

 ACTES Bernard GmbH

Datum:	05.05.2025
Projekt-Nr.:	P013672
Version	00
Seitenanzahl:	117
Autoren:	Stefan Jorthan, Sebastian Forthuber, Daniel Kral (ACTES Bernard GmbH) Renate Pohl (Bernard Gruppe ZT GmbH) Bernhard Kurzeck (PROSE GmbH) Andreas Schöbel (OpenTrack)

Auftraggeber:

Land Tirol

Abteilung Mobilitätsplanung

Projekt:

**Variantenprüfung für Lade- und
Versorgungseinrichtungen der
Zillertalbahn**

Inhalt:

Endbericht

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung, Zielsetzung, Projektumfang	9
2	Ausgangslage Zillertalbahn	11
3	Streckenbewertung - Arbeitspaket 1	11
3.1	Datengrundlage Bahnstrecke, Randbedingungen, Ansätze	12
3.1.1	Regelwerke und Normen	13
3.1.2	Ansätze zur technischen Realisierung	16
3.1.3	Rahmenbedingungen Umwelt / Naturhaushalt	19
3.2	Methode der Streckenbewertung	20
3.3	Ergebnis der Streckenbewertung	23
3.3.1	Technische Machbarkeit der Realisierung einer Oberleitung	23
3.3.2	Umwelt und Naturhaushalt	25
3.3.3	Streckenabschnitte mit tatsächlichen und potenziellen Einschränkungen höheren Grades	28
4	Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn – Arbeitspaket 2	30
4.1	Randbedingungen	31
4.1.1	Fahrplanvorgaben aus Zillertaler Mobilitätsplan und Annahmen für den Zugbetrieb	31
4.1.2	Annahmen zum Fahrzeug	31
4.2	Fahrdynamische Betriebsimulation mit OpenTrack	38
4.3	Dimensionierung der Akkus	38
4.4	Bahnenergieversorgung	40
4.4.1	Bahnenergieversorgung mit Gleichstrom	40
4.4.2	Bahnenergieversorgung mit Wechselstrom	42
4.5	Fahrplanstabilität	44
4.6	Varianten	44
4.6.1	Variante 0 – Akkuzug	47
4.6.2	Variante 1 – Akkuzug mit verlängerten Ladeabschnitten	49
4.6.3	Variante 2 – Akku-Hybrid mit teilweiser Oberleitungselektrifizierung	52
4.6.3.1	Variante 2 – Optimierungsvariante 2a	54
4.6.3.2	Variante 2 – Zusatzvarianten	56
4.6.4	Variante 3 – Akku-Hybrid mit erweiterter Oberleitungselektrifizierung	57
4.6.5	Variante 4 – Akku-Hybrid mit hohem Oberleitunganteil	59
4.6.6	Variante 5 – Vollelektrifizierung per Oberleitung mit leistungslosen Abschnitten	61
4.6.7	Variante 6 – Vollelektrifizierung per Oberleitung	63

4.7	Ermittelte minimale Akkugröße	64
4.8	Energiebedarf	65
4.8.1	Energiebedarf Fahrzeug ab Fahrleitung	65
4.8.2	Energiebedarf ab Netzknoten und Energiebilanz	67
4.9	Dimensionierung der Bahnstromversorgungs-Unterwerke und Systemauswahl.....	68
4.9.1	Gleichstrom.....	69
4.9.2	Wechselstrom	69
4.9.3	Auswahl des Bahnstromversorgungssystems.....	70
4.10	Fahrzeug: Kapazitätseinschränkung durch Platzbedarf von elektrischen Komponenten	70
4.11	Differentielle Kosten.....	71
4.11.1	Kosten Fahrzeug (inkl. Akku, Trafo) sowie Tauschkosten-Akku	72
4.11.2	Kosten Fahrleitung.....	73
4.11.3	Kosten Bahnstromversorgung	74
4.11.4	Energiekosten.....	75
4.11.5	Differentielle Kostenbetrachtung.....	76
4.12	Dauer der Baumaßnahmen für Fahrleitung und Bahnstrominfrastruktur.....	80
4.13	Bewertung der Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen	81
4.13.1	Kosten.....	81
4.13.2	Synergieeffekte Fahrzeug.....	81
4.13.3	Umweltauswirkungen.....	82
4.13.4	Zeitliche Realisierbarkeit, Dauer der Baumaßnahmen und Betriebliche Einschränkungen in der Bauphase	82
4.13.5	Bauliches Umsetzungsrisiko.....	82
4.13.6	Fahrzeugseitiges Umsetzungsrisiko	83
4.13.7	Angebotserweiterung.....	83
4.13.8	Betriebsstabilität (Störungsbetrieb).....	83
4.13.9	Gesamtbewertung	84
5	Zusammenfassung	86
5.1	Streckenbewertung.....	86
5.2	Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn auf Basis von Akku-Hybrid-Lösungen.....	86
5.2.1	Beurteilung.....	87
5.2.2	Resümee	89
6	Verweise – Literatur, Quellen, Daten	90
7	Abkürzungsverzeichnis.....	91

8	Anhang	92
8.1	Bezugslinie G1, Lademaß EBO	92
8.2	Aktualisiertes Lichtraumprofil	93
8.3	Zielfahrplan	94
8.4	Bewertungstabelle – Ergebnis Streckenbewertung	96
8.5	Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe	98
8.5.1	Brücken	98
8.5.2	Hochspannungsleitungen	99
8.6	Einschränkungen	100
8.6.1	Brücken/Unterführungen	100
8.6.2	Hochspannungsleitungen	104
8.6.3	Mittelspannungsleitungen	108
8.6.4	Telekomleitungen	112
8.6.5	Engstellen	114
8.7	Fahrdynamisches Betriebssimulationsmodell OpenTrack	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Regelquerschnitt, Lichtraumprofil mit Mast mit Rammrohr-Fundament (schematische Darstellung)	17
Abbildung 2: Regelquerschnitt, Lichtraumprofil mit Mast mit Blockfundament (schematische Darstellung)	17
Abbildung 3: Regelquerschnitt, Baubereich Mastgasse	20
Abbildung 4: Übersichtskarte Streckenbewertung	27
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Zugkonzepte „3-Teiler“ und „4-Teiler“	32
Abbildung 6: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm für vierteiliges Konzept. Beschleunigungen gelten sowohl für drei- als auch vierteiliges Konzept	34
Abbildung 7: Blockdiagramm Antriebsanlage für einen Gleich- und einen Wechselstrom-Akku-Triebzug	34
Abbildung 8: Grafische Darstellung der aufbereiteten Eingangsdaten aus OpenTrack für den 4-Teiler ..	39
Abbildung 9: Legende Elektrifizierungsvarianten	45
Abbildung 10: Elektrifizierungsvarianten	46
Abbildung 11: Akkudimensionierung Variante 1 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 301 kWh (noch mit kürzeren Elektrifizierungsabschnitten an den Enden)	50
Abbildung 12: Akkudimensionierung Variante 1 – 15 kV AC – maximaler Entladehub 301 kWh (noch mit kürzeren Elektrifizierungsabschnitten an den Enden)	51
Abbildung 13: Akkudimensionierung Variante 2 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 153 kWh	53
Abbildung 14: Akkudimensionierung Variante 3 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 77 kWh	58
Abbildung 15: Akkudimensionierung Variante 4 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 23 kWh	60
Abbildung 16: Akkudimensionierung Variante 5 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 4 kWh	62
Abbildung 17: Unterführung, km 1,4 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH).....	100
Abbildung 18: Unterführung, km 2,8 (Plan Brückenbau Land Tirol, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	102
Abbildung 19: Unterführung, km 16,8 (Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	103
Abbildung 20: Hochspannungsleitung TINETZ, km 1,4 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH)	104
Abbildung 21: Hochspannungsleitung TINETZ, Neubau km 23,0 (Google Earth).....	105
Abbildung 22: Hochspannungsleitung APG, km 30,8	106

Abbildung 23: Hochspannungsleitung APG, km 30,8	107
Abbildung 24: Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 21,0 (Google Earth)	108
Abbildung 25: Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 21,4 (Google Earth)	108
Abbildung 26: Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 21,8 (Google Earth)	109
Abbildung 27: Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 22,6 (Google Earth)	110
Abbildung 28: Mittelspannungsleitung TINETZ, km 28,8 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH) ...	111
Abbildung 29: Mittelspannungsleitung TINETZ, km 30,2 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH) ...	111
Abbildung 30: Stromleitung, km 23,6/23,8 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	112
Abbildung 31: Telekomleitung, km 28,0 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	113
Abbildung 32: Engstelle Grundstück, km 3,0 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	114
Abbildung 33: Engstelle Grundstück, km 3,2 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	114
Abbildung 34: Engstelle Grundstück, km 3,6 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	115
Abbildung 35: Engstelle, km 24,0 – 24,4 Zell am Ziller (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)	116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datensätze – Strecke	12
Tabelle 2: Öffentlich zugängliche Datensätze – Recherche	13
Tabelle 3: Elektrische Sicherheitsabstände OVE EN 50119, Tabelle 2	15
Tabelle 4: Baubereich Mastgasse.....	19
Tabelle 5: Bewertungsschema.....	22
Tabelle 6: Ergebnis der Bewertungsanteile	24
Tabelle 7: Brückenhöhen, Quelle: 2024-11-25 (ZVB), Laservermessung.....	28
Tabelle 8: Engstellen	29
Tabelle 9: Parameter für drei- und vierteiliges Zugkonzept	33
Tabelle 10: Wirkungsgrad Traktion am Rad ab Fahrleitung ohne / mit Speicherung der Traktionsenergie im Akku	35
Tabelle 11: Maximale Stromstärke bei stillstehendem Fahrzeug nach EN 50367 [7]	35
Tabelle 12: Annahmen für Masse und Kosten des Transformators	36
Tabelle 13: Annahmen zu Akkugröße, -kosten und -lebensdauer	37
Tabelle 14: Für einen Umlauf maximal benötigte Traktionsenergie und anfallende Bremsenregie für einen Umlauf (am Rad, maximale Beladung).....	39
Tabelle 15: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 0	47
Tabelle 16: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 1	49
Tabelle 17: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 2	52
Tabelle 18: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 2a	54
Tabelle 19: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 3	57
Tabelle 20: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 4	59
Tabelle 21: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 5	61
Tabelle 22: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 6	63
Tabelle 23: Gewählte Akku-Nenn-Kapazität für die verschiedenen Elektrifizierungsvarianten.....	64
Tabelle 24: Annahme Fahrzeugmasse für die einzelnen Varianten und Wert bei 40% Beladung für Energieberechnung	65
Tabelle 25: Abschnitte ohne Fahrleitung pro Umlauf – zeitlicher Anteil und Streckenanteil	66

Tabelle 26: Jährlicher Energiebezug der Flotte ab Schleifleiste in GWh	67
Tabelle 27: Jährlicher Energiebezug / Energiebilanz ab Netzknoten.....	68
Tabelle 28: Maximaler Leistungsbedarf	68
Tabelle 29: Dimensionierung der 1,5 kV Gleichrichter-Unterwerke (GUW).....	69
Tabelle 30: Dimensionierung der 15 kV Wechselstrom Unterwerke	69
Tabelle 31: Bauraumvolumen für die Akkus und beanspruchte Fahrzeuglänge bei beidseitigen Geräteschränke mit 0,9m Breite und 2,5 m Höhe	71
Tabelle 32: Kostenkomponenten des Schienenfahrzeugs aufgeteilt in Basisfahrzeug und Zusatzkosten für Trafo und Akku.....	72
Tabelle 33: Jährliche Kilometerleistung pro Garnitur, Quelle: VVT	73
Tabelle 34: Kostenkomponenten der Fahrleitung	74
Tabelle 35: Kostenkomponenten der Bahnstromversorgung.....	75
Tabelle 36: Anteile der Investitionskosten an den Gesamtkosten	77
Tabelle 37: Anteile der Betriebskosten an den Gesamtkosten	77
Tabelle 38: Erst-Investitionskosten, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz	77
Tabelle 39: Investitionskosten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz	78
Tabelle 40: Investitionskosten, Kostenkomponenten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz.....	78
Tabelle 41: Betriebskosten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz	79
Tabelle 42: Betriebskosten, Kostenkomponenten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz	79
Tabelle 43: Gesamtkosten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz	80
Tabelle 44: Bewertung der Varianten.....	85
Tabelle 45: Bewertungstabelle Streckenbewertung.....	97
Tabelle 46: Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe unter Brücken für Wechselspannung (AC)	98
Tabelle 47:Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe unter Brücken für Gleichspannung (DC).....	98
Tabelle 48: Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe unter Hochspannungsleitungen	99

Hauptauftragnehmer:



- ACTES Bernard GmbH, Ernst-Melchior-Gasse 24, 1020 Wien,
Stefan Jorthan, Sebastian Forthuber, Daniel Kral

Für diese Studie wurden folgende Nachunternehmer eingesetzt:



- PROSE GmbH, Spornbergerstr. 1, 6130 Schwaz,
Josef Kometer, Bernhard Kurzeck, Fahrzeugtechnischer Teil, rollendes Material



- OpenTrack Railway Technology GmbH, Kaasgrabengasse 19/8, 1190 Wien
Andreas Schöbel, Fahrdynamische Simulation



- BERNARD Gruppe ZT GmbH, Bahnhofstraße 19, 6060 Hall in Tirol
Renate Pohl, Raum und Umwelt

1 Einführung, Zielsetzung, Projektumfang

Im Auftrag des Landes Tirol, wurde eine Studie zur Untersuchung möglicher Infrastrukturvarianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen der Zillertalbahn, betrieben von der Zillertaler Verkehrsbetriebe AG (ZVB AG), erstellt.

Die Technische Universität Wien hat für das Land Tirol verschiedene Konzepte zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn bewertet [1]. Ein optimiertes Akku-Hybrid-Konzept (Akku-Züge, teilweise durch eine Oberleitung gespeist) wird, unter den vorgegebenen zeitlichen Randbedingungen, als bestes Konzept für eine zeitnahe und kosteneffiziente Dekarbonisierung betrachtet. Das Hybrid-Konzept sieht den elektrischen Betrieb per Oberleitung auf jenen Abschnitten vor, an denen diese rasch und problemfrei errichtet werden kann. Die Verbindungsstrecken dazwischen werden per Akku überbrückt.

Die in der Studie priorisierten Akku-Hybrid-Varianten weisen unterschiedlich lange Versorgungs- und Ladeabschnitte auf.

Die vorliegende Studie untersucht, auf welchen Abschnitten der Strecke die Errichtung von Versorgungs- und Lade-Abschnitten möglich und sinnvoll ist. Zu diesem Zweck wird eine Bewertung der Strecke hinsichtlich der Realisierbarkeit einer Fahrleitungsinfrastruktur vorgenommen und anschließend mehrere Varianten zur Elektrifizierung ausgearbeitet und Zusammenhang mit der notwendigen Akkuleistungsfähigkeit des rollenden Materials untersucht. Das Ergebnis soll zur Entscheidungsfindung betreffend die zu errichtende Infrastruktur und der Definition der Randbedingungen für die Fahrzeugbeschaffung hinsichtlich der Akkuleistungsfähigkeit beitragen.

Arbeitspaket 1 beinhaltet die Bewertung der Strecke bezüglich Eignung für Lade- und Versorgungseinrichtungen. Hierbei wird untersucht, wo Ladeeinrichtungen und Oberleitung errichtet werden können. Ergebnis der Untersuchung ist eine Einteilung der gesamten Strecke in Kategorien nach einem Bewertungsschema. Die Kategorien bilden den Aufwand ab, der für die Errichtung erbracht werden muss. Dabei werden Parameter wie z.B.: bauliche Machbarkeiten, notwendige behördliche Verfahren, Umwelteinflüsse, Grundstückseigentumsverhältnisse, Zuwegungen, Eisenbahnkreuzungen, Haltestellen/Bahnhöfe betrachtet.

Arbeitspaket 2 befasst sich mit der Ausarbeitung und Bewertung verschiedener Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen. Dabei werden unter Berücksichtigung der streckenspezifischen

Randbedingungen Kombinationen aus verschiedenen Abschnitten mit Fahrleitung und Akkubetrieb in Abhängigkeit der Fahrzeuge sowie des Fahrplans abgebildet.

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems basiert nach dem Zillertaler Mobilitätsplan auf dem Betrieb mit vierteiligen Triebzügen im Halbstundentakt. Ein möglicher flexibler Betrieb von dreiteiligen Zuggarnituren, für Starklastzeiten in Doppeltraktion, wird miteinbezogen. Die Implikationen einer Taktverdichtung, im Betrieb mit vierteiligen Zügen, werden aufbauend auf die Betrachtung des Halbstundentaktes qualitativ beurteilt. Hinsichtlich der Zielsetzung der Minimierung der Kosten wird eine differentielle Kostenbetrachtung für Errichtungs- und Erhaltungskosten der Infrastruktur und der Fahrzeuge über die Lebensdauer der Fahrleitungsanlage vorgenommen, welche die längste Betriebszeit der Systemkomponenten darstellt. Die Energieversorgung wird entsprechend der Oberleitungsabschnitte in den verschiedenen Elektrifizierungsvarianten, in Kombination mit der jeweils notwendigen zugseitigen Traktionsstrom- und Akkuausrüstung, hinsichtlich deren Einfluss auf die Beurteilung der Varianten betrachtet.

Für die Bewertung der Varianten werden Investitions- und Betriebskosten, Synergieeffekte in der Fahrzeugbeschaffung, Umweltauswirkungen, die zeitliche Realisierbarkeit, die Dauer der Baumaßnahmen, Betriebliche Einschränkungen in der Bauphase, das bauliche Umsetzungsrisiko, mögliche Angebotserweiterungen und die Betriebsstabilität herangezogen.

Der Detailgrad der Ausarbeitung orientiert sich an der Machbarkeit in Bezug auf die Abschnitte für Ladeeinrichtungen bzw. die Oberleitung, das Energieversorgungssystem, sowie den wesentlichen technischen Anforderungen an die Schienenfahrzeugausrüstung (insbesondere an die Akkusysteme).

Die Anzahl und Länge der Fahrleitungs- bzw. Ladeabschnitte bestimmen die Mindestkapazität der Akkus im Fahrzeug. Die Fahrzeugmasse und das geforderte Beschleunigungsvermögen auf Abschnitten ohne Fahrleitung, bestimmen die Bauart- und Größe der Akkumulatoren durch deren maximalen Entladestrom. Die beiden Grenzfälle bilden der Akkuzug mit Ladeeinrichtungen in den Endbahnhöfen, sowie die Vollelektrifizierung per Oberleitung über den ganzen Streckenverlauf.

Die benötigte Akkuspezifikation der jeweiligen Variante richtet sich nach dem Leistungs- und Energiebedarf. Aus einer Leistungsbedarfsberechnung auf Basis einer Betriebssimulation mit nachfolgender Ermittlung des Energiebedarfs werden die technischen Anforderungen an die Schienenfahrzeuge hinsichtlich der Akkusysteme abgeleitet.

Eine Beurteilung der Fahrplanstabilität bildet die Grundlage für die Auswahl der Varianten.

Weiters werden verschiedene Betriebsspannungen der Bahnstromversorgung und deren Auswirkungen auf die Fahrzeugtechnik berücksichtigt.

2 Ausgangslage Zillertalbahn

Die Zillertalbahn ist eine österreichische Schmalspurbahn, die im Zillertal in Tirol verkehrt. Diese nutzt eine Spurweite von 760 mm. Diese wird als Bosnische Spurweite bezeichnet. Die Trasse der Bahn führt von Jenbach, mit Umstiegsmöglichkeiten zur ÖBB, bis nach Mayrhofen.

Die Bahnlinie ist ca. 32 km lang und wird hauptsächlich eingleisig geführt, abschnittsweise zweigleisig. Zusätzlich soll ein zweigleisiger Abschnitt zwischen Schlitters und Gagering, und eine Neubaustrecke zwischen Aschau und Zell am Ziller errichtet werden.

Auf dieser Strecke kommen momentan ausschließlich Diesellokomotiven zum Einsatz. Zusätzlich gibt es im Sommer Nostalgiefahrten mit einem alten Dampfzug der Zillertalbahn. Diese verkehren jeweils von Dienstag bis Donnerstag parallel zum normalen Betrieb.



3 Streckenbewertung - Arbeitspaket 1

In Arbeitspaket 1 wurde untersucht, welche technischen, betrieblichen und rechtlichen Voraussetzungen für die Errichtung von Lade- bzw. Fahrleitungseinrichtungen auf der Zillertalbahn-Bestandsstrecke und der geplanten Neubaustrecken bestehen.

Nach Erhebung der relevanten Daten und Informationen zur Bestandsstrecke und dem geplanten Neubauabschnitt zwischen Aschau und Zell am Ziller wurde eine detaillierte Beurteilung der Streckenabschnitte vorgenommen. Die technische Machbarkeit der Realisierung einer Oberleitungsmastgasse wurde nach räumlichen bzw. baulichen Einschränkungen, der Notwendigkeit zusätzlicher baulicher Maßnahmen bzw. Einschränkungen durch in der Nähe der Trasse befindliche, oder querende Infrastrukturen (Einbauten) beurteilt. Die technischen Hürden wurden weiters nach bei der Errichtung anfallender relevanter Mehrkosten und Auswirkungen auf die Errichtungsdauer betrachtet. Betriebliche und rechtliche Voraussetzungen betreffen die Eigentumsverhältnisse im Bereich der zu realisierenden Mastgasse bzw. daraus resultierender zusätzlicher Grundstücksbedarf, den Umfang zusätzlich notwendiger behördlicher Genehmigungen und Verfahren, sowie wasser- bzw. naturschutzrechtliche Einschränkungen.

Die Bewertung der Strecke erlaubt die Analyse im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie, weiterführende Detailplanungen sind Gegenstand der nächsten Projektphasen.

3.1 Datengrundlage Bahnstrecke, Randbedingungen, Ansätze

Die Grundlage der Bewertung bilden Daten und Information zur Bestandsstrecke, deren aktuellem Verlauf, bestehender Infrastruktur und Einbauten entlang der Trasse, zu den Eigentumsverhältnissen entlang einer potenziellen Mastgasse, sowie zum Verlauf der geplanten Neubaustrecken. Tabelle 1 listet die, für die Beurteilung herangezogenen, Datensätze betreffend der Bestandsverhältnisse der Zillertalbahn-Strecke und die Planungen für Neubauabschnitte. Die Grundlagendaten wurden durch ein hochaufgelöst aufgezeichnetes Befahrungsvideo ergänzt.

Tabelle 1: Datensätze – Strecke

Datensatz – Strecke	Quelle	Datum
Befahrungsvideo	ACTES Bernard	
Vermessungsdaten Gleisachse	ZVB	24.09.2024
Planung im Zuge der Straßen-Umfahrung Fügen-Gagering	Land Tirol	23.09.2024
Planung Neubau Aschau-Zell am Ziller	ZVB	25.09.2024
Planung Ausbau (zweigleisig) Schlitters-Gagering	ZVB	03.10.2024
Einbauten entlang Trasse	ZVB	17.09.2024
Einbauten Strom, Gas, Wasser	Land Tirol	14.10.2024
Einbauten Wasser	Wassergenossenschaften Mayrhofen	18.09.2024
Einbauten Abwasser	Abwasserverband Zillertal	24.09.2024
Brückenplan Autobahnbrücke A12, bei Jenbach	Land Tirol	21.10.2024
Brückenplan Straßenbrücke Bundesstraße B169, Zillertalstraße, Straßen-/Flussbrücke (Ziller) Landesstraße L216, Dorfstraße Kaltenbach	Land Tirol	
Vermessung Durchfahrtshöhen, Durchfahrtsbreiten	ZVB, Trigonos	25.11.2024
Strom-, Gas-, Telekomleitungen: Einbauten TIWAG, Innsbrucker Kommunalbetriebe AG, TINETZ, TIGAS	Leitungsauskunft.at	
Leitungsauskunft APG (Hochspannungsleitungen)	APG	14.11.2024, 20.11.2024
Leitungsauskunft TINETZ (Mittelspannungsleitungen)	TINETZ	
Leitungsauskunft TINETZ (Hochspannungsleitungen)	TINETZ	15.11.2024
Leitungsauskunft Telekomleitungen A1	A1	
Liste Grundstückseigentum ZVB Strecke	Land Tirol, ZVB	26.09.2024

Zur Evaluation der Streckenabschnitte und zur Identifikation möglicher Hürden wurden außerdem die in Tabelle 2 gelisteten, öffentlich zugänglichen, kartenbasierten Informationsquellen herangezogen.

Tabelle 2: Öffentlich zugängliche Datensätze – Recherche

Datensatz	Quelle
Verkehrswege, Bauten, Freileitungen	Google Maps
Verkehrswege, Bauten, Freileitungen	OpenStreetMap
Strom-Freileitungen	Open Infrastructure Map
Bahnstrecke	OpenRailwayMap
Infrastrukturdaten	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
Umweltdaten (Biotopflächen)	tiris – Tiroler Rauminformationssystem
Kataster	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

3.1.1 Regelwerke und Normen

Bei der Realisierung einer Fahrleitungsanlage müssen mindestens folgende technische Regelwerke beachtet werden:

- OVE EN 50119 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für den elektrischen Zugbetrieb
- OVE EN 50122 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag
- OVE EN 50122 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 2: Schutzmaßnahmen gegen Streustromwirkungen durch Gleichstrombahnen
- OVE EN 50122 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 3: Gegenseitige Beeinflussung von Wechselstrom- und Gleichstrombahnsystemen
- OVE EN 50149 – Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Rillenfahrdrähte
- OVE EN 50341-1 – Freileitungen über AC 1 kV Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Gemeinsame Festlegungen
- OVE EN 50341-2 – Freileitungen über AC 1 kV Teil 2-1: Nationale Normative Festlegungen (NNA) für ÖSTERREICH basierend auf EN 50341-1
- OVE EN 50367 - Bahnanwendungen – Zusammenwirken der Systeme – Technische Kriterien für das Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung für einen freien Zugang
- DIN VDE 0100 – Errichten von Niederspannungsanlagen
- OVE EN 50163 – Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen
- OVE EN 50160 – Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
- OVE EN 15273-3 – Bahnanwendungen – Begrenzungslinien, Teil 3: Lichtraumprofile
- OVE EN 50125 – Bahnanwendungen – Umweltbedingungen für Betriebsmittel

Zur konkreten Einschätzung der Realisierbarkeit einer Oberleitungsinfrastruktur und zur Identifikation spezifischer technischer Hürden, wurde seitens ZVB, ein für den zukünftigen Bahnbetrieb aktualisiertes Lichtraumprofil (8.1) (basierend auf der Bezugslinie G1 und dem entsprechenden Lademaß nach EBO) für den freizuhaltenden Mindestlichtraum erstellt und zur Verfügung gestellt.

Einschränkungen in der Höhe

Von der Bahnstrecke unterfahrene Bauwerke (z.B.: Brücken) oder Infrastrukturen (z.B.: Freileitungen) bilden mögliche Höheneinschränkungen für die Realisierung einer Oberleitung.

Für unterfahrene Bauwerke (z.B.: Brücken) gelten, entsprechend OVE EN 50119 [2], die in Tabelle 3 aufgelisteten typischen Sicherheitsabstände in Luft, zwischen den aktiven Teilen der Oberleitungsanlage und dem geerdeten Teil von ortsfesten Anlagen. Selbige Sicherheitsabstände sind auch zum Fahrzeugprofil einzuhalten.

Tabelle 3: Elektrische Sicherheitsabstände OVE EN 50119, Tabelle 2

Tabelle 2 – Typische elektrische Abstände

Nennspannung	Typische Abstände mm	
	statisch (EC_s)	dynamisch (EC_d)
DC 600 V (720 V) ^a	100	50
DC 750 V (900 V)	100	50
DC 1,5 kV (1,8 kV)	100	50
DC 3,0 kV (3,6 kV)	150	50
AC 15 kV (17,25 kV)	150	100
AC 25 kV (27,5 kV)	270	150
^a Nur für bestehende Anlagen. Die Werte in den Klammern sind die höchsten Dauerspannungen nach EN 50163.		

Je nach gegebenen Bedingungen können die genannten statischen Abstände in Folge verschiedener Maßnahmen (Überspannungsableiter, zusätzliche Isolierungen) verringert werden. Zudem sind kleinere Abstände für dynamische, zeitlich begrenzte, Zustände aufgrund von Wahrscheinlichkeitsüberlegungen, die die Dauer des Zustandes berücksichtigen, gerechtfertigt.

Bei Kreuzungen der Gleisachse mit Hochspannungs-Freileitungen sind nach OVE EN 50341-1 [3] bzw. OVE EN 50341-2 [4] entsprechende Sicherheitsabstände zwischen der Hochspannungsleitung und Teilen der elektrischen Energieversorgung von Eisenbahnen einzuhalten.

Grundsätzlich ist nach OVE EN 50341-2-1 Tab. 5.12/AT.4 [4] bei Kreuzungen von Hochspannungsleitungen bis 110 kV mit unter Spannung stehenden Teilen der elektrischen Energieversorgung von Eisenbahnen ein Sicherheitsabstand von 3 m am Kreuzungspunkt, für die Annahme des Leitungsdurchhanges bei höchster Leitertemperatur (80°C), einzuhalten. Im Fall von Abspannmasten ist dieser Sicherheitsabstand zum berechneten Durchhang für den Sonderlastfall 6 (Bruch eines Isolators bei Mehrfachabspannketten) einzuhalten. Bei Kreuzungen von Hochspannungsleitungen bis 220 kV mit unter Spannung stehenden Teilen der elektrischen Energieversorgung von Eisenbahnen ist ein Sicherheitsabstand von 3,7 m einzuhalten. Für Kreuzungen zu festen nicht unter Spannungen stehenden Teilen der Bahnenergieversorgungsanlage gelten die gleichen Sicherheitsabstände, der Sonderlastfall 6 ist jedoch nicht zu betrachten.

Für die Untersuchung der Abschnitte hinsichtlich der technischen Machbarkeit wird grundsätzlich das Lichtraumprofil (8.1) und die elektrischen Sicherheitsabstände von 150 mm (15 kV AC, 3 kV DC) bzw. 100 mm (1,5 kV DC) herangezogen. Dies resultiert in einer minimaler Fahrdrachhöhe von 5170 mm bzw. 5120 mm. Für eine Traktionsspannung von 25 kV AC, mit dem notwendigen elektrischen Sicherheitsabstand

von 270 mm, sind einigen Stellen der Strecke hinsichtlich der Machbarkeit als kritisch zu bewerten. Daher findet dieses Spannungsniveau im Rahmen dieser Studie keine weitere Betrachtung.

Einschränkungen in der Breite

In seitlicher Richtung ist auf freier Strecke der Mindest-Lichtraum nach 8.2 freizuhalten. Werden zu öffnende Fenster vorgesehen ist die Schutzraumtiefe zwischen Wagenkasten und Mastvorderkante zu beachten. Im Verschub- und Bahnhofsbereich ist weiters der seitliche Sicherheitsabstand nach EisbAV, sowie der entsprechende Sicherheits-, und Bedienungsraum zu gewährleisten. Der Abstand von der Gleisachse zur seitlichen Umgrenzungslinie des Lichtraumprofils der Zillertalbahn beträgt nach (8.2) 1825 mm. Dieses Maß kann als Minimalabstand zwischen Gleisachse und Mastvorderkante angesehen werden.

3.1.2 Ansätze zur technischen Realisierung

Als Grundlage für Machbarkeitsaussagen zur techn. Realisierung werden Einzelmasten aus Stahl (HEB, HEM, HEA) oder Stahlbeton zugrunde gelegt. Andere Werkstoffe, Beschichtungen oder farbliche Behandlungen sind denkbar und bei der Ausschreibung zu spezifizieren.

Die Fundamentierung kann durch Block- oder Sockelfundamente, Rammrohre oder möglicherweise Erdschrauben hergestellt werden. Die Masten werden eingesetzt (Block, Rammrohr) oder verschraubt. Im Schadensfall an der Mastanlage können Mastverschraubungen einen Vorteil hinsichtlich der Ausfallzeit bieten. Abbildung 1 zeigt eine mögliche Realisierung der Fahrleitungsmaste mit Rammrohr-Fundamenten, Abbildung 2 eine Realisierung mit Blockfundament. Die Masthöhe beträgt ca. 7,5 m ab Schienenoberkante (SOK). Der Mastabstand kann auf gerade Strecke im Schnitt mit etwa 60 m angenommen werden. In Kurven ist dieser jedoch nicht ausnutzbar.

Die Energieversorgung von Bahnstromsystemen erfolgt typischerweise über Gleichspannungssysteme mit 750 kV, 1,5 kV oder 3 kV Nennspannung, oder über Wechselstromsysteme mit 15 kV (16,7 Hz od. 50 Hz) oder 25 kV (50 Hz) Nennspannung. Die Energieversorgung wird in 4.4 näher erläutert.

Die Realisierung der Fahrleitung ist als Hochkette mit Tragseil und Fahrdraht oder als Einfach-Fahrdraht möglich. Bei der Realisierung als Hochkette führt der Fahrdraht, aus Kupfer oder Kupferlegierungen, den Hauptteil des Fahrstromes. Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Aufhängung ist er über sogenannte Hänger leitend mit einem Tragseil, aus Bronze, Aluminium oder Kupfer, verbunden. Fahrdraht und Tragseil sind jeweils abgespannt. Der Fahrdraht ist als Rillenfahrdraht (Aussparungen für Halteklemmen) ausgeführt und muss, um ungleichmäßige Abnutzung der Stromabnehmer am Triebfahrzeug zu vermeiden, im Zickzack geführt werden. Typische Fahrdraht-Querschnitte betragen 80 mm² – 150 mm² (Durchmesser ca. 10 mm – 14 mm). Typische Tragseil-Querschnitte betragen 50 mm² – 120 mm² (Durchmesser ca. 8 mm – 12 mm). Für 15 kV AC kommen typischerweise die Fahrdrähte Ri 100 od. Ri 120, sowie die Tragseile Bz II 50 od. Bz II 70 zum Einsatz. Für 1,5 kV DC können beispielsweise die Fahrdrähte Ri 120 oder Ri 150, bzw. das Tragseil Cu 120 zum Einsatz kommen.

Der Fahrdraht befindet sich im Stromabnehmerbereich des Lichtraumprofils der Zillertalbahn (8.2), in einer Höhe zwischen 5020 mm und 6200 mm über Schienenoberkante (SOK). Zur Begrenzungslinie des Lichtraumprofils muss zusätzlich der elektrische Schutzabstand nach OVE EN 50341 [3] [4] eingehalten werden. Aus Tabelle 46 und Tabelle 47 können die jeweiligen minimalen Fahrdrahthöhen entnommen werden. Bei Traktionsspannung 15 kV AC beträgt die minimale Höhe 5170 mm.

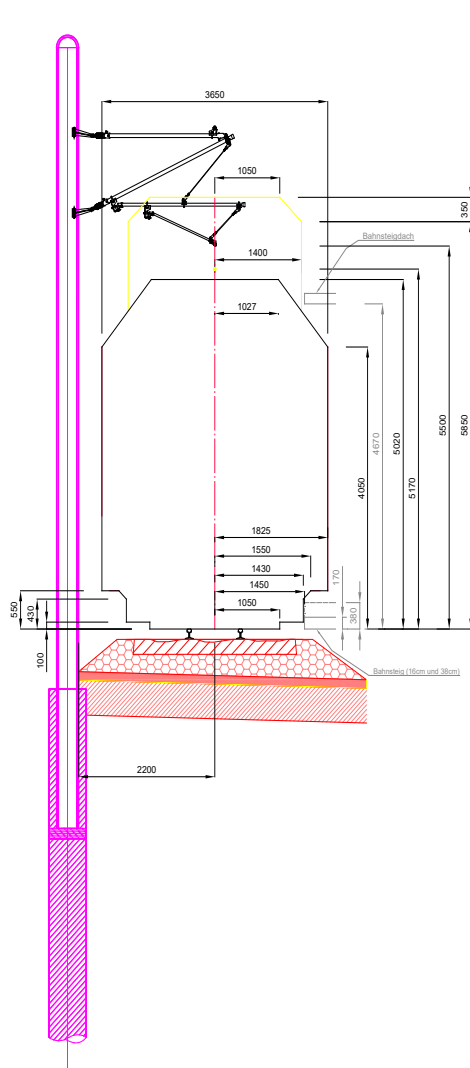


Abbildung 1: Regelquerschnitt, Lichtraumprofil mit Mast mit Rammrohr-Fundament (schematische Darstellung)

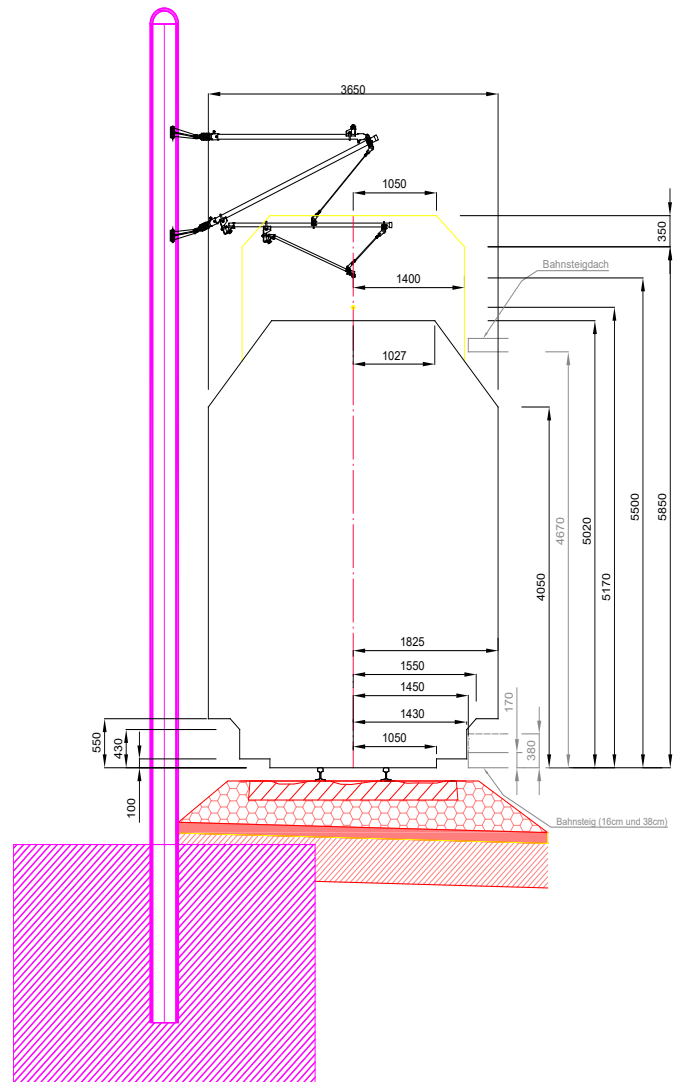


Abbildung 2: Regelquerschnitt, Lichtraumprofil mit Mast mit Blockfundament (schematische Darstellung)

Die typische Fahrdrathöhe einer Vollbahn beträgt 5500 mm. Die Systemhöhe (Abstand zwischen Fahrdrath und Trageil am Mast) beträgt in der Regel zwischen 500 mm und 1600 mm, ein typischer Wert ist 1300 mm. Der Abstand zwischen Fahrdrath und Trageil kann im Durchhang durch Reduktion der Hängerlänge reduziert werden. Auch die Reduktion der Systemhöhe auf 0 mm ist möglich. Dabei werden Fahrdrath und Trageil aneinander geklemmt, der Mastabstand muss dabei jedoch auf ca. 20 m reduziert werden. Die Höhe von Fahrdrath und Trageil wird in der Detailplanung entsprechend der Gegebenheiten festgelegt.

Für Gleichspannungssysteme ist durch eine Netzstudie die Notwendigkeit einer Verstärkungsleitung und eines Rückleiters zu untersuchen. Um Streustromkorrosion an Bauwerken und Einbauten zu vermeiden ist die isolierte Aufstellung des Oberbaus zu überprüfen und zu gewährleisten. Die Isolierung des Oberbaus kann durch dessen hohe Qualität oder durch Isolierung zwischen Schiene oder Schwellen sichergestellt werden. Dies kann im Zuge dessen den Neuaufbau des Oberbaus erforderlich machen.

In den ausgebauten und geplanten zweigleisigen Streckenteilen ist, basierend auf dem aktuellen Lichtraumprofil, eine mittig zwischen den Gleisen angeordnete Mastgasse aufgrund der zu geringen

Abstände zwischen den Gleisen ohne betriebliche Einschränkung des Rollwagenverkehrs nach Erhebungen der ZVB nicht möglich¹. Nach dieser Grundlage werden auf diesen Abschnitten die Maste beidseitig, bzw. entsprechend höher dimensioniert, einseitig mit Zweigleis-Ausleger (ca. 13 m Höhe) realisiert.

Höhe der Fahrleitung

Für die Streckenabschnitte der Bahnstrecke, die eine Höheneinschränkung aufweisen, kann für unterfahrene Brücken angenommen werden, dass der Ansatz des dynamischen Sicherheitsabstandes gerechtfertigt ist. Die Isolationsstrecke kann durch Isolationsplatten erhöht werden. Weiters kann, durch entsprechende Montage der Oberleitung, für die Montagehöhe unter der Brücke lediglich der Durchmesser des Fahrdrahtes (Ann.: ca. 10 mm) angenommen werden. Das Trageil wird am Brückenbauwerk abgefangen, und zusammen mit einer ev. vorhandenen Verstärkungsleitung isoliert an der Einschränkungsstelle vorbeigeführt. Zur Beibehaltung des leitenden Querschnitts wird ein Mittelspannungskabel mit Kabelendverschlüssen am abgefangenen Trageil an beiden Seiten des Brückenbauwerks angeschlossen und am Brückenbauwerk vorbeigeführt. Das Kabel kann hängend unter der Brücke hindurchgeführt werden, oder am Mast herabgeführt und in der Erde oder einem Kabeltrog verlegt werden.

Für die Unterfahrung von tiefhängenden Hochspannungsleitungen kann für den entsprechenden Fahrleitungsabschnitt der Mindestabstand zwischen Trageil und Fahrdraht auf bis zu 120 mm verringert werden. Sollten die Sicherheitsabstände für unter Spannung stehende Teile der elektrischen Energieversorgung von Eisenbahnen nicht ausreichen, besteht die Möglichkeit diese Abschnitte leistungslos zu befahren. Damit muss der Sonderlastfall 6 für den Sicherheitsabstand nicht betrachtet werden. Dabei wird der entsprechende Abschnitt der Oberleitung abgetrennt und geerdet. Die Verbindung der unter Spannung stehenden Abschnitte der Oberleitung wird an der Stelle vorbeigeführt (z.B.: als Erdkabel). Der geerdete Abschnitt kann nach Öffnen des Leistungsschalters im Zug mit ausgefahrenen Stromabnehmern ohne Traktionsleistung (leistungslos) mit Schwung durchfahren werden. Dies ist ein gängiges Verfahren im Bahnbetrieb.

Grundsätzlich können Hochspannungs-Freileitungen auch erhöht werden. Dies kann – nach entsprechenden Erhebungen durch den Netzbetreiber – durch Einbau eines Zwischenschusses erfolgen. Damit können etwa 2 – 4 m gewonnen werden. Außerdem kann, beispielsweise im Zuge eines turnusmäßigen Leiterseiltausches ein höherer Mast eingesetzt werden.

Des Weiteren können, um notwendige Sicherheitsabstände zu erreichen – Gleisabsenkungen (bis ca. 0,5 m) vorgenommen werden.

Breite der Mastgasse

Für die grundsätzliche Beurteilung wurde die statische seitliche Umgrenzungslinie inklusive einer Toleranz für dynamisches Profil und Bogenzuschlag ein Abstand von 2000 mm herangezogen. Der für die Realisierung einer Oberleitungs-Mastgasse benötigte Platz seitlich der Gleise, hängt von der technischen

¹ Abstand zwischen den Gleisachsen 4,2 m, unter Berücksichtigung des Lichtraumprofils und der Tiefe/Breite des Mastes ist der Abstand zu gering. Der Abstand zw. den Gleisachsen wurde aufgrund von Einschränkungen durch die Grundstückseigentumsverhältnisse gewählt.

Ausführung der Maste und Mastfundamente ab. Die Tiefe der Maste beträgt je nach Ausführung 200 mm – 400 mm. Die Fundamente werden je nach örtlicher Gegebenheit typischerweise als Rammrohr- oder Blockfundamente ausgeführt. Andere Gründungen sind auch möglich und im Rahmen der Ausführungsplanung zu untersuchen. Der Durchmesser der Rammrohre erstreckt sich zwischen DN 610 mm und DN 813 mm. Die Abmessungen von Blockfundamenten betragen ca. 1400 mm x 1400 mm x 2700 mm bis ca. 3900 mm x 3900 mm x 2700 mm im Fall ungünstiger Bodenverhältnisse, als mittleres Maß kann etwa 2200 mm x 2200 x 2200 mm herangezogen werden. Tabelle 4 weist die minimal/maximal benötigten Abstände für die Mastgasse mit Rammrohren oder Blockfundament aus. Diese wurden für die Beurteilung hinsichtlich des erforderlichen Baubereichs für die Mastgasse herangezogen. Das Gesamtmaß errechnet sich aus dem notwendigen Abstand zwischen Gleisachse und Mastvorderkante + der halben Masttiefe und dem halben Durchmesser des Rammrohres bzw. der halben Seitenlänge des Blockfundaments.

Tabelle 4: Baubereich Mastgasse

Baubereich Mastgasse	Rammrohr (C)		Blockfundament (D)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Gleisachse – Mastinnenkante (Breite Lichtraumprofil) in mm (A)	1825	1825	1825	1825
halbe Masttiefe in mm	100	200	100	200
Gleisachse – Mastachse in mm (B)	1925	1925	1925	1925
Gleisachse – Mastaußenkante in mm (C)	2025	2225	2200	2400
halber Durchmesser/Seitenlänge Fundament in mm	305	406,5	700	1950
Gesamtmaß in mm (D) (E)	2230	2431,5	2625	3975

Für die Bewertung wurde festgelegt, dass falls der freie, auf ZVB-Eigengrund befindliche Abstand auf beiden Seiten der Gleisachse weniger als 2600 mm beträgt, der Streckenabschnitt im Rahmen dieser Studie als Engstelle bewertet wird. Dies bedeutet, dass eine gesonderte Detailprüfung festzustellen hat, ob und mit welchen technischen Mitteln eine Fahrleitung realisiert werden kann. Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des Regelquerschnitts.

3.1.3 Rahmenbedingungen Umwelt / Naturhaushalt

Die gegenständliche Studie zur Machbarkeit einer Elektrifizierung umfasst die bestehende eingleisige Bahnstrecke inklusive des bereits geplanten zweigleisigen Abschnittes der Zillertalbahn. Im Rahmen der behördlichen Genehmigungen wird in der Regel zwischen Auswirkungen während der Errichtung (Bauphase) und Auswirkungen während des Betriebs (Betriebsphase) unterschieden.

Auswirkungen auf die Umwelt durch die Elektrifizierung der Bahnanlage entstehen v.a. durch

- Flächenbeanspruchung (Bau- und Betriebsphase) und Betroffenheit von Schutzgebieten sowie Lebensräumen (Pflanzen, Tiere)
- Wirkung der Oberleitung, v.a. in Bezug auf Tiere, Landschaft und Erholungswert (Betriebsphase)
- Emissionen wie Lärm, Luftschadstoffe, Erschütterungen, etc. (Bau- und Betriebsphase)

Für erforderliche Infrastrukturelemente wie Ladestationen, Versorgungsleitungen, etc. liegen noch keine konkreten Standorte vor.

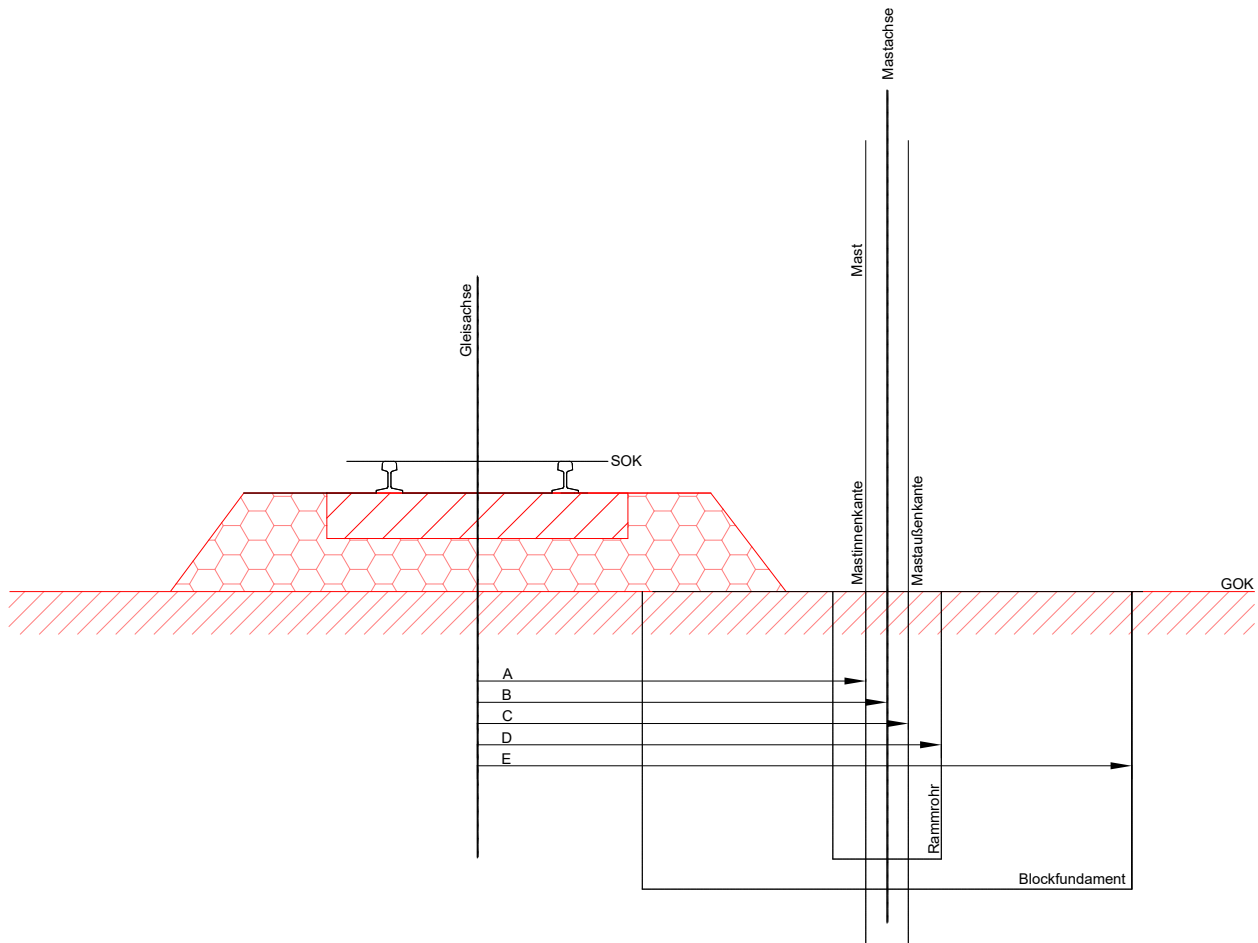


Abbildung 3: Regelquerschnitt, Baubereich Mastgasse

3.2 Methode der Streckenbewertung

Die Bewertung der Streckenabschnitte basiert auf der Zusammenführung der erhobenen Datensätze (3.1) in einem gesamthaften CAD-Datensatz, sowie der Erstellung und Auswertung des Befahrungsvideos.

Die Bahnstrecke wurde entsprechend der Kilometrierung in 200 m lange Abschnitte unterteilt und bewertet. Abweichungen von der Abschnittslänge ergeben sich durch Fehlerprofile² entlang der Strecke. Für die Neubaustrecke Aschau-Zell wurde die Kilometrierung entsprechend dem letzten Abschnitt der Bestandsstrecke fortgesetzt. Nach Einmünden der Neubaustrecke in die Bestandsstrecke wird jedoch die Kilometrierung der Bestandsstrecke fortgesetzt. Der Bewertung liegen das aktualisierte Lichtraumprofil (8.2), sowie die gültigen Regelwerke (3.1.1) und technischen Ansätze (3.1.2) zu Grunde. Jeder Abschnitt wurde durch kombinierte Auswertung des Befahrungsvideos und der CAD-Datensätze auf Einschränkungen bei der Realisierung einer Oberleitungsmastgasse anhand folgender Kriterien untersucht und klassifiziert:

² Durch Änderungen in der Streckenführung entstandene Fehllänge eines Abschnitts

- Wegerecht - Notwendigkeit der Inanspruchnahme von Fremdf Flächen
 - Grundstück ZVB oder Fremdgrundstück
- Querung von Freileitungen - Einschränkung durch Höhe über Gleistrasse
 - Stromleitungen (Hoch-, Mittel-, Niederspannung)
 - Telekomleitungen - Höhe über Gleistrasse
- Einbauten (querend oder längs der Strecke)
 - Kabeltrog entlang der Strecke (Signal-, Weichenanlagen)
 - LWL (TIWAG, ZVB) entlang Strecke
 - Gasleitungen
 - Wasserleitungen
 - Abwasserkanäle
 - Einbauten im Bahnhofsbereich
- Verkehrsbauwerke (querende oder befahrene Kunstbauten)
 - Brücken
 - Unterführungen
 - Tunnel
 - Bahnhöfe
- Notwendigkeit zusätzlicher Baumaßnahmen
 - Masten im Brückenbereich
 - Masten im Bahnhofsbereich
- Einschränkungen Naturhaushalt
 - Schutzgebiete
 - Biotopkartierung
 - Gewässer
- Engstelle aus baulichen od. wegerechtlichen Gründen bzw. Terraingründen
- Bahnstrecke zweigleisig
- Streckensteigung

Jeder Streckenabschnitt wurde für die oben aufgelisteten Kriterien nach in Tabelle 5 dargestelltem Schema hinsichtlich der technischen Machbarkeit der Umsetzung einer Fahrleitungsinfrastruktur klassifiziert und beurteilt.

Da ein Streckenabschnitt (200 m) mehrere Einschränkungen enthalten kann, resultiert die Beurteilung der Realisierbarkeit einer Oberleitungsmastgasse in einem betreffenden Abschnitt grundsätzlich aus der mit dem höchsten Einschränkungsgrad bewerteten Einschränkung. In einzelnen Abschnitten führt die Anzahl der Einschränkungen zu einer höheren Abschnitts-Bewertung. Aus den zur Verfügung stehenden Datengrundlagen kann eine erste Einschätzung der Verortung der Mastgasse (rechts-, links-, beidseitig) vorgenommen werden.

Die Kosten der notwendigen Maßnahmen wurden in den entsprechenden Komponenten der Kostenabschätzung einbezogen.

Tabelle 5: Bewertungsschema

0	Umsetzung möglich	keine Einschränkungen
1	Umsetzung möglich	Einschränkungen ohne Einfluss auf Machbarkeit (z.B.: Einbauten vorhanden – bei Mastgassenplanung berücksichtigen)
2	Umsetzung möglich	Einschränkungen vorhanden, (z.B.: Einbauten, Bauwerke im Oberleitungsbereich, Vegetation) welche 1) mehr Planungsaufwand 2) zusätzliche Investitionen 3) Genehmigungen erfordern, aber keinen signifikanten Einfluss auf die Machbarkeit des Projekts haben. (evtl. kann es zu längeren Umsetzungszeiten kommen, aber keine unplanbaren Verzögerungen absehbar)
3	Umsetzung technisch möglich, jedoch Unsicherheiten	Einschränkungen vorhanden, die Einfluss auf die 4) Kosten und/oder 5) Umsetzungsdauer haben könnten. Unplanbare Verzögerungen möglich , z.B. durch notwendige behördliche Verfahren, die die Rechte Dritter (Grundstücksrechte) betreffen.
4	Umsetzung möglich, jedoch hoher Aufwand	Einschränkungen vorhanden, Umsetzung aus 6) rechtlichen Gründen, 7) technischen oder 8) sonstigen Gründen nur mit 9) erheblich längeren Vorlaufzeiten oder 10) überdurchschnittlich hohen Investitionen möglich
5	Umsetzung nicht möglich	Einschränkungen vorhanden, Umsetzung aus technischen Gründen nicht möglich

Baubereich und Flächenbeanspruchung

Der Baubereich der Mastgasse, inklusive der Fundamentierung, wurde nach mittlerem Maß „Breite der Mastgasse“ beurteilt. Auf dieser Grundlage wurde aus dem, durch bauliche, wege- oder grundstücksrechtliche bzw. topographische Einschränkungen, begrenzten verfügbaren Raum eine qualitative Bewertung der Streckenabschnitte abgeleitet. Die Bewertung dieser Platzreserve, bzw. potenzieller Engstellen erfolgte auf Basis des Befahrungsvideos und digitaler Katasterdaten.

Einschränkend muss hier angefügt werden, dass die zur Verfügung stehenden digitalen Katasterdaten, für das gesamte Zillertal, Unsicherheiten aufgrund zwischen Gemeindegrenzen unterschiedlicher Vermessungsreferenzen aufweisen. Ansteigende Klassifizierungen repräsentieren zunehmend beschränkte Platzverhältnisse. Für potenzielle Engstellen wurden im Rahmen dieser Studie seitens der ZVB erste vermessungstechnische Untersuchungen bereitgestellt, welche die Klassifizierung konkretisiert haben. Im Rahmen der Ausführungs- und Einreichplanung müssen die Eigentumsverhältnisse und die tatsächlichen örtliche Gegebenheiten erhoben werden um anschließend auf dieser Basis die technische Ausführung (Fundamentierung) festzulegen. Gegebenenfalls kann dadurch eine höhere Flächenbeanspruchung resultieren.

Zusätzlicher Flächenbedarf fällt durch die benötigten Unterwerke an. Aufgrund der unklaren Standorte der Unterwerke und dem Fokus auf die Realisierbarkeit einer Mastgasse wurde dies nicht in die Streckenbewertung einbezogen. Es ist davon auszugehen, dass die Realisierung der Bahnstrominfrastruktur flächenmäßig möglich ist, gegebenenfalls kann es hier zu zusätzlichem Grundbedarf außerhalb der Grundstücke der ZVB kommen, was Grundeinlöse zu Folge hätte.

Der reine Flächenbedarf eines Gleichrichterunterwerkes (GUW) (siehe 4.4.1) beträgt etwa 50 m², abhängig von der Anzahl der Streckenabgangsfelder und der möglichen Ausführung eines Umgehungsfeldes. In der Bauphase können umfangreiche Arbeiten für die Zuleitungen notwendig werden. Umrichterwerke (siehe 4.4.2) werden heute in Containerbauweise errichtet. Die Erweiterung erfolgt durch weitere Containereinheiten. Der reine Flächenbedarf der Umrichterwerke kann daher mit 100-200 m² angesetzt werden. Für die Errichtung eines Umspann-/Umrichterwerkes am Netzknoten Zell am Ziller fällt vorrausichtlich kein weiterer Platzbedarf an, da die Schaltanlage Platz für einen zusätzlichen Abgang hat.

Einbauten

Die Einschränkung der technischen Machbarkeit aufgrund von Einbauten wurde auf Basis der verfügbaren Datensätze qualitativ bewertet. Höhere Bewertungen repräsentieren höheren Planungs- oder Ausführungsaufwand. Vorhandene Einbauten müssen bei der Planung entsprechend berücksichtigt, bzw. ev. notwendige Vorbeiführungen im Rahmen der Ausführungsplanung behandelt werden.

Umwelt / Naturhaushalt

Für die Relevanzabschätzung der Auswirkungen einer Mastgasse auf die Umwelt, durch die Elektrifizierung der Bahnanlage, wurde deren Flächenumgriff mit den vorliegenden Daten des Tiroler Rauminformationssystems (TIRIS) verschnitten und ausgewertet. Die Bewertung der Streckenabschnitte erfolgt nach wasser- oder naturschutzrechtlichen Gesichtspunkten, eine Bewertung der Veränderung der Landschaft durch die Errichtung einer Oberleitung kann aus den folgenden Studienergebnissen nicht abgeleitet werden.

3.3 Ergebnis der Streckenbewertung

3.3.1 Technische Machbarkeit der Realisierung einer Oberleitung

Auf Basis der Datenlage wurde, nach dem Stand der vorliegenden Unterlagen, für alle Abschnitte der Strecke der Zillertalbahn eine Einschätzung für die Realisierbarkeit einer Oberleitungsanlage, sowie eine

grundlegende Abschätzung der Auswirkungen hinsichtlich Umwelt/Naturschutz vorgenommen. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der Strecke mit der Farbcodierung der Abschnitte entsprechend Tabelle 5.

Große Teile der Strecke können nach der vorgenommenen Bewertung technisch ohne besondere Einschränkungen elektrifiziert werden. Tabelle 6 zeigt die Anteile der Strecke auf denen mit Einschränkungen der jeweiligen Kategorie zu rechnen ist.

Tabelle 6: Ergebnis der Bewertungsanteile

Anteile in %		
0	Umsetzung möglich	24%
1	Umsetzung möglich	62%
2	Umsetzung möglich	11%
3	Umsetzung technisch möglich, Unsicherheiten	3%
4	Umsetzung möglich, hoher Aufwand	0%
5	Umsetzung nicht möglich	0%

Etwa 24 % der Strecke sind ohne Einschränkungen (blau, 0) elektrifizierbar. Das bedeutet, dass hier bei der Planung der Mastgasse nichts streckenspezifisches zu berücksichtigen ist.

Etwa 62 % der Strecke sind ohne besondere Einschränkungen (hellgrün, 1) elektrifizierbar. Das bedeutet, dass bei der Planung und Umsetzung der Mastgasse das Vorhandensein von Stromleitungen (Freileitung, Erdkabel), Telekomleitungen, Kabeltrog, Gas-, Wasser- und Abwasserleitungen, unbekannter Einbauten, Bahnhofseinbauten, Tunnels in der Nähe der Bahnstrecke, Vegetation, Bäche od. Böschungsbereiche oder geringe Platzreserve beachtet werden müssen. Das Vorhandensein von Einbauten oder einem längs der Schotterkrone verlaufenden und an der Mastgasse vorbeizuführendem Kabeltrog kann zu erhöhtem Planungs- und Umsetzungsaufwand und damit verbundenen Mehrkosten führen, daraus erwachsen aber signifikanten keine Einschränkungen in der Machbarkeit.

Die beiden Kategorien vereinen ca. 86 % der Strecke.

Etwa 11 % der Strecke erlauben eine Realisierung mit Einschränkungen, die zusätzliche Investitionen oder Genehmigungen erfordern (grün, 2). Dies betrifft beispielsweise die Anpassung von Vegetation, die Verlegung von Nieder-/Mittelspannungs- oder Telekomleitungen, die Berücksichtigung von baulichen Einschränkungen in Bahnhofsbereichen, die Berücksichtigung von querenden Gasleitungen od. spez. bauliche Maßnahmen in Böschungsbereichen.

Etwa 3 % der Strecke sind mit Einschränkungen zu qualifizieren die aus rechtlichen, technischen od. sonstigen Gründen signifikanten Einfluss auf die Kosten und/oder die Umsetzungsdauer haben könnten (gelb, 3). Dies betrifft Streckenabschnitte die Engstellen aufgrund der Grundstückseigentumsverhältnisse aufweisen und auf denen eine Mastgasse möglicherweise nur mit der Nutzung von Fremdgrund

realisierbar ist, bzw. Abschnitte auf denen Spezialkonstruktionen notwendig sind und/oder die Rechte Dritter betroffen sind. Des Weiteren wurden mit dieser Kategorie Abschnitte bewertet, auf denen sich Einschränkungen befinden, die nur mit erheblichem organisatorischem und finanziellem Aufwand zu überwinden wären, auf denen aber mit technischen Sonderlösungen eine Oberleitung realisiert werden kann, wobei der Abschnitt im Bahnbetrieb ohne Traktionsleistung befahren wird. Es handelt sich dabei um zwei Hochspannungsleitungen des Übertragungsnetzbetreibers APG bei km 30,6 und 30,8 (siehe 3.3.3 und 8.6.2), wobei Unklarheit besteht ob darunter der notwendige Normabstand zwischen Hochspannungsleitungen und Teilen der elektrischen Energieversorgung von Eisenbahnen eingehalten werden kann.

Es wurde kein Streckenabschnitt mit Kategorie 4 qualifiziert.

Es wurde weiters kein Streckenabschnitt identifiziert auf welchem die Umsetzung als technisch unmöglich zu bewerten, und damit mit Kategorie 5 zu qualifizieren ist.

Das konkrete Ergebnis der Streckenbewertung kann der Bewertungstabelle in 8.4. entnommen werden. Abschnitte mit einer potenziell höheren Einschränkungs-Bewertung wurden einer gesonderten Detailprüfung unterzogen, welche in 3.3.3 erläutert wird.

3.3.2 Umwelt und Naturhaushalt

Baubereich und Flächenbeanspruchung

Der Umfang des Baubereichs und die Flächenbeanspruchung ergibt sich aufgrund der erforderlichen Masten (Mastgasse), Unterwerke und weiterer Versorgungsinfrastruktur (z.B. Anbindungen an das Energieversorgungsnetz).

Es befinden sich keine ausgewiesenen Schutzgebiete im Nahbereich der Trasse. Sensible Biotop (wie Gewässer/bachbegleitende Gehölze, Feldgehölze, Streuobstwiesen) sind maximal kleinräumig betroffen und können durch entsprechende Vorgaben in der Bauausführung geschont werden. Derzeit wird davon ausgegangen, dass keinerlei Gewässerquerungen neu errichtet werden müssen oder relevante Anpassungen in der Bahnanlage (Entwässerung) erforderlich sind.

Aufgrund der punktuellen Beanspruchung und räumlichen Nahelage am bestehenden Gleiskörper (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2 Lichtraumprofil) kann davon ausgegangen werden, dass die Flächenbeanspruchung als nicht erheblich zu beurteilen sein wird oder durch entsprechende Maßnahmen kompensiert werden kann.

Es liegen allerdings noch keine konkreten Standorte für erforderliche Infrastrukturelemente wie Ladestationen, Versorgungsleitungen, etc. vor, sodass derzeit keine abschließende Einschätzung erfolgen kann.

Wirkung der Oberleitung (Barriere / Sichtbarkeit) in der Betriebsphase

Einflüsse der Oberleitung hinsichtlich Barrierewirkung für Tiere (insbesondere Vögel) sind zwar gegeben, können mittels Maßnahmen nach Stand der Technik jedoch ausreichend minimiert werden. Als Maßnahmen wirksam sind diesbezüglich neben Markierungs- und Isolierungsmaßnahmen auch die Wahrung entsprechender Abstände zwischen den Leitungsführungen.

Der Zillertaler Talboden wird vielseitig genutzt und im Bestand bereits von Freileitungen durchschnitten (220 kV, 110 kV). Durch die Errichtung der Mastgasse an der Bahn kommt es zu einer Veränderung der Landschaft, da die bereits bestehende Bahnstrecke sichtbarer wird. Das Ausmaß der Sichtbarkeit wird maßgeblich von der Wahl des Materials, des Designs und der Farbgebung der Masten abhängen.

Eine Bewertung der Veränderung Landschaft durch die Errichtung der Oberleitung Zillertalbahn erfolgte im Rahmen der gegenständlichen Machbarkeitsstudie nicht, der Aspekt fließt nicht in die Ausweisung der Streckenbewertung ein.

Emissionen

Für die Betriebsphase ist insbesondere bezüglich Lärms und Luftschadstoffen durch den Antriebsumstieg von signifikanten Verbesserungen auszugehen. Die Auswirkungen während der Bauphase sind zeitlich begrenzt und können durch entsprechende Vorgaben minimiert werden.

Zusammenfassung

Die Auswirkungen durch die Elektrifizierung der Bahnanlage (Errichtung einer Oberleitungs-Mastgasse) auf die Umwelt wurde hinsichtlich Flächenumgriff und Barrierewirkung in der Machbarkeitsstudie berücksichtigt.

Nach derzeitigem Wissenstand liegen keine Hinweise gegen eine Genehmigungsfähigkeit der Elektrifizierung Zillertalbahn vor.

Eine UVP-Pflicht für Eisenbahnvorhaben ist in Anhang 1 des Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 (UVP-G 2000) unter Z10 definiert. Da die Elektrifizierung keinen Neubau der Strecke oder von Streckenteilen, keine Gleisulage oder Verschiebung der Gleisachse / Gleislage bedeutet, besteht keine UVP-Pflicht nach Spalte 1 oder 2 des Anhang 1 UVP-G. Ebenso werden die Schwellenwerte hinsichtlich Kapazität in Spalte 3 nicht erreicht, welche von mindestens 60.000 Zügen / Jahr (vor oder nach der Kapazitätserhöhung) sowie die Erhöhung der Kapazität um mind. 25% und die Betroffenheit eines schutzwürdigen Gebietes der Kategorie E (Siedlungsgebiet) ausgehen. Der Schwellenwert der Kapazität von 60.000 Zügen/Jahr wird nach derzeitigem Wissenstand derzeit und auch zukünftig nicht erreicht. Ein Feststellungsverfahren zur UVP-Pflicht inklusive Entscheidung hinsichtlich der Behördenzuständigkeit kann allerdings von Projektwerber, mitwirkenden Behörden oder Umweltschutz beantragt werden.

In den folgenden Projektierungsphasen sind die Auswirkungen auf die Umwelt entsprechend zu konkretisieren und im Rahmen der behördlichen Genehmigungen darzustellen.

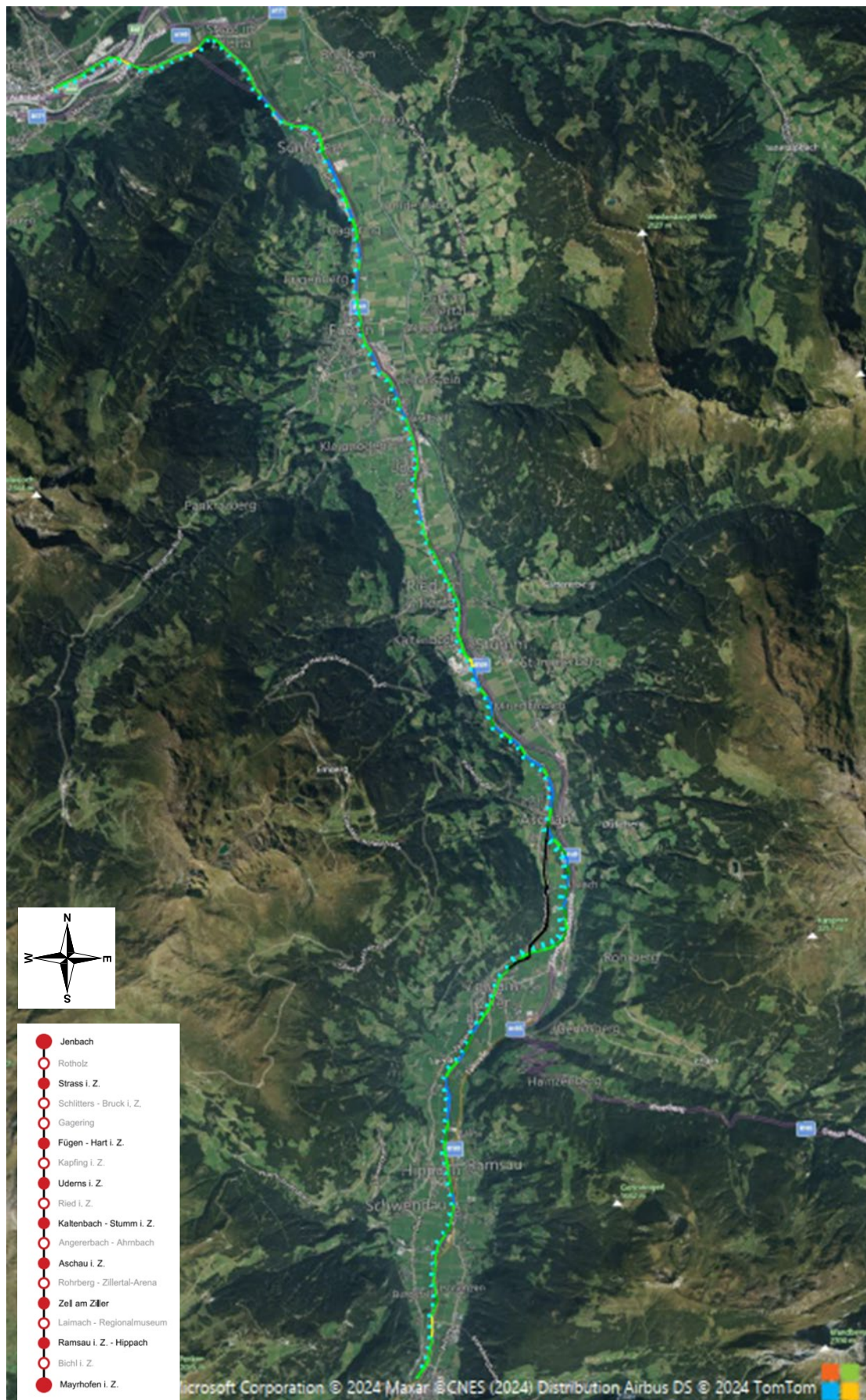


Abbildung 4: Übersichtskarte Streckenbewertung

3.3.3 Streckenabschnitte mit tatsächlichen und potenziellen Einschränkungen höheren Grades

Einzelne Streckenabschnitte mit potenziellen Einschränkungen der Kategorien 3 und 4 wurden einer gesonderten Detailprüfung unterzogen.

Höheneinschränkung - Unterfahrene Brücken

Auf den Abschnitten km 1,4 – km 1,6, km 2,8 – km 3,0 und km 16,8 – km 17,0 (Details in 8.6.1) werden Brücken niedriger Durchfahrtshöhe unterfahren, bei denen zudem bei der Montage der Fahrleitung Rechte Dritter betroffen sind. Tabelle 7 listet die minimalen Durchfahrtshöhen der betroffenen Brücken.

Tabelle 7: Brückenhöhen, Quelle: 2024-11-25 (ZVB), Laservermessung

Brücke	Brückenhöhe über Schienenoberkante in mm
ASFINAG Brücke A12, Rotholz; km 1,4; Länge ca. 40m	5340
Brücke B169, Brettfalltunnel; km 2,8; Länge ca. 13 m	5400
Brücke L216, Kaltenbach; km 16,8; Länge ca. 10 m	5710

Mit Bezug auf die technischen Randbedingungen und Annahmen (3.1) kann eine Auswertung hinsichtlich der Machbarkeit vorgenommen werden. Die Auswertung ergab, dass die technische Realisierung einer Fahrleitung für Gleichspannungs- und Wechselspannungssysteme unter allen Brückenbauwerken möglich ist. Für eine Betriebsspannung von 25 kV muss allerdings mit sehr geringer Reserve der dynamische Sicherheitsabstand (OVE EN 50119 Tab. 2, 3.1.1 [2]) zu Grunde gelegt werden. Ob dies zulässig ist, müsste in einer Detailprüfung geklärt werden. Alternativ wäre eine leistungslose Befahrung möglich, wovon aus betrieblichen Gründen an dieser Stelle abgesehen wird. Aus diesen Gründen wird von der Traktionsspannung 25 kV AC abgesehen, und für ein Wechselspannungssystem 15 kV präferiert. Die Auswertung, nach Vermessungsdaten, entsprechend der Norm OVE EN 50119 [2] kann Tabelle 46 bzw. Tabelle 47 entnommen werden.

Im Zuge der Realisierung der Oberleitung unter den Brückenbauwerken sind bei der Befestigung (Aufhängung bzw. Abfangung von Fahrdraht, Tragseil bzw. ev. Verstärkungs- oder Rückleitung) möglicherweise Rechte Dritter betroffen. Im Zuge der Realisierung auf Brückenbauwerken dürften bei der Befestigung der Maste bzw. bei der bahnerdungstechnischen Behandlung Rechte Dritter betroffen sein.

Die Bewertung der Abschnitte mit unterfahrenen oder befahrenen (km 1,4, Bahn-Brücke über Inn) Brücken erfolgt daher mit Kategorie 3 (gelb), nach Festlegung des Bewertungsschemas in Tabelle 5.

Höheneinschränkung - Hochspannungsleitungen

Auf den Abschnitten km 1,4 – km 1,6, km 23,0 – km 23,2, km 30,6 – km 30,8 und km 30,8 – km 31,0 (Details in 8.6.2) werden Hochspannungsleitungen unterfahren. Es werden dabei zwei Hochspannungsleitungen des Verteilnetzbetreibers TINETZ und zwei Hochspannungsleitungen des Übertragungsnetzbetreibers APG gekreuzt. Mit Bezug auf (3.1.1) kann eine Auswertung hinsichtlich der Machbarkeit vorgenommen werden. Unter den beiden TINETZ-Leitungen kann eine Oberleitung unter Einhaltung der normgerechten Sicherheitsabstände, inklusive jenem für den Sonderlastfall 6, realisiert werden. Die Auswertung nach den Angaben des Netzbetreibers TINETZ kann Tabelle 48 entnommen werden.

Für die beiden APG-Leitungen gilt, dass die Realisierung einer Oberleitung auf beiden Abschnitten möglich ist. Die Einhaltung des Sicherheitsabstands für den Sonderlastfall 6 (siehe 3.1.1) konnte mangels

konkreter Angaben nicht überprüft werden, ist aber vermutlich nicht möglich. Eine Erhöhung der Hochspannungsleitung ist grundsätzlich möglich (siehe 3.1.2) jedoch mit entsprechenden Kosten und Vorlaufzeiten verbunden. Die Bewertung dieser Abschnitte, hinsichtlich der Realisierbarkeit einer versorgungstauglichen Oberleitung, erfolgt mit Kategorie 3 (gelb), da auch mit der leistungslosen Befahrung dieser Streckenabschnitte der Betrieb gewährleistet werden kann.

Zur abschließenden Beurteilung der vorschriftgemäßen Schutzabstände seitens des Übertragungsnetzbetreibers APG ist eine Planung des Bauvorhabens vorzulegen. Daher muss diese Überprüfung als nachfolgende Detailprüfung bzw. im Rahmen der Ausführungsplanung stattfinden. Für den Fall, dass es sich nicht um Abspannmaste handelt und somit der Sonderlastfall 6 nicht betrachtet werden muss, kann nach den technischen Annahmen in 3.1.2 auch in diesen Abschnitten eine unter Spannung befahrbare Oberleitung realisiert werden.

Höheneinschränkungen – Mittelspannungsleitungen

Die Bahnstrecke wird von einigen Mittelspannungsleitungen gekreuzt. Es wird nach Absprache mit dem Netzbetreiber TINETZ davon ausgegangen, dass jene Leitungen – so sie eine Einschränkung hinsichtlich der Sicherheitsabstände darstellen – unter den Gleisen (z.B.: per Spülbohrverfahren) hindurchgeführt werden können.

Engstellen

Auf Basis der Ansätze zur technischen Realisierung (3.1.2) wurden, basierend auf Befahrungsvideo und Katasterdaten, vorbehaltlich einer ingenieurmäßigen Vermessung, die in Tabelle 8 gelisteten Abschnitte als potenzielle Engstellen qualifiziert. Die Bereiche km 3,0 – km 3,2, km 3,6 und km 24,0 – 24,4 wurden im Auftrag der ZVB seitens der Firma Trigonos im Detail untersucht.

Tabelle 8: Engstellen

km	Ort	Bewertung
3,0	zw. Bhf. Rotholz und Bhf. Strass	1
3,2	kurz vor Bhf. Strass	2
3,6	kurz nach Bhf. Strass	1
10,4	kurz nach Bhf. Fügen	1
12,8	kurz nach Bhf. Uderns	1
15,2	Ried i. Zillertal	1
15,4	Ried i. Zillertal	1
15,6	Ried i. Zillertal	1
23,8	Zell a. Ziller	2
24,0	Zell a. Ziller	1
24,2	Zell a. Ziller	1
24,4	Zell a. Ziller	1

Dabei konnte festgestellt werden, dass in den genannten Bereichen, mindestens einseitig, der mindestens benötigte Raum für die Fundamentierung mittels Rammrohr vorhanden ist. Die Gesamt-Bewertung der

entsprechenden Abschnitte resultiert nun aus der Qualifizierung als Engstelle zusammen mit den anderen Bewertungskriterien erläutert in 3.2. Details können 8.6.5 entnommen werden. Die Qualifizierung als Engstelle einer entsprechenden Kategorie ist so zu interpretieren, dass bei der Planung der Mastgasse beengte Platzverhältnisse berücksichtigt werden müssen, die möglicherweise zu einem erhöhten Planungs- und Umsetzungsaufwand führen. Die Realisierbarkeit einer Oberleitung wird jedoch positiv bewertet.

4 Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn – Arbeitspaket 2

Aufbauend auf der Streckenbewertung, hinsichtlich der Realisierbarkeit einer Oberleitung, aus Arbeitspaket 1, wurden in Arbeitspaket 2 Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn ausgearbeitet, die unterschiedliche Grade der Oberleitungs-Elektrifizierung abbilden. Die Bandbreite reicht von einer reinen Akku-Variante mit Ladeeinrichtungen in den Endbahnhöfen bis zur Vollelektrifizierung per Oberleitung. Die Varianten bilden unterschiedliche Kombinationen aus Längen und Anzahl von Fahrleitungsabschnitten ab, welche für den Bezug der jeweils aktuell benötigten Traktionsenergie, sowie zum Laden der Akkus genutzt werden. Die Varianten der Oberleitungsabschnitte orientieren sich in erster Linie an der Einfachheit der Realisierung einer Oberleitung und daraus abgeleiteten, möglichen, zusammenhängenden Streckenabschnitten.

Mit einer dynamischen Betriebssimulation mit dem Modell OpenTrack wird, zu jedem Zeitpunkt eines Umlaufes, die für die entsprechend notwendigen Geschwindigkeiten, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge benötigte Leistung am Rad ermittelt. Für die Variantenprüfung wurden die im Fahrplan angesetzten Haltezeiten je Stationshalt angesetzt. Auf Basis der Simulationsergebnisse wird die benötigte Akkuspezifikation ermittelt, welche sich nach dem resultierenden Leistungs- und Energiebedarf richtet.

Das Simulationsmodell berücksichtigt alle Arten von Fahrwiderständen, die Massenträgheit des Fahrzeugs inklusive rotatorischer Anteile, die Kennlinie der Fahrmotoren (z-v-Diagramm) sowie die Wirkungsgrade aller relevanten Baugruppen im Antrieb. Der Energiebedarf der Hilfsbetriebe inklusive Heizung und Klimatisierung wird nachträglich bei der Gesamtenergieberechnung aufgeschlagen. Bogen und Steigungswiderstand werden durch Abbildung der realen Trassierung implementiert.

Für die unterschiedlichen Elektrifizierungsvarianten wird die Bahnstrominfrastruktur für die Versorgung mit Gleich- oder Wechselspannung ausgewiesen.

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems (Versorgung, Unterwerke, Fahrzeuge) orientiert sich an der Vorgabe eines Halbstundentaktes mit vierteiligen Triebzügen. Bezüglich der Flexibilität zur Kapazitätserhöhung wird ein genereller Betrieb mit dreiteiligen Zuggarnituren, sowie deren Betrieb in Doppeltraktion zu Starklastzeiten, betrachtet. Eine Taktverdichtung in Form eines Viertelstundentaktes kann nach, auf Betriebssimulationen gestützten, Erkenntnissen nur mit Anpassung bzw. Erweiterung von Streckenteilen betrieblich ermöglicht werden und wird in dieser Studie hinsichtlich der dafür notwendigen Aufstockung bzw. Erweiterung des rollenden Materials und der Infrastruktur qualitativ erörtert.

Für die Bewertung hinsichtlich des Ziels der Kostenminimierung, erfolgt eine Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten der Varianten, über die zu erwartende Lebensdauer der Fahrleitungsinfrastruktur. Die Abschätzung dient der Vergleichbarkeit der Elektrifizierungsvarianten und hat nicht den Anspruch Vollkosten abzubilden.

4.1 Randbedingungen

4.1.1 Fahrplanvorgaben aus Zillertaler Mobilitätsplan und Annahmen für den Zugbetrieb

Der Zillertaler Mobilitätsplan sieht für die Zillertalbahn zukünftig im Zielfahrplan einen durchgängigen Betrieb im Zeitraum von etwa 5:00 bis etwa 24:00 mit tagsüber einem 30-min-Takt und Stundentakt in den Abendstunden vor [5]. Die Fahrzeit Jenbach – Mayrhofen ist auf 47 Minuten festgelegt, die für die Richtung Mayrhofen-Jenbach auf 46 Minuten. Ankunft in Jenbach ist jeweils zur Minute 10 und 40. Die planmäßige Wendezeit beträgt 10 Minuten. Als betrieblich erforderliche, minimale Wendezeit im Verspätungsfall wird in Abstimmung mit ZVB eine Zeit von 3 Minuten angenommen. Der Zielfahrplan ist im Anhang 8.3 aufgeführt.

Nach Berechnung des VVT sind bei einzeln verkehrenden Triebzügen 12251,5 Umläufe pro Jahr erforderlich. Werden kürzere Triebzüge vorgesehen und in der Hauptverkehrszeit³ mit einer Doppeleinheit gefahren, erhöht sich die Anzahl der jährlichen Fahrzeugumläufe auf 16024,0 [6].

Für die Abbildung des Zugbetriebs in der Betriebssimulation (siehe 4.2) wurden in Absprache mit VVT und ZVB zusätzliche betriebliche Annahmen zum Ziel-Fahrplan abgestimmt und getroffen. Die geplanten Haltezeiten wurden grundsätzlich mit 30 Sekunden angesetzt, bei Orten mit bekannt stärkerer Nachfrage (Fügen, Kaltenbach, Zell, Ramsau) mit 60 Sekunden. Bei den Bedarfshalten wurde, abweichend von der ÖBB-Annahme von 12 Sekunden, in Ried und Schlitters (24 Sekunden) und Rotholz (30 Sekunden) angesetzt.

4.1.2 Annahmen zum Fahrzeug

Für das Zillertal werden aktuell zwei Fahrzeugkonzepte diskutiert:

- Ein vierteiliger Triebzug mit ca. 72 m Länge, der nur einzeln verkehrt
- Ein dreiteiliger Zug mit einer Länge von etwa 54 m, der in der Hauptverkehrszeit in Doppeltraktion und sonst einzeln verkehrt.

Bei Erstellung dieser Studie lag noch keine Entscheidung bezüglich des Fahrzeugkonzeptes vor, so dass ein Weg gesucht wurde, mit möglichst geringem Aufwand, Ergebnisse für beide Varianten zu generieren. Bei dreiteiligen Zügen ist zu prüfen, ob die vorhandenen Längen der Bahnsteige an allen Stationen ausreichend sind.

Die Fahrzeugkonzepte für den drei- und den vierteiligen Triebzug werden von dem, ursprünglich dem Zillertaler Mobilitätsplan zugrundeliegenden, vierteiligen Wasserstoff-Triebzug abgeleitet. Ausgehend von diesem vierteiligen Triebzug, mit etwa 72 m Länge, werden ein drei- und ein vierteiliger Triebzug abgeleitet, die sich fahrdynamisch gleich verhalten, sodass für den einen Typ berechnete Energiewerte linear, entsprechend der Masse, auf den anderen Typ umgerechnet werden können. Abbildung 5 skizziert eine beispielhafte Ausführung für beide Varianten. Dabei soll die gewählte Verteilung von Lauf- und

³ Für den Betrieb in Doppeltraktion sind folgende Betriebszeiten angesetzt: Mo-Fr(S) bis ca. 8 Uhr und ab ca. 16 Uhr bis ca. 19 Uhr, in der Skisaison zusätzlich täglich: ca. 7 Uhr bis ca. 11 Uhr und ca. 14 Uhr bis ca. 18 Uhr (Überschneidung der Zeiträume während der Skisaison)

Triebdrehgestellen den Gedanken der proportional zum Gewicht skalierten Antriebsleistung verdeutlichen. Ein Fahrzeughersteller wird vermutlich eher zwei Triebdrehgestelle in jedem Endwagen vorsehen.

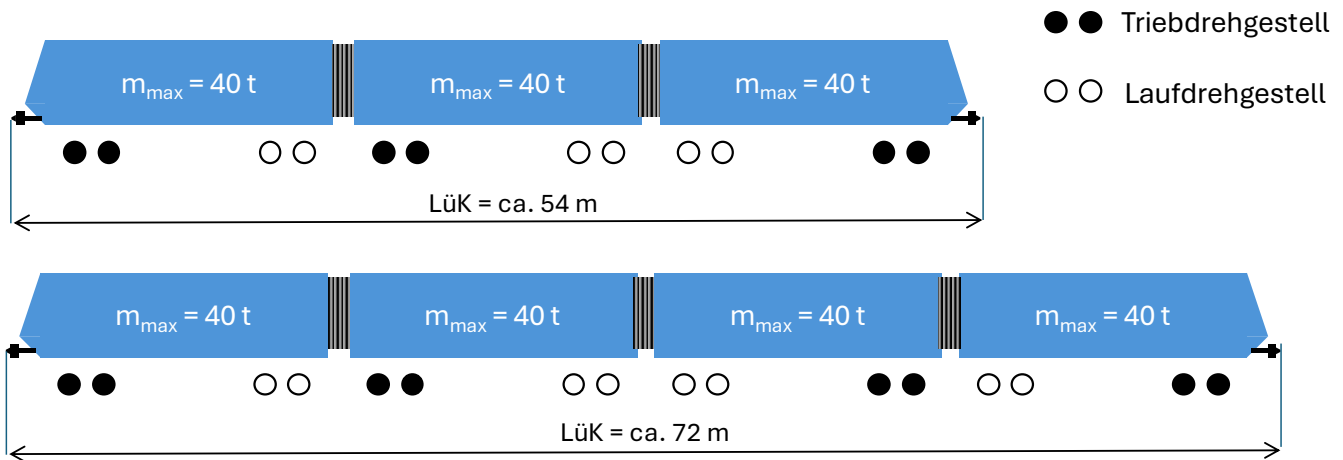


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Zugkonzepte „3-Teiler“ und „4-Teiler“

Das ursprüngliche Fahrzeugkonzept sieht vier Wagen mit insgesamt vier Trieb- und vier Laufdrehgestellen vor. Die acht Triebradsätze werden von je einem Elektromotor angetrieben. Die Gesamtmasse wird mit 164 t bei einer maximalen Zuladung von 36 t angegeben [1]. Neben der Wasserstoffanlage zur Stromerzeugung sah das Konzept einen Speicherakku mit einer Kapazität von 310 kWh vor. Die maximale Radsatzlast beträgt bei der Zillertalbahn 12,5 t und wird bei einer durchschnittlichen Radsatzlast von 10,25 t nicht überschritten.

Die für diese Studie abgeleiteten Fahrzeugkonzepte entsprechen hinsichtlich der Drehgestelle und Antriebe, sowie der fahrdynamischen Eigenschaften, dem ursprünglichen Konzept, sodass die Einhaltung des Zielfahrplans, für den dieses Fahrzeugkonzept erstellt wurde, grundsätzlich gewährleistet ist. Bei der Ermittlung des Energieverbrauchs, im späteren Verlauf, muss die unterschiedliche, elektrische Ausrüstung der Fahrzeugvarianten bewertet werden. Durch die verschiedene Ausrüstung können Masseunterschiede zwischen einer Variante mit Transformator und großem Akku und einer Variante für Gleichstromfahrlleitung, ohne Trafo und ohne Akku, in der Größenordnung von 10 t entstehen.

Die Masse des Referenzfahrzeugs für die fahrdynamischen Berechnungen wird auf maximal 160 t abgerundet, da gegenüber dem ursprünglichen Konzept Komponenten wie die Wasserstoffanlage entfallen. Um die Masseunterschiede im Gesamtenergiebedarf zu berücksichtigen, wird der Traktionsenergiebedarf am Ende entsprechend des Mehr- oder Mindergewichts der untersuchten Varianten korrigiert (siehe Kap. 4.8). Die wichtigsten, insbesondere fahrdynamischen, Parameter fasst Tabelle 9 zusammen. Während bei Traktion die Leistung am Rad durch die Verluste in Motor, Getriebe und Lagern geringer ist, als die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung, kehrt sich beim generatorischen Bremsen der Effekt um, sodass die Bremsleistung am Rad höher als die vom Motor abgegebene elektrische Leistung ist.

Tabelle 9: Parameter für drei- und vierteiliges Zugkonzept

Parameter	Einheit	für 3-Teiler	für 4-Teiler
Länge	m	ca. 54	ca. 72
Leermasse	t	93	124
Max. Zuladung	t	27	36
Traktionsleistung am Rad	kW	1050	1400
Bremsleistung am Rad	kW	1200	1800
Anfahrzugkraft	kN	135	180
Anfahrbeschleunigung	m/s ²	1.0	1.0
Bremsverzögerung	m/s ²	-1.0	-1.0
Betriebliche Höchstgeschwindigkeit	km/h	80	80
Leistung Hilfsbetriebe - maximal	kW	100	125
Leistung Hilfsbetriebe - Jahresmittel	kW	50	60

Abbildung 6 zeigt das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm für die vierteilige Variante. Zusätzlich ist der, sich in der Ebene über die Geschwindigkeit ergebende, Verlauf der Anfahrbeschleunigung und der Bremsverzögerung über die Geschwindigkeit dargestellt. Die fahrdynamischen Parameter des 3-Teilers sind so gewählt, dass sich der gleiche Verlauf der Beschleunigungen ergibt und beide Varianten somit das gleiche fahrdynamische Verhalten haben.

Die TU Wien Studie [1] enthält auf Seite 78 eine Abschätzung für den Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe wie Heizung und Klimaanlage, Kühlung von Akku, Trafo, Stromrichtern und Fahrmotoren, Kompressor, Fahrzeugsteuerung, Türantriebe und Beleuchtung. Dort wird für den 3-Teiler ein Leistungsbedarf der Nebenverbraucher mit 98 kW angegeben. Vereinfachend wird angenommen, dass der maximale Bedarf pro Wagen 25 kW und 25 kW für das Antriebssystem beträgt. Damit lässt sich der Maximalbedarf auf den 4-Teiler hochskalieren. Die Akkus werden für den maximalen Energiebedarf ausgelegt. Ein großer Teil der benötigten Leistung entfällt auf die Heizung und Klimatisierung. Da in der Übergangszeit und auch in den Morgen- und Abendstunden im Sommer der Leistungsbedarf für die Klimatisierung deutlich zurückgeht, wird angenommen, dass im Jahresmittel der Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe nur etwa die Hälfte des Maximalwertes beträgt. Daher wird bei der Berechnung des jährlichen Energiebedarfs die reduzierte Hilfsbetriebeleistung verwendet.

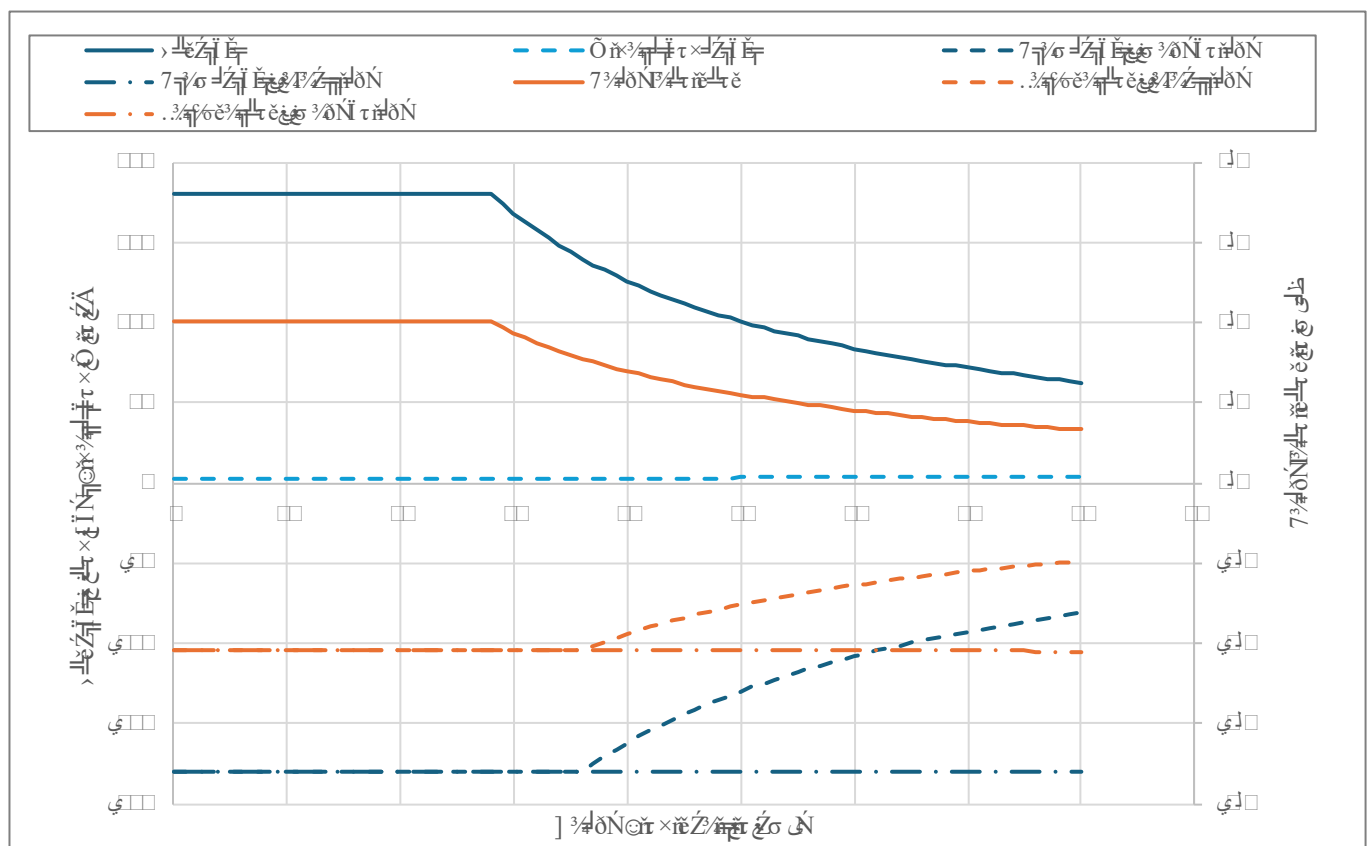


Abbildung 6: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm für vierteiliges Konzept. Beschleunigungen gelten sowohl für drei- als auch vierteiliges Konzept

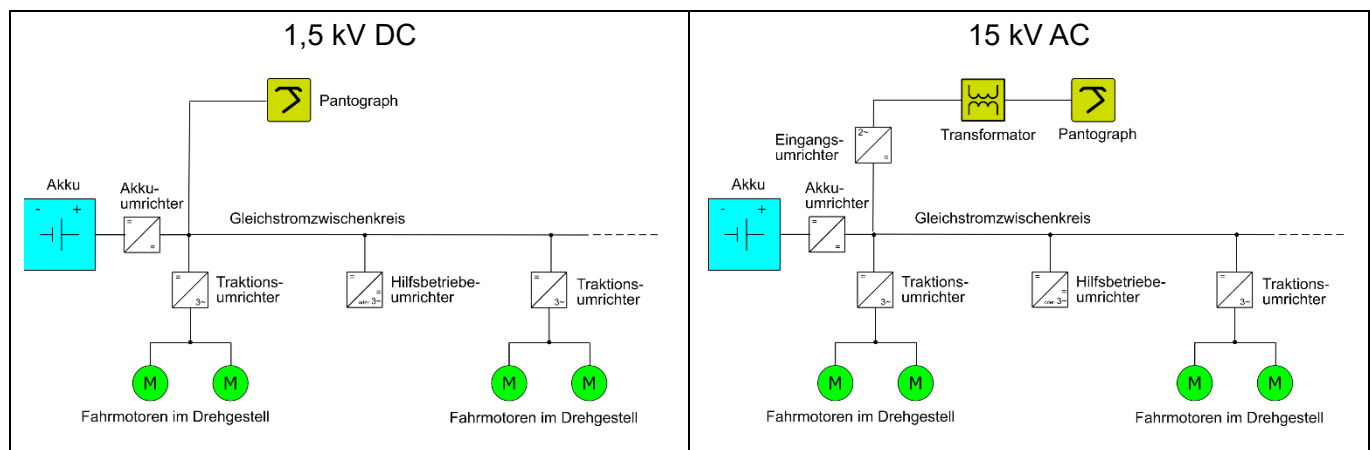


Abbildung 7: Blockdiagramm Antriebsanlage für einen Gleich- und einen Wechselstrom-Akku-Triebzug

Die wichtigsten elektrischen Komponenten, die u.a. den Gesamtwirkungsgrad bestimmen, zeigt Abbildung 7 für einen Triebzug mit Akku, einmal für eine Gleichstromfahrleitung und einmal für eine Wechselstromfahrleitung. Hauptunterschied ist der Transformator mit der entsprechenden Hochspannungseinrichtung. Bei geeigneter Auslegung und Abstimmung der Komponenten benötigt die 1,5 kV DC-Variante keinen Eingangsumrichter, allerdings sind auf der Eingangsseite nicht dargestellte Komponenten wie eine Eingangsdrossel erforderlich. Die für die Energieberechnung angenommenen Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten aus Abbildung 7 listet Tabelle 10 auf. Der Wirkungsgrad vieler Komponenten ist abhängig vom Arbeitspunkt. Die in Tabelle 10 angegebenen Werte sind als mittlerer Wirkungsgrad für den gesamten Betriebsbereich zu verstehen. Die jeweiligen Gesamtwirkungsgrade

liegen im Vergleich zur in der Studie der TU Wien [1] auf Seite 28 aufgezeigten Streuweite der Annahmen aus verschiedenen Quellen sehr nahe an den dort gewählten Werten von 0,85 für einen Elektrozug und 0,68 für einen Akkuzug.

Tabelle 10: Wirkungsgrad Traktion am Rad ab Fahrleitung ohne / mit Speicherung der Traktionsenergie im Akku

Stromsystem	Wirkungsgrad ohne Speicherung im Akku		Wirkungsgrad bei Speicherung im Akku	
	DC	AC	DC	AC
Transformator (luftgekühlt)	-	0.95	-	0.95
Eingangsumrichter	-	0.98	-	0.98
Akkuumrichter (Laden)	-	-	0.95	0.95
Akku (Speichern)	-	-	0.95	0.95
Akkuumrichter (Entladen)	-	-	0.95	0.95
Traktionsumrichter	0.98	0.98	0.98	0.98
Fahrmotor	0.94	0.94	0.94	0.94
Getriebe und Lager	0.98	0.98	0.98	0.98
Gesamtwirkungsgrad	0.90	0.84	0.77	0.72

Beim Laden von Akkuzügen im Stand kann der maximal übertragbare Strom zwischen Fahrleitung und Schleifstück am Stromabnehmer den limitierenden Faktor bilden. Der Kontaktwiderstand führt zu einer Erwärmung der Fahrleitung, die in einem ertragbaren Rahmen gehalten werden muss, um ein Reißen der mechanisch stark gespannten Fahrleitung bei starker Erwärmung ausschließen zu können. Die EN 50367 [7] gibt in Tab. 5 folgende maximal zulässigen Ströme an:

Tabelle 11: Maximale Stromstärke bei stillstehendem Fahrzeug nach EN 50367 [7]

Kategorie	DC 1,5 kV	DC 3 kV	AC
Maximale Stromstärke je Dachstromabnehmer bei stillstehendem Fahrzeug	300 A	200 A	80 A
Übertragbare Leistung je Dachstromabnehmer bei stillstehendem Fahrzeug	450 kW	600 kW	1200 kW (bei 15 kV)

Kann das Fahrzeug einen zweiten Stromabnehmer anlegen, verdoppelt sich die Leistung. Technisch kann der Ladestrom noch in gewissen Grenzen erhöht werden, wenn der Anpressdruck des Stromabnehmers im Stand erhöht wird, wodurch sich der Übergangswiderstand verringert, so dass bei gleicher Erwärmung etwas mehr Strom übertragen werden kann. Bezüglich der maximal übertragbaren Leistung ist die 1,5 kV DC-Variante kritischer als die mit 3 kV. Da beide Varianten sonst sehr ähnlich sind, aber bei 1,5 kV Eingangsspannung sich der Fahrzeugaufbau etwas vereinfacht, werden nachfolgend nur die 1,5 kV DC und 15 kV AC-Variante verglichen. Aus fahrzeugtechnischer Sicht bietet eine Elektrifizierung mit 25 kV AC wegen der geringen Leistungsanforderung keine Vorteile gegenüber 15 kV, sofern in beiden Fällen die Frequenz 50 Hz beträgt. Aufgrund der höheren Ströme ist bei der 1,5 kV DC Variante von einem höheren Verschleiß der Schleifleiste auszugehen.

Für eine Nennleistung um 1 MW werden auf dem Markt sowohl ölgekühlte Transformatoren als auch luftgekühlte, sogenannte Trockentransformatoren angeboten, die sich in der Leistungsklasse nur unwesentlich in der Masse unterscheiden. Bei höherer Leistung sind dann ölgekühlte Transformatoren leichter als luftgekühlte gleicher Nennleistung.

Die Vorteile von Trockentransformatoren sind eine halbierte Verlustleistung und eine größere Überlastfähigkeit, da sie gegenüber ölgekühlten Transformatoren etwa die doppelte aktive Masse aufweisen, die bei Überlast Wärme zwischenspeichern kann. Damit können Trockentransformatoren länger mit einer höheren Last oder mit reduzierter Kühlerleistung bei Nennlast betrieben werden. Eine Leistung von 150 % der Nennleistung ist im Bereich von Minuten ertragbar. Aufgrund der Geräuschentwicklung der Lüfter kann ein Betrieb mit Nennleistung und reduzierter Lüfterleistung beim Laden in Bahnhöfen vorteilhaft sein.

Aufgrund der mit der Spannung zunehmenden Isolationsabständen sind Trockentransformatoren besser für Eingangsspannungen zwischen 10 bis 15 kV geeignet als für 25 kV. Eine höhere Frequenz erlaubt ebenfalls eine leichtere Bauweise, weshalb eine Frequenz der Wechselspannung von 50 Hz zu bevorzugen ist. In diesem Fall kann die Masse des Transformators mit 1000 kW Nennleistung bei unter 3000 kg liegen. Da zusätzliche Komponenten erforderlich sind, wird die Mehrmasse eines Transformators mit 1000 kW Nennleistung mit 3000 kg angenommen. Da sich bestimmte Komponenten bei einer moderaten Leistungserhöhung kaum ändern, wird die Masse eines Transformators mit 1333 kW Nennleistung mit 3500 kg für den 4-Teiler angenommen. Die Leistungsangaben dienen hier zur Masseabschätzung und greifen nicht der Auslegung eines Fahrzeugs durch einen Fahrzeughersteller vor.

Tabelle 12: Annahmen für Masse und Kosten des Transformators

Parameter	Einheit	für 3 Teiler	für 4 Teiler
Nennleistung	kW	1000	1333
Kurzzeitleistung	kW	1500	2000
Masse	kg	3000	3500
Mehrkosten des Fahrzeugs	EUR	270'000	300'000

Akku

Für Traktionsaufgaben in Schienenfahrzeugen werden von verschiedenen Herstellern unterschiedliche Akkutypen mit unterschiedlicher Zellchemie angeboten. Diese müssen insbesondere folgende Anforderungen erfüllen

- Hohe Lebensdauer sowohl zeitlich als auch bezüglich Ladezyklen
- Hohe Lade- und Entladeleistung
- Geringes Brandrisiko

Diesen Kriterien sind die Kriterien geringe Masse und geringes Volumen tendenziell untergeordnet, die im Kraftfahrzeugbereich sehr wichtig sind, so dass sich die Eigenschaften von Akkus in Elektroautos und in Schienenfahrzeugen grundlegend unterscheiden. Die Brandschutzanforderungen an Schienenfahrzeuge sind deutlich höher als bei Kraftfahrzeugen. Daher werden im Bahnbereich häufig Akkus mit einer Lithium-Titanat-Oxid (LTO) Zelltechnologie verwendet, bei denen das sog. „Thermisches Durchgehen“ (schlagartige Entzündung) praktisch ausgeschlossen ist. Diese Akkus werden üblicherweise unterflur oder auf dem Dach untergebracht. Sollten bei der Zillertalbahn aufgrund der Schmalspurausführung mit

gewünschtem großen Niederflurbereich die Akkus in Geräteräumen im Wagenkasten untergebracht werden müssen, wird ein Fahrzeughersteller vermutlich diese gegenüber dem Fahrgastbereich ausreichend sicher abschotten müssen, was technisch gut möglich ist.

Aufgrund des marktverfügbaren Angebots verschiedenen Packs und anpassbaren Packs wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeughersteller die berechnete Akkukapazität mit nur geringen Abweichungen realisieren und sinnvoll auf die einzelnen Fahrzeuge verteilen kann und kaum Zwänge durch vorgegebene Akkupack-Größen hat.

Im Bahnbereich werden typischerweise Lithium-Ionen-Akkus mit den Zelltechnologien LTO oder NMC verwendet. Tabelle 13 vergleicht die wesentlichen Parameter. Die Parameter für die Akkus mit LTO-technologie sind auf Basis der im Internet verfügbaren Datenblätter [8] ermittelt. Spezifische Masse und spezifisches Volumen sind aufgerundet, um Gehäuse, Kühlanlage und unvermeidbare Abstände zwischen den einzelnen Packs zu berücksichtigen. In den spezifischen Zusatzkosten für die Akkus bei der Fahrzeugbeschaffung sind neben den eigentlichen Akkus Geräte zu deren Temperierung, Ladeumrichter und Befestigungsrahmen sowie Engineering-Kosten anteilig berücksichtigt, die zwar bei Tauschakkus entfallen. Andererseits ist unklar, ob zum Zeitpunkt des Tausches schnittstellengleiche Akkus verfügbar sind, so dass als Annahme zur sicheren Seite - und trotz grundsätzlich sinkender Preise für Akkus - für die Tauschakkus die gleichen Kosten wie für der Erstbestückung angesetzt werden. Zur Sicherstellung der Lieferbarkeit geeigneter Tauschakkus kann es sinnvoll sein, diese mit in die Fahrzeugausschreibung aufzunehmen.

Tabelle 13: Annahmen zu Akkugröße, -kosten und -lebensdauer

Parameter	Einheit	LTO Lithium-Titanium-Oxide	NMC Lithium-Nickel-Mangan- Cobalt-Oxide
Spezifische Masse	kg/kWh	20.5	12
Spezifisches Volumen	m³/kWh	0.018	0.012
Spezifische Kosten			
• bei Fahrzeugbeschaffung	€/kWh	3000	2000
• bei Akkutauch		3000	2000
Ertragbare Zyklen		40'000	8'000
Laderate C, typisch	kW/kWh	3 – 5	1 - 2
Laderate C, maximal		10	3
Entladerate C, typisch	kW/kWh	3 – 5	1 - 2
Entladerate C maximal		10	3
Kalendarische Lebensdauer	Jahre	15	k.A.

Ein wesentlicher Parameter bei der Akkudimensionierung ist die C-Rate, die angibt, in welcher Zeit die Ladung dem Akku entnommen oder zugeführt werden kann. Eine C-Rate von 2 bedeutet, dass der Akku einer halbe Stunde ge- oder entladen werden kann. Prinzipiell gibt die C-Rate damit auch in kW/kWh an, mit welcher Leistung bezogen auf die Nennkapazität der Akku belastet werden kann. Dabei wird zwischen maximalen und eher schädigenden Laderaten und typischen, von dem Akku besser ertragbaren Laderaten unterschieden.

ABB gibt die zyklische Lebensdauer ihrer LTO-Akkus mit 40'000 Zyklen mit einem Ladehub von 10% auf 90% bei einer Lade-/Entladeleistung von 3C/3C an [8]. Grundsätzlich wirken sich geringere Ladehübe positiv und hohe Lade-/Entladeleistungen negativ auf die Anzahl ertragbare Zyklen aus. Zusätzlich spielen Temperatur und Ladzustand dabei eine gewisse Rolle. In der Praxis sind nach Angaben eines Herstellers sehr hohe Zyklenzahlen bei einer Ladeleistung von 7C und Ladehub um 10 % der Nennkapazität zur Aufnahme von Bremsenergie bei Rekuperieren durchaus möglich.

4.2 Fahrdynamische Betriebsimulation mit OpenTrack

Zur Berechnung der Fahrzeiten und des zeitlichen Verlaufs der Zug- bzw. Bremskraft wurde die Software OpenTrack [9] verwendet. OpenTrack ist ein am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich realisiertes Forschungsprojekt zum Thema interaktive Betriebsimulation von Eisenbahnnetzen. Mit dem Simulationsprogrammes lassen sich komplexe Fragestellungen aus dem Bereich des Eisenbahnwesens behandeln.

Durch die Simulation wurden, basierend auf einem der neu anzuschaffenden Schienenfahrzeuge entsprechenden Zugkraftdiagramm, die Fahrzeiten, die entsprechenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auf der zurückgelegten Wegstrecke, sowie die mechanische Leistung per zurückgelegtem Weg berechnet.

Auf Grundlage des Simulationsergebnis wird im Weiteren der Energieverbrauch auf den Streckenabschnitten berechnet und die Akkudimensionierung für die unterschiedlichen Elektrifizierungsvarianten vorgenommen.

4.3 Dimensionierung der Akkus

Aus den OpenTrack-Simulationen wird der Verlauf einer Fahrt Jenbach-Mayrhofen und Mayrhofen-Jenbach als Verlauf von Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Leistung am Rad für Traktion bzw. Bremsen übergeben. Beide Fahrten entsprechend des Zielfahrplans (siehe 8.3) werden zeitlich so hintereinander gesetzt, dass sich der zweistündige Referenzumlauf mit für $t = 0$ Abfahrt in Jenbach und $t = 63$ min Abfahrt in Mayrhofen ergibt.

Zu beachten ist, dass in der Simulation in OpenTrack die technisch kürzeste Fahrzeit simuliert wird, die vorgesehen ist, um Verspätungen aufzuholen. Da bei dieser Fahrweise der Energiebedarf etwas höher als im sanfteren Regelbetrieb ist, wird sicherheitshalber dieser höhere Wert für die Akkudimensionierung verwendet. Allerdings kommt so das Fahrzeug in der Simulation entsprechend der vorhandenen Fahrzeitreserve jeweils ca. 2,5 min vor der planmäßigen Zeit am Ziel ankommt. Abbildung 8 stellt die für den 2 h-Referenzumlauf aufbereiteten Eingangsdaten aus OpenTrack grafisch dar.

Der Traktionsenergiebedarf am Rad ergibt sich durch Integration der positiven Leistung (Traktionsleistung) aus dem untersten Diagramm und beträgt für den 4-Teiler 497 kWh. Umgerechnet ergibt sich für den 3-Teiler ein Wert von 373 kWh, der ausreichend gut mit dem Wert von 394 kWh in der Studie der TU Wien auf Seite 28 für die Variante Sz5 mit fast gleicher Masse übereinstimmt.

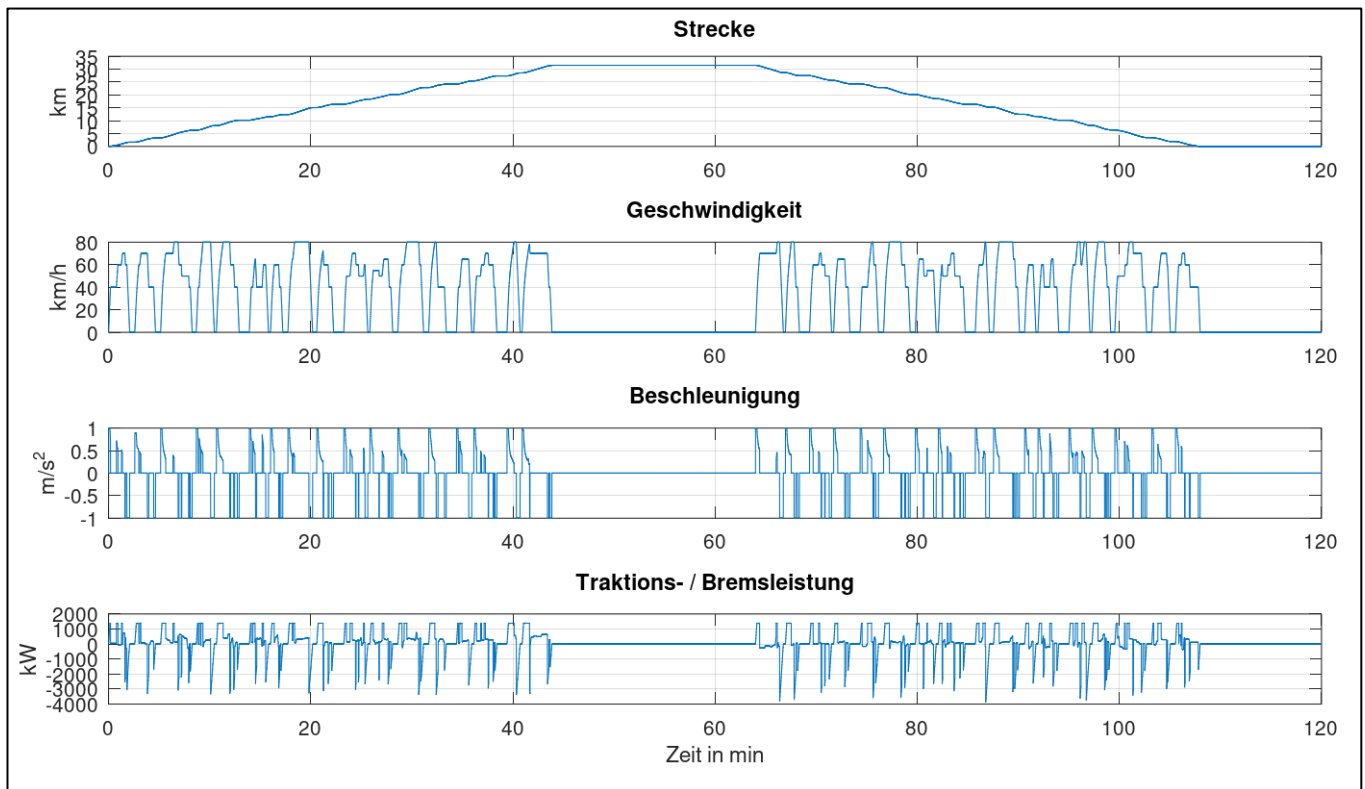


Abbildung 8: Grafische Darstellung der aufbereiteten Eingangsdaten aus OpenTrack für den 4-Teiler

Das Integral nur über die negativen Leistungen ergibt die Bremsenergie. Beim 4-Teiler wird angenommen, dass die elektrische Bremse am Rad maximal eine Leistung von 1800 kW aufnehmen kann. Bei einer Verzögerung von 1 m/s² kann die elektrische Bremse oberhalb einer Geschwindigkeit von 36 km/h nicht mehr die gesamte Bremsenergie aufnehmen und die weitere Bremsleistung muss von der mechanischen Bremse aufgenommen werden (vgl. Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm Abbildung 6). Die gesamte Bremsenergie für einen Umlauf mit dem Anteil der elektrisch nutzbaren Energie enthält Tabelle 14. Die Energiemengen sind für „am Rad“ angegeben: entsprechend den Wirkungsgraden der elektrischen Komponenten wird für die Traktion mehr elektrische Energie benötigt und kann beim Bremsen weniger elektrische Energie bereitgestellt werden. Konservativ wird zusätzlich angenommen, dass die Energiegewinnung real nur in 75 % der Fälle möglich. Werden 75 % der möglichen Energiegewinnung aus der unteren Zeile von Tabelle 14 auf die Traktionsenergie bezogen, ergibt sich ein Faktor für die Rückspeisung von 0,45.

Tabelle 14: Für einen Umlauf maximal benötigte Traktionsenergie und anfallende Bremsenregie für einen Umlauf (am Rad, maximale Beladung)

Parameter	Einheit	für 3 Teiler	für 4 Teiler
Traktionsenergie (am Rad pro Umlauf)	kWh	373	497
Bremsenergie gesamt (am Rad pro Umlauf)	kWh	274	365
Davon maximaler Anteil der elektrischen Bremse	kWh	223	297

Um dauerhaft einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, müssen die Akkus des Fahrzeuges am Ende des 2 h-Umlaufs mindestens den gleichen Ladezustand aufweisen, wie zu Beginn der Fahrt. Die Berechnung für die Akkudimensionierung erfolgt für maximale Beladung und maximalen Leistungsbedarf.

der Hilfsbetriebe, allerdings mit vereinfachter Berücksichtigung der Wirkungsgrade. Vereinfachend werden eine einheitliche Masse angenommen und die Gewichtsunterschiede der elektrischen Ausrüstung erst in einer späteren Betrachtung in Kap. 4.8 berücksichtigt.

Die Akkugröße wird ermittelt, in dem die entnommene Energie vom anfänglichen Ladezustand abgezogen und beim Laden die zugeführte Energie wieder aufaddiert werden. Der Anfangszustand wird auf null gesetzt, so dass der maximale Ladehub einfach ablesbar ist. Wird wieder der Anfangszustand erreicht und es besteht noch die Möglichkeit zum Laden, wird die Zeit, für die dieser Zustand besteht als Reservezeit, aufsummiert. Die Reservezeit muss mindestens die Fahrplanreserve von zweimal 2,5 min überschreiten. Je geringer die Reservezeit ist, desto größer ist das Risiko, dass bei Störungen oder vorübergehenden Fahrzeitverlängerungen durch Langsamfahrstellen etc. sich der Ladezustand über den Umlauf verschlechtert und nach einer gewissen Anzahl von Umläufen das Fahrzeug einen zu geringen Ladezustand aufweist, um pünktlich in den nächsten Zyklus zu starten.

Nachfolgende Betrachtungen werden für den 4-Teiler durchgeführt. Da der Energiebedarf sich näherungsweise linear mit der Fahrzeugmasse ändert, wird für den 3-Teiler bei einem um 25% reduzierten Gesamtgewicht ebenfalls ein um 25% kleiner Akku benötigt, so dass sich die Ergebnisse einfach umrechnen lassen.

Die Ermittlung der Nennkapazität aus der im Regelbetrieb benötigten Akku-Kapazität folgt dem Ansatz aus S.39 der Studie der TU Wien [1], nach dem die maximale Entladung nicht den Wert von 55 % der Nennkapazität überschreiten sollte, um ausreichende Reserven für Störfälle und die Alterung der Akkus vorzuhalten.

4.4 Bahnenergieversorgung

Ein elektrisches Bahnstromsystem kann mit Gleichstrom oder einphasigem Wechselstrom betrieben werden. Die typischen Traktions-Nennspannungsniveaus sind für Gleichspannung 750 V, 1,5 kV und 3 kV DC, für Wechselspannung 15 kV 16,7 Hz und 25 kV 50 Hz. Bisher weniger verbreitet ist das 15 kV 50 Hz AC System. Es bietet aber Vorteile bei beengten Platzverhältnissen, da im Vergleich zu 25 kV verringerte Schutzabstände einzuhalten sind (siehe 3.1.1). Jede Traktionsspannungsart hat entsprechende Implikationen für die Traktionsausrüstung der Schienenfahrzeuge (siehe 4.1.2).

Die Auslegung der Energieversorgung entsprechend der Oberleitungsabschnitte in 4.5 hat konzeptionellen Charakter und ist jedenfalls vorbehaltlich einer Netzstudie zur Bahnstromversorgung und einer eingehenden Prüfung des Netzbetreibers hinsichtlich der örtlichen Leistungsfähigkeit und der zu erwartenden Netzzurückwirkungen des jeweiligen Systems zu betrachten.

4.4.1 Bahnenergieversorgung mit Gleichstrom

Die Energieversorgung einer Gleichstrombahn erfolgt aus dem öffentlichen dreiphasigen 50 Hz Drehstromnetz. Dabei wird in mehreren, auf der Strecke verteilten, Gleichrichterunterwerken (GUW) die aus dem Mittelspannungsnetz zur Verfügung stehende dreiphasige Spannung in Gleichspannung des jeweiligen Nennspannungsniveaus umgesetzt und an der Fahrleitung bereitgestellt. Durch hohe Ströme, aufgrund des im Vergleich zu Wechselspannungssystemen niedrigeren Spannungsniveaus, kommt es zu höheren Verlusten. Dadurch ist eine größere Anzahl an örtlich verteilten Unterwerken notwendig, um die erforderlichen Ströme und Leistungen entlang der Strecke zur Verfügung zu stellen, um

Übertragungsverluste und Spannungsabfall zu begrenzen. Die Anzahl der Unterwerke muss nach einer Netzstudie entsprechend dimensioniert werden.

Die Gleichrichterunterwerke arbeiten dabei im Parallelbetrieb. Per zweiseitiger Speisung werden durch Streckentrenner getrennte Speiseabschnitte der Strecke versorgt. Für eine redundante Auslegung können Schaltgerüste mit Umgehungsleitungen vorgesehen werden. Dadurch können Speiseabschnitte bei Ausfall eines Unterwerkes verbunden werden. Zur Bedienung und Überwachung der Anlage ist entsprechende Leit- und Fernwirktechnik erforderlich, die in das bahnbetriebliche Leitsystem eingebunden werden muss. Für den Fehlerfall muss eine Mitnahmeschaltung zur systemweiten Fehlerbehandlung vorgesehen werden. Gleichrichterunterwerke beinhalten, neben der Mittelspannungs- und Gleichspannungsschaltanlage und diversen Schaltfeldern, eine Transformator- und Gleichrichtereinheit um die entsprechende Spannungsart- und Niveau bereitstellen zu können. Der Wirkungsgrad des Transformators ist dabei in dieser Studie mit 98 % angesetzt, jener des Gleichrichters mit 95 %. Gleichrichterunterwerke können grundsätzlich auch rückspeisefähig ausgeführt werden. Dies ist aber noch keine weit verbreitete Technologie. Auch der Einsatz von Pufferbatterien im GUW zur Glättung von Lastspitzen ist möglich und vorteilhaft. Die Technologie ist derzeit Gegenstand von Forschungs- und Pilotprojekten.

Gleichrichterunterwerke nach Belastungsklasse VI nach OVE EN 50329 können bei Spitzenlast für 1 Minute mit 300 % und für zwei Stunden mit 150 % überlastet werden. Dies hat Einfluss auf die Dimensionierung.

Die Fahrleitung eines Gleichstrom-Bahnsystems wird als Hochkette mit Tragseil und Fahrdraht ausgeführt. Aufgrund der hohen Anfahrströme in Gleichstromsystemen kann eine entsprechende Strombegrenzung der Fahrzeuge beim Anfahren erforderlich sein. Die Zuleitung zur Oberleitung erfolgt über entsprechend dimensionierte Kabel mit Kabelendverschlüssen und Mastkopfschalter an der Fahrleitung. Um die Übertragungsverluste und den Spannungsfall durch die hohen Ströme zu begrenzen, wird eine Verstärkungsleitung vorgesehen. Die Übertragungsverluste über Leitungen und Schiene sind als Gesamtwirkungsgrad berücksichtigt. Zum Schutz gegen Überspannungen müssen Überspannungsableiter (A1-Ableiter) vorgesehen werden. Bei der Realisierung einer Fahrleitung für ein Gleichstromsystem sind die Randbedingungen, Vorschriften und Normen aus 3.1.1 zu beachten.

Die Rückleitung erfolgt bei DC-Bahnen über die Schiene und meist einen zusätzlichen Rückleiter. Es wird ein Verhältnis der Ströme von 70:30 von Rückleiter:Schiene angestrebt. Da die Gleise direkt und/oder induktiv mit dem Erdreich verbunden sind und auch die Speisequellen geerdet sind, fließt ein Teil des Rückstroms auch über das Erdreich. Bei DC-Bahnen muss Rückstrom im Erdreich vermieden werden, da es aufgrund der hohen Ströme zu Korrosionsproblemen, durch elektrochemische Streustromkorrosion an im Erdboden verlegten metallischen Strukturen, kommen kann. Dazu muss die Qualität des Oberbaus untersucht und nachgewiesen werden, dass der nach OVE EN 50122-2 [10] zulässige Ableitungsbelag erfüllt wird. Der Oberbau muss so ausgelegt sein, dass die Isolationsqualität der Schienen gegen Erde nicht durch Wasser herabgesetzt wird und durch Trennung sichergestellt ist, dass kein direkter Kontakt mit dem Erdreich hergestellt werden kann. Um Streuströme zu verhindern, kann die Schiene isoliert aufgestellt werden. Schienen in offenem Oberbau können durch sauberen Schotter, Holz- oder Stahlbetonschwellen mit isolierenden Befestigungen oder mit Schutzfolie bzw. mit Abstand zwischen Fahrschienen und Schotter erreicht werden. Die isolierte Aufstellung kann umfangreiche Maßnahmen am gesamten Gleiskörper inklusive der Weichenanlagen, bis hin zum Neuaufbau des Oberbaus, mit umfangreichen Streckensperren erforderlich machen.

Teile, welche sich im Oberleitungs- oder Stromabnehmerbereich befinden und die nicht gegen Erde isoliert sind, dürfen wegen der Gefährdung durch Streuströme nicht direkt mit der Rückleitung verbunden werden. Aufgrund des, durch den hohen Bahnrückstrom, auftretenden Schienenlängsspannungsfall zwischen dem Schienenfahrzeug und dem Unterwerk, entsteht ein Schienenpotential gegen Bezugs- oder Bauwerkserde. Die Grenzwerte für die Berührungsspannung werden durch bahnerdungstechnische Behandlung im Oberleitungsbereich (Rissbereich) von Bauwerken entlang der Strecke, mittels Spannungsbegrenzungseinrichtungen (A2-Ableiter) zum Potenzialausgleich eingehalten. In Bahnhöfen oder Remisen wird üblicherweise ein eigenes GUV vorgesehen und das Betriebsgelände mittels Isolierstoß von der Strecke getrennt. Im Betriebsbereich werden Streuströme über die zahlreichen möglichen Strompfade, v.a. über die Verbindung mit Bauwerkserde, toleriert. Weiters müssen bahnerdungstechnische Maßnahmen nach OVE EN 50122-3 [11] getroffen werden, um Potenzialverschleppung und das Fließen von beachtlichen Schäden verursachenden Streuströmen zwischen Gleisen, die nur für Wechselstrom elektrifiziert sind, und Gleisen, die nur für Gleichstrom elektrifiziert sind, zu verhindern.

Für die Fahrzeugtechnik stellen die hohen Ströme der Gleichstromsysteme Herausforderungen hinsichtlich Betrieb und Verschleiß an Fahrleitung und Stromabnehmer dar. Die technischen Randbedingungen für die Stromabnehmer werden in 4.1.2 behandelt. Aufgrund höherer Elektroerosion nach Lichtbogenbildung und erhöhtem mechanischen Abrieb aufgrund notwendig höherer Kontaktkräfte kommt es zu, im Vergleich zum Betrieb mit Wechselspannung, erhöhtem Verschleiß.

In der vorliegenden Studie wird vorrangig das 1,5 kV DC-System behandelt, da dies im Vergleich zum 3 kV System Vorteile für die Fahrzeugkonfiguration, hinsichtlich der Akkuintegration (einfachere Isolationsanforderungen, keine zusätzliche Transformator/Gleichrichter- bzw. DC-DC-Wandler-Einheit), bietet und die Übertragungsverluste aufgrund der Streckenlänge mit einer moderaten Anzahl von Gleichrichterunterwerken handhabbar sind. Gleichspannungssysteme mit niedrigeren Traktionsspannungen (z.B.: 750 V, 850 V, 900 V, 1000 V) erfordern aufgrund der Verluste und aus Gründen der Spannungshaltung eine höhere Anzahl an Unterwerken entlang der Strecke. Diese Systeme werden daher nicht weiterverfolgt.

4.4.2 Bahnenergieversorgung mit Wechselstrom

Die Energieversorgung einer Wechselstrombahn kann aus dem öffentlichen dreiphasigen 50 Hz Drehstromnetz, oder aus dem einphasigen 16,7 Hz Bahnstromnetz der ÖBB bereitgestellt werden. Da ein Anschluss an das ÖBB-Netz aufgrund der Entfernung zum nächstgelegenen Netzknoten in Wörgl nicht in Betracht gezogen wird, kann auch auf die Betrachtung einer 16,7 Hz Versorgung verzichtet werden. Der einphasige Anschluss an das öffentliche Drehstromnetz kann auf Spannungsebene 5 (Mittelspannung, 25 kV) bzw. auf Spannungsebene 3 (Hochspannung, 110 kV) erfolgen.

Grundsätzlich muss der Netzanschluss entsprechend der Technischen und Organisatorischen Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) erfolgen und vom Netzbetreiber, anhand der erforderlichen Lage der Unterwerke, der benötigten Leistung, der Gleichzeitigkeit der Belastung und der zu erwartenden Leistungsrampen, hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Netzes und der zu erwartenden Netzrückwirkungen geprüft werden. Dies muss in einer weiteren Projektphase behandelt werden.

In der vorliegenden Studie wird vorrangig das 15 kV 50 Hz System behandelt. Die höheren notwendigen Schutzabstände für das Niveau 25 kV 50 Hz würden zu größeren Einschränkungen (3.3.3) in der Fahrleitungsrealisierung führen und werden daher nicht näher betrachtet.

Im Zillertal besteht eine Hochspannungs- (110 kV) und eine Mittelspannungs-Verteilernetzinfrastruktur (25 kV). Prinzipiell ist der Anschluss an beide Netzebenen vorstellbar. Der Netzanschluss kann grundsätzlich direkt per 110 kV 3AC (50 Hz) / 15 kV 1AC (50 Hz) Transformator, oder mit 25 kV 3AC (50 Hz) / 15 kV 1AC (50 Hz) bzw. 25 kV 3AC (50 Hz) / 15 kV 2AC (50 Hz) Transformatoren mit Phasentrennstellen erfolgen. Es sind verschiedene Anschlussmöglichkeiten an ein oder zwei Phasen des Drehstromnetzes, je nach technischer Lösung mit Sonderbautransformatoren und entsprechenden Fahrleitungsschaltungen und Phasentrennstellen, möglich. Dabei kommt es, v.a. hinsichtlich Unsymmetrie, zu Rückwirkungen auf das übergeordnete Drehstromnetz. Diese können reduziert, aber nicht verhindert werden. Nach Rücksprache mit dem Netzbetreiber, muss von diesem im Zuge der Detailplanung die Zulässigkeit untersucht werden.

Der Netzanschluss kann weiters durch 110 kV 3AC (50 Hz) / 15 kV 1AC (50 Hz) bzw. 25 kV 3AC (50 Hz) / 15 kV 1AC (50 Hz) Umrichter-Lösungen erfolgen. Dabei können Voll- oder Symmetrienumrichter zum Einsatz kommen. Als Umrichter-Technologien stehen wiederum Direkt- und Zwischenkreisumrichter zur Verfügung. Bei einem Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis wird der dreiphasige Drehstrom nach der Spannungswandlung zunächst in Gleichstrom und anschließend auf einphasigen Wechselstrom umgesetzt. Dadurch ist ein leistungssymmetrischer Anschluss möglich und die Netzurückwirkungen werden minimiert.

Umrichterwerke bestehen im Wesentlichen aus der 3AC Schaltanlage, 3AC Filter und Transformator, den Umrichtereinheiten, 1AC Transformator und Filter, der 1AC Schaltanlage, Schutzeinrichtungen sowie zusätzlicher Hilfs- und Leittechnik. Heute ist die Ausführung in Containerbauweise üblich, wobei die Leistung für Mittelspannungs-Umrichter in Containereinheiten skaliert werden kann, Hochspannungsumrichter werden als auf die benötigte Leistung zugeschnittene Anlagen errichtet. Die notwendige Leistungselektronik der Umrichter haben erhöhte Kosten der Umrichterwerke im Vergleich zu Umspannwerken zu Folge.

Die Symmetrierung der Belastung ist unter bestimmten Bedingungen auch durch Sonderbautransformatoren ohne Umrichter möglich. Dies kann für den Lastfall zweiphasiges gleichmäßiges Laden, mit getrennten elektrischen Systemen (Doppeltraktion) erreicht werden. Dieser Betriebsfall kann nur bei Laden im Stand gewährleistet werden. Durch die Vorgabe des Zielfahrplans mit begrenzten Standzeiten muss von dieser Möglichkeit jedoch abgesehen werden.

Der Umfang der Bahnenergieversorgungs-Infrastruktur, hinsichtlich Leistung und Anzahl der Unterwerke, richtet sich nach der Anzahl der zu versorgenden Fahrleitungsabschnitte und dem geforderten Redundanzniveau.

Die Rückspeisung von Bremsenergie in das übergeordnete Drehstromnetz ist grundsätzlich denkbar. Dies muss ebenfalls nach TOR erfolgen und vom Netzbetreiber untersucht werden. Die einphasige Rückspeisung über einen Bahnstromtransformator hat signifikante Netzurückwirkungen zur Folge. Moderne Umrichterwerke können rückspeisefähig ausgeführt werden. Dies ist aber noch keine weit verbreitete Technologie. Die Netzurückspeisung einer 1-phasigen Wechselstrom-Bahn in der 3-phasige Drehstromnetz ist aufgrund der Unsymmetrie eher nur für Umrichterlösungen denkbar. Der Einsatz von Pufferbatterien zur Glättung von Lastspitzen ist denkbar und müsste technisch untersucht werden.

Für den Netzanschluss sind in den Unterwerken primärseitige Hoch- bzw. Mittelspannungsschaltanlagen, die Transformator- bzw. Umrichtereinheit, sowie die sekundärseitige Schaltanlage notwendig. Der Wirkungsgrad des Transformators ist mit 98 % angesetzt, jener des Umrichters mit 93 %. Die Übertragungsverluste der Fahrleitung sind für das AC-System über einen Wirkungsgrad von 0,9 berücksichtigt. Die Wirkungsgrade wirken sich auf den Energieverbrauch und damit in weiterer Folge auf die Energiekosten aus.

Die Fahrleitung eines Wechselstrom-Bahnsystems wird als Hochkette mit Tragseil und Fahrdraht ausgeführt. Aufgrund der, im Vergleich zum Gleichstromsystem besseren Stromtragfähigkeit und geringeren Übertragungsverluste, ist keine Verstärkungsleitung notwendig. Bei AC-Bahnen werden a priori keine Rückstromleiter benötigt, die Bauweise ohne Rückleiter ist auch bei Vollbahnen teils verbreitet. Allerdings kann es im Fehlerfall zu Problemen mit den zulässigen Berührungsspannungen oder diversen Beeinflussungen (OVE EN 50122-1 [12], -2 [10], -3 [11]) kommen. Bei Vollbahnen werden daher verbreitet Rückleiter verbaut, um durch entsprechende Bemessung der Querschnitte, ein Verhältnis bei der Rückleitung von etwa 40:40:20 (Rückleiter:Schiene:Erde) zu erreichen. Die Notwendigkeit eines Rückleiters muss untersucht werden, bei einem Lokalbahnssystem kann der Rückleiter möglicherweise entfallen. Teile elektrischer Betriebsmittel bzw. Bauwerke Oberleitungs (Rissbereich)- oder Stromabnehmerbereich müssen durch direkte Verbindung mit der mit der Rückleitung werden. Bei der Realisierung einer Fahrleitung für ein Wechselstromsystem sind die Randbedingungen, Vorschriften und Normen aus 3.1.1 zu beachten.

Nach OVE EN 50367 [7], Tab. 5 ist der, vor allem für einen Ladevorgang, relevante Strom über den Stromabnehmer im Stillstand aus thermischen Gründen begrenzt. Der Maximalwert für Wechselstrom beträgt 80 A pro Stromabnehmer.

4.5 Fahrplanstabilität

Betrieblichen Aspekte bilden das erste Validierungskriterium für die Auswahl der Elektrifizierungsvarianten. Die Fahrzeuge müssen zu jeder Zeit die für den Betrieb erforderliche Energie entweder aus der Fahrleitung oder aus ausreichend geladenen Akkus beziehen können. Sowohl bei typischen Verspätungen muss eine ausreichende Fahrplanstabilität als auch bei größeren Betriebsstörungen mit anderen Wendepunkten z.B. durch Baustellen eine ausreichende Energieversorgung gewährleistet sein.

Für die Variantenprüfung wurden fixe Haltezeiten je Stationshalt angesetzt. Unter dieser Voraussetzung ermöglichen alle Elektrifizierungsvarianten in Kombination mit den vorgestellten Fahrzeugvarianten grundsätzlich einen zuverlässigen 2 h-Umlauf der Fahrzeuge, bei dem keine Beeinträchtigungen aufgrund des Akkuladevorgangs selbst bei kleineren Störungen zu erwarten sind. Die finale Ausführung der Variante 1 gewährleistet durch die Länge der Fahrleitung vor dem Endbahnhof auch bei Verspätung und minimaler Wendezeit eine ausreichende Ladung der Akkus. Eine abschließende Beurteilung der Fahrplanstabilität kann unter dem Ansatz von Haltezeitverteilungen erfolgen, die in Verspätungsszenarien zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dies ist nicht Gegenstand dieser Variantenprüfung.

4.6 Varianten

Für die Elektrifizierung der Bahn sind vielfältige Varianten möglich. Diese reichen von der batterieelektrischen Befahrung eines großen Teils der Strecke, mit Oberleitungsabschnitten für das statische und dynamische Laden der Akkus im Rahmen der Vorgabe des Zielfahrplans, bis zur

Elektrifizierung durch Realisierung einer Oberleitung entlang der gesamten Strecke. Abbildung 9 gibt eine Übersicht über mögliche Elektrifizierungsvarianten innerhalb des Rahmens der oben genannten Grenzfälle. Die Grenzfälle werden in den Varianten 0, 5 und 6 abgebildet. In Variante 0 wird die Bahnstrecke mit einem Akkuzug befahren. Das Laden der Akkus erfolgt ausschließlich im Stand in den beiden Endbahnhöfen. In den Varianten 5 und 6 ist die gesamte Bahnstrecke mit einer Oberleitung ausgestattet, wobei in Variante 5 zwei Abschnitte unter Hochspannungsleitungen leistungslos befahren werden.

Für alle Varianten wird die Versorgung mit Gleichstrom- oder Wechselstrom-Systemen betrachtet. Für die Grenzvarianten mit Oberleitung auf der ganzen Strecke und AC-Stromversorgung über das 110 kV Hochspannungsnetz ist die Realisierung der Bahnstromversorgung über Transformator/Umrichter-Einheit oder nur mittels Transformatoren denkbar. Bei Einsatz eines Umrichters ist die Rückspeisung von rekuperierter Bremsenergie denkbar, die direkte Versorgung mittels Transformators hat jedoch die geringsten Anschaffungskosten in der Bahnstrominfrastruktur. Um diese Aspekte aufzeigen zu können wurde die Fälle für Variante 5 unterschieden, um die volle Kostenbandbreite aufzeigen zu können. Variante 6 bildet mit voll ausgebauter und voll unter Spannung befahrbarer Oberleitung, sowie voll ausgebautem DC-System bzw. AC-System mit Umrichter-Lösung die Maximalausbauvariante. Sie wurde als Grenzvariante erörtert, um in der nachfolgenden Kostenbetrachtung als Referenzvariante für den Vergleich der Varianten zu dienen. Die Hybrid-Varianten 2 – 4 bauen auf den Erkenntnissen der Streckenbewertung sowie der vorangegangenen Studie der TU-Wien auf.

Es wird grundsätzlich redundante Versorgung der Oberleitungsstrecken angestrebt. Eine redundante Auslegung der Standorte der Unterwerke, erlaubt bei abschnittsweiser Installation von Streckentrennern, zur Abtrennung der Versorgung von Oberleitungsabschnitten, den teilweisen Betrieb bei Störungen an der Fahrleitung. Bei vergleichsweise kurzen Oberleitungsstrecken wird vorerst keine zweiseitige Speisung vorgesehen. Für die Varianten, bei welchen die Versorgung aus dem 110 kV Netz erfolgen kann, ist eine redundante Einspeisung von zwei Standorten entlang der Strecke vorgesehen (siehe Varianten 4 – 6). Das Redundanzniveau muss im Rahmen der Auslegung der Bahnstromversorgung erörtert und mit betrieblichen Aspekten der jeweiligen Variante abgewogen werden.

Die Varianten werden im Folgenden näher beschrieben. 4.7 gibt Aufschluss über die minimal notwendigen Akkugrößen für die jeweilige Variante. Die konzeptionelle Dimensionierung der Bahnstromversorgungsanlagen wird in 4.8.2 erläutert.

1	Abschnitt mit Oberleitung befahren	b	Bahnhofsereich
1	Abschnitt mit Oberleitung befahren (nur für Var. 1 DC, Ladestrecke)	x	Zweigleisiger Abschnitt
2	Abschnitt mit Oberleitung befahren (zweigleisig)	HS	Umspann-/Umrichterwerk 110 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC
0	Abschnitt ohne Oberleitung, möglicher Ausbau bis Fixhalt (Var.2a)	MS	Umrichterwerk 25 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC
0	Abschnitt ohne Oberleitung	G	Gleichrichterunterwerk 25 kV 50 Hz 3AC / 1,5 kV DC
II	Abschnitt mit Oberleitung, teils leistungslos befahren	?	fraglicher Standort

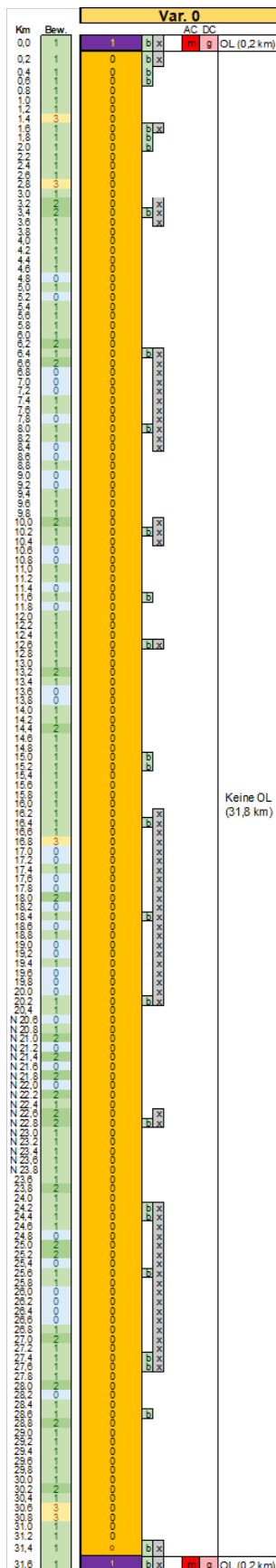
Abbildung 9: Legende Elektrifizierungsvarianten

Anmerkung: durch ein Fehlerprofil auf der Strecke und die Einführung einer Kilometrierung auf der Neubaustrecke Aschau-Zell, kann die Länge von Streckenabschnitten nicht direkt aus der Kilometrierung errechnet werden.



Abbildung 10: Elektrifizierungsvarianten

4.6.1 Variante 0 – Akkuzug



Variante 0 sieht die Befahrung der Strecke mit batterieelektrischem Betrieb vor. In den beiden Endbahnhöfen befinden sich Ladestationen und kurze Ladeabschnitte mit Oberleitung zur Ladung der Akkus in den Triebzügen im Stand.

Länge der Oberleitung: ca. 200 m je Endbahnhof

Oberleitungsabschnitte

- 1) ca. 200 m in Bahnhof Jenbach
- 2) ca. 200 m in Bahnhof Mayrhofen

Akku-Abschnitt

- 1) km 0,2 – km 31,4 (31,8 km): Jenbach bis Mayrhofen

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen

Die Bahnstromversorgung kann durch Gleichrichterunterwerke 25kV(AC)/1,5kV(DC) oder 25kV(AC)/15kV(AC) Mittelspannungs-Lade-Umrichter erfolgen. Sie dient der Aufladung der Akkus. Tabelle 16 zeigt Standorte und Grobdimensionierung der Unterwerke.

Tabelle 15: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 0

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach	UW MS	2500	GUW	1600
km 31,6	Mayrhofen	UW MS	2500	GUW	1600

Im Vergleich zu den nachfolgenden Varianten 1 bis 6 wird bei der Variante 0 angenommen, dass der Ladestromabnehmer erst nach Stillstand des Fahrzeugs ausgefahren und angelegt wird und vor Abfahrt wieder eingefahren sein muss. Damit entfällt ein gewisser Teil (ca. eine Minute) der gesamten Wendezeit zum Laden. Um in der geplanten Wendezeit von 10 Minuten in Jenbach den Akkus die auf der Fahrt von Mayrhofen nach Jenbach entnommene Energie wieder zuführen zu können, ist ein Ladestrom in der Größenordnung von 1000 A bei 1,5 kV DC erforderlich. Derartige Ströme können bei stehendem Fahrzeug nur speziellen Ladestromabnehmer übertragen, bei denen der Kontakt zwischen einer Kupferschleifleiste und einer Kupferstromschiene hergestellt wird. In diesem Fall ist zu klären, wie weit ein derartiger Rückstrom bei Fahrzeugstillstand von den Erdungsbürsten am Radsatzlager übertragen werden können, oder ob eine zweipolige Ladestromschiene ähnlich wie Akkubussen über dem Fahrzeug installiert werden muss.

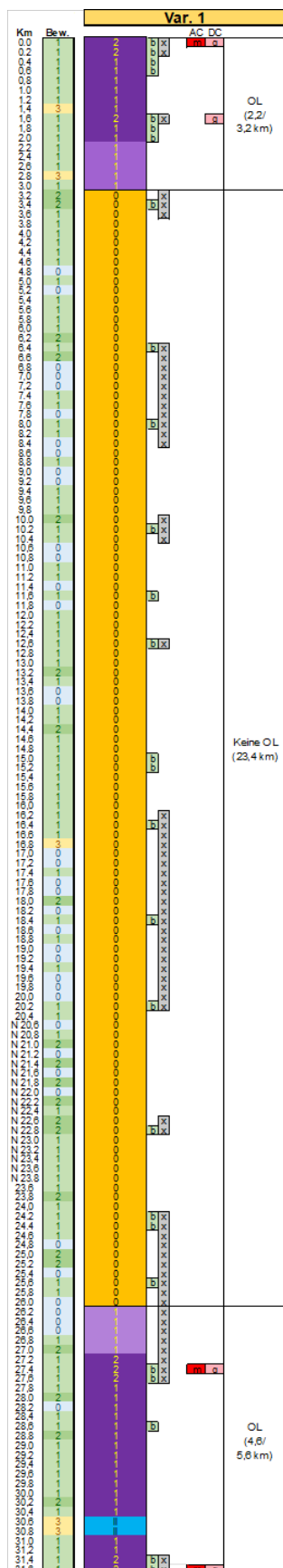
Bei 15 kV AC reduzieren sich die Ladeströme deutlich, aber beim ausschließlichen Laden im Stand sind weder die Umwandlungsverluste im Trafo des Fahrzeugs noch das Mitführen der Trafomasse im Fahrzeug wirtschaftlich sinnvoll.

Muss im Fall von Verspätungen die Wendezeit auf die minimale, betrieblich erforderliche Zeit reduziert werden, die in dieser Studie mit 3 Minuten angenommen wird, ist die Ladezeit, die nach Abzug der zum Anlegen und Senken des Ladestromabnehmers im Stillstand benötigten Zeit verbleibt, nicht ausreichend, um dem die fehlende Energie im Akku zu ersetzen. Die Wendezeit muss in dem Fall bis zum Erreichen einer Mindestladung verlängert werden, so dass häufiger bestehende Verspätung in die nächste Fahrt mitgenommen werden. Um bei der Variante 0 die gleiche Fahrplanstabilität wie bei den Varianten 1 bis 6, bei denen sich eine verringerte Wendezeit nicht auf die Ladefähigkeit auswirkt, zu gewährleisten, ist bei der Variante 0 ein zusätzliches Fahrzeug im täglichen Betrieb erforderlich. Damit kann die planmäßige Wendezeit in Jenbach von 10 auf 40 min vergrößert werden, so dass auch im Verspätungsfall eine ausreichende Ladung möglich ist. Neben den höheren Kosten für Beschaffung, Reinigung und Instandhaltung des zusätzlichen Fahrzeugs fallen darüber hinaus höhere Personalkosten für die zusätzliche Bereitstellung des Fahrpersonals an, die aber in der Studie nicht im Detail betrachtet werden können.

Akkudimensionierung

Der maximale Entladehub des Akkus fällt auf der Fahrt von Jenbach nach Mayrhofen an und ist mit 320 kWh für Variante 0 geringfügig größer als bei der Variante 1 (ohne verlängerte Endabschnitte, Abbildung 11). Insgesamt wird erwartet, dass die Energiekosten der Variante 0 unwesentlich von denen der Variante 1 abweichen, weshalb Variante 0 bei der Energieberechnung nicht einzeln betrachtet wird.

4.6.2 Variante 1 – Akkuzug mit verlängerten Ladeabschnitten



Variante 1 hat den geringsten Anteil an oberleitungselektrifizierter Bahnstrecke. Der Großteil der Strecke wird per Akku befahren. Die Aufladung der Akkus erfolgt in den Endbahnhöfen und während der Fahrt, auf zusätzlichen Oberleitungs-Abschnitten zur Verlängerung der Ladezeit. Die beiden Abschnitte unter den Hochspannungsleitungen bei km 30,6 und km 30,8 werden leistungslos befahren. Es wird der größtmögliche Akku verbaut, um die sichere Wiederaufladung unter den Rahmenbedingung des Zielfahrplans und der gültigen technischen Normen und Möglichkeiten zu gewährleisten.

Länge der Strecke mit Oberleitung: ca. 6800 m – 8800 m (inkl. Strecke zum Ein-/Ausfahren des Stromabnehmers)

Anteil an Gesamtlänge: 21,1 % - 27,3 %

Länge der Oberleitung (inkl. zweigl. Abschnitte): ca. 8000 m – 11000 m

Oberleitungsabschnitte

- 1) DC: km 0;0 – km 3,2 (3,2 km): Bf. Jenbach bis Strass im Zillertal
AC: km 00; – km 2,2 (2,2 km): Bf. Jenbach bis Rotholz
- 2) DC: km 26,2 – km 31,6 (5,6 km): beginnend zw. Laimbach und Ramsau, bis Mayrhofen
AC: km 27,2 – km 31,6 (4,6 km): ca. Ramsau bis Bf. Mayrhofen

Akku-Abschnitt

- 1) DC: km 3,2 – km 26,2 (23,4 km): ca. Strass bis ca. Laimbach
AC: km 2,2 – km 27,2 (25,4 km): ca. Rotholz bis ca. Ramsau

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen

Die Bahnstromversorgung kann durch Gleichrichterunterwerke 25kV(AC)/1,5kV(DC) oder 25kV(AC)/15kV(AC) Mittelspannungs-Lade-Umrichter erfolgen. Sie dient der Aufladung der Akkus und des Fahrbetriebs auf den Oberleitungsabschnitten. Tabelle 16 zeigt Standorte und Grobdimensionierung der Unterwerke.

Tabelle 16: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 1

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach	UW MS	3400	GUW	1400
km 1,6	Rotholz			GUW	1600
km 27,4	Ramsau	UW MS	5000	GUW	1600
km 31,6	Mayrhofen	UW MS	5000	GUW	1400

Erweiterbarkeit

Für den Fall eines späteren Vollausbaus der Oberleitung entlang der gesamten Bahnstrecke kann die Oberleitungslücke zwischen Rotholz/Strass und Mayrhofen geschlossen werden. Hinsichtlich der Bahnstrominfrastruktur käme dann ein Anschluss zur Versorgung der gesamten Strecke an den 110 kV Netzknoten in Zell am Ziller in Frage. Die existierenden Mittelspannungs-Unterwerke in Jenbach und Mayrhofen können dann als Notunterwerke für die Versorgung im Fall von Streckenstörungen dienen.

Akkudimensionierung

Die Variante 1 ist die einzige der sechs Varianten, bei der das Stromsystem eine relevante Auswirkung auf die Betriebssicherheit hat. Abbildung 11 zeigt den Ladestatus des Akkus über den 2 h-Umlauf für die Variante 1 mit 1,5 kV DC, während Abbildung 12 den gleichen Vorgang bei 15 kV AC zeigt. Da bei 15 kV AC der fahrleistungslose Abschnitt die gleiche Länge wie bei 1,5 kV DC hat, ist der maximale Entladehub mit 301 kWh bei beiden Stromsystemen gleich (unteres Diagramm in den Abbildungen). Unterschiede ergeben sich in der erforderlichen Ladezeit. Bei beiden Stromsystemen wird beim Laden im Stand die Nutzung von zwei Stromabnehmern vorausgesetzt, wobei bei der DC-Version durch Zusatzmaßnahmen (Ertüchtigung auf erhöhten Anpressdruck bei Stillstand) die Stromaufnahme im Stand von 300 A auf 400 A gesteigert werden müsste.

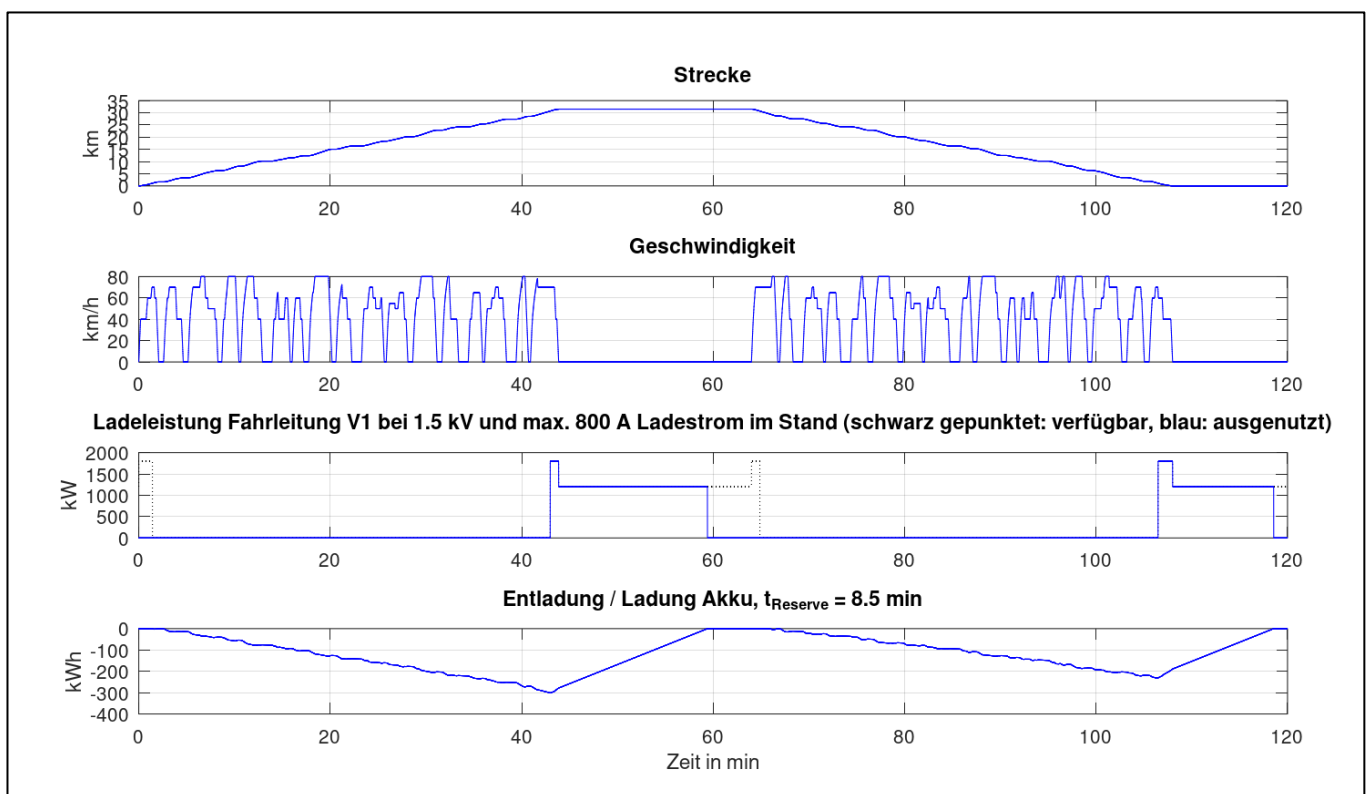


Abbildung 11: Akkudimensionierung Variante 1 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 301 kWh (noch mit kürzeren Elektrifizierungsabschnitten an den Enden)

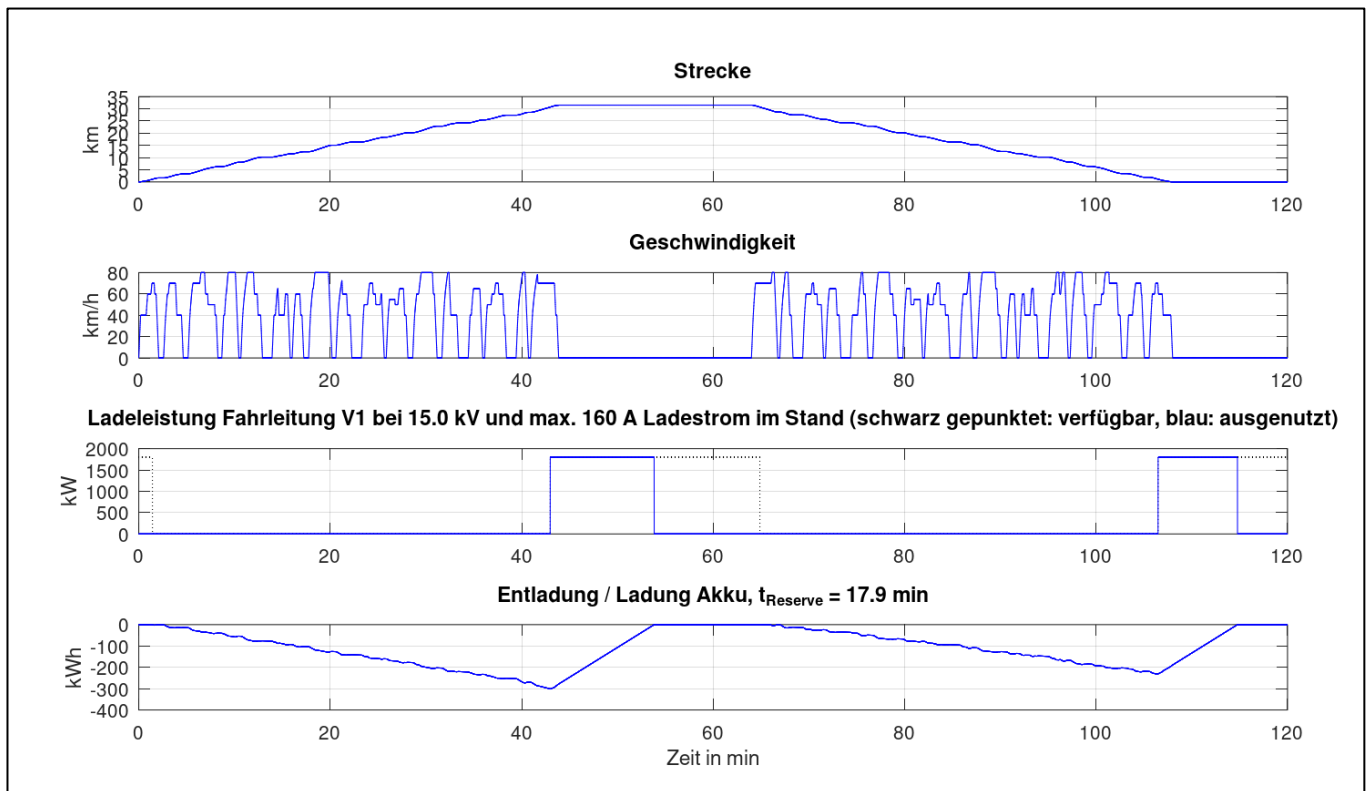
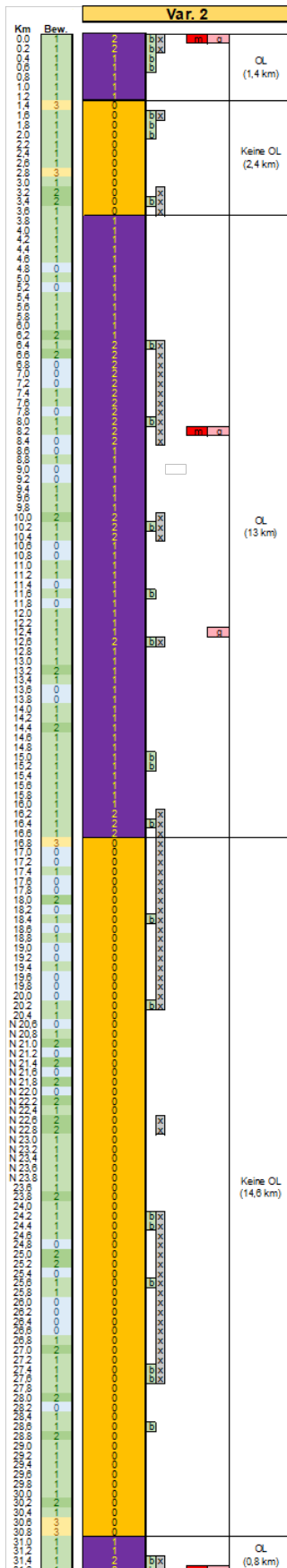


Abbildung 12: Akkudimensionierung Variante 1 – 15 kV AC – maximaler Entladehub 301 kWh (noch mit kürzeren Elektrifizierungsabschnitten an den Enden)

Im jeweils zweiten Diagramm von unten ist deutlich zu erkennen, wie an den elektrifizierten Wendebahnhöfen bei der AC-Ausführung der Ladevorgang früher abgeschlossen werden kann. Die Reservezeiten betragen nach Abzug der Fahrplanreserve von 5 min für 1,5 kV DC 3.5 min und für 15 kV 12.9 min bei Fahrt mit maximaler Zuladung und größtem Energiebedarf der Hilfsbetriebe. Wird bei 15 kV nur mit einem Stromabnehmer geladen, fällt die Reservezeit auf den Wert der 1,5 kV Variante. Das in Abbildung 12 gezeigte Szenario mit maximaler Beladung stellt einen seltenen Sonderfall dar. Bei 50 % Auslastung und halber Hilfsbetriebeleistung steigen die zusätzlich nutzbaren Reservezeit zum Laden auf 13.4 min bei 1,5 kV und 19.4 min bei 15 kV. Bei der Variante 1 beträgt der maximale Ladehub 301 kWh unabhängig vom Stromsystem. Dem Ansatz aus S.39 der Studie der TU Wien [1] folgend, dass die maximale Entladung nicht den Wert von 55 % der Nennkapazität überschreiten sollte, ergibt sich für den 4-Teiler bei der Elektrifizierungsvariante 1 eine anzustrebende Akku-Nennkapazität von 550 kWh.

Abbildung 11 und Abbildung 12 berücksichtigen noch eine Länge der Elektrifizierungsabschnitten an den Endbahnhöfen von etwa 1 km. Diese Längen sind für den Regelbetrieb ausreichend. Im Verspätungsfall besteht das Risiko der Verschleppung einer unvollständigen Ladung über mehrere Umläufe, da bei der minimalen, betrieblich möglichen Wendezeit keine vollständige Ladung möglich ist. Um kein zusätzliches Reservefahrzeug beschaffen zu müssen, sind in der finalen Ausführung der Variante 1 mit 1,5 kV DC die von den Endbahnhöfen ausgehenden Fahrleitungsabschnitten auf 3,2 km bzw. 5,6 km verlängert, so dass bei einer minimal, betrieblich möglichen Wendezeit von 3 min am jeweiligen Endbahnhof die für die Fahrt dorthin dem Akku entnommene Energie wieder zugeführt werden kann. Dies geschieht während der Fahrt ab Fahrleitungsbeginn bis zum Endbahnhof, der Standzeit während der Wende unter Fahrleitung und der Rückfahrt bis zum Fahrleitungsende. Dazu muss das Fahrzeug beim Richtungswechsel durchgängig laden können. Aufgrund der höheren Ladeleistung im Stand könnten die Oberleitungsabschnitt bei 15 kV AC jeweils 1 km kürzer ausgeführt werden.

4.6.3 Variante 2 – Akku-Hybrid mit teilweiser Oberleitungselektrifizierung



Die Variante 2 bildet ausgehend von Variante 1 moderate Elektrifizierung mit Oberleitung ab. Etwa die Hälfte der Bahnstrecke ist mit einer Oberleitung ausgestattet.

Länge der Strecke mit Oberleitung: ca. 15200 m

Anteil an Gesamtlänge: 47,2 %

Länge der Oberleitung (inkl. zweigleisiger Abschnitte): ca. 19200 m

Für Variante 2 wurden noch weitere Sub-Varianten untersucht, die bei vergleichbarem Oberleitungsanteil andere OL-elektrifizierte Abschnitte vorsieht.

Oberleitungsabschnitte

- 1) km 0,0 – km 1,4 (1,4 km): Jenbach bis zu ASFINAG Brücke A12 bei Rotholz
- 2) km 3,8 – km 16,6 (13 km): Strass im Zillertal bis zu Brücke L216 in Kaltenbach
- 3) km 31,0 – km 31,6 (0,8 km): ab nach den beiden Hochspannungsleitungen bis Mayrhofen

Akku-Abschnitt

- 1) km 1,4 – km 3,6 (2,4 km): Rotholz bis Strass
- 2) km 16,8 – km 30,8 (14,6 km): Kaltenbach bis Mayrhofen

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen

Die Bahnstromversorgung kann durch Gleichrichterunterwerke 25kV(AC)/1,5kV(DC) oder 25kV(AC)/15kV(AC) Mittelspannungs-Lade-Umrichter erfolgen. Sie dient der Aufladung der Akkus und des Fahrbetriebs auf den Oberleitungsabschnitten. Tabelle 16 zeigt, konzeptionell, Standorte und Grobdimensionierung der Unterwerke.

Tabelle 17: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 2

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach	UW MS	5000	GUW	1600
km 8,2	Gagering	UW MS	5000	GUW	1600
km 12,4	Uderns			GUW	1600
km 22,6	Rohrberg				
km 25,6	Laimbach				
km 31,6	Mayrhofen	UW MS	3400	GUW	1600

Akkudimensionierung

Ab Variante 2 reicht ein Stromabnehmer für eine sichere Ladung im Stand bei beiden Stromsystemen aus. Die Reservezeit ist bei Variante 2 für alle Stromsysteme unkritisch und die Akkubelastung identisch, weshalb nur die Ergebnisse für 1,5 kV DC dargestellt werden (Abbildung 13). Bei der Variante 2 beträgt der maximale Ladehub 153 kWh, so dass sich mit o.g. Ansatz für den 4-Teiler bei der Elektrifizierungsvariante 2 eine anzustrebende Akku-Nennkapazität von 278 kWh ergibt. Grundsätzlich erhöht der zusätzliche Elektrifizierungsabschnitt auch die Betriebssicherheit bei vorzeitigen Wenden durch baustellenbedingten Streckenunterbrechungen oder Betriebsstörungen. Verkürzte Wendezeiten haben keinen Einfluss auf die Akkuladung.

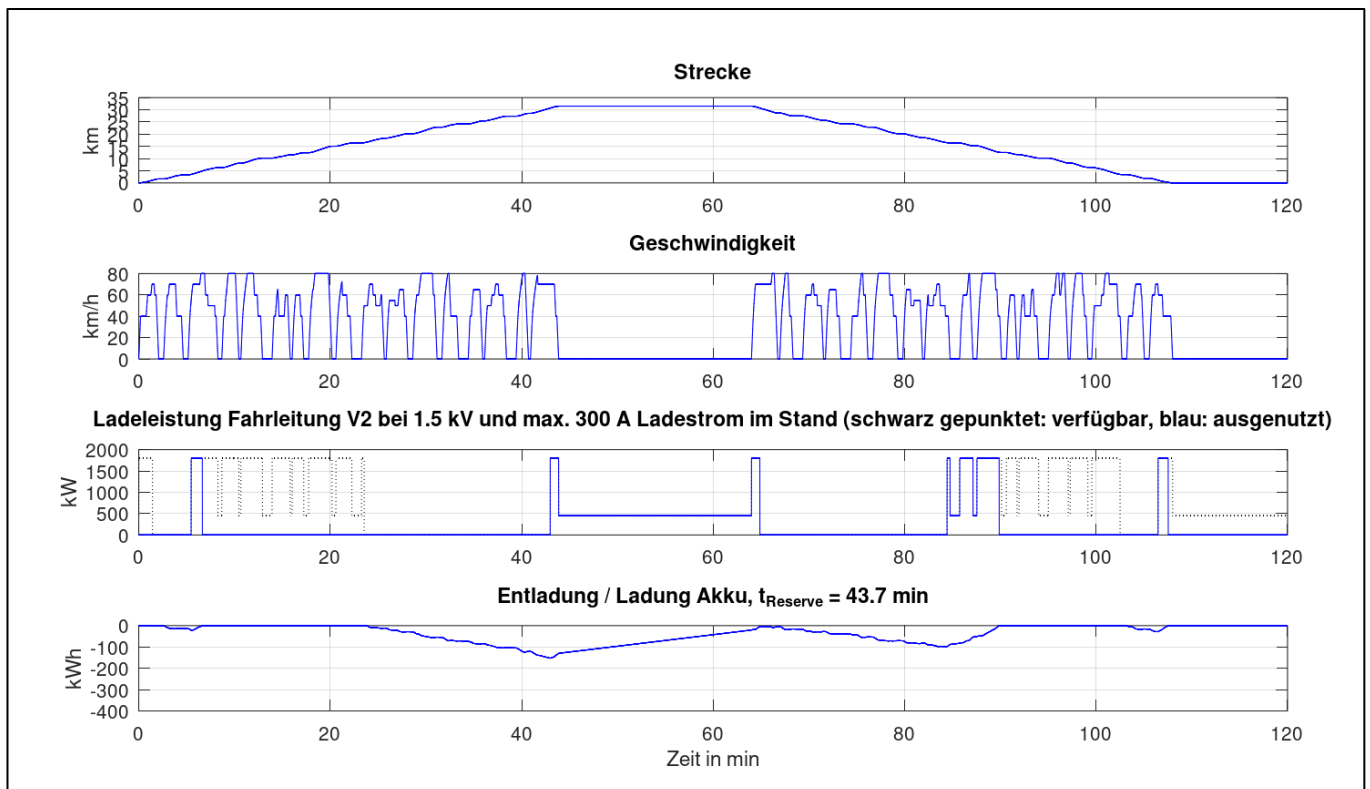


Abbildung 13: Akkudimensionierung Variante 2 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 153 kWh

Die oben erwähnte Variation der Oberleitungsabschnitte hat keinen signifikanten Einfluss auf die Akkudimensionierung, da für die entsprechende Leistungsvorhaltung Akkus mit der gleichen Dimensionierung vorzusehen sind.

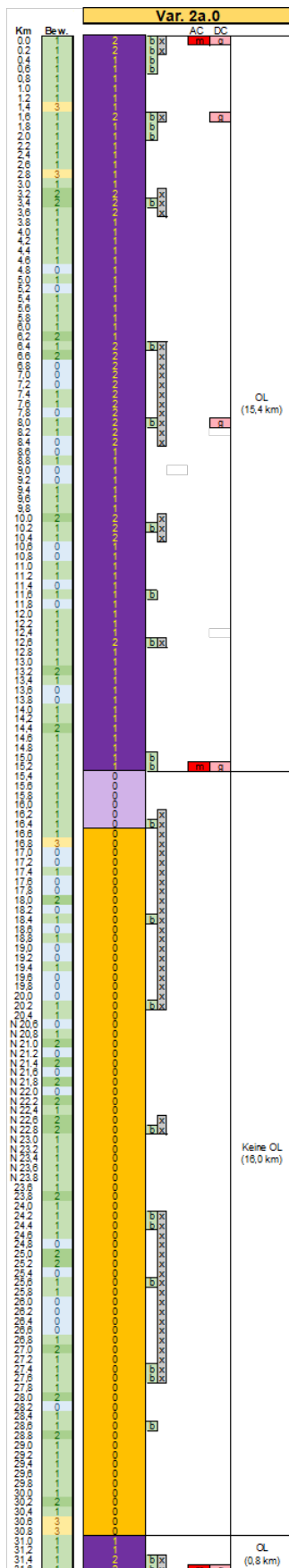
Optimierungsvariante 2a und Zusatzvarianten

Die nachfolgenden Unterkapitel zeigen mögliche Varianten einer weiterer Hybrid-Lösung mit unterschiedlichen Oberleitungs-Abschnitten, aufbauend auf Variante 2.

Variante 2a repräsentiert eine direkte Weiterentwicklung von Variante 2. Nach einer eingehenderen Untersuchung der Machbarkeit der Oberleitung auf einzelnen Abschnitten, wurde nach der Neubewertung die Lücke zwischen Rotholz und Strass geschlossen.

Variante 2d ähnelt hinsichtlich der notwendigen Akkudimensionierung bereits Variante 3.

4.6.3.1 Variante 2 – Optimierungsvariante 2a



Bei Variante 2a ist etwa die Hälfte der Bahnstrecke mit Oberleitung ausgestattet. Die Oberleitung dient zum Bereitstellen der direkt benötigten Traktionsenergie, sowie zum Laden der Traktionsakkus.

Variante 2a.0

Der erste Oberleitungsabschnitt ist grundsätzlich vom Bf. Mayrhofen bis zum Bf. Ried vorgesehen (Var. 2a.0). Aus betrieblichen Gründen kann die Realisierung bis zum nächsten Bahnhof mit Fixhalt in Kaltenbach sinnvoll sein. So kann ein klarer Zeitpunkt und Ort für den Anlegevorgang (Stromabnehmer – Fahrleitung) festgelegt und damit das Fehlerrisiko minimiert werden. Es ist keine Sicherheits-OL-Strecke für den Anlegevorgang nötig. Das Anfahren kann unter Fahrleitung und damit mit höherem Wirkungsgrad erfolgen. Am Ende der Bahnstrecke ist vor dem Bahnhof Mayrhofen ein verlängerter Ladeabschnitt notwendig, um einen ausreichenden Ladezustand für das Befahren der Oberleitungslücke sicherzustellen.

Länge der Strecke mit Oberleitung, Var. 2a.0: ca. 16200 m

Anteil an Gesamtlänge, Var. 2a.0: 50,3 %

Länge der Oberleitung (inkl. zweigleisiger Abs.), Var. 2a.0: ca. 20800 m

Oberleitungsabschnitte Var. 2a.0

- 1) km 0 – km 15,4 (15,4 km): Bf. Jenbach bis Bf. Ried oder Bf. Kaltenbach (nächster Fixhalt)
- 2) km 31,0 – km 31,6 (0,8 km): ab nach den beiden APG-Hochspannungsleitungen bis Bf. Mayrhofen

Akku-Abschnitt Var. 2a.0

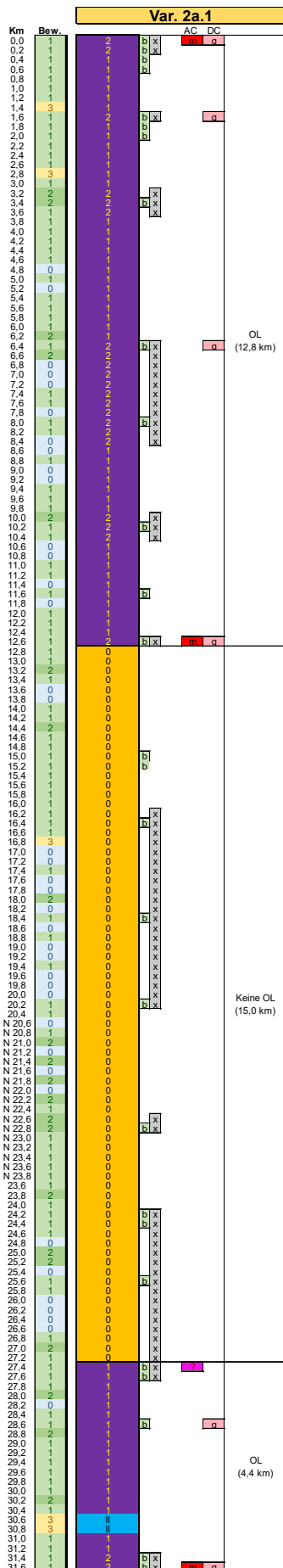
- 1) km 15,4 – km 30,8 (16,0 km): Bf. Ried bis vor Mayrhofen

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen Var. 2a.0

Tabelle 18: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 2a

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach	UW MS	5000	GUW	1400
km 1,6	Rotholz			GUW	1600
km 8,0	Gagering			GUW	1600
km 15,2	Ried	UW MS	5000	GUW	1600
km 31,6	Mayrhofen	UW MS	5000	GUW	1600

Die Bahnstromversorgung kann durch Gleichrichterunterwerke 25kV(AC)/1,5kV(DC) oder 25kV(AC)/15kV(AC) Mittelspannungs-Lade-Umrichter erfolgen. Sie dient der Aufladung der Akkus und des



Fahrbetriebs auf den Oberleitungsabschnitten. Tabelle 16 zeigt, konzeptionell, Standorte und Grobdimensionierung der Unterwerke.

Erweiterbarkeit

Für den Fall eines späteren Vollausbaus der Oberleitung entlang der gesamten Bahnstrecke könnte die Oberleitungslücke zwischen Ried/Kaltenbach und Mayrhofen geschlossen werden. Hinsichtlich der Bahnstrominfrastruktur käme dann ein Anschluss, zur Versorgung der gesamten Strecke, an den 110 kV Netzknoten in Zell am Ziller in Frage. Die existierenden Mittelspannungs-Unterwerke können dann als Notunterwerke für die Versorgung im Fall von Streckenstörungen dienen.

Variante 2a.1

Für einen sicheren Betrieb mit dem Akku der Dimensionierung von Variante 2 sollte der Streckenanteil ohne Oberleitung generell nicht mehr als 50 % betragen.

Grundsätzlich kann die Lücke in der Oberleitung verschoben werden. Je mittiger sie sich befindet, desto höher ist die Fahrplanstabilität hinsichtlich kurzer Wendezeiten in den Endbahnhöfen.

Länge der Strecke mit Oberleitung, Var. 2a.1: ca. 17200 m

Anteil an Gesamtlänge, Var. 2a.1: 53,4 %

Länge der Oberleitung (inkl. zweigleisiger Abs.), Var. 2a.1: ca. 21800 m

Oberleitungsabschnitte Var. 2a.1

- 1) km 0,0 – km 12,8 (12,8 km): Bf. Jenbach bis Bf. Uderns (Bedarfshalt)
- 2) km 27,4 – km 31,6 (4,4 km): Bf. Ramsau bis Bf. Mayrhofen

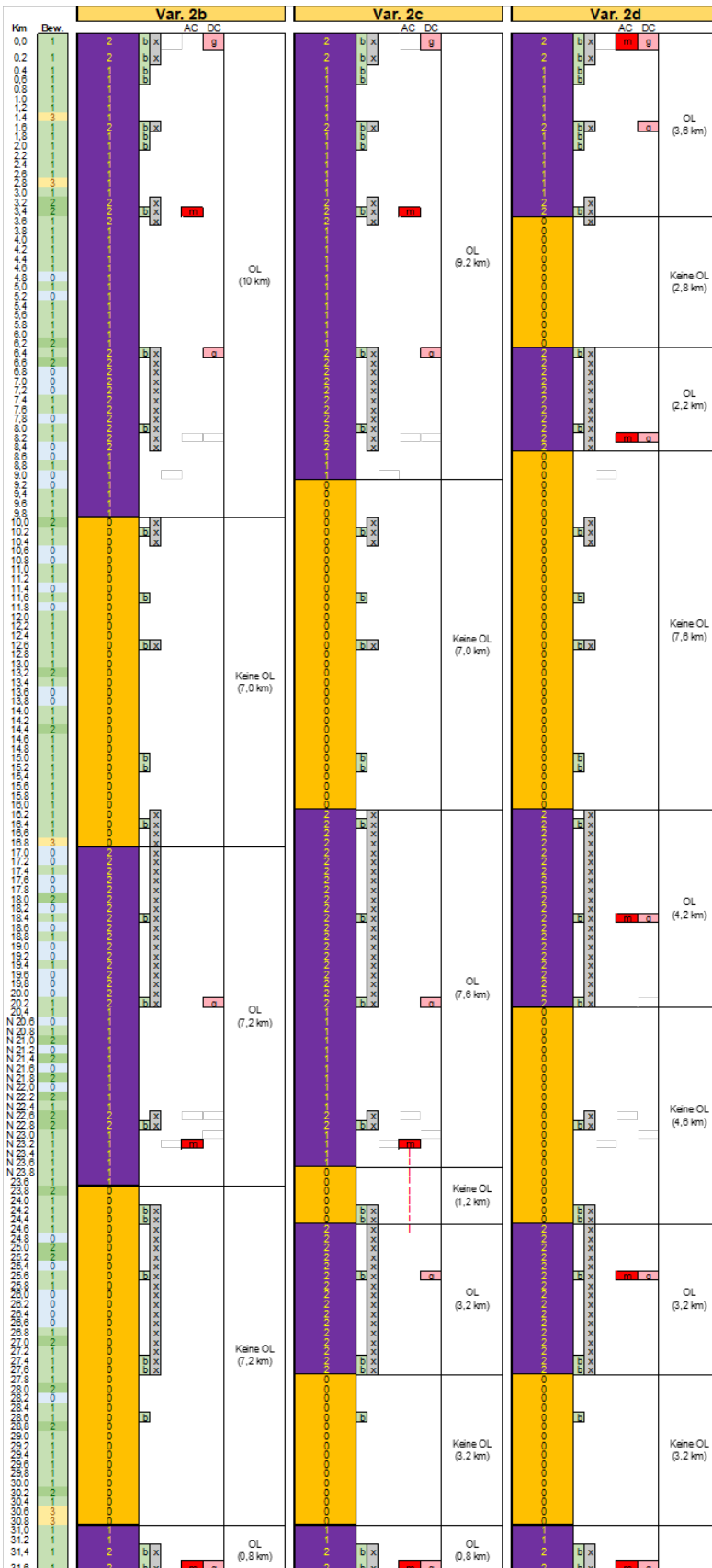
Akku-Abschnitt Var. 2a.1

- 2) km 12,8 – km 27,4 (15,0 km): Bf. Uderns bis Bf. Ramsau

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen Var. 2a.1

Ev. kann ein weiteres Unterwerk für die redundante Versorgung des südlichen OL-Abschnitts in Uderns vorgesehen werden.

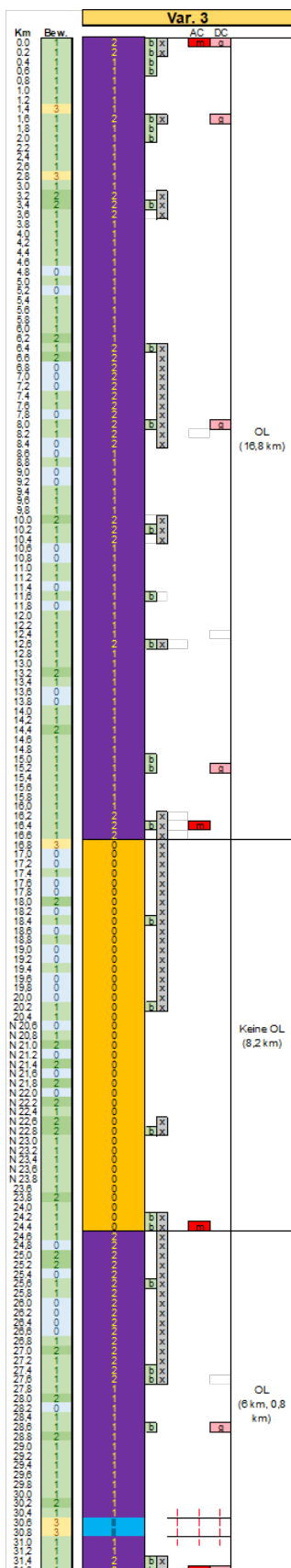
4.6.3.2 Variante 2 – Zusatzvarianten



Ausgehend von Variante 2 wurden, konzeptionell, weitere Möglichkeiten mit unterschiedlichen Oberleitungsstrecken erörtert. Auf Basis der Berechnung von Variante 2 können diese Zusatzvarianten generell in Betracht gezogen werden. Der Anteil der Strecke mit Oberleitung ist vergleichbar. Grundsätzlich ausschlaggebend, für die betriebliche Realisierbarkeit mit dem Akku der Variante 2, ist die längste Lücke in der Oberleitungsstrecke. Die Varianten 2b – 2d können Vorteile hinsichtlich des baulichen Ablaufs haben. Stärkere Segmentierung der Oberleitungsstrecke hat aber höheren Aufwand bei der AC-Bahnstromversorgung zu Folge, da mehr Unterwerke erforderlich sind, die bei einem späteren möglichen Vollausbau der Oberleitung nicht mehr notwendig sind. Bei einer DC-Stromversorgung ist dieser Aspekt nicht so gravierend, da ohnehin in bestimmten Abständen Unterwerke entlang der Strecke notwendig sind. Die DC-System-Varianten sind jedoch mit der Unsicherheit der Realisierung hinsichtlich der Streustromisolierung verbunden.

Grundsätzlich ist bei den Varianten 2b - 2d daher, auch bei möglichen Vorteilen in der Realisierung, mit technischem und finanziellem Mehraufwand und Unsicherheiten im Vergleich zu Variante 2a zu rechnen. Diese Varianten werden daher zu Gunsten der Variante 2a nicht weiterverfolgt.

4.6.4 Variante 3 – Akku-Hybrid mit erweiterter Oberleitungselektrifizierung



Variante 3 stellt ein Szenario mit erweitertem Oberleitungsausbau dar. Weite Teile der Strecke werden elektrifiziert, Zwei Teile, die sich an mit Kategorie 3, bzw. Kategorie 2 bewerteten Abschnitten orientieren, werden ausgespart und mit Akku befahren. Die beiden Abschnitte unter den Hochspannungsleitungen bei km 30,6 und km 30,8 werden leistungslos befahren.

Länge der Strecke mit Oberleitung: 24000

Anteil Oberleitung an Gesamtlänge: 74,5 %

Länge Oberleitung (inkl. zweigleisiger Abschnitte): ca. 32400 m

Oberleitungsabschnitte

- 1) km 0,0 – km 16,8 (16,8 km): Bf. Jenbach bis Kaltenbach
- 2) km 24,6 – km 31,6 (6,8 km): nach Zell am Ziller bis Bf. Mayrhofen

Akku-Abschnitt

- 1) km 16,8 – km 24,6 (8,2 km): Kaltenbach bis nach Zell am Ziller

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen

Die Bahnstromversorgung kann durch 25kV(AC)/1,5kV(DC) Gleichrichterunterwerke oder 25kV(AC)/1,5kV(DC) Mittelspannungs-Umrichter erfolgen. Sie dient der Aufladung der Akkus und des Fahrbetriebs auf den Oberleitungsabschnitten. Tabelle 19 zeigt, konzeptionell, mögliche Standorte und die Grobdimensionierung der Unterwerke.

Tabelle 19: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 3

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach	UW MS	5000	GUW	1400
km 1,6	Rotholz			GUW	1600
km 8,2	Gagering			GUW	1600
km 15,2	Ried			GUW	1600
km 16,4	Kaltenbach	UW MS	5000		
km 24,4	Zell	UW MS	5000		
km 28,6	Bichl			GUW	1600
km 31,6	Mayrhofen	UW MS	5000	GUW	1600

Akkudimensionierung

Bei Elektrifizierungsvariante 3 (Abbildung 14) wird der Akku in den verbleibenden Elektrifizierungslücken um maximal 77 kWh entladen. Die sich daraus ergebenden Nennkapazitätswerte von 140 kWh erfordert einen Akku, der nicht mehr in der Lage ist, die erforderliche Antriebsleistung vollumfänglich bereit zu stellen. Dies wird bei der Wahl der erforderlichen Akku-Nennkapazität nachfolgend Kap. 4.7 berücksichtigt. Die Reservezeiten sind tendenziell zu hoch berechnet, da die angesetzte Ladeleistung möglicherweise von den kleineren Akkus nicht mehr ertragen werden kann. Aber auch bei einer geringeren Ladeleistung werden die Ladezeiten bei diesen Varianten deutlich kürzer und damit unkritischer als bei Variante 1 und 2 sein.

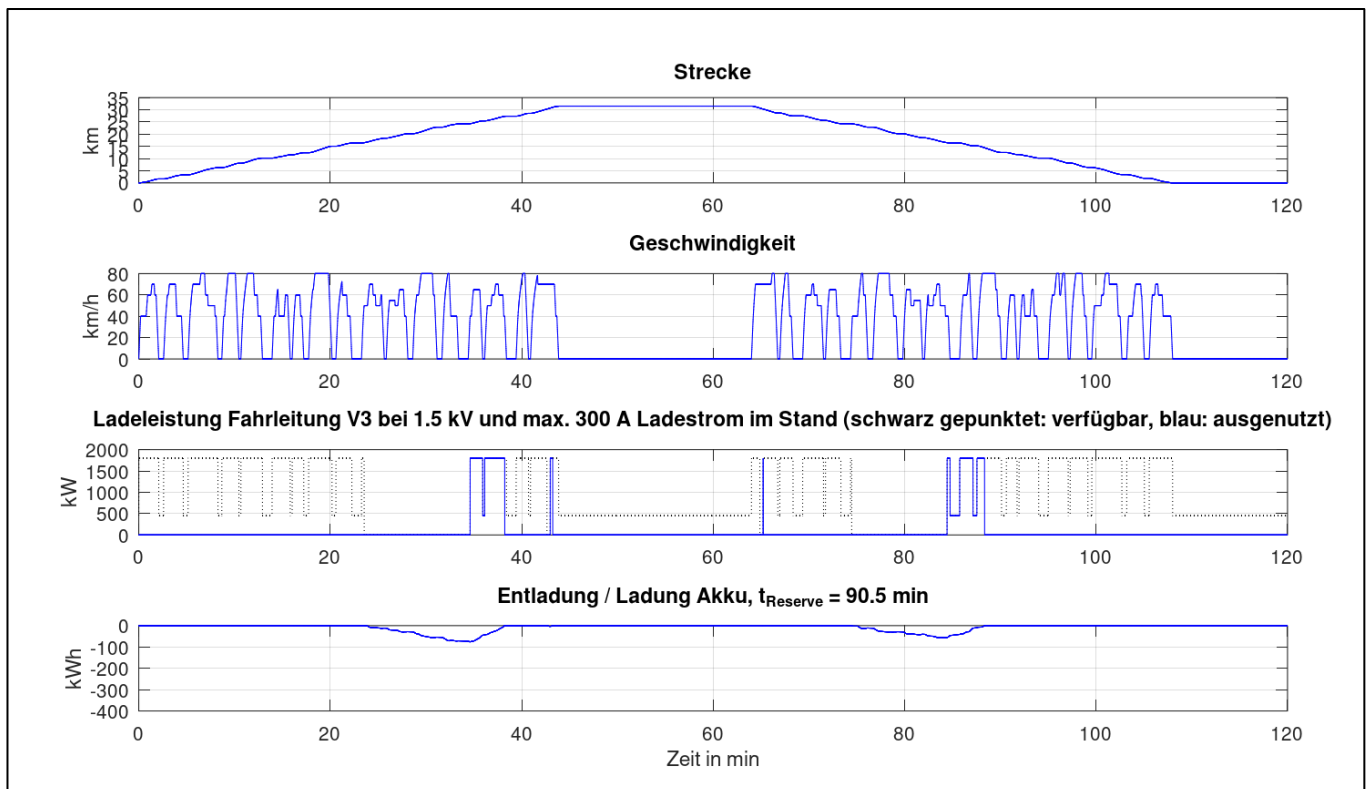
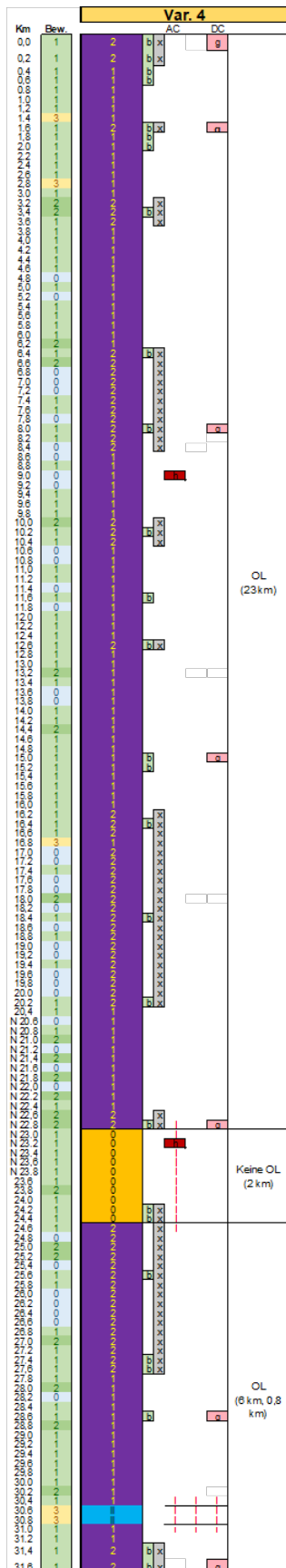


Abbildung 14: Akkudimensionierung Variante 3 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 77 kWh

4.6.5 Variante 4 – Akku-Hybrid mit hohem Oberleitungsanteil



Variante 4 stellt die letzte Stufe der Variation vor dem Vollausbau dar. Es bleibt nur ein kleiner Teil ohne Oberleitung welcher mit einem Akku geringer Kapazität befahren wird. Die beiden Abschnitte unter den Hochspannungsleitungen bei km 30,6 und km 30,8 werden leistungslos befahren.

Länge der Strecke mit Oberleitung: ca. 30200 m

Anteil an Gesamtlänge: 93,8 %

Länge der Oberleitung (inkl. zweigleisiger Abschnitte): ca. 42400 m

Oberleitungsabschnitte

- 1) km 0,0 – km 23,0 (23,0 km): Bf. Jenbach bis Bf. Rohrberg
- 2) km 24,6 – km 31,6 (6,8 km): nach Zell am Ziller bis Bf. Mayrhofen

Akku-Abschnitt

- 1) km N 23,0 – km 24,6 (2 km): Bf. Rohrberg bis Zell am Ziller

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen

Die Bahnstromversorgung kann durch 25kV(AC)/1,5kV(DC) Gleichrichterunterwerke oder 25kV(AC)/15kV(AC) Mittelspannungs-Umrichterwerke und 110kV(AC)/15kV(AC) Umspann-/Umrichterwerke erfolgen. Tabelle 16 zeigt, konzeptionell, Standorte und Grobdimensionierung der Unterwerke.

(*) Der Hochspannungs-Standort in Fügen stellt eine örtlich redundante Versorgung her, die aber mit hohen Kosten verbunden und nicht zwingend erforderlich ist.

Tabelle 20: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 4

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach			GUW	1400
km 1,6	Rotholz			GUW	1600
km 8,0	Gagering			GUW	1600
km 9,0	Fügen	UW/US HS (*)	12000	GUW	1600
km 15,0	Ried			GUW	1600
km N 22,8	Rohrberg			GUW	1600
km N 23,0	Rohrberg	UW/US HS	12000		
km 28,6	Bichl			GUW	1600
Km 31,6	Mayrhofen			GUW	1400

Beim Umspannwerk in Fügen besteht grundsätzlich die Möglichkeit zum Netzanschluss an das 110 kV Netz, allerdings muss eine zusätzliche GIS-Schaltanlage errichtet werden.

Akkudimensionierung

Erwartungsgemäß ist die maximale Entladung in den verbleibenden Elektrifizierungslücken der Elektrifizierungsvarianten 4 (Abbildung 15) nochmals geringer und beträgt lediglich 23 kWh entladen. Wird daraus analog zu den vorherigen Varianten eine Nennkapazität abgeleitet (41 kWh), kann der Akku nur einen Bruchteil der erforderlichen Leistung bereitstellen. Dies wird bei der Wahl der erforderlichen Akku-Nennkapazität nachfolgend in Kap. 4.7 berücksichtigt.

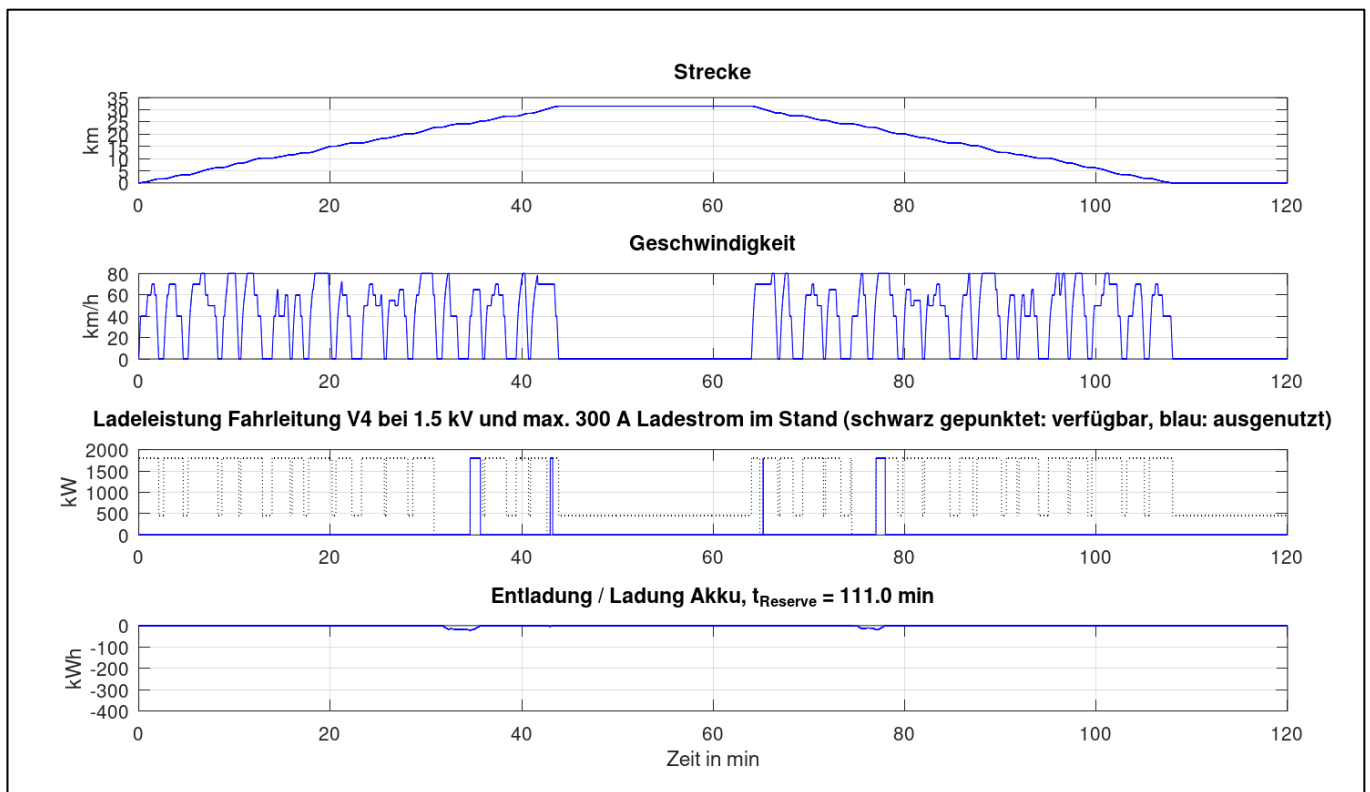
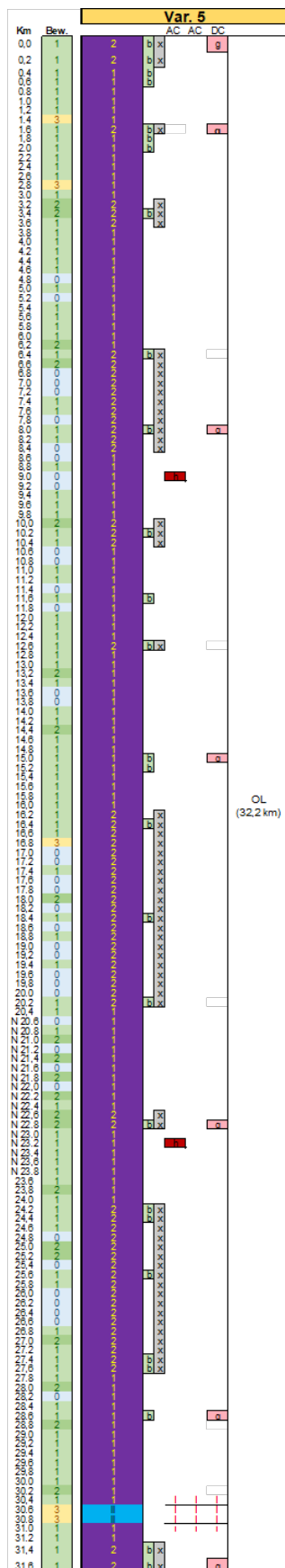


Abbildung 15: Akkudimensionierung Variante 4 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 23 kWh

4.6.6 Variante 5 – Vollelektrifizierung per Oberleitung mit leistungslosen Abschnitten



Die beiden Abschnitte (zusammenhängend ca. 400m) unter den Hochspannungsleitungen bei km 30,6 und km 30,8 werden leistungslos befahren.

Länge der Strecke mit Oberleitung: ca. 32200 m

Anteil an Gesamtlänge: 100 %

Länge der Oberleitung (inkl. zweigleisiger Abschnitte): ca. 44600 m

Oberleitungsabschnitt

- 1) km 0,0 – km 31,6 (32,2 km): Jenbach bis Mayrhofen

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen

Die Bahnstromversorgung kann durch 25kV(AC)/1,5kV(DC) Gleichrichterunterwerke oder 110kV(AC)/15kV(AC) Umspann-/Umrichterwerke erfolgen. Sie dient der Aufladung der Akkus und des Fahrbetriebs auf den Oberleitungsabschnitten. Tabelle 16 zeigt, konzeptionell Standorte und Grobdimensionierung der Unterwerke.

(*) Der Hochspannungs-Standort in Fügen stellt eine örtlich redundante Versorgung her, die aber mit hohen Kosten verbunden und nicht zwingend erforderlich ist.

Tabelle 21: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 5

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach			GUW	1400
km 1,6	Rotholz			GUW	1600
km 8,0	Gagering			GUW	1600
km 9,0	Fügen	UW/US HS (*)	12000	GUW	1600
km 15,0	Ried			GUW	1600
km N 22,8	Rohrberg			GUW	1600
km N 23,0	Rohrberg	UW/US HS	12000		
km 28,6	Bichl			GUW	1600
Km 31,6	Mayrhofen			GUW	1400

Der Anschluss an das 110 kV Netz am Netzknoten Zell am Ziller ist möglich und war auch in der Vergangenheit schon vorgesehen. Durch die Dimensionierung der vorhandenen Schaltanlage sind hier zur Anbindung per Transformator und ev. Umrichter nur zusätzliche Schalt- und Abgangsfelder notwendig. Hinsichtlich der Energiekosten wird die Möglichkeit der Energie Rückspeisung erörtert.

Akkudimensionierung

Das Durchfahren der beiden direkt benachbarten, leistungslosen Abschnitte würde einen Akku um maximal 4 kWh entladen (Abbildung 16). Da die leistungslosen Abschnitte in beiden Fahrtrichtungen im Bereich der Fahrt in Beharrung befinden, wurde mit dem Auftraggeber vereinbart, dass für diese Abschnitte kein Akku erforderlich ist, sondern diese mit leistungsreduzierten Hilfsbetrieben durchrollt werden können. Der Streckenabschnitt hat eine Längsneigung von ca. 15 ‰. Sollte ein Fahrzeug unerwartet in dem Bereich zu stehen kommen, kann es in den nächsten Fahrleitungsabschnitt mit elektrischer Leistung rollen.

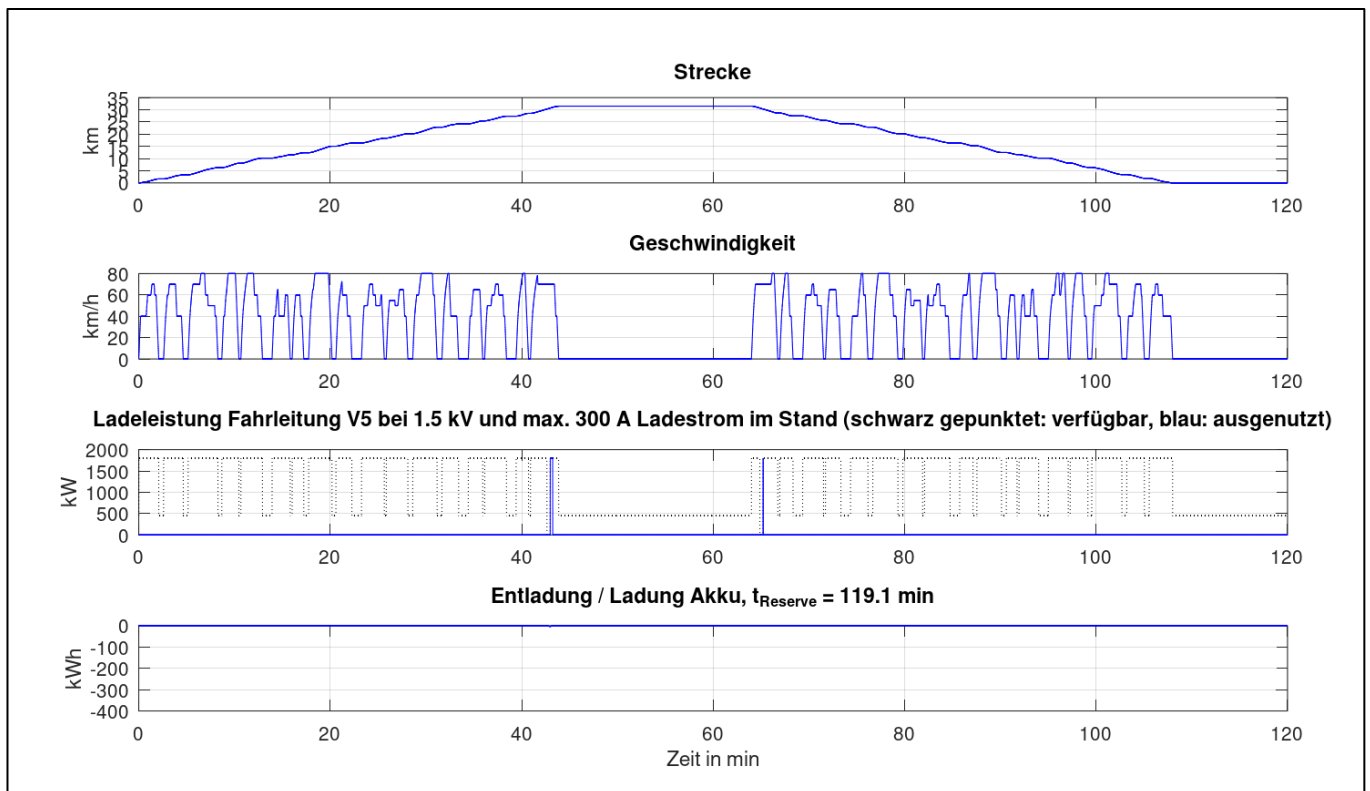
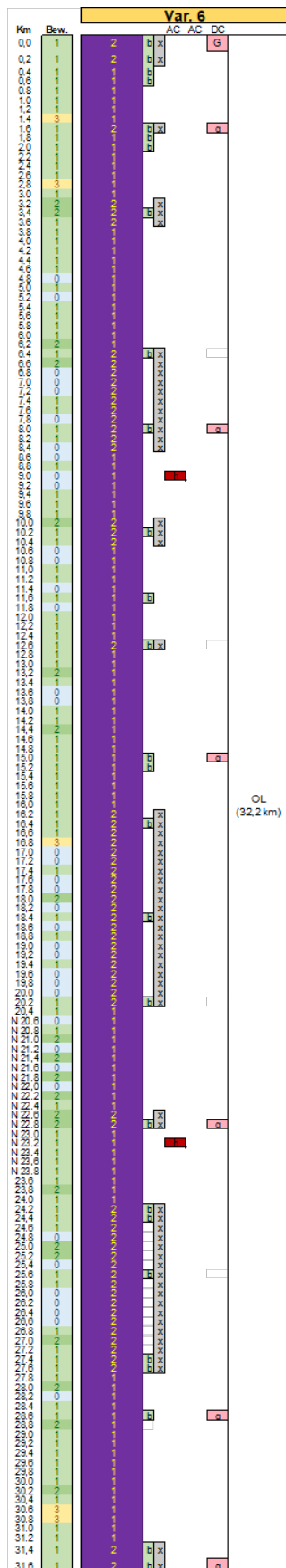


Abbildung 16: Akkudimensionierung Variante 5 – 1,5 kV DC – maximaler Entladehub 4 kWh

4.6.7 Variante 6 – Vollelektrifizierung per Oberleitung



Variante 6 stellt die Vollelektrifizierung mit Oberleitung dar. Die beiden Hochspannungsleitungen bei km 30,6 und km 30,8 werden höher gesetzt.

Länge der Strecke mit Oberleitung: ca. 32200 m

Anteil an Gesamtlänge: 100 %

Länge der Oberleitung (inkl. zweigleisiger Abschnitte): ca. 44600 m

Oberleitungsabschnitt

- 1) km 0,0 – km 31,6 (32,2 km): Jenbach bis Mayrhofen

Energieversorgung und Ladeeinrichtungen

Die Bahnstromversorgung kann durch 25kV(AC)/1,5kV(DC) Gleichrichterunterwerke oder 110kV(AC)/15kV(AC) Umspann-/Umrichterwerke erfolgen. Sie dient der Aufladung der Akkus und des Fahrbetriebs auf den Oberleitungsabschnitten. Tabelle 16 zeigt, konzeptionell Standorte und Grobdimensionierung der Unterwerke.

(*) Der Hochspannungs-Standort in Fügen stellt eine örtlich redundante Versorgung her, die aber mit hohen Kosten verbunden und nicht zwingend erforderlich ist.

Tabelle 22: Bahnstromversorgungsinfrastruktur, Variante 6

Km	Ort	AC (15 kV 50 Hz)		DC (1,5 kV)	
		Unterwerk	P _{dim} in kVA	Unterwerk	P _{dim} in kVA
km 0,0	Jenbach			GUW	1400
km 1,6	Rotholz			GUW	1600
km 8,0	Gagering			GUW	1600
km 9,0	Fügen	UW/US HS (*)	12000	GUW	1600
km 15,0	Ried			GUW	1600
km N 22,8	Rohrberg			GUW	1600
km N 23,0	Rohrberg	UW/US HS	12000		
km 28,6	Bichl			GUW	1600
Km 31,6	Mayrhofen			GUW	1400

Der Anschluss an das 110 kV Netz am Netzknoten Zell am Ziller ist möglich und war auch in der Vergangenheit schon vorgesehen. Durch die Dimensionierung der vorhandenen Schaltanlage sind hier zur Anbindung per Transformator und ev. Umrichter nur zusätzliche Schalt- und Abgangsfelder notwendig.

Variante 6 sieht, als Maximalausbaustufe aller technischen Möglichkeiten, die Möglichkeit der Energie-Rückspeisung vor.

Akkudimensionierung

Entsprechend der Definition dieser Variante ist kein Akku erforderlich und vorgesehen.

4.7 Ermittelte minimale Akkugröße

In Tabelle 23 sind die gewählten Nennkapazitäten für beide Fahrzeugkonzepte und die Elektrifizierungsvarianten zusammengefasst. Bei Variante 1 ist die erforderliche Kapazität maßgeblich. Bei Variante 2 ist die Lade/Entladerate C maßgeblich, die mit Rücksicht auf die Akkulebensdauer in diesem Fall auf C=5 gesetzt wird. Für die maximale Traktionsleistung am Rad von 1400 kW beim 4-Teiler muss der Akku eine elektrische Leistung von 1600 kW abgeben, woraus sich mit C=5 eine Nennkapazität von 320 kWh ergibt. Da bei den Varianten 3 und 4 der maximale Entladehub bezogen auf die gewählte Kapazität deutlich kleiner als bei den Varianten 1 und 2 ist, wird angenommen, dass der Akku bei Beschleunigungsvorgängen kurzzeitig mit C=7 belastet werden kann, wodurch sich eine erforderliche Kapazität von 230 kWh ergibt. Eine Reduktion der Traktionsleistung im Akkubetrieb ist bei den Varianten 1 bis 4 nicht akzeptabel, da dies unweigerlich zu einer Fahrzeitverlängerung führt, wodurch die Fahrplanreserve und die Fahrplanstabilität sinken.

Tabelle 23: Gewählte Akku-Nenn-Kapazität für die verschiedenen Elektrifizierungsvarianten

Elektrifizierungs-variante	4-Teiler				3-Teiler			
	maximaler Entladehub [kWh]	min. Nenn-Kapazität [kWh]	gewählte Kapazität [kWh]	Masse Akku (ca.) [t]	maximaler Entladehub [kWh]	min. Nenn-Kapazität [kWh]	gewählte Kapazität [kWh]	Masse Akku (ca.) [t]
1	301	548	550	11.3	226	411	415	8.5
2	153	278	320	6.6	115	208	240	4.9
3	77	140	230	4.7	58	105	175	3.6
4	23	41	230	4.7	17	31	175	3.6
5	Kurze Lücken erfordern keinen Traktionsakku							
6	kein Akku erforderlich							

Für den 3-Teiler beträgt die gewählte Nennkapazität jeweils 75 % vom Wert für den 4-Teiler. Die ermittelten Akku-Nennkapazitäten werden nachfolgend für die Ermittlung der Akkumasse und der Akkukosten für die einzelnen Varianten verwendet. Bei einer Fahrzeugausschreibung sollte die Akkudimensionierung dem Fahrzeughersteller überlassen werden und auf Basis der durch den Besteller vorgegebenen Anforderungen erfolgen, damit der Fahrzeughersteller auch die Lebensdauer der Akkus garantieren kann.

Auch wenn LTO-Akkus die doppelte Masse und einen deutlich höheren Preis pro kWh haben als NMC-Akkus, sind sie besser geeignet für Anwendungen, bei denen Akkus mit begrenzter Nennkapazität hohe Leistungen aufbringen oder aufnehmen sollen und viele Zyklen ertragen sollen. Aus diesem Grund wird nachfolgend nur eine Ausführung mit LTO-Akkus betrachtet.

Die Akkus in Tabelle 23 sind überschlägig so dimensioniert, dass ein Umlauf maximal die Schädigung eines Referenzzyklus beträgt, so dass von ABB angegeben Lebensdauer von 40'000 Zyklen [8] vorausgesetzt werden kann. Der Einfluss der kleinen Ladehöbe durch Rekuperation der Bremsenergie

auf die Lebensdauer wird dabei als untergeordnet eingestuft. Wird Zielfahrplan mit 4-Teilern gefahren, ergeben sich pro Jahr bei 12251.5 Umläufen und 6 Fahrzeugen pro Fahrzeug 2042 Referenzzyklen, so dass die Grenze von 40'000 Zyklen theoretisch erst nach 19,6 Jahren erreicht wird und die anvisierte Lebensdauer von 15 Jahren möglich ist. Diese überschlägige Abschätzung der Akkulebensdauer ersetzt nicht den Nachweis und die Garantie der tatsächlichen Lebensdauer über 15 Jahre durch den Fahrzeughersteller und muss in der Fahrzeugausschreibung gefordert werden.

4.8 Energiebedarf

4.8.1 Energiebedarf Fahrzeug ab Fahrleitung

Auf Basis des Traktionsenergiebedarfs für das Fahrzeug mit 160 t Masse aus Tabelle 14 wird der Energiebedarf proportional zur Fahrzeugmasse umgerechnet. Die Fahrzeugmassen ergeben sich aus der Masse des Basisfahrzeug (V6 – 1,5 kV DC) und der Zusatzmasse für Transformator und Hochspannungseinrichtung aus Tabelle 12 sowie der Akkumasse aus Nennkapazität und spezifischem Akkugewicht aus Tabelle 13 und sind in Tabelle 24 aufgeführt.

Tabelle 24: Annahme Fahrzeugmasse für die einzelnen Varianten und Wert bei 40% Beladung für Energieberechnung

Elektrifizierungs- variante	Masse für 3-Teiler [t]			Masse für 4-Teiler [t]		
	leer	maximal beladen	40% Auslastung	leer	maximal beladen	40% Auslastung
V1 - 1.5 kV DC	95.5	122.5	106.3	127.3	163.3	141.7
V1 - 15 kV AC	98.5	125.5	109.3	130.8	166.8	145.2
V2 - 1.5 kV DC	91.9	118.9	102.7	122.6	158.6	137.0
V2 - 15 kV AC	94.9	121.9	105.7	126.1	162.1	140.5
V3 - 1.5 kV DC	90.6	117.6	101.4	120.7	156.7	135.1
V3 - 15 kV AC	93.6	120.6	104.4	124.2	160.2	138.6
V4 - 1.5 kV DC	90.6	117.6	101.4	120.7	156.7	135.1
V4 - 15 kV AC	93.6	120.6	104.4	124.2	160.2	138.6
V5 - 1.5 kV DC	87.0	114.0	97.8	116.0	152.0	130.4
V5 - 15 kV AC	90.0	117.0	100.8	119.5	155.5	133.9
V6- 1.5 kV DC	87.0	114.0	97.8	116.0	152.0	130.4
V6 - 15 kV AC	90.0	117.0	100.8	119.5	155.5	133.9

Die Berechnung des Energiebedarfs erfolgt in mehreren Schritten für einen zweistündigen Umlauf:

1. Skalierung des Traktionsenergiebedarfs am Rad und der rekuperierbaren Energie aus Tabelle 14 entsprechend der jeweiligen Masse des Fahrzeugs bei 40% Beladung. Dies entspricht etwa der mittleren Auslastung im Fernverkehr und ist für den Nahverkehr eher eine konservative Annahme.

2. Umrechnung des Traktionsenergiebedarfs entsprechend der Wirkungsgrade aus Tabelle 10 auf den Energiebedarf ab Zwischenkreis.
3. Umrechnung der rekuperierten Energie entsprechend der Wirkungsgrade aus Tabelle 10 auf Einspeisung in den Zwischenkreis nach Speicherung im Akku, wobei konservativ angenommen wird, dass nur in 75 % der Fälle die Rekuperation der Bremsenergie möglich ist.
4. Bei den Varianten 5 und 6 wird lediglich der Eigenbedarf der Hilfsbetriebe beim Bremsen mit Bremsenergie versorgt. Für die Varianten 5 und 6 wird zusätzlich die in die Fahrleitung zurückgespeiste Energie ermittelt.
5. Berechnung der Energieentnahme der Hilfsbetriebe aus dem Zwischenkreis für die Hilfsbetriebeleistung (Jahresmittel) aus Tabelle 9.
6. Ermittlung des Streckenanteils ohne Fahrleitung und Abschätzung des zeitlichen Anteils ohne Fahrleitung während eines Umlaufs. Vereinfachend wird angenommen, dass während der Fahrt der zeitliche Anteil dem Streckenanteil entspricht. Da bei allen Varianten die Endbahnhöfe mit einer planmäßig Wendezeit von in Summe 27 min pro Umlauf elektrifiziert sind, ist bei den Varianten 1 bis 5 der zeitliche Anteil ohne Fahrleitung immer kleiner als der Streckenanteil (Tabelle 25).
7. Ermittlung des Energiebedarfs pro Umlauf unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade aus Tabelle 10 zwischen Schleifleiste und Zwischenkreis und für die Zwischenspeicherung im Akku. Der Energiebedarf der Hilfsbetriebe wird entsprechend des zeitlichen Anteils von elektrifizierter und nicht elektrifizierter Strecke auf direkte Speisung und Speisung aus Akku verteilt, die Traktionsenergie nach Abzug der rekuperierten Energie entsprechend der Streckenanteile.
8. Der jährliche Energiebedarf ab Schleifleiste ergibt aus der jeweiligen Energie pro Umlauf und 12251.5 Umläufen pro Jahr für eine Flotte von 4-Teilern und 16024.0 Umläufen pro Jahr für eine Flotte aus 3-Teilern, bei denen einzelne Fahrten im Halbstundentakt mit Doppelheiten gefahren werden.

Elektrifizierungs- variante	Abschnitte ohne Fahrleitung	
	Streckenanteil	zeitlicher Anteil
1	78.9%	61.1%
2	49.7%	38.5%
3	25.5%	19.8%
4	6.2%	4.8%
5	1.2%	1.0%
6	0.0%	0.0%

Tabelle 25: Abschnitte ohne Fahrleitung pro Umlauf – zeitlicher Anteil und Streckenanteil

Den jährlichen Energiebedarf für die Flotte ab Schleifleiste listet Tabelle 26 für die einzelnen Varianten auf. Gemessen ab Schleifleiste haben die Wechselstromfahrzeuge wegen der Verluste im Trafo grundsätzlich einen etwas höheren Energiebedarf als die Gleichstromfahrzeuge, der aber durch geringere Übertragungsverluste in der Fahrleitung bei höherer Spannung und effizienteren Unterwerken

überkompensiert werden kann. Der höhere Energiebedarf pro Umlauf bei den 4-Teiler wird ziemlich genau von der höheren Umlaufanzahl der 3-Teiler ausgeglichen. Dabei ist zu beachten, dass die 3-Teiler in den Hauptverkehrszeiten in Doppeltraktion verkehren und so die 1,5-fache Kapazität gegenüber den immer einzeln verkehrenden 4-Teiler anbieten. Dem etwas höherem Jahresenergiebedarfes der Flotte von 3-Teilern gegenüber der Flotte von 4-Teilern steht somit ein besser angepasstes und im Bedarfsfall größeres Kapazitätsangebot gegenüber.

Von Variante 1 bis Variante 4 nimmt der Energiebedarf ab, da mehr Energie bei der Fahrt direkt aus der Fahrleitung bezogen werden kann, so dass die zusätzlichen Verluste durch Speichern im Akku abnehmen. Bei den Varianten 5 und 6 wird zwischen dem Energiebezug aus der Fahrleitung und der rückgespeisten Bremsenergie unterschieden. Da bei Variante 5 und 6 die Bremsenergie nicht im Fahrzeug zwischengespeichert werden kann, wird generell mehr Energie aus der Fahrleitung bezogen, aber auch ein erheblicher Teil beim Bremsen zurückgespeist, der allerdings überwiegend vom Stromnetz aufgenommen werden muss. Die getrennte Ausweisung ermöglicht die Berücksichtigung unterschiedlicher Kosten für Energiebezug und -abgabe.

Tabelle 26: Jährlicher Energiebezug der Flotte ab Schleifleiste in GWh

Jährlicher Energiebezug ab Schleifleiste in GWh	4-Teiler		3-Teiler	
	1.5 kV DC	15 kV AC	1.5 kV DC	15 kV AC
1	6.37	6.97	6.43	7.05
2	5.85	6.40	5.91	6.48
3	5.64	6.17	5.70	6.25
4	5.46	5.97	5.52	6.05
5 & 6: (Entnahme)	6.91	7.58	6.93	7.62
(Rückspeisung)	-1.50	-1.44	-1.47	-1.41

4.8.2 Energiebedarf ab Netzknoten und Energiebilanz

Der Energiebezug ab Netzknoten wird aus 4.8.1 unter Berücksichtigung der Wirkungsgradkette aus 4.4 errechnet. Die Verluste von Fahr- und Rückleitung werden über Wirkungsgrade berücksichtigt. Dabei wird der Literatur entsprechend für Wechselstrom ein Wirkungsgrad von 98 % und für Gleichstrom ein Wirkungsgrad von 90 % angesetzt. Der DC-Wirkungsgrad erscheint aber eher als am oberen Ende angesetzt. In den Varianten 0-4 wird die Bremsenergie rekuperiert und in den Akkus zwischengespeichert. Durch die Möglichkeit der Rekuperation wird der zugehörige Energiehaushalt optimiert, dies erfolgt allerdings unter der Randbedingung des Akku-bedingt höheren Fahrzeuggewichts. Für die Varianten 5 und 6 wurde, vorbehaltlich der technischen Möglichkeit, die Rückspeisung von Energie über die umgekehrte Wirkungsgradkette in das übergeordnete Stromnetz betrachtet. Tabelle 27 zeigt den jährlichen Energiebezug und die Energiebilanz mit Rückspeisung. Durch die Reduktion des bilanziellen Energiebezugs können die Energiekosten reduziert werden. Dies ist mit dem Aufwand der Herstellung der technischen Voraussetzungen für die Rückspeisung abzuwägen (siehe 4.4.2). Die Rückspeisung ist nach technischer Auskunft des Netzbetreibers voraussichtlich nur mit dem Einsatz von Umrichtern möglich. Der Energiebedarf für die Flotte für Variante 0 wurde nicht gesondert berechnet. Aufgrund der Ähnlichkeit der technischen Infrastruktur wird er jedem der Variante 1 gleichgesetzt.

Tabelle 27: Jährlicher Energiebezug / Energiebilanz ab Netzknoten

Jährlicher Energiebezug ab Netzknoten in GWh	4-Teiler		3-Teiler	
	1.5 kV DC	15 kV AC	1.5 kV DC	15 kV AC
0	7,61	7,81	7,68	7,89
1	7,61	7,81	7,68	7,89
2	6,98	7,17	7,05	7,26
3	6,73	6,91	6,81	7,00
4	6,52	6,69	6,59	6,78
5 & 6: (Entnahme)	8,25	8,49	8,27	8,53
(Rückspeisung)	-1,26	-1,28	-1,21	-1,26
Saldo	6,99	7,20	7,07	7,27

4.9 Dimensionierung der Bahnstromversorgungs-Unterwerke und Systemauswahl

Die Auslegung der Energieversorgung entsprechend der Oberleitungsabschnitte hinsichtlich des Standortes und der Leistungsfähigkeit der Unterwerke in 4.6 hat konzeptionellen Charakter. Die tatsächliche Verortung und Dimensionierung erfolgt nach einer Netzstudie zur Bahnstromversorgung und in Abstimmung mit dem Netzbetreiber. Die Dimensionierung richtet sich nach der im jeweiligen Abschnitt benötigten Traktionsleistung, der Gleichzeitigkeit der Belastung und der zu erwartenden Leistungsrampen.

Die leistungsmäßige Dimensionierung der Unterwerke erfolgt entsprechend der Belastung durch zeitgleich im Abschnitt anfahrende oder ladende Schienenfahrzeuge. Die Auslegung erfolgt nach der Maximalleistung des 3-Teilers in Doppeltraktion und auf Grundlage des Bildfahrplans. Dies stellt den Maximallastfall, der im Rahmen dieser Studie untersuchten Betriebskonfiguration dar.

Tabelle 28 weist die maximal bezogene Leistung beim Anfahren des 3- und 4-Teilers aus.

Tabelle 28: Maximaler Leistungsbedarf

	P_{max} in kW
4-Teiler	1800
3-Teiler in Doppeltraktion	2700

Für Varianten mit Abschnitten ohne Oberleitung wird davon ausgegangen, dass im Anfahrbetrieb unter Fahrleitung nicht geladen wird und daher bei den Anfahrspitzen keine Ladeleistung anfällt, da Transformator und Eingangsstromrichter sonst für diese Spitzenleistung überdimensioniert werden müssten. Das Laden der Akkus erfolgt im Stand (statisch) bzw. bei annähernd gleichmäßigem Fahrbetrieb (dynamisch). Beim Laden der Akkus im Stand weisen die Akku-Züge einen notwendigen Energiebedarf, entsprechend der Kapazität der jeweiligen Variante auf. Der notwendige Leistungsbedarf für das Laden ergibt sich aus den Zeitvorgaben des Zielfahrplans. Der Strombedarf ist abhängig vom Spannungsniveau.

Beim Betrieb des 4-Teilers in Einfachtraktion im Viertelstundentakt treten kleinere Lastspitzen auf als im für die Auslegung herangezogenen Betrieb des 3-Teilers in Doppeltraktion. Unter Berücksichtigung der Unschärfe der konzeptionellen Dimensionierung und der Überlastfähigkeit der Unterwerke kann die

vorgesehen Leistungsfähigkeit für den Betrieb mit Taktverdichtung ausreichend sein. Durch eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Bahnstrominfrastruktur im Rahmen der tatsächlichen Dimensionierung wird keine gravierende Auswirkung auf die Variantenbewertung erwartet.

Beim Ausbau der Energieversorgung für die Bahn können, bei entsprechender Dimensionierung, auch Energienutzungen für andere Mobilitätslösungen (E-Ladestationen für Busse und PKW) mitbedacht werden.

4.9.1 Gleichstrom

Tabelle 29 zeigt die konzeptionelle Dimensionierung der Gleichrichterunterwerke. Die Unterwerke werden entsprechend zweiseitig versorgter Speiseabschnitte zu 5-7 km, entlang der Oberleitungsstrecke verteilt. Die Entfernung zwischen den Unterwerken basiert auf der Erfahrung aus Vorprojekten und einer früheren Netzstudie [13] zur Elektrifizierung der Zillertalbahn (die Voraussetzungen sind weitgehend gleich geblieben). Die Bahnhofs- und Werkstätten- bzw. Remise-Bereiche der Endbahnhöfe erhalten eigene Unterwerke. Es werden Gleichrichterunterwerke der Belastungsklasse VI nach OVE EN 50329 mit der Nennspannung 1500 V DC vorgesehen.

Tabelle 29: Dimensionierung der 1,5 kV Gleichrichter-Unterwerke (GUW)

Gleichrichterunterwerk 25 kV 50 Hz 3AC / 1,5 kV DC	Bez.	Leistung in kVA (für 1 min 300% überlastbar, für 2h 150 % überlastbar)
Bahnhofsbereich	GUW	1.400
Auf der Strecke	GUW	1.600

4.9.2 Wechselstrom

Es müssen in der konzeptionellen Dimensionierung für die Elektrifizierungsvarianten Wechselstrom-Unterwerke unterschiedlicher Nenn-Scheinleistungen (Tabelle 30) vorgesehen werden. Die Leistungen erheben sich aus der Länge der Oberleitungsstrecken und der Anzahl zeitgleich im Abschnitt verkehrenden Schienenfahrzeuge. Es wird grundsätzlich eine redundante Versorgung der Oberleitungsabschnitte angestrebt. In Variante 1 sind zwei Unterwerke zum Laden und Befahren der verlängerten Ladeabschnitte in den Endbahnhöfen erforderlich. Für die Varianten 5 und 6 ist ein leistungsfähiges Unterwerk, am Standort des Netzknotens Zell am Ziller und ein mögliches weiteres bei Fügen.

Tabelle 30: Dimensionierung der 15 kV Wechselstrom Unterwerke

Unterwerk	Bez.	Leistung in kVA (kurzzeitig um ca. 20% überlastbar)
Mittelspannungs-Umrichterwerk 25 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC	UW MS	3400
Mittelspannungs-Umrichterwerk 25 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC	UW MS	5000
Hochspannungs- Umspann-/Umrichterwerk 110 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC	UW HS	12000

4.9.3 Auswahl des Bahnstromversorgungsystems

Die Realisierung einer Gleichstromversorgung ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Die Notwendigkeit der Realisierung einer wirksamen Streustromisolierung kann mit erheblichen Kosten für umfangreiche Maßnahmen am Gleiskörper inklusive Weichenanlagen verbunden sein. Eine sichere Trennung und bahnerdungstechnische Behandlung von Gleisen, die nur für Wechselstrom elektrifiziert sind, und Gleisen, die nur für Gleichstrom elektrifiziert sind, muss sichergestellt werden. Für die Einhaltung der Wendezeiten sind in Varianten mit hohem Akku-Anteil Sonderlösungen an den Ladestationen erforderlich. Gleichstromsysteme weisen aufgrund der höheren Ströme höhere Verluste und einen höheren Spannungsabfall auf, was entlang der Strecke gleichmäßig verteilte Unterwerke und ein umfangreicheres Oberleitungssystem erforderlich macht. An Fahrzeugkomponenten ist für Akku- und Akku-Hybrid-Systeme höherer Verschleiß zu erwarten.

Durch die Wahl eines Wechselstromsystems können, im Rahmen eines gemeinsamen Fahrzeugbeschaffungsprozesses und Instandhaltungskonzepts mit anderen österreichischen Privat-Schmalspurbahnen, entscheidende Synergieeffekte erzielt werden.

Aufgrund der genannten Unsicherheiten von Gleichstromsystemen für Realisierung und Betrieb und damit verbundener Unsicherheiten in den Kostenkomponenten, sowie den vorteilhaften Synergieeffekten bei Schienenfahrzeugbeschaffung und Instandhaltung bei Wechselstromzügen, werden Gleichstromsysteme für die abschließende Bewertung nicht herangezogen.

Aufgrund des zu geringen Sicherheitsabstandes beim Brückenbauwerk ASFINAG Brücke A12 bei Rotholz wird die Traktionsspannung 25 kV AC nicht weiterverfolgt. Die führt aufgrund der geringen geografischen Ausdehnung der Bahnstrecke zu keinen Nachteilen.

Die Bewertung der Varianten erfolgt ausschließlich das 15 kV 50 Hz Wechselstromsystem.

4.10 Fahrzeug: Kapazitätseinschränkung durch Platzbedarf von elektrischen Komponenten

Aufgrund der hohen Masse sollten Akkus im Fahrzeug möglichst weit unten angeordnet werden. Ideal ist dabei eine Unterfluranordnung, die aber im Widerspruch zur Anforderung eines großen Niederflurbereichs steht. Insbesondere bei Schmalspurfahrzeugen ist der als Niederflurbereich ausführbare Abschnitt zwischen den Drehgestellen bereits sehr kurz. Daher wird als worst-case-Szenario angenommen, dass für die Akkus die bereits an den Wagenübergängen beidseitig des Mittelgangs angeordneten Geräteschränke erweitert werden müssen und dabei die Akkus als schwere Komponenten im unteren Bereich und leichtere Komponenten darüber platziert werden. Über das spezifische Volumen aus Tabelle 13 und der jeweils erforderlichen Akkukapazität wird ermittelt, um welche Länge die Geräteschränke verlängert werden müssen und welchem Anteil der Fahrzeuggesamtlänge dies entspricht. Im spezifischen Volumen ist zusätzlicher Bauraum für Verdrahtung, Rahmen und Kühlmittel berücksichtigt. Da Akkupacks von verschiedenen Herstellern verfügbar sind, wird der Weg über die Bauraumabschätzung gewählt, da die Detailausführung nur vom Fahrzeughersteller geleistet werden kann. Als Bauraum für die Geräteschränke werden eine Breite von 0,9 m beidseitig des Mittelgangs und 2,5 m Höhe angenommen. Diese grobe Abschätzung soll einen Anhaltspunkt für die Kapazitätseinschränkung liefern, kann aber nicht der tatsächlichen Umsetzung durch einen Hersteller vorgreifen. Die Ergebnisse fasst Tabelle 31 zusammen.

Tabelle 31: Bauraumvolumen für die Akkus und beanspruchte Fahrzeuglänge bei beidseitigen Geräteschränke mit 0,9m Breite und 2,5 m Höhe

Elektr.- var.	4-Teiler					3-Teiler				
	Akku- Nenn- kapazität	Akku- volumen	Verlust Nutz- länge bei 72 m Fahrzeuglänge		Anzahl Sitz- plätze ⁴	Akku- Nenn- kapazität	Akku- volumen	Verlust Nutz- länge bei 54 m Fahrzeuglänge		Anzahl Sitz- plätze
	[kWh]	[m³]	[m]			[kWh]	[m³]	[m]		
1	550	9.9	2.2	3.1%	220	415	7.5	1.7	3.1%	163
2	320	5.8	1.3	1.8%	224	240	4.3	1.0	1.8%	166
3	230	4.1	0.9	1.3%	226	175	3.2	0.7	1.3%	167
4	230	4.1	0.9	1.3%	226	175	3.2	0.7	1.3%	167
5	0	0	0	0.0%	230	0	0	0	0.0%	170
6	0	0	0	0.0%	230	0	0	0	0.0%	170

Die Geräteschränke müssten insgesamt um 1 bis 3 % der Fahrzeuglänge erweitert werden. Grundsätzlich kann dies natürlich einen entsprechenden Verlust an Sitzplätzen bedeuten. Andererseits entfielen beim ursprünglichen (Wasserstoff-) Fahrzeugkonzept etwa 12 m bzw. 16 % der Fahrzeuglänge auf Geräteräume vermutlich insbesondere für die Wasserstofftanks (Abb. 38 der TU Wien Studie [1]). Bei den reinen Elektrotriebwagen der Mariazeller Bahn werden etwa 6 m bzw. 12 % der Fahrzeuglänge von Geräteräumen beansprucht (Abb. 33 der TU Wien Studie [1]). Vor diesem Hintergrund wird eine Verlängerung der Geräteräume um maximal 2.2 m als nicht extrem eingestuft: typischerweise beträgt der Sitzabstand (halber Fensterteiler) ca. 0,9 m, so dass der maximale Unterschied zwischen allen Varianten in der Kapazität bei 2+2 Bestuhlung bei etwa 8 Sitzplätzen liegt. Ohne Vorgabe einer verpflichtenden Fahrzeugkapazität und maximalen Fahrzeuglänge kann schwer bewertet werden, ob der zusätzliche Bauraum für die Akkus in der zulässigen Fahrzeuglänge ohne Kapazitätsverlust realisiert werden kann.

4.11 Differentielle Kosten

Zur monetären Beurteilung der Elektrifizierungsvarianten wurde eine differentielle Kostenbetrachtung vorgenommen. Diese umfasst die Investitions- und Betriebskosten der Schienenfahrzeuge (differenziert nach der jeweiligen Konfiguration als 4-Teiler oder 3-Teiler, Traktionsspannungssystem und Akkuausstattung), des Fahrleitungs- und Bahnstromsystems, sowie die Energiekosten für den Strombedarf.

⁴ Die Annahme von 170 Sitzplätzen für einen dreiteiligen EMU basiert (gerundet) auf dem Wert für die Variante Sz1 in Abbildung 68 der TU Wien Studie. Weiterhin wird angenommen, dass sich beim 4-Teiler die Kapazität um 60 Sitzplätze erhöht. Die Sitzplatzanzahl wird entsprechend des Verlustes an Nutzlänge um 4 Plätzen pro 0,9 m Fahrzeuglänge (halber Fensterteiler) bei den Varianten mit Akku reduziert. Diese Werte dienen ausschließlich als Bezugswert für die Angabe sitzplatzabhängiger Größen

4.11.1 Kosten Fahrzeug (inkl. Akku, Trafo) sowie Tauschkosten-Akku

Die Investitionskosten bei der Fahrzeugbeschaffung sind stark abhängig von der technischen Ausrüstung der Fahrzeuge. Die Basiskosten für DC-Zuggarnituren wurden, als mit entsprechender Unsicherheit behaftete, Typkosten mit minimaler elektrischer Ausrüstung angesetzt. Die Kosten für den 3-Teiler wurden mit etwa 85% des 4-Teilers angenommen. Tabelle 32 listet die Varianten- und Stromsystem-abhängigen Zusatzkosten auf. Alle Preisangaben werden auf Basis verfügbarer Informationen abgeschätzt. Die Zusatzkosten für die Akkus werden in % der Investitionskosten für das Basisfahrzeug angegeben. Die Wartungs- & Instandhaltungskosten werden in % angegeben, wobei 100% die Wartungskosten des Basisfahrzeugs bedeuten. Die Investitions- und die Wartungs- & Instandhaltungskosten für den 3-Teiler entsprechen etwa 75% der Kosten des 4-Teilers. Die finalen Kosten bei der Beschaffung werden jedoch am Ende erheblich von der Stückzahl und der aktuellen Marktlage beeinflusst. Die Basiskosten enthalten einen Gleichstromtriebzug für 1,5 kV Fahrdrachtspannung ohne Akku, welcher für die Elektrifizierungsvariante 6 geeignet ist. Dies stellt die in dieser Studie betrachtete Minimalvariante dar. Bei einer 15 kV AC-Variante kommen die Kosten für den Trafo dazu und bei den Varianten mit Akku die Akkukosten abhängig von der Akkukapazität.

Es wird die Anschaffung von

- 6 Stück 4-teiligen Garnituren für den Betrieb in Einfachtraktion, oder
- 10 Stück von 3-teiligen Garnituren für den teilweisen Verstärkungsbetrieb in Doppeltraktion

zu Grunde gelegt.

Tabelle 32: Kostenkomponenten des Schienenfahrzeugs aufgeteilt in Basisfahrzeug und Zusatzkosten für Trafo und Akku

Investitionskosten	4-Teiler
Zusatzkosten Transformator für AC mit Hochspannungsausrüstung in €	300.000
Zusatzkosten Akku für Variante 5 („Hilfsfahrt“) in %	3%
Zusatzkosten Akku für Variante 3 & 4 („klein“) in %	5%
Zusatzkosten Akku für Variante 2 („mittel“) in %	7%
Zusatzkosten Akku für Variante 0 & 1 („groß“) in %	12%
Wartungs- & Instandhaltungskosten	
EMU in €/Zkm	100%
BEMU, Akku klein (Variante 3 & 4) in %	149%
BEMU, Akku mittel (Variante 2) in %	152%
BEMU, Akku groß (Variante 0 & 1) in %	167%
Lebensdauer	
Lebensdauer Schienenfahrzeuge in Jahren	30
Lebensdauer Akku in Jahren	15

Für die Akkus werden als Tauschkosten nach 15 Jahren die gleichen Kosten wie für die Erstausrüstung angesetzt. Auch wenn die Akkus möglicherweise einfach getauscht und Batterieumrichter sowie das Kühlsystem weiterverwendet werden können, deren Kosten anteilig in den Investitionskosten der Akkus berücksichtigt sind und beim Tausch gespart werden können, werden als Annahme zur sicheren Seite die gleichen Kosten angesetzt, um den Fall, dass keine schnittstellengleichen Akkus verfügbar sind, und Anpassungen am Fahrzeug durchgeführt werden müssen, mit zu berücksichtigen.

Die Betriebsdauer (Lebensdauer) der Schienenfahrzeuge wird mit 30 Jahren angesetzt; entsprechend ist die einmalige Wiederbeschaffung der Fahrzeuge für den Durchrechnungszeitraum von 60 Jahren berücksichtigt. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Wiederbeschaffung wurden die Re-Investitionskosten gleich der Erst-Investition angesetzt.

Die Instandhaltungskosten der Schienenfahrzeuge und der technischen Ausrüstung für den Akkubetrieb sind nach Tabelle 32 angesetzt. Der Grundwert für einen EMU wird aus der Studie der TU Wien [1] für den 3-Teiler übernommen, auch wenn in anderen Quellen teilweise doppelte Werte genannt werden. Für den 4-Teiler wird der Wert entsprechend linear hochskaliert. Die Berechnung erfolgt nach Angaben über die erwartbare jährliche Kilometerleistung pro Garnitur in Tabelle 33. Der Ansatz ist mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet und ist stark von der zukünftigen Organisation der Wartung- und Instandhaltung abhängig.

Tabelle 33: Jährliche Kilometerleistung pro Garnitur, Quelle: VVT

Jahres-Zugkilometer	
4-Teiler (Einfachtraktion) in km	778.656
3-Teiler (z.T. in Doppeltraktion) in km	1.018.421

4.11.2 Kosten Fahrleitung

Die gesamten Investitionskosten für die Realisierung der Fahrleitung sind stark abhängig von der betrachteten Elektrifizierungsvariante. Nach dem Ergebnis der Streckenbewertung (Kapitel 3.3) ist die Realisierung einer Oberleitung auf allen Abschnitten der Strecke möglich. Die technischen Sonderlösungen im Bereich von unterfahrenen Brücken machen nur einen sehr geringen Anteil der Strecke aus, sodass durchschnittliche Kosten pro m Fahrleitung zur Anwendung kommen. Die beiden möglicherweise leistungslos zu befahrenden Abschnitte sind durch zusätzlich notwendige Installationen wie Trenner, Erdung und Vorbeiführung der Spannungsversorgung einbezogen. Einige Mittelspannungs-Freileitungen, welche die Bahntrasse kreuzen, müssen mittel Pressbohr- oder Spülbohrverfahren als Erdkabel unter der Bahntrasse hindurchgeführt werden, was je nach Elektrifizierungsvariante entsprechend einer durchschnittlichen Kostenannahme berücksichtigt ist. Die in 3.1.2 dargelegte Möglichkeit der Höherlegung von Hochspannungsfreileitungen ist mit einer groben Kostenannahme vorbehaltlich der technischen Ausführungsplanung berücksichtigt.

Die Kosten für Wartung und Instandhaltung der Fahrleitungsanlage werden als prozentueller Anteil an den Investitionskosten abgebildet. Die Summe entspricht branchentypischen Richtwerten für die jährlichen Kosten einer Lokalbahn. Die Lebensdauer der Fahrleitungsanlage ist mit 60 Jahren angesetzt. Diese wird sowohl für die Maste als auch, entsprechend der Belastung, für die Fahrleitung angesetzt. Die Aufstellung der Kostenschätzung für die Komponenten der Bahnstromversorgung kann Tabelle 34 entnommen werden. Für Wartungsarbeiten an der Fahrleitungsanlage wird ein Oberleitungsturmwagen benötigt.

Tabelle 34: Kostenkomponenten der Fahrleitung

Investitionskosten	
Oberleitung AC Hochkette in €/m	590,00
Oberleitung, leistungslos befahren in €/m	650,00
Verlegung Mittelspannungsleitung in € pro Leitung	50.000,00
Höherlegung Hochspannungsleitung in € pro Leitung	2.000.000,00
Oberleitungsfahrzeug	3.400.000,00
Wartung & Instandhaltung	
Wartungs-/Reparaturkosten Fahrleitung in % der IK	0,8
Lebensdauer	
Betriebsjahre (Lebensdauer) Fahrleitung in Jahren	60

4.11.3 Kosten Bahnstromversorgung

Die Investitionskosten der Bahnstromversorgung setzen sich, je nach Traktionsstromvariante, aus den Kosten für die benötigten Gleichstromunterwerke, Umspannwerke oder Umrichterwerke, den Kosten für die netzseitige und fahrleitungsseitige Zuleitung, sowie den Betriebskosten für die Unterwerke zusammen. Die Kosten für Umspannwerke ohne Umrichter sind wesentlich geringer, ob diese zum Einsatz kommen können, ist jedoch durch eine Netzstudie der Bahnstromversorgung und Netzberechnungen der Netzbetreibers zu untersuchen.

Die Kosten für die Zuleitungen zum Unterwerk bzw. vom Unterwerk zur Strecke sind als durchschnittliche Kosten angesetzt und beinhalten Kabel, Kabelmuffen, Kabelverlegung und Anschluss an das Unterwerk. Da die Standorte der Unterwerke für die Varianten 1-5 nicht genau spezifiziert sind, wurde auch für die Länge der Zuleitung ein Durchschnittswert angesetzt. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung der Fahrleitungsanlage wurden durch eine Schätzung der Personalkosten, des Aufwands in Personenmonaten und eines prozentuellen Anteils an den Investitionskosten, welcher den Materialeinsatz abbildet, kalkuliert. Die Lebensdauer der Unterwerke ist, bei entsprechender Wartung mit 60 Jahren angesetzt. Die Aufstellung der Kostenschätzung für die Komponenten der Bahnstromversorgung kann Tabelle 35 entnommen werden.

Tabelle 35: Kostenkomponenten der Bahnstromversorgung

	Unterwerke/Umspannwerke/Umrichterwerke	Investitions Kosten in €	Leistung in kVA
DC	Gleichrichterunterwerk (GUW) in €	1.550.000,00	1600
	Gleichrichterunterwerk, rückspeisefähig (GUW) in €	2.000.000,00	1600
	Zuleitung GUW in €/m	1.000,00	
	UW MS 25 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC in €	3.000.000,00	2500
AC	UW MS 25 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC in €	5.000.000,00	3400
	UW MS 25 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC in €	7.000.000,00	6800
	Zuleitung UW MS in €/m	1.100,00	
	US HS 110 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC in €	1.000.000,00	12000
	US HS 110 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC mit GIS Fügen in €	4.000.000,00	12000
	UW HS 110 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC in €	15.000.000,00	12000
	UW HS 110 kV 50 Hz 3AC / 15 kV 50 Hz 1AC mit GIS Fügen in €	17.000.000,00	12000
	Zuleitung UW HS in €/m	1.100,00	
	Wartung & Instandhaltung		
	Personalkosten GUW/UW (1 Person) in € pro Monat	10.000,00	
	Personenmonate O&M GUW/UW pro GUW/UW	0,05	
	Wartungs-/Reparaturkosten GUW, UW in % der IK	1,00	
	Lebensdauer		
	Betriebsjahre (Lebensdauer) Unterwerk in Jahren	60	

Die Varianten in 4.5 beinhalten unterschiedliche Redundanzniveaus in der Bahnstromversorgung. Die tatsächliche Auslegung des Systems erfolgt auf Basis einer Netzstudie. Sollten nach entsprechender Erörterung und Abwägung nach betrieblichen Aspekten Unterwerk-Standorte wegfallen könnte das zu Kostensenkungen der Varianten 2a bis 6 führen. Eine Änderung der Reihung der Varianten in der abschließenden Beurteilung ist dadurch nicht zu erwarten.

4.11.4 Energiekosten

Die Energiekosten für den Strombezug setzen sich aus den laufenden Energiebezugs- und Netzkosten, bzw. den einmaligen Netzbereitstellungskosten zusammen. Die Kosten für den Energiebezug richten sich nach dem Strompreis-Arbeitspreis. Die Netzkosten setzen sich aus arbeits- und leistungsabhängigen Netznutzungsentgelten, dem Netzverlustentgelt sowie der Elektrizitätsabgabe zusammen

Für die Ermittlung der Netz-Kosten wurden die Netzbereitstellungskosten aus 2024 herangezogen. Netzbereitstellungsentgelt und Netzentgelt sind abhängig von der Netzebene aus der, der Strom bezogen wird. Entsprechend sind diese für den Bezug aus Netzebene 3 (Hochspannung, Variante 5 und 6) geringer als für den Bezug aus Netzebene 5 (Mittelspannung, Variante 1-4). Als Arbeitspreis wurde ein mittlerer Strompreis von 12 ct/kWh herangezogen. Die Annahme eines zukünftigen Strompreises ist mit großen Unsicherheiten behaftet, daher wurde keine Strompreisentwicklung unterstellt, sondern der Strompreis bis zum Ende des Betrachtungszeitraums fortgeschrieben.

Für die Untersuchung der Rückspeisemöglichkeit ins Stromnetz wurde eine hypothetische Vergütung von 5 ct/kWh angesetzt.

Die Energiekosten wurden auf Basis des Energieverbrauchs ab Netzknoten errechnet. Die Rückspeisung ist nach technischer Auskunft des Netzbetreibers nur mit dem Einsatz von Umrichtern möglich.

4.11.5 Differentielle Kostenbetrachtung

Auf Basis der einzelnen Kostenkomponenten wurde differentielle Kostenbetrachtung zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Elektrifizierungsvarianten vorgenommen. Die Studie behandelt in erster Linie die Fahrleitungsinfrastruktur und deren Implikationen auf die Bahnstrominfrastruktur sowie mit den Elektrifizierungsvarianten verbundene Akkusysteme in den Schienenfahrzeugen. Um den Einfluss dieser Kostenkomponenten einzuordnen, wurden die Kosten der Fahrzeuge miteinbezogen. Die Kosten beinhalten die Investitions-/Reinvestitions- und Instandhaltungskosten für die Fahrzeuge, die Fahrleitungs- und Bahnstrominfrastruktur sowie die Energiekosten für den Bahnstromverbrauch. Es wurde ein Durchrechnungszeitraum von 60 Jahren herangezogen.

Sämtliche Kostenkomponenten sind mit unterschiedlich stark ausgeprägten Unsicherheiten behaftet. Die Abschätzung der Kosten für die Fahrleitungsinfrastruktur kann, aufgrund des vergleichbaren technischen Aufbaus und Erfahrungswerten aus anderen Projekten, als relativ robust angenommen werden. Die Kosten für die Bahnstrominfrastruktur weisen aufgrund des konzeptionellen Charakters größere Unsicherheiten auf. Die Kosten für Fahrzeuge und Fahrzeuginfrastruktur weisen aufgrund von teils noch wenig etablierten Komponenten und stärkerer Abhängigkeit von der Marktlage ebenfalls größere Unsicherheiten auf.

Die Personalkosten für den Schienenfahrzeugbetrieb werden nicht miteinbezogen, da sie für die Varianten 1 - 6 gleich ausfallen.

Es handelt sich um eine statische Investitionsrechnung zur Abschätzung der Größenordnungen. Nicht einbezogen sind Kapital- und Personalkosten. Um den Kalkulationsansatz unter den Komponenten konsistent zu halten, wird für die Instandhaltungskosten keine jährliche Valorisierung angenommen.

Die Kostenbetrachtung wird für den 4-Teiler aufgestellt und dargestellt. Daraus können Aussagen für den 3-Teiler abgeleitet werden.

Anteile der Kostenkomponenten an den Gesamtkosten

Es erfolgt zunächst eine Betrachtung der einzelnen Kostenkomponenten in Bezug auf die Gesamtkosten, um deren Relation darzustellen. Die Bandbreite der Relation der Kostenkomponenten der Investitionskosten über den Betrachtungszeitraum von 60 Jahren ist in Tabelle 36 dargestellt. Sie variiert infrastrukturseitig mit den unterschiedlichen Ausbaustufen der Fahrleitungs- und Bahnstrominfrastruktur. Die höchsten Infrastrukturkosten weisen die Varianten 5 und 6 mit Umrichteranlagen auf. Kann eine Realisierung mit Transformator-Unterwerken erfolgen, nähert sich der Anteil Bahnstrominfrastruktur dem unteren Ende der Bandbreite. Der größte Anteil der Investitionskosten entfällt auf die Fahrzeuge. Die Bandbreite der Kostenkomponente ergibt sich aus den unterschiedlichen Akkusystemen. Die geringsten Fahrzeugkosten weisen die Varianten 5 und 6 auf, die sie ohne Akkusystem auskommen.

Tabelle 36: Anteile der Investitionskosten an den Gesamtkosten

INVESTITIONSKOSTEN - 60 Jahre	Anteil an Gesamtkosten	
Bahnstrom	2 %	- 6,9 %
Fahrleitung	0,02 %	- 7 %
Planungs- und Genehmigungskosten	0,3 %	- 2 %
Schienenfahrzeuge	36 %	- 49 %

Die Bandbreite der Relation der Kostenkomponenten der Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum von 60 Jahren ist in Tabelle 37 dargestellt. Die unterschiedlichen Ausbaustufen der Fahrleitungs- und Bahnstrominfrastruktur zeigen sich auch in der Bandbreite der Instandhaltungskosten. Ihr Anteil ist von hinsichtlich der Gesamtkosten untergeordneter Bedeutung. Die Instandhaltungskosten der Schienenfahrzeuge variieren den verbauten Akkusystemen. Bei den Varianten 0 und 1 ist mit daher im Vergleich mit höheren Instandhaltungskosten zu rechnen.

Tabelle 37: Anteile der Betriebskosten an den Gesamtkosten

BETRIEBSKOSTEN - 60 Jahre	Anteil an Gesamtkosten	
Instandhaltung, Bahnstrom	0,6 %	- 3 %
Instandhaltung, Fahrleitung	0,009 %	- 2 %
Instandhaltung Fahrzeug	19 %	- 32 %
Energiebezug Strom	17 %	- 25 %

Die Energiekosten variieren mit dem Energieverbrauch und den Netzkosten je nach Netzebene, aus welcher die elektrische Energie bezogen wird. Der Energieverbrauch ist wiederum abhängig von der Fahrzeugmasse. Die Varianten mit großem Akkusystem weisen einen höheren Energieverbrauch auf, können auch einen hohen Anteil der Bremsenergie rekuperieren, in den Akkus speichern und wieder nutzen. Rekuperierte Bremsenergie kann grundsätzlich auch in das Stromnetz zurückgespeist werden. Dies ist nur in Varianten ohne Akkusystem sinnvoll, und nur möglich mit dem Einsatz von Umrichter-Lösungen in den Unterwerken. Die Energiekosten von Variante 5 mit Rückspeisung können dadurch gesenkt werden. Die Varianten mit Akkusystem haben im Vergleich dennoch niedrigere Energiekosten. Die Varianten 5 und 6 weisen die höchsten Energiekosten auf.

Die nachfolgende Darstellung der Gesamtkosten der Varianten erfolgt als Vergleich bezogen auf Variante 6, 15 kV AC 50 Hz mit Rückspeisung ins Netz. Die relative Vergleichs-Darstellung der Varianten, erfordert eine Referenz-Variante. Ausgehend von der Machbarkeitsanalyse der Realisierung einer Fahrleitungsinfrastruktur entlang der gesamten Strecke, wurde die maximale Ausbaustufe der Vollelektrifizierung als Referenz herangezogen und mit 100% festgelegt.

Investitionskosten

Tabelle 38 zeigt die notwendigen Erst-Investitionen der Elektrifizierungsvarianten für den 4-Teiler für das 15 kV 50 Hz AC-Bahnstromsystem. Tabelle 39 zeigt nachfolgend die Investitionskosten über den Durchrechnungszeitraum 60 Jahren und beinhaltet somit die Reinvestitionen für Fahrzeuge und Akkusysteme. Tabelle 40 zeigt deren Kostenkomponenten. Alle Werte stellen die Kosten bezogen auf Variante 6 dar.

Tabelle 38: Erst-Investitionskosten, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz

4-Teiler AC, Bahnstromsystem 15 kV AC, bezogen auf Variante 6	Variante 0	Variante 1	Variante 2a	Variante 3	Variante 4	Variante 5 - (UW mit Rücksp.)	Variante 5 - (US ohne Rücksp.)	Variante 6 - (UW mit Rücksp.)
INVESTITIONSKOSTEN - 60 Jahre	76%	80%	82%	91%	100%	97%	81%	100%

Die Erst-Investitionskosten sind für Varianten mit keiner oder wenig Oberleitungsanteil am geringsten. Für Variante 0 ist für den Fahrplan-sicheren Zugbetrieb ein zusätzliches, einsatzbereites Fahrzeug vorzusehen, daher ergeben sich höhere Kosten als für Variante 1. Für die Varianten mit ausgebauten Oberleistungsstrecken ergeben sich höhere Erst-Investitionen. Die Einbeziehung der Investitionen über den Durchrechnungszeitraum von 60 Jahren ermöglicht eine gesamthafte Betrachtung.

Variante 5 ohne Rückspeisung weist die geringsten Investitionskosten über den gesamten Durchrechnungszeitraum auf. In der Variante verkehren Schienenfahrzeuge ohne Akkusystem, die Oberleitung ist voll ausgebaut. Die Bahnstromversorgung ist über Unterwerke ohne Umrichter vorgesehen, was zu signifikanten Kosteneinsparungen führt. Durch den Ansatz von Bahnstromtransformatoren ohne Umrichter muss allerdings voraussichtlich von der Möglichkeit der Energierückspeisung ins Netz Abstand genommen werden. Die Differenz der Kosten von Variante 5 mit Rückspeisung zu Variante 6 erklärt sich durch die Unsicherheit des Mehraufwandes durch die mögliche Notwendigkeit der Höherlegung von Hochspannungsleitungen. Trotz der infrastrukturseitigen Einsparungen bei Variante 0 sind aufgrund des zusätzlich notwendigen Fahrzeugs höhere Ausgaben als für die anderen Varianten zu erwarten. Die Hybridvarianten 1 – 3 weisen nach der Variante 5 ohne Umrichter geringsten Investitionskosten auf. Höhere Fahrzeugkosten stehen dabei geringeren Infrastrukturkosten gegenüber. Variante 4 weist aufgrund eines hohen Oberleitungs-Ausbaugrades und dem verbauten Akkusystem die höchsten Investitionskosten auf.

Tabelle 39: Investitionskosten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz

4-Teiler AC, Bahnstromsystem 15 kV AC, bezogen auf Variante 6	Variante 0	Variante 1	Variante 2a	Variante 3	Variante 4	Variante 5 - (UW mit Rücksp.)	Variante 5 - (US ohne Rücksp.)	Variante 6 - (UW mit Rücksp.)
INVESTITIONSKOSTEN - 60 Jahre	103%	98%	95%	99%	105%	98%	87%	100%

Tabelle 40: Investitionskosten, Kostenkomponenten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz

4-Teiler AC, Bahnstromsystem 15 kV AC, bezogen auf Variante 6	Variante 0	Variante 1	Variante 2a	Variante 3	Variante 4	Variante 5 - (UW mit Rücksp.)	Variante 5 - (US ohne Rücksp.)	Variante 6 - (UW mit Rücksp.)
INVESTITIONSKOSTEN - 60 Jahre								
Bahnstrom	31%	58%	64%	86%	105%	100%	28%	100%
Fahrleitung	0%	29%	46%	66%	84%	88%	88%	100%
Planungs- und Genehmigungskosten	14%	44%	55%	76%	94%	94%	58%	100%
Schienenfahrzeuge	143%	123%	113%	109%	109%	100%	100%	100%

Betriebskosten

Tabelle 41 zeigt die Betriebskosten für den 4-Teiler, für das 15 kV 50 Hz AC-Bahnstromsystem, Tabelle 42 zeigt deren Kostenkomponenten, jeweils bezogen auf Variante 6.

Die Varianten mit voll ausgebauter Oberleitung weisen die höchsten Instandhaltungskosten hierfür, und daraus folgend den meisten Wartungsaufwand für die Fahrleitung auf. Der Instandhaltungsaufwand für das Bahnstromsystem variiert mit dem Ausbaugrad und dem Unterwerksystem. Der höchste Anteil der Instandhaltungskosten entfällt jedoch auf die Schienenfahrzeuge inklusive dem verbauten Akku-System.

Die Energiekosten errechnen sich nach der aus dem Netz bezogenen Energie und den dafür anfallenden Netzkosten, sowie den leistungsbezogenen Netzkosten. Die Netzkosten für den Bezug aus Netzebene 3 (Variante 4, 5 und 6) sind deutlich geringer als auf Netzebene 5 (Varianten 0 – 3). Der Energieverbrauch der Fahrzeuge variiert je nach Konfiguration (AC-Trafo, Akku) aufgrund der unterschiedlichen zu beschleunigenden Masse. Fahrzeuge mit großem Akku können einen beträchtlichen Anteil der

Bremsenergie rekuperieren und im Akku zwischenspeichern, wodurch die Aufnahme aus dem Netz verringert wird. Dies steht einem erhöhten Verbrauch durch die zusätzlich zu beschleunigende Masse der Akku gegenüber, führt aber jedenfalls zu einer Reduktion des gesamten Energieverbrauchs. Sofern die Möglichkeit besteht Bremsenergie in das übergeordnete Netz zurück speisen zu, können, durch eine mögliche Einspeisevergütung, Energiekosten gespart werden. Dies ist nur für Variante 5 und 6 (ohne Akku) relevant. Es muss allerdings die Wirkungsgradkette in umgekehrter Richtung durchlaufen werden und für die Rückspeisung ist jedenfalls ein Umrichter notwendig. Die Einsparung durch Rückspeisen in den Varianten 5 mit Rückspeisung und Variante 6 fällt daher eher gering aus. Die Energiekosten variieren somit am meisten mit der Möglichkeit zur Energierückgewinnung im Fahrzeug. Sie sind für Fahrzeuge mit leistungsfähigem Akkusystem am geringsten.

Diese beiden Trends von hohen Kosten für die Akkus und geringeren Energiekosten durch Energierückgewinnung sind gegenläufig, heben sich aber durch den höheren Anteil der Kosten für das Fahrzeug an den Gesamtkosten nicht auf. Die Betriebskosten steigen mit erhöhtem Anteil an Infrastruktur und Fahrzeugtechnologie. Die geringsten Betriebskosten weisen die Varianten für den Grenzfall des Oberleitungs-Vollausbaus auf.

Tabelle 41: Betriebskosten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz

4-Teiler AC, Bahnstromsystem 15 kV AC, bezogen auf Variante 6	Variante 0	Variante 1	Variante 2a	Variante 3	Variante 4	Variante 5 - (UW mit Rücksp.)	Variante 5 - (US ohne Rücksp.)	Variante 6 - (UW mit Rücksp.)
BETRIEBSKOSTEN - 60 Jahre	107%	124%	122%	131%	115%	100%	96%	100%

Tabelle 42: Betriebskosten, Kostenkomponenten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz

4-Teiler AC, Bahnstromsystem 15 kV AC, bezogen auf Variante 6	Variante 0	Variante 1	Variante 2a	Variante 3	Variante 4	Variante 5 - (UW mit Rücksp.)	Variante 5 - (US ohne Rücksp.)	Variante 6 - (UW mit Rücksp.)
BETRIEBSKOSTEN - 60 Jahre								
Wartung & Instandhaltung, Bahnstrom	31%	60%	66%	88%	100%	100%	16%	100%
Wartung & Instandhaltung, Fahrleitung	0%	25%	46%	72%	94%	99%	99%	100%
Wartung & Instandhaltung Fahrzeug	167%	167%	152%	149%	149%	100%	100%	100%
Energiebezug Strom	78%	107%	111%	128%	90%	100%	103%	100%

Gesamtkosten

Tabelle 43 zeigt die Gesamtkosten für den 4-Teiler, für das 15 kV 50 Hz AC-Bahnstromsystem, bezogen auf Variante 6. Die geringsten Gesamtkosten weist Variante 5 ohne Rückspeisung, also jene Grenz-Variante mit voll ausgebauter Oberleitung und ohne Umrichter-System in den Unterwerken auf. Die nächste-günstigere Variante ist Variante 2a. Sie weist einen Oberleitungs-Streckenanteil von etwa 50 % und ein mittelgroßes Akkusystem von ca. 320 kWh auf. Diese Kombination erweist sich als kostenoptimalste Hybrid-Variante. Die Varianten 1, 3 und 4 weisen höhere Gesamtkosten durch größere Akkusysteme, oder höheren Infrastruktur-Ausbaugrad aus. Variante 0, der reine Akku-Zug, weist durch das zusätzlich notwendige Fahrzeug die höchsten fahrzeugbezogenen Kosten auf. Für das zusätzliche, einsatzbereite Fahrzeug fallen im Vergleich zu den Varianten 1 - 6 zusätzliche Personalkosten an, die in der vorliegenden Studie nicht quantifiziert wurden, aber in einer Bewertung berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 43: Gesamtkosten über 60 Jahre, 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz

4-Teiler AC, Bahnstromsystem 15 kV AC, bezogen auf Variante 6	Variante 0	Variante 1	Variante 2a	Variante 3	Variante 4	Variante 5 - (UW mit Rücksp.)	Variante 5 - (US ohne Rücksp.)	Variante 6 - (UW mit Rücksp.)
GESAMTKOSTEN - 60 Jahre	105%*	111%	108%	114%	110%	99%	91%	100%

Generell lässt das Ergebnis der Gesamtkostenbetrachtung, aufgrund der geringen Differenz der bestgereihten Varianten und der generellen Unschärfe einer Gesamtkostenschätzung über 60 Jahre, keine klare Ableitung einer bestgereihten Variante zu. Die Beurteilung erfordert die Bewertung weiterer Realisierungs-, Betriebs- und Erweiterungskriterien.

Die Kosten für 4-Teiler und 3-Teiler unterscheiden sich durch die Kosten für die Schienenfahrzeuge und die Kosten für den Energiebedarf. Die Kosten für den 3-Teiler sind dadurch etwa 11 – 24 % höher. Die anderen Kostenanteile ändern sich entsprechend, bleiben aber in ihrer Verteilung ähnlich. Die Ergebnisse für den 3-Teiler lassen daher grundsätzlich dieselben Schlüsse wie für den 4-Teiler zu.

Sensitivitäten

Bei einer Erhöhung der Anzahl zu beschaffender Fahrzeuge für die Bewältigung einer Taktverdichtung (15 min Takt) ergibt sich keine Änderung der Reihung der Varianten hinsichtlich der Gesamtkosten.

Die Entwicklung der zukünftigen Strom- und Akkupreise ist mit einiger Unsicherheit behaftet. Die Variation der Preise hat keine Änderung der Reihung der Varianten hinsichtlich der Gesamtkosten zur Folge.

Die Instandhaltungskosten machen über den Durchrechnungszeitraum von 60 Jahren einen signifikanten Anteil aus. Die Variation jener Kosten für Fahrleitung und Bahnstromsystem zeigen jedoch keinen Einfluss auf die Variantenreihung.

4.12 Dauer der Baumaßnahmen für Fahrleitung und Bahnstrominfrastruktur

Für die Varianten 0 - 5 erscheint die bauliche Realisierung der Lade- und Versorgungseinrichtung innerhalb eines Zeitrahmens von 18 Monaten möglich. Für Variante 6 muss die Realisierbarkeit, bzw. der zusätzliche zeitliche, technische und finanzielle Aufwand, für eine unter Spannung befahrbare Oberleitung unter den beiden Hochspannungsleitungen bei km 30,6 und km 30,8 geprüft werden.

Die bauliche Umsetzungszeit für Variante 0 kann mit 1 – 2 Monaten angesetzt werden.

Für den Bau von Fahrleitung und Bahnstrominfrastruktur von Variante 1 ist eine Umsetzungszeit von einigen Monaten anzusetzen.

Die Baudauer einer Wechselstrom-Fahrleitung für Variante 5 kann mit etwa 15 Monaten, in abschnittsweiser Realisierung, zum Teil in Nacharbeit und teilweisem Einsatz von Schienenersatzverkehr, ohne Vollsperrung, erwartet werden. Die bauliche Umsetzung der Bahnstromversorgung kann während dieser Zeitspanne parallel erfolgen. Durch das Vorhandensein von doppelten Gleisverbindungen auf den Zweigleisabschnitten, die bei Schwachlast eingleisig befahren werden können, bzw. durch die straßengebundene Erreichbarkeit der Strecke zur Materialanlieferung, erscheint bei zweckmäßiger

* Zusätzliche Personalkosten fallen für das zusätzliche, einsatzbereite Fahrzeug an

Planung eine Vollsperre als vermeidbar. Im Zuge der Arbeiten an der Strecke können vorgesehene Ausbaumaßnahmen für eine mögliche spätere Taktverdichtung umgesetzt werden. Für den Bau einer Gleichstrom-Fahrleitungsanlage muss die mögliche Notwendigkeit einer Vollsperre, für das Herstellen der Streustromisolierung der Gleisanlage inklusive möglichem Neuaufbau des Oberbaus, berücksichtigt werden. Für Variante 5 ist der längste Zeitraum des Variantenspektrums für die Infrastruktur- bzw. Einreichplanung, sowie für die Ausführungsplanung anzusetzen.

Die Ausführungsdauer des Baus der Varianten 2 – 4 kann zwischen den Randwerten erwartet werden.

4.13 Bewertung der Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen

Zur Beurteilung der Varianten wurde eine Bewertungsmatrix, inklusive Gewichtung, erarbeitet. Die Bewertung der Kriterien aus 4.11, mit den Werten -2, -1, 0, 1, 2, erfolgte durch den Auftragnehmer. Die jeweilige Bewertung wird mit einer Gewichtung des jeweiligen Kriteriums für die Gesamtbewertung versehen. Die Kriterien werden nachfolgend erläutert. Die Gesamtbewertung wird anschließend in Tabelle 44 dargestellt.

4.13.1 Kosten

Zur monetären Beurteilung der Varianten wurde eine differentielle Kostenbetrachtung vorgenommen. Diese umfasst die Investitions- und Betriebskosten der Schienenfahrzeuge (unterschieden nach der jeweiligen Konfiguration als 4-Teiler oder 3-Teiler, Traktionssystem und Akkuausstattung), des Fahrleitungs- und Bahnstromsystems, sowie die Energiekosten für den Strombedarf.

Investitionskosten

Die Bewertung der gesamten Investitionskosten, über den Durchrechnungszeitraum von 60 Jahren, erfolgt entsprechend der Ergebnisse des Kapitels 4.11.5. Aufgrund der Einstufung von Variante 6 als Referenzvariante für den Kostenvergleich wird sie mit 0 bewertet.

Betriebskosten

Die Bewertung der gesamten Betriebskosten, über den Durchrechnungszeitraum von 60 Jahren, erfolgt entsprechend der Ergebnisse des Kapitels 4.11.5. Aufgrund der Einstufung von Variante 6 als Referenzvariante für den Kostenvergleich wird sie mit 0 bewertet. Die Personalkosten für den Schienenfahrzeugbetrieb werden in der vorliegenden Studie nicht behandelt, da sie für die Varianten 1 - 6 gleich ausfallen. Für Variante 0 fallen, aufgrund des zusätzlich einsatzfähig vorzuhaltenden Fahrzeuges, zusätzliche Personalkosten an, was zur Abwertung von -1 auf -2 führt.

4.13.2 Synergieeffekte Fahrzeug

Die Beschaffung der Schienenfahrzeuge und die Erstellung eines Instandhaltungskonzepts soll entsprechend den Grundsätzen der Sparsamkeit, Wirtschaftlichkeit und Zweckmäßigkeit erfolgen. Im Zuge dessen wird eine gemeinsame Beschaffung mit anderen Schmalspurbahnen geprüft. Ein gemeinsamer Beschaffungsprozess, sowie ein gemeinsames Instandhaltungskonzept kann zu positiven Synergieeffekten hinsichtlich Anschaffungskosten und Ersatzteilkosten führen. Durch die unterstellten geringsten Abweichungen im Fahrzeugkonzept der Varianten 5 und 6 (ohne Akku) werden die

Synergieeffekte für diese Varianten am höchsten bewertet. Durch den zusätzlichen Engineering- und Betriebsaufwand der Akku- und Akku-Hybrid-Varianten werden die Synergieeffekte hier geringer eingeschätzt. Durch die gleiche Fahrzeugbasis kann aber davon ausgegangen werden, dass diese weiterhin in geringerem Maße bestehen. Sollten von anderen Schmalspurbahnen Vorteile in der Akku-Hybrid-Technologie gesehen werden, kann es zu einer gemeinsamen Beschaffung solcher Fahrzeuge kommen, was dann zu einer Erhöhung der Synergieeffekte für diese Varianten führt. Eine Unterscheidung zwischen den Akku- und Akku-Hybrid-Varianten hinsichtlich der Synergieeffekte ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich und kann im Fahrzeugbeschaffungsprojekt weiterbearbeitet werden.

4.13.3 Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen der Realisierung einer Oberleitung entlang der Bahnstrecke wurden in Kapitel 3.3.2 behandelt. Dabei wurde festgestellt, dass nach derzeitigem Wissenstand keine Hinweise gegen eine Genehmigungsfähigkeit der Elektrifizierung Zillertalbahn vorliegen. Es wird somit für die Bewertung von keinen relevanten Umweltauswirkungen ausgegangen.

4.13.4 Zeitliche Realisierbarkeit, Dauer der Baumaßnahmen und Betriebliche Einschränkungen in der Bauphase

Die zeitlichen Aspekte der Realisierung von Fahrleitung und Bahnstrominfrastruktur und daraus resultierende betriebliche Einschränkungen in der Bauphase werden in Kapitel 4.13.2 behandelt. Es wird davon ausgegangen, dass sowohl die Fahrleitungs- als auch die Bahnstrominfrastruktur für die Varianten 0 - 5 bis zur Fahrzeuginbetriebnahme realisiert werden können. Daraus resultieren positive Bewertungen. Die geringste Planungs- und Baudauer weist Variante 0 auf. Der höhere Realisierungsaufwand für die Varianten 1 – 6 hat eine niedrigere Bewertung zur Folge. Variante 6 wird mit -1 bewertet, aufgrund der Unsicherheit der Höherlegung der APG-Hochspannungsleitungen.

Die betrieblichen Einschränkungen in der Bauphase gehen einher mit dem Umfang der notwendigen Baumaßnahmen. Mit ansteigendem Oberleitungsanteil und dazugehöriger Bahnstrominfrastruktur ist mit höheren Einschränkungen zu rechnen. Die höchsten Einschränkungen, beispielsweise in Form von Tagesrandsperrungen oder Teilsperrungen sind für die Varianten mit vollem bzw. nahezu vollem Oberleitungsausbau entlang der gesamten Strecke zu erwarten. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass durch entsprechende Planung, Nacharbeit und Vorgaben an die ausführende Baufirma, großräumige und langfristige Streckensperrungen vermieden werden können. Daher erfolgt für keine der Varianten eine Bewertung mit -2.

4.13.5 Bauliches Umsetzungsrisiko

Das bauliche Umsetzungsrisiko, resultierend aus nicht planbaren Verzögerungen, beispielsweise aufgrund von archäologischen Funden, nicht vorhersehbaren Bodenverhältnissen, in der Detailplanung auftretenden Herausforderungen oder technischer Realisierungs-Unsicherheiten (Höherlegung Hochspannungsleitungen), steigt mit dem Umfang der Baumaßnahmen. Risiken, v.a. hinsichtlich der zeitlichen Realisierbarkeit, können auch aus Abhängigkeiten mit anderen Baumaßnahmen auf der Bahnstrecke erwachsen, beispielsweise mit dem Neubau des Streckenabschnitts Aschau – Rohrberg/Zell am Ziller. Die Bandbreite der Bewertung reicht daher von 2 für Variante 0 (Baumaßnahmen ausschließlich in schon erschlossenen Bahnhofsbereichen) bis -2 für Variante 6.

4.13.6 Fahrzeugseitiges Umsetzungsrisiko

Das fahrzeugseitige Umsetzungsrisiko bezieht sich auf die Umsetzbarkeit einer der Variante entsprechenden Triebfahrzeugkonfiguration. Während für die Fahrzeuge der Varianten 5 und 6 von einem geringen, bis gar keinem Umsetzungsrisiko für einen Schmalspurbahn-Elektrotriebzug ausgegangen werden kann, weist die Integration von Akkusystemen in die Fahrzeuge gewisse Unsicherheiten auf. Masse, Bauraum und Zusatzaggregate der Traktionsakkus haben, je nach Akkukapazität, durch die entsprechende Positionierung und Integration der Batteriemodule (Schwerpunkt der Schmalspurfahrzeuge) Auswirkungen auf die Achslasten und einen möglichen Verlust an Transportkapazität zur Folge. Ein gewisses Risiko besteht in der Wiederbeschaffbarkeit gleichartiger Traktionsakkumodule und ev. anfallendem Zusatzaufwand für Integration und Engineering. Für Variante 0 sind möglicherweise Sonderlösungen für die fahrzeugseitigen Ladevorrichtungen notwendig. Die Bewertung des fahrzeugseitigen Umsetzungsrisikos steigt mit der Größe der Akkusysteme und muss für Variante 0 am höchsten angenommen werden.

4.13.7 Angebotserweiterung

Die Varianten werden nach der Möglichkeit einer Angebotsausweitung hinsichtlich Taktverdichtung und der Ausweitung der Elektrifizierung auf den Güterverkehr bewertet.

Für den Betrieb mit verkürzten Intervallen (15 Minuten Takt) müssen, neben den für die vorliegende Studie nicht gegenständlichen streckenbaulichen Maßnahmen, zusätzliche Fahrzeuge angeschafft werden. Es wird – mit den Einschränkungen aus 4.9 - davon ausgegangen, dass das Bahnstromsystem, durch die grundsätzliche Auslegung im Rahmen der Studie auf den Maximalbelastungsfall des 3-Teilers im 30 Minuten Takt, die Energieversorgung von 4-teiligen Zuggarnituren im 15 Minuten Takt bereitstellen kann. Durch eine weiterführende Prüfung im Rahmen einer Netzstudie kann die Auslegung auf eine derartige Angebotserweiterung geprüft und vorgesehen werden.

Die Fahrzeuge für Variante 0 haben aufgrund der Akkusysteme den höchsten Anschaffungspreis. Damit ergeben sich für Variante 0 die höchsten Mehrkosten.

Auf der Zillertalbahn wird bis zum Bahnhof Fügen Güterverkehr abgewickelt. Eine zukünftige Umstellung des Güterverkehrs auf elektrische Antriebssysteme kann nur durch ein System mit Oberleitung im entsprechenden Bereich erfolgen.

4.13.8 Betriebsstabilität (Störungsbetrieb)

Für die Betriebsführung im Fall von Streckenstörungen haben Fahrzeuge mit Akkusystem grundsätzlich den Vorteil, dass Streckenteile auf denen die Fahrleitungsinfrastruktur gestört ist, per Akku befahren werden können. Dies hängt jedoch vom jeweiligen Störabschnitt, des Redundanzniveaus der Bahnstromversorgung und der Segmentierung abtrennbarer Streckenteile ab. Eine genaue Untersuchung von Störungsszenarien hinsichtlich Einzel- bzw. Doppelfehler, dem Einsatz von Ersatzzügen bzw. dem Betrieb mit reduzierter Leistung zur Energiebedarfsreduktion von mit Akkus ausgestatteten Zügen, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Die Bewertung der Betriebsstabilität erfolgt daher mit einer neutralen Bewertung der Varianten mit vollem Oberleitungsausbau ohne Akku, und einer grundsätzlich vorteilhafteren Bewertung der Varianten mit Akku.

4.13.9 Gesamtbewertung

Tabelle 44 zeigt die Bewertung der Varianten für die Gesamtbeurteilung nach den oben erläuterten Kriterien. Deren gewichtete Auswertung führt zu einer Gesamtbewertung.

Variante 5 (Oberleitung entlang der gesamten Strecke mit zwei leistungslosen Abschnitten) weist grundsätzlich die beste Gesamtbewertung auf. Eine weitere Differenzierung nach der Bahnstromversorgung mit oder ohne Umrichter kann im Rahmen einer Netzstudie erfolgen. Variante 5 weist jedenfalls aufgrund von einer in Bezug auf die Referenzvariante vergleichbaren oder deutlich vorteilhaften Kostenerwartung, vorteilhafter Synergieeffekte, geringem fahrzeugseitigem Umsetzungsrisiko und guter Voraussetzungen für die Angebotserweiterung die beste Bewertung auf. Dies deckt sich mit dem Ergebnis der TU-Wien Studie [1]. Die Variante weist allerdings (gemeinsam mit Variante 6), aufgrund der größten geografischen Ausdehnung und der Verknüpfung mit dem Strecken-Neubauprojekt Aschau-Zell am Ziller, das höchste bauliche Umsetzungsrisiko auf. Es ist mit höheren betrieblichen Einschränkungen und längeren Umsetzungszeiten als in den Akku-Hybridvarianten zu rechnen.

Variante 2a weist, nahezu gleichauf, die zweitbeste Bewertung auf und ist damit die bestgereichte Akku- bzw. Akku-Hybrid-Variante. Sie weist günstigere Investitionskosten, aber leicht höhere Betriebskosten als die Referenzvariante auf und kann in vielerlei Hinsicht als eine Kombination der Eigenschaften des Variantenspektrums angesehen werden. Die Vorteile von im Vergleich zum OL-Vollausbau reduzierter zeitlicher Umsetzungszeit und geringerer betrieblicher Einschränkungen in der Bauphase sind verbunden mit einer positiven Bewertung der Möglichkeit zur Angebotserweiterung und der Betriebsstabilität durch das verbaute Akkusystem. Das bauliche Umsetzungsrisiko ist aufgrund der OL-Streckenausdehnung im Mittelfeld der Varianten einzuordnen. Zudem besteht keine Abhängigkeit des Infrastrukturausbaus mit dem in den kommenden Jahren anstehenden Projekt Streckenneubau Aschau – Rohrberg/Zell am Ziller.

Variante 6 ist die Maximal-Ausbauvariante für die Streckeninfrastruktur. Daraus resultiert das höchste bauliche Umsetzungsrisiko und die höchste Umsetzungszeit. Fahrzeugseitige Synergieeffekte, fahrzeugseitiges Umsetzungsrisiko und Möglichkeit zur Angebotserweiterung sind vergleichbar mit Variante 5.

Variante 1 weist durch die notwendigen Akku-Systeme eine schlechtere Bewertung bei Betriebskosten und fahrzeugseitigem Umsetzungsrisiko auf. Die Ausdehnung des nördlichen Oberleitungsabschnitts bis zumindest Bf. Rotholz (AC-System) hat eine negative Auswirkung auf die Bewertung der Möglichkeit zur Angebotserweiterung, da der Güterverkehr bis Fügen mit diesem System nicht elektrifiziert werden kann. Vorteile der Variante 1 sind das verringerte bauliche Umsetzungsrisiko, die mögliche Ausführung einer Variante mit hohem per Akku befahrenem Streckenanteil bei gleicher Fahrzeuganzahl und die rasche zeitliche Umsetzbarkeit.

Tabelle 44: Bewertung der Varianten

3- od. 4-Teiler, 15 kV AC 50 Hz		Gewichtung	V0	V1	V2a	V3	V4	V5	V6
Investitionskosten	Investitionskosten	15,0%	-1	1	2	1	-1	2	0
	Betriebskosten	15,0%	-2	-2	-1	-2	-1	0	0
	Synergieffekte Fahrzeuge	10,0%	0	0	0	0	0	2	2
Umweltauswirkungen	Umweltauswirkungen	5,0%	0	0	0	0	0	0	0
	Zeitliche Realisierbarkeit / Dauer der Baumaßnahmen	10,0%	2	1	1	0	0	0	-1
Betriebliche Einschränkungen in der Bauphase	Betriebliche Einschränkungen in der Bauphase	5,0%	2	1	1	0	-1	-1	-1
	Bauliches Umsetzungsrisiko	10,0%	2	1	1	0	-1	-1	-1
Fahrzeugseitiges Umsetzungsrisiko	Fahrzeugseitiges Umsetzungsrisiko	10,0%	-1	-1	0	0	0	2	2
	Angebotserweiterung	5,0%	-1	0	1	1	1	2	2
Betriebsstabilität (Störungsbetrieb)	Betriebsstabilität (Störungsbetrieb)	15,0%	1	1	1	1	1	0	0
	GESAMTBEWERTUNG	100%	0,05	0,15	0,60	0,05	-0,25	0,65	0,25

Die Varianten 0 und 3 folgen in der Reihung dahinter. Variante 0 weist nachteilige Bewertungen in der Kostenstruktur (höhere Anschaffungs-, Betriebs- und Personalkosten) und nachfolgend in der Möglichkeit zur Angebotserweiterung durch die notwendige Fahrzeuganzahl auf. Weiters wirkt sich das durch die zu verbauenden Akkusysteme und mögliche Sonderlösungen in den Ladevorrichtungen erhöhte fahrzeugseitige Umsetzungsrisiko negativ aus. Variante 3 weist einen Oberleitungsanteil von ca. 75 % und einen Akku mit 230 kWh auf. Die Variante verfügt somit über eine sehr leistungsfähige Infrastruktur, was entsprechenden Niederschlag in der Kostenbewertung findet. Im Vergleich zu den Varianten 1 und 2a weist sie auch eine entsprechend höhere Umsetzungszeit, höhere Einschränkungen in der Bauphase und ein höheres bauliches Umsetzungsrisiko auf.

Variante 4 hat einen Oberleitungsanteil von ca. 94 % und den gleichen Akku wie Variante 3. Es ergeben sich daraus die Vor- und Nachteile einer nahezu voll ausgebauten Oberleitung und einem für die kurze Akku-Strecke überdimensionierten Akku mit entsprechender Störfall-Reserve. Die Variante stellt eine, in dieser Form nicht zur Realisierung geeignete, Beispielvariante für ein System mit sehr hohem Oberleitungsanteil und den betrieblichen Fähigkeiten eines Akkuzugs dar. Dies schlägt sich in den höchsten Kosten und einer hinsichtlich der Fahrleistungs- und Bahnstrominfrastruktur vergleichbaren Bewertung wie Variante 5 nieder.

5 Zusammenfassung

Die Technische Universität Wien hat für das Land Tirol verschiedene Konzepte zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn bewertet [1]. Die Ergebnisse weisen einen vollelektrischen Betrieb mit durchgehender Oberleitung als langfristig bestes Konzept und ein optimiertes Akku-Hybrid-Konzept als bestes Konzept für eine zeitnahe und kosteneffiziente Dekarbonisierung aus.

In der vorliegenden Studie wurde eine Bewertung der Strecke hinsichtlich der Realisierbarkeit einer Fahrleitungsinfrastruktur vorgenommen, Varianten zur Elektrifizierung ausgearbeitet und der Zusammenhang mit der notwendigen Akkuleistungsfähigkeit des rollenden Materials untersucht.

Das vorliegende Studienergebnis bestätigt das Ergebnis der TU-Wien Studie [1] hinsichtlich der Variantenreihung, und vertieft dieses durch die positive Beurteilung der Machbarkeit der Oberleitung entlang der gesamten Strecke.

5.1 Streckenbewertung

Im Zuge der Studie wurde eine Untersuchung der technischen, betrieblichen und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Errichtung einer Oberleitung bzw. Ladeinfrastruktur durchgeführt.

Durch Auswertung eines Befahrungsvideos, Ausheben und Zusammenstellen der notwendigen Datensätze und technischen Randbedingungen, sowie Anwendung der betreffenden Normen, wurde eine Bewertung der Strecke in 200 m-Abschnitten hinsichtlich technischer oder rechtlicher Einschränkungen, anhand eines 6-stufigen Bewertungsschemas vorgenommen.

Die Machbarkeit der Realisierung einer Fahrleitung wird entlang der gesamten Bahnstrecke positiv beurteilt. Auf weiten Teilen der Strecke ist die Umsetzung technisch möglich, teils mit erhöhtem Planungsaufwand hinsichtlich der Berücksichtigung von Einbauten und zusätzlichen Investitionen, etwa für die Verlegung von Mittelspannungs-Freileitungen. Daraus ergibt sich aber kein signifikanter Einfluss auf die Machbarkeit.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Fremdgrund für die Realisierung einer Oberleitungsmastgasse notwendig ist, wird als gering eingestuft.

Auf etwa 3 % der Strecke sind Einschränkungen vorhanden, die Sonderlösungen erfordern bzw. die Rechte Dritter betreffen. Dabei handelt es sich um Brückenbauwerke mit geringer Platzreserve und, die Trasse kreuzende, Hochspannungsleitungen. Die Abschnitte können mit entsprechender Führung der Fahrleitung bzw. Befahrung ohne Traktionsleistung, ohne betriebliche Einschränkungen, überwunden werden.

Abschnitte, auf denen die Realisierung einer Oberleitung aus technischen Gründen oder aus Gründen des Naturschutzes nicht oder nur schwer möglich ist, wurden nicht identifiziert. Nach derzeitigem Wissenstand liegen keine Hinweise gegen eine Genehmigungsfähigkeit der Elektrifizierung vor.

5.2 Varianten für Lade- und Versorgungseinrichtungen zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn auf Basis von Akku-Hybrid-Lösungen

Im Zuge der Analysen wurden verschiedene Varianten für unterschiedliche Ausbaustufen der Lade- und Versorgungseinrichtungen zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn untersucht. Die Bandbreite reicht von

einer Variante ohne Oberleitung (Variante 0), bis zu einer Variante mit entlang der Strecke durchgehend unter Spannung nutzbaren Oberleitung (Variante 6). Variante 5 weist, als Spezialisierung von Variante 6, eine durchgehende Oberleitung mit leistungslosen Abschnitten und eine Differenzierung in der Bahnstromversorgung auf.

Die Anforderungen an die Bahnstromversorgung wurden konzeptionell erfasst. Die Gleichstromversorgung weist in 4.4.1 aufgezeigte Unsicherheiten in der Realisierung auf. In 4.11.5 wurden die damit verbundenen Unsicherheiten der Kostenkomponenten für die differentielle Kostenbetrachtung erörtert. Weiters können durch eine gemeinsame Beschaffung von AC-Schienenfahrzeugen mit anderen Schmalspurbahnen vorteilhafte Synergieeffekte genutzt werden. Aus diesen Gründen wurde die Realisierung eines Gleichstromsystems im Rahmen der Studie nicht weiterverfolgt. Weiters wurde aufgrund zu erwartender Streckeneinschränkungen ein 25 kV Traktionssystem nicht weiterverfolgt. Die weitere Betrachtung der Varianten hinsichtlich differentieller Kosten, Bewertung und Beurteilung erfolgte für das 15 kV 50 Hz Wechselstromsystem.

In Kombination mit einer Energiebedarfsberechnung auf Basis einer Betriebssimulation wurde die Dimensionierung von Akkusystemen für die Befahrung der Abschnitte ohne Oberleitung mit Akku- und Akku-Hybrid-Zügen vorgenommen. Die Auslegung erfolgte für 4-teilige und 3-teilige Schienenfahrzeuge.

Die Investitions- und Betriebskosten sämtlicher Komponenten wurden inklusive der anzuschaffenden Schienenfahrzeuge, über einen Durchrechnungszeitraum von 60 Jahren betrachtet. Diese wurden in einer differentiellen Kostenbetrachtung gegenübergestellt. Allein aus diesem Ergebnis lässt sich, aufgrund der geringen Differenzen und der generellen Unschärfe einer Kostenbetrachtung über den Zeitrahmen von 60 Jahren, keine klare Reihung der Varianten ableiten. Daher wurde weitere fachliche Kriterien zur Beurteilung herangezogen.

In der Gegenüberstellung aller Varianten erweist sich Variante 5 nach der Bewertung in 4.13.9 grundsätzlich als langfristig vorteilhafteste Lösung mit der besten Gesamtbewertung. Sie sieht den Vollausbau einer Oberleitung, mit zwei leistungslos befahrenen Abschnitten, vor. Die Energieversorgung wird mit einem 15 kV 50 Hz Wechselspannungssystem hergestellt. Dabei kann eine Lösung mit Transformator und Umrichter am Standort Zell am Ziller, oder im Falle der technischen Realisierbarkeit eine Lösung nur mit Bahnstromtransformator zur Anwendung kommen. Die Variante baut auf konventioneller Traktionssystemtechnik auf und bietet in daher das geringste Risiko hinsichtlich der Wiederbeschaffung des rollenden Materials und das wirtschaftlichste Konzept hinsichtlich der Erweiterbarkeit des Bahnbetriebs. Die Variante weist dabei allerdings die höchste Umsetzungsdauer und das höchste bauliche Umsetzungsrisiko, aufgrund der größten geografischen Ausdehnung der Baumaßnahmen und der zeitlichen Verknüpfung mit dem Streckenneubau Aschau – Rohrberg/Zell am Ziller, auf.

Variante 0 stellt die Variante des Akkuzugs, am anderen Ende des konzeptionellen Spektrums dar. Dabei erfolgt die Befahrung per Akku, mit reinem Laden im Stand, ohne Oberleitung entlang der Strecke.

5.2.1 Beurteilung

Gemäß der Zielsetzung des Studienauftrags zur Untersuchung und Identifizierung von optimalen Akku- bzw. Akku-Hybrid-Varianten mit kombiniertem Oberleitungs- und Akkusystem hat die Studie folgendes ergeben.

Die Hybridvariante 2a wird als beste Variante im Vergleich der Akku- und Akku-Hybrid-Varianten beurteilt. Sie sieht einen Oberleitungsanteil von ca. 50 % und ein mittelgroßes Akkusystem von ca. 320 kWh vor. Sie weist, nahezu gleichauf, die zweitbeste Bewertung, in 4.13.9, über das gesamte Variantenspektrum auf. Für Variante 2a werden im Vergleich zur Referenzvariante geringere Investitions- und moderate Betriebskosten erwartet. Es kann von einer Realisierbarkeit vor der Fahrzeuginbetriebnahme ausgegangen werden. Die Umsetzungsdauer und die Einschränkungen in der Bauphase können im mittleren Bereich des Variantenspektrums erwartet werden. Umfangreiche durchgängige Streckensperren können vermieden werden. Das bauliche Umsetzungsrisiko wird aufgrund der geografischen Ausdehnung der Baumaßnahmen ebenfalls im Mittelfeld der Varianten angesetzt. Durch die Oberleitungsstrecke im nördlichen Bereich des Streckenverlaufs ist eine Elektrifizierung des Güterverkehrs von Jenbach bis Fügen möglich. Die Möglichkeit zur Angebotserweiterung hinsichtlich einer Taktverdichtung wird positiv beurteilt. Eine mögliche Verlängerung der Oberleitungsstrecke vor dem Endbahnhof Mayrhofen, bzw. mittigere Anordnung der per Akku befahrenen Strecke, kann zu einer Erhöhung der betrieblichen Stabilität führen. Die tatsächliche Auslegung der Bahnstromversorgung und die Optimierung des Ladeabschnitts vor Mayrhofen kann aus einer Netzstudie abgeleitet werden. Das Vorsehen eines Akkusystems weist ein fahrzeugseitiges Umsetzungsrisiko auf. Dieses betrifft die konstruktive Integration der Akkusysteme in Schmalspur-Schienenfahrzeuge und eine Unsicherheit betreffend der Wiederbeschaffbarkeit kompatibler Akkusysteme nach Ablauf der Lebensdauer. Es wird davon ausgegangen, dass die konstruktiven Risiken durch den Zughersteller adressiert und minimiert werden können. Durch die Festlegung auf ein Wechselstrom-Bahnsystem können Synergieeffekte im Rahmen eines gemeinsamen Beschaffungsprozesses mit anderen Schmalspurbahnen erzielt werden. Das verbaute Akkusystem kann zur Erhöhung der Betriebsstabilität im Fall von lokalen Fahrleitungsstörungen beitragen.

Die Hybrid-Variante 1 wird aufgrund höherer Kosten des rollenden Materials durch größere Akkusysteme, einem mit den Akkusystemen verbundenen, höheren, fahrzeugseitigen Umsetzungsrisikos und ungünstigeren Voraussetzungen für eine Angebotserweiterung schlechter beurteilt als Variante 2a.

Die Hybrid-Varianten 3 und 4 werden aufgrund höherer Kosten, längerer Umsetzungszeiten, höherem baulichem Umsetzungsrisiko und höheren Einschränkungen in der Bauphase schlechter beurteilt als Variante 2a.

Die Akku-Variante 0 weist die geringste bauliche Realisierungsdauer, das geringste bauliche Risiko und die geringsten Einschränkungen in der Bauphase auf. Dem gegenüber stehen die höchsten fahrzeugbezogenen Investitions- und Betriebskosten, aufgrund der Größe der verbauten Akkusysteme und eines, aus Gründen der Fahrplanstabilität notwendigen, zusätzlichen einsatzbereiten Fahrzeugs. Darüber hinaus sind höhere Personalkosten für die zusätzliche Bereitstellung des Fahrpersonals anzusetzen. Des Weiteren weist die Variante, ebenfalls aufgrund der umfangreichen Akkusysteme, das höchste fahrzeugseitige Umsetzungsrisiko, sowie eine mögliche Reduktion der Transportkapazität pro Fahrzeug auf. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten zusätzlicher Fahrzeuge und der fehlenden Möglichkeit der Elektrifizierung des Güterverkehrs weist die Variante die schlechtesten Voraussetzungen für eine mögliche Angebotserweiterung aus.

Die Bewertung wurde für 4-teilige Schienenfahrzeuge vorgestellt. Die Berechnungen wurden auch für 3-teilige Schienenfahrzeuge durchgeführt. Die Ergebnisse für den 3-Teiler lassen grundsätzlich dieselben Schlüsse wie für den 4-Teiler zu.

5.2.2 Resümee

Als abschließendes Ergebnis, kann folgendes festgehalten werden:

Variante 2a mit Wechselstromsystem wurde als beste Akku-Hybrid-Variante identifiziert.

Die Variante weist folgende Vorteile auf:

- Vergleichsweise geringe Investitions- und moderate Betriebskosten
- Günstiges Verhältnis von Umsetzungsdauer und betrieblichen Einschränkungen
- Geringeres bauliches Umsetzungsrisiko als Oberleitungs-Vollausbau
- Mittleres fahrzeugseitiges Umsetzungsrisiko und moderate mögliche Synergieeffekte bei gemeinsamer Beschaffung mit anderen Privatbahnen
- Günstige Voraussetzungen für Erweiterung des Angebots hinsichtlich elektrifizierten Güterverkehrs und Taktverdichtung
- Vorteilhafte Betriebsstabilität

6 Verweise – Literatur, Quellen, Daten

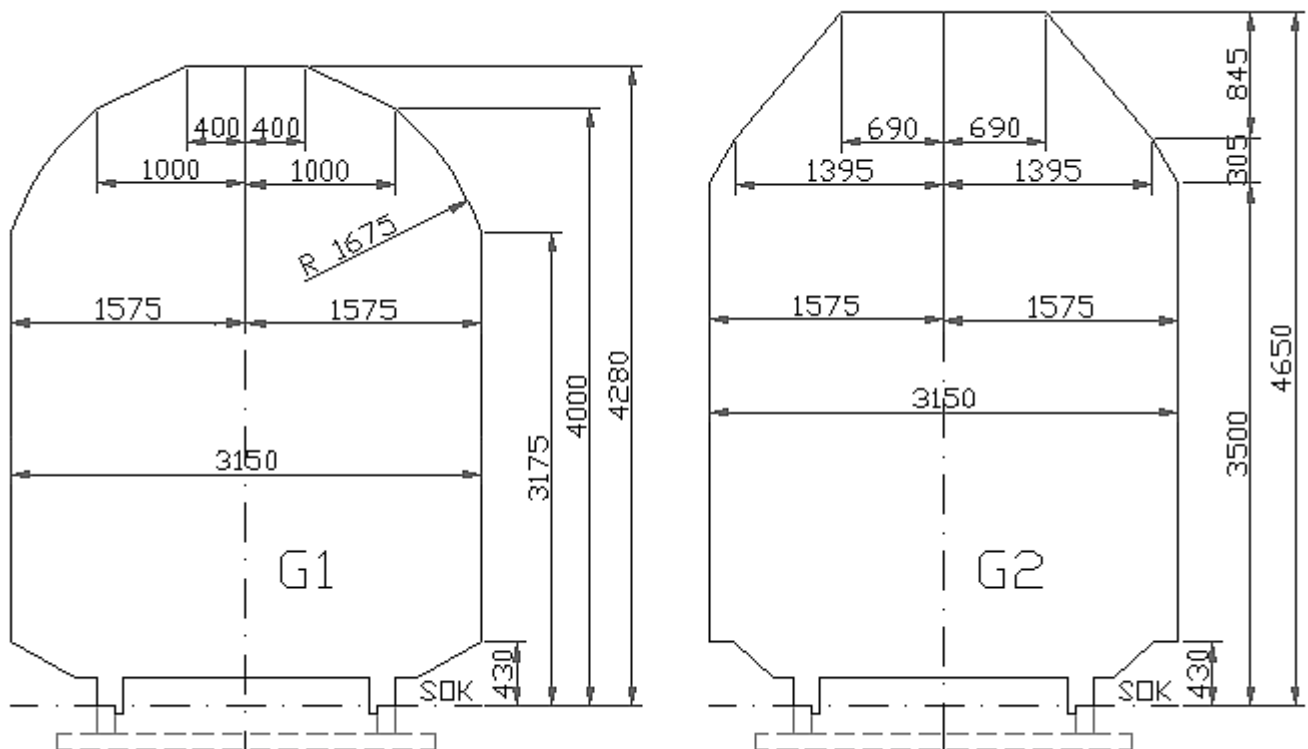
- [1] G. Emberger und M. Vohla, *TU Wien - Bewertung unterschiedlicher Konzepte zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn in Tirol*, Wien, 2024.
- [2] OVE, OVE EN 50119 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für den elektrischen Zugbetrieb.
- [3] OVE, OVE EN 50341-1 – Freileitungen über AC 1 kV Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Gemeinsame Festlegungen.
- [4] OVE, OVE EN 50341-2 – Freileitungen über AC 1 kV Teil 2-1: Nationale Normative Festlegungen (NNA) für ÖSTERREICH basierend auf EN 50341-1.
- [5] Land Tirol / VVT, *Zielfahrplan Zillertal*, 2024.
- [6] VVT, 2024.
- [7] OVE, *EN 50367 - Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge - Kriterien zur Erreichung der technischen Kompatibilität zwischen Dachstromabnehmer und Oberleitung*, 2020.
- [8] ABB, „Traction Battery,“ 18.12.2024. [Online]. Available: <https://new.abb.com/electric-drivetrains/traction-battery>.
- [9] OpenTrack, <http://www.opentrack.ch>, Dr. D. Hürlimann, ETH Zürich; www.opentrack.at, Dr. A. Schöbel.
- [10] OVE, EN 50122 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 2: Schutzmaßnahmen gegen Streustromwirkungen durch Gleichstrombahnen.
- [11] OVE, EN 50122 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 3: Gegenseitige Beeinflussung von Wechselstrom- und Gleichstrombahnsystemen.
- [12] OVE, EN 50122 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag.
- [13] ELBAS, Machbarkeitsstudie: Elektrifizierung der Zillertalbahn (15 kV, 50 Hz AC/15 kV, 16,7 Hz AC/1,5 kV DC), 2011.
- [14] OVE, OVE EN 50149 – Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Rillenfahrdrähte.

7 Abkürzungsverzeichnis

1AC, 3 AC	Einphasiger/Dreiphasiger Wechselstrom (alternating current)
APG	Austrian Power Grid, österreichischer Übertragungsnetzbetreiber
BEMU	Battery Electric Multiple Unit (Batterieelektrischer Triebwagen)
DC	Gleichstrom (direct current)
EisbAV	Eisenbahn-ArbeitnehmerInnenschutzverordnung
EMU	Electric Multiple Unit (Elektrotriebwagen)
FL	Fahrleitung
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
GOK	Geländeoberkante
GUW	Gleichrichterunterwerk
HEA	Breitflanschträger (schmale und leichte Ausführung der H-Träger)
HEB	Breitflanschträger (normale bzw. mittlere Ausführung der H-Träger)
HEM	Breitflanschträger (schwerste und breiteste Ausführung der H-Träger)
HS	Hochspannung
kVA	Kilo-Volt-Ampere
LTO	Lithium-Titanium-Oxide
LüK	Länge über Kupplung
LWL	Lichtwellenleiter
MS	Mittelspannung
MVA	Mega-Volt-Ampere
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide
OL	Oberleitung
P _{dim}	Dimensionierte Leistung des Unterwerkes
SOK	Schienenoberkante
US	Umspannwerk
UW	Unterwerk
VVT	Verkehrsverbund Tirol
ZVB	Zillertaler Verkehrsbetriebe

8 Anhang

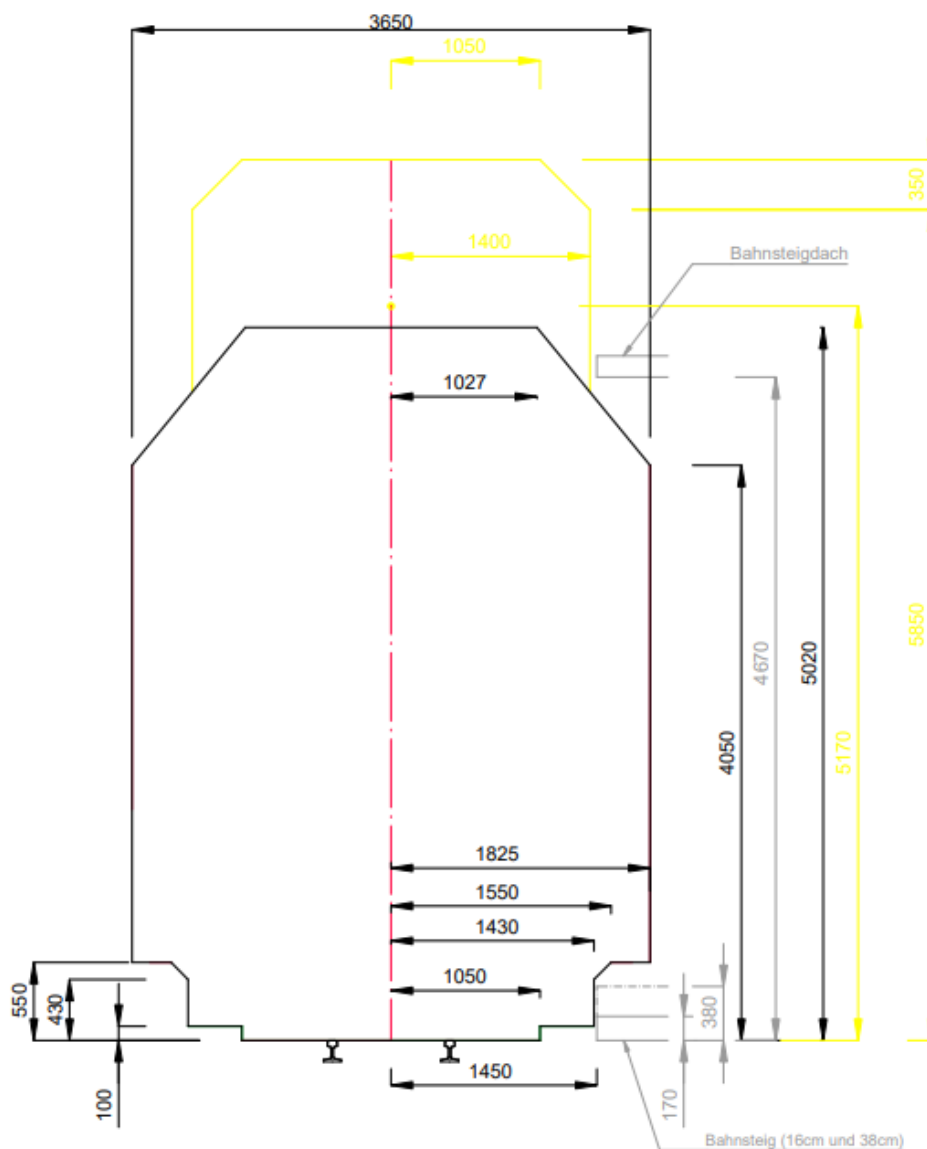
8.1 Bezugslinie G1, Lademaß EBO



8.2 Aktualisiertes Lichtraumprofil

Überlagerung Lichtraumprofile

- Lichtraumprofil ZVB NEU (mit Oberleitung)
- Oberleitung
- Einbauten



V1.0 Stand 2024.12.02

ZILLERTALBAHN
 zug · bus · dampf
 Alexander Wirtenberger

8.3 Zielfahrplan

S5 Jenbach – Schlitters Bf. – Fügen-Hart Bf. – Zell am Ziller Bf. – Mayrhofen

km	Zug Klasse	5001	5003	5005	5007	5009	5011	5013	5015	5017	5019	5021	5023	5025
	von													
0.0	Jenbach	5.20	5.50	6.20	6.50	7.20	7.50	8.20	8.50	9.20	9.50	10.20	10.50	11.20
1.7	Rotholz Hast. RI1	5.23	5.53	6.23	6.53	7.23	7.53	8.23	8.53	9.23	9.53	10.23	10.53	11.23
2.0	Rotholz Hast. RI2													
3.5	Strass im Z. Bf.	5.26	5.56	6.26	6.56	7.26	7.56	8.26	8.56	9.26	9.56	10.26	10.56	11.26
6.4	Schlitters Bf.	5.30	6.00	6.30	7.00	7.30	8.00	8.30	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30
8.2	Gagering Hast.	5.30	6.00	6.30	7.00	7.30	8.00	8.30	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30
10.2	Fügen-Hart Bf.	5.32	6.02	6.32	7.02	7.32	8.02	8.32	9.02	9.32	10.02	10.32	11.02	11.32
		5.35	6.05	6.35	7.05	7.35	8.05	8.35	9.05	9.35	10.05	10.35	11.05	11.35
11.7	Kapfing Hast.	5.35	6.05	6.35	7.05	7.35	8.05	8.35	9.05	9.35	10.05	10.35	11.05	11.35
12.5	Udemers Bf.	5.38	6.08	6.38	7.08	7.38	8.08	8.38	9.08	9.38	10.08	10.38	11.08	11.38
15.3	Ried Hast.	5.40	6.10	6.40	7.10	7.40	8.10	8.40	9.10	9.40	10.10	10.40	11.10	11.40
16.5	Kaltenbach-Stumm Bf.	5.43	6.13	6.43	7.13	7.43	8.13	8.43	9.13	9.43	10.13	10.43	11.13	11.43
18.5	Angererbach Hast.	5.45	6.15	6.45	7.15	7.45	8.15	8.45	9.15	9.45	10.15	10.45	11.15	11.45
20.3	Aschau/Z Bf.	5.48	6.18	6.48	7.18	7.48	8.18	8.48	9.18	9.48	10.18	10.48	11.18	11.48
23.1	Rohrberg-Zillertal Arena	5.51	6.21	6.51	7.21	7.51	8.21	8.51	9.21	9.51	10.21	10.51	11.21	11.51
24.5	Zell am Ziller Bf.	5.54	6.24	6.54	7.24	7.54	8.24	8.54	9.24	9.54	10.24	10.54	11.24	11.54
25.8	Laimach.Museum Hast.	5.57	6.27	6.57	7.27	7.57	8.27	8.57	9.27	9.57	10.27	10.57	11.27	11.57
27.7	Ramsau/Z. Bf.	5.59	6.29	6.59	7.29	7.59	8.29	8.59	9.29	9.59	10.29	10.59	11.29	11.59
28.8	Bichl Hast.	6.02	6.32	7.02	7.32	8.02	8.32	9.02	9.32	10.02	10.32	11.02	11.32	12.02
31.8	Mayrhofen	6.03	6.33	7.03	7.33	8.03	8.33	9.03	9.33	10.03	10.33	11.03	11.33	12.03
	nach	6.08	6.38	7.08	7.38	8.08	8.38	9.08	9.38	10.08	10.38	11.08	11.38	12.08

km	Zug Klasse	5027	5029	5031	5033	5035	5037	5039	5041	5043	5045	5047	5049	5051
	von													
0.0	Jenbach	11.50	12.20	12.50	13.20	13.50	14.20	14.50	15.20	15.50	16.20	16.50	17.20	17.50
1.7	Rotholz Hast. RI1	11.53	12.23	12.53	13.23	13.53	14.23	14.53	15.23	15.53	16.23	16.53	17.23	17.53
2.0	Rotholz Hast. RI2													
3.5	Strass im Z. Bf.	11.56	12.26	12.56	13.26	13.56	14.26	14.56	15.26	15.56	16.26	16.56	17.26	17.56
6.4	Schlitters Bf.	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00	15.30	16.00	16.30	17.00	17.30	18.00
8.2	Gagering Hast.	12.02	12.32	13.02	13.32	14.02	14.32	15.02	15.32	16.02	16.32	17.02	17.32	18.02
10.2	Fügen-Hart Bf.	12.05	12.35	13.05	13.35	14.05	14.35	15.05	15.35	16.05	16.35	17.05	17.35	18.05
11.7	Kapfing Hast.	12.08	12.38	13.08	13.38	14.08	14.38	15.08	15.38	16.08	16.38	17.08	17.38	18.08
12.5	Udemers Bf.	12.10	12.40	13.10	13.40	14.10	14.40	15.10	15.40	16.10	16.40	17.10	17.40	18.10
15.3	Ried Hast.	12.13	12.43	13.13	13.43	14.13	14.43	15.13	15.43	16.13	16.43	17.13	17.43	18.13
16.5	Kaltenbach-Stumm Bf.	12.15	12.45	13.15	13.45	14.15	14.45	15.15	15.45	16.15	16.45	17.15	17.45	18.15
18.5	Angererbach Hast.	12.18	12.48	13.18	13.48	14.18	14.48	15.18	15.48	16.18	16.48	17.18	17.48	18.18
20.3	Aschau/Z Bf.	12.21	12.51	13.21	13.51	14.21	14.51	15.21	15.51	16.21	16.51	17.21	17.51	18.21
23.1	Rohrberg-Zillertal Arena	12.24	12.54	13.24	13.54	14.24	14.54	15.24	15.54	16.24	16.54	17.24	17.54	18.24
24.5	Zell am Ziller Bf.	12.27	12.57	13.27	13.57	14.27	14.57	15.27	15.57	16.27	16.57	17.27	17.57	18.27
25.8	Laimach.Museum Hast.	12.29	12.59	13.29	13.59	14.29	14.59	15.29	15.59	16.29	16.59	17.29	17.59	18.29
27.7	Ramsau/Z. Bf.	12.32	13.02	13.32	14.02	14.32	15.02	15.32	16.02	16.32	17.02	17.32	18.02	18.32
28.8	Bichl Hast.	12.33	13.03	13.33	14.03	14.33	15.03	15.33	16.03	16.33	17.03	17.33	18.03	18.33
31.8	Mayrhofen	12.38	13.08	13.38	14.08	14.38	15.08	15.38	16.08	16.38	17.08	17.38	18.08	18.38
	nach													

km	Zug Klasse	5053	5055	5057	5059	5061	5063	5065	5067					
	von													
0.0	Jenbach	18.20	18.50	19.20	19.50	20.50	21.50	22.50	23.50	...	...	...	...	...
1.7	Rotholz Hast. RI1	18.23	18.53	19.23	19.53	20.53	21.53	22.53	23.53	...	...	...	...	...
2.0	Rotholz Hast. RI2									...	...	...	...	...
3.5	Strass im Z. Bf.	18.26	18.56	19.26	19.56	20.56	21.56	22.56	23.56	...	...	...	...	...
6.4	Schlitters Bf.	18.30	19.00	19.30	20.00	21.00	22.00	23.00	0.00	...	...	...	...	...
8.2	Gagering Hast.	18.32	19.02	19.32	20.02	21.02	22.02	23.02	x 0.02	...	...	...	...	...
10.2	Fügen-Hart Bf.	18.35	19.05	19.35	20.05	21.05	22.05	23.05	0.05	...	...	...	...	...
11.7	Kapfing Hast.	18.35	19.05	19.35	20.05	21.05	22.05	23.05	0.05	...	...	...	...	...
12.5	Udemers Bf.	18.38	19.08	19.38	20.08	21.08	22.08	23.08	x 0.08	...	...	...	...	...
15.3	Ried Hast.	18.40	19.10	19.40	20.10	21.10	22.10	23.10	x 0.10	...	...	...	...	...
16.5	Kaltenbach-Stumm Bf.	18.43	19.13	19.43	20.13	21.13	22.13	23.13	x 0.13	...	...	...	...	...
18.5	Angererbach Hast.	18.45	19.15	19.45	20.15	21.15	22.15	23.15	x 0.15	...	...	...	...	...
20.3	Aschau/Z Bf.	18.48	19.18	19.48	20.18	21.18	22.18	23.18	x 0.18	...	...	...	...	...
23.1	Rohrberg-Zillertal Arena	18.51	19.21	19.51	20.21	21.21	22.21	23.21	x 0.21	...	...	...	...	...
24.5	Zell am Ziller Bf.	18.54	19.24	19.54	20.24	21.24	22.24	23.24	0.24	...	...	...	...	...
25.8	Laimach.Museum Hast.	18.57	19.27	19.57	20.27	21.27	22.27	23.27	0.27	...	...	...	...	...
27.7	Ramsau/Z. Bf.	18.59	19.29	19.59	20.29	21.29	22.29	23.29	x 0.29	...	...	...	...	...
28.8	Bichl Hast.	19.02	19.32	20.02	20.32	21.32	22.32	23.32	0.32	...	...	...	...	...
31.8	Mayrhofen	19.03	19.33	20.03	20.33	21.33	22.33	23.33	x 0.33	...	...	...	...	...
	nach	19.08	19.38	20.08	20.38	21.38	22.38	23.38	0.38	...	...	...	...	...

S5 Mayrhofen – Zell am Ziller Bf. – Fügen-Hart Bf. – Schlitters Bf. – Jenbach

km	Zug Klasse	5002	REX 5102	5004	5006	5008	5010	5012	5014	5016	5018	5020	5022	5024
	von													
-3.0	Mayrhofen	□ 5.23	□ 5.30	5.53	6.23	6.53	7.23	7.53	8.23	8.53	9.23	9.53	10.23	10.53
0.0	Bichl Hast.	□ x 5.26	□	x 5.56	x 6.26	x 6.56	x 7.26	x 7.56	x 8.26	x 8.56	x 9.26	x 9.56	x10.26	x10.56
1.1	Ramsau/Z. Bf.	□ 5.28	□ 5.34	5.58	6.28	6.58	7.28	7.58	8.28	8.58	9.28	9.58	10.28	10.58
3.1	Laimach Museum Hast.	□ x 5.31	□	x 6.01	x 6.31	x 7.01	x 7.31	x 8.01	x 8.31	x 9.01	x 9.31	x10.01	x10.31	x11.01
4.4	Zell am Ziller Bf.	□ 5.34	□ 5.39	6.04	6.34	7.04	7.34	8.04	8.34	9.04	9.34	10.04	10.34	11.04
5.8	Rohrberg-Zillertal Arena	□ 5.36	□	6.06	6.36	7.06	7.36	8.06	8.36	9.06	9.36	10.06	10.36	11.06
8.5	Aschau/Z. Bf.	□ x 5.39	□ 5.43	x 6.09	x 6.39	x 7.09	x 7.39	x 8.09	x 8.39	x 9.09	x 9.39	x10.09	x10.39	x11.09
10.3	Angererbach Hast.	□ x 5.42	□	x 6.12	x 6.42	x 7.12	x 7.42	x 8.12	x 8.42	x 9.12	x 9.42	x10.12	x10.42	x11.12
12.3	Kaltenbach-Stumm Bf.	□ 5.45	□ 5.49	6.15	6.45	7.15	7.45	8.15	8.45	9.15	9.45	10.15	10.45	11.15
13.6	Ried Hast.	□ x 5.47	□	x 6.17	x 6.47	x 7.17	x 7.47	x 8.17	x 8.47	x 9.17	x 9.47	x10.17	x10.47	x11.17
16.3	Uderns Bf.	□ x 5.51	□	x 6.21	x 6.51	x 7.21	x 7.51	x 8.21	x 8.51	x 9.21	x 9.51	x10.21	x10.51	x11.21
17.1	Kapfing Hast.	□ x 5.52	□	x 6.22	x 6.52	x 7.22	x 7.52	x 8.22	x 8.52	x 9.22	x 9.52	x10.22	x10.52	x11.22
18.6	Fügen-Hart Bf.	o □ 5.55	□ 5.56	6.25	6.55	7.25	7.55	8.25	8.55	9.25	9.55	10.25	10.55	11.25
20.6	Gagering Hast.	□ 5.55	□ 5.56	6.25	6.55	7.25	7.55	8.25	8.55	9.25	9.55	10.25	10.55	11.25
22.4	Schlitters Bf.	o □ 6.00	□ 6.00	6.30	7.00	7.30	8.00	8.30	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30
25.4	Strass im Z. Bf.	□ 6.00	□ 6.00	6.30	7.00	7.30	8.00	8.30	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30
26.9	Rotholz Hast. RI2	□ 6.04	□	6.34	7.04	7.34	8.04	8.34	9.04	9.34	10.04	10.34	11.04	11.34
27.1	Rotholz Hast. RI1	□ 6.07	□	6.37	7.07	7.37	8.07	8.37	9.07	9.37	10.07	10.37	11.07	11.37
28.8	Jenbach	o □ 6.10	□ 6.09	6.40	7.10	7.40	8.10	8.40	9.10	9.40	10.10	10.40	11.10	11.40
	nach													

km	Zug Klasse	5026	5028	5030	5032	5034	5036	5038	5040	5042	5044	5046	5048	5050
	von													
-3.0	Mayrhofen	11.23	11.53	12.23	12.53	13.23	13.53	14.23	14.53	15.23	15.53	16.23	16.53	17.23
0.0	Bichl Hast.	x11.26	x11.56	x12.26	x12.56	x13.26	x13.56	x14.26	x14.56	x15.26	x15.56	x16.26	x16.56	x17.26
1.1	Ramsau/Z. Bf.	11.28	11.58	12.28	12.58	13.28	13.58	14.28	14.58	15.28	15.58	16.28	16.58	17.28
3.1	Laimach Museum Hast.	x11.31	x12.01	x12.31	x13.01	x13.31	x14.01	x14.31	x15.01	x15.31	x16.01	x16.31	x17.01	x17.31
4.4	Zell am Ziller Bf.	11.34	12.04	12.34	13.04	13.34	14.04	14.34	15.04	15.34	16.04	16.34	17.04	17.34
5.8	Rohrberg-Zillertal Arena	11.36	12.06	12.36	13.06	13.36	14.06	14.36	15.06	15.36	16.06	16.36	17.06	17.36
8.5	Aschau/Z. Bf.	x11.39	x12.09	x12.39	x13.09	x13.39	x14.09	x14.39	x15.09	x15.39	x16.09	x16.39	x17.09	x17.39
10.3	Angererbach Hast.	x11.42	x12.12	x12.42	x13.12	x13.42	x14.12	x14.42	x15.12	x15.42	x16.12	x16.42	x17.12	x17.42
12.3	Kaltenbach-Stumm Bf.	11.45	12.15	12.45	13.15	13.45	14.15	14.45	15.15	15.45	16.15	16.45	17.15	17.45
13.6	Ried Hast.	x11.47	x12.17	x12.47	x13.17	x13.47	x14.17	x14.47	x15.17	x15.47	x16.17	x16.47	x17.17	x17.47
16.3	Uderns Bf.	x11.51	x12.21	x12.51	x13.21	x13.51	x14.21	x14.51	x15.21	x15.51	x16.21	x16.51	x17.21	x17.51
17.1	Kapfing Hast.	x11.52	x12.22	x12.52	x13.22	x13.52	x14.22	x14.52	x15.22	x15.52	x16.22	x16.52	x17.22	x17.52
18.6	Fügen-Hart Bf.	o 11.55	12.25	12.55	13.25	13.55	14.25	14.55	15.25	15.55	16.25	16.55	17.25	17.55
20.6	Gagering Hast.	x11.58	x12.28	x12.58	x13.28	x13.58	x14.28	x14.58	x15.28	x15.58	x16.28	x16.58	x17.28	x17.58
22.4	Schlitters Bf.	o 12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00	15.30	16.00	16.30	17.00	17.30	18.00
25.4	Strass im Z. Bf.	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00	15.30	16.00	16.30	17.00	17.30	18.00
26.9	Rotholz Hast. RI2	12.04	12.34	13.04	13.34	14.04	14.34	15.04	15.34	16.04	16.34	17.04	17.34	18.04
27.1	Rotholz Hast. RI1	12.07	12.37	13.07	13.37	14.07	14.37	15.07	15.37	16.07	16.37	17.07	17.37	18.07
28.8	Jenbach	o 12.10	12.40	13.10	13.40	14.10	14.40	15.10	15.40	16.10	16.40	17.10	17.40	18.10
	nach													

km	Zug Klasse	5052	5054	5056	5058	5060	5062	5064	5066					
	von													
-3.0	Mayrhofen	17.53	18.23	18.53	19.23	19.54	20.23	21.23	22.23	23.23	...	...	...	...
0.0	Bichl Hast.	x17.56	x18.26	x18.56	x19.26	x19.58	x20.26	x21.26	x22.26	x23.26	...	...	...	...
1.1	Ramsau/Z. Bf.	17.58	18.28	18.58	19.28	20.00	20.28	21.28	22.28	23.28	...	...	...	...
3.1	Laimach Museum Hast.	x18.01	x18.31	x19.01	x19.31	x20.02	x20.31	x21.31	x22.31	x23.31	...	...	...	...
4.4	Zell am Ziller Bf.	18.04	18.34	19.04	19.34	20.04	20.34	21.34	22.34	23.34	...	...	...	...
5.8	Rohrberg-Zillertal Arena	18.06	18.36	19.06	19.36	20.07	20.36	21.36	22.36	23.36	...	...	...	...
8.5	Aschau/Z. Bf.	x18.09	x18.39	x19.09	x19.39	x20.10	x20.39	x21.39	x22.39	x23.39	...	...	...	...
10.3	Angererbach Hast.	x18.12	x18.42	x19.12	x19.42	x20.12	x20.42	x21.42	x22.42	x23.42	...	...	...	...
12.3	Kaltenbach-Stumm Bf.	18.15	18.45	19.15	19.45	20.15	20.45	21.45	22.45	23.45	...	...	...	...
13.6	Ried Hast.	x18.17	x18.47	x19.17	x19.47	x20.17	x20.47	x21.47	x22.47	x23.47	...	...	...	...
16.3	Uderns Bf.	x18.21	x18.51	x19.21	x19.51	x20.20	x20.51	x21.51	x22.51	x23.51	...	...	...	...
17.1	Kapfing Hast.	x18.22	x18.52	x19.22	x19.52	x20.22	x20.52	x21.52	x22.52	x23.52	...	...	...	...
18.6	Fügen-Hart Bf.	o 18.25	18.55	19.25	19.55	20.24	20.55	21.55	22.55	23.55	...	...	...	...
20.6	Gagering Hast.	x18.28	x18.58	x19.28	x19.58	x20.26	x20.58	x21.58	x22.58	x23.58	...	...	...	...
22.4	Schlitters Bf.	o 18.30	19.00	19.30	20.00	20.29	21.00	22.00	23.00	0.00	...	...	...	...
25.4	Strass im Z. Bf.	18.30	19.00	19.30	20.00	20.29	21.00	22.00	23.00	0.00	...	...	...	...
26.9	Rotholz Hast. RI2	18.34	19.04	19.34	20.04	20.33	21.04	22.04	23.04	0.04	...	...	...	...
27.1	Rotholz Hast. RI1	18.37	19.07	19.37	20.07	20.35	21.07	22.07	23.07	0.07	...	...	...	...
28.8	Jenbach	o 18.40	19.10	19.40	20.10	20.41	21.10	22.10	23.10	0.10	...	...	...	...
	nach													

□ □-□

8.4 Bewertungstabelle – Ergebnis Streckenbewertung

Jenbach- Mayrhofen		LEITUNGEN					EINBAUTEN					BAUWERKE				UMWELT				ENG- STELLE	Be- wertung		
		Stromleitungen		Telekomleitungen			Kabel																
	Km	Frei- leitung	Erd- kabel	Frei- leitung	Erd- kabel	LWL (fremd)	Unspez. Erdkabel	Kabel- trog	Gas	Wasser	Ab- wasser	Unbe- kannt	Ein- bauten, Bahnhof	Brücke	Unter- führung	Tunnel	Bahnhof Bez.	Vegeta- tion (Baum)	Bach/ Fluss	Schutz- gebiete	Bösch- ung	Eng- stelle	
Bestand	0,0												1				Jenbach						1
	0,2												1				Jenbach						1
	0,4												1				Jenbach						1
	0,6												1				Jenbach						1
	0,8												1			1							1
	1,0								1							1							1
	1,2	1														1			1				1
	1,4	1							1	1				3	3				1				3
	1,6		1		1			1		1			1					Rotholz					1
	1,8							1		1			1					Rotholz					1
	2,0							1					1					Rotholz	1				1
	2,2							1										1	1				1
	2,4							1											1				1
	2,6																		1				1
	2,8							1								3							3
	3,0				1		1	1	1													1	1
	3,2		1		1		1	1	1	1	1								2			1	2
	3,4		1				1	1	1	1	1			1				Strass i. Z.					2
	3,6		1				1	1	1		1											1	1
	3,8							1															1
	4,0							1															1
	4,2							1				1											1
	4,4							1					1										1
	4,6		1					1															1
	4,8																						0
	5,0		1			1				1			1										1
	5,2																						0
	5,4														1								1
	5,6					1				1			1						1			1	1
	5,8							1														1	1
	6,0							1					1		1							1	1
	6,2		1			1	1	1	1					1								1	2
	6,4							1	1	1				1				Schlitters				1	1
	6,6		1					1					1		1				2				2
	6,8																						0
	7,0																						0
	7,2																						0
	7,4														1								1
	7,6		1																				1
	7,8																						0
8,0											1		1	1			Gagering					1	
8,2		1																				1	
8,4																						0	
8,6																						0	
8,8		1																				1	
9,0																						0	
9,2																						0	
9,4		1																				1	
9,6		1				1								1								1	
9,8		1																				1	
10,0														1				2	1			2	
10,2							1										Fügen				1	1	
10,4																					1	0	
10,6																						0	
10,8																						1	
11,0																1						1	
11,2		1														1						0	
11,4																						1	
11,6											1		1	1			Kapfing	1				1	
11,8																						0	
12,0									1													1	
12,2		1									1				1							1	
12,4		1				1																1	
12,6		1																				1	
12,8							1							1				1		1	1	1	
13,0							1															1	
13,2		1				1	1	1						1				2				2	
13,4		1																				1	
13,6																						0	
13,8																						0	
14,0							1															1	
14,2							1															1	
14,4							1									1		2				2	
14,6		1				1	1															1	
14,8							1	1	1													1	
15,0		1					1						1									1	
15,2		1							1				1				Ried i. Z. Ried i. Z.					1	1
15,4		1				1			1														

Bestand	19,4	1			1														1
	19,6																		0
	19,8																		0
	20,0																		0
	20,2	1			1	1			1					Aschau					1
Neubau	20,4	1			1		1												1
	20,6																		0
	20,8	1																	1
	21,0	2																	2
	21,2																		0
	21,4	2																	2
	21,6																		0
	21,8	2	1																2
	22,0																		0
	22,2	2																	2
	22,4									1			1						1
	22,6	2							1										2
	22,8	2							1					Rohrberg					2
	23,0	1																	1
	23,2								1										1
	23,4								1										1
	23,6				1				1										1
	23,8				1				1										1
	23,8		1		1				1			1	1						1
Bestand	23,6		1		1							1	1					1	2
	23,8	1	1		1		1											1	1
	24,0	1			1		1											1	1
	24,2				1					1				Zell a. Z.				1	1
	24,4					1				1				Zell a. Z.				1	1
	24,6	1																1	
	24,8																	0	
	25,0							1							2			2	
	25,2														2			2	
	25,4																	0	
	25,6				1				1					Laimach	1			1	
	25,8				1													1	
	26,0																	0	
	26,2																	0	
	26,4																	0	
	26,6																	0	
	26,8	1																1	
	27,0														2			2	
	27,2									1								1	
	27,4				1					1		1		Ramsau				1	
	27,6	1			1		1		1	1				Ramsau				1	
	27,8								1									1	
	28,0	1	1						1						2			2	
	28,2																	0	
	28,4	1								1								1	
	28,6	1				1			1		1			Bichl				1	
	28,8	2	1		1													2	
	29,0	1			1		1			1								1	
	29,2				1		1	1										1	
	29,4				1	1												1	
	29,6				1													1	
	29,8				1	1												1	
	30,0				1	1												1	
	30,2	2				1												2	
	30,4					1												1	
	30,6	3			1	1	1	1										3	
	30,8	3			1			1			1							3	
	31,0					1												1	
	31,2	1			1		1											1	
	31,4	1			1		1			1				Mayrhofen				1	
	31,6	1				1		1		1				Mayrhofen				1	

Tabelle 45: Bewertungstabelle Streckenbewertung

8.5 Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe

8.5.1 Brücken

	ASFINAG Brücke, Rotholz; Länge ca. 40m				Brücke B169 km 2,8; Länge ca. 13 m				Brücke L216, km 16,8 - Kaltenbach; Länge ca. 10 m			
Brückenhöhe über SOK in mm	5340	5340	5340	5340	5400	5400	5400	5400	5710	5710	5710	5710
Mindest-Fahrdrahthöhe Lichtraumprofil ZVB in mm	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170
Mindest-Fahrdrahthöhe Lichtraumprofil ZVB in mm	5290	5170	5170	5120	5290	5170	5170	5120	5290	5170	5170	5120
Bahnstromsystem	25 kV AC		15 kV AC		25 kV AC		15 kV AC		25 kV AC		15 kV AC	
	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.
Isolationsstrecke bei 25 kV AC lt. EN 50119 in mm	270	150			270	150			270	150		
Isolationsstrecke bei 15 kV AC lt. EN 50119 in mm			150	100			150	100			150	100
Isolationsstrecke bei 3 kV DC lt. EN 50119 in mm												
Isolationsstrecke bei 1,5 kV DC lt. EN 50119 in mm												
Montage Fahrleitung/Deckenstromschiene in mm	15	15	15	15	15	15	15	15	200	200	200	200
Gleisabsenkung in mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Min. Höhe Deckenstromschiene/Fahrleitung	5055	5175	5175	5225	5115	5235	5235	5285	5240	5360	5360	5410
Benötigte Fahrleitungshöhe in mm	5575	5335	5335	5235	5575	5335	5335	5235	5760	5520	5520	5420
Differenz zu benötigter Fahrleitungshöhe in mm	-235	5	5	105	-175	65	65	165	-50	190	190	290
Min. Höhe Deckenstromschiene/Fahrleitung für leistungslos befahrene/geerdete OL in mm	5325	5325	5325	5325	5385	5385	5385	5385	5510	5510	5510	5510
Benötigte Fahrleitungshöhe für leistungslos befahrene/geerdete OL in mm	5305	5185	5185	5135	5305	5185	5185	5135	5490	5370	5370	5320
Differenz zu benötigter Fahrleitungshöhe (leistungslose Befahrung) mm	35	155	155	205	95	215	215	265	220	340	340	390

Tabelle 46: Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe unter Brücken für Wechselspannung (AC)

	ASFINAG Brücke, Rotholz; Länge ca. 40m				Brücke B169 km 2,8; Länge ca. 13 m				Brücke L216, km 16,8 - Kaltenbach; Länge ca. 10 m			
Brückenhöhe über SOK in mm	5340	5340	5340	5340	5400	5400	5400	5400	5710	5710	5710	5710
Mindest-Fahrdrahthöhe Lichtraumprofil ZVB in mm	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170	5170
Mindest-Fahrdrahthöhe Lichtraumprofil ZVB in mm	5170	5070	5120	5070	5170	5070	5120	5070	5170	5070	5120	5070
Bahnstromsystem	3 kV DC		1,5 kV DC		3 kV DC		1,5 kV DC		3 kV DC		1,5 kV DC	
	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.	stat.	dyn.
Isolationsstrecke bei 25 kV AC lt. EN 50119 in mm												
Isolationsstrecke bei 15 kV AC lt. EN 50119 in mm												
Isolationsstrecke bei 3 kV DC lt. EN 50119 in mm	150	50			150	50			150	50		
Isolationsstrecke bei 1,5 kV DC lt. EN 50119 in mm			100	50			100	50			100	50
Montage Fahrleitung/Deckenstromschiene in mm	15	15	15	15	15	15	15	15	200	200	200	200
Gleisabsenkung in mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Min. Höhe Deckenstromschiene/Fahrleitung	5175	5275	5225	5275	5235	5335	5285	5335	5360	5460	5410	5460
Benötigte Fahrleitungshöhe in mm	5335	5135	5235	5135	5335	5135	5235	5135	5520	5320	5420	5320
Differenz zu benötigter Fahrleitungshöhe in mm	5	205	105	205	65	265	165	265	190	390	290	390
Min. Höhe Deckenstromschiene/Fahrleitung für leistungslos befahrene/geerdete OL in mm	5325	5325	5325	5325	5385	5385	5385	5385	5510	5510	5510	5510
Benötigte Fahrleitungshöhe für leistungslos befahrene/geerdete OL in mm	5185	5085	5135	5085	5185	5085	5135	5085	5370	5270	5320	5270
Differenz zu benötigter Fahrleitungshöhe (leistungslose Befahrung) mm	155	255	205	255	215	315	265	315	340	440	390	440

Tabelle 47: Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe unter Brücken für Gleichspannung (DC)

8.5.2 Hochspannungsleitungen

	TINETZ 110 kV Leitung, Zillertalbahn km 1,4 bei Rotholz in mm	TINETZ 110 kV Leitung, Zillertalbahn km 23,0 vor Zell am Ziller in mm	APG 220 kV Leitung, Zillertalbahn km 30,6 vor Mayerhofen in mm	APG 110 kV Leitung, Zillertalbahn km 30,8 vor Mayerhofen in mm
Leitungshöhe lt. Vermessung (unbekannter Lastfall) in mm	13600		10750	9190
Quelle	ZVB, Laser- vermessung		ZVB, Laser- vermessung	ZVB, Laser- vermessung
Leitungshöhe für höchste Leitertemp. 80°C in mm	11640	11000	9390	8550
Quelle	TINETZ	TINETZ	APG (*)	APG (*)
Abstand höchste Temp. und Sonderlastfall 6 in mm	2160	2010	3200	2500
Leitungshöhe für Sonderlastfall 6 in mm	9480	8990	6190	6050
Quelle	TINETZ	TINETZ	Annahme	Annahme
Mindest-Fahrdrahthöhe Lichtraumprofil ZVB in mm	5170	5170	5170	5170
Durchmesser Fahrdrabt in mm	10	10	10	10
Abstand Fahrdrabt-Tragseil in mm (Variation)	150	150	150	150
Durchmesser Tragseil mm	10	10	10	10
Mindestluftstrecke zu Gegenständen mit Erdpotential lt. EN 50341-1: D _{el} bis 123 kV in mm	1000	1000		1000
Mindestluftstrecke zu Gegenständen mit Erdpotential lt. EN 50341-1: D _{el} bis 245 kV in mm			1700	
Mindestabstand von Hochspannungsleitungen zu Teilen der elektrischen Energieversorgung von Eisenbahnen in Luft lt. EN 50341-1: 2,0 m + D _{el} , min. 2,6 m in mm	3000	3000	3700	3000
Gleisabsenkung in mm	0	0	0	0
Leitungserhöhung in mm	0	0	0	0
Max. Höhe Fahrleitung in mm	6310	5820	2320	2880
Benötigte Strom-Leitungshöhe für höchste Leitertemp. 80°C in mm	10500	10350	12240	10840
Differenz zu benötigter Strom-Leitungshöhe in mm	1140	650	-2850	-2290
Max. Höhe Fahrleitung, leistungslose Befahrung in mm	8470	7830	5520	5380
Benötigte Strom-Leitungshöhe für leistungslos befahrene/geerdete OL in mm	10300	-2660	10400	8980
Differenz zu benötigter Strom-Leitungshöhe, leistungslose Befahrung in mm	3300	2660	350	210

(*) Bei Sicherheitsabständen für den Sonderlastfall 6 bei den APG Leitungen bei km 30,6 und 30,8 handelt es sich um grobe Schätzungen, die jedenfalls vorbehaltlich einer eingehenden Prüfung durch den Übertragungsnetzbetreiber APG zu verstehen sind. Es zeigt sich jedoch unabhängig vom genauen Maß, dass für den Fall der Anwendung der Schutzabstände nach Sonderlastfall 6 die notwendige Leitungshöhe nicht gegeben ist.

Tabelle 48: Auswertung zur benötigten Fahrleitungshöhe unter Hochspannungsleitungen

8.6 Einschränkungen

8.6.1 Brücken/Unterführungen

km 1,4:

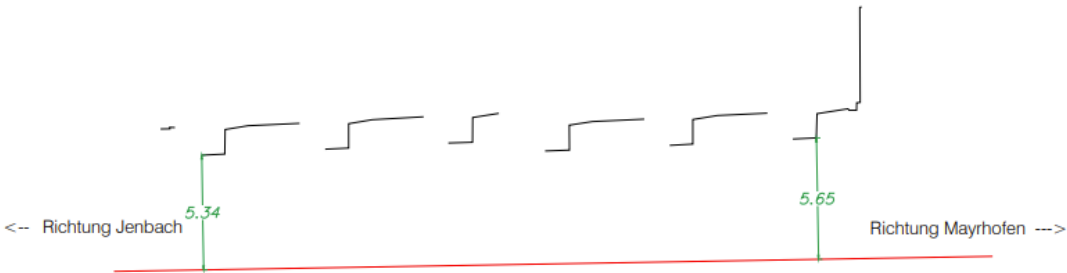
Ort: Strecken-km 1,4 – (47.392321, 11.794934) bei Rotholz	
Einschränkung	Beschreibung
<u>Unterführung</u> Kategorie: 3	Realisierung Fahrleitung: Oberleitung - Lichte Höhe der Unterführung, gemessen (ZVB): 5,655 m - Mastgasse links: wenig Platz
	
km 1.4 bei Rotholz Unterführung A12 	

Abbildung 17: Unterführung, km 1,4 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH)

Ort: Strecken-km 1,4 – bei Rotholz	
Einschränkung	Beschreibung
<u>Brücke</u> Straßen-/Bahn-Brücke über Fluss (Inn) Kategorie: 3	- Statische Belastung durch Mastgewicht und Zugkrafteinleitung durch Oberleitung zu klären - Rechte Dritter betroffen
	

km 2,8:

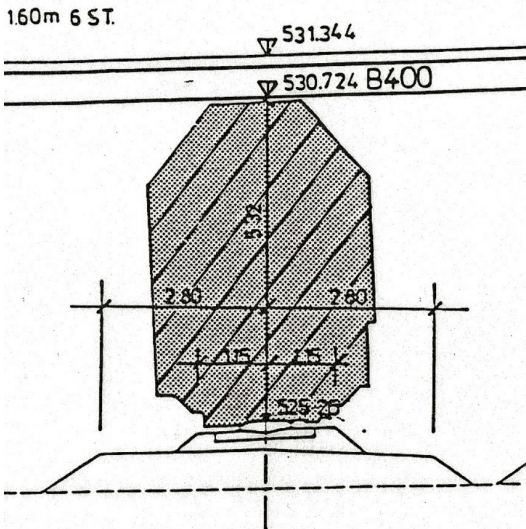
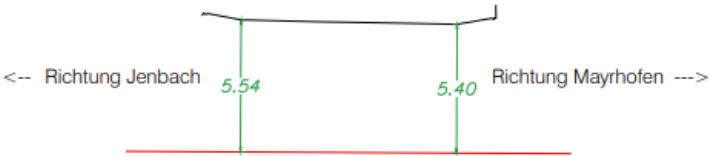
Ort: Strecken-km 2,8 – (47.393385, 11.811531) zw. Rotholz und Strass i. Zillertal	
Einschränkung	Beschreibung
<u>Unterführung</u> Straßenbrücke (über Bahn, Straße) Bundesstraße B169, Zillertalstraße, bei Brettfalltunnel zw. Schlitters u. Wiesing Kategorie: 3	Lichte Höhe der Unterführung (lt. Plan): 530,724 m - 525,26 m = 5,464 m Rechte Dritter betroffen
	
	km 2.8 zw. Rotholz und Strasss i. Zillertal Straßenbrücke Bundesstraße B169, Zillertalstraße 

Abbildung 18: Unterführung, km 2,8 (Plan Brückenbau Land Tirol, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

km 16,8:

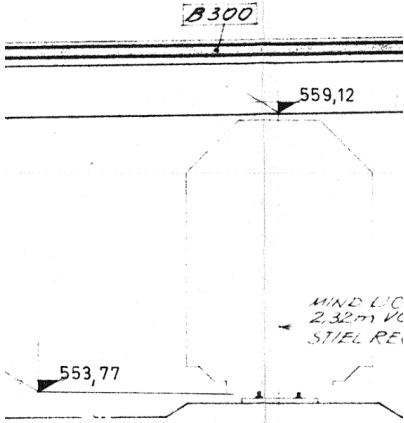
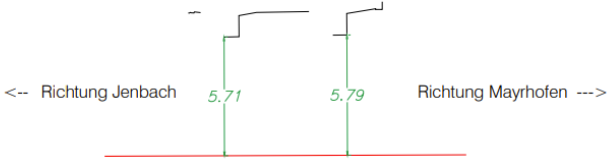
Ort: Strecken-km 16,8 – (47.289768, 11.878259) in Kaltenbach	
Einschränkung	Beschreibung
<u>Unterführung</u> Straßenbrücke Landesstraße L 216, Dorfstraße Kaltenbach Kategorie: 3	Lichte Höhe der Unterführung (lt. Plan): 559,12 m – 553,77 m = 5,35 m
	
	km 16,8 in Kaltenbach Unterführung / Straßenbrücke Landesstraße L216, Dorfstraße Kaltenbach 

Abbildung 19: Unterführung, km 16,8 (Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

8.6.2 Hochspannungsleitungen

km 1,4:

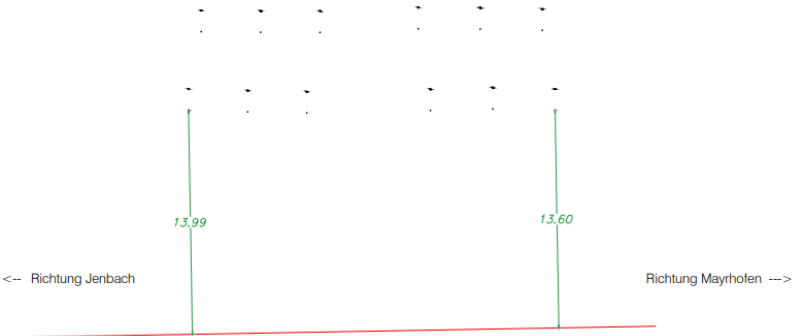
Ort: Strecken-km 1,4 – (47.392314, 11.794907) bei Rotholz	
Einschränkung	Beschreibung
Hochspannungsleitung (110 kV, TINETZ) Kategorie: 2	Lichte Höhe zu Oberleitung gering
	
km 1.4 bei Rotholz Hochspannungsleitung (110kV, TINETZ) gemessen am 24.10.2024 	

Abbildung 20: Hochspannungsleitung TINETZ, km 1,4 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH)

Neubau km 23,0:

Ort: Strecken-km 23,0 – (47.241038, 11.897056) zw. Aschau und Zell am Ziller	
Einschränkung	Beschreibung
Hochspannungsleitung 110 kV (TINETZ) Kategorie: 2	Lichte Höhe zu Oberleitung gering
 	

Abbildung 21: Hochspannungsleitung TINETZ, Neubau km 23,0 (Google Earth)

km 30,6:

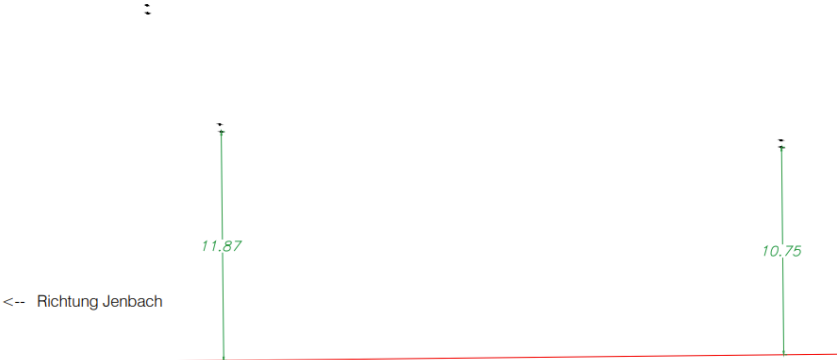
Ort: Strecken-km 30,6 – (47.178301, 11.865395) bei Laubichl, Mayrhofen	
Einschränkung	Beschreibung
Hochspannungsleitung 220 kV (APG) Kategorie: 3	Lichte Höhe über Gleisachse gering, Höhe lt. APG: 9,5 m
	
km 30,6 bei Laubichl, Mayrhofen Hochspannungsleitung 220kV (APG) gemessen am 24.10.2024 	

Abbildung 22: Hochspannungsleitung APG, km 30,8

km 30,8:

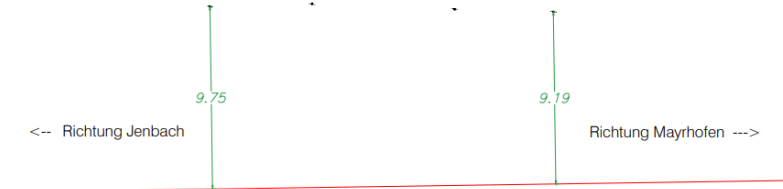
Ort: Strecken-km 30,8 – (47.176893, 11.865427) bei Laubichl, Mayrhofen	
Einschränkung	Beschreibung
Hochspannungsleitung 110 kV (APG) Kategorie: 3	Lichte Höhe über Gleisachse gering, Höhe lt. APG: 8,3 m
	
km 30,8 bei Laubichl, Mayrhofen Hochspannungsleitung 110kV (APG) gemessen am 24.10.2024 	

Abbildung 23: Hochspannungsleitung APG, km 30,8

8.6.3 Mittelspannungsleitungen

Neubau km 21,0:

Ort: Strecken-km 21 – (47.257687, 11.899964) zw. Aschau und Zell am Ziller	
Einschränkung	Beschreibung
Mittelspannungsleitung (TINETZ) Kategorie: 2	Lichte Höhe zu Oberleitung gering
	

Abbildung 24: Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 21,0 (Google Earth)

Neubau km 21,4:

Ort: Strecken-km 21,4 – () zw. Aschau und Zell am Ziller	
Einschränkung	Beschreibung
Mittelspannungsleitung (TINETZ) Kategorie: 2	Lichte Höhe zu Oberleitung gering
	

Abbildung 25: Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 21,4 (Google Earth)

Neubau km 21,8:

Ort: Strecken-km 21,8 – () zw. Aschau und Zell am Ziller	
Einschränkung	Beschreibung
Mittelspannungsleitung (TINETZ) Kategorie: 2	niedrige Mittelspannungsleitung, verläuft im Bereich neuer Gleisachse verm. aber als Erdkabel
	

Abbildung 26: Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 21,8 (Google Earth)

Neubau km 22,6:

Ort: Strecken-km 22,6 – (47.242772, 11.899867) zw. Aschau und Zell am Ziller	
Einschränkung	Beschreibung
Mittelspannungsleitung (TINETZ) Kategorie: 2	Lichte Höhe zu Oberleitung gering

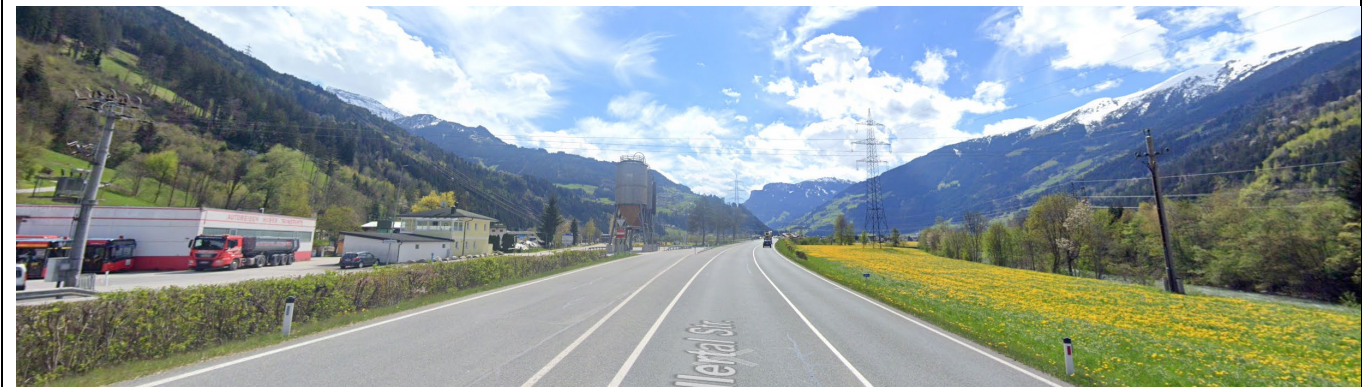


Abbildung 27. Mittelspannungsleitung TINETZ, Neubau km 22,6 (Google Earth)

km 28,8:

Ort: Strecken-km 28,8 – (47.193792, 11.870076) Bichl	
Einschränkung	Beschreibung
Mittelspannungsleitung (TINETZ) Kategorie: 2	Lichte Höhe zu Oberleitung gering
	

Abbildung 28: Mittelspannungsleitung TINETZ, km 28,8 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH)

km 30,2:

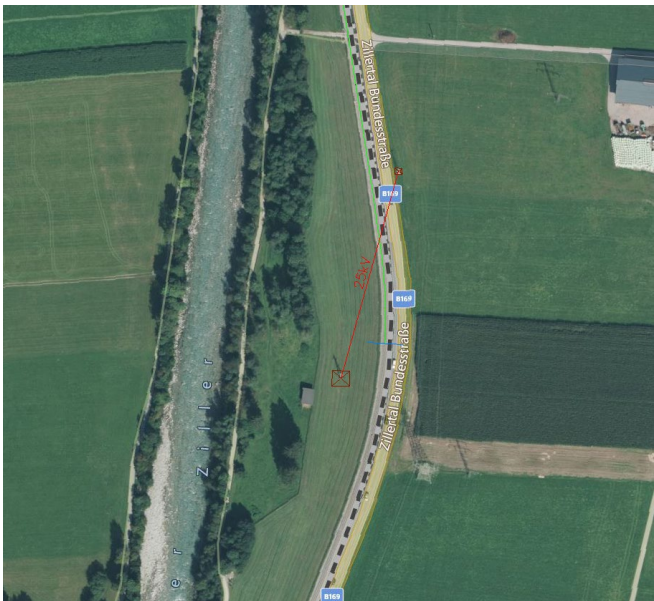
Ort: Strecken-km 30,2 – (47.182242, 11.866656) zw. Bichl und Mayrhofen	
Einschränkung	Beschreibung
Mittelspannungsleitung (TINETZ) Kategorie: 2	Lichte Höhe zu Oberleitung gering
	

Abbildung 29: Mittelspannungsleitung TINETZ, km 30,2 (Befahrungsvideo ACTES Bernard GmbH)

8.6.4 Telekomleitungen

Die Erd-Verlegung der beiden Telekomleitungen auf den beiden folgenden Abschnitten wurde bereits seitens ZVB veranlasst.

km 23,6/23,8:

Ort: Strecken-km 23,6/23,8 – (47.235684, 11.883844) Zell am Ziller	
Einschränkung	Beschreibung
Telekomleitung A1 Kategorie (vor Verlegungsveranlassung): 3	Leitung entlang Trasse und querend KG-Nr.: 87124, Zell am Ziller Querung, Parz.nr.: 150/6 (links), 150/3 (rechts)
	
	

Abbildung 30: Stromleitung, km 23,6/23,8 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

km 28,0:

Ort: Strecken-km 28,0 – (47.201185, 11.870626) Ramsau im Zillertal	
Einschränkung	Beschreibung
Telekomleitung A1 Kategorie (vor Verlegungsveranlassung): 3	Leitung entlang Trasse und querend KG-Nr.: 87114, Ramsau im Zillertal Querung, Parz.nr.: 516 (links), .513 (rechts)
	

Abbildung 31: Telekomleitung, km 28,0 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

km 3,0:

Ort: Strecken-km 3,0	
Einschränkung	Beschreibung
Engstelle Grundstück Kategorie: 2	Abstand Gleisachse-Grundstücksgrenze < 2,6 m
	

Abbildung 32: Engstelle Grundstück, km 3,0 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

Ort: Strecken-km 3,2	
Einschränkung	Beschreibung
Engstelle Grundstück Kategorie: 2	Abstand Gleisachse-Grundstücksgrenze < 2,6 m
	

Abbildung 33: Engstelle Grundstück, km 3,2 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

km 3,6:

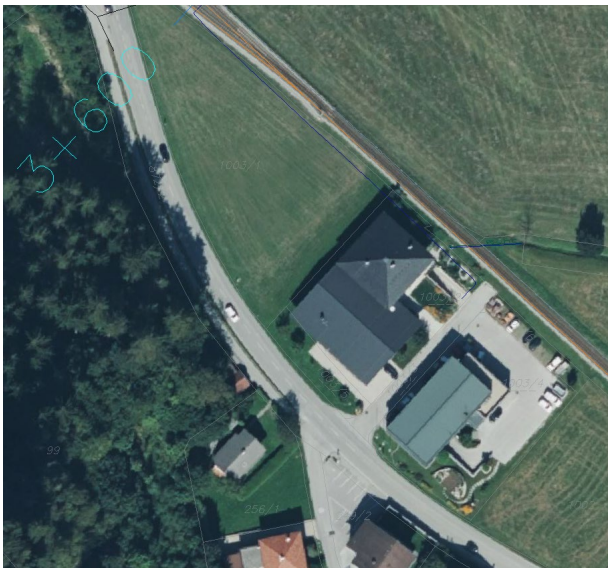
Ort: Strecken-km 3,6	
Einschränkung	Beschreibung
Engstelle Grundstück Kategorie: 2	Abstand Gleisachse-Grundstücksgrenze < 2,6 m
	

Abbildung 34. Engstelle Grundstück, km 3,6 (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

km 23,8 - 24,4: Erklärung

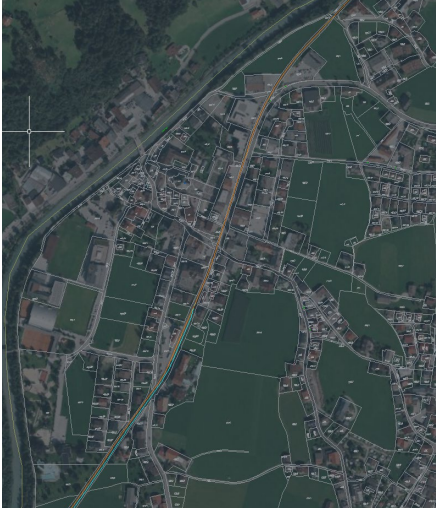
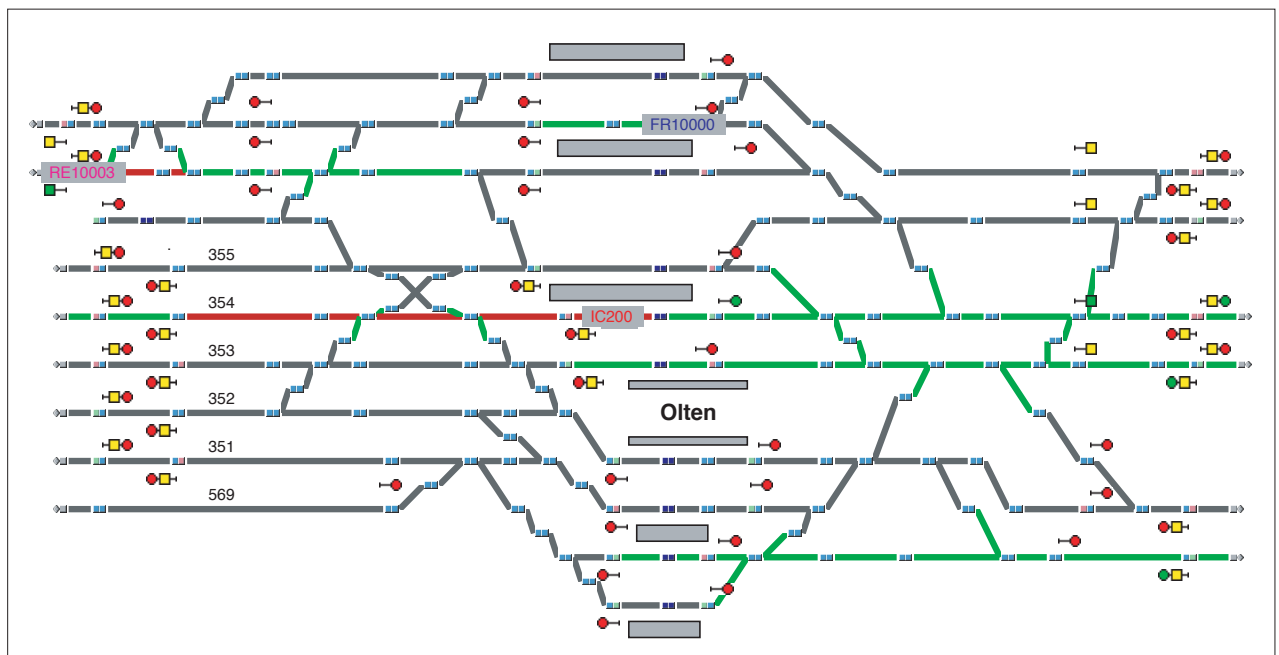
Ort: Strecken-km 24,0 – 24,4 – Zell am Ziller	
Einschränkung	Beschreibung
Engstelle, Stadtkern - Zell am Ziller Kategorie: 2	Abstand Gleisachse-Grundstücksgrenze < 2,6 m
	
	
	

Abbildung 35: Engstelle, km 24,0 – 24,4 Zell am Ziller (Plan, Befahrungsvideo - ACTES Bernard GmbH)

Projektname: Variantenprüfung für Lade- und Versorgungseinrichtungen der Zillertalbahn
Projektnummer: P013672
Inhalt: Bericht

8.7 Fahrdynamisches Betriebssimulationsmodell OpenTrack

OpenTrack - Betriebssimulation von Eisenbahnnetzen



Funktionen von OpenTrack

OpenTrack ist ein Planungs- und Simulationswerkzeug für den Eisenbahnbetrieb, welches am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich entwickelt wurde. OpenTrack bietet Unterstützung für folgende Aufgaben:

Betrieb

- Kapazitätsbestimmung von Knoten
- Kapazitätsbestimmung von Strecken
- Auffinden von Kapazitätsengpässen
- Berechnen von Zugfolgezeiten
- Belegungszeiten von Stationsgleisen
- Optimierung von Zugläufen
- Bestimmen der Auswirkungen von Störungen auf das Gesamtnetz
- Planung von Baustellen im Netz
- Visualisierung der Betriebsvorgänge (Fahrzeuge, Fahrwege, Signale)

Infrastruktur

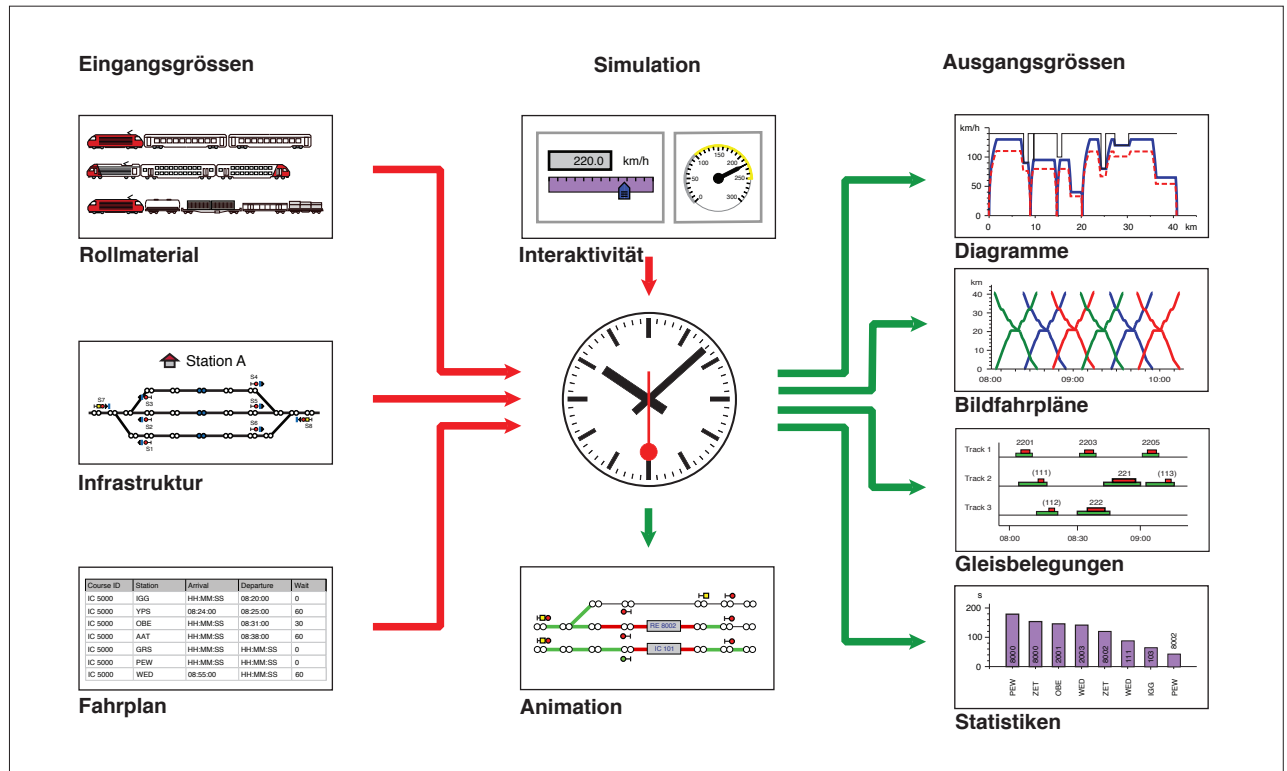
- Durchrechnen verschiedener Infrastrukturvarianten
- Bestimmung des Ausbaubedarfs
- Bemessung von Sicherungsanlagen
- Verwaltung der Infrastrukturdaten mittels grafischer Benutzeroberfläche

Fahrplan

- Fahrzeiten berechnen
- Machbarkeit und Stabilität von Fahrplänen und Anschlüssen prüfen, Konflikte erkennen

Rollmaterial

- Planen von Umläufen, Einsatzplanung
- Anforderungen an zukünftige Fahrzeuge bestimmen



Arbeitsweise von OpenTrack

Der Ablauf einer Simulation ist in obiger Abbildung dargestellt. Vordefinierte Züge bewegen sich unter den Randbedingungen der Fahrplandaten auf einer definierten Gleistopologie. Die gemischt diskret/kontinuierliche Simulation berechnet einerseits die numerische Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung der Fahrzeuge (kontinuierlicher Teil), andererseits werden die diskreten Vorgänge im System (Wechsel von Stellwerkzuständen, Verspätungsverteilungen) simuliert.

Während der Simulation kann die Gleistopologie in einem Animationsmodus betrachtet werden. Dabei werden die fahrenden Züge, die vorbereiteten Fahrwege und die aktuellen Signalstellungen visualisiert. Die Simulation kann jederzeit unterbrochen werden, um so bei Bedarf direkt in den Ablauf eingreifen und gewisse Randbedingungen ändern zu können.

Nach dem Simulationslauf stehen verschiedene Auswertungen zur Verfügung:

- Strecken/Geschwindigkeitsdiagramme
- Gleisbelegungen
- Beschleunigungsverhalten
- Protokolle über Behinderungen und Störungen
- Bildfahrpläne (Grafische Fahrpläne)
- Sperrzeitentreppen
- Zugkraftverlauf
- Soll/Ist-Vergleich von Fahrplandaten

OpenTrack läuft auf allen gängigen Computersystemen (Windows XP / Vista / 7 / 8 / 10 und Mac OS X).