Andere renommierte Bahnen wie die Rhätische Bahn (RhB) in der Schweiz, verwenden nicht nur vorhandenen drei- und vierteilige Triebzüge als reines Güterverkehrstriebfahrzeug an (RhB ABe 4/16 3101-3105 „Allegra 2“ und RhB ABe4/16 3111-3166 „Capricorn“), sondern haben für die Berninabahn leistungsstarke Zweisystemtriebzüge (auch) für den Güterverkehr spezifiziert (RhB ABe 8/12 3501 – 3115 „Allegra“), um ältere Schlepptriebwagen mittelfristig ablösen zu können (RhB ABe 4/4 51-56 und RhB ABe 4/4 41-49).

Verkehren die RhB ABe 8/12 „Allegra“ auf der Berninabahn überwiegend als PmG (Personenzug mit Güterbeförderung) (Abbildung 49, Bernina Suot), wird bei allen anderen Anwendungen auf der Albula-Linie (Abbildung 48, Landwasserviadukt) oder im Prättigau (Landquart – Klosters – Davos) eine reine Lokomotiv-Traktionsfunktion abgerufen.



Abbildung 47: RhB ABe4/12 „Allegra“ 3501 – 3115 in eine Aufstellung zulässiger Zugbildungsvarianten als Triebfahrzeug eines Holzzuges © Wolfgang Finke, Gian Brüngger, Buch-auf-DVD 923, Triebfahrzeuge 4, p113, [tram-tv.de](http://tram-tv.de)

Ähnliche Beispiele sind aus früheren Jahren in Österreich z.B. von der Hausruckbahn Attnang-Puchheim – Ried/Innkreis mit der ÖBB Rh 5081 oder im Weinviertel nach Poysdorf mit ÖBB Rh 5146 bekannt.

Im Anwendungsfall Zillertalbahn wäre bei Verwendung von Hybridfahrzeugen der Vorteil zu benennen, dass die Ladegleise in Fügen und Jenbach nicht mit einer Oberleitung überspannt werden müssen, die Traktionsbatterie reicht zum

Positionieren des Zuges und zum Verschieben aus. Lediglich das Ausziehgleis zum Umsetzen in Fügen, heute zur Rundholzverladung genutzt, müsste auf ausreichende Länge zum Wenden überprüft werden. Zudem müssen die Kupplungsvorrichtung (Adapter auf Scharfenbergkupplung) und die Einspeisevorrichtung der Hauptluftleitung (dzt. Vakuum) berücksichtigt werden sowie die Ansteuerung der Hauptluftleitung an sich. Eine direkte Bremse mit Sicherheitsschleife ohne Bremsmöglichkeit des Güterzuges ist aufgrund der Bremsmassenverteilung im Betrieb nicht möglich.



Abbildung 48: EMU-Triebzug ABe4/12 „Allegra“ der RhB als Triebfahrzeug eines Güterzuges (kein GmP oder PmG),  
© Kurt Wolfert, [www.youtube.com/watch?v=Jgx64\\_Xfy8I](https://www.youtube.com/watch?v=Jgx64_Xfy8I), 2:51



Abbildung 49: EMU-Triebzug ABe4/12 „Allegra“ der RhB als Triebfahrzeug eines Personenzuges mit Güterbeförderung (PmG) unter 1 kV = auf der Berninabahn, © internet

Hinweis: die RhB ABe4/12 „Allegra“ verkehren auf der Berninabahn mit 1,0 kV DC Fahrleitungsspannung. In starken Steigungsabschnitten (bis 70‰) werden bei entsprechend großer Anhängelast beide Stromabnehmer an die Fahrleitung angelegt, um so die großen erforderlichen Ströme verschleißarm übertragen zu können. Diese betriebliche Maßnahme wäre bei 1,5kV und den kleinen Steigungen der Zillertalbahn nicht erforderlich.

## Vollelektrisch mit E-Lok

Sollte die Zillertalbahn entsprechend Sz1 oder Sz4 ab Jenbach bis Fügen durchgehend elektrifiziert werden und entscheidet man sich dafür, auch die Ladegleise elektrisch befahrbar zu machen (oder liegengebliebene E-Fahrzeuge anders fortzubewegen), besteht die Möglichkeit eine Elektrolokomotive als Einzelstück anzuschaffen.

Dafür bieten sich mehrere Hersteller aus dem U-Bahn- und Straßenbahn-Segment, bzw. dem Bergbausegment an, z.B. die Firma Schalke der NMT-Gruppe ([www.schalke.eu/de/](http://www.schalke.eu/de/)) ehem. „Schalker Eisenhütte“. In Österreich haben z.B. die Wiener Linien Service-Lokomotiven für den Einsatz auf beiderlei U-Bahn-Systeme (U1 – U5, U6) angeschafft. Ebenso hat die BVG Berliner Verkehrsbetriebe verschiedene Service-Triebfahrzeuge bezogen. Unter den Schmalspurbahnen hat die RhB Rätische Bahn 4 Stk. dieselektrische Lokomotiven mit 1,8MW Leistung Gmf 4/4 II 234 01 bis 234 04 2014 und 2015 für die Infrastrukturerhaltung erhalten (ursprüngliche Bezeichnung 287 01 bis 287 04).

Neben Schalke gibt es weitere in Frage kommende Firmen wie z.B. Heiterblick, etc. und Anbieter aus dem Baumaschinenbereich wie Plasser & Theurer etc. .

Die Sinnhaftigkeit bezüglich der Kosten (pro t km) muss außerhalb dieser Studie geklärt werden.

## Akku-Hybrid mit E-Lok

Schalke bietet neben kleinen Stückzahlen auch 2-System- und Hybrid-Lösungen an. Damit würde sich die über den Ladegleisen wegklappbare Oberleitung, Hilfsvorrichtungen oder betriebliche Vorsorgemaßnahmen vermeiden lassen.

Auch Plasser & Theurer bietet mit seinem E<sup>3</sup>-Konzept (Economic – Ecologic – Ergonomic) heute serienreife Hybridlösungen an und hat mit 760mm Spurweite Erfahrung.

Die Sinnhaftigkeit bezüglich der Kosten (pro t km) muss außerhalb dieser Studie geklärt werden.

## Biomasse-Antrieb

Vor rund zwanzig Jahren hat die DLM (Dampflokotivfabrik Winterthur) schwere 2'D2'-Neubaudampflokotiven für Spurweiten von 760 bis 1067mm angeboten. Diese können – je nach Spezifikation – mit allerlei Brennstoffen auch für einmännigen Betrieb ausgerüstet werden. Biomasse aus Holzabfällen der Fa. Binder oder von Bauern der lokalen Umgebung würden CO<sub>2</sub>-neutral und ohne große Transportkosten zu Verfügung stehen.

Gleichzeitig könnte diese Lösung als große Synergie die Betriebskosten des Nostalgieverkehrs reduzieren helfen und für Geschwindigkeiten und Fahrzeiten sorgen, die es künftig leichter machen werden, (moderne) Nostalgiefahrten in einen dichten Fahrplan einzubetten.

Auf eine Typenskizze wird hier verzichtet, sie findet sich unter:

[2D2\\_oliv\\_zyl\\_sw.pdf \(dlm-ag.ch\)](#) bzw.

[dlm-ag.ch/wp-content/uploads/2020/08/2D2\\_oliv\\_zyl\\_sw.pdf](http://dlm-ag.ch/wp-content/uploads/2020/08/2D2_oliv_zyl_sw.pdf)

## Industrie-Abdampf-Antrieb

Eine weitere CO<sub>2</sub>-neutrale Primärenergieform ist industrieller Abdampf mit Drücken bis 50 bar und mehr. Hier liegen positive Erfahrungen von diversen Brauereien (z.B. Haldengut), Chemiebetrieben (Halle/Saale), Stahlwerken (Thyssen-Krupp) und Raffinerien (ÖMV, Schwechat-Mannswörth) vor. Oftmals wurden diese unverwüstlichen Dampfspeicherlokomotiven nur deshalb von Dieselrangierlokomotiven abgelöst, weil nur diese als Ersatz angeboten worden sind. Bilder historischer Dampfspeicherlokomotiven finden sich unter Google „Dampfspeicherlokomotiven“, eine Liste in Wikipedia.

Wenn diese Energieform bei der Fa. Binder in ausreichendem Maße verfügbar gemacht werden kann – ein Hochdruckschlauchanschluss ist dann als letztes Glied ausreichend – dann stünde auch hier die DLM Winterthur als kompetenter Ansprechpartner zu Verfügung: „Bei der Dampfspeichertechnik wird die Fähigkeit von Wasser genutzt, unter Druck große Energiemengen zu speichern“

Kontakt:

[Fireless-technology - DLM - MODERN STEAM \(dlm-ag.ch\)](http://Fireless-technology-DLM-MODERN-STEAM.dlm-ag.ch)

[dlm-ag.ch/fireless-technology/](http://dlm-ag.ch/fireless-technology/)

## Transport H2

Neben der Möglichkeit, lokal in Mayrhofen elektrolytisch hergestellten und somit grünen Wasserstoff im Bahnbetrieb zu verwenden, kann sich die Zillertalbahn anbieten, dieses Gefahrgut sicher und zuverlässig während der Nachtstunden in Transportcontainerform nach Jenbach zu befördern (GGVSEB Gefahrgutverordnung Straße).

Die vorhandenen Rollwagen der Zillertalbahn und das nicht durch Tunneln eingeschränkte Lichtraumprofil bietet gute Voraussetzungen für den Transport von Wasserstoff in 20-Fuß ISO-Containern nach ISO 668 und eine Kooperation mit dem Verbund über den Bezug von Primärenergie hinaus.

Bemerkung: natürlich könnte man auch den Strom für die Elektrolyse aus dem Zillertal leiten, nur dazu müssen die Leitungen genügen und die Akzeptanz, dass die Wertschöpfung wo anders stattfindet. Wasserstoff als Energiespeicher und chemisches Element kann anders und mit anderen Margen gehandelt werden.

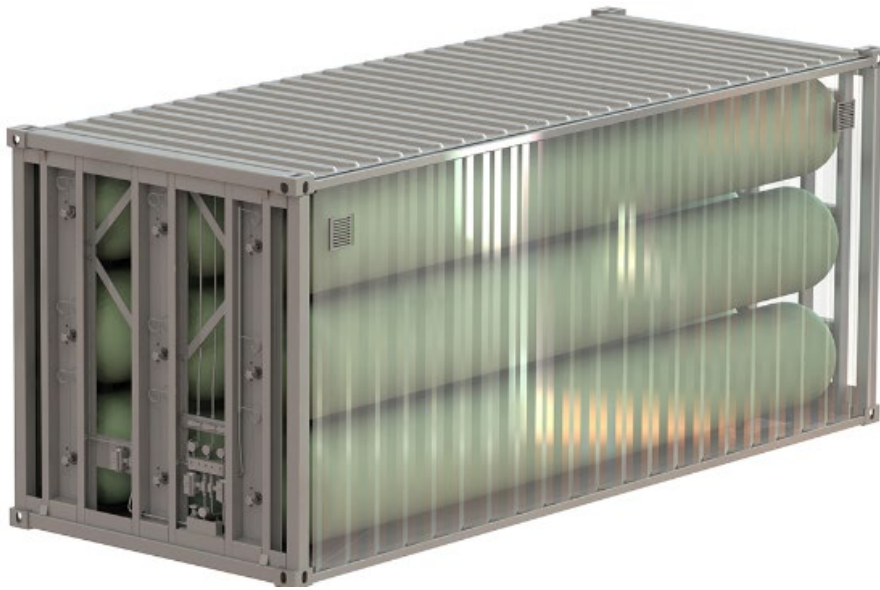


Abbildung 50: Beispiel eines 20“-Fuß ISO Wasserstoff-Transportcontainers mit liegender Behälterbauform,  
© [Unser Geschäftsfeld – Vernconex](https://www.vernconex.com/unser-geschaeftsfeld/), [vernconex.com/unser-geschaeftsfeld/](https://www.vernconex.com/unser-geschaeftsfeld/)



Abbildung 51: Beispiel eines 40“-Fuß ISO Wasserstoff-Transportcontainers mit stehender Behälterbauform  
© [Wasserstofftransportlösungen - NPROXX](https://www.nprox.com/de/transport-stationaere-speicherung/wasserstofftransport/) [www.nprox.com/de/transport-stationaere-speicherung/wasserstofftransport/](https://www.nprox.com/de/transport-stationaere-speicherung/wasserstofftransport/)



Abbildung 52: Beispiel eines 20“-Fuß ISO Wasserstoff-Transportcontainers in Kooperation mit DB  
 © Schienentransport von Wasserstoff soll Standard werden (vogel.de)  
[www.mm-logistik.vogel.de/schienentransport-von-wasserstoff-soll-standard-werden-a-954766/](http://www.mm-logistik.vogel.de/schienentransport-von-wasserstoff-soll-standard-werden-a-954766/)

## 5.9 Infrastruktur bei Hybrid-Konzepten

Bei den Hybrid-Konzepten sind Oberleitungsinseln anzudenken. Dieser entspricht den jüngsten Erkenntnissen, war 2018 derart noch nicht verfügbar, und setzt sich z.B. auch in den Planungen der ÖBB durch [42]. Hier werden drei denkbare Konzepte kurz vorgestellt, die aber fast beliebig im Rahmen betrieblicher und technischer Grenzen an lokale Gegebenheiten angepasst werden können:

- Oberleitung Jenbach – Fügen, Bhf. Mayrhofen
- Oberleitung Jenbach – Straß, Doppelspurabschnitte, Bhf. Mayrhofen
- Oberleitungsinseln anderen Enden in die jeweiligen Beschleunigungsabschnitte vorziehen

Die Oberleitungsinseln sollen in jedem Fall bereits das zukünftige System einer Vollelektrifizierung berücksichtigen. Die Zillertalbahn hat als nichtvernetzte Regionalbahn genau diesen Freiheitsgrad mehr, aus den Spannungssystemen bzw. Stromversorgungssystemen nach DIN EN50163 (2005-07) auszuwählen.

- 600 V DC
- 750 V DC
- 1500 V DC
- 3000 V DC
- 15 kV, 16 ⅔ Hz (seit 16. 10. 1995 12:00: 16,7 Hz, in A, D, CH, nicht bei NSB und SJ)
- 25 kV, 50 Hz

Vorteile von AC-Systemen und deren Energieeffizienz siehe [43]. Bei AC-Systemen gilt auch eine Ausnahme, nämlich das das Speisen von Oberleitungsinseln vorübergehend aus dem Ortsnetz mit 50Hz und z.B. 20 kV erfolgen kann und dann später mit dem Lückenschluss der durchgehenden Oberleitung auf das Bahnstromsystem 15kV 16,7Hz umgestellt wird, so die Fahrzeuge (im Wesentlichen die Transformatorenauslegung) beide Systeme zulässt. Gemäß [9] p193 scheidet das Stromversorgungssystem 1500 V DC für die Zillertalbahn am besten ab.

Bei Gleichstrom ist wiederum die Wahl eines Vielfachens der Akkuspeisespannung vorteilhaft, weil dann teure DC-DC-Wandler entfallen oder entsprechend kleiner Spannungsdifferenzen klein gemacht werden können. Im konkreten Fall bieten sich bei 8 LTO-Akkus mit je 800V Nominalspannung pro Triebzugende zwei Kreise serieller Akkus an. 1,5kV innerhalb der zulässigen Schwankungsbreite sind ideal für die 1,6kV Ladespannung. Dadurch kann kostengünstig eine sinnvolle Redundanz im Antriebsstrang erzielt werden. Analog bei 12 NMC-Akkus mit drei Strängen pro Zugende.

Die Entscheidung für ein Stromsystem hat Konsequenzen für Errichtungskosten, Unterwerke, Materialien (Isolatoren), etc. Die Errichtung einer vorsorglichen Maximallösung 25kV 50Hz ist am teuersten.

### Oberleitung Jenbach – Fügen (Sz4)

In diesem Konzept wird das Streckengleis über 10,3 km von Jenbach bis Fügen-Hart im Zillertal überspannt. Zusätzlich sind in Jenbach 2x 500 m und in Mayrhofen 500m weiterer Bahnhofsgleise, sowie in Rotholz 120 m, in Strass 500 m, in Schlitters-Bruck 1x 120 m und in Fügen-Hart 2x 500 m Kreuzungsgleise überspannt (damit ist das Anschlussgleis in Fügen zur Firma Binder in etwa abgebildet, nicht aber die Ladegleise selber analog zum Ladegleis Jenbach, siehe Kap. 5.8).

Die gesamte nominale Oberleitungslänge beträgt somit 13,487 km, es sind zwei Unterwerke in Jenbach (oder Strass) und in Mayrhofen vorgesehen.

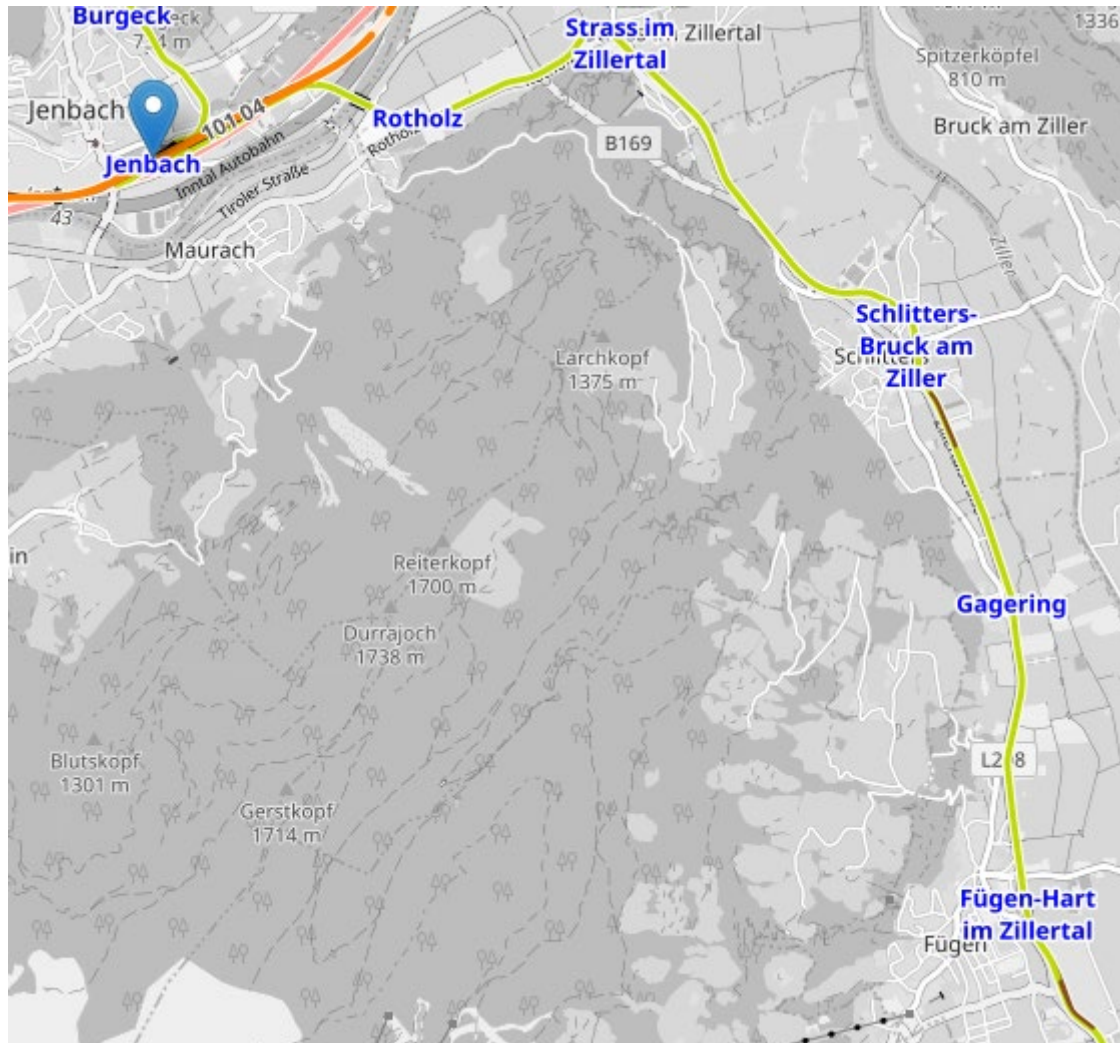


Abbildung 53: Oberleitungsabschnitt Jenbach – Fügen © openrailwaymap.org

### Oberleitung Doppelspurinseln (Sz5)

In diesem Konzept wird das Streckengleis von Bhf. Jenbach bis – Strass i.Z., die beiden Doppelspurinseln Kaltenbach-Stumm i.Z. – Aschau i.Z. und Zell a.Z. – Ramsau i.Z.-Hippach, sowie der Bhf. Mayrhofen überspannt. Zusätzlich werden in Jenbach 2x 500 m, in Rotholz 120 m, in Strass i.Z. 500 m und in Mayrhofen 500 m Bahnhofsgleise überspannt. Das Anschlussgleis der Firma Binder ist nicht berücksichtigt, ebenso etwaige Oberleitungsunterbrechungen unter Hochspannungsleitungen.

Die gesamte nominale Oberleitungslänge beträgt somit 20,523 km, es sind drei Unterwerke in Jenbach (oder Strass), in Kaltenbach (km 16) und in Ramsau (km 27), sowie eine stationäre Ladeeinrichtung in Mayrhofen (km 32) vorgesehen,

die ggf. per Erdkabel an das Unterwerk Ramsau angeschlossen werden kann (oder Ortsnetz, da keine Belastungsspitzen zu erwarten sind).

In den Bahnhöfen sind stets beide (alle) Hauptgleise mit Oberleitung bis zur gemeinsamen Abspannung im Bereich der jeweiligen Ausfahrtsweiche vorgesehen. Der Stromabnehmer wird im Stillstand gesenkt, die Ausfahrt erfolgt bereits ab Akku.



Abbildung 54: Oberleitungsabschnitt Jenbach – Strass i.Z. © openrailwaymap.org

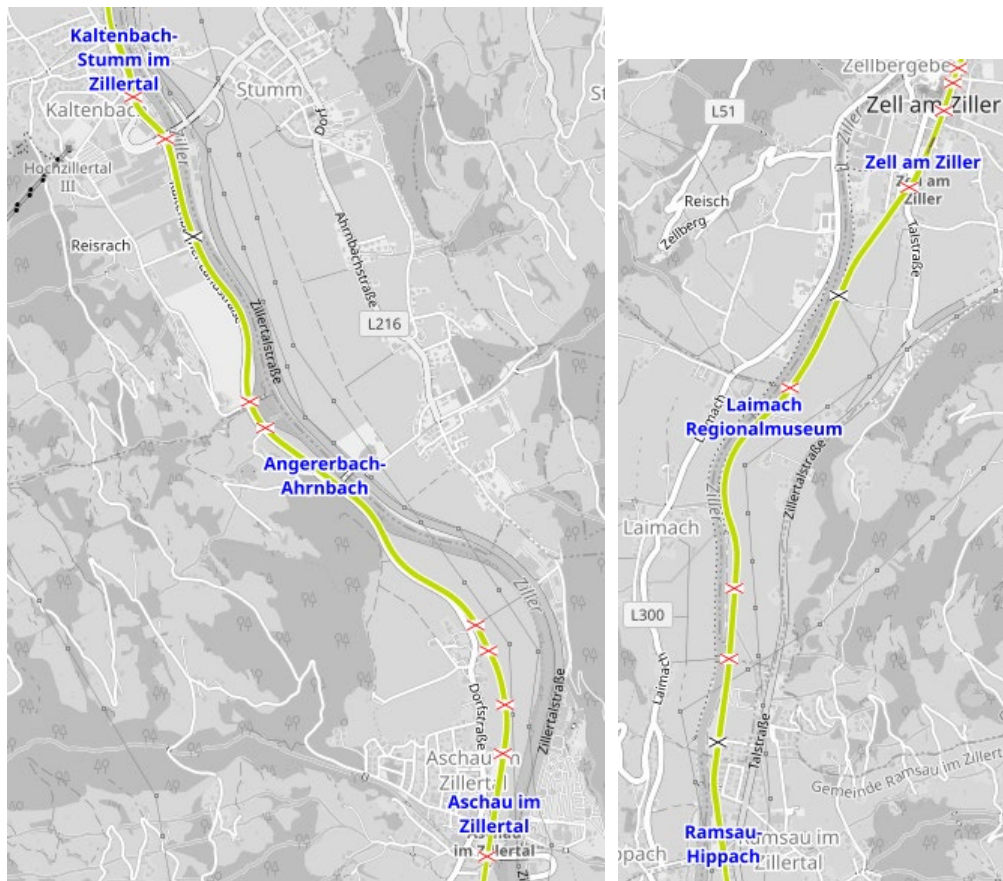


Abbildung 55: Oberleitungsabschnitte der Doppelspurinseln © openrailwaymap.org

Die beiden Doppelspurinseln sollen mit Mittelmasten elektrifiziert werden, um Probleme mit Grundstücksablösen für Mastfundamente zu minimieren. Die damit einhergehenden Kosteneinsparungen sind in der Vergleichskalkulation nicht berücksichtigt. Mehr- und Minderkosten bei Querung der Hochspannungsleitungen sind ebenfalls nicht berücksichtigt. In den Endbahnhöfen der Doppelspurabschnitte sind alle Bahnhofsgleise und Gleisverbindungen kalkuliert. Da ist nach [10] e.a. ein konservativer Ansatz, da üblicherweise in diesem Stadium einer Kostenabschätzung bei Bahnhofsgleise nur 50% Aufschlag und nicht eine Verdoppelung entsprechend der Gleiszahl zugrunde gelegt wird.



Abbildung 56: Oberleitungsabschnitt Bahnhof Mayrhofen © openrailwaymap.org

Im Bahnhof Mayrhofen werden zusätzlich zu der bis in Mitte Aufnahmegebäude reichende Streckenoberleitung alle vier Gleise mit je 125 m kalkuliert, um ausreichend Lademöglichkeiten für das nächtliche Stillager vorzusehen. Dass im Bahnhof Mayrhofen keine Kettenfahrleitung mit Trageseil, Hängern und Fahrdrabt, sondern nur der Fahrdrabt ( $v_{\max} = 25 \text{ km/h}$  ab Einfahrtssignal resp. Einfahrtsweiche) erforderlich ist, wird kalkulatorisch nicht berücksichtigt.

### Oberleitung Jenbach – Strass i.Z. und Bhf. Mayrhofen

Dieses Ladeinfrastrukturkonzept wurde am Ende der TUW-Studie mehrfach angesprochen und stellt eine minierende Mischung von Sz4 und Sz5 dar. Aus Sz5 wird der Abschnitt Bhf. Jenbach bis – Strass i.Z. (jedoch ohne die Ladeinseln Doppelspurabschnitte) und aus Sz4 und Sz5 der Bhf. Mayrhofen übernommen.

Da die Ladeinfrastruktur bei aktuell 5 resp. 6 Minuten Fahrzeit zwischen Strass und Jenbach und 1 Minute Wendezeit (bei 5 Zugsgarnituren) nicht ausreicht, um einen vollständigen Ladevorgang abzuschließen, ist dieser Fall grundsätzlich zu betrachten. Müssen die Akkus vergrößert werden für Hin- und Rückfahrt nach Teilladung – und das kann nicht kontinuierlich, sondern aus Symmetrie- und Redundanzgründen nur in diskreten Schritten erfolgen –, steigt die Fahrzeugmasse und somit der Traktions- und Nebenverbraucherenergiebedarf, die Kosten und der Wartungsaufwand.

Diese Betrachtung soll und kann in einer weiteren Projektphase zur Ladeinfrastruktur nach der grundlegenden Entscheidung für ein Antriebskonzept erfolgen. Eine pauschale Einschätzung hier ohne Überprüfung könnte falsche Erwartungen wecken.

### Oberleitung eingleisige Streckenabschnitte

Ebenso gegen Ende der TUW-Studie kamen unterschiedliche, von lokalen Interessen getriebene Wunschvorstellungen zur Ladeinfrastruktur auf. Einerseits wurde die Forderung aufgestellt, in den Ortschaften Oberleitung zu vermeiden und nur Abschnitte der freien Strecke zu elektrifizieren, andererseits genau gegenteilig das Landschaftsbild bei freien Streckenabschnitten, insbesondere der Doppelspurabschnitte nicht zu elektrifizieren und sich dafür Abschnitte entlang bewaldeter Abschnitte am Ziller-Fluß und innerhalb der Ortschaften zu suchen, wo eine gemeinsame Nutzung von neuen Oberleitungsmasten vorhandene Masten der Straßenbeleuchtung, Fahnen- und Werbeträger ersetzen können.

Auch diese Anregungen müssen in einer weiteren Projektphase rasch nach der Konzeptentscheidung untersucht und entschieden werden.

Zwei Bemerkungen dazu: das Zillertal ist in der glücklichen Lage, sich aufgrund der flachen und homogenen Streckenführung seiner Bahn die Lage der Ladeinfrastruktur aussuchen zu können. Wann und wo die Akkus der Sz4 und Sz5 während der Fahrt aufgeladen werden, ist grundsätzlich wählbar innerhalb der technischen Grenzen, dass die Akkus auch im gealterten Zustand einen gewissen Ladezustandsbereich (SoC, state of Charge) planmäßig nicht verlassen dürfen. Grundsätzlich gilt, dass

1. die Oberleitung der Ladeinfrastruktur bevorzugt dort errichtet wird, wo der **Traktionsenergiebedarf am höchsten** ist (also in langen, steilen Rampen bergwärts, um ein „Aussagen“ der Akkus zu vermeiden) und wo die zu-

lässige **Streckenhöchstgeschwindigkeit am kleinsten** ist (je langsamer der Zug fährt, desto kürzer kann der Oberleitungsabschnitt bei gleicher Ladezeit sein),

2. **die Kosten** für die Oberleitung und Unterwerke **auf eingleisigen Streckenabschnitten geringer** sind, da nur ein Streckengleis überspannt werden muss und die Spitzenlastauslegung der Unterwerke ggf. nur auf einen ausfahrenden Zug und nicht auf zwei gleichzeitig beschleunigende Züge ausgelegt werden muss. Die Belastung der Fahrleitung (Verschleiß durch Fahrdrabtüberschleifungen) verdoppelt sich, während sich die Anzahl der Unterwerk-Lastwechsel nahezu gleichbleibt (außer bei planmäßig wiederkehrenden zeitgleichen Zugsausfahrten). Der primäre Strombedarf wird über einen längeren Zeitraum auf niedrigerem Spitzenniveau verteilt.

## Oberleitung Doppelspurinseln plus

Hier wird die gleiche Topologie der Oberleitungsabschnitte zugrunde gelegt wie bei Sz5, jedoch mit Verlängern der Oberleitung aus dem jeweiligen Bahnhofsbereichen hinaus um rund 250m auf die freie, eingleisige Strecke.

Dies mit dem Ziel, den ersten Beschleunigungsvorgang noch unter Fahrleitung zu ermöglichen und damit den Akkumulator in seinen Ladezyklen weiter zu schonen.

Der Stromabnehmer wird im Fahren gesenkt, sei es durch den Triebfahrzeugführer oder durch den Verlust der Speisenspannung durch eine zunächst nach oben weg geführten und erst danach seitlich abgespannten Fahrdrabt. Da die Streckengeschwindigkeit bereits erreicht sein sollte, ist mit keinem verschleißintensiven Lichtbogen zu rechnen. Das Fahrzeug ist entsprechend zu spezifizieren.

Die gesamte nominale Oberleitungslänge beträgt somit 21,923 km, es sind die gleichen drei Unterwerke in Jenbach (oder Strass), in Kaltenbach (km 16) und in Ramsau (km 27), sowie eine stationäre Ladeeinrichtung in Mayrhofen (km 32) vorgesehen. Da die Auslegung der Unterwerke ohnehin auf den vollelektrischen Betrieb und den Betrieb Fahren & Laden auszulegen sind, ist keine spezielle Maßnahme zu ergreifen.

## Oberleitung bei späterem Infrastrukturausbau

Wird gemäß Pressemeldung vom 26.10.2023 [41] der Abschnitt Schlitters – Gagering bereits ab 2024 zweigleisig ausgebaut, so müssen selbstverständlich in Sz4 dort beide Streckengleise überspannt werden. Dabei handelt es sich um 1,760 km Haltestellenabstand, konservativ gerechnet müssten etwa 2km Oberleitungslänge bei Szenario Sz4 zuge schlagen werden. In Sz5 ist der Abschnitt nicht elektrifiziert.

Wie schon an zwei Stellen beschrieben, wirken sich spätere Lückenschlüsse hinsichtlich längere Akkulebensdauer positiv aus aufgrund der geringen Belastungszyklen (DoD, Depth of Discharge). Werden keine lebensdauerbegünstigenden Beschleunigungsverzögerungen im Akku-Betrieb vorgesehen (außer der generellen energiesparenden Fahrweise bei Normal- und Schwachlastbetrieb), kann eine höhere Fahrplanstabilität sichergestellt werden.

Die Gesamtoberleitungslänge (ohne den Zweigleisausbau Schlitters – Gagering) beträgt nach der hier angewandten Berechnungsmethode mit allen Nebengleisen 45,294km.

In Abbildung 57 wird die Datengrundlage dargestellt. Grau hinterlegte Flächen sind mit Oberleitung überspannt. Bei Bahnhöfen und Bahnhofsvorfelder werden nur die zusätzlichen Gleise gerechnet, da das durchgehende Hauptgleis von Bahnhofsmitte bis Bahnhofsmitte schon berücksichtigt ist. Die Spalten zeigen Sz5, Sz5-plus, Sz4 und Sz1, sowie das heutige und zukünftige VzG (Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten).

| Position                      |     |              |       |      | Infrastruktur |        |         |       |         |       |            |      |
|-------------------------------|-----|--------------|-------|------|---------------|--------|---------|-------|---------|-------|------------|------|
| Betriebsstelle                | Gl  |              | km    |      | Strecke       | OL min | OL opt. | OL Fü | OL voll | VzG   | vollelekt. |      |
| Mayrhofen im Zillertal        | 4   | Bhf.         | 31700 | 125  |               | 4      | 4       | 4     | 4       | 25    | 1,0        | 25,0 |
|                               | 1   | Bhf.-Vorfeld |       | 250  |               | 0      | 1       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 2950 | 2950          | 0      | 0       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Bichl im Zillertal            | x 1 | Hst.         | 28750 |      |               | 0      | 0       | 0     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 1145 | 1145          | 0      | 0       | 0     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
|                               | 1   | Bhf.-Vorfeld |       | 250  |               | 0      | 1       | 0     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
| Ramsau im Zillertal-Hippach   | 2   | Bhf.         | 27605 | 125  |               | 1      | 1       | 0     | 1       | 40    | 1,0        | 40,0 |
|                               | 2   | Strecke      |       | 3205 | 3205          | 2      | 2       | 0     | 2       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Laimach Regionalmuseum        | x 2 | Hst.         |       |      |               | 2      | 2       | 0     | 2       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 2   | Strecke      |       |      |               | 2      | 2       | 0     | 2       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Zell am Ziller                | 3   | Bhf.         | 24400 | 125  |               | 2      | 2       | 0     | 2       | 25    | 1,0        | 25,0 |
|                               | 1   | Bhf.-Vorfeld |       | 200  |               | 0      | 1       | 0     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 2000 | 2000          | 0      | 0       | 0     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
| Erlach im Zillertal           | x 1 | Hst.         | 22400 |      |               | 0      | 0       | 0     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 2070 | 2070          | 0      | 0       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 1   | Bhf.-Vorfeld |       | 250  |               | 0      | 1       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Aschau im Zillertal           | 3   | Bhf.         | 20330 | 125  |               | 2      | 2       | 0     | 2       | 40    | 1,0        | 40,0 |
|                               | 2   | Strecke      |       | 3824 | 3824          | 2      | 2       | 0     | 2       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Angererbach-Ahrnbach          | x 2 | Hst.         |       |      |               | 2      | 2       | 0     | 2       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 2   | Strecke      |       |      |               | 2      | 2       | 0     | 2       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Kaltenbach-Stumm im Zillertal | 3   | Bhf.         | 16506 | 125  |               | 2      | 2       | 0     | 2       | 40    | 1,0        | 40,0 |
|                               | 1   | Bhf.-Vorfeld |       | 250  |               | 0      | 1       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 1240 | 1240          | 0      | 0       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Ried im Zillertal             | x 1 | Hst.         | 15266 |      |               | 0      | 0       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 2738 | 2738          | 0      | 0       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Uderns im Zillertal           | 3   | Bhf.         | 12528 | 500  |               | 0      | 0       | 0     | 2       | 30    | 1,0        | 30,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 835  | 835           | 0      | 0       | 0     | 1       | 65    | 1,0        | 65,0 |
| Kapfing im Zillertal          | x 1 | Hst.         | 11693 |      |               | 0      | 0       | 0     | 1       | 65    | 1,0        | 65,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 1446 | 1446          | 0      | 0       | 0     | 1       | 65    | 1,0        | 65,0 |
| Fügen-Hart im Zillertal       | 3   | Bhf.         | 10247 | 500  |               | 0      | 0       | 2     | 2       | 30    | 1,0        | 30,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 2047 | 2047          | 0      | 0       | 1     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Gagering                      | x 1 | Hst.         | 8200  |      |               | 0      | 0       | 1     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 1760 | 1760          | 0      | 0       | 1     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Schlitters-Bruck am Ziller    | x 3 | Hst.         | 6440  | 120  |               | 0      | 0       | 1     | 1       | 30    | 1,0        | 30,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 2970 | 2970          | 0      | 0       | 1     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
|                               | 1   | Bhf.-Vorfeld |       | 250  |               | 0      | 1       | 0     | 1       | 70    | 1,0        | 80,0 |
| Strass im Zillertal           | 2   | Bhf.         | 3470  | 500  |               | 1      | 1       | 1     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 1505 | 1505          | 1      | 1       | 1     | 1       | 60    | 1,0        | 60,0 |
| Rotholz                       | x 2 | Hst.         | 1965  | 120  |               | 1      | 1       | 1     | 1       | 65    | 1,0        | 65,0 |
|                               | 1   | Strecke      |       | 1965 | 1965          | 1      | 1       | 1     | 1       | 65    | 1,0        | 65,0 |
| Jenbach                       | 2   | Bhf.         | 0     | 500  |               | 2      | 2       | 2     | 2       | 65    | 1,0        | 65,0 |
|                               |     |              |       |      |               | 31700  | 20523   | 21973 | 13487   | 45294 |            |      |

31700 20523 21973 13487 45294

Abbildung 57: Übersicht der Oberleitungsabschnitt, ©MfV

## Optische Verträglichkeit der Oberleitung

In Österreich sind Betonmasten der Fa. MABA in einem hellen Grauton weit verbreitet. Oftmals werden diese für die Montage von Speiseleitungen, Rückleiter in wesentlich längerer Bauform als die für Montage von Fahrleitung und Tragseil notwendige Höhe von rund 6m über SOK (Schienenoberkante) angewandt. Das kann auf die Wahrnehmung in sensiblen Umfeld störend wirken.



Abbildung 58: typischer Oberleitungsmasten mit Speiseleitung im Osttiroler Pustertal,  
© stock.adobe.com/201472812, © Plasser&Theurer

Das Problem von in die Landschaft eingebetteter Fahrleitungsmasten kann unterschiedlicher Art gelöst werden. In [11] wird die Möglichkeit lackierter feuerverzinkter Stahlmasten der Kostenkalkulation berücksichtigt. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von Holzmasten wie z.B. an der 2022 neu gebauten Oberleitung der 12,4km langen Tramway du Mont-Blanc (TMB) in Saint-Gervais-les-Bains in Frankreich (1047 m bis 2372 m Seehöhe).

Im Anwendungsfall der Zillertalbahn sollten die Masten nicht direkt fundiert werden, sondern wie Stahlmasten eine klassische 4-Schrauben-Sollbruchstelle gegen das Betonfundament aufweisen, um im Schadensfall einen schnellen Austausch zu ermöglichen. Durch die Trennung von Fundament und Masterrichtung können die Baumaßnahmen auch in kürzeren nächtlichen Betriebspausen umgesetzt werden. Der Nachteil kürzerer Lebensdauer kann durch Vorteile lokaler Wertschöpfung kompensiert werden. Mittelmasten in Zweigleisabschnitten sind statisch symmetrisch belastet, wodurch das höhere Gewicht einer Kettenfahrleitung einander gegenseitig kompensiert. Speise- und Rückleitungen bis 55 kV wären mit Vorteil im Erscheinungsbild als teurere Erdleitungen in Kabeltrögen am Rand des Schotterbettes zu verlegen.

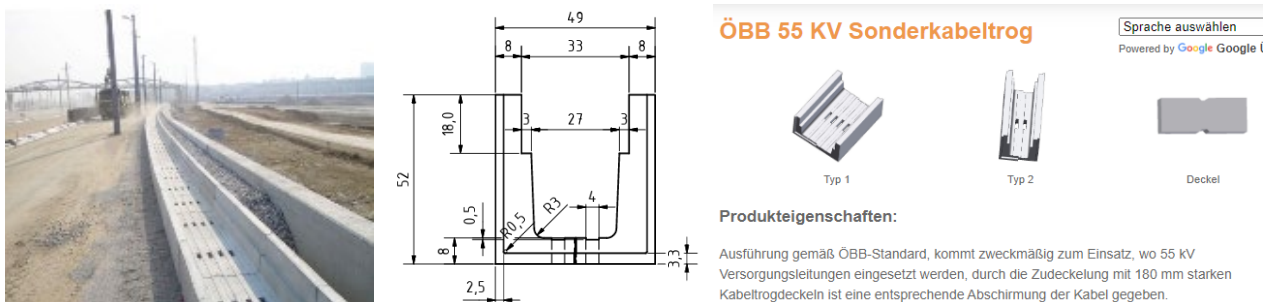


Abbildung 59: 55 kV Kabeltröge für Erdleitungen entlang der Bahntrasse, © [www.gerocret.at](http://www.gerocret.at)



Abbildung 60: originale und neue Oberleitungsmasten der TMB während der Erneuerung bei vollem Planbetrieb, im hinten liegenden Streckenabschnitt ist die Oberleitung vorhanden, aber nicht ersichtlich, © MfV 3128

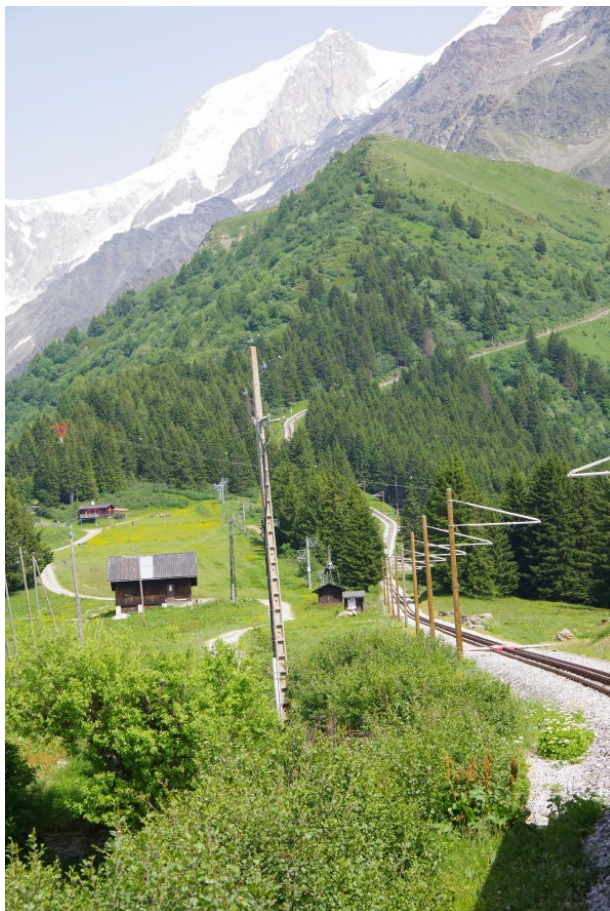


Abbildung 61: neue Oberleitungsmasten der TMB aus Holz (links) und folienbeschichtetem Stahl in Holzoptik (rechts)  
© MfV 3110, 3137



Abbildung 62: direkte Fundierung der Holzasten mit Faulschutz, Doppelholzmasten für Aufnahme der Querseile (Turmmasten) bei der TMB, © MfV 3052, 3096



Abbildung 63: Einspeisung und Abschnittstrennung mit Holzmasten bei der TMB, © MfV 3039



Abbildung 64: Weite Strecken der normalspurigen Hauptbahn Oslo – Bergen sind mit Holzmasten elektrifiziert mit Tragseil (Kettenwerk), 15kV 16 2/3 Hz und Geschwindigkeiten bis 130km/h, © www.blockstelle.de Jan-Geert Lukner



Abbildung 65: Doppelholzmasten von Furrer & Frey in lawinengefährdeten Abschnitten am Oberalppass der Matterhorn-Gotthard-Bahn MGB, 11 kV 16,7Hz, © MfV 3703

Der kurze Mastenabstand der MGB in Bögen ist der extrem schmalen Schleifenleistenbreite geschuldet, die wegen des Furka-Scheiteltunnels eingeführt worden ist. Früher verwendete windschief gespannte Oberleitung ist einer vertikalen

Aufhängung gewichen. Das zulässige kleine Querspiel des Fahrdrabes bei der Polygon-Verlegung des Fahrdrabes wiederum gepaart mit kleinen Bogenradien bis 100 m verursachen unschöne Mastenanhäufungen.



Abbildung 66: Negativbeispiel extrem kleiner Mastabstände von unter 15 m im 100 m Bogen des Bugnei-Viadukt der MGB zwischen Sedrun und Distentis/Muster, Graubünden, Schweiz © MfV 3784, MfV 8571



Abbildung 67: Windschiefe Fahrleitung zur Vermeidung hoher Mastdichten, Pilatusbahn bei Luzern © MfV 8177, Uzi

## 5.10 Zusammenfassung Antriebsszenarien

Die hier abgebildeten Zahlenwerte entstammen der fahrdynamischen Berechnung. Die Fahrzeit-Berechnungen sind präzise mit dem Programm OpenTrack (<http://www.opentrack.ch>, Dr. D. Hürlimann, ETC Zürich bzw. [www.opentrack.at](http://www.opentrack.at) Dr. A. Schöbel) ermittelt und anhand anderer Programme (z.B. [40]) sowie aktueller Fahrplandaten kalibriert.

Die daraus abgeleiteten Traktionsenergie-Anforderungen am Rad entsprechen nicht der Traktionsenergie ab Primär-energie bzw. werden über Wirkungsgrad wie angeführt rückgerechnet. Das war eine erste gute Näherung ohne Berücksichtigung der Rekuperation beim Bremsen oder der Laufwiderstände, die aus Zeitgründen nicht der präziseren Energieermittlung nach [40] angeglichen wurde. Für einen detaillierten Abgleich wäre mehr Zeit und Aufwand erforderlich. Für den relativen Vergleich unterschiedlicher Konzepte ist die Kombination beider Vorgangsweisen ausreichend.

| Beschreibung                   |                     | Diesel-Wende-zug | Voll elektr. „bb“ | Wasserstoffzug | Akku-Zug ex FAL | Akku-Hybrid ex FAL | Akku-Hybrid opt. |
|--------------------------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------|
| Szenario                       |                     | Sz0              | Sz1               | Sz2            | Sz3             | Sz4                | Sz5              |
| Wagenzahl                      |                     | 4                | 3(*)              | 4              | 3*              | 3*                 | 3*               |
| Länge 3-teiler<br>4-teiler     | [m]                 | 68,5             | 57,8<br>(76,4*)   | 76,4           | 56<br>(75,5*)   | 56<br>(75,5*)      | 56<br>(75,5*)    |
| Masse                          | [t]                 | 151,4            | 118,4             | 164            | 121,2           | 122,2              | 120,3            |
| Kapazität 3-teiler<br>4-teiler | [Pers]              | 323              | 303<br>(413*)     | 373            | 278<br>(392*)   | 278<br>(392*)      | 278<br>(392*)    |
| Adhäsionsmasse                 | [t]                 | 58               | 88                | 90,4           | 86,0            | 87,0               | 85,1             |
| max. Geschw.                   | [km/h]              | 80               | 100               | 100            | 100             | 100                | 100              |
| Lstg. Am Rad                   | [kW]                | 500              | 1400              | 1400           | 1400            | 1400               | 1400             |
| Anfahrzugkraft                 | [kN]                | 161              | 180               | 180            | 180             | 180                | 180              |
| Akku-Kapazität                 | [kWh]               | -                | -                 | 310            | 650             | 650                | 264              |
| Verzögerung                    | [m/s <sup>2</sup> ] | 0,8              | 1,0               | 1,0            | 1,0             | 1,0                | 1,0              |
| Beschleunig. m.OL              | [m/s <sup>2</sup> ] | -                | 1,0               | -              | -               | 1,0                | 1,0              |
| Beschleunig. o.OL              | [m/s <sup>2</sup> ] | 0,65             | -                 | 1,0            | 0,9             | 0,9 (1,0)          | 0,9 (1,0)        |

| Betriebssimulation   |         | Sz0         | Sz1              | Sz2               | Sz3         | Sz4         | Sz5         |
|----------------------|---------|-------------|------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Fahrzeit MA–JB       | [min:s] | 50:17       | 45:33            | 45:56             | 45:48       | 45:34       | 45:34       |
| Fahrzeit JB–MA       | [min:s] | 51:06       | 45:17            | 45:47             | 45:29       | 45:19       | 45:19       |
| Energie MA–JB        | [MJ]    | 657         | 620              | 796               | 633         | 634         | 625         |
| Energie JB–MA        | [MJ]    | 835         | 785              | 1004              | 796         | 801         | 793         |
| Energie MA-JB-MA     | [MJ]    | 1492        | 1405             | 1800              | 1429        | 1435        | 1418        |
| am Rad MA-JB-MA      | [kWh]   | 414,4       | 390,3            | 500               | 397,0       | 398,6       | 393,9       |
| pro Jahr (38x365 UL) | [GWh]   | 5,75        | 5,41             | 6,94              | 5,51        | 5,53        | 5,46        |
| Kosten [0,15ct/kWh]  | [k€]    | 862,5       | 811,5            | 1041              | 826,5       | 826,5       | 819         |
| Kosten               | €/kWh   | 1,20/9,8    | 0,15             | 0,15 0,045        | 0,15        | 0,15        | 0,15        |
| Wirkungsgrad         | η       | 0,45*       | 0,95**           | 0,27 0,89         | 0,89[*]     | 0,91[*]     | 0,93[*]     |
| Kosten               | [k€]    | 1565        | 854              | 3855 1170         | 929         | 912         | 881         |
| Sitzplatz+Klappsitz  | [#]     | 179         | 171 187          | 196               | 187         | 187         | 187         |
| Kosten/Sitzplatz     | [k€]    | <b>8,74</b> | <b>4,99 4,57</b> | <b>19,67 6,00</b> | <b>4,97</b> | <b>4,88</b> | <b>4,71</b> |
| Kapazität            | [#]     | 323         | 303              | 373               | 278         | 278         | 278         |
| Kosten/Kapazität     | [k€]    | <b>4,85</b> | <b>2,82</b>      | <b>10,34 3,14</b> | <b>3,34</b> | <b>3,28</b> | <b>3,17</b> |
| ΔKosten/Jahr         | [k€]    | <b>+711</b> | <b>0</b>         | <b>+3001 +316</b> | <b>+75</b>  | <b>+58</b>  | <b>+43</b>  |

Abbildung 68: Fahrdynamische Berechnungsergebnisse im Vergleich der untersuchten Konzepte

Ein **erstes Ergebnis** ist die Erkenntnis, dass alle Antriebskonzepte die geforderten Fahrzeiten erfüllen können.

Ein **zweites Ergebnis** ist die Reihenfolge bezüglich der Primäre-Energiekosten pro Jahr (bei gleichen Betriebsanforderungen): Sz1 – Sz5 – Sz4 – Sz3 – Sz0 – Sz2. Also vollelektrischer Betrieb vor Akku-hybrid-optimiert. Nach dieser groben Abschätzung liegen alle rasch realisierbaren Antriebskonzepte (alle außer Sz1) ca. 2,3 bis 2,9 Mio. Eur pro Jahr günstiger als der Wasserstoffantrieb.

Wendet man für den Wasserstoffantrieb spezielle Vertragskonditionen an, die einen gleichen Kostensatz wie bei einem elektrischen Betrieb sicherstellen, dann vertauschen Dieselbetrieb und Wasserstoffbetrieb die Plätze. Die verbleibenden alternativen Antriebskonzepte sind rund 275 k€ bis 240 k€ pro Jahr günstiger.

Wie sich diese grobe Abschätzung unter Berücksichtigung der Investitions- und Erhaltungskosten verändert, ist in Kap. 8 nachzulesen.

Hier wurden alle Züge mit permanenter Volllast auslastung gerechnet. Weitere Parameter, die hier verwendet wurden:

Umrechnung der **Treibstoffkosten** Diesel auf elektr. kWh:

Dieselpreis: Heizöl 120,1€/100l bei 9,8kWh/l (Stand 13.12.23)

© [www.bmk.gv.at/themen/energie/preise/aktuelle\\_preise.html](http://www.bmk.gv.at/themen/energie/preise/aktuelle_preise.html)

**CO2-Strafsteuern:**

1L Diesel verursacht 2,64kg CO<sub>2</sub>:

1 t CO<sub>2</sub> entspricht somit 378,78 L Diesel oder 3712 kWh Strom)

Treibstoffpreise 2023

| Stichtag   | Diesel | Eurosuper | Normal | Super Plus | Heizöl Extraleicht: ab 2000 Liter | Heizöl Extraleicht: Tankstelle |
|------------|--------|-----------|--------|------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 11.12.2023 | 1,617  | 1,506     | 1,511  | 1,727      | 1,201                             | 1,429                          |

Strafsteuern wirken sich wie folgt aus (bei 5,75 GWh):

- 50 €/t: + 0,0135 €/kWh + 77,625 k€/a
- 200 €/t: + 0,0539 €/kWh + 310,500 k€/a
- 500 €/t: + 0,1347 €/kWh + 776,250 k€/a

Abschätzung nur über die Wirkungsgrade berücksichtigten **Nebenverbraucher** (JR 16.12.23):

- HVAC (Klima, Heizung) pro Wagenkasten: 15kW x 3 45 kW
- Akku-Chiller: 2kW pro 50kWh installierter Akku-Kapazität unabhängig von der Bauart x 13 26 kW
- Kühlleistung für Stromrichter pro Triebdrehgestell 2,5kW x 4 10 kW
- (alternativ 1,5 kW für 0,4 m<sup>3</sup>/s Motorlüftungsluftstrom pro Fahrmotor [Bachner, Schreilechner?]) (x 8 12 kW)
- pro Zug für Kompressor, Steuerelektronik, Zugsicherung-Onboard-Unit, ... ~6kW x 1 6 kW
- HVAC pro aktivem Führerstand ~5kW x 1 5 kW
- FIS, Türen, etc. pro Wagenkasten ~2kW x 3 6 kW
- Summe (Auslegung, nicht im Dauerbetrieb) 98 kW

(\*) **Wirkungsgrad** Dieselmotor 30% ([40] p28) ohne Pufferbatterie, 45% nur im optimalen Betriebspunkt.

(\*\*) **Wirkungsgrade** aus Berechnungsdatenblatt ([40] LR Zellen D56 – D63).

Wirkungsgrad rein **E-Motor**: 90 – 99% im stationären Betrieb, gemittelt über Zeit im Fahrbetrieb ggf. bei 93%

Stromrichter: hat nicht in allen Betriebspunkten den gleichen Wirkungsgrad, geringere Bandbreite von ca. 9%-Punkte

(\*\*\*) **Wirkungsgrad Brennstoffzelle** zusätzlich zu Traktions-Pufferbatterie:

Verbrauch: 0,126 bis 2 g H<sub>2</sub>/kWh

Elektrolyse: 33 kWh/1000 g H<sub>2</sub> => 0,033 kWh/gH<sub>2</sub>

[© : [www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf](http://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf)]

Bandbreite von 0,126 g H<sub>2</sub>/kWh: 0,004158 kWh/kWh

bis 2,000 g H<sub>2</sub>/kWh: 0,066 kWh/kWh

Wirkungsgrad Brennstoffzelle: zw. 8 und 86% je nach Betriebspunkt [© Stadler-Dok.]

Brennstoffzelle: Ballard PowerSystem 100kW EoL (End of Life):

Datenblatt: peak efficiency: 57%

Die Elektrolyse weist einen Wirkungsgrad von 60 bis 70 Prozent auf. Und auch bei der Umwandlung des Wasserstoffs in Strom geht Energie verloren. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle liegt je nach Anwendung bei etwa 50 Prozent.

<https://www.sfc.com> › glossar › wirkungsgrad-der-bre... (© SFC Energy AG):

Der elektrische Wirkungsgrad der PEM-Brennstoffzelle liegt bei 32 Prozent bis 37 Prozent.

Ihr gegenüber liegt die Bandbreite des Wirkungsgrads der SOFC- ...

**Marktpreise Wasserstoff:** [www.h2.live](http://www.h2.live): **H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa**

Annahme: Verkauf mit 20% Marge

mittlerer Verkaufspreis z.B. 15,85 €/kg / 1,2 ergibt 13,2 €/kg Industriepreis inkl. MWSt, und 11,0 €/kg ohne MWSt.

**Optimierte Umläufe:**

In Abbildung 68 wurde ein homogener Fahrplan gleich über alle Tage zugrunde gelegt. Dabei wird der vierteilige Wasserstoffzug gegenüber den dreiteiligen alternativen Antriebskonzepten benachteiligt. Eine genauere Abschätzung mit Berücksichtigung der erhöhten Nachfrage bei 5 Umläufen an Werktagen, die bei den dreiteiligen Zügen die Mitnahme eines 4. Zusatzwagens erfordern, erhöhen den Energieverbrauch dort. Mit folgenden Annahmen

- an Werktagen (249): 5 Umläufe mit (4+1) Steuerwagen (4-teilig), sonst 3-teilig
- an Sa, So, Ftg (116): alle Umläufe 3-teilig

verändert sich Abbildung 68 zu

| <b>Traktionsenergie</b> |        | Sz0         | Sz1              | Sz2               | Sz3         | Sz4         | Sz5         |
|-------------------------|--------|-------------|------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| per Umlauf Kurzzug      | [MJ]   | 1492        | 1405             | 1800              | 1429        | 1435        | 1418        |
| 12625x                  | [kWh]  | 414,4       | 390,3            | 500               | 397,0       | 398,6       | 393,9       |
| Massenverhältnis        |        | x1,232      | x1,297           | x1                | x1,290      | x1,288      | x1,293      |
| per Umlauf 4-tlg        | [MJ]   | 1838        | 1822             | 1800              | 1843        | 1848        | 1833        |
| 1245x                   | [kWh]  | 510,6       | 506,2            | 500               | 512,1       | 513,4       | 509,3       |
| pro Jahr (38x365 UL)    | [GWh]  | 5,87        | 5,56             | 6,94              | 5,65        | 5,67        | 5,61        |
| Kosten [0,15ct/kWh]     | [k€]   | 880,1       | 833,7            | 1041              | 847,5       | 850,7       | 841,1       |
| Kosten                  | €/kWh  | 1,20/9,8    | 0,15             | 0,15[?]           | 0,15        | 0,15        | 0,15        |
| Wirkungsgrad            | $\eta$ | 0,45        | 0,95             | 0,27 0,89         | 0,89[*]     | 0,91[*]     | 0,93[*]     |
| Kosten                  | [k€]   | 1597        | 878              | 3855 1170         | 952         | 935         | 905         |
| Sitzplatz+Klappsitz     | [#]    | 179         | 171 187          | „187“             | 187         | 187         | 187         |
| Kosten/Sitzplatz        | [k€]   | <b>8,92</b> | <b>5,13 4,70</b> | <b>20,62 6,26</b> | <b>5,09</b> | <b>5,00</b> | <b>4,84</b> |
| Kapazität               | [#]    | 323         | 303              | „278“             | 278         | 278         | 278         |
| Kosten/Kapazität        | [k€]   | <b>4,94</b> | <b>2,90</b>      | <b>13,87 4,21</b> | <b>3,42</b> | <b>3,36</b> | <b>3,26</b> |
| $\Delta$ Kosten/Jahr    | [k€]   | <b>+719</b> | <b>0</b>         | <b>+2977 +292</b> | <b>+74</b>  | <b>+57</b>  | <b>+27</b>  |

Abbildung 69: Fahrdynamische Berechnungsergebnisse optimierter Umläufe im Vergleich der untersuchten Konzepte

Ein **drittes Ergebnis** ist, dass diese verfeinerte Betrachtung die Zahlen nur marginal beeinflusst und die Reihenfolge der Konzepte nicht verändert.

Ein **viertes Ergebnis** ist, dass ein Zusatzwagen zu den dreiteiligen Akku-Hybrid-Zug nach Sz4 (NMC-Zellen) und Sz5 (LTO-Zellen) keine Beschleunigungsreduktion bedingt, um die vorgegebenen Stromabgabemengen der Traktionsakkumulatoren während des Anfahrens nicht zu überschreiten.

## 6 Beurteilungsindikatoren

Die Beurteilungskriterien zur betriebswirtschaftlichen vergleichenden Abschätzung der unterschiedlichen Antriebskonzepte umfassen grundlegend die folgenden fünf Größen:

- Fahrzeugbeschaffungskosten
- Fahrzeugerhaltungskosten
- Infrastrukturkosten
- Infrastrukturerhaltungskosten
- Betriebskosten

Diese Größen werden grundsätzlich nur als differentielle Größen, nicht aber als absolute Größen betrachtet. Es werden also nur jene Kostenpositionen herangezogen, in denen sich die verschiedenen Antriebskonzepte unterscheiden. Beispielsweise werden die Personalkosten für Triebfahrzeugführer und Zugbegleitpersonal NICHT angeführt, da diese für alle untersuchten Antriebskonzepte gleich, also invariant angenommen werden.

In die Betriebskosten gehen im Wesentlichen folgende Größen ein:

- Primärenergiekosten (Strom, Wasserstoff, Diesel, ...)
- CO<sub>2</sub>-Strafsteuern als Äquivalent, wenn kein emissionsfreier Betrieb umgesetzt wird
- Austausch von Großkomponenten, die antriebsspezifisch sind und zyklisch getauscht werden müssen (Akku, Brennstoffzellen)
- Risikoaufschläge durch Lieferanten (Wartungsverträge)

Die **wesentlichen Beurteilungsindikatoren** sind in absteigender Reihenfolge der Priorisierung die

- *Differentiellen Betriebskosten*  
pro km planmäßiger Zugsfahrt in Eur/Zkm
- *Differentiellen Gesamtkosten* (inkl. Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur und deren Erhaltung)  
pro km planmäßiger Zugsfahrt in Eur/Zkm
- *Differentiellen Gesamtkosten*  
pro Sitzplatzkilometer in Euro-Cent ct/Spkm

**Langfristig gesehen sind also die Betriebskosten als dominant** zu betrachten, einerseits weil der Betrachtungszeitraum von 30 Jahren für eine derartige Daseinsvorsorge in der Mobilitätsinfrastruktur (d.h. das Angebot „öffentlicher Verkehr“) relativ kurz angesetzt ist und andererseits, weil jeglicher zukünftiger Kapazitätsausbau diesen Indikator besonders stark gewichtet.

Zahlenmäßig **nicht berücksichtigt** sind Indikatoren, die nur schwer unstrittig monetisiert werden können, gleichwohl sie jedoch in der finalen Konzeptempfehlung **zwingend zu berücksichtigen** sind:

- Absolute Streckenkapazität (Sitzplätze pro Tag in beiden Fahrrichtungen mit Verstärker-Optionen), also der Kipppunkt für zukünftige große Ausbauminvestitionen
- Umsetzungsdauer in Jahren
- Etappierungsmöglichkeiten der Investitionen
- Flexibilität für zukünftige Betriebsanpassungen
- Risiko-Zuschläge, sofern sie nicht in Lieferanten-Angeboten berücksichtigt werden
- Aufwand für Projektmanagement und Verwaltung

Ebenfalls nicht quantitativ bewertet sind **der Mehrwert eines attraktivierten öffentlichen Verkehrsangebotes** per se und der **Mehrwert als Bestandteil einer Innovationsregion**. Dabei darf angenommen werden, dass jedes Antriebskonzept außer Dieselantrieb und Vollelektrifizierung aus heutiger Sicht als innovativ dargestellt werden kann und soll.

Das Konzept der **Akku-Hybrid-Antriebe** mit betrieblichen Ladeinseln für Eisenbahnen **ist jung und innovativ** und bisher nur selten genutzt (Straßenbahnen in historischen Altstädten). Das gemeinsame Optimieren von Fahrzeug und Infrastruktur ermöglicht schrittweise Investitionen, es kann der volle **Nutzen bereits VOR Abschluss der langfristigen Gesamtinvestition** lukriert werden.

## 7 Betriebssimulation

Die im Kap. 5.10 vorgezogen dargestellten Simulationsergebnisse bezüglich fahrzeit und Traktionsenergie wurden mit der gleichen Datengrundlage ermittelt wie auch in anderen hier zu untersuchenden Studien.

### 7.1 mit RailSys

Schon vor 2021 wurde die mögliche erzielbare Fahrzeit von Jenbach nach Mayrhofen und retour auf Basis des VzG-Geschwindigkeitsbandes für das Wasserstofffahrzeug ermittelt (Abbildung 70). Dabei wurden bereits neue Höchstgeschwindigkeiten von 80 km/h und Beschleunigungen bis  $1,0 \text{ m/s}^2$  zugrunde gelegt.

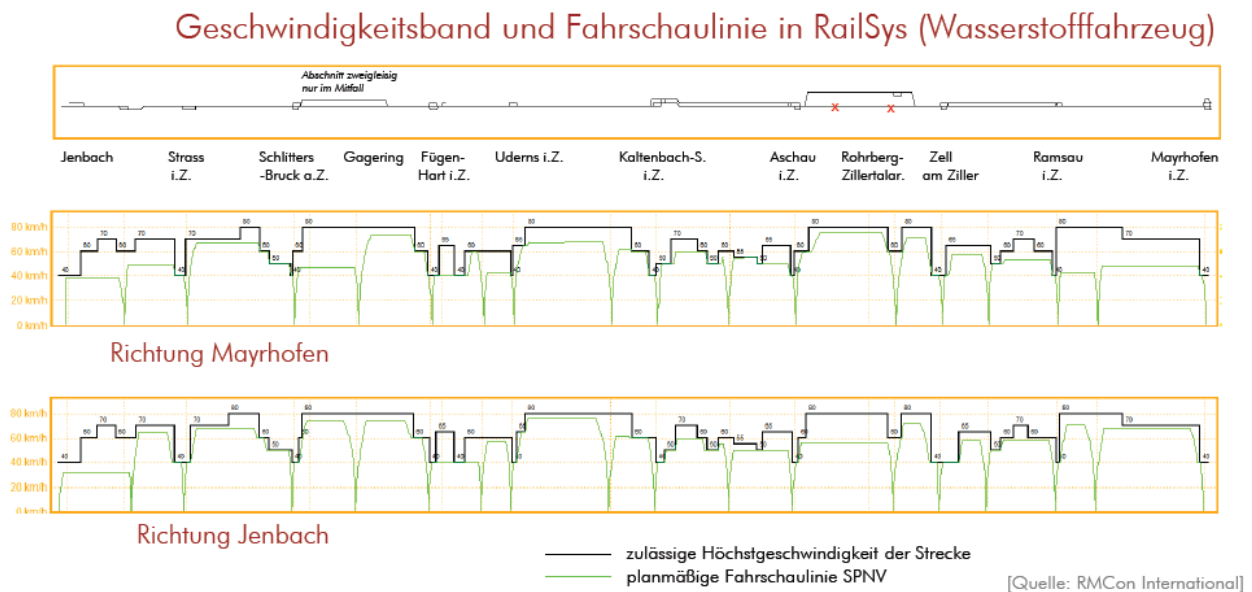


Abbildung 70: Geschwindigkeitsband Zillertalbahn nach [4] p15

Diese Berechnungen können bestätigt werden.

### 7.2 mit Open Track

Mit OpenTrack wurden die Konzeptvarianten systematisch auf Basis der zukünftigen Streckendaten ermittelt

Abbildung 71 zeigt exemplarisch das Geschwindigkeitsprofil und den Leistungsbedarf einer Zugfahrt am Rad mit einem vollelektrischen dreiteiligen Triebzug von Mayrhofen nach Jenbach nach Sz1, jedoch ohne Rekuperation der Bremsenergie. Die kumulierte Energie von 620 MJ beträgt umgerechnet 172 kWh Traktionsenergieverbrauch am Rad und ist im blauen Grafen rechts (nach 31,7km Fahrt) mit der linken Skala abzulesen.

Das Geschwindigkeitsband zwischen 0 und 80 km/h ist an der rechten Skala über die Fahrstrecke ablesbar.

Die Berechnungsfälle der anderen Szenarien und Fahrrichtungen sind in der Darstellung vergleichbar und hier nicht wiedergegeben.

Abbildung 72 zeigt die typische Darstellung der betrieblichen Blockbelegungszeiten einer eingleisigen Strecke, die nur bei den Zugskreuzungen in den Doppelspurinseln aufgebrochen wird. Aufgrund der Ähnlichkeit mit den anderen Antriebsszenarien werden diese hier nicht abgebildet.

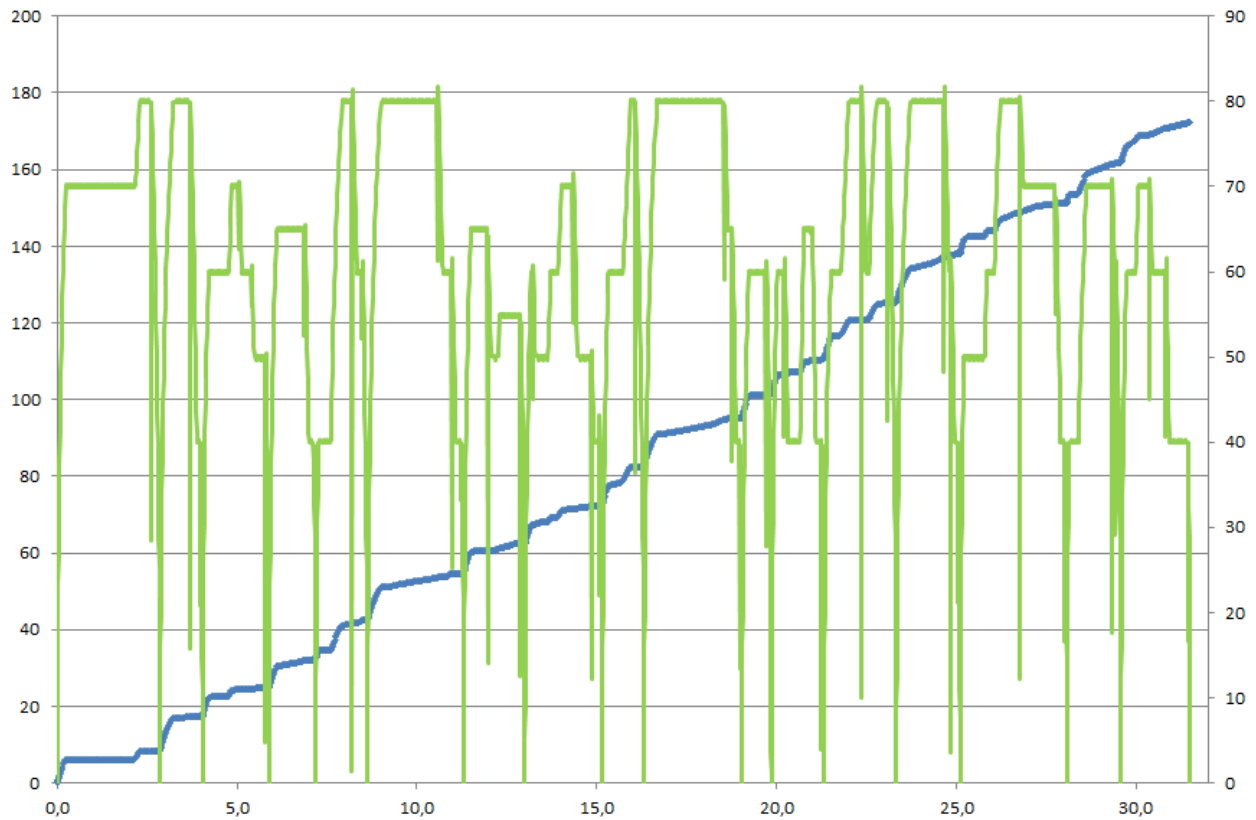


Abbildung 71: Geschwindigkeitsprofil und Leistungsbedarf einer Zugfahrt von MA nach JE nach Sz1, ohne Rekuperation

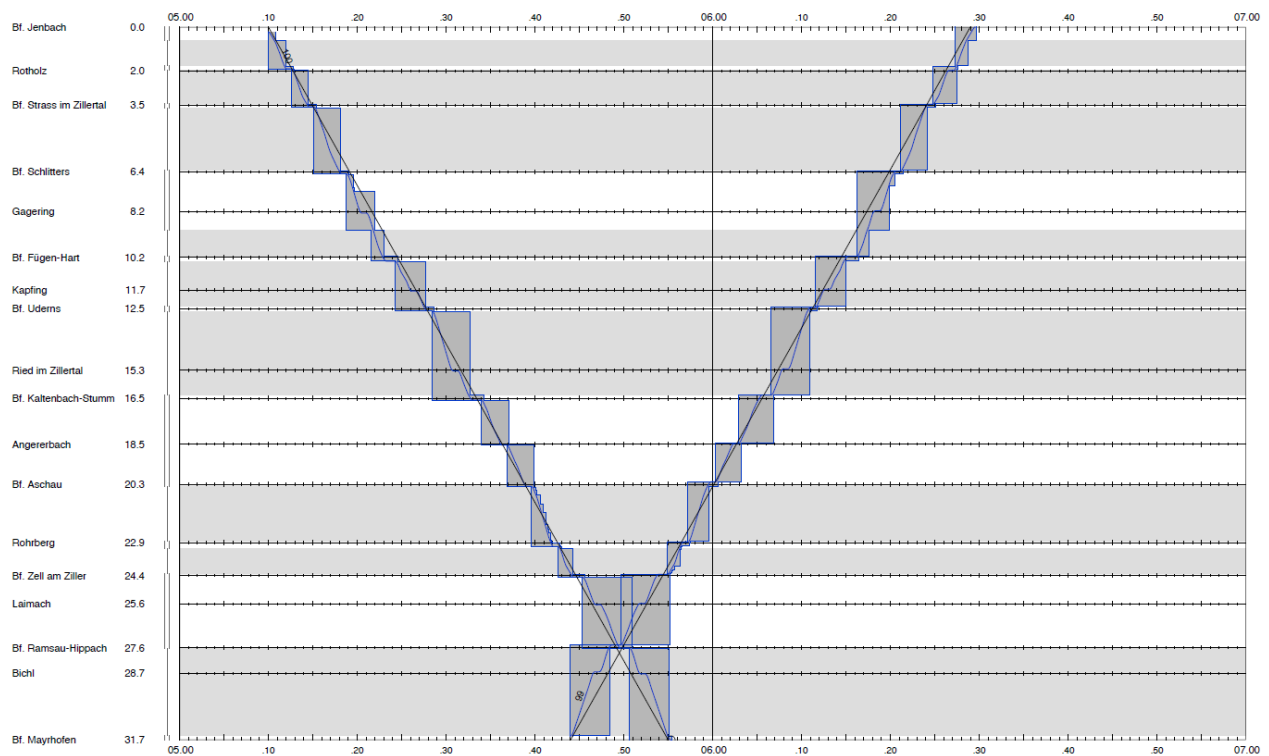


Abbildung 72: Typischer Takt-Umlaufplan nach Sz5 mit fahrplanstabilisierender Zugskreuzung an dem Ende der Doppelspurinsel Zell – Ramsau, das dem Zwangsknoten Jenbach weiter entfernt liegt.

### 7.3 mit traktionsabhängiger Differenzierung

Erst durch die Einführung von Hybrid-Fahrzeugen kann es sinnvoll sein, einem Fahrzeug mehrere Parameter für sein fahrdynamisches Verhalten zuzuordnen. Frühere Berechnungen für z.B. Zweikraftlokomotiven wurden für jeden Betriebsfall einzeln gerechnet und dann zusammengestellt. Sinnvoll wird es dann, wenn während einer Zugfahrt mehrmals das Antriebssystem gewechselt wird, wie in Sz 5 oder wie in [44] beschrieben.

Bei diesem neuartigen Ansatz, bei dem das maximale Beschleunigungsvermögen des Akkuzuges im Betriebsmodus Akku geringfügig gegenüber dem Betriebsmodus Oberleitung reduziert wird, z.B. von  $1,0 \text{ m/s}^2$  auf  $0,9 \text{ m/s}^2$  oder  $0,85 \text{ m/s}^2$  kann ermittelt werden, wieviel Fahrzeit tatsächlich „verloren“ geht. Dies ist ein nichtlineares Verhalten, da entsprechend dem Z-v-Diagramm bzw. dem a-v-Diagramm bei hohen Beschleunigungen nur kleine Geschwindigkeiten gefahren werden und bei hohen Geschwindigkeiten die Beschleunigung schon reduziert und die anteilige Schwächung anteilig kleiner ausfällt. Der Fahrzeitverlust ist ein theoretischer gegenüber der Voll-elektrischen Antriebsvariante Sz1, gegenüber der Referenzvariante mit der Dieseltraktion Sz0 mit  $0,65 \text{ m/s}^2$  ist immer noch ein erheblicher Vorteil gegeben.

Der Fahrzeit-Unterschied zwischen  $a = 0,65 \text{ m/s}^2$  und  $a = 1,0 \text{ m/s}^2$  beträgt rund 5 Minuten. Das sind etwa 10% der bisherigen Fahrzeit von 50 Minuten.

Besteht keine technische Notwendigkeit durch eine zu klein ausgelegte Akkukapazität oder durch unzulässige Alterung des Akkupakets, so kann das Ziel die Schonung des Akkus bezüglich Entladegeschwindigkeit (c-Raten-Ausnutzung) und Ladespiel „State of Charge“ (SoC) sein, um dessen Lebensdauer zu erhöhen und damit die Wartungskosten und Lebenszykluskosten LCC zu reduzieren.

Aussagen zur praktischen Umsetzung bei Einführung einer freiwilligen Schonung der Akkumulatoren:

- jeder neuer Oberleitungsabschnitt bringt eine weitere Fahrzeitverkürzung, Elektrifizierung lohnt sich.
- Im betrieblichen Ausnahmefall kann diese Reduktion vom Triebfahrzeugführer auf Befehl der Betriebsdisposition temporär z.B. bis zur nächsten Zugskreuzung, bis zum Ende der Zugfahrt, bis zum Ende des Betriebstages aufgehoben werden.
- Reset bei Neustart der Fahrzeugsteuerung.

Diese Differenzierung ist bei industriellen fahrdynamischen Betriebssimulatoren nicht einfach vorbereitet.

## 8 Numerischer Konzeptvergleich

Zum Unterschied von Kap. 5.10 werden hier neben den Traktionsenergiekosten die Betriebskosten, die Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur sowie die Unterhaltungskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur gegenübergestellt.

Dieser Kostenvergleich ist ein differentieller, d.h. es werden nur jene Kosten berücksichtigt, in denen sich die unterschiedlichen Antriebskonzepte unterscheiden. Daraus kann kein Schluss auf die Vollkosten gezogen werden.

Das Berechnungsmodell existiert aus mehreren Masterarbeiten bzw. deren Zusammenfassungen, speziell [45] und [40], und wird hier sinngemäß mit aktuellen Zahlen der Zillertalbahn gefüllt. Sinngemäß bedeutet, dass selbstverständlich die spezifischen Gegebenheiten der Fahrzeuge und deren Antriebskonzepte, die infrastrukturellen Gegebenheiten und Anforderungen, die Entwicklungsperspektive und Zeitkomponente berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse sind plausibel im Zusammenspiel mit anderen Studien und einfachen Überschlagsrechnungen.

Nicht im Detail eingearbeitet sind die Nebenbetriebsenergiekosten. Indirekt fließen sie über die Wirkungsgrade ein. Ebenso noch nicht berücksichtigt wurde eine Fahrzeiddifferenzierung aufgrund besonders schonenden Umganges mit Akkumulatoren (siehe Kap. 7.3). Sehr wohl berücksichtigt wurden

- Unterschiedliche Fahrzeugmassen
- Unterschiedliche Sitzplatzkapazitäten
- Unterschiedliche Wirkungsgrade im Antriebstrang
- Unterschiedliche Anschaffungs- und Wartungskosten
- Unterschiedliche Abschreibungsdauern
- Unterschiedliche Steuersätze, Primärenergiepreise, Einsatzdauern, etc.

Die Herleitung der Parameter erfolgt im Rahmen der Diskussion bisheriger Studien in Kap. 3. Parameter, die dort nicht ermittelt und relativiert werden, werden hier aufgelistet.

Die wesentlichen Parameter sind

- **Anzahl Züge** für den zukünftigen Fahrplan sind 4 Züge und ein Reservezug erforderlich. Sind antriebspezifisch mehr Züge erforderlich (Sz3), so wird ein Zug ergänzt. Die Hochrechnung auf zwei zusätzliche Züge (Kap. 5.1) bei Sz3 bei gleicher km-Leistung wird hier nicht vorgenommen, kann aber ggf. nachgereicht werden.
- **Anzahl Wagen** es werden dreiteilige Triebzüge betrachtet, sofern nicht das Antriebskonzept technisch einen vierten Waggon (Sz2) erforderlich macht (Achslasten)
- **Länge der Züge** fließt in die Kalkulation nicht ein, jedoch in die Überlegungen zu späteren Erhöhungen der Beförderungskapazität, Zusatzwagen sind hier nicht berücksichtigt
- **Masse der Züge** fließt in den Energieverbrauch essenziell ein  
Zusatzwagen sind nicht berücksichtigt
- **Fahrzeugpreise** fließen in die Investitionskosten ein  
es wurde auf Basis vorliegender Unterlagen ein Basispreis für Trieb- und Zwischenwagen, der um antriebsspezifische Komponenten modifiziert wurde
- **Lebensdauer** die Lebensdauer aller Fahrzeuge wurde mit 30 Jahren angenommen  
die ggf. längere Lebensdauer einfacher, rein elektrischer Fahrzeuge wurde vernachlässigt
- **Lebensdauer** die Lebensdauer der Oberleitung wurde auf 60 Jahre geschätzt (tatsächlich höher, wenn nicht andere Gründe zu Umbauten führen), die von Unterwerken und Tankstellen auf 30 Jahre
- **Lebensperioden** der Betrachtungszeitraum wird mit einer Fahrzeuglebensdauer von 30 Jahren festgelegt  
Nur bei der Sensitivitätsuntersuchung wird diese einmalig mit 2 Perioden angenommen
- **Streckenlänge** Die Strecke wird mit 31,7km unabhängig von geplanten Um- und Ausbauten angenommen
- **Zugskilometer** Es werden 37 Zugpaare pro Werktag und 30 Umläufe an Sa/So/Feiertagen angenommen.  
Das sind bei 12 werktäglichen Feiertagen 772 553 Zkm oder 33,4 Zugpaare im Wochenmittel  
Das sind 12185 Zugfahrten pro Jahr (heute 9855) ohne Güterverkehr und Nostalgie

- **Energiekosten** Die Energiekosten werden mit 0,15 €/kWh Bahnstrom angenommen, bzw mit 1,45 €/L Diesel. Beim Wasserstoffkonzept wird der Energiepreis vor Elektrolyse angewandt, ein Lieferondervertrag in der Sensitivitätsanalyse untersucht.
- **Oberleitung** Die Kosten werden 1 Mio Eur pro Gleiskilometer angenommen. In Bahnhöfen werden übliche Minderungsfaktoren nicht herangezogen, jedoch ebenso nicht Gleiswechsel
- **Unterwerke** Die Kosten werden mit 2,5 Mio € pro Unterwerk angenommen.
- **Dieselmzüge** Der Jahresverbrauch von 900.000l heute ergibt einen Verbrauch von 91,3L pro Zugpaar
- **Wasserstoff** Dort, wo Wasserstoff direkt eingesetzt wird, wird ein Preis von 3€/kg verwendet. Unter glaubwürdigen Annahmen kann das nur grauer, aber kein grüner Wasserstoffs sein
- **Wirkungsgrade** Wurden aus der Studie [13] übernommen, siehe Kap. 3.5
- **Oberleitung** Die Erhaltungskosten werden mit den Errichtungskosten verteilt auf 30 Jahre angenommen
- **Fahrzeuge** Die Erhaltungskosten werden mit 0,16 €/TDG/km, mit 0,10 €/LDG/km und 0,386 €/WK/km als Basis angenommen und mit antriebspezifischen Aufschlägen versehen. Vorliegende Angebote und Erfahrungswerte werden berücksichtigt
- **NMC-Akku** wird je Pack mit 40 k€ und 2 oder 3 Tauschen pro 30 Jahren angesetzt (Verhältnisse Zillertal)
- **LTO-Akku** wird je Pack mit 80 k€ und 1 Tausch pro 30 Jahre angesetzt (Verhältnisse Zillertal)
- **FC-Cell** Brennstoffzelle mit 80 k€ und 1 Tausch pro 30 Jahre angesetzt (Verhältnisse Zillertal)
- **Tankstelle** Diesel: es werden zwei Neubauten in 60 Jahren je 500 k€ angenommen, plus Erhaltung H<sub>2</sub>: es werden 2 Neubauten in 30 Jahren a 5 Mio € angenommen (inkl. Ersterrichtung), eine in Mayrhofen und eine in Jenbach – die Erhaltungskosten werden halbiert, da je nach Versorgung immer nur eine Tankstelle operativ in Betrieb ist.
- **Erhaltung** die Erhaltung von Tankstellen wird mit den Errichtungskosten über 30 Jahre angenommen
- **Grundabläsen** wurden weder für Oberleitung noch für Tankstellen berücksichtigt. Auch die Schätzungen in anderen Studien (2 Mio €) sind nicht wirklich belastbar
- **Güterverkehr** nicht berücksichtigt
- **Nostalgie** nicht berücksichtigt
- **Synergien** mit Dritten: nicht berücksichtigt
- **Energie** lokale Eigenproduktion (Photovoltaik, Windkraft) nicht berücksichtigt
- **Speiseleitung** Bahnstrom von UW Wörgl, nicht berücksichtigt, im Leistungspreis eingepreist
- **Speiseleitung** entlang der Zillertalbahn (Erdkabel): optional, nicht berücksichtigt
- **Speicher** in Unterwerken: optional, nicht berücksichtigt, im Leistungspreis eingepreist, kostendämpfend

Alle differentiellen Kosten beziehen sich, so nicht anders angeführt, auf Preisbasis 2023. Die Kostenvergleiche werden für das erste Betriebsjahr nach Betriebsaufnahme angenommen und nicht valorisiert. Dies wird für einen Kostenvergleich, der in Einmalinvestitionen und laufende Betriebs- und Erhaltungskosten unterschieden wird, in dieser Phase als nicht notwendig erachtet.

## 8.1 Basispunkt der Modellparameter

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |                 |                                                                                | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   | Sz0             | Sz1                                                                            | Sz2                        | Sz3                           | Sz4                         | Sz5                        |                                  |                                   |
| Anzahl Züge                                                                                | 5               | 5                                                                              | 5                          | 6                             | 5                           | 5                          |                                  |                                   |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   | 4               | 3                                                                              | 4                          | 3                             | 3                           | 3                          |                                  |                                   |
| Länge über Puffer [m]                                                                      | 68,5            | 57,8                                                                           | 76,4                       | 56,0                          | 56,0                        | 56,0                       |                                  |                                   |
| Bruttomasse [t]                                                                            | 151,4           | 118,4                                                                          | 164                        | 121,2                         | 122,2                       | 120,3                      |                                  |                                   |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               | 14 (Basis 1999) | 12,7                                                                           | 19,5                       | 13,0                          | 12,9                        | 13,3                       |                                  |                                   |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 | 71              | 113,6                                                                          | 107,5                      | 80,5                          | 85,6                        | 93,9                       |                                  |                                   |
| Position                                                                                   | Einheit         | Hinweis                                                                        |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm           | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                                    | 3,0                        | 2,73                          | 4,21                        | 3,37                       | 2,79                             | 2,87                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm           | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                                    | 0,02                       | 1,08                          | 0,22                        | 0,05                       | 0,45                             | 0,59                              |
| Infrastrukturhaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                           | €/Zkm           | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                                  | 0,04                       | 1,84                          | 0,22                        | 0,13                       | 0,69                             | 0,85                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm           | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer | 2,31<br>2,49<br>4,01       | 1,09                          | 6,94                        | 1,88                       | 1,43                             | 1,30                              |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm           | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker                 | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Zugskilometer)                                                  | €/Zkm           | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025                                                     | 9,06                       | 8,75                          | 14,16                       | 7,93                       | 7,86                             | 8,11                              |
|                                                                                            |                 | bei 100 €/t CO2-Steuer                                                         | 9,23                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |                 | bei 500 €/t CO2-Steuer                                                         | 10,76                      |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |                 | mit Verstärker                                                                 |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |                 |                                                                                |                            | 9,33                          | 14,16                       | 8,51                       | 8,44                             | 8,70                              |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd           | Planangebot                                                                    | 646                        | 606                           | 746                         | 556                        | 556                              | 556                               |
|                                                                                            |                 | mit Verstärker                                                                 | 646                        | 826                           | 746                         | 784                        | 784                              | 784                               |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd           | Planangebot                                                                    | 23902                      | 22 422                        | 27 602                      | 20 572                     | 20 572                           | 20 572                            |
|                                                                                            |                 | mit Verstärker                                                                 | 23902                      | 30 562                        | 27 602                      | 29 008                     | 29 008                           | 29 008                            |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Sitzplatzkilometer)                                             | ct/Spkm         | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025                                                     | 2,80                       | 2,89                          | 3,80                        | 2,85                       | 2,83                             | 2,92                              |
|                                                                                            |                 | bei 100 €/t CO2-Steuer                                                         | 2,86                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |                 | bei 500 €/t CO2-Steuer                                                         | 3,33                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |                 | mit Verstärker                                                                 |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |                 |                                                                                | 2,26                       | 3,80                          | 2,17                        | 2,15                       | 2,22                             |                                   |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |                 | bei 100 €/t CO2-Steuer                                                         | 97%<br>99%                 | 100%                          | 132%                        | 99%                        | 98%                              | 101%                              |
|                                                                                            |                 | bei 500 €/t CO2-Steuer                                                         | 115%                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |                 |                                                                                |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |

Abbildung 73: Kennzahlen-Vergleich: Basispunkt der Modellparameter

|                        | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1   | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|------------------------|------------|--------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Infrastrukturkosten/km | 31 545,74  | 1 583 596,21 | 315 457,41  | 78 864,35   | 662 460,57     | 862 776,03         |
| Infrastrukturkosten    | 1 000 000  | 50 200 000   | 10 000 000  | 2 500 000   | 21 000 000     | 27 350 000         |

Abbildung 74: Investitionskosten-Vergleich: Basispunkt der Modellparameter

Der Basispunkt der Modellrechnung spiegelt den Zustand mit jenen Eingangsparameter wider, die aktuell am besten belegbar sind und ein plausibles Gesamtbild ergeben.

Entsprechend der Beurteilungsindikatoren sind die Betriebskosten beim Sz1 EMU deutlich am geringsten, gefolgt von den beiden Hybridkonzepten Sz4 BEMU-Hy und Sz5 BEMU-Hy-opt. Das reine Akku-Konzept Bz3 BEMU hat etwa 72% höhere Betriebskosten als der EMU. Die höchsten Betriebskosten haben der aktuelle Dieselmotorbetrieb Sz0 und der Wasserstoffantrieb Sz2, der dank des vierteiligen Zuges das größte Sitzplatzangebot hat. Trotzdem sind auch die Gesamtkosten pro Sitzplatz um rund 30% höher als beim Sz1 EMU und den anderen Konzepten.

Die Infrastruktur-Investitionen sind bei SZ1 EMU erwartungsgemäß am höchsten und beim Diesel- und Akku-Betrieb am geringsten.

## 8.2 Sensitivitätsanalyse: Halbierung Oberleitung-Investkosten

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |         |                                                                                                  | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   |         |                                                                                                  | Sz0                        | Sz1                           | Sz2                         | Sz3                        | Sz4                              | Sz5                               |
| Anzahl Züge                                                                                |         |                                                                                                  | 5                          | 5                             | 5                           | 6                          | 5                                | 5                                 |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   |         |                                                                                                  | 4                          | 3                             | 4                           | 3                          | 3                                | 3                                 |
| Länge über Puffer [m]                                                                      |         |                                                                                                  | 68,5                       | 57,8                          | 76,4                        | 56,0                       | 56,0                             | 56,0                              |
| Bruttomasse [t]                                                                            |         |                                                                                                  | 151,4                      | 118,4                         | 164                         | 121,2                      | 122,2                            | 120,3                             |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               |         |                                                                                                  | 14 (Basis 1999)            | 12,7                          | 19,5                        | 13,0                       | 12,9                             | 13,3                              |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 |         |                                                                                                  | 71                         | 92,2                          | 107,5                       | 80,5                       | 77,6                             | 84,1                              |
| Position                                                                                   | Einheit | Hinweis                                                                                          |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 3,0                        | 2,73                          | 4,21                        | 3,37                       | 2,79                             | 2,87                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 0,02                       | 0,62                          | 0,22                        | 0,05                       | 0,28                             | 0,38                              |
| Infrastrukturhaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                           | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                                                    | 0,04                       | 0,92                          | 0,22                        | 0,13                       | 0,35                             | 0,42                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                   | 2,31<br>2,49<br>4,01       | 1,09                          | 6,94                        | 1,88                       | 1,43                             | 1,30                              |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker                                   | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Zugskilometer)                                                  | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 9,06<br>9,23<br>10,76      | 7,36                          | 14,16                       | 7,93                       | 7,34                             | 7,48                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 7,95                          | 14,16                       | 8,51                       | 7,93                             | 8,06                              |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd   | Planangebot                                                                                      | 646                        | 606                           | 746                         | 556                        | 556                              | 556                               |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 646                        | 826                           | 746                         | 784                        | 784                              | 784                               |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd   | Planangebot                                                                                      | 23902                      | 22 422                        | 27 602                      | 20 572                     | 20 572                           | 20 572                            |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 23902                      | 30 562                        | 27 602                      | 29 008                     | 29 008                           | 29 008                            |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Sitzplatzkilometer)                                             | ct/Spkm | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 2,80<br>2,86<br>3,33       | 2,43                          | 3,80                        | 2,85                       | 2,64                             | 2,69                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 1,92                          | 3,80                        | 2,17                       | 2,02                             | 2,06                              |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |         | bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                                                 | 115%<br>118%<br>137%       | 100%<br>100%                  | 156%<br>197%                | 117%<br>113%               | 109%<br>105%                     | 111%<br>107%                      |

Abbildung 75: Kennzahlen-Vergleich: halbierte Oberleitungs-Investkosten (500k€/km)

|                        | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Infrastrukturkosten/km | 31 545,74  | 910 094,64 | 315 457,41  | 78 864,35   | 410 094,64     | 553 627,76         |
| Infrastrukturkosten    | 1 000 000  | 28 850 000 | 10 000 000  | 2 500 000   | 13 000 000     | 17 550 000         |

Abbildung 76: Investitionskosten-Vergleich: halbierte Oberleitungs-Investkosten (500k€/km)

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, nur die Kosten für Oberleitungserrichtung und -erhaltung wurden halbiert. Siehe dazu auch Kap. 3.3 und Kap. 3.4.

### 8.3 Sensitivitätsanalyse: Verdopplung Primärenergiekosten

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |         |                                                                | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   |         |                                                                | Sz0                        | Sz1                           | Sz2                         | Sz3                        | Sz4                              | Sz5                               |
| Anzahl Züge                                                                                |         |                                                                | 5                          | 5                             | 5                           | 6                          | 5                                | 5                                 |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   |         |                                                                | 4                          | 3                             | 4                           | 3                          | 3                                | 3                                 |
| Länge über Puffer [m]                                                                      |         |                                                                | 68,5                       | 57,8                          | 76,4                        | 56,0                       | 56,0                             | 56,0                              |
| Bruttomasse [t]                                                                            |         |                                                                | 151,4                      | 118,4                         | 164                         | 121,2                      | 122,2                            | 120,3                             |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               |         |                                                                | 14 (Basis 1999)            | 12,7                          | 19,5                        | 13,0                       | 12,9                             | 13,3                              |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 |         |                                                                | 71                         | 113,6                         | 107,5                       | 80,5                       | 85,6                             | 93,9                              |
| Position                                                                                   | Einheit | Hinweis                                                        |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                    | 3,0                        | 2,73                          | 4,21                        | 3,37                       | 2,79                             | 2,87                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                    | 0,02                       | 1,08                          | 0,22                        | 0,05                       | 0,45                             | 0,59                              |
| Infrastrukturerehaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                        | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                  | 0,04                       | 1,84                          | 0,22                        | 0,13                       | 0,69                             | 0,85                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer 2025                        | 4,40                       | 2,17                          | 11,49                       | 3,26                       | 2,70                             | 2,47                              |
|                                                                                            |         | bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 4,57                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |         | bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 6,10                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Zugskilometer)                                                  | €/Zkm   | bei 55 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer 2025                        | 11,14                      | 9,83                          | 18,71                       | 9,31                       | 9,13                             | 9,28                              |
|                                                                                            |         | bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 11,31                      |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |         | bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 12,84                      |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                 |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd   | Planangebot                                                    | 646                        | 606                           | 746                         | 556                        | 556                              | 556                               |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                 | 646                        | 826                           | 746                         | 784                        | 784                              | 784                               |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd   | Planangebot                                                    | 23902                      | 22 422                        | 27 602                      | 20 572                     | 20 572                           | 20 572                            |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                 | 23902                      | 30 562                        | 27 602                      | 29 008                     | 29 008                           | 29 008                            |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Sitzplatzkilometer)                                             | ct/Spkm | bei 55 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer 2025                        | 3,45                       | 3,24                          | 5,02                        | 3,35                       | 3,29                             | 3,34                              |
|                                                                                            |         | bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 3,50                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |         | bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 3,98                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                 |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |         |                                                                | 106%                       | 100%                          | 155%                        | 103%                       | 101%                             | 103%                              |
|                                                                                            |         | bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 108%                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |
|                                                                                            |         | bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                            | 123%                       |                               |                             |                            |                                  |                                   |

Abbildung 77: Kennzahlen-Vergleich: verdoppelte Primärenergiekosten (30ct/kWh)

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, nur die Kosten für elektrische Primärenergie wurde von 0,15 €/kWh auf 0,30 €/kWh verdoppelt (ab Übergabepunkt, also ggf. inkl. Netzgebühren, etc.).

## 8.4 Sensitivitätsanalyse: Kapazitätserhöhung Doppeltraktion

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |         |                                                                                                  | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   |         |                                                                                                  | Sz0                        | Sz1                           | Sz2                         | Sz3                        | Sz4                              | Sz5                               |
| Anzahl Züge                                                                                |         |                                                                                                  | 9                          | 9                             | 9                           | 10                         | 9                                | 9                                 |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   |         |                                                                                                  | 4                          | 3                             | 4                           | 3                          | 3                                | 3                                 |
| Länge über Puffer [m]                                                                      |         |                                                                                                  | 68,5                       | 57,8                          | 76,4                        | 56,0                       | 56,0                             | 56,0                              |
| Bruttomasse [t]                                                                            |         |                                                                                                  | 151,4                      | 118,4                         | 164                         | 121,2                      | 122,2                            | 120,3                             |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               |         |                                                                                                  | 14 (Basis 1999)            | 12,7                          | 19,5                        | 13,0                       | 12,9                             | 13,3                              |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 |         |                                                                                                  | 127                        | 164,2                         | 185,5                       | 132,5                      | 137,2                            | 147,1                             |
| Position                                                                                   | Einheit | Hinweis                                                                                          |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 5,4                        | 4,92                          | 7,57                        | 5,61                       | 5,01                             | 5,17                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 0,02                       | 1,08                          | 0,22                        | 0,05                       | 0,45                             | 0,59                              |
| Infrastrukturhaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                           | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                                                    | 0,04                       | 1,84                          | 0,22                        | 0,13                       | 0,69                             | 0,85                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                   | 2,33<br>2,50<br>4,03       | 1,09                          | 7,09                        | 2,21                       | 1,55                             | 1,41                              |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker                                   | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Zugskilometer)</b>                                          | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 11,49<br>11,66<br>13,19    | 10,93                         | 17,68                       | 10,50                      | 10,21                            | 10,52                             |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 11,52                         | 17,68                       | 11,09                      | 10,80                            | 11,10                             |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd   | Planangebot                                                                                      | 1292                       | 1 212                         | 1 492                       | 1 112                      | 1 112                            | 1 112                             |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 1292                       | 1 652                         | 1 492                       | 1 568                      | 1 568                            | 1 568                             |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd   | Planangebot                                                                                      | 23902                      | 22 422                        | 27 602                      | 20 572                     | 20 572                           | 20 572                            |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 23902                      | 30 562                        | 27 602                      | 29 008                     | 29 008                           | 29 008                            |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Sitzplatzkilometer)</b>                                     | ct/Spkm | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 3,56<br>3,61<br>4,08       | 3,61                          | 4,74                        | 3,78                       | 3,67                             | 3,78                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 2,79                          | 4,74                        | 2,83                       | 2,75                             | 2,83                              |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |         | bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                                                 | 99%<br>100%<br>113%        | 100%                          | 131%<br>170%                | 105%<br>101%               | 102%<br>99%                      | 105%<br>102%                      |

Abbildung 78: Kennzahlen-Vergleich: Kapazitätserhöhung Doppeltraktion (9 statt 5 Züge)

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, nur die Anzahl der Züge wurde um 4 erhöht und die Taktung fiktiv auf 4 Züge/Stunde erhöht, um das höhere Sitzplatzangebot zu berücksichtigen.

Überlange Züge durch Doppeltraktion erhöhen die Sitzplatzzahl und die Betriebskosten, nicht aber die Personalkosten. Da die Personalkosten nicht in diese differentielle einfließen, ist der Unterschied kleiner als in Realität.

## 8.5 Sensitivitätsanalyse: Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |         |                                                                                                  | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   |         |                                                                                                  | Sz0                        | Sz1                           | Sz2                         | Sz3                        | Sz4                              | Sz5                               |
| Anzahl Züge                                                                                |         |                                                                                                  | 9                          | 9                             | 9                           | 10                         | 9                                | 9                                 |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   |         |                                                                                                  | 4                          | 3                             | 4                           | 3                          | 3                                | 3                                 |
| Länge über Puffer [m]                                                                      |         |                                                                                                  | 68,5                       | 57,8                          | 76,4                        | 56,0                       | 56,0                             | 56,0                              |
| Bruttomasse [t]                                                                            |         |                                                                                                  | 151,4                      | 118,4                         | 164                         | 121,2                      | 122,2                            | 120,3                             |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               |         |                                                                                                  | 14 (Basis 1999)            | 12,7                          | 19,5                        | 13,0                       | 12,9                             | 13,3                              |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 |         |                                                                                                  | 127                        | 164,2                         | 185,5                       | 132,5                      | 137,2                            | 147,1                             |
| Position                                                                                   | Einheit | Hinweis                                                                                          |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 3,8                        | 3,43                          | 5,28                        | 3,91                       | 3,49                             | 3,60                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 0,02                       | 0,75                          | 0,15                        | 0,04                       | 0,32                             | 0,41                              |
| Infrastrukturhaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                           | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                                                    | 0,03                       | 1,28                          | 0,15                        | 0,09                       | 0,48                             | 0,59                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                   | 2,32<br>2,49<br>4,02       | 1,09                          | 6,32                        | 1,96                       | 1,47                             | 1,34                              |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker                                   | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Zugskilometer)</b>                                          | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 9,81<br>9,98<br>11,51      | 8,56                          | 14,48                       | 8,50                       | 8,26                             | 8,44                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 9,14                          | 14,48                       | 9,08                       | 8,85                             | 9,03                              |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd   | Planangebot                                                                                      | 1292                       | 1 212                         | 1 492                       | 1 112                      | 1 112                            | 1 112                             |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 1292                       | 1 652                         | 1 492                       | 1 568                      | 1 568                            | 1 568                             |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd   | Planangebot                                                                                      | 43282                      | 40 602                        | 49 982                      | 37 252                     | 37 252                           | 37 252                            |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 43282                      | 55 342                        | 49 982                      | 52 528                     | 52 528                           | 52 528                            |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Sitzplatzkilometer)</b>                                     | ct/Spkm | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 3,04<br>3,09<br>3,56       | 2,82                          | 3,88                        | 3,06                       | 2,97                             | 3,04                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 2,21                          | 3,88                        | 2,32                       | 2,26                             | 2,30                              |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |         | bei 100 €/t CO2-Steuer                                                                           | 108%                       | 100%                          | 138%                        | 108%                       | 105%                             | 108%                              |
|                                                                                            |         | bei 500 €/t CO2-Steuer                                                                           | 126%                       | 100%                          | 175%                        | 105%                       | 102%                             | 104%                              |

Abbildung 79: Kennzahlen-Vergleich: Fahrplanverdichtung (67 Zugpaar/Werktag)

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, nur die Anzahl der Züge wurde um 4 erhöht und die Taktung real auf 4 Züge/Stunde erhöht, um das höhere Sitzplatzangebot zu berücksichtigen.

Der Viertelstundentakt wird von 6 bis 20 Uhr angenommen und bedingt 30 zusätzliche Zugspare an Werktagen. An Sa, So und Feiertagen ist ein Halbstundentakt angenommen.

Dieses Konzept ist mit einer Personalkostenerhöhung verbunden, die in dieser differentiellen Berechnung nicht einfließen. Die Vollkosten steigen stärker als die differentiellen Gesamtkosten.

## 8.6 Sensitivitätsanalyse: Wasserstoff-Sonderpreis

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                             |         |                                                           | DMU             | EMU                 | HEMU            | BEMU            | BEMU-Hy            | BEMU-Hy-opt     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|
|                                                                                      |         |                                                           | Diesel-Wendezug | Vollelektrisch "bb" | Wasserstoff-Zug | Akku-Zug ex FAL | Akku-Hybrid ex FAL | Akku-Hybrid opt |
| Szenario                                                                             |         |                                                           | Sz0             | Sz1                 | Sz2             | Sz3             | Sz4                | Sz5             |
| Anzahl Züge                                                                          |         |                                                           | 5               | 5                   | 5               | 6               | 5                  | 5               |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                             |         |                                                           | 4               | 3                   | 4               | 3               | 3                  | 3               |
| Länge über Puffer [m]                                                                |         |                                                           | 68,5            | 57,8                | 76,4            | 56,0            | 56,0               | 56,0            |
| Bruttomasse [t]                                                                      |         |                                                           | 151,4           | 118,4               | 164             | 121,2           | 122,2              | 120,3           |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                         |         |                                                           | 14 (Basis 1999) | 12,7                | 19,5            | 13,0            | 12,9               | 13,3            |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                           |         |                                                           | 71              | 113,6               | 107,5           | 80,5            | 85,6               | 93,9            |
| Position                                                                             | Einheit | Hinweis                                                   |                 |                     |                 |                 |                    |                 |
| Fahrzeugbeschaffungskosten Flotte                                                    | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                               | 3,0             | 2,73                | 4,21            | 3,37            | 2,79               | 2,87            |
| Infrastrukturkosten (Invest Strecke differentiell)                                   | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                               | 0,02            | 1,08                | 0,22            | 0,05            | 0,45               | 0,59            |
| Infrastrukturhaltungskosten (Streckerhaltung differentiell)                          | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                             | 0,04            | 1,84                | 0,22            | 0,13            | 0,69               | 0,85            |
| Konzeptspezifische different. Betriebskosten auf 30 Jahre Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025                                | 2,31            | 1,09                | 3,78            | 1,88            | 1,43               | 1,30            |
|                                                                                      |         | bei 100 €/t CO2-Steuer                                    | 2,49            |                     |                 |                 |                    |                 |
|                                                                                      |         | bei 500 €/t CO2-Steuer                                    | 4,01            |                     |                 |                 |                    |                 |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                        | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergiekomponenten) mit Verstärker | 3,66<br>0,00    | 2,00<br>0,59        | 2,58<br>0,00    | 2,50<br>0,59    | 2,50<br>0,59       | 2,50<br>0,59    |
| Diff. Gesamtkosten (pro Zugskilometer)                                               | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025                                | 9,06            | 8,75                | 11,00           | 7,93            | 7,86               | 8,11            |
|                                                                                      |         | bei 100 €/t CO2-Steuer                                    | 9,23            |                     |                 |                 |                    |                 |
|                                                                                      |         | bei 500 €/t CO2-Steuer                                    | 10,76           |                     |                 |                 |                    |                 |
|                                                                                      |         | mit Verstärker                                            |                 |                     |                 |                 |                    |                 |
| Beförderungskapazität (Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                | pphpd   | Planangebot                                               | 646             | 606                 | 746             | 556             | 556                | 556             |
|                                                                                      |         | mit Verstärker                                            | 646             | 826                 | 746             | 784             | 784                | 784             |
| Fahrgastkapazität (Sitzplätze pro Werktag)                                           | ppdbd   | Planangebot                                               | 23902           | 22 422              | 27 602          | 20 572          | 20 572             | 20 572          |
|                                                                                      |         | mit Verstärker                                            | 23902           | 30 562              | 27 602          | 29 008          | 29 008             | 29 008          |
| Diff. Gesamtkosten (pro Sitzplatzkilometer)                                          | ct/Spkm | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025                                | 2,80            | 2,89                | 2,95            | 2,85            | 2,83               | 2,92            |
|                                                                                      |         | bei 100 €/t CO2-Steuer                                    | 2,86            |                     |                 |                 |                    |                 |
|                                                                                      |         | bei 500 €/t CO2-Steuer                                    | 3,33            |                     |                 |                 |                    |                 |
|                                                                                      |         | mit Verstärker                                            |                 |                     |                 |                 |                    |                 |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                     |         |                                                           | 97%             | 100%                | 102%            | 99%             | 98%                | 101%            |
|                                                                                      |         | bei 100 €/t CO2-Steuer                                    | 99%             |                     |                 |                 |                    |                 |
|                                                                                      |         | bei 500 €/t CO2-Steuer                                    | 115%            |                     |                 |                 |                    |                 |

Abbildung 80: Kennzahlen-Vergleich: Wasserstoffpreis ( $\eta$  = EMU)

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, nur beim Wasserstoffzug Sz2 wird der Primärenergiepreis derart als Sonderkondition angenommen, dass die Leistung am Rad gleichpreisig mit einem elektrischen Triebzug ist.

Implizit wird angenommen, dass diese Sonderkondition über die Lebensdauer aller Fahrzeuge (auch eventuell später nachbeschaffter Fahrzeuge) Gültigkeit behält und nicht einseitig aufgekündigt werden kann. Im Falle einer Vertragsauflösung müsste über den Restwert der Fahrzeuge eine Vereinbarung getroffen sein ebenso wie für die Zeit von rund 5 Jahren, bis ein anderes Antriebskonzept umgesetzt werden können. Alternativ wären die Kosten für einen späteren Umbau der Züge Vertragsgegenstand.

## 8.7 Sensitivitätsanalyse: Nachhaltigkeit 60 Jahre

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |         |                                                                                                  | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   |         |                                                                                                  | Sz0                        | Sz1                           | Sz2                         | Sz3                        | Sz4                              | Sz5                               |
| Anzahl Züge                                                                                |         |                                                                                                  | 10                         | 10                            | 10                          | 12                         | 10                               | 10                                |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   |         |                                                                                                  | 4                          | 3                             | 4                           | 3                          | 3                                | 3                                 |
| Länge über Puffer [m]                                                                      |         |                                                                                                  | 68,5                       | 57,8                          | 76,4                        | 56,0                       | 56,0                             | 56,0                              |
| Bruttomasse [t]                                                                            |         |                                                                                                  | 151,4                      | 118,4                         | 164                         | 121,2                      | 122,2                            | 120,3                             |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               |         |                                                                                                  | 14 (Basis 1999)            | 12,7                          | 19,5                        | 13,0                       | 12,9                             | 13,3                              |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 |         |                                                                                                  | 141                        | 176,9                         | 215,0                       | 158,5                      | 150,1                            | 160,5                             |
| Position                                                                                   | Einheit | Hinweis                                                                                          |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 3,0                        | 2,73                          | 4,21                        | 3,37                       | 2,79                             | 2,87                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 0,04                       | 1,08                          | 0,43                        | 0,05                       | 0,45                             | 0,59                              |
| Infrastrukturhaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                           | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                                                    | 0,04                       | 1,84                          | 0,43                        | 0,13                       | 0,69                             | 0,85                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                   | 2,33<br>2,50<br>4,03       | 1,09                          | 6,94                        | 1,88                       | 1,43                             | 1,30                              |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker                                   | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Zugskilometer)</b>                                          | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 9,10<br>9,27<br>10,80      | 8,75                          | 14,59                       | 7,93                       | 7,86                             | 8,11                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 9,33                          | 14,59                       | 8,51                       | 8,44                             | 8,70                              |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd   | Planangebot                                                                                      | 646                        | 606                           | 746                         | 556                        | 556                              | 556                               |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 646                        | 826                           | 746                         | 784                        | 784                              | 784                               |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd   | Planangebot                                                                                      | 23902                      | 22 422                        | 27 602                      | 20 572                     | 20 572                           | 20 572                            |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 23902                      | 30 562                        | 27 602                      | 29 008                     | 29 008                           | 29 008                            |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Sitzplatzkilometer)</b>                                     | ct/Spkm | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 2,82<br>2,87<br>3,34       | 2,89                          | 3,91                        | 2,85                       | 2,83                             | 2,92                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 2,26                          | 3,91                        | 2,17                       | 2,15                             | 2,22                              |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |         | bei 100 €/t CO2-Steuer                                                                           | 98%                        | 100%                          | 136%                        | 99%                        | 98%                              | 101%                              |
|                                                                                            |         | bei 500 €/t CO2-Steuer                                                                           | 99%<br>116%                | 100%                          | 173%                        | 96%                        | 95%                              | 98%                               |

Abbildung 81: Kennzahlen-Vergleich: Nachhaltigkeit

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, nur der Betrachtungszeitraum wird auf zwei Zugslebensdauern von 60 Jahren ausgedehnt. Das führt zu nur minimalen Veränderungen bei Sz0 und Sz2.

## 8.8 Sensitivitätsanalyse: Lange Wende, 7 Züge für reinen Akku-Betrieb

Der heutige Betrieb erfolgt mit 6 Zugsgarnituren. Für den Antriebskonzeptvergleich wurde den bisher getätigten Ausschreibungen eine Reduktion auf 5 Zugsgarnituren zugrunde gelegt. Aus technischen Gründen der Akku-Ladezeit im Stillstand wird in diesem Konzept mindestens ein Zug mehr vorgesehen. Für die Fälle, dass dies nicht dauerhaft darstellbar ist, die Fahrzeitverkürzungen nicht im erforderlichen Ausmaß sichergestellt werden können (und damit die Wendezeit in Mayrhofen nicht zum Laden rausreicht) oder die betriebliche Stabilität nicht ausreichend gewährleistet werden kann, ist ein weiterer, 7. Zug der technische Lösungssatz.

Dieser 7. Zug bedingt nicht nur höhere Investitionen, sondern auch höhere Erhaltungskosten bei sonst gleichbleibender Flotten-Kilometerleistung aus dem Faktum heraus, dass es neben laufeleistungsabhängigen Wartungsarbeiten auch zeitabhängige Erhaltungsaufwände gibt. Beide Parametergruppen werden hier variiert.

## Sensitivitätsanalyse: lange Wende, 7 Züge für reinen Akku-Betrieb

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |         |                                                                                                                                         | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   |         |                                                                                                                                         | Sz0                        | Sz1                           | Sz2                         | Sz3                        | Sz4                              | Sz5                               |
| Anzahl Züge                                                                                |         |                                                                                                                                         | 5                          | 5                             | 5                           | 7                          | 5                                | 5                                 |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   |         |                                                                                                                                         | 4                          | 3                             | 4                           | 3                          | 3                                | 3                                 |
| Länge über Puffer [m]                                                                      |         |                                                                                                                                         | 68,5                       | 57,8                          | 76,4                        | 56,0                       | 56,0                             | 56,0                              |
| Bruttomasse [t]                                                                            |         |                                                                                                                                         | 151,4                      | 118,4                         | 164                         | 121,2                      | 122,2                            | 120,3                             |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               |         |                                                                                                                                         | 14 (Basis 1999)            | 12,7                          | 19,5                        | 13,0                       | 12,9                             | 13,3                              |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 |         |                                                                                                                                         | 71                         | 113,6                         | 107,5                       | 93,5                       | 85,6                             | 93,9                              |
| Position                                                                                   | Einheit | Hinweis                                                                                                                                 |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                                                                                             | 3,0                        | 2,73                          | 4,21                        | 3,93                       | 2,79                             | 2,87                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                                                                                             | 0,02                       | 1,08                          | 0,22                        | 0,05                       | 0,45                             | 0,59                              |
| Infrastrukturhaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                           | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                                                                                           | 0,04                       | 1,84                          | 0,22                        | 0,13                       | 0,69                             | 0,85                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer<br>bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                   | 2,31<br>2,49<br>4,01       | 1,09                          | 6,91                        | 2,13                       | 1,43                             | 1,30                              |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker                                                                          | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Zugskilometer)                                                  | €/Zkm   | bei 55 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer<br>bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer<br>mit Verstärker | 9,06<br>9,23<br>10,76      | 8,75                          | 14,13                       | 8,74                       | 7,86                             | 8,11                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                                                         |                            | 9,33                          | 14,13                       | 9,32                       | 8,44                             | 8,70                              |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd   | Planangebot                                                                                                                             | 646                        | 606                           | 746                         | 556                        | 556                              | 556                               |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                                                          | 646                        | 826                           | 746                         | 784                        | 784                              | 784                               |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd   | Planangebot                                                                                                                             | 23902                      | 22 422                        | 27 602                      | 20 572                     | 20 572                           | 20 572                            |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                                                          | 23902                      | 30 562                        | 27 602                      | 29 008                     | 29 008                           | 29 008                            |
| Diff. Gesamtkosten<br>(pro Sitzplatzkilometer)                                             | ct/Spkm | bei 55 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer<br>bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer<br>mit Verstärker | 2,80<br>2,86<br>3,33       | 2,89                          | 3,79                        | 3,14                       | 2,83                             | 2,92                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                                                         |                            | 2,26                          | 3,79                        | 2,38                       | 2,15                             | 2,22                              |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |         | bei 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                                                                                                     | 97%<br>99%                 | 100%                          | 131%                        | 109%                       | 98%                              | 101%                              |
|                                                                                            |         | bei 500 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer                                                                                                     | 115%                       | 100%                          | 168%                        | 105%                       | 95%                              | 98%                               |

Abbildung 82: Kennzahlen-Vergleich: 7. Zug BEMU

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, nur die Anzahl der BEMU-Züge in Sz 3 wird von 6 auf 7 erhöht, wodurch sich die Investitionskosten und die diff. Betriebskosten erhöhen.

Die Stillstandenergiekosten für die betriebliche Bereithaltung des 6. und 7. Zuges wurden konservativ mit nur 30% der Betriebsenergiekosten berücksichtigt, obwohl die Nebenbetriebe (alles außer Traktionsenergie) rund 50% ausmachen. Dies soll den fehlenden Fahrgastwechsel während der Stillstandzeiten bei großen Verbräuchen wie der Heizung/Klimaanlage (Türen bleiben geschlossen) sowie den statischen und dynamischen Luftverbrauch der Luftfederung berücksichtigen.

Die Wartungskosten der zusätzlichen Züge, bisher hier rein abhängig von der Fahrleistung (also in €/Zkm) angenommen, müssen auch berücksichtigt werden. Hier wurde 25% der Wartungskosten als zeitfix angenommen und 75% als fahrleistungsabhängig. Die zeitabhängige Wartung (Sichtkontrollen, Zeit- und Hauptuntersuchungen, ...) müssen unabhängig von der erbrachten Fahrleistung erfolgen, gewisse Verschleißteile altern (z.B. Elastomere, Öle, Schläuche...) müssen regelmäßig getauscht werden. Ähnlich verhält es sich bei der zusätzlichen Reinigung, die hier nicht berücksichtigt worden ist.

Diese Effekte sind für den 6. Zug in Kap. 8.1 nicht ausreichend gewürdigt und lassen das Konzept Sz3 geringfügig schlechter aussehen (siehe Abbildung 83). Die diff. Gesamtkosten erhöhen sich um 0,09 € pro Zugskilometer und 0,03ct pro Sitzplatzkilometer. Die wesentlich höheren Werte des 7. Zuges kommen von dem zusätzlichen Investitionsbedarf und waren für den 6. Zug in Kap. 8.1 bereits berücksichtigt. Ebenso die anteiligen Kosten für die konzeptspezifischen Betriebskosten (i.W. der zeitabhängige Akkutauch), der dort bereits für den 6. Zug berücksichtigt war.

## Sensitivitätsanalyse: 6 Züge für reinen Akku-Betrieb (Nachtrag)

Differenzielle Kosten und Beförderungskapazität: Gegenüberstellung Fahrzeugkonzepte

(keine Vollkosten)

| Konzepte                                                                                   |         |                                                                                                  | DMU<br>Diesel-<br>Wendezug | EMU<br>Vollelektrisch<br>"bb" | HEMU<br>Wasserstoff-<br>Zug | BEMU<br>Akku-Zug<br>ex FAL | BEMU-Hy<br>Akku-Hybrid<br>ex FAL | BEMU-Hy-opt<br>Akku-Hybrid<br>opt |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Szenario                                                                                   |         |                                                                                                  | Sz0                        | Sz1                           | Sz2                         | Sz3                        | Sz4                              | Sz5                               |
| Anzahl Züge                                                                                |         |                                                                                                  | 5                          | 5                             | 5                           | 6                          | 5                                | 5                                 |
| Anz. Wagenkasten pro Zug                                                                   |         |                                                                                                  | 4                          | 3                             | 4                           | 3                          | 3                                | 3                                 |
| Länge über Puffer [m]                                                                      |         |                                                                                                  | 68,5                       | 57,8                          | 76,4                        | 56,0                       | 56,0                             | 56,0                              |
| Bruttomasse [t]                                                                            |         |                                                                                                  | 151,4                      | 118,4                         | 164                         | 121,2                      | 122,2                            | 120,3                             |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]                                                               |         |                                                                                                  | 14 (Basis 1999)            | 12,7                          | 19,5                        | 13,0                       | 12,9                             | 13,3                              |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR]                                                 |         |                                                                                                  | 71                         | 113,6                         | 107,5                       | 80,5                       | 85,6                             | 93,9                              |
| Position                                                                                   | Einheit | Hinweis                                                                                          |                            |                               |                             |                            |                                  |                                   |
| Fahrzeugbeschaffungskosten<br>Flotte                                                       | €/Zkm   | 30 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 3,0                        | 2,73                          | 4,21                        | 3,37                       | 2,79                             | 2,87                              |
| Infrastrukturkosten<br>(Invest Strecke differentiell)                                      | €/Zkm   | 60 Jahre Abschreibungsdauer                                                                      | 0,02                       | 1,08                          | 0,22                        | 0,05                       | 0,45                             | 0,59                              |
| Infrastrukturhaltungskosten<br>(Streckenerhaltung differentiell)                           | €/Zkm   | 30 Jahre Betrachtungszeitraum                                                                    | 0,04                       | 1,84                          | 0,22                        | 0,13                       | 0,69                             | 0,85                              |
| Konzeptspezifische different.<br>Betriebskosten auf 30 Jahre<br>Flottenlebensdauer bezogen | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                   | 2,31<br>2,49<br>4,01       | 1,09                          | 6,91                        | 1,96                       | 1,43                             | 1,30                              |
| Fahrzeuginstandhaltungskosten                                                              | €/Zkm   | Vollkosten (ohne Primärenergie-<br>komponenten) mit Verstärker                                   | 3,66<br>0,00               | 2,00<br>0,59                  | 2,58<br>0,00                | 2,50<br>0,59               | 2,50<br>0,59                     | 2,50<br>0,59                      |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Zugskilometer)</b>                                          | €/Zkm   | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 9,06<br>9,23<br>10,76      | 8,75                          | 14,13                       | 8,01                       | 7,86                             | 8,11                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 9,33                          | 14,13                       | 8,60                       | 8,44                             | 8,70                              |
| Beförderungskapazität<br>(Sitzplätze pro Stunde und Rtg)                                   | pphpd   | Planangebot                                                                                      | 646                        | 606                           | 746                         | 556                        | 556                              | 556                               |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 646                        | 826                           | 746                         | 784                        | 784                              | 784                               |
| Fahrgastkapazität<br>(Sitzplätze pro Werktag)                                              | ppdbd   | Planangebot                                                                                      | 23902                      | 22 422                        | 27 602                      | 20 572                     | 20 572                           | 20 572                            |
|                                                                                            |         | mit Verstärker                                                                                   | 23902                      | 30 562                        | 27 602                      | 29 008                     | 29 008                           | 29 008                            |
| <b>Diff. Gesamtkosten<br/>(pro Sitzplatzkilometer)</b>                                     | ct/Spkm | bei 55 €/t CO2-Steuer 2025<br>bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer<br>mit Verstärker | 2,80<br>2,86<br>3,33       | 2,89                          | 3,79                        | 2,88                       | 2,83                             | 2,92                              |
|                                                                                            |         |                                                                                                  |                            | 2,26                          | 3,79                        | 2,19                       | 2,15                             | 2,22                              |
| Vergleich mit Sz1 Vollelektrisch                                                           |         | bei 100 €/t CO2-Steuer<br>bei 500 €/t CO2-Steuer                                                 | 97%<br>99%<br>115%         | 100%<br>100%                  | 131%<br>168%                | 100%<br>97%                | 98%<br>95%                       | 101%<br>98%                       |

Abbildung 83: Kennzahlen-Vergleich: 6. Zug BEMU unter Berücksichtigung zeitfixer Zusatzkosten

Alle Parameter entsprechen Kap. 8.1, auch die Anzahl der BEMU-Züge in Sz 3 beträgt 6. Hier werden die Einflüsse von stillstandbezogenen Zusatzaufwendungen des 6. Zuges in Analogie zum 7. Zug ergänzt.

## 8.9 Überblick Sensitivitätsanalysen

Folgende Sensitivitätsuntersuchungen wurden durch Parametervariation jeweils eines Parameters (also ohne Kreuzkorrelationen) durchgeführt:

- |                                           |                                                             |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1. Basispunkt                             | Ausgangspunkt der Berechnungen                              |
| 2. Halbierung Oberleitung-Investkosten    | Halbierung der Kosten pro km Oberleitung auf 500k€          |
| 3. Verdopplung Primärenergiekosten        | Verdoppelung der Primär-Energiekosten auf 30ct/kWh          |
| 4. Kapazitätserhöhung Doppeltraktion      | Führung von überlangen Zügen, 9 statt 5 Züge                |
| 5. Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung | Einführung Viertelstundetakts an Werktagen                  |
| 6. Wasserstoff-Sonderpreis                | gleiche Primär-Energiekosten wie EMU (Sondervertrag)        |
| 7. Nachhaltigkeit 60 Jahre                | 2 Lebensperioden (60 Jahre) von Zügen und spez. Komponenten |

Dies ohne Betrachtung von Verstärkung einzelner Starklastzeiten-Züge (Steuerwagen, Zwischenwagen).

Für eine globale Bewertung wurden diese Fälle gleichgewichtet gemittelt.

Beim Bestandsdieselbetrieb wurde die mittelfristige Variante mit 100€/t CO<sub>2</sub>-Ausstoß herangezogen.

Für den Sondervertrag Wasserstoff wurde wie weiter vorne beschrieben [siehe Kap 4.1] hier angenommen:

- 30 Jahre Vertragslaufzeit ab Anfang Planbetrieb (= Fahrzeuglebensdauer)
- Restwertabsicherung bei vorzeitigem Vertragsausstieg, ggf. Ersatzbetriebskosten abgegolten bei Flottentausch
- Rollierende Vertragslaufzeit bei Anschaffung von Verstärkerzügen (30 Jahre ab ersten Planeinsatz) [Kap 4.1]

Daraus ergeben sich mehrere Möglichkeiten der Gesamtdarstellung

### Gesamtüberblick tabellarisch

Die jeweils linke Zahl, mittlere und rechte Zahl sind die:

1. Differentiellen Betriebskosten (Prio. 1) pro km planmäßiger Zugsfahrt in Eur/Zkm
2. Differentiellen Gesamtkosten (Prio. 2) pro km planmäßiger Zugsfahrt in Eur/Zkm
3. Differentiellen Gesamtkosten (Prio. 3) pro Sitzplatzkilometer in Euro-Cent ct/Spkm

| ohne Verstärker                      |         |                                 | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|--------------------------------------|---------|---------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Basispunkt                           | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 9,23       | 8,75       | 14,16       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 2,86       | 2,89       | 3,80        | 2,85        | 2,83           | 2,92               |
| Oberleitung-Investkosten             | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 9,23       | 7,36       | 14,16       | 7,93        | 7,34           | 7,48               |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 2,86       | 2,43       | 3,80        | 2,85        | 2,64           | 2,69               |
| Primärenergiekosten                  | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,49       | 2,17       | 11,49       | 3,26        | 2,70           | 2,47               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 9,23       | 9,83       | 18,71       | 9,31        | 9,13           | 9,28               |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 2,86       | 3,24       | 5,02        | 3,35        | 3,29           | 3,34               |
| Kapazitätserhöhung Doppeltraktion    | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,50       | 1,09       | 7,09        | 2,21        | 1,55           | 1,41               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 11,66      | 10,93      | 17,68       | 10,50       | 10,21          | 10,52              |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 3,61       | 3,61       | 4,74        | 3,78        | 3,67           | 3,78               |
| Kapazitätserhöhung Fahrplanverdicht. | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 6,32        | 1,96        | 1,47           | 1,34               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 9,98       | 8,56       | 14,48       | 8,50        | 8,26           | 8,44               |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 3,09       | 2,82       | 3,88        | 3,06        | 2,97           | 3,04               |
| Wasserstoff-Sonderpreis              | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 3,78        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 9,23       | 8,75       | 11,00       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 2,86       | 2,89       | 2,95        | 2,85        | 2,83           | 2,92               |
| Nachhaltigkeit 60 Jahre              | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,50       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 9,27       | 8,75       | 14,59       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 2,87       | 2,89       | 3,91        | 2,85        | 2,83           | 2,92               |
| lange Wende (7. Zug BEMU)            | €/Zkm   | different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 2,13        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm   | Diff. Gesamtkosten(Zugskm)      | 9,23       | 8,75       | 14,16       | 8,74        | 7,86           | 8,11               |
|                                      | ct/Spkm | Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | 2,86       | 2,89       | 3,80        | 3,14        | 2,83           | 2,92               |

Abbildung 84: Überblick Sensitivitätsanalyse für diff. Betriebskosten/km, Gesamtkosten/Zkm und Gesamtkosten/Spkm

Die entsprechende Zusammenfassung für das Management-Summary lautet – mit gleichen Zahlenwerten – wie folgt:

**Betriebs- und Gesamtkosten**

1. Differenziellen Betriebskosten pro km planmäßiger Zugsfahrt in Eur/Zkm
2. Differenziellen Gesamtkosten pro km planmäßiger Zugsfahrt in Eur/Zkm
3. Differenziellen Gesamtkosten pro Sitzplatzkilometer in Euro-Cent ct/Spkm

| ohne Verstärker                      |                                       | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Basispunkt                           | €/Zkm different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm Diff. Gesamtkosten(pugsfahrt)   | 9,23       | 8,75       | 14,16       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
|                                      | ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(pitzplatz) | 2,86       | 2,89       | 3,80        | 2,85        | 2,83           | 2,92               |
| Oberleitung-Investkosten             | €/Zkm different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm Diff. Gesamtkosten(pugsfahrt)   | 9,23       | 7,36       | 14,16       | 7,93        | 7,34           | 7,48               |
|                                      | ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(pitzplatz) | 2,86       | 2,43       | 3,80        | 2,85        | 2,64           | 2,69               |
| Primärenergiekosten                  | €/Zkm different. Betriebskosten       | 2,49       | 2,17       | 11,49       | 3,26        | 2,70           | 2,47               |
|                                      | €/Zkm Diff. Gesamtkosten(pugsfahrt)   | 9,23       | 9,83       | 18,71       | 9,31        | 9,13           | 9,28               |
|                                      | ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(pitzplatz) | 2,86       | 3,24       | 5,02        | 3,35        | 3,29           | 3,34               |
| Kapazitätserhöhung Doppeltraktion    | €/Zkm different. Betriebskosten       | 2,50       | 1,09       | 7,09        | 2,21        | 1,55           | 1,41               |
|                                      | €/Zkm Diff. Gesamtkosten(pugsfahrt)   | 11,66      | 10,93      | 17,68       | 10,50       | 10,21          | 10,52              |
|                                      | ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(pitzplatz) | 3,61       | 3,61       | 4,74        | 3,78        | 3,67           | 3,78               |
| Kapazitätserhöhung Fahrplanverdicht. | €/Zkm different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 6,32        | 1,96        | 1,47           | 1,34               |
|                                      | €/Zkm Diff. Gesamtkosten(pugsfahrt)   | 9,98       | 8,56       | 14,48       | 8,50        | 8,26           | 8,44               |
|                                      | ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(pitzplatz) | 3,09       | 2,82       | 3,88        | 3,06        | 2,97           | 3,04               |
| Wasserstoff-Sonderpreis              | €/Zkm different. Betriebskosten       | 2,49       | 1,09       | 3,78        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm Diff. Gesamtkosten(pugsfahrt)   | 9,23       | 8,75       | 11,00       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
|                                      | ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(pitzplatz) | 2,86       | 2,89       | 2,95        | 2,85        | 2,83           | 2,92               |
| Nachhaltigkeit 60 Jahre              | €/Zkm different. Betriebskosten       | 2,50       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
|                                      | €/Zkm Diff. Gesamtkosten(pugsfahrt)   | 9,27       | 8,75       | 14,59       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
|                                      | ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(pitzplatz) | 2,87       | 2,89       | 3,91        | 2,85        | 2,83           | 2,92               |

**Invest-Kosten Infra/km**

|                        | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Infrastrukturkosten/km | 31545,74   | 1583596,21 | 315457,41   | 78864,35    | 662460,57      | 862776,03          |
| Infrastrukturkosten    | 1000000    | 50200000   | 10000000    | 2500000     | 21000000       | 27350000           |

Abbildung 85: Management-Layout der Sensitivitätsanalyse für diff. Betriebskosten/km, Gesamtkosten/Zkm und Gesamtkosten/Spkm

**Mittelwert über diff. Gesamtkosten pro Sitzplatzkilometer in % (Prio. 3)**

Hier wird die jeweils letzte Zeile aus dem standardisierten Überblickblatt zusammengefasst, also die prozentuelle Abweichung der einzelnen Antriebskonzepte der Prio. 3 Auswertung nach den Gesamtkosten pro Sitzplatzkilometer in Bezug auf den vollelektrischen Betrieb mit EMUs.

| ct/Spkm Diff. Gesamtkosten(Sitzplatzkm) | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|-----------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| ohne Verstärker                         |            |            |             |             |                |                    |
| Basispunkt                              | 99%        | 100%       | 132%        | 99%         | 98%            | 101%               |
| Oberleitung-Investkosten                | 118%       | 100%       | 156%        | 117%        | 109%           | 111%               |
| Primärenergiekosten                     | 108%       | 100%       | 155%        | 103%        | 101%           | 103%               |
| Kapazitätserhöhung Doppeltraktion       | 100%       | 100%       | 131%        | 105%        | 102%           | 105%               |
| Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung  | 109%       | 100%       | 138%        | 108%        | 105%           | 108%               |
| Wasserstoff-Sonderpreis                 | 99%        | 100%       | 102%        | 99%         | 98%            | 101%               |
| Nachhaltigkeit 60 Jahre                 | 99%        | 100%       | 136%        | 99%         | 98%            | 101%               |
| lange Wende (7. Zug BEMU)               | 99%        | 100%       | 132%        | 109%        | 98%            | 101%               |
| gleichgew. Mittelwert                   | 104%       | 100%       | 135%        | 105%        | 101%           | 104%               |

Abbildung 86: gleichgewichteter Mittelwert der Sensitivitätsanalyse für Gesamtkosten/Spkm (Prio. 3)

Die entsprechende Zusammenfassung für das Management-Summary lautet – mit gleichen Zahlenwerten – wie folgt.

| ohne Verstärker                        | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|----------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Basispunkt                             | 99%        | 100%       | 132%        | 99%         | 98%            | 101%               |
| Oberleitung-Investkosten               | 118%       | 100%       | 156%        | 117%        | 109%           | 111%               |
| Primärenergiekosten                    | 108%       | 100%       | 155%        | 103%        | 101%           | 103%               |
| Kapazitätserhöhung Doppeltraktion      | 100%       | 100%       | 131%        | 105%        | 102%           | 105%               |
| Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung | 109%       | 100%       | 138%        | 108%        | 105%           | 108%               |
| Wasserstoff-Sonderpreis                | 99%        | 100%       | 102%        | 99%         | 98%            | 101%               |
| Nachhaltigkeit 60 Jahre                | 99%        | 100%       | 136%        | 99%         | 98%            | 101%               |
| gleichgew. Mittelwert                  | 105%       | 100%       | 136%        | 104%        | 102%           | 104%               |

Abbildung 87: Management-Layout der gleichgewichteten Mittelwerte der Sensitivitätsanalyse für Gesamtkosten/Spkm (Prio. 3)

Die Unterschiede aufgrund der einzelnen Einflussfaktoren sind relativ klein. Die Akku-Konzepte schneiden etwas schlechter ab als das vollelektrische EMU-Konzept, eine Rangordnung sollte daraus nicht gelesen werden.

### Mittelwert über diff. Gesamtkosten pro Zugkilometer (Prio. 2)

In dieser Übersicht werden die differenziellen Gesamtkosten in Euro pro Zkm zusammengefasst. Die letzte Zeile normiert den Mittelwert über alle Szenarien für das vollelektrische Antriebskonzept (EMU) auf 100%. In dieser Darstellung werden erhebliche Unterschiede zwischen den Szenarien sichtbar, die ein klares Ranking zulassen.

| €/Zkm Diff. Gesamtkosten(Zugskm)<br>ohne Verstärker | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|-----------------------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Basispunkt                                          | 9,23       | 8,75       | 14,16       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
| Oberleitung-Investkosten                            | 9,23       | 7,36       | 14,16       | 7,93        | 7,34           | 7,48               |
| Primärenergiekosten                                 | 9,23       | 9,83       | 18,71       | 9,31        | 9,13           | 9,28               |
| Kapazitätserhöhung Doppeltraktion                   | 11,66      | 10,93      | 17,68       | 10,50       | 10,21          | 10,52              |
| Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung              | 9,98       | 8,56       | 14,48       | 8,50        | 8,26           | 8,44               |
| Wasserstoff-Sonderpreis                             | 9,23       | 8,75       | 11,00       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
| Nachhaltigkeit 60 Jahre                             | 9,27       | 8,75       | 14,59       | 7,93        | 7,86           | 8,11               |
| lange Wende (7. Zug BEMU)                           | 9,23       | 8,75       | 14,16       | 8,74        | 7,86           | 8,11               |
| gleichgew. Mittelwert                               | 9,63       | 8,96       | 14,87       | 8,59        | 8,30           | 8,52               |
|                                                     | 108%       | 100%       | 166%        | 96%         | 93%            | 95%                |

Abbildung 88: gleichgewichteter Mittelwert der Sensitivitätsanalyse für diff. Gesamtkosten/Zkm (Prio. 2)

Weil das größere Sitzplatzangebot des EMUs aus Sz1 in diesen Kennzahlen nicht gewürdigt wird, erscheinen die Akku-Konzepte Sz3, Sz4 und Sz5 gesamthaft günstiger. Das ist solange richtig, als eine Kapazitätserhöhung als nicht erforderlich angenommen wird. Diese wird bei diesen Konzepten jedoch früher schlagend, wenn von kontinuierlich steigender Nachfrage ausgegangen wird.

Unter den drei Akku-Konzepten sind die Hybrid-Konzepte günstiger als das reine Akku-Konzept Sz3. Der Abstand vergrößert sich noch, wenn der reine Akku-Zug Sz3 aufgrund gemäß Kap. 8.8 auch für den 6. Zug zeitfixe Energie- und Wartungskosten von ca. 0,09€/Zkm berücksichtigt werden auf 8,68 €/Zkm bzw. 97%.

Entscheidend in dieser Betrachtung sind die Investitionskosten für die Oberleitung. Können diese gering gehalten werden (2. Zeile), dann sind die Konzepte Sz1, Sz4 und Sz5 gleich auf und signifikant günstiger als die Konzepte Sz0, Sz2 und Sz3. Hier befinden sich Infrastruktur-Investitionskosten und Betriebskosten quasi im Gleichgewicht.

### Mittelwert über die differentiellen Betriebskosten (Prio. 1)

In dieser Übersicht wird die Prio.1 Größe der differentiellen Betriebskosten in Euro pro Zkm zusammengefasst. Die letzte Zeile normiert den Mittelwert über alle Szenarien für das vollelektrische Antriebskonzept (EMU) auf 100%. In dieser Darstellung werden erhebliche Unterschiede zwischen den Szenarien sichtbar, die ein klares Ranking zulassen.

| €/Zkm different. Betriebskosten<br>ohne Verstärker | DMU<br>Sz0 | EMU<br>Sz1 | HEMU<br>Sz2 | BEMU<br>Sz3 | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|----------------------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|--------------------|
| Basispunkt                                         | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
| Oberleitung-Investkosten                           | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
| Primärenergiekosten                                | 2,49       | 2,17       | 11,49       | 3,26        | 2,70           | 2,47               |
| Kapazitätserhöhung Doppeltraktion                  | 2,50       | 1,09       | 7,09        | 2,21        | 1,55           | 1,41               |
| Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung             | 2,49       | 1,09       | 6,32        | 1,96        | 1,47           | 1,34               |
| Wasserstoff-Sonderpreis                            | 2,49       | 1,09       | 3,78        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
| Nachhaltigkeit 60 Jahre                            | 2,50       | 1,09       | 6,94        | 1,88        | 1,43           | 1,30               |
| lange Wende (7. Zug BEMU)                          | 2,49       | 1,09       | 6,94        | 2,13        | 1,43           | 1,30               |
| gleichgew. Mittelwert                              | 2,49       | 1,14       | 7,05        | 2,13        | 1,61           | 1,47               |
|                                                    | 218%       | 100%       | 617%        | 187%        | 141%           | 128%               |

Abbildung 89: Überblick Sensitivitätsanalyse für diff. Betriebskosten/Zkm (Prio. 1)

Die entsprechende Zusammenfassung für die Management-Summary lautet – mit gleichen Zahlenwerten – wie folgt.

| €/Zkm                                  | different. Betriebskosten<br>ohne Verstärker | DMU<br>Sz0    | EMU<br>Sz1    | HEMU<br>Sz2   | BEMU<br>Sz3   | BEMU-Hy<br>Sz4 | BEMU-Hy-opt<br>Sz5 |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| Basispunkt                             |                                              | 2,49          | 1,09          | 6,94          | 1,88          | 1,43           | 1,30               |
| Oberleitung-Investkosten               |                                              | 2,49          | 1,09          | 6,94          | 1,88          | 1,43           | 1,30               |
| Primärenergiekosten                    |                                              | 2,49          | 2,17          | 11,49         | 3,26          | 2,70           | 2,47               |
| Kapazitätserhöhung Doppeltraktion      |                                              | 2,50          | 1,09          | 7,09          | 2,21          | 1,55           | 1,41               |
| Kapazitätserhöhung Fahrplanverdichtung |                                              | 2,49          | 1,09          | 6,32          | 1,96          | 1,47           | 1,34               |
| Wasserstoff-Sonderpreis                |                                              | 2,49          | 1,09          | 3,78          | 1,88          | 1,43           | 1,30               |
| Nachhaltigkeit 60 Jahre                |                                              | 2,50          | 1,09          | 6,94          | 1,88          | 1,43           | 1,30               |
| gleichgew. Mittelwert                  |                                              | 2,49<br>214 % | 1,17<br>100 % | 7,07<br>606 % | 2,13<br>183 % | 1,64<br>140 %  | 1,49<br>128 %      |
|                                        |                                              | ①             |               | ③             |               | ②              |                    |

Abbildung 90: Management-Layout der gleichgewichteten Mittelwerte  
der Sensitivitätsanalyse für diff. Betriebskosten/Zkm (Prio. 1)

Auf Basis der variablen Betriebskosten wird klar das Sz1 EMU als „bestes“ Szenario erkannt. Die Reihung ist dem höchsten Energiewirkungsgrad, dem kleinsten Fahrzeuggewicht und den geringsten Instandhaltungskosten fahrzeugseitig zu verdanken.

Da das Sz1 EMU mit langen Errichtungszeiten für eine durchgehende Oberleitung verknüpft ist, wurden nach einer Lösung unter Berücksichtigung des Musskriteriums einer kurzen Realisierungszeit von unter 5 Jahren gesucht. Hier findet sich eine Gruppe der Akku-Hybridkonzepte Sz4 und Sz5, die zudem den Vorteil haben, zu einem späteren Zeitpunkt in Sz1 EMU übergeführt werden zu können.

Ein zweite Gruppe bilden der reine Akku-Betrieb BEMU Sz3 und der Bestandsdieselantrieb Sz0 DMU, sofern die Strafsteuer für die Belastung der Luft nur bei 100€/t CO<sub>2</sub>-Äquivalent bleiben. Bei BEMU schlagen die höhere Kapazität der Akkus zu Buche (doppelte Anzahl zu BEMU-Hy), das höhere Fahrzeuggewicht und der schlechtere Wirkungsgrad, da ja die gesamte Energie zuerst in den Akku eingespeichert werden muss, um nachher bedarfsgerecht abgerufen zu werden.

In einer eigenen Dimension findet sich der HEMU Sz2, der unter den schlechten Energiegesamtwirkungsgrad und der Notwendigkeit der Verwendung eines 4-Wagen-Zuges leidet. Der Vergleich mit anderen vierteiligen Zugskonzepten und mit Verstärkerwagen von dreiteiligen zu vierteiligen Zügen ergibt keine signifikante Veränderung der Verhältniszahlen. Selbst im Vergleich der Parametervariation zum Wasserstoff-Sonderpreis lässt sich erkennen, dass die deutlichen höheren Instandhaltungskosten sich signifikant und nachteilig auswirken.

Das **Ranking** auf Basis der Sensitivitätsanalysen ergibt somit:

1. Sz1 EMU vollelektrisches Antriebskonzept
2. Sz5 BEMU-Hy-opt Akku-Hybrid-Fahrzeuge mit LTO-Akkus und mehreren kurzen Fahrleitungsabschnitten, die geringe Ladungsschwankungen bei hoher Zyklen-Anzahl bedingen
3. Sz4 BEMU-Hy Akku-Hybrid-Fahrzeuge mit NMC-Akkus und einem langen Fahrleitungsabschnitt (Jenbach – Fügen) und Nachladen in Mayrhofen mit hohen Ladungsschwankungen, aber geringerer Zyklen-Anzahl (pro Zugspaar nur zwei Ladezyklen)

Betrachtet man neben den **reine Kostenbetrachtung auch zeitliche Restriktionen** (Umsetzungsdauer des Betriebskonzeptes innerhalb von max. 5 Jahren) so ergibt sich eine Umordnung der Reihung hin zu

1. Sz5 BEMU-Hy-opt gefolgt von
2. Sz4 BEMU-Hy,
3. Sz3 BEMU.

Diese Konzepte sind in Zeitrahmen von 5 Jahren umsetzbar und ermöglichen, da systemoffen, den Ausbau in Richtung einer Vollelektrifizierung je nach Bedarf.

## 9 Vergleichbare Dekarbonisierungskonzepte

In den letzten 6 bis 10 Jahren sind zahlreiche Projektstudien und Erprobungen durchgeführt worden. Diejenigen mit Bezug zu Österreich sind hier exemplarisch mit ihren Kernergebnissen angeführt. Ein guter Überblick über die beschlossenen und zukünftigen Dekarbonisierungsvorhaben der ÖBB findet sich in [42].

### 9.1 Realisierte Dekarbonisierungsprojekte in Österreich

#### Umrüstung Verschublokomotive der ÖBB Rh 1063 [19] [46]

Bereits 2015 wurde eine Machbarkeitsstudie der ÖBB gemeinsam mit den wissenschaftlichen Partnern TU Wien, Montanuniversität Leoben und DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt), sowie den Industrie-Partnern Voith, Molinari, HET Verkehrstechnik (Hochleistungs-Eisenbahn- und Transporttechnik Entwicklung) und TecSol Technical Solution in Auftrag gegeben mit dem Ziel, diese Elektrolokomotivbaureihe im Rahmen einer Hauptuntersuchung für den Betrieb ohne Oberleitung nachzurüsten.

Dazu wurden bis 2018 zwei Konzepte an den Lokomotiven 1063.038 und 1063.039 umgesetzt: eine wurde mit Supercaps als schnelles Speichermedium und LiFePo4-Akkus als Traktionsbatterie, die andere mit Wasserstofftanks und einer H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle (als range extender) und einem Li-Ionen Speicher als Traktionsbatterie, sowie den erforderlichen Nebengeräten und Ansteuerungen ausgerüstet. Die Lokomotivbaureihe wurde ausgewählt, weil im Rangierdienst dank kleiner Geschwindigkeiten nur kleine Leistungen, jedoch hohe Zugkraft benötigt werden.

Die Variante mit den Supercaps als schnell ladende und abrufbare Speicherlok hat sich grundsätzlich im Vershubdienst (Linz Hbf.) und im Anschlussbahndienst bewährt. Die Wasserstofflok hat die Machbarkeitsstudie positiv abgeschlossen und die Funktionen erfüllt, durfte aber in Betrieb ohne Oberleitung nur mit der Traktionsbatterie, nicht aber mit dem Nachladen durch die Brennstoffzelle betrieben werden. Es konnten wertvolle Erfahrungen zu Zulassung, Adaption der Werkstatt und Arbeitsschutz gewonnen werden.

Der Serienumbau unterblieb, weil aus Kostengründen die lebensverlängernden Maßnahmen für die Baureihe zugunsten einer Neuausschreibung nicht umgesetzt wurden. Auch das Folgeprojekt der Remotorisierung der dieselhydraulischen Vershublokomotive ÖBB Rh 2068 mit Umbau auf elektrische Antriebsmotoren, Wasserstoffantrieb, H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle und Traktionsbatterien (in zwei Varianten ohne oder mit zusätzlichen Supercaps) wurde verworfen, jedoch bereits im Konzeptstadium.

In [19] p17, p25, p38 und in [46] p21 werden Stand 2023 fünf alternative Antriebskonzepte zur Ablösung des Dieselantriebs benannt:

- Akku-Fahrzeuge
- Akku-Hybrid-Fahrzeuge
- Wasserstofffahrzeuge
- Wasserstofffahrzeuge mit Supercap
- Streckenelektrifizierung

#### Einsatz von Nahverkehrstriebwagen auf Regionalbahnen [19] [46]

Im 2020 wurden seitens der ÖBB zwei emissionsfreie Regionalzüge erprobt. Einerseits wurde der Elektrotriebzug ÖBB 4746.049 „Desiro EcoJet“ durch Ergänzung von ca. 17 t Batterypacks am Dach des Mittelwagens bei weitgehend unveränderten angetriebenen Triebkopf- und Endwagen in ein dreiteiliges E-Hybrid-Fahrzeug umgerüstet. Mit diesem Zug wurde fahrplanmäßiger Betrieb auf neun Regionalbahnen gefahren, die längste von Attnang-Puchheim bis Scharding über 64km, sowie die Strecke St. Pölten – Krems – Horn (Kamptalbahn) mit zusammen 55km oberleitungsfreier Strecke und zwei Oberleitungsabschnitten zum Laden während der Fahrt. Der Ladezustand fiel – ausgehend von 90% der Kapazität – nie unter 40%. Auch die technisch anspruchsvollste Regionalbahn von Wiener Neustadt nach Puchberg am Schneeberg und zurück, konnte – jedoch nur mit maximal reduzierten Nebenbetrieben – gerade noch bewältigt werden. Für einen Planbetrieb wäre eine infrastrukturseitige Lademöglichkeit (Ladeinsel) vorzusehen, wobei dieser Mehrfrequenzzug sowohl mit 16,7 Hz 15kV Bahnstrom, also auch mit 50 Hz 25kV Ortsnetz geladen werden kann. Die Tauglich-

keit wurde jedenfalls nachgewiesen. Dieses Fahrzeug war vollständig homologiert (zugelassen). Nach rund einem Jahr wurde der Zug rückgebaut und versieht wieder seinen gewohnten Dienst auf der Wiener Schnellbahn.

Derzeit werden in Österreich jährlich rund 2,1 Mio. Zugskilometer mit Diesel unter Oberleitung erbracht. Durch aktuelle Elektrifizierungsprogramme werden ab 2029 rund 0,5 Mio. Zkm elektrisch gefahren, die restlichen 1,6 Mio. Zkm können mit Durchbindungskonzepten von Akku-Hybridzügen gefahren und unter vorhandener Oberleitung weitgehend während der Fahrt aufgeladen werden. Die Durchbindungskonzepte würden die Regionalbahnen mit Wien, St. Pölten, Graz, Linz und Salzburg verbinden und die Attraktivität nicht nur durch die kürzeren Fahrzeiten, sondern auch durch den Entfall des Umsteigens ganz erheblich attraktivieren.

Als Konsequenz der Versuchsfahrten mit dem 4746.049 wurden 2023 16 Stück Akku-Hybridzüge für die Kamptalbahn mit einer Option auf insgesamt 120 Stück bestellt. Planbetrieb ab 2028.

Andererseits wurde 2020 aus Deutschland der Wasserstoffzug iLint DB 654 101/601 mit einem von Brennstoffzellen und Traktionsbatterie gespeisten E-Antrieb für rund vier Monate zur Erprobung angemietet. Dieser Zug basiert auf der bewährten dieselektrischen Triebzugfamilie Lint und wurde als Wasserstoff-Vorserienfahrzeug gebaut. Er ist nicht hybrid, kann also keinen Strom aus der Oberleitung ziehen, und ist zweiteilig ausgeführt. Mit diesem Zug wurde fahrplanmäßiger Personenverkehr von Wiener Neustadt ausgehend auf mehreren Regionalbahnen betrieben, unter anderem auf der äußeren Aspangbahn über den Wechsel bis Fehring. Dieser Probetrieb konnte die Tauglichkeit nachweisen, die Betankung mit industriell (chemisch) hergestelltem Wasserstoff mit einer mobilen Tankstellenanlage und Anlieferung mit Tanklastwagen über die Straße stellte sich als teuer und aufwändig heraus. Für einen Serieneinsatz würde jedenfalls „grün zertifizierter“ Wasserstoff aus Österreich vorgesehen sein.

## Neue Instandhaltungsfahrzeuge [19] [47]

Ende 2020 wurden von den ÖBB 5 Stück Tunnelrettungszüge mit einer Option auf insgesamt 20 Züge der 3. Generation bei Stadler bestellt. Der erste wurde im August 2023 geliefert. Deren Zweikraft-Antriebskonzept besteht aus vier Traktionsvarianten:

1. Oberleitung
2. Traktionsbatterie
3. Hybrid für erweiterte Einsätze ohne Oberleitung mit Traktionsbatterie + Dieselgenerator
4. Dieselektrisch als Rückfallebene

Im Juli 2021 wurden von den ÖBB Infrastruktur AG 50 Stück (plus 46 Stück Option) Hochleistungs-Instandhaltungsfahrzeuge in drei unterschiedlichen Bauformen und 6 nicht angetriebene Steuerwagen bei Plasser & Theurer bestellt. Der erste wurde im Juni 2023 geliefert. Diese besitzen ein hybrides E<sup>3</sup>-Antriebskonzept. E<sup>3</sup> steht für „Economic, Ecologic, Ergonomic“. Diese besitzen ebenfalls vier Traktionsvarianten, die mit jenen der Tunnelrettungszüge übereinstimmen.

Plasser & Theurer konnte seit 2015 bis Anfang 2023 international 67 Aufträge an E<sup>3</sup>-Maschinen gewinnen, 14 Fahrzeuge waren bereits ausgeliefert, 51 in Produktion und 2 in Konstruktion. 8 von 12 Baumaschinen-Fahrzeugfamilien sind bereits auf das akku-hybride E<sup>3</sup>-Konzept umgestellt worden, die vier verbleibenden sind in Bearbeitung oder können aufgrund des außerordentlich hohen Leistungsbedarfs noch nicht hybrid abgebildet werden.

## 9.2 Akademische Dekarbonisierungsstudien in Österreich

In den Jahren seit 2019 hat der Lehrgang „Rolling Stock Engineering“ an der FH Technikum Wien Academy ein Schwerpunkt der Wissenschaftlichen Arbeiten (zur Erlangung des Masters of Science) zu alternativen Antriebskonzepten herausgebildet. Das kann als Folge der Vorlesung „Innovative und zukunftsorientierte Konzepte“ im dritten Semester betrachtet werden, wo verschiedene Fachlektoren aus der einschlägigen Industrie und Wirtschaft ihre Zukunftsperspektiven vortragen und auch zur Diskussion stellen. Die Zillertalbahn hat dankenswerter Weise wiederholt wertvolle Impulse eingebracht, die speziell durch die gesamtheitliche Betrachtung von der Energiegewinnung bis zum erhöhten Kundennutzen und durch die Vorstellung des Wasserstoffzugkonzeptes und dessen gedanklichen Hintergründe ganz wesentlich und positiv aufgenommen wurden.

## Dekarbonisierung aller ÖBB Regionalbahnen bis 2029 [10] [48]

Fr. Sophie Jesper, damals tätig für die Siemens Mobility in Wien, hat in ihrer Masterarbeit des Lehrgangs „Rolling Stock Engineering“ an der FH Technikum Wien Academy [10] 2021 und bei Ergebnisvorstellung am 27. 6. 2022 im Bundesministerium für Klima, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK, vulgo Verkehrsministerium) [48] alle ÖBB-Regionalbahnen, die nicht vollständig elektrifiziert sind, auf alternative Betriebskonzepte analysiert. Diese Machbarkeitsuntersuchung hat ergeben, dass der Wasserstoffbetrieb fahrdynamisch für alle Strecken unproblematisch ist ([10] p56, [48] p4), der Batteriehybridbetrieb ebenso bis auf 7 Regionalbahnen, die zusätzliche Maßnahmen erfordern. Darunter befindet sich neben der Schneebergbahn nach Puchberg auch die Kamptalbahn, die in ihrer Gesamtlänge bis Sigmundsherberg dort ein stationäres Nachladen erfordert (das aktuelle ÖBB-Konzept sieht nur eine Bedienung bis Horn vor).

Vorgeschlagene Maßnahmen, um alle ÖBB Regionalbahnen bis 2029 dekarbonisieren zu können, sind

- Teilelektrifizierungen
- Verlagerung von projektierten Oberleitungsabschnitten innerhalb von Bundesländern bei gleichzeitiger Beibehaltung der Gesamtlänge an Oberleitungsneubau bis 2029
- Ladestationen an Streckenenden
- Speisung durch das 20 kV oder 25 kV 50 Hz Ortsnetz
- Durchbindungen auf elektrifizierte Hauptstrecken
- Aufrüstung von 35 Zügen der ÖBB Baureihe 4746 mit Battery Packs
- Lebensverlängerte Maßnahmen von 35 Zügen der ÖBB Baureihe 4020 als Kompensation
- Wasserstoffzugbetrieb für Strecke Spielfeld-Straß – Bad Radkersburg, wenn diese nicht nach Graz Hbf. durchgebunden werden sollen
- Round Table mit allen direkten Stakeholdern

**Diese Arbeit hat die sinnhafte Kombination von Maßnahmen bei Fahrzeugen und Infrastruktur behandelt.**

## Dekarbonisierung Norwegische Hauptbahnen [44] [45]

Hr. Markus Spreitzer, damals bereits als Projektleiter für Stadler Bussnang, vormals bei Siemens Mobility tätig, hat in seiner Masterarbeit des Lehrgangs „Rolling Stock Engineering“ an der FH Technikum Wien Academy [44] 2022 für die letzten Bahnstrecken mit Dieselmotoren in Norwegen diese drei äußerst anspruchsvollen, eingleisigen Hauptstrecken (Raumabahn, Rørosbahn, Nordlandbahn) untersucht. Bestehende Zweikrafttriebzüge (elektrisch und Diesel-power-pack) sollen durch Austausch des 30 t schweren Diesel-power-packs dekarbonisiert werden. Anfänglich stand klar der Wasserstoffantrieb im Vordergrund, da er nachweisen konnte, dass die erforderlichen Energiemengen (bis zu 7000 kWh) nicht in den bis zu 30 t Akku zu speichern sind bzw. dass bei 5 von 6 Zugsfahrten die Akku-Kapazitäten deutlich vor Erreichen des Zielbahnhofes erschöpft sind.

| Name der Strecke | Länge [km] | Anzahl Brücken | Anzahl Tunneln | Anzahl Bahnübergänge | Maximale Geschwindigkeit [km/h] | Maximaler Gradient [%] | Maximale Höhendifferenz [m] |
|------------------|------------|----------------|----------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Raumabahn        | 114        | 106            | 6              | 179                  | 130                             | 21                     | 645,95                      |
| Rørosbahn        | 384        | 275            | 6              | 464                  | 130                             | 36                     | 603,61                      |
| Nordlandsbahn    | 729        | 313            | 161            | 682                  | 130                             | 22                     | 662,07                      |

Abbildung 91: Untersuchte Strecken für alternative Antriebe in Norwegen [45] p10

Die Nordlandbahn überquert 3 Pässe mit zusammen rund 1200 Höhenmeter auf knapp 730km Streckenlänge.

Der Wasserstoffbetrieb wurde jedoch vom Betreiber aufgrund der Preisentwicklung und der erforderlichen Tank- und Lagerinfrastruktur kritisch gesehen, eine Bereitstellung grünen Wasserstoffs (aus Elektrolyse) wegen der volatilen Strompreise (reduzierte Leistungsfähigkeit der Wasserkraftwerke als Folge des Klimawandels) verworfen und grauer Wasserstoff zugrunde gelegt.

Eine vertiefte Analyse des Akku-Betriebs als 2. Schritt mit klug ausgewählten Oberleitungsinseln brachte die Machbarkeit, jedoch mussten im Mittel knapp 25% der Strecke mit Oberleitung überspannt werden. Die Gesamtinvestitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur konnten auf 30% der Vollelektrifizierung gesenkt werden.

In einem 3. Schritt wurde die Nutzung langer planmäßiger Aufenthaltszeiten in Stationen zum Nachladen berücksichtigt bzw. einzelne wenige Nachlade-Stillstandszeiten ergänzt, die sich dank des höheren Beschleunigungsvermögens nicht vollständig in der Reisezeit niederschlagen. Dieses Antriebskonzept mit Ladeinseln und Ladestationen konnte die erforderliche Oberleitungslänge auf weniger als 10% reduzieren bei einer Reisezeitverlängerung um max. 2%, bei der Rørosbahn im durchgehenden Verkehr um 6%. Dafür sanken die erforderlichen Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur auf 12,5% der Vollelektrifizierung bei einer Amortisationszeit von 10 Jahren (die sich bei einer CO<sub>2</sub>-Strafbesteuerung von 500 €/t CO<sub>2</sub> auf 6 Jahre reduziert).

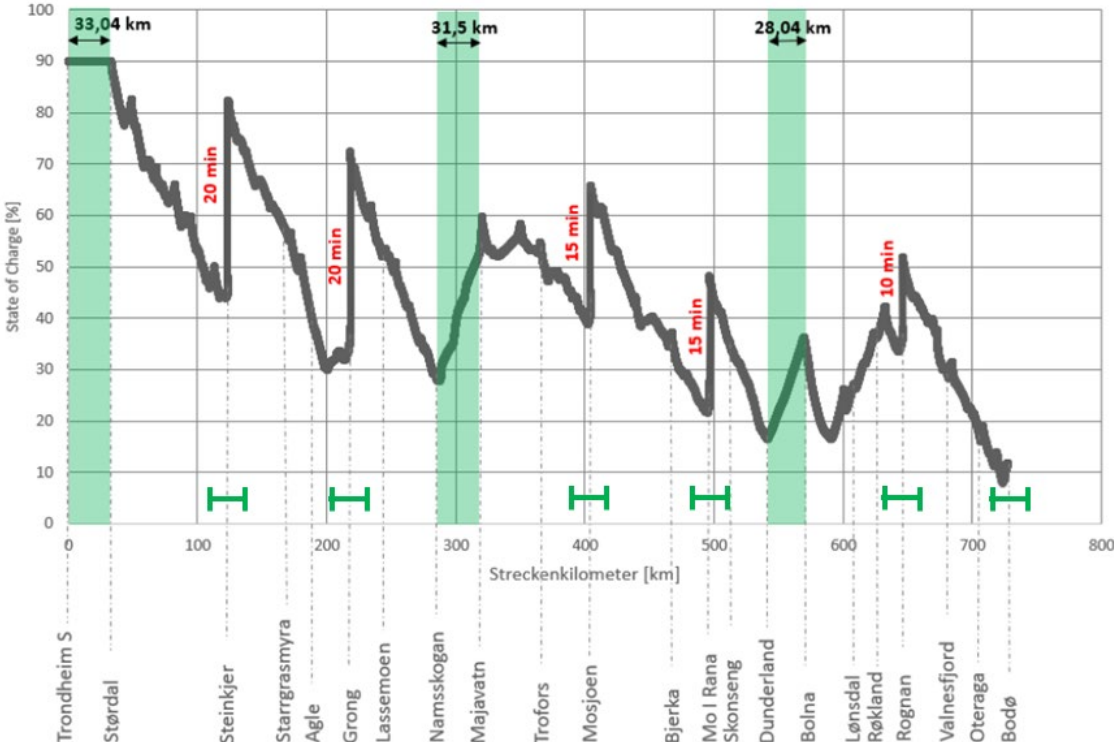


Abbildung 92: Beispiel Nordlandbahn: Oberleitungsinself, Ladestationen und Ladezustand [45] p23

Der Abschnitt Trondheim – Størdal wird aktuell für den Nahverkehr und Flughafenverkehr elektrifiziert. Mit jeder weiteren Oberleitungsinsel nach dem Konzept BEMU hybrid sinkt der Reisezeitverlust und wird zum Reisezeitgewinn, netto rund 75 min. Wird für den Güterverkehr elektrifiziert, profitiert der Personenfernverkehr mit jedem km zusätzlicher Oberleitung sofort.

|               | EMU<br>length            | BEMU (battery)<br>operational range | BEMU hybrid<br>partial catenary | BEMU hybrid + stationar charging |                                        |
|---------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
|               |                          |                                     |                                 | line + station                   | travel time                            |
| Raumabana     | 114km                    | ⇒76% ⇐100%                          | 20km 17,5%                      | 0+2km 1,7%                       | ⇔ +3:18min +1,92%<br>fra Oslo: +0,49%  |
| Rørosbana     | 384km                    | ⇒32% ⇐21%                           | 99km 25,8%                      | 25+4km 7,6%                      | ⇔ +45:07min +5,94%<br>fra Oslo: +4,69% |
| Nordlandbana  | 729km                    | ⇒25% ⇐13%                           | 190km 26,0%                     | 60+6km 9,1%                      | ⇔ +14:44min +1,25%<br>⇒9:55 ⇐9:46h     |
| total Δ-costs | 1227 Mio€<br><b>100%</b> | not feasible                        | 365 Mio€<br><b>29,7%</b>        | 153 Mio€<br><b>12,5%</b>         |                                        |

Abbildung 93: Ergebnistabelle der Abschätzrechnungen alternative Antriebskonzepte in Norwegen [45] p30

Da sich eine Vollelektrifizierung dieser Hauptbahnen aufgrund der geringen Zugdichte (ohne Güterverkehr) nicht kurzfristig wirtschaftlich darstellen lässt, hat sich die **sinnhafte Kombination von Maßnahmen bei Fahrzeugen, Infrastruktur und Betrieb als beste Lösung** ergeben.

### Zukünftige Betriebskonzepte am Knoten Wiener Neustadt [26] [27]

Hr. Martin Schellnast, tätig bei der ÖBB Produktion, hat in seiner Masterarbeit des Lehrgangs „Rolling Stock Engineering“ an der FH Technikum Wien Academy [26] jene möglichen Konzepte untersucht, die sich nach dem Erreichen der Lebensdauer der bestehenden Dieseltriebwagen der ÖBB Rh 5047 und 5022 ab 2027 anbieten. Eine Nachbeschaffung von neuen Dieseltriebwagen wird wohl ebenso ausgeschlossen wie die Anschaffung gebrauchter Dieseltriebwagen aus dem Ausland. Dazu tragen wohl auch die sehr hohen Wartungskosten des – in der Anschaffung günstigen – dieselmekanischen Antriebs der Baureihe 5022 bei, die in großen Stückzahlen international eingesetzt werden. Deshalb ist eine neue emissionsfrei Flotte ist für die sechs von Wr. Neustadt aus betriebenen Strecken zu evaluieren.

| Streckenabschnitt                     | Verbleibende Akkukapazität | Verbleibender Tankfüllstand H <sub>2</sub> (Basis Mireo Plus H) |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Leobersdorf – Weissenbach-Neuhaus     | 59 %                       | 97 %                                                            |
| Wr. Neustadt – Sopron                 | 28 %                       | 95 %                                                            |
| Wr. Neustadt – Aspang                 | 25 %                       | 94 %                                                            |
| Wr. Neustadt – Puchberg am Schneeberg | - 23 %                     | 90 %                                                            |
| Wr. Neustadt – Gutenstein             | 20 %                       | 94 %                                                            |
| Wien Zentralverschiebebf. - Felixdorf | 58 %                       | 94 %                                                            |

Abbildung 94: Verbleibende Energiespeicherkapazität nach einer Hin- und Rückfahrt, Zusammenstellung, nach [10], aus [26] p57

Diese Zusammenstellung zeigt die theoretische Nichteignung reiner Akkufahrzeuge für die Schneebergbahn nach Puchberg, die bei den Versuchsfahrten 2020 mit 4746.049 validiert wurden, mussten dort doch betriebliche Einschränkungen vorgenommen werden, die nicht dem worst case des realen Bahnbetriebs entsprechen. Hr. Schellnast legt deshalb in seiner Arbeit [26] eine Elektrifizierung des vernetzten, flachen Streckenabschnittes bis Rothengrub zugrunde (während Fr. Jesper die Teilelektrifizierung des 45% steilen Abschnittes Grünbach – Grünbacher Sattel (3,4km), Willendorf – Grünbacher Sattel (8,6km) oder Willendorf – Grünbach (5,2km) vorschlägt). Betriebliche Wünsche lassen eine Elektrifizierung ausgehend vom Unterwerk Wr. Neustadt bis Bad Fischau-Brunn und stationäres Nachladen während der Wendezeit am Streckenende ebenso sinnvoll erscheinen. Damit kann betrieblich bei einer kurzen Wende am Taktknoten Wr. Neustadt ausreichend Ladezeit zu Verfügung gestellt werden.

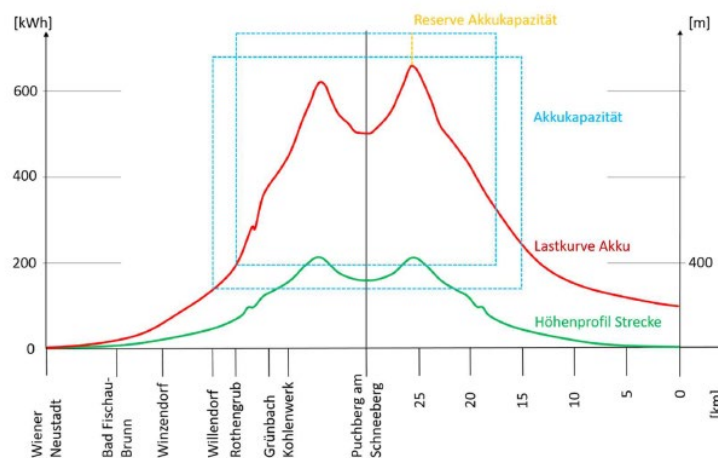


Abbildung 95: Bestimmung des erforderlichen Streckenelektrifizierungsbereichs für BEMU mittels Lastprofilkurve und vorhandener Akkukapazität für die Strecke Wr. Neustadt – Puchberg am Schneeberg ohne Nachladen in Puchberg am Schneeberg, ohne und inkl. 12% zusätzlicher Akku-Reserve [26] p58

**Auch aus diesen Untersuchungen ergibt sich die Sinnhaftigkeit, den reinen Akku-Triebzug zu einem Akku-Hybrid-Triebzug weiterzuentwickeln.**

Basierend auf den qualitativen Untersuchungen zum Energieverbrauch und den daraus resultierenden notwendigen infrastrukturellen Anforderungen werden vergleichende, differentielle Kostenabschätzungen angestellt. Diese liefern für alle sechs Strecken unterschiedliche, aber nahe beieinander liegende und plausible Ergebnisse, die eine Amortisationszeit von rund 10 Jahren bei knapp 4 Mio. Zugskilometern und 37 neuen dreiteiligen Triebzügen liegt.

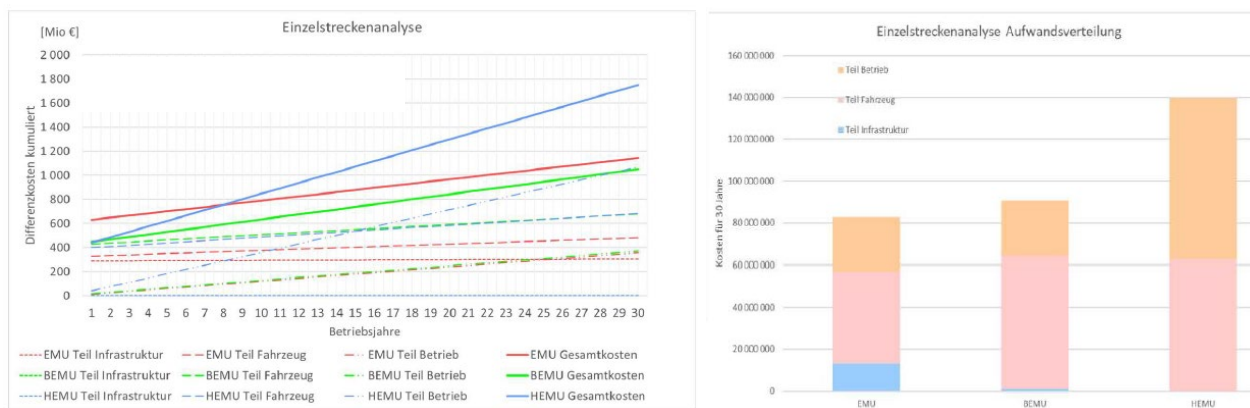


Abbildung 96: Einzelstreckenanalysen über 30 Jahre bei 129 000 bzw. 583 000 Zkm/a [27] p18, p20

Am 4. Mai 2023 wurden die Ergebnisse Vertretern der Schienen-Infrastruktur-Gesellschaft SCHIG und des Verkehrsministeriums BMK vorgestellt [27]. Für fünf der sechs Strecken wurde die Vollelektrifizierung vorgeschlagen, für die sechste Strecke (Innere Aspangbahn) ein Batterie-Hybrid-Triebzug ([27] p20). Da nur einer dieser Strecken im Rahmenplan bis 2029 zur Elektrifizierung vorgesehen ist (Wr. Neustadt- Sopron), muss mit Fahrzeugrochaden von anderen Dieselstandorten, die bis 2029 dekarbonisiert werden, eine längere Aufrechterhaltung des Dieselbetriebs am Knoten Wiener Neustadt ermöglicht werden. Die heute 97 Dieseltriebwagen können dann mittelfristig durch 37 dreiteilige EMUs bzw. BEMUSs ersetzt werden.

Kurzfristig ist der Wasserstoffzug das günstigste Dekarbonisierungskonzept, jedoch bereits nach wenigen Jahren (höchstens 10 Jahre) wird der Break even Punkt zum Batterie-Hybrid-Zug-Konzept überschritten. Über dreißig Jahre Fahrzeuglebensdauer erscheint das Batterie-Hybrid-Zug-Konzept – bei konstanten Betriebsannahmen – noch geringfügig kostengünstiger als die Vollelektrifizierung zu sein. Die Empfehlung zur Vollelektrifizierung basiert somit auf der deutlich längeren Standzeit der Oberleitung (60 Jahre) und einer angenommen Steigerung der jährlichen Zugs- und Sitzplatzjahreskilometer (Doppeltraktionen) aufgrund der hier rechnerisch nicht berücksichtigten Attraktivierung des Bahnverkehrs durch kürzer Fahrzeiten und umsteigefreie Durchbindungen nach Wien.

Der Umstellungsprozess soll also schrittweise erfolgen [27] p24:

- Fahrzeugbeschaffung EMU 2 Jahre & 20 Fahrzeuge / Jahr
- BEMU Betrieb innere Aspangbahn 2025
- Elektrifizierungsdauer 2 + 3 Jahre:
  - 2027: Weissenbach-Neuhaus & Sopron
  - 2030: Gutenstein & Puchberg am Schneeberg
  - 2033: Aspang
- BEMU mögliche Übergangstechnologie ab 2027

Die Anschaffung von Akku-Hybrid-Zügen als **Übergangstechnologie bis zur Vollelektrifizierung** aus dem bestehenden Rahmenvertrag kann – wegen verzögerter Bestellung gegenüber der Annahme in [27] – ab 2028 eine Dekarbonisierung dieser Strecken herbeiführen, bei Nachrüstung vorhandener 4647 schon ab 2026. Ein Rückbau der Akku-Komponenten nach Vollelektrifizierung der Strecken (also ein Nicht-Tausch der Akkus am Ende der Akku-Lebensdauer von 8 Jahren) würde die Akku-Hybrid-Züge in gewöhnliche EMUs zurückversetzen. Sinnvollerweise sollten beide Triebzugvarianten bereits im Rahmen der Anschaffung homologiert und zugelassen werden.

Diese Arbeit zeigt, wie **Maßnahmen bei Fahrzeugen, Infrastruktur und Betrieb, sowie Übergangslösungen** wegen verspäteter Entscheidungsfindungen ein für diese Anforderung **beste Lösung** ergeben.

## Emissionsfreier Betrieb der Schneeberg-Zahnradbahn [40] [49]

Hr. Joel Rippert, früher tätig bei Stadler Bussnang im Bereich T1 Zahnrad- und Schmalspurfahrzeuge, dann bei TSA in Wr. Neudorf für Getriebeauslegungen elektrischer Antriebsstränge und nun bei den SBB in Bern für strategische Projekte, hat in seiner Masterarbeit des Lehrgangs „Rolling Stock Engineering“ an der FH Technikum Wien Academy [40] die Quadratur des Kreises versucht ... und konzeptionell gelöst! Bei Zahnradbahnen mit bis zu 25% (250‰) Steigung, die Schneebergbahn besitzt 200‰ Maximalsteigung, zählt jedes kg Gewicht in der Antriebsauslegung viel stärker als bei Adhäsionsbahnen. Die Spurweite von 1000mm und traditionell kleine Radsatzlasten (vulgo Achslasten) lassen das Installieren von schweren Energieversorgungskomponenten an physikalische Grenzen stoßen, selbst bei Streckenlängen unter 10km.

Ein reines Akku-Fahrzeug benötigt auf der Schneebergbahn rund 9 t Akkumulatoren. Die Mitnahme von Wasserstofftanks, Brennstoffzellen und Traktionsbatterie schafft Probleme mit Bauraum im Fahrgastbereich, Schwerpunktslage und Achslasten. Grundsätzlich sind für den reinen Akku-Triebzug zumindest zweiteilige Doppeltriebwagen mit vier Drehgestellen erforderlich, für den Wasserstoffzug ein dreiteiliger Triebzug mit sechs Drehgestellen und für eine später in die Untersuchungen aufgenommenes Akku-Hybrid-Konzept ein zweiteiliger Doppeltriebwagen, der jedoch mit einem mittleren Jakobsdrehgestell ausgerüstet mit drei Drehgestellen auskommt und dadurch den Niederflurbereich deutlich vergrößern hilft. Vollelektrische Referenzprojekte sind z.B. auf der Gornergratbahn und der Jungfraubahn in der Schweiz zu finden.

Das als bestes ermittelte Antriebskonzept stellt eine Akku-Hybrid-Lösung mit einem Oberleitungsabschnitt im optisch und witterungsgeschützten Waldabschnitt zwischen Puchberg am Schneeberg und der Kreuzungsstation Baumgartner dar. Oberhalb im hochalpinen Bereich mit zwei Kehrtunneln und einer neu errichteten Bahnhofshalle, die für Oberleitungsbetrieb erheblich adaptiert werden müsste, ist auf rund 1/3 der Streckenlänge ein Akku-Betrieb mit etwas reduzierter Betriebsgeschwindigkeit vorgesehen. Ebenso kann die Ortsdurchfahrt in Puchberg mit 6 Eisenbahnkreuzungen und den Depotanlagen mit Ausnahme der Abfahrtsgleise ohne Oberleitung verbleiben. Das Ortsbild wird weder in Puchberg, noch am Hochschneeberg durch Oberleitung beeinträchtigt.

Das zusätzliche Gewicht für die Akku-Ausrüstung von knapp 4 t berücksichtigt bereits den Leistungsbedarf für einen hochgradig attraktiven vierachsigen Vorstellwagen für Starklastbetrieb und Gütertransport. Damit ist eine hohe betriebliche Flexibilität gewährleistet.



Abbildung 97: Fahrzeugkonzept dekarbonisierte Schneeberg-Zahnradbahn für 9t Achslast, [49] p7  
bei 12,5t Achslast kann durch ein mittleres Jakobsdrehgestell der Niederfluranteil signifikant erhöht werden.

Genaue Betrachtungen der Umlaufplanung mit einem und bis zu drei gleichzeitigen Umläufen in einem 90min-Takt, der je nach Antriebskonzept auf einen 85min oder 80min-Takt bei extremen Bedarf (Fahrt auf Verlangen, Abfahrt also alle 26 bis 27 min), Berücksichtigung der wesentlich langsameren Dampf-Nostalgiefahrten, das einfache Beistellen der drei optionalen Vorstellwagen, sowie die Ermöglichung von zwei Umläufen in Doppeltraktion mit Vorstellwagen (fünfteilig) ohne gleisseitige Anpassung der Kreuzungsstellen-Infrastruktur, lassen eine schrittweise umsetzbare Erhöhung der Streckenkapazität zu.

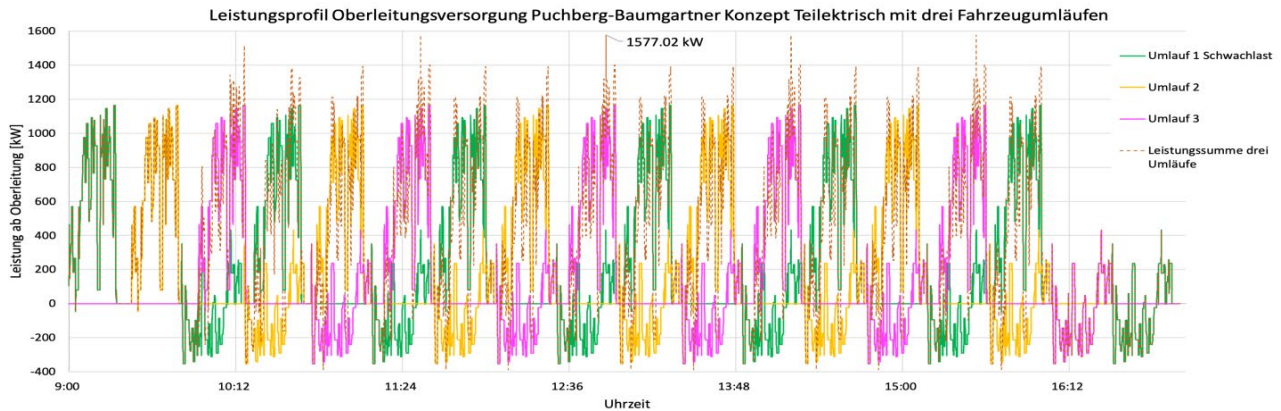


Abbildung 98: Leistungsverlauf bei drei Takt-Umläufen des Akku-Hybrid-Konzeptes, [49] p13  
 Der Spitzenleistungsbedarf ab Oberleitung erhöht sich vom Ein-Zug-Betrieb (1,2 MW) nur auf 1,6 MW.  
 Der Energiebedarf von 6 Zugpaaren (1200 kWh/d) erhöht sich bei 16 Zugpaaren auf 3200 kWh/d.

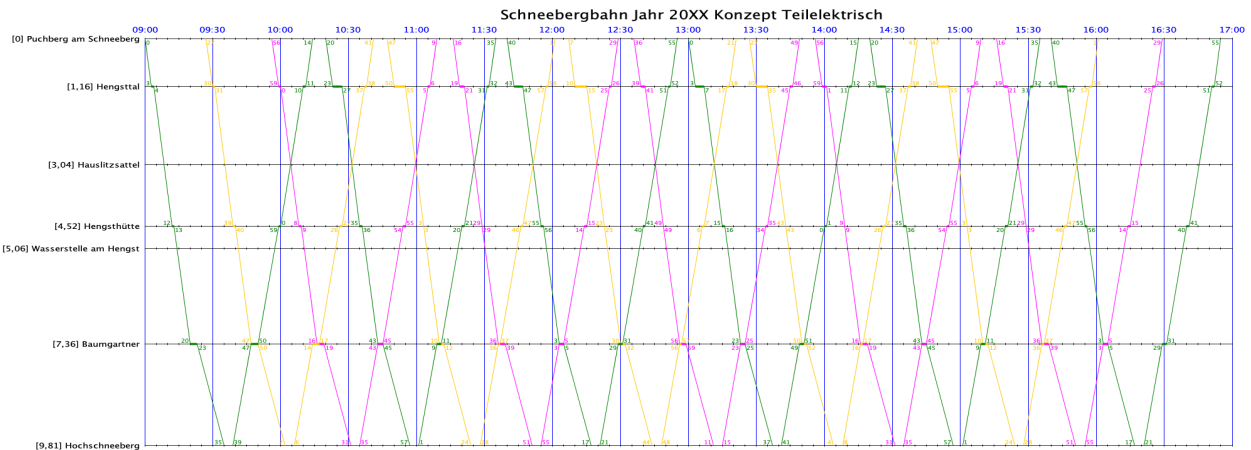


Abbildung 99: Umlaufplanung mit 3 zeitgleichen Umläufen des Akku-Hybrid-Konzeptes, [49] p14

Die Kosten über dreißig Jahre wurden nach einem standardisierten, differenziellen Abschätzungsmodell ermittelt. Der heutige Dieselbetrieb mit abgeschrieben Altfahrzeugen ist nicht wirklich repräsentativ, deshalb wurde ein Dieselnau-Konzept und heutiger Zulassungs- und Normenlage in die Abschätzung aufgenommen. Als Referenz wurde der vollelektrische Betrieb als konventioneller Lösungsansatz der Dekarbonisierung herangezogen.

| Konzepte                                   |         |                                           | Diesel IST       | Diesel NEU | Wasserstoff                                                           | Batterie | Teilelektrisch | Vollelektrisch | Teilelektrisch mit Vorstellwagen | Vollelektrisch mit Vorstellwagen |
|--------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------|----------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Anz. Wagenkasten pro Zug                   |         |                                           | 2                | 2          | 3                                                                     | 3        | 2              | 2              | 3                                | 3                                |
| Länge über Puffer [m]                      |         |                                           | 33,3 (mit Baby)  | 33,3       | 46,6                                                                  | 46,6     | 33,3           | 33,3           | 46,4                             | 46,4                             |
| Bruttomasse [t]                            |         |                                           | 44,8             | 70         | 102                                                                   | 102      | 71             | 67             | 81                               | 77                               |
| Preis pro Fahrzeug [Mio EUR]               |         |                                           | 2,7 (Basis 1999) |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Invest Fahrzeuge & Infrastruktur [Mio EUR] |         |                                           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Position                                   | Einheit | Hinweis                                   |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Fahrzeugbeschaffungskosten                 |         |                                           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Flotte                                     | EUR/Zkm | 30 Jahre Abschreibungsdauer               |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Konzeptspezifische                         |         |                                           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Infrastrukturkosten                        | EUR/Zkm | 60 Jahre Abschreibungsdauer               |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Infrastrukturhaltungskosten                | EUR/Zkm |                                           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
|                                            |         | bei 55 EUR/t CO <sub>2</sub> -Steuer 2025 |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Konzeptspezifische                         |         |                                           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Betriebskosten auf 30 Jahre                | EUR/Zkm | bei 100 EUR/t CO <sub>2</sub> -Steuer     |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Flotte                                     |         | bei 500 EUR/t CO <sub>2</sub> -Steuer     |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Zwischensumme                              | EUR/Zkm |                                           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Beförderungskapazität                      |         |                                           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| (Sitzplätze)                               | pphpd   | 1 Fahrzeug-Umlauf                         |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
|                                            |         | 3 Fahrzeug-Umläufe                        |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Summe                                      | EUR/Pkm | pro Sitzplatz bei 1 FZ-Umlauf             |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
|                                            |         | pro Sitzplatz bei 3 FZ-Umläufen           |                  |            |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
| Vergleich Basis Vollelektrisch             |         |                                           | 38%              | 121%       | 135%                                                                  | 115%     | 101%           | 100%           | 79%                              | 77%                              |
|                                            |         | bei 100 EUR/t CO <sub>2</sub> -Steuer     | 39%              | 123%       |                                                                       |          |                |                | 76%                              |                                  |
|                                            |         | bei 500 EUR/t CO <sub>2</sub> -Steuer     | 49%              | 137%       |                                                                       |          |                |                |                                  |                                  |
|                                            |         |                                           |                  |            | 97%                                                                   |          |                | 76%            |                                  |                                  |
|                                            |         |                                           |                  |            | optionale Teilelektrifizierung nur im Abschnitt Hengsttal-Baumgartner |          |                |                |                                  |                                  |

⇒ teilelektrischer Betrieb ist über Lebensdauer nicht teurer als vollelektrischer Betrieb

Abbildung 100: vergleich der differenziellen LCC-Kosten der untersuchten Konzepte, [49] p6

Das Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebskonzept ist rund 35% teurer als das Referenzkonzept und als das Akku-Hybrid-Konzept. Der Unterschied vergrößert sich auf dramatische rund 57%-Punkte, wenn die optionalen Vorstellwagen an verkehrsstarken tagen zum Einsatz gelangen.

Die in Puchberg am Schneeberg kritische elektrische Primärenergieversorgung hat zu dem Vorschlag einer „bahneigenen“ Photovoltaik-Anlage (4 MW, max 8 MW möglich) geführt, die direkt am Ende der Oberleitungstrecke bei der Station Baumgartner eingespeist werden kann. Deshalb hat sich die Versorgungsspannung 1,5kV DC als ideal herausgestellt. Mit Realisierung dieser – in der Kostenabschätzung nicht berücksichtigten Option – können die differenziellen LCC-Kosten weiter gesenkt und vor allem von Marktpreisschwankungen unabhängig gemacht werden.

Aus Blickwinkel **einer gesamtheitlichen Analyse von Fahrzeug, Infrastruktur, Betrieb und Primärenergieversorgung**, sowie unter zeitlichen Gesichtspunkten eines schrittweise Ausbaues der Maximalkapazität, hat diese Arbeit zwei beste Konzepte hervorgebracht: **vollelektrisch und akku-hybrid-Konzept**.

## FHTW Wasserstofftag [50] [51] [52] [53] [54] [55]

Am 20. 04. 2023 fand im vollbesetzten AudiMax der FH Technikum Wien ein hochkarätig besetztes „Start me up“ Event „Zukunft Wasserstoff“ statt, geleitet und moderiert von Michael Windisch, Fakultätsleiter Electronic Engineering. Hier die Kernbotschaften der jeweiligen Vorträge und anschließenden Diskussionen:

### Schadstoffreduktion durch Elektrifizierung und Wasserstoff [50]

Johannes Gragger (Kompetenzfeld Power Electronics and Control Systems Fakultät Electronic Engineering and Entrepreneurship, der FTWA)

- Wasserstoff ist im Mobilitätsbereich und als Energieträger im Moment unbedeutend
- Die Herstellung ist von der Anwendung nicht zu trennen
  - ⇒ mit Elektrolyse werden nur 0,04% des weltweiten Wasserstoffs hergestellt, 77,45% aus Kohlenstoffen
- Bei Wasserstoff ist die stoffliche Nutzung zu wertvoll, um ihn energetisch zu nutzen.
  - ⇒ >>1% der gesamten Nachfrage wird für Mobilität genutzt!
- Die Speicherung von H<sub>2</sub> ist wegen der geringen, volumetrischen Energiedichte problematisch (hohe Drücke sind erforderlich, 350 und 700 bar sind Standard, höhere wünschenswert)
- Ohne Leistungselektronik ist ökologische H<sub>2</sub>-Anwendung in der Mobilitätsbranche nicht vorstellbar.

**Künftige Rolle von Wasserstoff** (Herstellung, Speicherung, Verteilung, energetische und nicht energetische Anwendungen) [51]

Gerd Schauer (Verbund)

- Kenndaten von Wasserstoff – 1kg H<sub>2</sub> entspricht 2,8 l Benzin bzw. 33,3 kWh Strom
- Es werden 9 kg Wasser zur Extrahierung von 1 kg H<sub>2</sub> benötigt
- Der jährliche Weltbedarf beträgt 1300 Mrd m<sup>3</sup> = 117 Mio. t H<sub>2</sub>
- Als hochentzündlicher Gefahrstoff F+; R12 eingeordnet
- Wirkungsgrad vom E-Verteilnetz bis zur Nutzanwendung von H<sub>2</sub> im E-Motor liegt zwischen 21,5% und 29%
- Im Mobilitätsbereich zwei Stoßrichtungen:
  1. Fuel Cell + E-Motor
  2. konventionelle Verbrennungsmotoren auf H<sub>2</sub> adaptiert
- Wirtschaftlichkeit mit aktuellen Bewertungsschemen problematisch

**WASSERSTOFF: HERAUSFORDERUNGEN & AKTUELLE FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN** [52]

Stephan Abermann (Head of Competence Unit Energy Conversion &amp; Hydrogen / Center for Energy am AIT Austrian Institute of Technology)

- Die sinnvolle Anwendung von Wasserstoff ist verbunden mit der Herstellung von grünem Wasserstoff
- Solar und Windenergie sind in ihrer Verbreitung mit der H<sub>2</sub>-Produktion eng verlinkt (Technologietreiber)
- Angebot und Nachfrage sind derzeit nicht im Gleichgewicht
- Anwendung von H<sub>2</sub> ist in der Sinnhaftigkeit vom Träger der Energiewandlung abhängig (Autos und Nahverkehrsfahrzeuge ergeben in H<sub>2</sub>-Technik wenig Sinn – pauschal – kann im Detail Ausnahmen geben)

**Alternative Antriebe – Wasserstoff im Test bei den ÖBB** [54]

Harald Tisch (ÖBB Produktion GmbH)

- Grundstein der Klimaschutzstrategie der ÖBB ist die Elektrifizierung von Strecken
- Als davon alternative Antriebe wurden Batterie-Hybrid- und H<sub>2</sub>-Fahrzeuge untersucht
- Batterie-Hybrid ist von der Reichweite beschränkt, allerdings wirtschaftlich unter heutigen Rahmenbedingungen sehr attraktiv
- Batterie-Hybrid hat dort Sinn, wo die Strecke Nachlademöglichkeiten hergibt oder diese wirtschaftlich einfach vertretbar zu schaffen sind.
- H<sub>2</sub>-Fahrzeug ist von der Reichweite und den Tankintervallen Dieselfahrzeugen gleichzustellen
- H<sub>2</sub> nur bei grünem Wasserstoff sinnvoll und in der Wirtschaftlichkeit direkt vom H<sub>2</sub> Preis abhängig (derzeit unrentabel)
- H<sub>2</sub>-Fahrzeuge weisen einen sehr geringen, energetischen Gesamtwirkungsgrad auf

**Wasserstoff für Eisenbahnen [55]**

Friedrich Bruck (SIEMENS Mobility, System Engineering Traction)

- Alle Bahnverwaltungen wollen sich in Richtung nachhaltiger Mobilitätskonzepte entwickeln
- Ein Problem ist bei vielen Bahnverwaltungen der niedrige Elektrifizierungsgrad
- Es bieten sich für den Personenverkehr zwei Fahrzeugvarianten an
  1. Batterie Hybrid
  2. H<sub>2</sub>-Fuel-Cell-Train
- Der Batterie-Hybrid ist auf Bahnnetzen mit einem hohen Elektrifizierungsgrad die ideale Lösung. Speziell die Durchbindung zwischen elektrifizierten Abschnitten bietet ein enormes Potential der Transportqualität
- H<sub>2</sub>-Fahrzeug ist als Alternative zu Dieselfahrzeugen mittlerweile technologisch serienreif.
- Betrieblich können H<sub>2</sub>-Fahrzeuge mit Dieselfahrzeugen mithalten, wirtschaftlich nicht.
- Zwei Pilotprojekte in Deutschland laufen zur Sammlung von Erfahrungen mit diesem Fahrzeugtyp:
  1. H2goesRail (mobile H<sub>2</sub>-Tankstelle für DB Deutsche Bahn)
  2. Mireo Plus H für Bayern

**9.3 Internationale Dekarbonisierungsprojekte**

Aus Zeitmangel kann hier leider nur eine unvollständige Auflistung bemerkenswerter Projekte erfolgen. Stand Anfang 2023 ergab sich folgendes Bild von Referenzprojekten [26]

| Fzg. Typ | Produkt                | Stk. | Besteller / Betreiber                                   | Status     |
|----------|------------------------|------|---------------------------------------------------------|------------|
| BEMU     | Mireo Plus B           | 20   | Landesanstalt Scheinfahrzeuge<br>Baden-Württemberg      | Auftrag    |
| BEMU     | Desiro ML Eco          | 1    | ÖBB Personenverkehr                                     | in Betrieb |
| BEMU     | Coradia<br>continental | 11   | Verkehrsverbund Mittelsachsen                           | Auftrag    |
| BEMU     | FLIRT Akku             | 55   | Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein                   | Auftrag    |
| BEMU     | FLIRT Akku             | 44   | DB Regio für Zweckverband SPNV Süd                      | Auftrag    |
| HEMU     | Coradia iLint          | 27   | dein Start (DB Tochter)                                 | in Betrieb |
| HEMU     | Mireo Plus H           | 1    | Deutsche Bahn                                           | Projekt    |
| HEMU     | Mireo Plus H           | 7    | Niederbarimber Eisenbahn                                | Auftrag    |
| HEMU     | Coradia iLint          | 14   | Landesnahverkehrsgesellschaft<br>Niedersachsen          | in Betrieb |
| HEMU     | FLIRT H <sub>2</sub>   | 1    | San Bernardino County Transportation<br>Authority (USA) | Projekt    |

Abbildung 101: Referenzen von normalspurigen BEMU und HEMU, [26] p50

| Hersteller                                                                   | Plattform | Fahrzeugausführung als |               |                          |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------|---------------|--------------------------|
|                                                                              |           | EMU                    | BEMU          | HEMU                     |
| Alstom                                                                       | LINT      | -                      | -             | Coradia iLint            |
| Siemens Mobility                                                             | Desiro ML | Desiro ML              | Desiro ML Eco | -                        |
| Siemens Mobility                                                             | Mireo     | Mireo                  | Mireo Plus B  | Mireo Plus H             |
| Stadler Rail                                                                 | FLIRT     | FLIRT 160              | FLIRT Akku    | (FLIRT H <sub>2</sub> )* |
| * Vom FLIRT H <sub>2</sub> ist derzeit nur ein Fahrzeug für USA projektiert. |           |                        |               |                          |

Abbildung 102: verfügbaren normalspurige Fahrzeugplattformen mit alternativem Antriebskonzept, Stand Anfang 2023 der, [26] p51

Diese ersten modernen Referenzanwendungen in Abbildung 101 stützen sich auf Marktplukte ab, die alle auf Fahrzeugplattformen gemäß Abbildung 102 basieren und die bereits im Schienenfahrzeugmarkt erfolgreich eingeführt sind.

### Auflistung von Schienenfahrzeugen alternativer Antriebskonzepte

Hier findet sich der Versuch einer vermutlich unvollständigen, chronologischen Auflistung bemerkenswerter Meilenstein rund um die Dekarbonisierung des Schienenverkehrs Stand 07/2023. „4x“ soll die Anzahl von 4 Zügen bedeuten.

- 1907 Akkumulator-Triebwagen Wittfeld (DB: ETA177, 178 und ETA 180) (2-, 3-teilig)
- 1910 Akkumulator-Triebwagen Brjansk (Russland) (2-teilig)
- 1952 Akkumulator-Triebwagen ETA176 (DB BR 517/817) "Limburger Zigarre" (1-teilig, später mit Steuerwagen)
- 1954 Akkumulatoren-Fahrzeuge ETA 150 DB-BR 515 (1-teilig, mit Steuerwagen)
- ~2018: Prototyp-Versuche mit ÖBB 1063.038 und ÖBB 1063.039
- x.04.2018: Alstom iLint Versuchseinsatz (2x) LNVg Niedersachsen auf EVB Elbe-Weser
- 11.07.2018: Alstom iLint: Zulassung für D
- 17.09.2018: Alstom iLint (2x) Buxtehude-Bremerhaven-Cuxhaven
- x.10.2018: Stadler Flirt Akku: Vorstellung Prototyp (3-teilig), Reichweite 150 km, 140km/h
- 24.08.22: Alstom iLint EVB offiz. Inbetriebnahme (ab 25.7.2022)
- 12/2022: Alstom iLint (6x) auf 4 Taunus-Strecken (Umstellung bis Mitte 2023) (x? x) Rhein-Main-Verkehrsverbund [2.Auftrag]
- <30.06.2018: Alstom iLint: VRR (Rhein-Ruhr) Stornierung 14x von Absichtserklärung 2014
- ~2019: Siemens Desiro ML CityJet Eco ÖBB 4746.049 Vorstellung
- 2019 Land Schleswig-Holstein ordert als erster Kunde 55 zweiteilige Einheiten Stadler Flirt Akku, ab Ende 2022
- x.x.2019: Stadler Flirt H2: Deal mit SBCTA San Bernardino County Kalifornien
- x.2020: Siemens Desiro ML CityJet Eco ÖBB 4746.049 öffentliche Erprobungsfahrten im Planverkehr mit Passagieren
- 12.09.2020 - 26.11.2020: öffentliche Erprobungsfahrten Alstom iLint bei ÖBB (Aspangbahn, Wechsel, Thermen, Schneeberg, Gutenstein)
- x.03.2020 Auftrag Siemens Mireo B ab 12/23 Ortenau + Schwarzwaldbahn, ab 12/24 Netz Ostbrandenburg, ab 12/25 Westerwald
- x.06.2021 Siemens Mireo B für NEB ab 2024
- 31.8.2021 Siemens Battery Hybrid Straßenbahn Charlotte North Carolina
- x.12.2021: Alstom iLint: Abbruch Ausschreibung Thüringen: Rottenbach-Katzhütte wegen Unwirtschaftlichkeit (55 => 90 Mio.€)
- 12.07.2021 - 28.02.2022: Alstom iLint Testfahrten SWEG Hechingen – Gammertingen – Sigmaringen
- x.x.2021 Stadler korrigierte nach Testfahrten mit Akkutriebwagens auf Basis des Flirt unter diversen Bedingungen die Reichweite auf 185 km
- x.11. 2021 Auftrag von DB Regio über 44 Einheiten Stadler Flirt Akku für die Südpfalz ab 2025.
- x.12.2021 Stadler meldet Rekordfahrt eines Flirt-Akku-Triebwagens bei winterlichen Bedingungen über 224 km
- x.02. 2022 Auftrag über 16 Batteriezüge Flirt von DB Regio für Mecklenburg-Vorpommern ab Dezember 2026
- 15.02.2022 Vertrag Stadler mit Utah State University (USU) und ASPIRE Engineering Research Center über Entwicklung und Erprobung Batterietriebzuges auf Basis Flirt Akku
- x.09.2022: Alstom iLint: Langstreckenfahrt 1175km Bremervörde – München
- 15.09.2022: Präsentation Siemens Mireo H - erste Testfahrt
- 22.09.2022: Stadler Flirt H2 (4x, 21xopt) MoU für CalSTA CalTrans für Kalifornien
- ~05/2023: Auslieferung Stadler FlirtH2 nach Amerika
- x.06.2023-x.09-2023: Vorführfahrten Stadler Flirt H2 in Kanada Quebec – Clermont
- x.12.2023: Siemens Mireo B für Ortenau-Netz
- x.x.2024: Probetrieb Siemens Mireo H für DB Regio Baden Württemberg (Tübingen) mit 160km/h
- x.01.2024: Probetrieb mit Passagieren Siemens Mireo H für Bayerische Regiobahn (Augsburg)
- x.12.2024: Einsatz Siemens Mireo H für DB Heidekrautbahn (Berlin-Groß Schönebeck)
- 2024: Siemens Mireo H für NEB Niederbarnimer Eisenbahn (Berlin-Templin e.a.)
- x.12.2024: Einsatz Siemens Mireo B (31x) für NEB Niederbarnimer Eisenbahn (Berlin-Templin e.a.)
- 2024: Pesa Link (11x) für NEB Niederbarnimer Eisenbahn (Berlin-Templin e.a.)

## 10 Zusammenfassung & Ausblick

### 10.1 Resumee

Die Entscheidung 2018 für ein innovatives Wasserstoffzugkonzept, eingebettet in eine Modellregion und Bestandteil eines regionalen Mobilitätsplans, erscheint zum damaligen Zeitpunkt und Gewichtungen von Projektparameter richtig und gut getroffen worden sein.

Seit dieser Entscheidung sind viele Erkenntnisse bei österreichischen und ausländischen Bahnbetreibern mit Prototyp-Umbauten und seriennahen Fahrzeugen alternativer Antriebssysteme gewonnen worden. Auch der Stand der Wissenschaft und Technik hat sich äußerst stark weiterentwickelt. Ebenso hat sich die Normenlage derart verändert, dass das angebotene Fahrzeug von 2018 neu ausgeschrieben werden sollte.

### Fahrzeuge

Es wurden fünf Antriebskonzepte untersucht und daran die bisherigen Studien und Einschätzungen gespiegelt:

- Sz1 EMU                      vollelektrische Triebzüge dreiteilig (mit durchgehender Oberleitung)
- Sz2 HEMU                    Wasserstoffzüge wie 2018 konzipiert, vierteilig
- Sz3 BEMU                    Akku-Züge nach heutigem Stand der Technik, dreiteilig
- Sz4 BEMU-Hy                Akku-Züge mit NMC-Technologie, teilweise unter Oberleitung (Jenbach – Fügen)
- Sz5 BEMU-Hy-opt          Akku-Züge mit LTO-Technologie, teilweise unter Oberleitung in Doppelspurabschnitten

Diese Varianten wurden mit einem Dieselmotor heutiger Form verglichen und stellen nur eine Basisvariante dar, von der Subvarianten abgeleitet werden können. Große Veränderungen der grundsätzlichen Erkenntnisse werden nicht erwartet.

Das auf lange Sicht (30 Jahre und mehr) betrachtet **beste**, dauerhafteste und nachhaltigste **Antriebskonzept** ist **Sz1 EMU vollelektrische dreiteilige Triebwagenzüge**, weil es den geringsten Energieverbrauch im Betrieb, die höchste Performance und (mit Verstärkerwagen) das beste Sitzplatzangebot anbietet. Die hohen Investitionskosten in die Oberleitung werden durch günstigere Fahrzeuge und signifikant kleinere Betriebskosten über 30 Jahre kompensiert und damit der Priorität 1 entsprochen. Dafür wird eine Elektrifizierung mit 1,5kV DC und drei Unterwerken vorgeschlagen, da dies Vorteile für Fahrzeuge, Infrastruktur und späteren Strombezug bringt. Andere Versorgungssysteme sind mit Nachteilen ebenfalls möglich.

Dieses Konzept setzt sich in der Gesamtbetrachtung nur relativ gering von den Akku-Konzepten Sz3, Sz4 und Sz5 ab. Mit kleineren als den relativ hoch angesetzten Oberleitungsinvestitions- und -erhaltungskosten vergrößert sich der Abstand aber auf 10% bis 17% der differentiellen Gesamtkosten pro Sitzplatzkilometer.

Bei einem späteren Angebotsausbau, sei es auf Führung der Züge in Doppeltraktion oder in einem Viertelstundentakt, ist dieses Antriebskonzept allen anderen absolut überlegen.

Da die Errichtung einer durchgehenden Oberleitung nicht in der erforderlichen Zeit sichergestellt werden kann, gilt es ein zweitbestes Konzept bzw. ein **unter heutigen Bedingungen bestes Konzept** zu identifizieren, das – möglichst ohne Investitionsverluste – für die Zukunft Weiterentwicklungen nicht verhindert. Damit scheidet der Wasserstoffzug nach Sz2 aus, da er bisher nicht als Wasserstoff-Hybrid-Zug angeboten und als Sonderlösung für die spezielle Situation im Zillertal ein ewiges Einzelstück bliebe. Ein vorbereiteter späterer Umbau des HEMU in einen EMU ist grundsätzlich denkbar und wäre eine der erwähnten Subvarianten, macht das aber ohnehin schon deutlich teuerste Fahrzeug noch teurer. Die Betriebskosten des HEMUs sind rund 75% teurer als die der anderen Konzepte, wenn der Wasserstoff zu Marktpreisen bezogen wird. Kommt der Vertrag über Sonderkonditionen für das Zillertal derart zustande, dass die Energie am Rad gleich teuer bezahlt wird wie bei einem äquivalenten EMU (weniger als ein Drittel vom Marktwert), dann sind die Betriebskosten immer noch zwei bis drei Euro pro gefahrenen Zugskilometer teurer als bei den Vergleichskonzepten (rund 1,7 Mio Eur/Jahr).

Als zweitbestes Konzept erscheint dann investitionsseitig das Akku-Zug-Konzept Sz 3 BEMU, solange nur ein Zug mehr für die gleiche Verkehrsleistung erforderlich ist. Diesen Platz 2 verliert der BEMU jedoch, sobald ein zweiter zusätzlicher

Zug zum Akku-Nachladen an beiden Endbahnhöfen erforderlich wird (Kap. 8.8) an Sz4 und liegt sogar auf Platz 4, wenn die Investitionen in die Oberleitung für Sz5 dank 1,5kV DC nur minimal geringer ausfallen als zugrunde gelegt (Kap. 8.2). Dieses Akku-Zug-Konzept, das nur mit sechs Zügen attraktiv erscheint, verhindert jedoch zukünftige Weiterentwicklungen, weil die höheren Betriebskosten dauerhaft die eingesparten Investitionen aufzehren und quasi im täglichen Betrieb aufgehen lassen und eine Kapazitätserhöhung später teuer (mit bis zu +80% Betriebskosten) erkaufte wird. Dies entspräche exakt jene Vorgangsweise, die heute noch viele Regionalbahnen trotz des mittlerweile eingeführten Einstundentakts mit Dieselantrieb verkehren lässt, da anstelle einer nachhaltigen Investition teure Betriebskosten geduldet werden.

In genau diesen bisher nur schwer auflösbaren Entscheidungskonflikt, nämlich hohe Investitionen in eine Elektrifizierung tätigen zu müssen, bevor der erste Elektrozug mehrere (viele) Jahre später verkehren und damit das Mobilitätsangebot attraktiviert werden kann, bringt nun das hochinnovative Antriebskonzept des Akku-Hybrid-Zuges ein neue Lösung ein. Eine Lösung, die auch in den bisherigen Zillertalbahn-Studien nicht behandelt worden ist:

Dort, wo die Oberleitung rasch und problemfrei (Grundstücke) errichtet werden kann, verkehrt der Hybridzug elektrisch, die Lücken zwischen diesen Oberleitungsinseln werden mit einem deutlich kleineren Akku überbrückt. Ließen sich die Oberleitungslücken schließen, könnten die Akkus – dann idealerweise am Ende ihrer Lebenszeit – ersatzlos entfallen oder würden nur zum Puffern der Rekuperationsenergie mitgeführt.

Die **Szenarien Sz4 BEMU-Hy und Sz5 BEMU-Hy-opt** unterscheiden sich als **unter heutigen Bedingungen bestes Konzept** einerseits durch die Wahl der Oberleitungsabschnitte und andererseits durch die Akkutechnologie der Züge. Für die Zillertalbahn mit ihrem ausgeprägten Nahverkehrscharakter (stop-and-go-Verkehr) bieten sich eher die höherwertigen, aber **langlebigeren LTO Akkus aus Sz5** an.

Mehrkosten für diese aktuell beste Lösung sind vorhanden, aber gering und dem Zeitdruck geschuldet. Die laufenden Gesamtbetriebskosten pro Sitzplatzkilometer sind etwa gleichauf mit denjenigen des Sz1 EMU, weil der Mehraufwand (Anschaffung und Energieverbrauch) für die Akkus die geringeren Investitionskosten kompensiert.

## Infrastruktur

Doppelspurausbau Schlitters – Gagering ist unabhängig vom Antriebskonzept sinnvoll. Es wird empfohlen, es wie geplant umzusetzen. Sollte dieser Abschnitt elektrifiziert werden (Sz4), dann wäre zu berücksichtigen (Gleisabstand).

Der geplante Umbau Bhf. Mayrhofen als zentrale Verkehrsdrehscheibe muss nur für das Antriebskonzept Sz2 HEMU adaptiert werden. Bei einer anderen Konzeptentscheidung ist geplante bzw. bestehende Bahnhofsanlage mit vier Durchgangsgleisen ausreichend. Eine Oberleitung zum Nachladen von Akku-Zügen (Sz3, Sz4, Sz5 BEMU) soll mit einer Laststation nachgerüstet werden. Ein allfälliger Neubau einer Wagenhalle zum nächtlichen Unterstellen der neuen Züge ist unabhängig vom Antriebskonzept empfehlenswert.

Die geplante Trassenverlegung zwischen Zell am Ziller und Aschau zur Anbindung der Zillertal Arena ist genauso wie der Zillertaler Mobilitätsplan nicht vom Antriebskonzept abhängig. Beides kann mit allen Antriebskonzepten gleichermaßen umgesetzt werden.

Für die Akku-Hybridkonzepte sind mehrere Oberleitungsabschnitte möglich, die in der nächsten Projektphase nach einer Konzeptentscheidung untersucht werden würden. Diese Abschnitte werden von lokalen Unterwerken gespeist, die jedenfalls auch an das lokale Ortsnetz angeschlossen sein sollen. Optional können den Unterwerken stationäre Energiespeicher (Akkus, second-life-Akkus) zugeschaltet werden, die den Energiemenge des Bedarfs eines Starklast-Betriebstages ihres Abschnittes puffern können und so Stromspitzen im Ortsnetz tagsüber vermeiden.

Wird entlang der Trasse der Zillertalbahn von Mayrhofen ausgehend eine 55kV Erdleitung verlegt, durch die in der Nacht der günstige lokale Überschussstrom stationär gespeichert wird, hat man die Kernidee und Zillertal-spezifischen Vorteile des Wasserstoffzug-Konzepts lebendig weiterverfolgt. Wie in weiter oben gezeigt, wird Wasserstoff in der Mobilität eine geringere Rolle zugesprochen als seiner stofflichen Rolle als Rohstoff und Prozessstoff in der Industrie (Chemie, Stahl).

## Synergien

Die Nähe zu anderen österreichischen und ausländischen **Schmalspurbahnen mit 760 mm und 750 mm Spurweite** (siehe Kap 3.8), speziell der Pinzgaubahn, Murtalbahn und den Niederösterreich Bahnen, soll zur gemeinsamen Konzeptfindung gesucht werden. Ziel muss eine **möglichst große, gemeinsame Flotte** sein.

Der **aktuelle Güterverkehr** von und nach Fügen kann, wenn für Kapazitätserhöhung bzw. Taktverdichtungen eine zweite Serie an BEMU-Hybrid-Triebzügen angeschafft wird und Schlitters – Gagering zweigleisig ist, durch die in den Taktlücken überzähligen Triebzüge emissionsfrei abgewickelt werden. Die Elektrifizierung der Rampe von der Innbrücke zum Bahnhof Jenbach ist hilfreich. Der Akku-Modus der Fahrzeuge vermeidet die Probleme der bei Be- und Entladung störenden Oberleitung (betrieblichen oder infrastrukturseitigen Mehrkosten), wird aber punktuelle Anpassungen erforderlich machen. Bis dahin können die dann freien Diesellokomotiven D13 bis D16 (ggf. remotorisiert) und die Leihlok StB VL23 den Betrieb aufrechterhalten, für erstere wurden lebensverlängerte Maßnahmen schon budgetiert und für zweitere konnte die Prüfung auf Verwendung des vollsynthetischen HVO 100 Treibstoff positiv abgeschlossen werden.

Der **Nostalgieverkehr** ist durch die Wahl des Antriebskonzeptes nicht beeinflusst. Eine Zugskreuzung von Dampflokomotive und Wasserstoffzug mag bizarr erscheinen, würde aber bei einer vollständigen Zulassung des Wasserstoffzuges kein betriebliches Problem darstellen. Die in einer Studie getätigten Sichtweisen zu einer Verkürzung der Lebensdauer der Oberleitung durch gelegentlichen Dampflokomotivverkehr sind nicht belegbar und nicht nachvollziehbar, insbesondere weil die Zillertalbahn keine Tunnel besitzt.

Die Synergie zum **Busverkehr** kann mit gemeinsamen Ladestationen (idealerweise gleich bei den Unterwerken) sichergestellt werden. Würde man sich bei der Bahn für eine Akku-Hybrid-Lösung und bei den Bussen für eine Wasserstofflösung entscheiden, kann die Zillertalbahn den Wasserstoff auf Behälterbasis mit Zügen der Randlage von Mayrhofen befördern. Synergien zu Pistenraupen können aufgrund der bisher getroffenen Prototypenfahrungen für beide Energieträger aktuell ausgeschlossen werden.

## Studien

Die Kommentare zu und die Vergleiche von den beigegebenen, bisher durchgeführten Studien finden sich in Kap. 3.

## 10.2 Offene Punkte

In dem Zeitraum zur Erstellung dieser Studie konnten nicht alle Aspekte ausreichend gewürdigt werden, gleichwohl wir meinen, die essentiellen Parameter nach dem aktuellen Stand der Technik und der Wissenschaft abgebildet zu haben.

Die Einzelgespräche mit den meisten Stakeholdern konnten gegen Ende der Ausarbeitung durchgeführt werden, jene mit Lieferantenvertretern jedoch nicht. Dies ist der nun anstehenden Detailausarbeitung vorbehalten.

In der Modellbildung des **Wirtschaftlichkeitsmodells** konnten die

- Fahrdynamischen Einflüsse eines schonenden Umganges mit Traktionsbatterien bei allen Akku-Zug-Konzepten nicht abgebildet werden. Die vorhandenen Simulationsprogramme müssen dafür angepasst werden oder die Ergebnisdaten aus zweierlei Berechnungsfällen halbautomatisch kombiniert werden. Ziel wäre darzulegen, dass der Vollelektrische Betrieb Sz1 EMU hier zusätzliche Vorteile gegenüber den Akku-Zug-Konzepten verfügt. Aktuell sind die nachweisbaren Unterschiede tendenziell als zu gering dargestellt.
- Die Vorteile von dreiteiligen Triebzügen, die auf unterschiedliche Arten zu vierteiligen Zügen antriebsseitig verlängert werden können, wurden zu wenig und nicht in Kennzahlen ausgedrückt.
- Der Verbrauch der Nebenbetriebe, neben der „Chillen“ der Antriebsausrüstung in unterschiedlichem Ausmaß bei allen Antriebskonzepten außer dem Sz1 EMU vollelektrisch wurde noch nicht abgebildet. Hier sind speziell die großen Verbraucher HVAC, also Heizung, Lüftung und Klimaanlage zu verstehen, für die erhebliche Mengen an Energie im Fahrzeug bereitgestellt werden müssen. Tendenziell spricht das gegen die Bereitstellung elektrischer Energie durch Wasserstoff und Brennstoffzellen, etwas weniger gegen Akku-Speicher.
- Die Energierückgewinnung während des Bremsens (Rekuperation) ist längst Stand der Technik, eine Zwischenspeicherung im Fahrzeug bringt bei allen Fahrzeugen der Sz 2 bis Sz 5 (HEMU, BEMU) einen Vorteil gegenüber dem rein elektrischen Fahrzeug, das in die Fahrleitung zurückspeisen muss und dann erst zeitgleich einen Verbraucher finden muss (was auf einer eingleisigen Regionalbahn unvorteilhafter ist als in einem großen Netz). Dieser Effekt wäre noch herauszuarbeiten.

Bei der **Ermittlung der Parameter** fehlt eine plausible Ermittlung der Oberleitungskosten, die sich an den Erfordernissen der Zillertalbahn orientiert. Die Hochrechnung über typische Kosten und Strecken-, bzw. Gleislänge ist hinreichend erprobt worden, die Kombination der streckenspezifischen Analyse von FCP mit den nun erarbeiteten Konzeptvorschlägen sowie eine etwas kreativerer Herangehensweise zur Berücksichtigung eines regionalen Lokalbahnbetreibers fehlt.

### 10.3 Nächsten Schritte

Drei Schritte werden empfohlen, zeitgleich durchzuführen:

1. Gezielte Gespräche mit Pinzgaubahn, Murtalbahn und ggf. Niederösterreich Bahnen, ob und ggf. welches gemeinsame Antriebskonzept trotz aller bereits gefassten Beschlüsse noch möglich ist. Mit Akku-Hybrid-Zügen können grundsätzlich alle Bedürfnisse dieser Betreiber abgedeckt werden.  
Vorgespräche mit potentiellen Fahrzeuglieferanten.
2. Festlegung der Anzahl Züge für die Zillertalbahn, dazu u.a.  
Verfeinerung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung innerhalb des ausgewählten Konzeptes gemäß den gelisteten offenen Punkten insbesondere in Hinblick auf zukünftige Angebotsverdichtungen
3. Angepasste, detaillierte Ermittlung der Infrastrukturkosten entsprechend der Konzeptauswahl, im Falle Akku-Hybrid-Konzept z.B. die detaillierte Umsetzbarkeit der Ladeinfrastruktur (Akkugröße, Unterwerke, Oberleitungsabschnitte, etc.)

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Neuausschreibung der Fahrzeuge inkl. eines optionalen Wartungsvertrags empfohlen. Die Infrastrukturanpassungen sollen entsprechend dem ausgewählten Konzept zur Ausschreibung gelangen. Will man den Güterverkehr zeitnahe auf Basis neuer Triebfahrzeuge dekarbonisieren, so sollte die Anzahl zu bestellender Züge um eins erhöht werden. Dies stellt zudem eine zusätzliche Sicherheit gegen die Unwägbarkeiten von Kollisionen an Eisenbahnkreuzungen dar. Mit 10 Zügen (6 + 4 Angebotsverdichtung) sind beide Aspekte jedenfalls abgebildet.

### 10.4 Management-Summary

- Aufgrund der notwendig zeitnahen Realisierung wird die **Akku-Hybrid Lösung** als beste Variante empfohlen
  - differentielle Betriebskosten ähnlich gering wie vollelektrische Triebwagen (EMU)
  - kein Investitionsverlust, da voll aufwärtskompatible Systemarchitektur,
  - Züge könnten später zu EMUs umgebaut werden, um Austausch von Akkus zu vermeiden, Fahrzeuggewicht und Energieverbrauch sowie die Betriebskosten weiter zu senken, umgekehrt ist ein Nachrüsten der Hochspannungsausrüstung reiner Akku-Fahrzeuge kaum realistisch
- **Einsparungsmöglichkeiten** durch gemeinsamen Einkauf mit Pinzgau- und Murtalbahn, u.a.
  - eine Fahrzeugplattform ermöglicht rein elektrisch, rein Akku und Akku-hybrid bzw. baugleiche Züge
  - gemeinsame Ersatzteilbeschaffung und deutlich geringere Wartungskosten
- **Nachhaltigkeit:** später weiterer Ausbau der Oberleitung mit zusätzlichen Kosten- und Betriebsvorteilen möglich
  - Mobilitätsplan und alle Bauvorhaben unbeeinflusst,
  - Umbau Bhf. Mayrhofen als zentrale Verkehrsdrehscheibe zu Bus und P&R, sowie Ergänzung einer Abstellhalle für Züge bleiben unverändert sinnvoll. Vereinfachte Oberleitung zum Nachladen.
- Voller (Fahrgast-)Nutzen kann auch **ohne Abschluss einer Vollelektrifizierung** realisiert werden
- Realisierung **in 4 bis 5 Jahren** „unter besten Umständen“ möglich
  - Inkl. aus mehreren Gründen sinnvoll erscheinender Fahrzeugneuausschreibung
  - Festlegung von Oberleitungsabschnitten berücksichtigt den Zeithorizont
- **Synergien durch Nutzung** von gemeinsamen Ladestationen **für Bus und Dritte** (idealerweise bei den Unterwerken) können gleichermaßen sichergestellt werden.
  - Güterverkehr kann mit den Zusatzfahrzeugen späterer Angebotsverdichtungen, dem Zweigleisabschnitt Schlitters – Gagering und punktuellen Maßnahmen dekarbonisiert werden
  - Nutzungskonzept lokaler Energie kann durch geschirmte Erdspeiseleitung in Bahntrasse zu Unterwerken aufrecht bleiben, bestehende Steuerungskabel und Lichtwellenleiter sind zu berücksichtigen.

# 11 Literaturverzeichnis

- [1] Zillertaler Verkehrsbetriebe AG, Der Zillertaler Mobilitätsplan - Lösungen für eine bessere Mobilität, <https://mobilitaetsplan.at/>, (c)2020, 06.02.2024.
- [2] G. Emberger, Anbot für Erstellung einer Bewertung unterschiedlicher Konzepte für die Umsetzung des Projekts „Dekarbonisierung Zillertalbahn“, TU-Wien, 18.10.2023.
- [3] ÖBB, Fahrplanbilder der Fahrplanperiode 2024 für die Züge der ÖBB und einiger weiterer Bahnen im PDF-Format, Internet: <https://www.oebb.at/de/fahrplan/fahrplanbilder>, 06.02.2024.
- [4] ZVB-GF, Neue Fahrzeugkonzepte - Zillertalbahn2025+ (Vorlesung FHTW), Wien: ZVB, 11.11.2021.
- [5] A. Z. H. VVT, Protokoll zur 5. Sitzung, Innsbruck, 03.10.2023.
- [6] KCW, Prüfung des Angebotes der ZVB - Schlussbericht, Berlin: KCW GmbH, 25.05.2020.
- [7] C. Diewald und F. Saykin, Richtpreisangebot H2 TM EMU Zillertalbahn, Bussnang (Schweiz): StadlerAustria, 02.05.2023.
- [8] D. Günthel, P. Brandl und C. Schaaffkamp, Prüfung der Elektrifizierungskosten der ZBV für die Umstellung der Zillertalbahn auf elektrischen Antrieb mit Oberleitung - Annex zum Variantenvergleich, Berlin: KCW GmbH, 19.07.2023.
- [9] M. Frankhauser, C. Peer und S. Wechner, Mobilität der Zukunft - Antriebssysteme-ZVB (FFG-Studie), Schwaz: Molinari Rail Austria GmbH, 05/2017.
- [10] S. Jesper, Bewertung alternativer Antriebskonzepte für Schienenfahrzeuge des Personennahverkehrs bei Einsatz auf nicht- oder teilweise elektrifizierten Strecken in Österreich, Wien: FHTW, 15.09.2021.
- [11] Fritsch und Chiari, Elektrifizierung der Zillertalbahn - Studie - Kostenevaluierung, Wien: Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH / FCP GmbH, 17.05.2023.
- [12] FCP, Elektrifizierung der Pinzgauer Lokalbahn, Wien: FCP fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 01. 05. 2020.
- [13] M. Weber, e.a. und J. Kometer, WIVA P&G HyTrain - Technologischer, wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich von nachhaltigen Schienenfahrzeuganwendungen für das Zillertal, Graz: HyCentA, 21.12.2023.
- [14] R. Söllner, TramTrain - autorisierte Mitschrift eines Fachgesprächs, Wien: priv., 09.01.2024.
- [15] K. Garstenauer, Pionierprojekt: Wasserstoff-Zug in Österreich im ÖBB-Testbetrieb, Wien : ÖBB PV, 26.11.2020.
- [16] J. Kometer, Bericht Restnutzungsdauer ZVB - Fahrzeugflotte Personenverkehr, Schwaz: Prose GmbH, 27.01.2022.
- [17] Heid und Partner, Schienenfahrzeugbeschaffung Tirol GmbH - Vergaberechtliche Gegenüberstellung, Wien: Heid&Partner Rechtsanwälte GmbH, 11.07.2023.
- [18] L. Cech, Argentina launches solar-powered trains from CRRC in Jujuy, [www : railmarket.com/news/passenger-rail/15535-argentina-launches-solar-powered-trains-from-crrc-in-jujuy](http://www.railmarket.com/news/passenger-rail/15535-argentina-launches-solar-powered-trains-from-crrc-in-jujuy), 11.01.2024.
- [19] H. Tisch und T. Gerstenmayer, Hybrid Rail Systems, ÖBB, FHTW, 18.09.2023.

- [20] Wird nachgereicht, (Meldungen im Sommer 2023 zu diesem Sachverhalt sind im Netz wieder verschwunden - die lokale Kopie noch nicht wiedergefunden).
- [21] Warum keine zusätzlichen Wasserstoffzüge fahren (evB Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser), Hannover: [heise.de/news/Warum-keine-zusaetzlichen-Wasserstoffzuege-fahren-9245554](https://heise.de/news/Warum-keine-zusaetzlichen-Wasserstoffzuege-fahren-9245554), 17.08.2023.
- [22] A. Engelke, Wiesbaden schafft Wasserstoffbusse ab - und kauft Dieselbusse, Frankfurt/Main: [hessenschau.de/wirtschaft/wiesbaden-schafft-wasserstoffbusse-ab---und-kauft-dieselbusse-v4,wasserstoff-busse-wiesbaden-100](https://hessenschau.de/wirtschaft/wiesbaden-schafft-wasserstoffbusse-ab---und-kauft-dieselbusse-v4,wasserstoff-busse-wiesbaden-100), 15.12.2022.
- [23] M.-C. Fromm, Flotte komplett, Fahrplan noch löchrig (Taunusbahn), Frankfurt/Main: [hessenschau.de/wirtschaft/rmv-wasserstoffzuege-im-taunus-flotte-komplett-fahrplan-noch-loechrig-v1,ein-jahr-wasserstoffzuege-100](https://hessenschau.de/wirtschaft/rmv-wasserstoffzuege-im-taunus-flotte-komplett-fahrplan-noch-loechrig-v1,ein-jahr-wasserstoffzuege-100), 11.12.2023.
- [24] F. Z. Digital Life, Bilanz nach einem Jahr Wasserstoff-Züge in Deutschland: Zu teuer, Wien: [futurezone.at/digital-life/wasserstoff-zug-deutschland-bilanz-zu-teuer-lnvg-niedersachsen-akku-elektro/402552965](https://futurezone.at/digital-life/wasserstoff-zug-deutschland-bilanz-zu-teuer-lnvg-niedersachsen-akku-elektro/402552965), 10.08.2023.
- [25] W. Klebsch, Heininger Patrick und J. Martin, Studie - Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV Einschätzung der systemischen Potenziale, Frankfurt: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V, 2019.
- [26] M. Schellnast, Entwicklung eines Bewertungsmodells zur Auswahl der optimalen Traktionsart und Bewertung möglicher Lenkungseffekte am Schienenverkehrsmarkt am Beispiel Knoten Wr. Neustadt Hbf., Wien: FHTW, 26.02.2023.
- [27] M. Schellnast, Entwicklung eines Bewertungsmodells zur Auswahl der geeignetsten Traktionsart und Bewertung der möglichen Lenkungseffekte am Schienenverkehrsmarkt Lenkungseffekte am Schienenverkehrsmarkt (Vortrag SCHIG, BMK), Wien: SCHIG, BMK, 04. 05.2023.
- [28] C. Schindele und F. Bruck, Einsatz von Brennstoffzellen in Traktionsanwendungen (masterarbeit), Wien: FHTW, 08.10.2020.
- [29] D. Quitter, Deutsche Bahn und Siemens präsentieren den Mireo Plus H, Würzburg: Konstruktions-Praxis ([konstruktionspraxis.vogel.de](https://konstruktionspraxis.vogel.de)), 09.05.2022.
- [30] J. Rippert, Konzepte für emissionsfreien Personenverkehr auf nicht elektrifizierten Zahnradbahnen, Masterarbeit FHTW, 21.5.2003.
- [31] Ferrovie.info, Stadler e FAL presentano "TREEN" il primo treno green a batterie, [www.ferrovie.info/index.php/it/13-treni-reali/27754-ferrovie-stadler-e-fal-presentano-treen-il-primo-treno-green-a-batterie](https://www.ferrovie.info/index.php/it/13-treni-reali/27754-ferrovie-stadler-e-fal-presentano-treen-il-primo-treno-green-a-batterie), 03.10.2023.
- [32] DesignWerk, Neue Batteriezellen für den HIGH CAB Semi Lowliner, Winterthur, Schweiz: [www.designwerk.com/post/presse/designwerk-erweitert-batterieportfolio-mit-lfpzelltechnologie/](https://www.designwerk.com/post/presse/designwerk-erweitert-batterieportfolio-mit-lfpzelltechnologie/), 19.04.2023.
- [33] S. Schaal, Designwerk enthüllt MCS-Designwerk enthüllt MCS Batteriepuffer, Winterthur, Schweiz: [www.electrive.net/2022/12/19/designwerk-enthueullt-mcs-ladestation-mit-batteriepuffer/](https://www.electrive.net/2022/12/19/designwerk-enthueullt-mcs-ladestation-mit-batteriepuffer/), 19.12.2022.
- [34] Leclanché E-Mobility SA, Commercial Vehicle and Rail Battery Systems, Yverdon-les-Bains, Schweiz: [www.leclanche.com](https://www.leclanche.com), 07/2022.
- [35] ABB Switzerland Ltd.(Traction), BORDLINE® Max 850 HP - High power battery for transportation, Turgi, Schweiz: [abb.com](https://abb.com), 03/2022.
- [36] Designwerk Technologies AG , E-LKW, Batteriesysteme, Ladegeräte, Entwicklung von individuellen Lösungen,

Winterthur, Schweiz: [www.designwerk.com](http://www.designwerk.com), 2024.

- [37] Sva, Neue Züge für die Mariazellerbahn, Luzern: Schienenverkehr aktuell, Minirex, 01/2011.
- [38] M. Emmenegger, Die Ferrovia Appulo - Lucane, Luzern: SER SCHweizer Eisenbahn Revue 3/2024 p108, 2024.
- [39] Stadler, Battery-powered Multiple Unit SRBE312, 950mm Gauge, Bussnang: Stadler Dok: tmfalbmu0923\_en.pdf, 09.2023.
- [40] J. Rippert, Konzepte für emissionsfreien Personenverkehr auf nicht elektrifizierten Zahnradbahnen, Wien: FHTW, 21.05.2023.
- [41] ORF Tirol, Zillertalbahn abschnittsweise schneller, Innsbruck: tirol.orf.at/stories/3229955/, 26. 10. 2023.
- [42] R. Beier, Konzept zur Dekarbonisierung der ÖBB-Nebenbahnen, Luzern: Schienenverkehr aktuell 3/2024, p140 , 2024.
- [43] C. Söfker, F. Hütting und G. Hauser, Grössere Energieeffizienz durch Umrichter-Speisung, Luzern: SER SCHweizer Eisenbahn-Revue 03/2024, p134-136, 2024.
- [44] M. Spreitzer, Erarbeitung eines Nachhaltigkeitskonzeptes durch Dekarbonisierung aktueller Bestandsfahrzeuge unter Berücksichtigung bestehender Infrastruktur in Norwegen, Wien: FHTW, 19.09.2022.
- [45] M. Vohla und M. Spreitzer, Erarbeitung eines Nachhaltigkeitskonzeptes durch Dekarbonisierung aktueller Bestandsfahrzeuge unter Berücksichtigung bestehender Infrastruktur in Norwegen (Vortrag ÖVG), Wien: FHTW, 20.12.22 / 26.01.2023.
- [46] H. Tisch und ÖBB PV, Alternative Antriebe bei den ÖBB – Was bisher geschah (ÖVG Vortrag), Wien: ÖBB, 16.01.2023.
- [47] A. Pürller, Dekarbonisierung im Bahnbau - Alternative Antriebskonzepte von Plasser & Theurer auf der Überholspur (Vortrag ÖVG), Wien: Plasser & Theurer, 26.01.2023.
- [48] M. Vohla, F. Bruck und S. Jesper, Vollständige Dekarbonisierung des schienengebundenen Personenverkehrs in Österreich deutlich vor 2029, Wien (BMK): FHTW, 27.06.2022.
- [49] J. Rippert, Konzepte für emissionsfreien Personenverkehr auf nicht elektrifizierten Zahnradbahnen (Vortrag Amt der NÖ Landesregierung), St. Pölten: FHTW, 12.07.2023.
- [50] J. Gragger, Schadstoffreduktion durch Elektrifizierung und Wasserstoff, Wien: FHTW, 20.04.2023.
- [51] G. Schauer, Künftige Rolle von Wasserstoff - Herstellung, Speicherung, Verteilung, energetische und nicht energetische Anwednungen (Vortrag Wasserstofftag FHTW), Wien: Verbund, 20.04.2023.
- [52] S. Abermann, Wasserstoff: Herausforderungen & aktuelle Forschungsaktivitäten (Vortrag Wasserstofftag FHTW), Wien: AIT Austrian Institute of Technology, 20.04.2023.
- [53] ZVB-GF, Die Umstellung der Zillertalbahn auf Wasserstoff (Vortrag Wasserstofftag FHTW), Wien: ZVB, 20.04.2023.
- [54] H. Tisch, Alternative Antriebe – Wasserstoff im Test bei den ÖBB (Vortrag Wasserstofftag FHTW), Wien: ÖBB, 20.04.2023.
- [55] F. Bruck, Wasserstoff für Eisenbahnen (Vortrag Wasserstofftag FHTW), Wien: Siemens Mobility, 20.04.2023.



**Herausgeberin**

Technische Universität Wien  
Forschungsbereich für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik  
Karlsplatz 13, 1040 Wien

**Für den Inhalt verantwortlich**

Ao.Univ.Prof. Univ. Prof. Mag. Dr. Günter Emberger  
**Umschlagfotos** TU Wien | Matthias Heisler/goemb.at

**Layout** PR & Marketing

**Stand** 12/2021

**OPTIONAL Kontakt oder Bezugsquelle**

Technische Universität Wien  
E230-INSTITUT FÜR VERKEHRSWISSENSCHAFTEN  
Telefon +43 1 58801 23112  
[guenter.emberger@tuwien.ac.at](mailto:guenter.emberger@tuwien.ac.at)  
[www.tuwien.at/cee/transport/planning](http://www.tuwien.at/cee/transport/planning)