

H2 Zillertal: Zillertalbahn 2020+

VD Dipl.-Ing. Helmut Schreiner

Zillertaler Verkehrsbetriebe AG
Zillertalbahn
Austraße 1
6200 Jenbach
Österreich
Tel: +43 (0) 52 44 - 606-0
Fax: +43 (0) 52 44 - 606-39
E-Mail: helmut.schreiner@zillertalbahn.at



Dipl.-Ing. Nikolaus Fleischhacker

Green Energy Center Europe
FEN Sustain Systems GmbH
Technikerstraße 1a
6020 Innsbruck
Österreich
Tel: +43 (0) 512 209 039 11
Fax: +43 (0) 512 209 039 1
E-Mail: nikolaus.fleischhacker@green-energy-center.com

Auf der 32 km langen Schmalspurstrecke der Zillertalbahn von Jenbach nach Mayrhofen pendeln Fahrzeuge, die in den 80er Jahren gebaut und in Betrieb genommen wurden. Diese erreichen in den nächsten Jahren ihr Lebensende. Dem alternden Fahrzeugbestand steht eine seit Jahren angespannte Verkehrssituation im Tal gegenüber, die zu stetig steigenden Fahrgastzahlen der Bahn führt. So wurden 2016 ca. 2,4 Mio. Fahrgäste befördert.

Daher sollen mit dem Projekt „Zillertalbahn 2020+“ die Bahninfrastruktur und die Schienenfahrzeuge erneuert werden. Von besonderer Bedeutung für Betreiber und Talschaft ist die zum Einsatz kommende Traktionsart. So sind Fahrleitungsanlagen und damit einhergehende zusätzliche Masten im touristisch genutzten Tal grundsätzlich unerwünscht. Trotzdem soll die Bahn mit den eigenen grünen Ressourcen des Zillertals im Einklang mit der Tiroler Energiestrategie „Tirol 2050 energieautonom“ betrieben werden. Um die Herausforderungen der dafür notwendigen noch jungen Wasserstofftechnologie verantwortungsvoll zu begegnen, wurde im Labor für digitale Prozessinnovation (LDPI) des Green Energy Center Europe in Innsbruck in Kooperation von FEN-SYSTEMS und HyCentA das Start-Up HyWest eingerichtet. HyWest wird das Projekt in allen Belangen von der Genehmigung, über die Zulassung und Abnahme, das Monitoring und die Qualitätssicherung der Abwicklungs- und Betriebsprozesse bis hin zur Dissemination begleiten.

Im vorliegenden Artikel werden in einem Fahrzeugvergleich herkömmliche Oberleitungstriebzüge einem neu zu entwickelnden Wasserstoff-Elektrotriebwagenzug gegenübergestellt. Auch wird die für solche Züge notwendige Wasserstoff-Infrastruktur erläutert und dargelegt, wie eine Energiebereitstellung aus grünen Ressourcen Konkurrenzfähig zum Dieselbetrieb und auch Oberleitungsbetrieb erfolgen kann. Abschließend werden Aspekte der Sicherheit der Wasserstofftechnologie erläutert.

Dekarbonisierung und Attraktivierung der Zillertalbahn

Die Zillertalbahn ist eine österreichische Schmalspurbahn mit bosnischer Spurweite von 760 mm. Die 31,74 km lange vorwiegend eingleisige Strecke mit zweigleisigen Abschnitten führt von Jenbach durch das Zillertal in Tirol nach Mayrhofen und überwindet dabei 70 Höhenmeter. Damit ist die Charakteristik einer Flachlandbahn gegeben.

Eigentümer und Betreiber der Bahn ist die „Zillertaler Verkehrsbetriebe AG“ mit Sitz in Jenbach. Mit gesamt 165 Mitarbeitern wird neben der Bahn auch eine Flotte von 50 Dieselbussen betrieben und einen Dampfbahnzug für den touristischen Einsatz unterhalten.

Die derzeit im Einsatz befindlichen Fahrzeuge – 2 bis 3-fach Garnituren mit Lokomotive – wurden in den 80er Jahren gebaut und in Betrieb genommen. Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens auf den Straßen des Zillertals nehmen die Fahrgastzahlen der Bahn jährlich zu. 2016 konnten mit den Bestandszügen 2,4 Mio. Fahrgäste befördert werden. Dafür wurden rund 0,6 Mio. km zurückgelegt, ca. 0,8 Mio. Liter Diesel verbraucht – das entspricht rund 1,3 Liter Diesel pro km – und rund 2,2 Mio. kg CO₂ ausgestoßen.

Die sich seit nunmehr 35 Jahren in Betrieb befindlichen Fahrzeuge erreichen in Bälde das Ende ihrer Lebenserwartung. Daher soll mit dem Projekt „Zillertalbahn 2020+“ die Streckenführung aufgewertet werden und die Umstellung auf neue „grüne“ Fahrzeuge erfolgen. Die Traktion der neuen Fahrzeuge soll dabei in Einklang mit der Tiroler Energiestrategie „Tirol 2050 energieautonom“ unter Einsatz der eigenen Ressourcen des Zillertals bewerkstelligt werden. Zudem sollen die neuen Fahrzeuge mit 250 – gegenüber 130 Sitzplätzen bisher – dem steigenden Fahrgastzahlen Rechnung tragen und dabei wesentlich mehr Comfort bieten. Diese Maßnahmen sollen das Angebot auf der Schiene zusätzlich attraktivieren.

Fahrzeugvergleich

Aufbauend auf den Ergebnissen der Studie „PROJEKTBERICHT ZUR ATTRAKTIVIERUNG DER ZILLERTALBAHN 2020+“ [1] werden für das gegenständliche Projekt aufbauend auf einer Basisvariante eines Oberleitungs-Elektrotriebwagenzug mit Gleichstrom im Green Energy Center Europe [2] von Zillertalbahn und FEN-SYSTEMS [3] mit Experten von HyCentA [4] und Molinari [5] die zwei Fahrzeugvarianten

- Wechselstrom-Oberleitungs-Hybrid-Elektrotriebwagenzug und
- Wasserstoff-Elektrotriebwagenzug

entwickelt. Für diese Varianten werden technische Mindestvoraussetzungen definiert. So soll jeweils ein 4-teiliger Triebwagenzug mit einer Gesamtlänge von 75 m realisiert werden. In sensiblen Bereichen der Strecke wie Ortsdurchfahrten soll ein oberleitungsfreier Betrieb durch den Einsatz von Hybridtechnik ermöglicht werden. Die Züge sollen weiters einen neuen Fahrplan im Halbstundentakt von 6 bis 22 Uhr ermöglichen. Daraus ergeben sich 66 Fahrten pro Tag die mit zumindest 4 Garnituren durchgeführt werden können. Das entspricht 528 km pro Tag und Zug. Die Jahreskilometerleistung aller Züge ergibt sich weiter zu ca. 770000 km.

Weiters soll eine Fahrzeitverkürzung von derzeit 55 min auf 45 min für den Regelfahrplan bzw. 36 min für zusätzliche REX-Züge ermöglicht werden. Um diesen Fahrplan inkl. Sicherheiten abzudecken, sollen 6 Fahrzeuge angeschafft werden. Das führt weiter zu einer Betriebsdauer von ca. 3000 h je Fahrzeug.

Um die Fahrzeitverkürzung zu realisieren, ist vor allem ein hohes Beschleunigungsvermögen von 1 m/s² notwendig. Bei einer Antriebsleistung von 1000 kW kann dieses bis ca. 30 km pro h ermöglicht werden und nimmt anschließend mit steigender Geschwindigkeit begrenzt durch die Maximalleistung von 1000 kW ab.

Weiters sollen Betankungsvorgänge aufgrund der geringen Wendezeiten von 15 min nach Möglichkeit außerhalb der Betriebszeit einmal täglich erfolgen.

Basisvariante 0: Gleichstrom Elektrotriebwagenzug

Basis für alle weiteren Überlegungen ist ein Gleichstrom Elektrotriebwagenzug. Dieser wird mit 1500 V Gleichstrom (DC) aus der Oberleitung gespeist. Der 4-teilige Zug für die Spurwei-

te 760 mm mit einem minimalen Kurvenradius von 80 m ermöglicht eine Leistung am Rad von mehr als 1000 kW bei einer Anfahrzugkraft von 150 kN.

Diese Basisvariante stellt das einfachste Fahrzeug dar. Im Zug ist keine aufwändige Umrichtertechnik notwendig. Dafür ist aber die teuerste Fahrleitungsausstattung der vorgestellten Varianten mit zusätzlichen Infrastrukturanlagen notwendig.

Variante 1: Wechselstrom Oberleitungs-Hybrid-Elektrotriebwagenzug

Um den geforderten oberleitungsfreien Betrieb in sensiblen Bereichen von Ortsdurchfahrten zu ermöglichen, werden bei der vorliegenden Variante zwei Traktionsakkus mit einem Speichervermögen von je 42 kWh netto und einer Leistung von je 300 kW in den Fahrzeugunterboden integriert. Die Versorgung der Bahn mit elektrischer Energie erfolgt über eine Oberleitung mit Wechselspannung (AC) mit einer Spannung von 25 kV bei 50 Hz [6]. Hierdurch werden zwei Gleichrichter mit je 700 kW je Steuerwagen notwendig, die ebenso im Fahrzeugunterboden integriert werden.

Die zusätzliche Technik im Fahrzeug führt zu einem Raummehrbedarf für ebendiese von ca. 0,25 % des Fahrzeugvolumens – 1,5 m³ bei 650 m³ – und einer Zusatzmasse von ca. 5 % – 6 Tonnen bei 113 Tonnen Gesamtmasse. Aufgrund der Integration massereicher Komponenten in den Unterboden ist die Kippstabilität der Schmalspurbahn sichergestellt.

Die für diese Variante notwendige Fahrleitungsausstattung mit Wechselspannung ist günstiger als für die Gleichstromvariante. Zum einen sind aufgrund der hohen Spannung und des damit einhergehenden geringeren relativen Spannungsabfalles weniger Einspeisepunkte notwendig. Zum anderen kann die notwendige Spannung aufgrund der zum Einsatz kommenden Netzfrequenz von 50 Hz technisch einfach erfolgen.

Variante 2: Wasserstoff-Elektrotriebwagenzug

Die Variante Wasserstoffelektrischer-Triebwagenzug ermöglicht den oberleitungsfreien Betrieb auf dem gesamten Streckenverlauf. Aufgrund der intensiven touristischen Nutzung des Zillertals wird diese Möglichkeit ohne zusätzliche Masten hervorgehoben und begrüßt.

Die Versorgung des Zuges mit elektrischer Energie übernehmen 4 PEM¹-Brennstoffzellen (PEM-BZ) mit je 100 kW Leistung. Dabei werden je 2 BZ pro Steuerwagen für eine höhere Redundanz und Ausfallsicherheit in einem Technikraum parallel geschaltet. In den Brennstoffzellen werden der Sauerstoff O₂ der Luft und der am Fahrzeugdach gespeicherte Wasserstoff H₂, zu in einer elektrochemischen Reaktion, zu elektrischer Energie und Wasserdampf in einer sogenannten kalten Verbrennung rekombiniert. Dabei können aus 1 kg_{H₂} ca. 17 kWh elektrische Energie gewandelt werden. Das entspricht einem Wirkungsgrad von ca. 50 %. Die garantierte Lebensdauer der evaluierten Schwerlast-Brennstoffzellen erreichen je nach Hersteller bis zu 25.000 Betriebsstunden.

Der notwendige Wasserstoff wird in Wasserstoffdrucktanks mit einem Nominaldruck von 350 bar Druck am Fahrzeugdach der Zwischenwagen gespeichert. Diese fassen gesamt 150 kg_{H₂}. Diese Menge reicht aus um den Zug bei einem Wasserstoffbedarf von 0,3 kg_{H₂} pro km für einen Tag bis zur Betankung außerhalb der Betriebszeiten zu betreiben.

Um die für hohe Beschleunigungen notwendige Traktionsleistung von 1000 kW zu ermöglichen, werden zusätzlich zu den Brennstoffzellen mit 400 kW Pufferakkus mit einer Leistung von 2 x 300 kW und einem Speichervermögen von 2 x 42 kWh im Fahrzeugunterboden vorgesehen. Diese unterstützen somit bei Beschleunigungsvorgängen die Brennstoffzellen um zusätzliche 600 kW. Sie ermöglichen es weiters, einen Großteil der kinetischen Energie des

¹ PEM steht für Proton Exchange Membrane

Fahrzeugs, die beim Bremsvorgang durch Rekuperation in elektrische Energie gewandelt wird, zwischenzuspeichern.

Der im Vergleich zur Basisvariante notwendige zusätzliche Raumbedarf beträgt ca. 1 % – 6 m³ bei 650 m³ – bei einer Zusatzmasse von ca. 5 % – 6 Tonnen bei 113 Tonnen Gesamtmasse. Auch bei dieser Variante ist das Schwerpunktsproblem beherrschbar.

Der technische Mehraufwand der Fahrzeuge führt zu Mehrkosten von ca. 20 % zu Variante 1. Auch eine Wasserstoff-Infrastruktur für Elektrolyse, Speicherung, Distribution, Verdichtung und Betankung ist notwendig. Jedoch entfallen die hohen Investitionskosten der Fahrleitungsanlage von ca. 22 Mio. €.

Da es sich bei der Wasserstofftechnologie um eine neue Technik mit Produkten und Komponenten im Stadium von Prototypen und 1. Serie handelt, ist für die Genehmigung, die Zulassung und Abnahme und das Monitoring und die Qualitätssicherung der Abwicklungs- und Betriebsprozesse bis hin zur Dissemination eine dafür geeignete Infrastruktur mit den zugehörigen Kompetenzen notwendig. Diese Infrastruktur wurde mit dem Start-Up HyWest im Labor für digitale Prozessinnovation (LDPI) des Green Energy Center Europe in Innsbruck [2] in Kooperation von FEN-SYSTEMS [3] und HyCentA [4] eingerichtet. Sie ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Zusammenarbeit und Interaktion der Projektpartner und positive Disseminierung in Fachkreisen und die breite öffentliche Darstellung des Projektes.

Wasserstoff Infrastruktur und Herstellung

Da die Lastrichtung am Morgen aus dem Zillertal von Mayrhofen nach Jenbach führt, ist die Betankung der Fahrzeuge an einer Wasserstofftankstelle (HRS – Hydrogen Refueling Station) in Mayrhofen naheliegend. Im Zuge der Neuerrichtung des Bahnhofs Mayrhofen, soll hier eine neue HRS mit einem Betriebsdruck von nominal 350 bar – Standard im Schwerlastbereich [7] – errichtet werden. Diese Tankstelle und dessen Tagesspeicher, soll über eine kurze Pipeline mit Wasserstoff aus einer Elektrolyseanlage mit 2 Elektrolyseuren mit je 1,5 MW versorgt werden. Bei einer Effizienz der Anlage von 52 kWh pro kg_{H2} können je Elektrolyseur knapp 700 kg_{H2} pro Tag erzeugt werden und auch der Wasserstoffbedarf an heißen Sommer- und kalten Wintertagen abgedeckt werden. Aus Redundanzgründen steht ein zweiter 1,5 MW Elektrolyseur zur Verfügung. Dieser findet Einsatz bei Ausfall und Wartung. Darüber hinaus kann in dieser Konstellation Netzregelung betrieben werden.

Für die Betankung wird wiederum aus Redundanzgründen und als zusätzliche Rückfallebene bei Streckenunterbrechungen bzw. geplanten Streckensperren eine HRS am Betriebsstandort Jenbach eingeplant. Deren Belieferung soll über Hochdruck-Wasserstoff-Trailer-LKWs realisiert werden.

Wasserstoff Herstellung

Um eine zum Überleitungsbetrieb preislich konkurrenzfähige Wasserstoff-Herstellung zu ermöglichen, wurden basierend auf dem MPREIS-Business-Case des EU Forschungsprojektes „Demo4Grid“ [8] mehrere mögliche Varianten der Wasserstoffherstellung für die Zillertalbahn entwickelt. Der „Demo4Grid“ Business-Case zur Wasserstoffherstellung sieht den Bezug von elektrischer Energie

- aus Stromnetzregelung,
- dem Kauf günstiger elektrischer Energie auf der Strombörse zu Schwachlastzeiten (z.B. in der Nacht) und
- die Einbindung eines regionalen Laufwasserkraftwerkes mit Direktleitung

vor. Der produzierte Wasserstoff kann somit nicht nur als Brennstoff, sondern auch als Speicherstoff verstanden werden. Die Speicherfähigkeit erlaubt es damit sehr günstigen Strom für die Elektrolyse einzukaufen.

Variante 1 zur Wasserstoffherstellung für die Zillertalbahn sieht eine Eigenherstellung des Wasserstoffs durch die Zillertaler Verkehrsbetriebe AG vor. Hier wird der Strom direkt von der Strombörse bezogen. Eine derzeit gültige gesetzliche Ausnahmeregelung für Elektrolyseure und Pumpspeicherkraftwerke sieht für diese Anwendungen keine Netzgebühren vor, was sehr günstige Strompreise ermöglicht.

Variante 2 sieht einen lokalen Betreiber vor, der die elektrische Energie von im Zillertal vorhandenen Laufwasserkraftwerken mit Direktleitung bezieht. Wiederum kann aufgrund des Wegfalles von Netzgebühren ein sehr günstiger Strompreis erreicht werden. Zudem hat der Betreiber die Möglichkeit, im Bedarfsfall Strom aus dem Netz an der Strombörse zuzukaufen. Auch der Einsatz der Anlagen zur Netzregelung ist möglich.

Variante 3 sieht die Kooperation mit einem großen Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) vor. Einem solchen Betreiber ist es möglich die Anlage in einem großen Kraftwerkspark zu integrieren. Aus diesem kann Überschussstrom und Strom aus Laufwasserkraft über Direktleitungen ohne Netzgebühren bezogen werden. Es kann Strom an der Strombörse zugekauft werden. Weiters können Netzregelungsdienste angeboten werden. Es ist somit möglich, eine komplette Wasserstoffwirtschaft mit Wasserstoff-Herstellung, -Speicherung und -Distribution für Bahn, Bus, LKW und PKW aufzubauen. Auch der anfallende Sauerstoff kann für Kläranlagen und Industrieprozesse genutzt werden, sowie die anfallende Abwärme einer regionalen Verwertung zugeführt werden. Daraus ergeben sich große Synergiepotentiale und folglich mögliche günstige Wasserstoffpreise.

Ein gewichtiges Motiv für EVUs sich dem Thema Wasserstoff zu widmen, ist dabei der massive Anstieg der volatilen Stromerzeugung, von vor allem Wind und Photovoltaik am europäischen Strommarkt. Diese führen zu einer massiven Steigerung des Überschussstromanteils in den nächsten Jahren.

Szenario Oberleitung

In ersten Prognoserechnungen wurde der durchschnittliche Energiebedarf für die Variante Oberleitung mit 4022 MWh pro Jahr ermittelt. Durch das vorgegebene Bedarfsprofil sind bei der Energiebeschaffung hier keine Freiheitsgrade zur Optimierung vorhanden und aufgrund des Fahrbetriebs zu Peak-Zeiten von 06:00 bis 22:00 Uhr „hohe“ Energiekosten zu erwarten.

Szenario Wasserstoff

Der wasserstoffelektrische Betrieb benötigt im Durchschnitt 500 kg_{H2} pro Tag. An Tagen mit großem Heiz- bzw. Kühlbedarf wird von einem Wasserstoffbedarf von 600 kg_{H2} pro Tag ausgegangen. Für ein Jahr werden somit im Mittel 9890 MWh an elektrischer Energie benötigt. Durch die Möglichkeit der Zwischenspeicherung des produzierten Wasserstoffes, sind wesentliche Freiheitsgrade zur Optimierung der Strombeschaffung vorhanden – Stichwort Sektorenkopplung. Zudem können u.U. bei Variante 3 in Kooperation zusätzliche Standortvorteile genutzt werden, sowie Erlöse am Regelenergiemarkt erzielt werden. Damit sind im Vergleich zum Szenario Oberleitung, deutlich niedrigere Energiekosten zu erwarten. Der günstige Strompreis gepaart, mit dem Mehrbedarf an elektrischer Energie, führt in Summe wiederum auf ähnliche Gesamtkosten beider Szenarien.

Sicherheit der Wasserstofftechnologie

Molekularer Wasserstoff mit der chemischen Formel H_2 ist ein ungiftiges – nicht wassergefährdendes, nicht krebserregendes und leicht abbaubares – und geruchloses Gas. Er besitzt eine hohe Flüchtigkeit. Das heißt, dass er sich bei Austritt umgehend in der Umgebungsluft verteilt und damit rasch ungefährlich wird. Daher ergibt sich eine geringere Explosionsgefahr als bei Benzin. Im Freien kann Wasserstoff faktisch nicht zur Explosion gebracht werden. Zudem werden die Gefahren bei einem Feuer durch die Kombination der Verbrennungs- und Diffusionseigenschaften im Vergleich zu einem Feuer bei dem Benzin im Spiel ist minimiert.

Wasserstofftanks sind eigensicher für den Fall, dass eine Leitung (ab)reißt. Innenliegende Druckminderer sorgen in diesem Fall für einen langsamen Austritt des Wasserstoffs. Im Falle einer Entzündung des austretenden Wasserstoffs, erfolgt ein Abbrand mit fast unsichtbarer Flamme ohne nennenswerte Wärmestrahlung. Zudem gibt es strenge europäische Regelungen für die Zulassung von Wasserstofftanks. Die Freisetzung großer Mengen von Wasserstoff aus Drucktanks ist daher sehr unwahrscheinlich.

Conclusio

In der durchgeführten Vorstudie konnte die Machbarkeit der Vision „H2 Zillertal“ bestätigt werden. Die verantwortungsvolle Entwicklung eines Wasserstoff-Elektrotriebwagenzuges ist anspruchsvoll, aber machbar. Den Mehrkosten der Fahrzeuge und der zusätzlich notwendigen Wasserstoff-Infrastruktur stehen Einsparungen der nicht benötigten teuren Oberleitungsinfrastruktur gegenüber. Auch die Gesamtkosten der Energiebereitstellung sind in etwa auf gleichem Niveau. So kann der Mehrbedarf an elektrischer Energie über einen günstigeren Strompreis aufgehoben werden. Die Energiekosten bei der Varianten sind jeweils deutlich günstiger als der Dieselbetrieb.

Die weitere Entwicklung des Projektes hat nun begonnen. So gibt es Zusagen von Fahrzeugherstellern, dass Angebote gelegt werden. Die dafür notwendige Ausschreibung wird noch 2018 erstellt.

Die Planmäßige Inbetriebnahme der neuen Garnituren soll mit Winterfahrplan 2022 erfolgen.

Literaturhinweise

- [1] DI Torsten Neumann, VVT; DI Dr. Alfred Lintner, Land Tirol, DI (FH) Georg Tollinger, ZVB AG; Studie „Projektbericht zur Attraktivierung der Zillertalbahn 2020+“ Juli 2015
- [2] Green Energy Center Europe in Innsbruck: <https://www.green-energy-center.com/>
- [3] FEN-SYSTEMS: FEN Sustain Systems GmbH; <http://www.fen-systems.com/>
- [4] HyCentA: Hydrogen Center Austria; <http://www.hycenta.at>
- [5] Molinari: Molinari Rail Austria GmbH; <http://www.molinari-rail.com>
- [6] DIN EN 50163: Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen
- [7] Eichlseder, H., Klell, M.; Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung
- [8] EU-Projekt „Demo4Grid“: Demonstration for Grid Services – Production of Green Hydrogen & Greening of Industry; <https://www.demo4grid.eu/>