



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Bewertung unterschiedlicher Konzepte zur Dekarbonisierung der Zillertalbahn in Tirol



Positionspapier mit dem Stand der Technik von 2023

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

www.tuwien.at



© ZVG, Internet-Startseite www.zillertalbahn.at

Autoren

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

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

Wien, Mai 2024

10 Zusammenfassung & Ausblick

10.1 Resumee

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

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

Fahrzeuge

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Infrastruktur

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

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

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

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

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

Synergien

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

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

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

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

Studien

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

10.2 Offene Punkte

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

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

In der Modellbildung des **Wirtschaftlichkeitsmodells** konnten die

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

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

10.3 Nächsten Schritte

Drei Schritte werden empfohlen, zeitgleich durchzuführen:

1. Gezielte Gespräche mit Pinzgaubahn, Murtalbahn und ggf. Niederösterreich Bahnen, ob und ggf. welches gemeinsame Antriebskonzept trotz aller bereits gefassten Beschlüsse noch möglich ist. Mit Akku-Hybrid-Zügen können grundsätzlich alle Bedürfnisse dieser Betreiber abgedeckt werden.
Vorgespräche mit potentiellen Fahrzeuglieferanten.
2. Festlegung der Anzahl Züge für die Zillertalbahn, dazu u.a.
Verfeinerung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung innerhalb des ausgewählten Konzeptes gemäß den gelisteten offenen Punkten insbesondere in Hinblick auf zukünftige Angebotsverdichtungen
3. Angepasste, detaillierte Ermittlung der Infrastrukturkosten entsprechend der Konzeptauswahl, im Falle Akku-Hybrid-Konzept z.B. die detaillierte Umsetzbarkeit der Ladeinfrastruktur (Akkugröße, Unterwerke, Oberleitungsabschnitte, etc.)

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Neuausschreibung der Fahrzeuge inkl. eines optionalen Wartungsvertrags empfohlen. Die Infrastrukturanpassungen sollen entsprechend dem ausgewählten Konzept zur Ausschreibung gelangen. Will man den Güterverkehr zeitnahe auf Basis neuer Triebfahrzeuge dekarbonisieren, so sollte die Anzahl zu bestellender Züge um eins erhöht werden. Dies stellt zudem eine zusätzliche Sicherheit gegen die Unwägbarkeiten von Kollisionen an Eisenbahnkreuzungen dar. Mit 10 Zügen (6 + 4 Angebotsverdichtung) sind beide Aspekte jedenfalls abgebildet.

10.4 Management-Summary

- Aufgrund der notwendig zeitnahen Realisierung wird die **Akku-Hybrid Lösung** als beste Variante empfohlen
 - differentielle Betriebskosten ähnlich gering wie vollelektrische Triebwagen (EMU)
 - kein Investitionsverlust, da voll aufwärtskompatible Systemarchitektur,
 - Züge könnten später zu EMUs umgebaut werden, um Austausch von Akkus zu vermeiden, Fahrzeuggewicht und Energieverbrauch sowie die Betriebskosten weiter zu senken, umgekehrt ist ein Nachrüsten der Hochspannungsausrüstung reiner Akku-Fahrzeuge kaum realistisch
- **Einsparungsmöglichkeiten** durch gemeinsamen Einkauf mit Pinzgau- und Murtalbahn, u.a.
 - eine Fahrzeugplattform ermöglicht rein elektrisch, rein Akku und Akku-hybrid bzw. baugleiche Züge
 - gemeinsame Ersatzteilbeschaffung und deutlich geringere Wartungskosten
- **Nachhaltigkeit:** später weiterer Ausbau der Oberleitung mit zusätzlichen Kosten- und Betriebsvorteilen möglich
 - Mobilitätsplan und alle Bauvorhaben unbeeinflusst,
 - Umbau Bhf. Mayrhofen als zentrale Verkehrsdrehscheibe zu Bus und P&R, sowie Ergänzung einer Abstellhalle für Züge bleiben unverändert sinnvoll. Vereinfachte Oberleitung zum Nachladen.
- Voller (Fahrgast-)Nutzen kann auch **ohne Abschluss einer Vollelektrifizierung** realisiert werden
- Realisierung **in 4 bis 5 Jahren** „unter besten Umständen“ möglich
 - Inkl. aus mehreren Gründen sinnvoll erscheinender Fahrzeugneuausschreibung
 - Festlegung von Oberleitungsabschnitten berücksichtigt den Zeithorizont
- **Synergien durch Nutzung** von gemeinsamen Ladestationen **für Bus und Dritte** (idealerweise bei den Unterwerken) können gleichermaßen sichergestellt werden.
 - Güterverkehr kann mit den Zusatzfahrzeugen späterer Angebotsverdichtungen, dem Zweigleisabschnitt Schlitters – Gagering und punktuellen Maßnahmen dekarbonisiert werden
 - Nutzungskonzept lokaler Energie kann durch geschirmte Erdspeiseleitung in Bahntrasse zu Unterwerken aufrecht bleiben, bestehende Steuerungskabel und Lichtwellenleiter sind zu berücksichtigen.