

Diploma Thesis

Infrastructural and operational requirements for freight transport on narrow-gauge railways

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Infrastrukturelle und betriebliche Voraussetzungen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Gregor Clar-Novak, BSc

Matr.Nr.: 01426031

unter der Anleitung von

Univ. Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Norbert Ostermann**

Dipl.-Ing. **Markus Lagler, BSc BA**

Institut für Verkehrswissenschaften

Forschungsbereich Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/230-2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2023

Kurzfassung

Hintergrund

Weltweit wurden ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts Schmalspurbahnen errichtet, da eine geringere Spurweite als die vorherrschende Normalspur kleinere Bogenradien und damit eine bessere Anpassung der Trasse an das Gelände ermöglichte. Heute ist in Europa zwar der Großteil der Schmalspurbahnen verschwunden, doch bestehen in Österreich, Deutschland und der Schweiz noch immer Strecken mit schmaler Spurweite, auf denen Güterverkehr angeboten wird. Da durch die Klimakrise die Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene wieder vermehrt in den Fokus rückt, stellt sich auch die Frage der Nutzung von Schmalspurbahnen für den Güterverkehr. Die vorliegende Arbeit geht dabei der Frage nach, welche Voraussetzungen hinsichtlich Infrastruktur und Betrieb für Güterverkehr auf Schmalspurbahnen erfüllt sein müssen. Vertieft wird dabei das Beispiel der Murtalbahn in der Steiermark betrachtet.

Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, Informationen bei Expert:innen eingeholt sowie ein Musterfahrplan für die Murtalbahn erstellt.

Ergebnisse

Um auf Schmalspurbahnen Güterverkehr anbieten zu können, muss die Streckeninfrastruktur entsprechend ausgelegt sein. So bestehen einerseits Einschränkungen hinsichtlich der Überhöhung in Bögen, andererseits besteht die Notwendigkeit, Lichtraum und Belastbarkeit der Strecke den Bedürfnissen des Güterverkehrs anzupassen. Auch müssen Schmalspurbahnen mit Personenverkehr bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit so ausgelegt sein, dass Fahrplantrassen für den Güterverkehr zur Verfügung stehen. Schließlich erfordert der Güterverkehr auf Schmalspurbahnen auch geeignete Fahrzeuge sowie Umladeeinrichtungen an der Schnittstelle zu anderen Verkehrsträgern.

Fazit und Diskussion

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass vor allem Eigenschaften der Streckeninfrastruktur den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen beeinflussen. Hier kann es zu Zielkonflikten mit dem Personenverkehr kommen, weshalb unter anderem eine Überarbeitung der österreichischen Trassierungsrichtlinien für Schmalspurbahnen angeregt wird. Außerdem werden Maßnahmen zur Vereinfachung des intermodalen Verkehrs, der Einfluss innovativer Fahrzeugkonzepte sowie die Möglichkeit zur Ausweitung des Güterverkehrs auf österreichischen Schmalspurbahnen behandelt. Für die Murtalbahn werden Rahmenbedingungen für den Güterverkehr bei einer zukünftigen Umstellung des Personenverkehrsangebots diskutiert.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Introduction

Narrow-gauge railways were built all over the world from the second half of the 19th century onwards, as a narrower gauge than the prevailing standard gauge allowed a smaller curve radius and thus a better adaptation of the alignment to the terrain. Today, most narrow-gauge railways have disappeared in Europe. However, narrow-gauge lines providing freight services still exist in Austria, Germany, and Switzerland. Since the climate crisis has brought the shift of freight transport from road to rail back into focus, the question of increased use of narrow-gauge railways for freight transport arises. This thesis examines the question of which requirements must be met in terms of infrastructure and operation for providing freight transport on narrow-gauge railways. Furthermore, the example of the Murtalbahn narrow-gauge railway in Styria is examined in greater detail.

Methods

To answer the research questions, a literature review was carried out, information was obtained from experts, and, as a practical example, a timetable for the Murtalbahn narrow-gauge railway was constructed.

Results

In order to offer freight transport on narrow-gauge railways, the line infrastructure must be designed accordingly. On the one hand, there are restrictions regarding the cant in curves, on the other hand, there is the necessity to adapt the minimum clearance and load capacity of the line to the needs of freight traffic. Narrow-gauge railways with passenger traffic must also be designed in terms of their capacity so that timetable paths are available for freight traffic. Finally, freight transport on narrow-gauge railways also requires suitable vehicles as well as handling facilities for freight transfer to other modes of transport.

Conclusion and discussion

The results of this study show that it is above all the characteristics of the line infrastructure that influence freight transport on narrow-gauge railways. This can lead to conflicts with passenger traffic, which is why, among other things, a revision of the Austrian alignment guidelines for narrow-gauge railways is suggested. Furthermore, measures to facilitate intermodal transport on narrow gauge railways are addressed as well as the influence of innovative vehicle concepts and the possibility of expanding freight transport on Austrian narrow gauge railways. In addition, framework conditions for freight transport on the Murtalbahn narrow-gauge railway line in the case of a future reorganization of passenger transport are discussed.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, ohne die diese Diplomarbeit nicht zustande gekommen wäre. Mein Dank gebührt an erster Stelle den Betreuern dieser Arbeit Univ.-Prof. i.R. DI Dr. Norbert Ostermann, DI Markus Lagler sowie DI Stefan Edlinger, der die Arbeit in einem frühen Stadium betreut hat. Das konstruktive Feedback sowie die interessanten Diskussionen haben wesentlich dazu beigetragen, dass diese Arbeit ihre heutige Form erhalten hat. Ebenfalls danke ich Florian Förster, der zeitgleich mit der Entstehung dieser Diplomarbeit seine Bachelorarbeit zu „Möglichkeiten des des intermodalen Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen“ verfasst hat, für den Austausch zu diesem Thema.

Zudem möchte ich mich bei den Interviewpartnern DDI Daniel Gößler, Hannes Obholzer, DI Dr. Helmut Schreiner, MBA bedanken, dass sie sich Zeit für die aufschlussreichen Gespräche genommen haben. DI Stefan Greiner, DI (FH) Laurenz Neumann, Thomas Oberkalmsteiner, Michael Tschudnig und Ing. Helmut Zwirchmayr möchte ich für Ihre wertvollen Auskünfte über E-Mail danken. Für die Hilfe bei der Suche nach Unterlagen bedanke ich mich bei DI Elias Anglberger, Adrian Geringer, DI Dr. Michael Petz und DI Dr. Martin Smoliner, MA. Außerdem bedanke ich mich bei DI Maurice Hindenburg für die Zurverfügungstellung von Infrastrukturdaten der Murtalbahn.

Besonders möchte ich mich bei meiner Tochter Anja und meiner Partnerin Maria für ihre Geduld bei der Entstehung dieser Arbeit bedanken. Hvala vama! Ohne die Hilfe bei der Kinderbetreuung durch meine Eltern Maria und Peter, meine Schwiegereltern Christine und Hans-Jörg sowie Lea, Lichti, Ninni und Ron wäre die Ausarbeitung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Auch bei ihnen möchte ich mich für ihren Beitrag bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung sowie historischer und theoretischer Hintergrund	13
1.1	Aufgabenstellung	13
1.2	Chancen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen	14
1.3	Spurweiten	16
1.4	Geschichte der Schmalspurbahnen	18
1.4.1	Entstehung schmalspuriger Bahnen in Europa	18
1.4.2	Entwicklung nach dem ersten Weltkrieg	21
1.4.3	Schmalspurbahnen in Europa heute	21
1.5	Schmalspurbahnen in Österreich	23
1.6	Güterverkehr auf Schmalspurbahnen	28
1.6.1	Transportmittel auf Schmalspurbahnen	28
1.6.2	Güterverkehr auf Schmalspurbahnen in Europa	28
1.6.3	Güterverkehr auf Schmalspurbahnen weltweit	30
1.7	Stand der Forschung	31
2	Methodik	32
2.1	Literatur- und Internetrecherche	32
2.2	Expert:innenfachgespräche	32
2.3	Erstellung eines Musterfahrplans	34
3	Infrastrukturelle Voraussetzungen	35
3.1	Trassierung	35
3.1.1	Richtlinien und Verordnungen	35
3.1.2	Bogenradius	36
3.1.3	Übergangsbogen	38
3.1.4	Überhöhung	39
3.1.5	Überhöhungsrampe	41
3.2	Längsneigung	43
3.3	Lichtraum	43
3.4	Belastbarkeit des Oberbaus und der Bauwerke	46
3.4.1	Maximale Radsatz- und Meterlasten	46
3.4.2	Einflüsse auf die mögliche Belastung der Eisenbahninfrastruktur	47
3.4.3	Auswirkungen von Belastungsbeschränkungen auf den Güterverkehr	49
4	Betriebliche Voraussetzungen	51
4.1	Multimodale Schnittstellen	51
4.1.1	Gebrochene Verkehre	51
4.1.2	Intermodale Verkehre	53
4.1.3	Rollfahrzeugverkehr	55
4.2	Fahrzeuge	57
4.2.1	Triebfahrzeuge	57
4.2.2	Güterwagen	62

4.2.3	Rollfahrzeuge	66
4.3	Betrieb und Fahrplangestaltung	69
4.3.1	Rechtlicher Rahmen des Betriebs auf Schmalspurbahnen	69
4.3.2	Fahrten von Güterzügen	69
4.3.3	Betriebssteuerung	71
4.3.4	Fahrplangestaltung	73
4.3.5	Anforderungen an die Infrastruktur	73
5	Beispiel Murtalbahn	75
5.1	Streckenbeschreibung	75
5.1.1	Geschichte	75
5.1.2	Beschreibung der Infrastruktur	76
5.1.3	Derzeitiges Verkehrsangebot	78
5.2	Zukunftsszenarien Murtalbahn	78
5.2.1	Personenverkehr 2025+	79
5.2.2	Güterverkehr 2025+	80
6	Diskussion	81
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	81
6.1.1	Infrastrukturelle Voraussetzungen	81
6.1.2	Betriebliche Voraussetzungen	82
6.1.3	Murtalbahn	83
6.2	Zielkonflikte	83
6.2.1	Attraktivität des Personenverkehrs / Möglichkeit des Güterverkehrs	84
6.2.2	Betriebliche Gestaltung der Infrastruktur / Möglichkeit des Güterverkehrs	85
6.2.3	Belastbarkeit des Oberbaus und der Bauwerke / Möglichkeit des Güterverkehrs	85
6.2.4	Lichtraum / Austauschbarkeit der Fahrzeuge / multimodaler Verkehr	86
6.3	Forschungsfragen und Grenzen der vorliegenden Arbeit	86
6.4	Ausgewählte Diskussionspunkte	87
6.4.1	Zukunft des Güterverkehrs auf der Murtalbahn	87
6.4.2	Anpassung der Trassierungsrichtlinien	88
6.4.3	Vereinheitlichung der Belastungsnormen	91
6.4.4	Überarbeitung des Lichtraumprofils	91
6.4.5	Fahrzeuge für den Güterverkehr	92
6.4.6	Möglichkeiten des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen in Österreich	93
6.5	Weiterer Forschungsbedarf	95
A	Musterfahrplan Murtalbahn	107

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorherrschende Spurweite nach Land. <i>Own work</i> , CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons, online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rail_gauge_world.png [Abruf am 27.5.2022]	17
1.2	Schmalspurbahnen der Schweiz. <i>Plutowiki</i> , CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons, online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schmalspurnetz_Schweiz.svg [Abruf am 17.7.2022]	23
1.3	Schmalspurbahnen in Österreich. Eigene Darstellung, Kartenhintergrund: <i>Lencer</i> , CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons, online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Austria_location_map.svg [Abruf am 8.2.2023]	24
3.1	Kräfte bei Bogenfahrt nach Ihme 2019, S. 198, adaptiert	37
a	Bogenfahrt ohne Überhöhung	37
b	Bogenfahrt mit Überhöhung	37
3.2	Kräfte im Berührungspunkt Rad/Schiene	41
3.3	Schmalspurlichträume in Österreich und der Schweiz, eigene Darstellung nach BAV 2020a und ÖBB 1975	44
3.4	Schmalspurlichträume in Deutschland, eigene Darstellung nach ESBO, Neufassung vom 25. Februar 1972 (dBGBI. I S. 269)	45
3.5	Enger Bogen der Zillertalbahn mit Y-Schwellen und einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 35 km/h für Personenzüge und 25 km/h für Güterzüge (7.11.2022)	50
4.1	Umladeanlagen von Schmalspurbahnen	52
a	Jenbach (7.11.2022)	52
b	Unzmarkt (8.11.2022)	52
4.2	Platzbedarf bei horizontalem Umschlag (Förster 2022)	55
a	Mobiler	55
b	ACTS	55
4.3	Rollwagenanlage im Bahnhof Jenbach (7.11.2022)	56
4.4	Von den Zillertaler Verkehrsbetrieben im Güterverkehr eingesetzte Lokomotiven (Jenbach, 7.11.2022)	59
a	Steiermarkbahn VL 23	59
b	Zillertalbahn D 15	59
4.5	In Österreich und der Schweiz angewendete Kupplungen	61
a	Bosnakupplung mit zusätzlichen seitlichen Schraubekupplungen im gekuppelten Zustand (Waldviertel, 22.10.2022)	61
b	Balancierhebelkupplung (BAV 2020b)	61
4.6	Holztransportwagen der Zillertalbahn (Jenbach, 7.11.2022)	64
a	Rollwagen mit aufgesetzten Rungenaufbauten	64
b	Aufschriften am Holztransportwagen	64
4.7	Güterwagen der StB in der Ladestelle Murau (8.11.2022)	65
a	Kesselwagen Type <i>ZZm</i> und Containertransportwagen Type <i>SSrm</i>	65
b	Aufschriften am Kesselwagen der Type <i>ZZm</i>	65

4.8	Schematische Darstellung von Rollböcken (oben) und Rollwagen (unten). Eigene Darstellung nach Gottraux (2012), online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_rollbocks_trucks.PNG [Abruf am 12.11.2022]	66
4.9	Typenskizze der sechsachsigen ÖBB-Rollwagen WW/s 89700 bis 89729 (Schneider und Seelmann 1986)	68
6.1	Infrastrukturelle und betriebliche Voraussetzungen sowie deren Beziehung zueinander	82
6.2	Vorschlag für einen angepassten Lichtraum für den intermodalen Verkehr	92
A.1	Bildfahrplan Szenario Infrastrukturmaßnahmen und Einsatz neuer Fahrzeuge	108
A.2	Bildfahrplan Szenario Einsatz Bestandsfahrzeuge	109

Tabellenverzeichnis

1.1	Schmalspurbahn-Infrastruktur (Adhäsionsbahnen) in Österreich	25
1.2	Betrieb auf Schmalspurbahnen (Adhäsionsbahnen) in Österreich	26
3.1	Höchste zulässige Überhöhungen bei Schmalspurbahnen	40
3.2	Grenzwerte für Überhöhungsrampen bei Schmalspurbahnen	42
3.3	Achslasten auf Österreichischen Schmalspurbahnen (Auswahl)	46
3.4	Querschnittswerte gängiger Schienenprofile bei Schmalspurbahnen nach EN 13674-1 und EN 13674-4	47
4.1	Kennwerte von Schmalspurlokomotiven in Österreich und der Schweiz	60
4.2	Kennwerte von Schmalspur-Güterwagen in Österreich und der Schweiz	65
5.1	Bahnhöfe und Kreuzungsmöglichkeiten der Murtalbahn, Kilometrierung nach Steiermärkische Landesbahnen (1994)	77
6.1	Vorschlag für neue Grenzwerte der Trassierungsparameter bei Schmalspurbahnen in Österreich	90
A.1	Angenommene Zielgeschwindigkeiten Unzmarkt - Murau	107
A.2	Für die Fahrplanerstellung verwendete Zugarnituren	107

Kapitel 1

Einleitung sowie historischer und theoretischer Hintergrund

1.1 Aufgabenstellung

Als Schmalspurbahnen werden im Allgemeinen Bahnen mit einer Spurweite kleiner 1435 mm (Normalspur) bezeichnet. Die Wahl einer kleineren Spurweite hat vor allem Vorteile hinsichtlich der Trassierung und ermöglicht kleinere Bogenradien (Menius und Matthews 2020). Folglich entstanden weltweit zahlreiche Bahnen mit unterschiedlicher Spurweite, die üblichsten sind dabei 750 mm, 760 mm (Bosnische Spurweite), 914 mm (3-Fuß-Spur), 1000 mm (Meterspur) und 1067 mm (Kapspur). In Österreich ist die Streckenlänge der Schmalspurbahnen seit Jahren rückläufig und beträgt aktuell rund 450 km. Dabei besteht kein zusammenhängendes Netz, sondern es wirken die Bahnen viel mehr als Inselbetriebe. Die Schmalspurbahnen in Österreich werden heute von mehreren Privatbahnen und teilweise nur mehr im touristischen Verkehr betrieben (siehe Abschnitt 1.5).

In Europa entstanden ab etwa 1870 in größerem Umfang schmalspurige Lokal-, Werks- und Feldbahnen. Während erstere öffentliche Bahnen sind, also dem Transportbedürfnis der gesamten Gesellschaft dienen, wurden letztere für den Transport von Gütern und Mitarbeiter:innen eines bestimmten Unternehmens erbaut. Seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs ist in Europa das Streckennetz der Schmalspurbahnen, die von Anfang an auch für den Transport von Gütern errichtet wurden, kontinuierlich gesunken. Dazu kommt, dass auf dem Großteil der verbliebenen schmalspurigen Bahnen der Güterverkehr eingestellt wurde und diese oftmals nur mehr dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) und/oder touristischen Verkehr dienen (siehe Abschnitt 1.4).

Gleichzeitig steigt das öffentliche Bewusstsein für die klimaschädlichen und negativen gesundheitlichen Folgen des Straßengüterverkehrs. Die von der Politik vorgegebenen Ziele zur Senkung von CO₂-Emissionen nehmen auch den Verkehrssektor in die Pflicht. In Österreich ist der Verkehr nach der Industrie die zweitgrößte Quelle für Treibhausgasemissionen, wobei im Gegensatz zu den anderen Sektoren hier die Treibhausgasemissionen noch immer steigen (Umweltbundesamt 2021). So sieht der Mobilitätsmasterplan des Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) einen Zielpfad zur Klimaneutralität im Verkehrssektor bis 2040 vor, in dem neben anderen Maßnahmen die Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene vorgesehen ist. Als Ziel soll in Österreich der Anteil der Schiene am Güterverkehrsaufkommen auf 34 % gesteigert werden (Bundesministerium für Klimaschutz 2021). Im Jahr 2019 lag der Anteil der Schiene an der Transportleistung, also dem Produkt des Transportaufkommens (Masse) und Transportweite (Strecke), in Österreich bei etwa 28 % (Statistik Austria 2020).

Im Zuge der Diskussion über die Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene rückt auch der Güterverkehr auf Schmalspurbahnen wieder in den Fokus der Öffentlichkeit. Während in der Schweiz Güterverkehr auf Schmalspurbahnen noch immer üblich ist (siehe Ab-

schnitt 1.6.2), wird dieser in Österreich und Deutschland kaum mehr praktiziert. Im Sinne eines nachhaltigen Gütertransports ist die Nutzung der vorhandenen Schieneninfrastruktur essentiell. Nicht nur ist der Schienengüterverkehr die energieeffizienteste Form des Güterverkehrs (Bundesministerium für Klimaschutz 2021), auch werden durch die Nutzung bestehender Infrastrukturen keine neuen Flächen versiegelt. So gibt es auch in Österreich Initiativen, den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen auszuweiten. Eine solche führte beispielsweise dazu, dass im Mai 2021 auf der Zillertalbahn in Tirol der Güterverkehr wieder aufgenommen wurde, wobei innovative Wagenkonstruktionen zum Einsatz kommen (Kenning 2022).

Allerdings sind die infrastrukturellen und betrieblichen Voraussetzungen auf Schmalspurbahnen – zumindest in Europa – gänzlich andere als bei normalspurigen Bahnen. Die vorliegende Arbeit versucht daher folgende Fragen zu beantworten:

- In welcher Form wird Güterverkehr auf Schmalspurbahnen abgewickelt?
- Welche Einschränkungen gibt es bezüglich der Trassierung von Schmalspurbahnen?
- Was sind die Voraussetzungen hinsichtlich Lichtraumprofil und Belastbarkeit der Infrastruktur, damit Güterverkehr auf Schmalspurbahnen überhaupt möglich ist?
- Welche Eigenschaften müssen die eingesetzten Fahrzeuge für den Güterverkehr aufweisen?
- Wie kann das Umladen der Güter zwischen Schmalspur und Normalspur bzw. Straße bewerkstelligt werden?
- Was sind, vor allem auf Schmalspurbahnen mit dichtem Personenverkehrsangebot, die betrieblichen Voraussetzungen, um überhaupt Güterverkehr anbieten zu können?

Wie in Abschnitt 1.7 beschrieben wird, zeichnet sich das Thema dieser Arbeit dadurch aus, dass es bisher – zumindest im deutschsprachigen Raum – wenig bearbeitet wurde. Die vorliegende Arbeit gliedert sich in eine Beschreibung des theoretischen Rahmens, in der geschichtliche Aspekte und der aktuelle Stand von Güterverkehr auf Schmalspurbahnen behandelt werden, sowie in die Beschreibung der infrastrukturellen und betrieblichen Voraussetzungen, die aus der Literaturrecherche sowie durch Anfrage von Expert:innen (siehe Abschnitt 2.2) identifiziert werden konnten. Am Ende der Arbeit werden die theoretischen Voraussetzungen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen auf die Murtalbahn in der Steiermark angewandt sowie die Ergebnisse der Arbeit diskutiert.

1.2 Chancen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen

Wie bereits in Abschnitt 1.1 formuliert, besteht im Verkehrssektor ein dringender Bedarf zur Verlagerung der Verkehrsströme von der Straße auf die Schiene. Gleichzeitig hat sich die Güterverkehrsleistung in Österreich in den letzten dreißig Jahren mehr als verdoppelt. Für die nächsten Jahre ist ein weiterer Anstieg der Güterverkehrsleistung zu erwarten. Um die Klimaziele zu erreichen, muss das Wachstum des Straßengüterverkehrs beendet und die Transportleistung im Schienengüterverkehr von rund 23 Mrd. Tonnenkilometern im Jahr 2018 auf rund 35 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2040 gesteigert werden (Bundesministerium für Klimaschutz 2021).

Um diese Ziele zu erreichen, muss zumindest ein Teil der Transportkette von der Straße auf die Bahn verlagert werden. Dabei können Transportketten eingliedrig oder mehrgliedrig organisiert sein. Bei einer eingliedrigen Transportkette werden Sender und Empfänger mit einem einzigen Verkehrsträger verbunden, sie ist also auch unimodal. Beispielsweise können Rohstoffe mit der Bahn von einem Bergwerk zur verarbeitenden Industrie gebracht werden. Bei einer mehrgliedrigen

Transportkette findet hingegen ein Wechsel des Verkehrsmittels zwischen Sender und Empfänger statt. Werden dazu zwei oder mehr verschiedene Verkehrsträger herangezogen, so spricht man von multimodalem Verkehr. Beispielsweise können Container mit der Bahn zu einem Hafen gebracht werden, wo sie auf ein Schiff verladen werden (Gronalt et al. 2010). Betrachtet man die Schmalspurbahnen in Österreich, Deutschland und der Schweiz (siehe Abschnitt 1.6.2), so fällt auf, dass nur auf den wenigsten Bahnen unimodaler Verkehr auftritt. In den meisten Fällen wirken Schmalspurbahnen als Zubringerinnen zu anderen Verkehrsträgern, meist normalspurige Bahnen. Um die gesamte Lieferkette möglichst umweltfreundlich gestalten zu können, muss auch diese „Letzte Meile“ möglichst nachhaltig gestaltet werden (Bundesministerium für Klimaschutz 2021). Hier findet sich das Potential von Schmalspurbahnen im Güterverkehr. Wie in Abschnitt 1.5 gezeigt wird, ist in Österreich die Schieneninfrastruktur dafür noch vorhanden. Es müssen allerdings die in dieser Arbeit gezeigten infrastrukturellen und betrieblichen Voraussetzungen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen gegeben sein.

Eine Betrachtung der österreichischen Verkehrsstatistik für das Jahr 2019 zeigt, dass der Schienengüterverkehr vor allem im Bereich des Transits sowie des grenzüberschreitenden Empfangs und Versands wesentliche Anteile am Transportaufkommen und der Transportleistung aufweisen kann, während im Binnenverkehr der Straßengüterverkehr dominiert (Statistik Austria 2020). Die transportierten Güter können von Seiten der notwendigen Logistik nach verschiedenen Aspekten unterschieden werden. Eine typische Unterscheidung findet zwischen Massen- und Stückgütern statt. Während Massengüter ein hohes Gewicht aber einen geringen Wert aufweisen (wie beispielsweise Brennstoffe, Baustoffe, landwirtschaftliche Produkte), handelt es sich bei Stückgut um Güter fester Konsistenz, die sich zu Packungs- und Ladeeinheiten zusammenstellen lassen und die in der Regel einen höheren Wert als Massengüter aufweisen. Während historisch Stückgüter direkt auf den Verkehrsträger verladen wurden, kommen heute zunehmend Ladungsträger wie Container zum Einsatz (Hofmann und Gebert 2010).

Das Transportaufkommen auf der Schiene teilt sich in etwa zur Hälfte in Massengüter und Stückgüter bzw. Güter, die in intermodalen Transporteinheiten transportiert werden. Besonders im Bereich der intermodalen Transporteinheiten stehen häufig keine Informationen über den Inhalt dieser zur Verfügung (Statistik Austria 2020). Während in Österreich und Deutschland bis auf wenige Ausnahmen vor allem Massengüter auf Schmalspurbahnen transportiert werden, zeigen Beispiele aus der Schweiz, dass auch Ladeeinheiten im Intermodalen Verkehr auf Schmalspurbahnen erfolgreich transportiert werden können (siehe dazu Abschnitt 1.6.2).

Zukünftig wird davon ausgegangen, dass das Transportaufkommen von Massengütern im gesamten Verkehrsmarkt konstant bleiben wird und kein wesentliches Wachstum auftreten wird, während bei der Stückgutlogistik durch die Zunahme der internationalen Arbeitsteilung mit einem Wachstum dieses Segments gerechnet wird (Hofmann und Gebert 2010). Entsprechend ergeben sich für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen Chancen durch den Transport von Ladeeinheiten im Vor- und Nachlauf des Intermodalen Verkehrs. Eine weiteres Potential für Transporte auf Schmalspurbahnen bietet der Transport von Abfällen. In Österreich müssen nach § 15 Abfallwirtschaftsgesetz (BGBl. I Nr. 102/2002 idF. I 200/2021) ab 2023 Abfälle mit einer Transportweite von über 300 km verpflichtend mit der Bahn transportiert werden, bis 2025 sinkt die Transportweite auf 100 km. In der Schweiz ist ein Mülltransport auf Schmalspurbahnen üblich (Rellstab 2007). Ein Umladen zwischen den Verkehrsträgern ist beispielsweise mit Abrollcontainern möglich (siehe auch Abschnitt 4.1.2.1).

In Abhängigkeit von der Ladungsgröße wird im Schienengüterverkehr zwischen Wagenladungs-, Ganzzug-, Einzelwagen- und Kombinierten Verkehr unterschieden. Beim Wagenladungsverkehr werden Frachten transportiert, die einen oder mehrere Wagen vollständig in Anspruch nehmen, beim (unbegleiteten) kombinierten Verkehr der Ladungsträger einzelner Kund:innen. Werden Güterwagen direkt an Kund:innen zugestellt, so unterscheidet man Ganzzüge, die ohne

Unterwegsbehandlung zwischen Sender:in und Empfänger:in transportiert werden, sowie Einzelwagenverkehre, bei denen einzelne Wagen oder Wagengruppen zugestellt werden. Diese Wagen bzw. Wagengruppen werden in Rangierbahnhöfen zu größeren Zügen zusammengestellt und zum nächsten Knotenpunkt befördert (W. Weigend 2016). Wie im Abschnitt 1.6.2 geschildert, kommen Ganzzugverkehre auf Schmalspurbahnen in Europa aufgrund der meist kurzen Streckenlängen selten vor, bedeutender ist der Wagenladungsverkehr von Massengütern. Eine Spezialform des Einzelwagenverkehrs ist der Transport von normalspurigen Güterwagen auf schmalspurigen Rollfahrzeugen (siehe 1.6.1). Hier wirkt die Schmalspurbahn systemisch wie eine Anschlussbahn.

Um erfolgreich Güterverkehr auf Schmalspurbahnen anbieten zu können, müssen entsprechende wirtschaftliche Rahmenbedingungen gegeben sein, vor allem die finanzielle Attraktivität solcher Verkehre für potentielle Kund:innen. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für den Kombinierten Verkehr auf Schweizer Schmalspurbahnen ist die Schweizer *Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe* (LSVA) (Rail Business 2014). Diese flächendeckend und kilometerabhängig für Kraftfahrzeuge über 3,5 t eingehobene Maut soll den LKW-Verkehr teurer und somit weniger attraktiv machen. Allerdings muss dazu angemerkt werden, dass in der Schweiz gleichzeitig mit der Einführung der LSVA das zulässige Gesamtgewicht der Lastfahrzeuge erhöht wurde, weshalb die Anzahl an Fahrten im Straßengüterverkehr zwar zurückging, die Transportleistung aber stieg. Jedoch sind zwei Drittel der Einnahmen der LSVA für den Ausbau der Schieneninfrastruktur zweckgebunden, womit die Schiene in dieser Hinsicht profitiert. Zudem ging der Verkehr vor allem im niederrangigen Straßennetz des Transitlandes Schweiz überproportional zurück (Schrön 2015). So erhalten Schweizer Schmalspurbahnen, wie die Rhätische Bahn, Gelder aus dem Bundeshaushalt, die einerseits der Infrastruktur dienen, andererseits aber auch direkt den Güterverkehr fördern (Rhätische Bahn AG 2022b). Wirtschaftliche Betrachtungen sind allerdings nicht Teil dieser Arbeit und erfordern eine gesonderte Untersuchung.

1.3 Spurweiten

Als Spurweite wird im Eisenbahnwesen der kleinste Abstand der Innenflächen der Schienen eines Gleises von 0 bis 14 mm unter der Schienenoberkante bezeichnet. Die weltweit verbreiteste Spurweite ist die Normalspur mit einer Spurweite von 1435 mm. Diese macht rund 65 % des weltweiten Eisenbahnnetzes aus (Ihme 2019). Die Spurweite von 1435 mm entspricht im angloamerikanischen Maßsystem 4 Fuß und 8 1/2 Zoll. Diese Spurweite geht auf die erste öffentliche Eisenbahn von Stockton nach Darlington in England, die 1825 eröffnet wurde, zurück. Es wird allgemein angenommen, dass die Spurweite von 1435 mm vom Erbauer der Stockton-Darlington-Bahn, George Stephenson, an die damals gebräuchlichen Spurweiten von Pferdewagen und Grubenbahnen in England angelehnt wurde. Stephenson's Dampflokomotive *Rocket* war es auch, die sich 1829 auf der Bahnstrecke Liverpool - Manchester bei Wettfahrten gegen Lokomotiven der Konkurrenz durchsetzte. In Folge dieses Wettrennens rüsteten Stephenson's Lokomotivwerke zahlreiche Bahnen in Europa und Nordamerika aus, womit die Normalspur ihre weltweite Verbreitung fand (Haarmann 1891).

Neben der Normalspur entstand eine Vielzahl anderer Spurweiten (siehe Abb. 1.1). Kleinere Spurweiten als 1435 mm werden dabei als Schmalspur, größere als Breitspur bezeichnet. Während Schmalspurbahnen vorwiegend aufgrund geringerer Baukosten entstanden (siehe Abschnitt 1.4), waren bei Breitspurbahnen oft militärstrategische Gründe ausschlaggebend. Eine abweichende Spurweite sollte dem Gegner im Angriffsfall die Nutzung des eigenen Bahnnetzes erschweren. Die verbreitetsten Breitspur-Spurweiten sind dabei neben die Russische Breitspur mit 1520 bzw. 1524 mm (11 % des weltweiten Eisenbahnnetzes), die Irische Breitspur mit 1600 mm sowie die

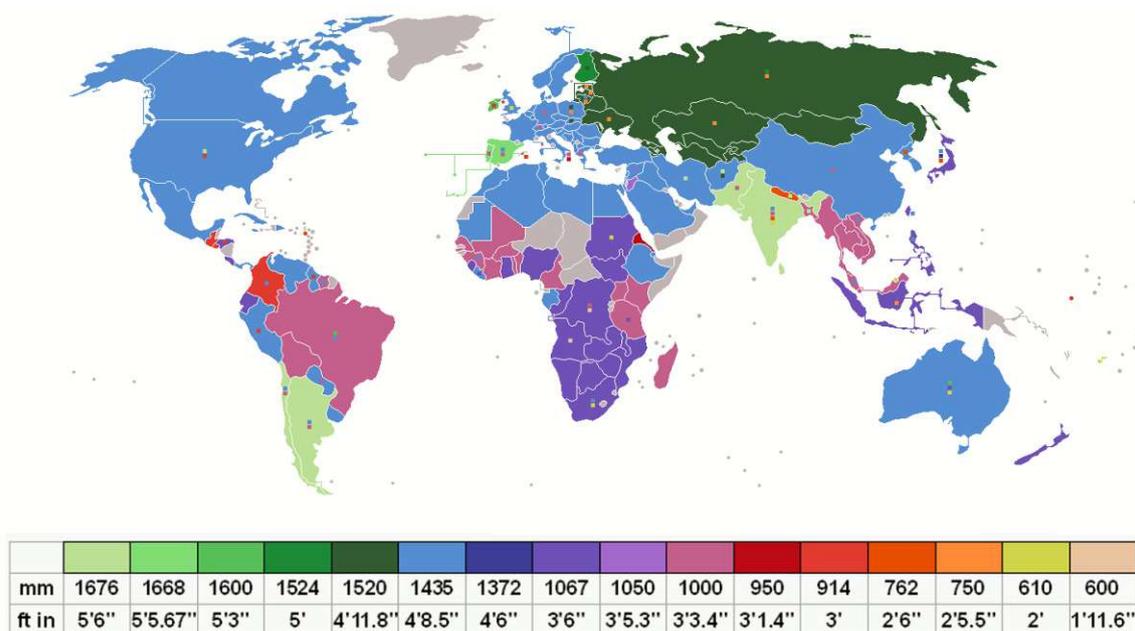


Abb. 1.1: Vorherrschende Spurweite nach Land. *Own work*, CC BY-SA 3.0, via Wiki-media Commons, online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rail_gauge_world.png [Abruf am 27.5.2022]

Iberische (1668 mm) und Indische Breitspur (1676 mm). Letztere machen gemeinsam etwa 6 % des weltweiten Eisenbahnnetzes aus (Ihme 2019).

Die weltweit üblichsten Spurweiten von Schmalspurbahnen sind:¹

- 381 mm: Parkeisenbahnen
- 500/600/610 mm: Feld- und Industriebahnen
- 750 mm: weltweit bei Lokal- und Industriebahnen, u.a. in China, der ehem. Sowjetunion und Deutschland
- 760 mm: Lokal- und Waldbahnen v.a. in den Nachfolgestaaten Österreich-Ungarns, u.a. in Österreich, Rumänien, Slowakei und Tschechien
- 914 mm: vor allem in Südamerika, u.a. in El Salvador, Kolumbien und Peru
- 1000 mm: weltweit bei Lokalbahnen im Einsatz, u.a. in Deutschland, Österreich, der Schweiz, Brasilien, Ecuador, Kamerun, Kenia, Malaysia, Myanmar, Thailand und Vietnam
- 1067 mm: Einsatz auf Vollbahnen und Lokalbahnen in ehemaligen britischen Kolonien in Afrika (z.B. Angola, Sudan oder Südafrika), außerdem u.a. in Japan, Australien, Neuseeland und Indonesien

Weltweit gesehen entfallen auf die Kapspur mit 1067 mm und die Meterspur mit 1000 mm Spurweite je ca. 7 % des Eisenbahnnetzes, Bahnen mit 750 bzw. 760 mm Spurweite machen nur etwa 1 % aus (Ihme 2019).

¹Eine gute Übersicht über Spurweiten liefert der Wikipedia-Artikel *Liste der Spurweiten*, online unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Spurweiten [Zugriff am 27.5.2022].

Gründe für die Wahl kleinerer Spurweiten sind vielfältig. Der Eisenbahningenieur *Friedrich Žežula* veröffentlichte 1893 *Eine Darstellung der hervorragendsten Errungenschaften auf dem Gebiete des schmalspurigen Eisenbahnwesens* (Žežula 1983, Neuausgabe), in der er sich ausführlich den Gründen für die Wahl einer kleineren Spurweite als der Normalspur widmet. Den wichtigsten Grund nennt Žežula in der Möglichkeit engerer Bogenradien, die eine bessere Ausnutzung der natürlichen Landschaft ohne größerer Kunstbauten wie Brücken oder Tunnel ermöglicht. So konnten bei Bahnen mit Meterspur Radien von 30 m gewählt werden, während bei normalspurigen Strecken die untere Grenze zum Zeitpunkt des Entstehens des Buchs bei 150 m lag. Dieser Umstand wirkte sich vor allem auf die Baukosten aus, die somit im Vergleich zu normalspurigen Bahnen günstiger ausgefallen sind. Trotzdem waren auch bei engeren Bögen Geschwindigkeiten bis zu 45 km/h möglich, womit sich die Schmalspurbahnen durchaus mit den normalspurigen Lokalbahnen jener Zeit messen konnten. Zudem war es trotz engerer Bogenradien möglich ebenso lange Güter, wie beispielsweise Holz, wie auf normalspurigen Lokalbahnen zu transportieren. Außerdem hatten schmalspurige Güterwagen ein besseres Verhältnis von Nutzlast zur Gesamtmasse als normalspurige Wagen (Žežula 1983).

1.4 Geschichte der Schmalspurbahnen

1.4.1 Entstehung schmalspuriger Bahnen in Europa

1.4.1.1 Frühzeit der Schmalspurbahnen

In der Entstehungsphase der Eisenbahn war es keineswegs festgelegt, welche Spurweite sich durchsetzen wird. So wurde die erste Bahnstrecke Österreichs, die ab 1827 abschnittsweise in Betrieb genommene Pferdebahn Gmunden – Linz – Budweis mit einer Spurweite von 1106 mm (3,5 Österreichische Fuß) gebaut. Später wurde ein Dampfbetrieb eingeführt und die Strecke nach und nach auf Normalspur umgespurt (Sima 2008).

Auch wenn es bereits einzelne schmalspurige Strecken wie die Pferdebahn Gmunden – Linz – Budweis und schmalspurige Werksbahnen gab, begann der Bau von Schmalspurbahnen im größeren Stil in Europa erst um das Jahr 1870, als das Hauptbahnnetz im wesentlichen ausgebaut war und es um die Erschließung von abgelegeneren Regionen ging. Der Grund für die Wahl von kleineren Spurweiten lag, wie bereits erwähnt, hauptsächlich in der möglichen Wahl kleinerer Bogenradien, womit eine bogenreichere und damit oft günstigere Trassierung möglich wurde. Kleinere und einfacher ausgerüstete Schmalspurfahrzeuge waren zudem günstiger als entsprechende Normalspurfahrzeuge (Krobot 1975).

In Frankreich beschäftigte sich ab 1861 eine Kommission mit möglichen Fördermaßnahmen für den Bau von Sekundärbahnen. Als ein Mittel zur Reduktion der Baukosten wurde dabei die Wahl einer kleineren Spurweite gefunden. Diese Möglichkeit wurde 1865 in einem Lokalbahngesetz festgelegt. Auch in England wurde der Bau von Schmalspurbahnen diskutiert, allerdings unterblieb der Bau größerer Strecken, nachdem der Aufwand für den Übergang von Gütern von Normalspur auf Schmalspur größer als die Ersparnisse beim Bau der Bahn bewertet wurde (Haarmann 1891).

In der Österreich-Ungarischen Monarchie begannen um 1870 Diskussionen über den Bau von Schmalspurbahnen. Befürworter schmalerer Spurweiten schlugen diese allgemein für den Bau von Bahnen durch schwierigeres Gelände, wie beispielsweise im Salzkammergut, vor (Nördling 1871). Die ersten Vorschläge für Schmalspurbahnen in Österreich wurden allerdings nicht aufgenommen und Eisenbahnstrecken weiterhin vorwiegend in Normalspur errichtet.

Erstmals bekam in Österreich-Ungarn die Schmalspurbahn eine größere Bedeutung mit der Okkupation der bis dahin osmanischen Provinzen Bosnien und Herzegowina nach dem Berliner Kongress von 1878. In weiterer Folge entstand hier aufgrund der schwierigen Topographie mit

hohen Bergen und schluchtartigen Flusstälern ein Netz an Bahnen mit Spurweite 760 mm, der sogenannten „Bosnischen Spurweite“. Bis dahin kamen in Österreich-Ungarn Schmalspurbahnen fast ausschließlich bei Feld- und Werksbahnen, u.a. bei großen Bauprojekten, zum Einsatz. Durch den für die Österreichisch-Ungarischen Truppen unerwarteten Widerstand gegen die Okkupation Bosniens mussten die ersten Schmalspurbahnen unter Zeitdruck errichtet werden, weshalb auf bereits vorhandenes Material von ehemaligen Werksbahnen zurückgegriffen wurde. Später wurden die anfangs als Provisorien gebauten ersten bosnischen Bahnen für den dauerhaften Betrieb ertüchtigt und neue Linien in Bosnischer Spurweite angelegt. Im Jahr 1910 war das Netz der *Bosnisch-Herzegowinischen Landesbahn* bereits etwa 1000 km lang und reichte im Süden bis nach Dalmatien. Zum Netz der Landesbahn kam ein Netz aus Waldbahnen, die dem Abtransport von Holz dienten, in selber Spurweite. Dieses von privaten Firmen betriebene Eisenbahnnetz übertraf in seiner Netzlänge sogar das öffentliche Netz der Bosnisch-Herzegowinischen Landesbahn (Schiendl 2015).

Nachdem das bosnische Eisenbahnnetz zu 90 % aus schmalspurigen Bahnen bestand, übernahm dieses die Aufgaben eines normalspurigen Netzes. Die von der k. k. Bosnabahn entwickelte Mittelpufferkupplung („Bosna-Kupplung“) wurde zur Standardkupplung der Schmalspurbahnen in Österreich-Ungarn und ist bis heute bei vielen Schmalspurbahnen in den Nachfolgestaaten der Monarchie im Einsatz (Schiendl 2015).

1.4.1.2 Bau der Schmalspurbahnen in Österreich, Deutschland und der Schweiz

1880 wurde in der österreichischen Reichshälfte erstmals mit dem *Gesetz, betreffend die Zugeständnisse und Begünstigungen für Localbahnen* (RGBl. 56/1880) ein Lokalbahngesetz erlassen, mit dem die Regierung ermächtigt wurde, bei Bahnen geringerer verkehrlicher Bedeutung, „nicht nur in Bezug auf die Vorarbeiten, den Bau und die Ausrüstung alle thunlichen Erleichterungen zu gewähren [...]“. Außerdem durften laut Localbahngesetz 1880 von nun an auch Reichsstraßen für die Anlage von Localbahnen verwendet werden. Vor 1880 mussten für alle Bahnen mit niedrigeren Anforderungen hinsichtlich Bau und Betrieb jeweils Spezialgesetze erlassen werden (Pawlik 1924). Als Folge des Localbahngesetzes von 1880 und seiner Novellen in den darauffolgenden Jahren, entstanden in der Monarchie zahlreiche Bahnen mit geringeren Anforderungen an Bau und Betrieb, ein Teil in Normalspur und ein anderer Teil schmalspurig. Für die meisten Schmalspurbahnen in Österreich-Ungarn wurde seitens der Heeresverwaltung die in Bosnien und der Herzegowina übliche Spurweite von 760 mm verlangt, um im Kriegsfall schnell auf das Rollmaterial dieser Bahnen zurückgreifen zu können (Krobot 1975). Daneben entstanden aber auch Bahnen mit Spurweiten von 1000 mm, 900 mm, 750 mm und 600 mm (Heinersdorff 1975).

Im heutigen Österreich wurden als Folge des Localbahngesetzes von 1880 hunderte Kilometer an Schmalspurbahnen, vor allem in einer Spurweite von 760 mm, errichtet. Die bedeutendsten Schmalspurbahnen waren die rund 91 km lange Mariazellerbahn St. Pölten – Gußwerk (Eröffnung zwischen 1897 und 1907) mit ihrer 27 km langen Stichstrecke nach Ruprechtshofen (Eröffnung zw. 1898 und 1905), das insgesamt rund 80 km lange Netz der Waldviertler Schmalspurbahnen (Eröffnung zw. 1901 und 1903), die mit ihrer Stichstrecke nach Ybbsitz 76 km lange Ybbstalbahn Waidhofen an der Ybbs – Kienberg-Gaming (Eröffnung zw. 1896 und 1899), die ebenfalls 76 km lange Murtalbahn Unzmarkt – Mauterndorf (Eröffnung 1894), die 63 km lange Salzkammergutlokalbahn zwischen Salzburg und Bad Ischl (Eröffnung zw. 1890 und 1894), die mit ihrer Stichstrecke nach Bad Hall 55 km lange Steyrtalbahn Garsten – Klaus (Eröffnung zw. 1889 und 1909) sowie die 53 km lange Pinzgauer Lokalbahn Zell am See – Krimml (Eröffnung 1898) (Krobot 1975).

Für die Waldviertler Schmalspurbahnen bestanden noch viel größere Pläne, wie die Verbindung mit der Schmalspurbahn Nová Bystřice – Jindřichův Hradec in Südböhmen und eine Erweiterung

nach Süden bis nach Krems (Krobot 1975). Auch für die Mariazellerbahn bestanden konkrete Pläne zur Verbindung mit der ehemaligen Strecke Kapfenberg – Au-Seewiesen der Steiermärkischen Landesbahnen (Felsing 2002). Neben Bahnen der Spurweite 760 mm entstand rund um Innsbruck ein Netz aus Lokalbahnen mit der Spurweite von 1000 mm, von denen heute die Stubaitalbahn und die Mittelgebirgsbahn als Teil des ebenfalls schmalspurigen Innsbrucker Straßenbahnnetz betrieben werden (W. Kaiser 2003). Viele Schmalspurbahnen in Österreich hatten im Gegensatz zu (normalspurigen) Hauptstrecken weniger die Aufgabe Gewinne für die Investor:innen abzuwerfen, sondern dienten vielmehr dem Anschluss weiter Gebiete an das nationale Bahnnetz. Dabei trat die Wirtschaftlichkeit der Betriebsführung vielfach in den Hintergrund (Faller et al. 1980). So wurden Schmalspurbahnen oft nicht von privaten Eisenbahngesellschaften, sondern von Landesbahngesellschaften, die im Eigentum der jeweiligen Kronländer standen, gebaut und betrieben.

In Deutschland begann ebenfalls um 1870 die Diskussion über den Bau von günstigeren Bahnen in der Fläche. Zwischen 1873 bis 1876 legte eine Kommission des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen „Grundzüge für die Gestaltung der Sekundären Bahnen“ fest. Die Anwendung der Schmalspur wurde vor allem bei Inselbetrieben, bei Verkehr mit Gütern, die problemlos umgeladen werden können, sowie bei Bahnen, wo es Bau und Betrieb erforderlich machten, empfohlen. Als Einsatzmöglichkeiten wurden Gebiete ohne Erschließung durch Vollbahnen und komplizierte topographische Verhältnisse genannt. Die Spurweiten für die künftig zu errichtenden *Secundärbahnen* wurden auf 750 mm und 1000 mm festgelegt (Haarmann 1891). Im damaligen Königreich Sachsen entstand in weiterer Folge bis 1923 über 500 km an Schmalspurbahnen. Auch in Württemberg, Bayern, in der Pfalz und auf diversen Inseln in der Nordsee wurden Schmalspurbahnen gebaut, jedoch nicht in einem Umfang wie in Sachsen. Anders als in den anderen Bundesstaaten des Deutschen Reichs wurden in Preußen Schmalspurbahnen nicht von staatlichen Stellen sondern ausschließlich von Kreisen, Kommunen und Unternehmen errichtet. So existierten in Preußen im Jahr 1913 94 Bahnbetreiber mit einer Streckenlänge von insgesamt fast 6700 km (Machel 2011).

In der Schweiz wurde anfangs noch die Verwendung der Normalspur bei Eisenbahnbauten vorgeschrieben, erst das Eisenbahngesetz von 1872 ermöglichte die Verwendung der Schmalspur für neue Projekte. Daraufhin setzte im Kanton Graubünden der Bau eines schmalspurigen Eisenbahnnetzes ein. Maßgebliche Motivation dafür war die Erschließung des Höhenkurorts Davos. Der 1890 eröffneten Bahnstrecke Landquart – Davos folgt in Etappen der Aufbau eines heute 415 km langen Streckennetzes in Meterspur. Ein Teil dieses Netzes war von Anfang an elektrifiziert, andere Strecken wurden später nachgerüstet. Daneben entstanden im gesamten Staatsgebiet der Schweiz noch zahlreiche weitere Schmalspurbahnen vorwiegend in Meterspur (siehe auch Abb. 1.2).

Neben der Verwendung bei öffentlichen Bahnen kamen schmale Spurweiten auch bei Feld-, Wald- und Industriebahnen zum Einsatz. Bei Feldbahnen kann das Gleis in einzelne Gleisjoche zerlegt und an anderer Stelle wieder aufgebaut werden. Zum Einsatz kamen Feldbahnen im militärischen Bereich, aber auch als Werkbahnen auf größeren Baustellen. Bei Waldbahnen dienten schmalspurige Gleise dem Abtransport des gewonnenen Holzes (Žežula 1983). In Österreich entstanden vor allem in der Zwischenkriegszeit zahlreiche Wald- und Industriebahnen.² Die letzte Waldbahn Österreichs von Lunz am See nach Langau war um 1975 noch in Betrieb und wurde später eingestellt (Krobot 1975).

²Eine unvollständige Übersicht gibt die Homepage *760net*, online unter: <http://760net.heimat.eu/strecken2.html> [Zugriff am 14.2.2023].

1.4.2 Entwicklung nach dem ersten Weltkrieg

In Österreich beendete der Erste Weltkrieg den Bau von Lokalbahnen. Nach dem Krieg führten der Kohlemangel und die unsichere wirtschaftliche Lage zu Schwierigkeiten für die Lokalbahnen. Erst die kurze Konjunkturzeit in der zweiten Hälfte der 1920er verbesserte die Lage und es wurden neue Schmalspurbahnen gebaut, wie die Lokalbahn Ruprechtshofen – Gresten im Jahr 1927, und bestehende nicht-öffentliche Bahnen als öffentliche Bahnen konzessioniert, wie 1926 die Lokalbahn Payerbach – Hirschwang oder 1930 die Lokalbahn Birkfeld – Ratten (Krobot 1975). Konnten Schmalspurbahnen bis zum ersten Weltkrieg durch sparsamen Betrieb noch kostendeckend geführt werden, zeigte sich ab etwa 1925 die Konkurrenz des KFZ-Verkehrs. Mit der Weltwirtschaftskrise brach zudem ab dem Beginn der 1930er die Nachfrage im Güterverkehr ein. Zudem ging das Kalkül, durch den Bau von Lokalbahnen wirtschaftlich schwächere Regionen an den bereits weit fortgeschrittenen Industrialisierungsprozess teilnehmen zu lassen, nicht auf. Im Gegenteil führte der Bau von Lokalbahnen zur Konzentration des Gewerbes in Ballungsräumen und das erwartete Verkehrsaufkommen wurde auf vielen normal- wie auch schmalspurigen Lokalbahnen nie erreicht (Molitor 1987). Eine weitere Herausforderung für die Lokalbahnen bestand in den neuen Grenzziehungen nach dem Ersten Weltkrieg, mit der ein Teil der Erschließungsfunktion dieser Bahnen wegbrach (Faller et al. 1980). Schließlich wurden in der Zwischenkriegszeit viele der bis dahin privat geführten Lokalbahngesellschaften in Österreich verstaatlicht (Wegenstein 2007).

Die Schmalspurbahnen in Deutschland standen vor ähnlichen Problemen: Die meisten Bahnen konnten mit ihren Einnahmen aus dem Fahrbetrieb gerade einmal die laufenden Ausgaben decken. Nach dem Ersten Weltkrieg begann durch die allgemein unsichere Lage die Krise der Lokalbahnen. Bei sinkenden Transportmengen mussten zahlreiche durch den Weltkrieg verschobene Investitionen nachgeholt werden. Nachdem in der zweiten Hälfte der 1920er eine gewisse Entspannung eingetreten war, brachen mit der Weltwirtschaftskrise ab 1932 die Transportmengen auf den deutschen Schmalspurbahnen komplett ein und es begann bereits in der Zwischenkriegszeit eine erste Stilllegungswelle (Machel 2011).

Neben den raumwirtschaftlichen Herausforderungen rächten sich mit dem Aufkommen des KFZ-Verkehrs auch die einfacheren Trassierungsparameter. So wurden in den Konzessionsurkunden der normal- und schmalspurigen Lokalbahnen Höchstgeschwindigkeiten von 25 bis 30 km/h festgelegt. In der Entstehungszeit der Schmalspurbahnen wurde zudem die Achslast auf 7 Tonnen beschränkt, zur selben Zeit lag sie bei normalspurigen Hauptbahnen bei 14 Tonnen (Molitor 1987). Zum Vergleich: Heute sind bei normalspurigen Hauptbahnen mit Streckenklasse D4 nach EN 15528 (CEN 2021) 22,5 Tonnen Achslast möglich. Eine geringere Achslast bedeutet aber, dass weniger Last mit einem Güterwagen transportiert werden kann.

1.4.3 Schmalspurbahnen in Europa heute

Im europäischen Eisenbahnnetz herrscht heute das Normalspurnetz mit einer Spurweite von 1.435 mm vor, während in den Ländern der ehemaligen Sowjetunion überwiegend die russische Breitspur (1.520 mm), in Finnland eine Spurweite von 1.524 mm sowie in Spanien und Portugal die Iberische Breitspur (1.668 mm) zum Einsatz kommt (siehe Abb. 1.1). Neben den bereits erwähnten Schmalspurbahnen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, finden sich Schmalspurbahnen im größeren Umfang beispielsweise (Stand 2012) in Frankreich (580 km), Italien (1200 km), Rumänien (420 km), Spanien (1880 km) und der Ukraine (300 km) (Koch 2012). Betrachtet man den online Eisenbahnatlas openrailwaymap.org, so fällt auf, dass die meisten Schmalspurbahnen in Europa als Stichstrecken mit Anschluss an das restliche Eisenbahnnetz ausgeführt sind. Allerdings bestehen auch Netze zusammenhängender Schmalspurstrecken, wie beispielsweise

das Meterspurnetz im Norden von Spanien, die meterspurige *Chemins de fer de la Corse* auf Korsika, das *Circumvesuviana* genannte 950 mm-Netz in Kampanien oder viele Schweizer Schmalspurbahnen. In zahlreichen Ländern dienen die verbliebenen Schmalspurbahnen hingegen nur mehr touristischen Zwecken. In Ungarn wurde beispielsweise im Jahr 2015 auf den 24 noch in Betrieb stehenden Schmalspurbahnen mit einer Gesamtlänge von 224 km fast ausschließlich Freizeitverkehr angeboten. Von den ungarischen Schmalspurbahnen dienten 2015 nur 12 km dem öffentlichen Personennahverkehr und etwas über 100 km dem Güterverkehr (Orosz und Bachmann 2016).

In Deutschland verlief die Entwicklung des Schmalspurbahnnetzes ähnlich wie in anderen europäischen Ländern: Nach dem Zweiten Weltkrieg war das Netz der Schmalspurbahnen mit öffentlichem Verkehr im heutigen Staatsgebiets Deutschlands etwa 3.800 km lang. In der BRD erlebten die Schmalspurbahnen in den Zeiten des *Wirtschaftswunders* einen kurzen Aufschwung, doch größere Investitionen unterblieben. Angesichts der zunehmenden Konkurrenz durch den PKW- und LKW-Verkehr wurden die meisten Nebenbahnen stillgelegt. 1983 stellte die Deutsche Bahn ihre letzte Schmalspurbahn am Festland ein und auch das Netz der nichtbundeseigenen Schmalspurbahnen sank massiv. In der sowjetischen Besatzungszone und späteren DDR blieben hingegen viele Schmalspurbahnen länger in Betrieb, weil sie in den ersten Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg für das Verkehrswesen in Ostdeutschland unverzichtbar waren. Allerdings unterblieben auch in der DDR wesentliche Investitionen in das Schmalspurbahnnetz und so wurden ab 1965 zahlreiche Bahnen eingestellt. Nach der „Wiedervereinigung“ wurde der Großteil der verbliebenen Schmalspurbahnen der ehemaligen DDR privatisiert. Im Jahr 2011 betrug die Gesamtlänge der im regulären Verkehr betriebenen Schmalspurbahnen in Deutschland rund 423 km, dazu kamen noch 118 km Museumsbahnen in schmaler Spurweite (Machel 2011).

Die Schweiz ging hinsichtlich ihrer Schmalspurbahnen einen anderen Weg. Zwar setzte ab den 1930ern die aufkommende Konkurrenz der Straße den Schweizer Schmalspurbahnen, die Großteils von Privatbahnen betrieben wurden, zu. Aufgrund der Bemühungen zur Verbesserung der Landesverteidigung der Schweiz im Zweite Weltkrieg investierte die Bundesregierung große Summen in die Ertüchtigung des Bahnnetzes. Diese staatlichen Gelder kamen auch den Schmalspurbahnen zugute. Trotzdem wurde bis 1975 auf rund 14 % des Schweizer Bahnnetzes der Betrieb eingestellt, auch auf zahlreichen Schmalspurbahnen. Ab Ende der 1970er-Jahre begann allerdings wieder eine rege Investitionstätigkeit in das Schweizer Bahnnetz, von dem auch die Schmalspurbahnen profitieren. So wurde 1982 der 15,4 km lange schmalspurige Furka-Basistunnel eröffnet, der die Bahnverbindung Oberwald – Realp wintersicher machte. Im Rahmen der Investitionsoffensive „Bahn 2000“ folgten weitere Ausbaumaßnahmen im Schmalspurnetz, wie der 19 km lange Vereinatunnel der Rhätischen Bahn. Der Kohlemangel während und nach dem Ersten Weltkrieg führte zu einem engagierten Elektrifizierungsprogramm des Schweizer Eisenbahnnetzes. Bereits 1960 wurde die Vollelektrifizierung des Schweizer Eisenbahnnetzes erreicht. So fahren auch die Schweizer Schmalspurbahnen, bis auf wenigen ausschließlich touristisch betriebenen Strecken, vollkommen elektrisch (Bärtschi 2019). Heute betreiben in der Schweiz 28 Bahnen ein Schmalspurnetz mit einer Länge von über 1400 km, was etwa 27 % des Schweizer Bahnnetzes entspricht (Bopp et al. 2016).

Vom ehemals umfangreichen bosnischen Schmalspurnetz ist hingegen kaum etwas erhalten geblieben. Nach dem Ersten Weltkrieg baute der neu entstandenen Staat der Serben, Kroaten und Slowenen (SHS-Staat) bzw. das spätere Jugoslawien das Bosnische Schmalspurnetz weiter aus und beschaffte neue Fahrzeuge. Zwar wurde nach dem Zweiten Weltkrieg das stark beschädigte Schmalspurnetz Bosnien-Herzegowinas wieder aufgebaut. Gleichzeitig begann allerdings der Bau von neuen Normalspurstrecken sowie die Umspurung des Schmalspurnetzes auf Normalspur. Ab den 1960ern wurde zudem Straßennetz in Bosnien-Herzegowina ausgebaut, woraufhin zahlreiche Schmalspurbahnen ohne Ersatz durch Normalspurbahnen eingestellt wurden. In den 1970ern

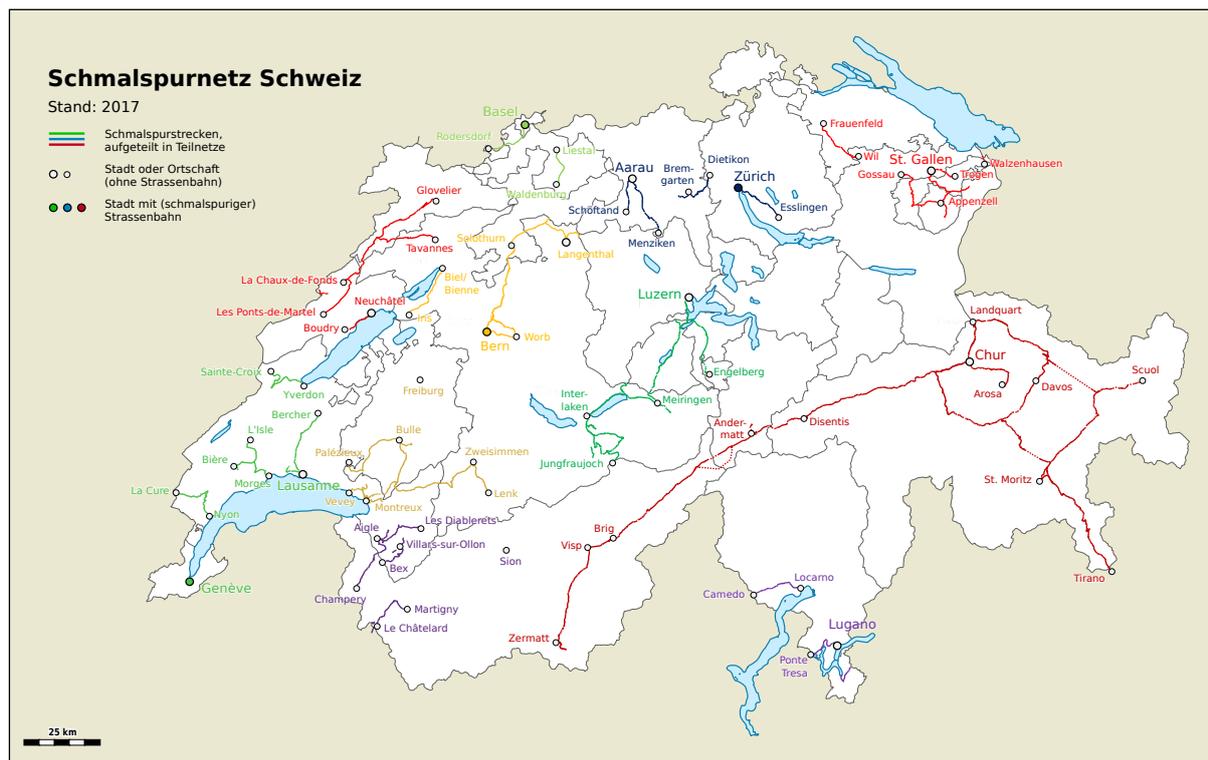


Abb. 1.2: Schmalspurbahnen der Schweiz. *Plutowiki*, CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons, online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schmalspurnetz_Schweiz.svg [Abruf am 17.7.2022]

stellten schließlich die letzten Schmalspurbahnen in Bosnien, der Herzegowina und Dalmatien ihren Betrieb ein, es verblieben nur mehr einige wenige Industriebahnen mit Spurweite 760 mm, wie die heute noch in Betrieb stehende Kohlebahn Banovići (Schiendl 2017).

1.5 Schmalspurbahnen in Österreich

Wie in Abschnitt 1.4.2 nachgezeichnet wurde, führte bereits in der Zwischenkriegszeit die aufkommende Konkurrenz der Straße und die negative wirtschaftliche Entwicklung sowie die einfache Trassierung für viele Schmalspurbahnen zu Problemen. Nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs erlebten die Schmalspurbahnen in Österreich zwar einen kurzen Aufschwung, der allerdings bald durch Diskussionen über die Zukunftsfähigkeit von Schmalspurbahnen beendet wurde. Die erste größere Schmalspurbahn, die in Österreich eingestellt wurde, war, trotz hoher Fahrgastzahlen, 1957 die 63 km lange Salzkammergut-Lokalbahn. Ein Grund für die Einstellung war der Platzbedarf für den Ausbau der parallelen Straßenverbindung (Krobot 1975).

Während lange Zeit der Betrieb der Nebenbahnen mittels Quersubventionen durch Überschüsse der Hauptbahnen finanziert werden konnte, verringerten sich diese Überschüsse durch eine allgemeine Verkehrsverlagerung zugunsten der Straße nach und nach (Faller et al. 1980). Ab 1964 herrschte auf Nebenbahnen der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) ein Investitionstopp. Dieser betraf auch die österreichischen Schmalspurbahnen, die zu jener Zeit vorwiegend von den ÖBB betrieben wurden. Durch fehlende Investitionen wurde der Verkehr auf diesen Bahnen sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr zunehmend unattraktiv (O. Knoll 1985). Trotz Streckeneinstellungen machte 1975 die Streckenlänge der Schmalspurbahnen in Österreich

718 km aus, was damals rund 11 % des Eisenbahnnetzes entsprach (Krobot 1975). Ende der 1970er wurden die ÖBB-Schmalspurbahnen von einer durch die österreichische Raumordnungskonferenz (ÖROK) beauftragten Studie hinsichtlich ihrer verkehrs- und raumwirtschaftlichen Bedeutung (Faller et al. 1980). Aus diesen Untersuchungen gingen Empfehlungen für eine Attraktivierung eines Teils der Bahnen hervor, teilweise wurde eine Einstellung des Gesamtverkehrs empfohlen (Österreichisches Institut für Raumplanung 1980). In weiterer Folge wurde der Verkehr auf weiteren ÖBB-Schmalspurbahnen eingestellt (Wegenstein 2007).

Um die Jahrtausendwende begann schließlich das Ende der Schmalspurbahnen unter Betriebsführung der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB). 1998 wurde aufgrund der großen Nachfrage im Güterverkehr ein Teil der von der Mariazellerbahn abzweigenden Strecke Ober Grafendorf – Wieselburg – Gresten auf Normalspur umgespurt, auf der restlichen Strecke der Betrieb eingestellt. 1992 wurde der Nebenast der Waldviertler Schmalspurbahnen von Alt-Nagelberg nach Heidenreichstein eingestellt. 2001 folgte die Einstellung des Gesamtverkehrs auf den restlichen Strecken der Waldviertler Schmalspurbahnen, hier verblieb ein touristischer Verkehr (Wegenstein 2007). Mit 1. Juli 2008 wurde die Pinzgauer Lokalbahn an das Land Salzburg übertragen (Kabelka 2008), 2010 übernahm das Land Niederösterreich schließlich die letzten verbliebenen Schmalspurbahnen der ÖBB (Lassbacher 2017a). Während die Mariazellerbahn im öffentlichen Personennahverkehr und die Waldviertler Schmalspurbahnen im Ausflugsverkehr weiter betrieben werden, wurde auf der seit Frühjahr 2009 durch Unwetterschäden unterbrochenen Ybbstalbahn der Verkehr eingestellt. Es verblieb nur mehr ein kurzer Abschnitt im Gemeindegebiet von Waidhofen sowie die Bergstrecke Lunz am See – Kienberg-Gaming (Lassbacher 2017b). Eine Übersicht der noch in Betrieb stehenden Schmalspurbahnen findet sich in Abbildung 1.3. Dabei wird farblich zwischen Bahnen mit Personenverkehr (hellgrün), mit Güterverkehr (orange), mit Personen- und Güterverkehr (dunkelgrün) sowie touristischen Betrieben (hellbraun) unterschieden.

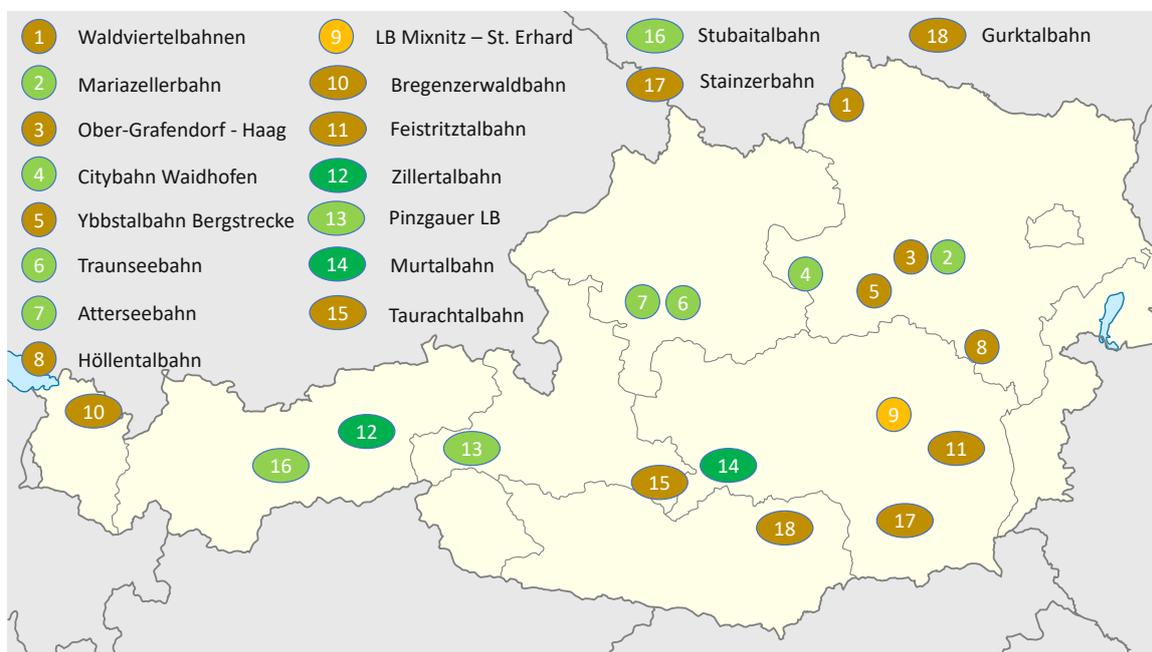


Abb. 1.3: Schmalspurbahnen in Österreich. Eigene Darstellung, Kartenhintergrund: *Lencer*, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons, online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Austria_location_map.svg [Abruf am 8.2.2023]

Nach Zählung der Schienen-Control wiesen im Jahr 2021 rund 5 % des österreichischen Streckennetzes eine Spurweite kleiner als Normalspur auf (Schienen-Control GmbH 2022). Eine Übersicht der Infrastruktur von Schmalspurbahnen mit Adhäsionsantrieb in Österreich (von Nord nach Süd) findet sich in Tab. 1.1 und Abb. 1.3. Bei der *Citybahn Waidhofen* handelt es sich um den letzten verbliebenen Rest der Ybbstalbahn, der nur mehr dem lokalen Personenverkehr innerhalb der Stadt Waidhofen an der Ybbs dient (Eisenbahn Österreich 2021a).

Tab. 1.1: Schmalspurbahn-Infrastruktur (Adhäsionsbahnen) in Österreich

Bundesland	Bezeichnung	Verlauf	Länge	Spurweite
NÖ	Waldviertler Schmalspurbahnen	Litschau / Heidenreichstein – Gmünd – Groß Gerungs	82,0 km	760 mm
NÖ/ST	Mariazellerbahn	St. Pölten – Mariazell	84,2 km	760 mm
NÖ	„Krumpe“	Ober-Grafendorf – Haag	4,0 km	760 mm
NÖ	Citybahn Waidhofen	Stadtgebiet Waidhofen / Ybbs	3,1 km	760 mm
NÖ	Ybbstalbahn Bergstrecke	Lunz am See – Kienberg-Gaming	17,4 km	760 mm
OÖ	Traunseebahn	Gmunden – Vorchdorf	17,9 km	1000 mm
OÖ	Atterseebahn	Vöcklamarkt – Attersee	15,3 km	1000 mm
NÖ	Höllentalbahn	Payerbach – Hirschwang	4,9 km	760 mm
ST	Breitenauerbahn	Mixnitz – Sankt Erhard	10,4 km	760 mm
VBG	Bregenzerwaldbahn	Schwarzenberg – Bezau	5,0 km	760 mm
ST	Feistritztalbahn	Weiz – Birkfeld	23,9 km	760 mm
T	Zillertalbahn	Jenbach – Mayrhofen im Zillertal	31,7 km	760 mm
SBG	Pinzgauer Lokalbahn	Zell am See – Krimml	52,6 km	760 mm
ST/SBG	Murtalbahnen	Unzmarkt – Tamsweg	65,5 km	760 mm
ST	Taurachtalbahnen	Tamsweg – Mauterndorf	10,6 km	760 mm
T	Stubaitalbahnen	Innsbruck – Fulpmes	18,2 km	1000 mm
ST	Stainzer Bahnen	Preding-Wieselsdorf – Stainz	11,3 km	760 mm
KTN	Gurktalbahnen	Treibach-Athofen – Pöckstein-Zwischenwässern	3,3 km	760 mm
Gesamtlänge			461,3 km	

Betrachtet man die verbliebenen Schmalspurbahnen in Österreich, wird, wie aus Tabelle 1.2 erkennbar, nur mehr auf wenigen Schmalspurbahnen Güterverkehr angeboten. Regelmäßigen Güterverkehr in größerem Maßstab gibt es nur mehr auf der seit 1913 elektrisch verkehrenden Lokalbahn Mixnitz - St. Erhard (Breitenauer Bahn) in der Steiermark, wo täglich bis zu zwei Güterzüge mit Magnesit transportiert werden (Strässle 2020), sowie auf der Zillertalbahn, wo im Mai 2021 nach einer mehrjährigen Pause der Güterverkehr mit Holz wieder aufgenommen wurde (Kenning 2022). Eine weitere Schmalspurbahn mit Güterverkehr ist die Murtalbahn (siehe Abschnitt 5).

Als Eisenbahninfrastrukturunternehmen der Schmalspurbahnen treten in Österreich, nach dem Verkauf der letzten ÖBB-Schmalspurbahnen an die Bundesländer (siehe Kap. 1.4.2), ausschließlich Gesellschaften im Eigentum der Bundesländer oder anderer Gebietskörperschaften und

Tab. 1.2: Betrieb auf Schmalspurbahnen (Adhäsionsbahnen) in Österreich

Bezeichnung	Länge	Elektrifizierung	PV	GV	Betreiber
Waldviertler Schmalspurbahnen	82,0 km	-	Tourismus	bis 1992/2001	NÖVOG/WSV ³
Mariazellerbahn	84,2 km	6,5 kV/25 Hz AC	ÖPNV	bis 1999	NÖVOG
„Krumpe“	4,0 km	-	Tourismus	bis 1999	O-AB
Citybahn Waidhofen	3,1 km	-	ÖPNV	bis 2009	NÖVOG
Ybbstalbahn Bergstrecke	17,4 km	-	Tourismus	bis 1988	NLB
Traunseebahn	17,9 km	600/750 V DC	ÖPNV ⁴	bis 1987	StH
Atterseebahn	15,3 km	750 V DC	ÖPNV	bis 1990er	StH
Höllentalbahn	4,9 km	550 V DC	Tourismus	bis 1982	HPG
Breitenauerbahn	10,4 km	800 V DC	Nostalgie	Ja	StLB
Bregenzerwaldbahn	5,0 km	-	Tourismus	bis 1985	BWM
Feistritzalbahn	23,9 km	-	Tourismus	bis 2015	FTB
Zillertalbahn	31,7 km	-	ÖPNV	Ja	ZVB
Pinzgauer Lokalbahn	52,6 km	-	ÖPNV	bis 2020	Salzburg AG
Murtalbahn	65,5 km	-	ÖPNV	Ja	StLB
Taurachtalbahn	10,6 km	-	Tourismus	bis 1980	TBG
Stubaitalbahn	18,2 km	900 V DC	ÖPNV ⁵	bis 1979	IVB
Stainzer Bahn	11,3 km	-	Tourismus	bis 1980	Gde. Stainz
Gurktalbahn	3,3 km	-	Tourismus	bis 1971	GTB
Gesamtlänge	461,3 km				

private Gesellschaften auf. Das sind (Abkürzungen lt. Tabelle 1.2) die auch als *Niederösterreich Bahnen* firmierende Niederösterreichische Verkehrsorganisationsgesellschaft m.b.H. (NÖVOG), Niederösterreichische Lokalbahnen Betriebsges.m.b.H. (NLB), Höllentalbahn-Projekt GmbH (HTB), Obergrafendorfer Anschlussbahnen gemeinnützige GmbH (O-AB), Feistritzalbahn Betriebs GmbH (FTB), Steiermärkische Landesbahnen (StLB), Taurachbahn Ges.m.b.H. (TBG), Verein Gurkthalbahn (GTB), Stern & Hafferl Verkehrsgesellschaft m.b.H. (StH), Zillertaler Verkehrsbetriebe AG (ZVB), die Innsbrucker Verkehrsbetriebe und Stubaitalbahn GmbH (IVB) sowie die Bregenzerwaldbahn-Museumsbahn Betriebsgesellschaft mbH (BWM).

Auf den meisten Schmalspurbahnen in Österreich wurde in den letzten Jahrzehnten der Güterverkehr eingestellt. Bei jenen Strecken, die heute nur mehr im Nostalgieverkehr genutzt werden, erfolgte die Einstellung des Güterverkehrs in der Regel mit der Einstellung des Gesamtverkehrs. Das betrifft von der noch vorhandenen Infrastruktur die Gurktalbahn (1972), die Taurachtalbahn

³Die Zweigstrecke Alt Nagelberg – Heidenreichstein wird vom Waldviertler Schmalspurverein (WSV) betrieben.

⁴Betrieb gemeinsam mit Straßenbahn Gmunden.

⁵Verkehr als Teil der Straßenbahn Innsbruck.

(1980), die Bregenzerwaldbahn (1980–1985), die Ybbstalbahn-Bergstrecke (1988) und die Waldviertler Schmalspurbahnen (1992 bzw. 2001). Auf der Stainzer Bahn konnte sich hingegen nach Einstellung des Personenverkehrs der Güterverkehr noch bis 1980 halten, auf der Höllentalbahn bis 1982. Die Mariazellerbahn, auf der noch heute regulärer Nahverkehr betrieben wird, sowie deren Zweigstrecke Ober-Grafendorf – Gresten stellte den Güterverkehr im Jahr 1999 ein (Wegenstein 2007). Letztere wurden von den ÖBB Ende 2010 an das Land Niederösterreich verkauft und werden heute von der Niederösterreichischen Verkehrsorganisationsgesellschaft (NÖVOG) betrieben. Der verbliebene Rest der Zweigstrecke Ober-Grafendorf - Gresten ging 2016 in das Eigentum einer Nostalgiebahngesellschaft über (Lassbacher 2019).

Auf den österreichischen Meterspurbahnen, auf denen heute noch öffentlicher Personennahverkehr angeboten wird, besteht kein Güterverkehr mehr. So wurde auf der Atterseebahn Vöcklamarkt – Attersee in den 1980ern noch Holz mit eigenen Güterwagen transportiert (Eisenbahn 1985). Der Güterverkehr kam hier allerdings Mitte der 1990er-Jahre zum Erliegen (Neumann, E-Mail vom 11.8.2022). Ein Spezialfall ist die Stubaitalbahn Innsbruck – Fulpmes, hier wurde der Güterverkehr 1979 beendet. Heute wird die Bahn als Teil der Innsbrucker Straßenbahn betrieben. Ähnliches gilt für die Traunseebahn, hier endete der Güterverkehr 1987, heute ist die Bahn mit der Straßenbahn Gmunden verbunden. Als weitere schmalspurige Bahn wird in der Literatur oft die Innsbrucker Mittelgebirgsbahn nach Igls genannt, die zwar ursprünglich als Lokalbahn konzessioniert wurde, heute aber als Linie 6 Teil der ebenfalls schmalspurigen Straßenbahn Innsbruck ist (Wegenstein 2007).

Noch in den letzten Jahren sank die Zahl an Schmalspurbahnen mit Güterverkehr in Österreich. So wurde auf der Feistritzalbahn bis Jänner 2015 Güterverkehr zu einem Bergbaubetrieb angeboten. Nachdem der Güterverkehr aufgrund des schlechten Zustands einer Brücke eingestellt werden musste, verkaufte das Land Steiermark die Bahn an die private Feistritzalbahn Betriebs GmbH (Fladerer 2016a). Zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit ist die Zukunft der Bahn jedoch nach der Insolvenz eines der Eigentümer der Feistritzalbahn Betriebs GmbH unsicher (Reithofer 2022). Auf der Pinzgauer Lokalbahn wurde bis zum Jahr 2020 Güterverkehr mit Rollwagen angeboten. Nachdem das Angebot seit 2017 nicht mehr genutzt wurde, wurden im Jahr 2020 im Zuge einer Streckensanierung das Dreischienengleis sowie Umladeanlagen im Bahnhof Tischlerhäusl entfernt, womit kein Güterverkehr mehr möglich ist (Kaindl 2020). Im Jahr 2021 gab das Land Salzburg eine Studie zur möglichen Wiedereinführung des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen in Auftrag (Sendlhofer 2022).

Neben den bereits erwähnten Schmalspurbahnen existieren noch zwei grenzüberschreitende Werksbahnen mit schmaler Spurweite. Die 6,1 km lange Wachtlbahn verbindet einen Steinbruch im Tiroler Ort Wachtl mit einem Zementwerk in Kiefersfelden in Deutschland. Bis zum Jahr 2017 fand hier Güterverkehr und Nostalgieverkehr mit Fahrgästen statt. Seit 2017 ist der Verkehr allerdings aufgrund von Oberbaumängeln eingestellt, der Nostalgie-Betrieb soll in Zukunft wieder möglich werden (Hötzelsperger 2022). Ein Spezialfall ist die ehemalige Dienstbahn der Internationalen Rheinregulierung (Spurweite 750 mm) die ursprünglich mit einer Länge von 25 km entlang des Rheins in Österreich und der Schweiz verkehrte. Heute findet auf einem Teil der Strecke Nostalgieverkehr statt (Rhein-Schauen o. D.). Der Fortbestand dieser Bahn ist allerdings aufgrund von geplanten Renaturisierungsmaßnahmen entlang des Rheins unsicher (Thurnher 2021). Bis 2007 wurden auf der Dienstbahn der internationalen Rheinregulierung Flussbausteine transportiert (Kaizler 2020).

Als weitere schmalspurige Bahnen existieren mit der Achenseebahn, Schafbergbahn und Schneebergbahn meterspurige Zahnradbahnen. Neben diesen bestehen auch schmalspurige Straßenbahnen in Gmunden, Innsbruck und Linz (Wegenstein 2007). Diese werden in dieser Arbeit aufgrund der fehlenden Bedeutung für den Güterverkehr nicht behandelt.

1.6 Güterverkehr auf Schmalspurbahnen

1.6.1 Transportmittel auf Schmalspurbahnen

Wie in Abschnitt 4.2 noch genauer beschrieben wird, können auf Schmalspurbahnen Güter mit eigenen, auf die Eigenschaften der Infrastruktur angepassten, Fahrzeugen transportiert werden. Um das in diesem Fall notwendige Umladen der Güter zwischen den Spurweiten zu umgehen, wurden Rollböcke und Rollwagen (siehe Abschnitt 4.1.3) entwickelt. Bei Rollböcken werden die Achsen von normalspurigen Güterwagen durch kleine Schmalspurwagen aufgenommen, bei Rollwagen werden ganze Waggons auf flachen schmalspurigen Güterwagen transportiert (siehe Abb. 4.8).

Als Spezialfall erwähnt Ringseisen (2013) auch den Einsatz von Dreischienengleisen zum Transport von normalspurigen Güterwagen mit schmalspurigen Lokomotiven. Dafür muss das schmalspurige Triebfahrzeug mit eigenen, außermittig liegenden, Schraubenkupplungen ausgerüstet sein. Als Anwendungsfälle werden die Bedienung von Anschlussbahnen wie beispielsweise im Großraum Chur durch die Rhätische Bahn oder der Vershub im Bereich von Umschlaganlagen, wie ehemals von der Pinzgauer Lokalbahn in Zell am See praktiziert, genannt.

1.6.2 Güterverkehr auf Schmalspurbahnen in Europa

Historisch wurde auf den meisten Schmalspurbahnen in Österreich Güterverkehr angeboten (siehe auch Tab 1.2). So waren 1974 alle Schmalspurbahnen der ÖBB mit Anschlussbahnen von Unternehmen ausgerüstet, über diese wurden jährlich über 8000 Wagen zugestellt und über 285.000 Tonnen transportiert (Faller et al. 1980). In den 1970ern stellten auf den Schmalspurbahnen der ÖBB land- und forstwirtschaftliche Produkte, vor allem Holz, das wichtigste Transportgut dar (Standort + Markt Beratungsgesellschaft 1980). Auf den ÖBB-Strecken und der Zillertalbahn wurde der Verkehr vorwiegend mit Rollwagen und Rollböcken abgewickelt. Einzig auf der Ybbstalbahn mussten aufgrund des beschränkten Lichtraumes schmalspurige Güterwagen verwendet werden (Hardmeier 2019). Als Problem erwies sich zunehmend, dass in den 1980ern der Großteil der Fahrzeuge für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen noch aus dem 19. Jahrhundert stammte. So wurden auf der Mariazellerbahn bis Ende des Jahres 1984 ungebremste Rollböcke verwendet, das Bremsen erfolgte durch eigene Hilfsbremswagen, auf denen ein Bremser mitfahren musste (O. Knoll 1985). Die Steiermärkischen Landesbahnen gingen zu dieser Zeit einen anderen Weg und statteten ihre Schmalspurbahnen mit modernen Fahrzeugen aus (Hardmeier 2019). Im Zillertal und bei den ÖBB wurden schließlich ab den 1980ern moderne Rollwagen von den Jenbacher Werken beschafft, um den Betrieb aufrechterhalten zu können (Ringseisen 2013).

In Österreich wird Güterverkehr heute nur mehr auf drei Schmalspurbahnen angeboten. Auf der Zillertalbahn wurden bis 2013 Normalspurgüterwagen auf Rollwagen transportiert. Den Höhepunkt des Güterverkehrsaufkommens erreichte die Bahn im Jahr 2000, als über 440.000 Tonnen transportiert wurden. Später sanken die Tonnagen und 2013 wurden die letzten verbliebenen Holztransporte auf die Straße verlegt. Im Mai 2021 begann der Güterverkehr zum Sägewerk Binderholz in Fügen wieder. Für den Transport wurden 30 Rollwagen mit neuen Rungenaufbauten versehen, diese werden nun als Güterwagen eingesetzt. Täglich sollen drei Güterzüge geführt und so im Jahr 200.000 t Holz statt auf der Straße mit der Bahn transportiert werden. Das Umladen in Jenbach wird mit einem Bagger durchgeführt (Kenning 2022). Zusätzlich wurde im Frühjahr 2022 damit begonnen, auch fertige Produkte des Sägewerks mit Normalspur-Güterwagen auf Rollwagen zu transportieren. Es wird mit einem Aufkommen von rund 1000 Wagenladungen im Jahr gerechnet (Beier 2022a).

Eine weitere Schmalspurbahn mit aktivem Güterverkehr ist die Lokalbahn Mixnitz – St. Erhard. Die 1913 als Lokalbahn für den Güter- und Personenverkehr eröffnete elektrische Bahn dient heute

nur mehr dem Transport von Magnesit vom Steinbruch in der Breitenau zum Bahnhof Mixnitz-Bärenschützklamm an der Südbahn zwischen Bruck an der Mur und Graz, wo das Ladegut auf Normalspurwagen verladen wird. Das Magnesit wird sowohl in Schüttwagen als auch in Bigbags mit 1000 bis 1300 Liter Volumen auf Flachwagen transportiert. Das Verkehrsaufkommen ist allerdings stark von der Auftragslage des einzigen Kunden der Bahn abhängig (Fladerer 2016b). Bis heute wird der Betrieb teilweise mit Lokomotiven aus dem Jahr 1913 abgewickelt. Ein gewisse Verjüngung des Fuhrparks konnte durch Übernahme von Flachwagen des Baujahres 1942 erzielt werden, diese ersetzen ältere Fahrzeuge (Moser 2020). Die Bigbags werden auf Europaletten transportiert, das Umladen an den jeweiligen Endbahnhöfen geschieht mittels Gabelstapler. Seltener wird das Magnesit auf abgedeckten Niederbordwagen transportiert, dann wird das Material in Mixnitz durch Kippen des gesamten Güterwagens in einen Schüttbunker entleert (Strässle 2020).

Bis vor wenigen Jahren wurde auf der Murtalbahn umfangreicher Güterverkehr abgewickelt. Dafür wurden noch in den 1970ern und 1980ern zahlreiche Güterwagen neu beschafft. Allerdings reduzierte sich die Nachfrage im Güterverkehr bis 2015 derart, dass die Betreiberin der Bahn, die Steiermärkischen Landesbahnen, viele Güterwagen und für den Güterverkehr geeignete Triebfahrzeuge verkaufte (Lassbacher 2015). Bis heute befindet sich in Unzmarkt eine großzügige Umladeanlage. Im Jahr 2019 war ein tägliches Güterzugpaar im Fahrplan vorgesehen, dieses fuhr allerdings nur mehr bei Bedarf (Hardmeier 2019). Im Jahr 2022 verkehrten nur mehr ein bis zwei wöchentliche Mineralöltransporte von Unzmarkt nach Murau. In Zukunft sollen zudem Container für eine Brauerei in Murau transportiert werden (Beier 2022b).

In Deutschland findet heute nur mehr auf drei Schmalspurbahnen regelmäßiger Güterverkehr statt. Die Wangerooger Inselbahn befördert als letzte verbliebene Schmalspurbahn der Deutschen Bahn AG Personen und Güter auf der Nordseeinsel Wangerooge. Im Harz befindet sich das längste Schmalspurnetz Deutschlands. Auf einem Teil ihres 140 km langen Netztes befördern die Harzer Schmalspurbahnen Güter (Machel 2011). Als dritte Bahn ist noch die Brohltalbahn in Rheinland-Pfalz zu nennen, die jährlich rund 15.000 Tonnen Material zum Rheinhafen in Brohl transportiert (Rail Business 2011a).

In der Schweiz bieten mehrere schmalspurige Bahnen Güterverkehr an. So werden bei der Rhätischen Bahn (RhB) mit eigenen Fahrzeugen unter anderem Brennstoffe in Kesselwagen, Holz und Container transportiert (Rellstab 2019). 2021 wurden von der RhB mit 522.000 Zugkilometern 618.000 Tonnen Güter befördert. Die beförderten Güter konzentrieren sich auf die Segmente Lebensmittel, Mineralölprodukte, Brief- und Paketsendungen, Holztransporte sowie den Transport von Baustoffen und Abfällen (Rhätische Bahn AG 2022b). Für den Güterverkehr unterhält die RhB über 300 Güterwagen. Es werden 30 Verladestellen auf Bahnhöfen sowie 65 Anschlussgleise bedient (Rhätische Bahn AG 2022a). Auch die Matterhorn - Gotthard - Bahn (MGB) transportiert zwischen Visp (Anschluss an das normalspurige Netz der SBB) und dem autofreien Ferienort Zermatt Güter auf Meterspur. Anders als bei der RhB ist das Angebot der MGB eine reine Punkt-zu-Punkt-Verbindung (Metz 2012). Im Jahr 2021 machten diese Transporte, die sich auf die Sektoren Nahrungsmittel, Baumaterialien und Heizöl konzentrieren, rund 36.000 Tonnen aus (Matterhorn Gotthard Bahn 2022). Im Meterspurnetz der Aare Seeland mobil AG (ASm) finden sich alle Formen des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen: auf einem Dreischienengleis, mit Rollböcken sowie Wagenladungs- und Ganzzugverkehr mit schmalspurigen Güterwagen (Metz 2012).

Wie in Abschnitt 1.4.3 beschrieben, finden sich in zahlreichen europäischen Ländern Schmalspurbahnen. Auch abseits von Deutschland, Österreich und der Schweiz wird auf manchen dieser Schmalspurbahnen Güterverkehr angeboten. Beispielhaft kann hier Spanien genannt werden, wo sowohl in Katalonien als auch im Norden Spaniens ausgedehnte Meterspurbahnen bestehen. So werden in Katalonien Neufahrzeuge vom Seat-Werk in Martorell zum Hafen Barcelona transpor-

tiert (Woker 2013). Neben Autos werden Kalisalze in umschlagbaren Ladungsträgern von einem Bergwerk in Súría zum Hafen Barcelona transportiert (Eisenbahn Österreich 2018). Im Norden Spaniens ist sowohl die staatliche RENFE als Nachfolgerin der 2012 zerschlagenen Schmalspurgesellschaft FEVE (Rail Business 2012) als auch die im Besitz der Baskischen Regionalregierung stehende EuskoKargo im meterspurigen Güterverkehr aktiv (Rail Business 2011b). Im Jahr 2009 beförderte die FEVE beispielsweise rund 2,8 Mio Tonnen (Rail Business 2010). Da das spanische Schmalspurnetz nur teilweise elektrifiziert ist, kommen in der Regel Zweikraftlokomotiven (siehe auch Abschnitt 4.2.1) zum Einsatz (Kache 2016).

1.6.3 Güterverkehr auf Schmalspurbahnen weltweit

Außerhalb Europas gehen Schmalspurbahnen häufig auf koloniale Bestrebungen diverser europäischer Staaten zurück. Während Küsten und Flüsse bereits seit dem 15. Jahrhundert von europäischen Kolonialmächten beherrscht wurden, ermöglichte erst der Bau von Eisenbahnen die Herrschaft über das Hinterland und dessen wirtschaftliche Ausbeutung (Smoliner 2015). Obwohl es bereits Mitte des 19. Jahrhunderts kleinere Bahnprojekte in den Kolonien gab, begann erst mit der Errichtung von Schmalspurbahnen in Europa (siehe Abschnitt 1.4.1) ab den 1870ern der großangelegte Bau von Bahnen in Afrika, Asien und Südamerika – großteils in einer Spurweite zwischen 3 Fuß (914 mm) und 3 Fuß 6 Zoll (1067 mm) (Divall 2003). Daneben entstanden Bahnen der Spurweite von 760 mm, wie sie beispielsweise in Bosnien üblich waren (Smoliner 2015).

Häufig wurden die Eisenbahnnetze in den Kolonien von privaten Investor:innen errichtet, wobei oft die Kolonialstaaten finanzielle Garantien übernahmen. Der Grund für die Wahl kleinerer Spurweiten lag wie in Europa in der Erwartung, dass dadurch Bau- und Betriebskosten im Vergleich zur Normalspur geringer ausfallen würden und sich somit früher eine Rentabilität einstellt. Auch waren die meist kurzen Bauzeiten von Interesse. Dadurch kamen schmale Spurweiten nicht nur bei Lokalbahnen geringerer verkehrlicher Bedeutung zum Einsatz, sondern auch auf Hauptstrecken (Smoliner 2015). Noch heute sind in weiten Teilen Südamerikas und Südostasiens sowie in Afrika südlich der Sahara schmalspurige Spurweiten vorherrschend (siehe Abbildung 1.1). Eine einheitliche Spurweite war jedoch nicht von Interesse, weil Kolonialstaaten vor allem die Bestrebung hatten, Häfen mit dem jeweiligen Hinterland zu verbinden, um ihre Kolonien möglichst effizient ausbeuten zu können (Divall 2003). Wie im online Eisenbahnatlas www.openrailwaymap.org erkennbar ist, bestehen am afrikanischen Kontinent bis heute vorwiegend Stichstrecken, ein zusammenhängendes Netz in einer Spurweite von 1067 mm besteht nur in Südafrika mit einzelnen Verbindungen nach Norden, die bis in den Kongo und nach Tansania reichen.

Aber auch in Staaten, die eine hohe Selbständigkeit behalten haben, wie Japan, oder in solchen, die früh ihre Unabhängigkeit erhalten haben, wie Ecuador, lag der Bau der ersten Eisenbahnen in den Händen von ausländischen Investor:innen, die aus Kostengründen eine schmale Spurweite gewählt haben (Divall 2003). In Japan setzte sich beispielsweise die Kapspur (1.067 mm) durch, bis heute bestehen über 80 % des japanischen Bahnnetzes aus dieser Spurweite (cia.gov 2022). Durch die spätere Kolonialisierung von Teilen Asiens durch Japan wurden in zahlreichen weiteren Staaten der Region Bahnen in Kapspur errichtet (Divall 2003).

Auch wenn auf zahlreichen Schmalspurbahnen weltweit Güterverkehr abgewickelt wird,⁶ sind diese Bahnen funktional mit europäischen Normalspurbahnen zu vergleichen. Aus diesem Grund wurden Schmalspurbahnen außerhalb Europas in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

⁶Den Schmalspurgüterverkehr in Japan und Südafrika stellt beispielsweise Förster (2022) in seiner Arbeit vor.

1.7 Stand der Forschung

Betrachtet man den Stand der Forschung zum Thema Güterverkehr auf Schmalspurbahnen, so fällt auf, dass dazu nur sehr wenige Publikationen in den gängigen Datenbanken von *Web of Science*, *Scopus*, *ResearchGate* oder *Google Scholar* zu finden sind. Diese befassen sich jedoch mit anderen Aspekten als die vorliegende Arbeit. Beispielsweise untersuchte Van der Mescht (2002) die Nachhaltigkeit des Güterverkehrs auf der Schmalspurbahn Port Elizabeth - Avontuur (Spurweite 610 mm) in Südafrika. Auch finden sich Arbeiten zur Entwicklung des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen in diversen Ländern, wie beispielsweise in der Deutschen Demokratischen Republik von Hörz und Richter (2011). In Österreich läuft zudem zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit ein Forschungsprojekt, bei dem ein neuer Ladungsträger für den Holztransport auf der Murtalbahn entwickelt werden soll (TU Wien 2022). In den Fachzeitschriften des Eisenbahnwesens, wie der *Railway Gazette International*, *ZEV Rail*, *Eisenbahntechnischen Rundschau*, dem *Eisenbahningenieur* oder *RailBusiness* konnten nur Artikel zu einzelnen Teilaspekten des Themas gefunden werden. Beispielsweise beschäftigt sich der Artikel von Gopalakrishnan (2007) in der *Railway Gazette International* mit dem Prud'homme Grenzwert für Meterspurbahnen oder Steiner und Krüger (2022) in der *Eisenbahntechnischen Rundschau* mit verwerfungssicheren Schmalspurgleisen. Eine Recherche in Bibliothekskatalogen deutschsprachiger technischer Hochschulen legt nahe, dass es hier kaum Forschung zu diesem Thema gibt und es kaum Thema von Abschlussarbeiten ist. Eine Ausnahme stellen die Arbeiten von Ringseisen (2013) zu Rollfahrzeugen und von Förster (2022) zu intermodalem Verkehr auf Schmalspurbahnen dar.

Besser erforscht sind hingegen die in dieser Arbeit betrachteten Faktoren, die den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen beeinflussen. Beispielsweise stellen in der Schweiz die vom Bundesamt für Verkehr herausgegebenen *Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung* (AB-EBV) (BAV 2020a) den Stand der Technik für Infrastruktur, Fahrzeuge und Bahnbetrieb sowohl für Normal- als auch Schmalspur dar. Aufbauend auf den Bestimmungen der AB-EBV erarbeitete ein Arbeitskreis des Schweizer Verbandes öffentlicher Verkehr die Richtlinie R RTE 22546 *Geometrische Gestaltung der Fahrbahn* (Verband öffentlicher Verkehr 2022) für die Meterspur. Mit den österreichischen Trassierungsrichtlinien für Schmalspurbahnen beschäftigte sich beispielsweise Fellingner (2017) in seiner Diplomarbeit, während die Diplomarbeit von Marek (1989) die Oberbaugestaltung von Schmalspurbahnen zum Thema hatte. Auch die Dissertation von B. Knoll (1998) zur Möglichkeit von Gleisverwerfungen bei Schmalspurbahnen hatte den Oberbau von Schmalspurbahnen zum Thema. Auf der TU Graz wurde im Jahr 2018 von Neuhold et al. die Optimierung von Trassierungsparametern für die Murtalbahn untersucht, der dazugehörige Bericht allerdings nicht publiziert. Als konkretes Anwendungsbeispiel wurde die Trassierung der Pinzgauer Lokalbahn Zell am See – Krimml Thema in den Diplomarbeiten von Voithofer (2013) und Edlinger (2020) thematisiert. Zum Thema multimodale Schnittstellen bzw. zum kombinierten Verkehr finden sich zahlreiche Arbeiten, wie beispielsweise das Handbuch von Gronalt et al. (2010) oder die Diplomarbeit von Novoszel (2008) – auch wenn sich diese nicht auf Schmalspurbahnen beziehen.

Kapitel 2

Methodik

Wie bereits in Abschnitt 1.7 beschrieben, ist das Thema der vorliegenden Arbeit bisher wenig erforscht, weshalb die Arbeit versucht, die Forschungsfragen (siehe Abschnitt 1.1) mittels Literaturrecherche in der zur Verfügung stehenden Fachliteratur bzw. Fachzeitschriften, Expert:inneninterviews sowie durch Recherchen im Internet beantwortet. Dabei stützt sich die Arbeit auf Fachliteratur; Informationen aus Expert:inneninterviews und dem Internet wurden nur verwendet, um die von der Fachliteratur nicht abgedeckten Fragestellungen zu beantworten. Für die betrieblichen Fragestellungen wurde zudem für die Murtalbahn in der Steiermark mithilfe des Fahrplanprogramms FBS ein Musterfahrplan erstellt.

2.1 Literatur- und Internetrecherche

Sowohl für die Formulierung der Einleitung in das Thema als auch für die Beantwortung der Forschungsfrage wurden Literatur- und Internetquellen konsultiert. Im Bereich der Einleitung musste teilweise auf populärwissenschaftliche Literatur zurückgegriffen werden. Da für infrastrukturelle und betriebliche Voraussetzungen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen nur sehr wenig Literatur existiert, wurde für diese Abschnitte auf verwandte Literatur, meist aus dem Bereich der Normalspur, zurückgegriffen. Relevante Ergebnisse wurden daraufhin auf die Eigenschaften der Schmalspur umgelegt. Zusätzlich wurden in Österreich, Deutschland und der Schweiz gültige Normen und Regelwerke zum Thema analysiert und in der vorliegenden Arbeit behandelt. Auch wurden Ausgaben von Fachzeitschriften des Eisenbahnwesens der letzten Jahrzehnte systematisch auf relevante Artikel untersucht. Sofern keine Monografien oder periodischen (Druck-)Werke verfügbar waren, wurde auf Informationen von Homepages zurückgegriffen, wobei darauf geachtet wurde, dass nur solche Informationen verwendet wurden, bei denen der:die Autor:in nachvollziehbar angegeben ist bzw. diese von einem Unternehmen stammen. Leicht änderbare anonyme Beiträge wie in der online Enzyklopädie *Wikipedia* wurden bis auf einzelne Abbildungen, deren Inhalt sich mit anderen Rechercheergebnissen deckt, gemieden.

2.2 Expert:innenfachgespräche

Aufgrund des Umstandes, dass viele für diese Arbeit relevanten Informationen nicht öffentlich verfügbar sind, wurden einerseits Auskünfte bei Mitarbeiter:innen diverser Eisenbahnverkehrsunternehmen im Schmalspurbereich eingeholt und andererseits Expert:innenfachgespräche geführt. Diese Form der Informationsbeschaffung hat in der vorliegenden Arbeit eine die Literaturrecherche ergänzende Funktion.

Im Allgemeinen wird unter dem Begriff *eine:r Expert:in* eine Person verstanden, die sachkundig ist und über entsprechendes Spezialwissen verfügt. In der sozialwissenschaftlichen Fachliteratur zu dem Thema wird allerdings auf den Umstand verwiesen, dass das Expert:in-Sein keine personelle Eigenschaft oder Fähigkeit, sondern immer auch eine Zuschreibung ist (Bogner et al. 2014). Ein:e Experten:in ist also immer auch ein Konstrukt der:des Forschenden. Zudem spielt die

gesellschaftliche Rolle des:der Expert:in eine Rolle. So haben sich nach Bogner et al. (2014, S. 13) Expert:innen „die Möglichkeit geschaffen, mit ihren Deutungen das konkrete Handlungsfeld sinnhaft und handlungsleitend für Andere zu strukturieren.“ Miegl und Näf (2005) lehnen in ihrem Werk über *Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften* ihren Expert:innen-Begriff an den der Psychologie an, wo die Kompetenz der befragten Person im Vordergrund steht und definieren Expert:innen als „jemand, der/die aufgrund langjähriger Erfahrung über bereichsspezifisches Wissen/Können verfügt“ (Miegl und Näf 2005, S. 9). Für die vorliegende Arbeit wurde bei der Auswahl der angefragten Expert:innen sowohl die Ausbildung und Stellung der Person im Unternehmen als auch die Erfahrung berücksichtigt.

Für Fachauskünfte wurden über E-Mail Stefan Greiner (Leiter Fahrzeug- und Energietechnik StLB), Laurenz Neumann (Betriebsleiter-Stv. Stern & Hafferl), Michael Tschudnig (Leiter Bahnmeisterei Kirchberg / Gmünd / Waidhofen NÖVOG) sowie Helmut Zwirchmayr (Leiter Infrastruktur Stern & Hafferl) kontaktiert. Außerdem wurden Experteninterviews am 7.11.2022 in Jenbach mit Helmut Schreiner (Technischer Vorstand der Zillertaler Verkehrsbetriebe) und Hannes Obholzer (Leiter Bahnbetrieb Zillertaler Verkehrsbetriebe) sowie am 16.1.2023 digital über Teams mit Daniel Gößler (Leiter Infrastruktur Steiermärkische Landesbahnen) geführt.

Expert:inneninterviews sind ein Instrument der qualitativen (Sozial-)Forschung. Diese dienen einerseits der Wissensbeschaffung, andererseits werden sie in den Sozialwissenschaften zur Analyse des Gesagten angewendet. Bogner et al. unterscheiden in diesem Zusammenhang zwischen technischem Wissen, Prozesswissen und Deutungswissen. Bei technischem Wissen handelt es sich beispielsweise um Daten und Fakten, es kann also kodifiziert werden. Da sich die befragte Person irren kann, stellt diese Form des Wissens eine mögliche Fehlerquelle dar (Bogner et al. 2014). Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit nur technisches Wissen abgefragt, das nicht aus der konsultierten Fachliteratur gewonnen werden konnte. Prozesswissen gibt hingegen Einblicke in Handlungsabläufe, Organisationen usw., während Deutungswissen die subjektive Sichtweise der interviewten Person darstellt. Nach Bogner et al. liegt die methodische Stärke des Expert:inneninterviews in den Bereichen des Prozesswissens und Deutungswissens. Entsprechend wurde in der vorliegenden Arbeit technisches Wissen vorzugsweise über E-Mail abgefragt, während der Fokus des Expert:inneninterviews auf Prozesswissen lag. Hierfür eignet sich nach Bogner et al. besonders das *systematisierende Interview*, dessen Ziel in der möglichst weitgehenden Erhebung des Sachwissens des:der Expert:in liegt.

Die als Expert:inneninterviews geführten Gespräche wurden entsprechend vorbereitet. Da nach Miegl und Näf (2005) die Kompetenz der fragenden Person wichtig ist, um zu verhindern, dass die befragte Person in eine didaktische Rolle schlüpft und die Zusammenhänge vereinfacht darstellt, wurden die Gespräche zeitlich am Ende der Literaturrecherche durchgeführt. Dadurch konnte sichergestellt werden, noch bestehende „Lücken“ in der vorliegenden Arbeit zu füllen. Als Format wurde für die Expert:inneninterviews jenes des *leitfadengestützten Interviews* gewählt. Zur Vorbereitung und Durchführung des Interviews wurde ein Leitfaden erstellt. Dieser soll das Themenfeld strukturieren sowie als Hilfsmittel in der Erhebungssituation dienen (Bogner et al. 2014).

Das erste Expertengespräch fand am 7.11.2022 in den Räumlichkeiten der Zillertaler Verkehrsbetriebe AG in Jenbach statt und wurde mit dem technischen Vorstand der Zillertaler Verkehrsbetriebe Helmut Schreiner geführt. Wenige Minuten nach Beginn stieß auch der Betriebsleiter des Bahnbetriebs Hannes Obholzer dazu. Für das Gespräch wurden entsprechend dem Aufbau der vorliegenden Arbeit Fragen aus den Themenbereichen „Güterverkehr auf der Zillertalbahn“, Trassierung, Lichtraum, Belastbarkeit des Oberbaus, Fahrzeuge und Betrieb vorbereitet, andere Fragen entstanden spontan im Gespräch. Ein zweites Experteninterview fand am 16.1.2023 mit dem Leiter des Fachbereichs Infrastruktur bei den Steiermärkischen Landesbahnen Daniel Gößler online via Microsoft TEAMS geführt. Dieses behandelte vorwiegend die Trassierung,

Belastbarkeit und den Betrieb auf der schmalspurigen Murtalbahn. Beide Gespräche wurden aufgezeichnet und transkribiert um als Quelle für die vorliegende Arbeit dienen zu können.

2.3 Erstellung eines Musterfahrplans

Als Beispiel für eine Schmalspurbahn mit Güterverkehr wird in Abschnitt 5 die Murtalbahn in der Steiermark betrachtet. Um die betriebliche Machbarkeit des Güterverkehrs auf dieser Strecke nach Anpassungen am Fahrplan des Personenverkehrs in Folge der Eröffnung der Koralmbahn beurteilen zu können, wurde ein Musterfahrplan auf der adaptierten Infrastruktur des Abschnitts Unzmarkt – Murau mittels des Fahrplanbearbeitungssystems FBS erstellt.

Das Fahrplanbearbeitungssystem FBS wird vom Deutschen Ingenieurbüro *Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung* (iRFP) entwickelt und vertrieben. FBS bietet eine Vielzahl an Funktionen zur Erstellung von Fahrplänen und Umlaufplänen sowie zur Fahrzeit- und Energieberechnung (iRFP o. D.[b]). Für die vorliegende Arbeit wurde das Bildfahrplanmodul *iPLAN* verwendet. Dieses ermöglicht die Konstruktion von Fahrplantrassen auf Basis von hinterlegten Infrastruktur- und Fahrzeugdaten (iRFP o. D.[a]).

Die Infrastrukturdaten für die vorliegende Arbeit wurden von iRFP aus openrailwaymap.org extrahiert und zur Verfügung gestellt sowie mit Daten aus dem *FBS-Österreichnetz* ergänzt. Das *FBS-Österreichnetz* wird vom Zusammenschluss der Österreichischen Verkehrsverbände *Mobilitätsverbände Österreich* und der *Schieneinfrastruktur-Dienstleistungsgesellschaft* SCHIG verwaltet und wird im Rahmen einer Forschungskoooperation zwischen TU Wien und SCHIG genutzt. Für einen eventuellen Infrastrukturausbau wurden Annahmen laut Anhang getroffen, wobei die Kilometrierung und notwendige Maßnahmen (z.B. Begradigungen der Strecke) aus aktuellen Luftbildern des Geoinformationssystems des Landes Steiermark (<https://gis.stmk.gv.at/>) abgeschätzt wurden.

Für die auf der Infrastruktur verkehrenden Züge wurden Zuggarnituren aus Triebfahrzeugen, die in der *Triebfahrzeugdatenbank* der Software FBS enthalten sind, gebildet. Da keine Fahrzeuge der Steiermarkbahn in der Triebfahrzeugdatenbank hinterlegt waren, wurden baugleiche Fahrzeuge der NÖVOG und Zillertaler Verkehrsbetriebe herangezogen. Für das Zukunftsszenario neuer Fahrzeuge auf der Murtalbahn wurden die Reihe ET 1–9 der NÖVOG verwendet, da diese ein Beispiel für ein zeitgemäßes Fahrzeug auf einer Spurweite von 760 mm darstellt. Die Anhängelast des Güterverkehrs wurde auf Basis von real existierenden Schmalspur-Güterwagen der Steiermarkbahn Transport und Logistik GmbH gebildet, wobei die Fahrzeugdaten aus Wittmann (1994) bzw. einer Auskunft von Greiner (E-Mail vom 3.10.2022) stammen. In der Fahrzeitberechnung wurde ein Fahrzeitzuschlag von 3 % sowie eine Bremseneinstellung (siehe Abschnitt 4.3.2.2) von 120 R für den Personen- und 80 P für den Güterverkehr verwendet. Zur Validierung der Annahmen wurde ein Probelauf mit bestehenden Fahrzeugen durchgeführt und die Fahrzeiten mit dem aktuellen Fahrplan abgeglichen.

Kapitel 3

Infrastrukturelle Voraussetzungen

3.1 Trassierung

Unter Trassierung versteht man im Eisenbahnwesen das Festlegen eines Fahrwegs als eine Abfolge geometrischer Elemente im Raum. Das einfachste Trassierungselement ist die Gerade als kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten. Da eine ausschließliche Verwendung von Geraden aufgrund der Topographie in der Realität nicht möglich ist, müssen in der Regel auch Bögen angeordnet werden. Im folgenden Abschnitt soll auf die Besonderheiten der Trassierung von Schmalspurbahnen und die Auswirkungen dieser Trassierung auf den Güterverkehr eingegangen werden.

3.1.1 Richtlinien und Verordnungen

Anders als bei normalspurigen Bahnen gibt es für die Trassierung schmalspuriger Bahnen keine vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) harmonisierte europäische Norm wie die EN 13803:2017 *Trassierungsparameter – Spurweiten 1435 mm und größer* (CEN 2017). Stattdessen gilt in Österreich für die Trassierung von Schmalspurbahnen, auch nach Übernahme dieser Bahnen durch die Bundesländer, weiterhin die ÖBB Dienstvorschriften (DV) *B 52 Oberbau technische Grundsätze* von 1980 (Edlinger 2020). Außerdem existiert mit der Vorschrift B 51/P eine *Oberbauvorschrift für Österreichische nicht vom Bunde betriebene Haupt- und Nebenbahnen*. Diese enthält Bestimmungen für die Spurweite 1000 mm (N. N. 1958). Trotzdem kommt auch bei Privatbahnen, wie den Zillertaler Verkehrsbetrieben (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022) oder der Steiermärkischen Landesbahnen (Gößler, Interview vom 16.1.2023), die ÖBB DV B 52 zum Einsatz. Als Nachfolgerin der Richtlinie B 52 der ÖBB für normalspurige Strecken gilt das Regelwerk *01.03 Linienführung von Gleisen* der ÖBB-Infrastruktur AG. Dieses enthält allerdings keine Bestimmungen mehr für Schmalspurbahnen (ÖBB-Infrastruktur AG 2016).

In der Schweiz verordnet das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV). Die vom Schweizer Bundesamt für Verkehr (BAV) herausgegebene aktuelle Ausgabe von November 2020 enthält neben Bestimmungen für den Bahnbetrieb und Fahrzeuge auch Vorgaben für die Infrastruktur, unter anderem die Trassierung. Für die „geometrische Gestaltung der Fahrbahn“ enthält die AB-EBV Vorgaben für Normalspur (kurz N), Meterspur (kurz M) und Spezia Spur (kurz S). Unter Spezia Spur werden dabei alle von Normal- und Meterspur abweichenden Spurweiten, wie beispielsweise 750 mm, verstanden. Für die Spezia Spur sind allerdings in den meisten Fällen die Vorgaben für die Meterspur sinngemäß anzuwenden (BAV 2020a). Zusätzlich zum gesetzlichen Rahmen der AB-EBV wird vom Schweizer *Verband öffentlicher Verkehr* eine eigene Richtlinie R RTE 22546 *Geometrische Gestaltung der Fahrbahn – Meterspur* herausgegeben. Diese definiert Planungsgrenzwerte, die unter den Grenzwerten der AB-EBV liegen. Diese geringeren Grenzwerte sollen die Erhaltungskosten senken sowie den Fahrkomfort erhöhen und sind bei Neuanlagen

einzuhalten bzw. bei der Erneuerung bestehender Anlagen anzustreben (Verband öffentlicher Verkehr 2022).

In Deutschland werden die gesetzlichen Grundlagen für Bau und Betrieb von Schmalspurbahnen als *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen* ESBO, Neufassung vom 25. Februar 1972 (dBGBl. I S. 269), letzte Änderung durch Art. 15 VO vom 31. August 2015 (dBGBl. I S. 1474, 1549), als Verordnung erlassen. Die ESBO gilt für Bahnen der Spurweite 750 mm und 1000 mm bzw. sind die Vorschriften auf Schmalspurbahnen mit anderer Spurweite sinngemäß anzuwenden. Grundsätzlich ist die ESBO analog zur *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung* (EBO) für normalspurige Bahnen aufgebaut und verweist auch in manchen Bereichen auf die EBO.

3.1.2 Bogenradius

Wie bereits in Kapitel 1.3 geschildert, war ein wesentlicher Grund für die Wahl kleinerer Spurweiten die Möglichkeit, kleinere Bogenhalbmesser zu wählen. Nach der *Enzyklopädie des Eisenbahnwesens* (Röll 1917) ergibt sich der kleinste befahrbare Radius r bei Bahnen aus der Spurweite s folgendermaßen:

$$r = 70 \cdot s \quad (3.1)$$

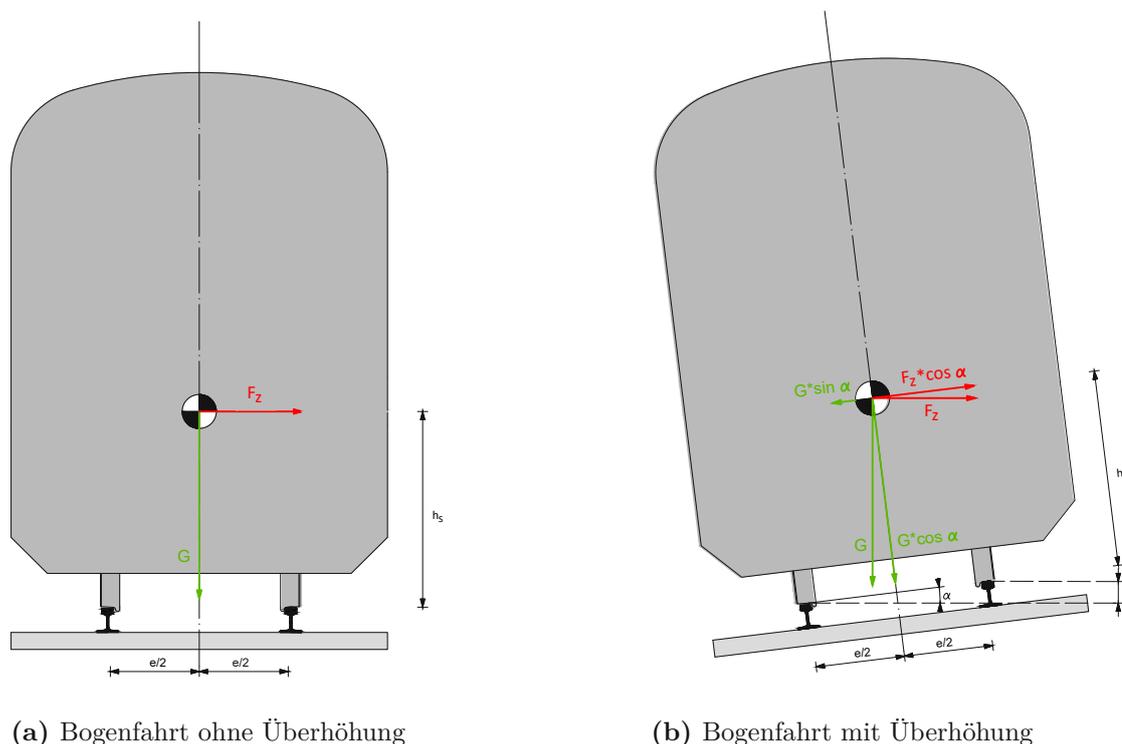
Folglich ergibt sich der kleinste Radius bei der Meterspur zu 70 m und bei der „Bosnischen Spurweite“ (760 mm) zu 53,2 m. In der ÖBB DV B 52 ist unabhängig von der Überhöhung der kleinste zulässige Bogenradius bei einer Spurweite von 760 mm mit 60 m festgelegt, dieser darf mit 20 km/h befahren werden (ÖBB 1980). In der Schweiz liegt der Grenzwert für den Bogenradius im Meterspurnetz bei 80 m (BAV 2020a) bzw. sind bei Anwendung der R RTE 22546 (Verband öffentlicher Verkehr 2022) Bögen mit einem Radius von unter 200 m zu vermeiden. Die deutsche ESBO erlaubt Bögen mit einem Mindestradius von 50 m.

Die beim Durchfahren des Bogens auftretende Fliehkraft ist nach Jochim und Lademann (2018) proportional zur Bahngeschwindigkeit und umgekehrt proportional zum Radius des Bogens:

$$a_Z = \frac{v^2}{r} \quad (3.2)$$

Grundsätzlich legt die DV B 52 eine maximale Seitenbeschleunigung von $a_Z = 0,654 \text{ m/s}^2$ fest. Auf „höherrangigen“ (Streckenrang S und 1) Strecken erlaubt die DV B 52 eine Seitenbeschleunigung von bis zu $a_Z = 0,85 \text{ m/s}^2$. Doch wurden nach ÖBB DV B 52 ausschließlich normalspurige Strecken in Rang S und 1 eingeteilt (ÖBB 1980). Trotzdem wurde der Grenzwert von $a_Z = 0,85 \text{ m/s}^2$ auch auf Schmalspurbahnen angewendet. Allerdings zeigte sich, dass der Schmalspur-Oberbau nur bedingt für derartige Seitenbeschleunigungen geeignet ist. So führte eine hohe Seitenbeschleunigung im heutigen Streckennetz der Niederösterreich Bahnen zu einer Absenkung des überhöhten Gleises im Bogen. Daher wird beispielsweise auf der Mariazellerbahn eine maximale Seitenbeschleunigung von $a_Z = 0,75 \text{ m/s}^2$, in Ausnahmefällen $a_Z = 0,8 \text{ m/s}^2$, angewandt. Ab einer Seitenbeschleunigung von $a_Z = 0,7 \text{ m/s}^2$ werden Maßnahmen zur Verstärkung des Oberbaus wie ein engerer Schwellenabstand angewandt (Tschudnig, E-Mail vom 22.10.2022). In der Schweiz ist mit einem Grenzwert von $a_Z = 0,8 \text{ m/s}^2$ bzw. in Ausnahmefällen mit $a_Z = 1 \text{ m/s}^2$ eine höhere Seitenbeschleunigung zulässig (BAV 2020a). Für Deutschland ist in der ESBO kein Grenzwert der Seitenbeschleunigung vorgesehen, er kann allerdings aus den maximalen Überhöhungsfehlbeträgen berechnet werden und entspricht in etwa $a_Z = 0,8 \text{ m/s}^2$ (siehe Abschnitt 3.1.4).

Grenzwerte für die Seitenbeschleunigung werden neben der erwähnten Begrenzung der Belastung der Infrastruktur erlassen, weil zu hohe Fliehkräfte im Bogen eine Komfortbeeinträchtigung der Reisenden verursachen, Ladung verrutschen lassen können sowie im Extremfall zur Entgleisung oder einem Kippen des Fahrzeuges führen können. Die Komfortgrenze für Reisende liegt etwa bei einer Seitenbeschleunigung von 1 m/s^2 . Eine Entgleisungsgefahr tritt bei Normalspur allerdings erst bei etwa 2 m/s^2 auf, eine Kippgefahr überhaupt erst bei über 4 m/s^2 (Jochim und Lademann 2018). Allerdings hat die Spurweite und der Schwerpunkt einen Einfluss auf den Grenzwert der Seitenbeschleunigung, der zum Kippen bzw. davor bereits zu einer Entgleisung zufolge Radentlastung führt (siehe auch Abschnitt 3.1.4).



(a) Bogenfahrt ohne Überhöhung

(b) Bogenfahrt mit Überhöhung

Abb. 3.1: Kräfte bei Bogenfahrt nach Ihme 2019, S. 198, adaptiert

Betrachtet man die statischen Kräfte bei der Bogenfahrt (siehe Abb. 3.1a), so kann (unter Vernachlässigung etwaiger Windkräfte) aus dem Momentengleichgewicht folgende Beziehung hergeleitet werden:

$$F_z \cdot h_s = G \cdot \frac{e}{2} \quad (3.3)$$

$$m \cdot a_z \cdot h_s = m \cdot g \cdot \frac{e}{2} \quad (3.4)$$

$$a_z = g \cdot \frac{e}{2 \cdot h_s} \quad (3.5)$$

Die maximale Seitenbeschleunigung a_z , die zum Kippen des Fahrzeuges führt, ist also vom Spurbreitenabstand e und der Schwerpunkthöhe h_s abhängig, die Gravitation $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ist in etwa konstant. Beim Schmalspurverkehr wirkt sich die geringere Spurweite negativ auf die Sicherheit gegen Kippen aus. Ebenso wirkt sich ein hoher Schwerpunkt wie beispielsweise beim Rollfahrzeugverkehr negativ aus. Dazu kommt bei Schmalspurbahnen die Anfälligkeit für Windbelastung (Rießberger 2019). Für gedeckte Wagen auf Rollböcken wurde bereits von Röll

1917 ein Grenzwert für den Winddruck von etwa 1 kN/m^2 für die Meterspur und $0,75 \text{ kN/m}^2$ bei 750 mm Spurweite genannt. Nach Einschätzung von Obholzer und Schreiner (Interview vom 7.11.2022) sind allerdings Triebwagen des Personenverkehrs aufgrund ihrer geringen Eigenmasse bei starken Winden gefährdeter als Güterwagen, vor allem wenn sie voll beladen sind.

Da die Seitenbeschleunigung bei Bogenfahrt proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist (siehe Formel 3.2), kann für eine sichere Bogenfahrt eine Beschränkung der Geschwindigkeit für den Güterverkehr zweckmäßig sein. Beispielsweise galt für ÖBB-Schmalspurbahnen laut Dienstvorschrift V7 *Betrieb auf Schmalspurbahnen* für beladenen Rollwagen eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 40 km/h, bei Bögen unter 100 m Radius 30 km/h (ÖBB 1989). Auch auf der Zillertalbahn gilt eine Geschwindigkeitsbegrenzung im Rollwagenbetrieb von 40 km/h, Schmalspur-Güterwagen verkehren aufgrund des niedrigeren Schwerpunkts mit 50 km/h (Obholzer, Interview vom 7.11.2022), wobei bei einzelnen Bögen eine geringere Höchstgeschwindigkeit für Güterzüge als für Personenzüge gilt (siehe Abb. 3.5). Diese ergibt sich aus der Berücksichtigung eines Seitenstoßfaktors von 1,1 bei der Berechnung der zulässigen Geschwindigkeit (Obholzer, E-Mail vom 16.11.2022).

Nachdem beim Rollbockbetrieb Normalspurwagen miteinander und mit dem Triebfahrzeug mittels Schraubenkupplung gekuppelt werden (siehe Abschnitt 4.2.3), kann hier bei Fahrt durch Gegenbögen mit kleinen Radien Überpufferung auftreten. Wenn es zur Überpufferung kommt, ist nicht mehr sichergestellt, dass sich die Puffer der Wagen am Krümmungswechsel ausreichend überdecken und ein Verhaken der Pufferteller verhindert wird (M. Weigend 2019). Aus diesem Grund sollte der Bogenhalbmesser der Schmalspurbahn bei Rollbockbetrieb nicht unter 90 m liegen (Österreichisches Institut für Raumplanung 1980). Außerdem müssen die Schraubenkupplungen möglichst lang gemacht werden, also nicht zu straff angezogen werden (Ringseisen 2013). In der Schweiz müssen bei Rollbockbetrieb bezüglich Überpufferung die entsprechenden Grenzwerte für die Normalspur eingehalten werden (Verband öffentlicher Verkehr 2022).

3.1.3 Übergangsbogen

Schließt ein Bogen unmittelbar an eine Gerade an, so tritt an dieser Stelle ein Ruck, also eine Änderung der Seitenbeschleunigung in einem Zeitintervall, auf. Durchfährt ein Fahrzeug einen unmittelbar auftretenden Gleisbogen, so „wankt“ der gefederte Wagenkasten quer zur Gleisachse. Im Fahrzeug tritt dabei ein Maximum der Seitenbeschleunigung auf, das doppelt so groß sein kann wie die rechnerische Seitenbeschleunigung im Bogen (M. Weigend 2019). Um das Auftreten eines Rucks zu verhindern, muss die Krümmung des Bogens stetig und langsam mit einem Übergangsbogen aufgebaut werden (Menius und Matthews 2020). Somit ist der Ruck vor allem für Weichen, wo kein Übergangsbogen angeordnet wird, relevant. Hier bestimmt der Ruck die maximale Geschwindigkeit am Zweiggleis (Lay und Rensing 2019).

Die ÖBB-Richtlinie B 52 (ÖBB 1980) beschränkt den zulässigen Ruck für Streckengleise und durchgängigen Hauptgleisen auf $0,35 \text{ m/s}^3$, für sonstige Gleise auf $0,7 \text{ m/s}^3$. Auf Haupt- und Streckengleisen ist der Einbau eines Übergangsbogens vorgeschrieben, dieser soll so lange wie die Überhöhungsrampe, mindestens aber 10 m, sein. In der Schweiz muss laut AB-EBV (BAV 2020a) bis auf wenige Ausnahmen in allen Zuggleisen ein Übergangsbogen mit linearem Krümmungsverlauf angeordnet werden. Die Länge des Übergangsbogens ist ebenfalls auf die Länge der Überhöhungsrampe abzustimmen. Da Übergangsbogen und Überhöhungsrampe zusammenfallen sollen, wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher auf den Übergangsbogen eingegangen. Die Überhöhungsrampe wird im Abschnitt 3.1.5 behandelt.

3.1.4 Überhöhung

Bei der Fahrt durch einen Gleisbogen wirkt auf das Fahrzeug eine Fliehkraft, die zum Verrutschen von Ladungen, Entgleisungen oder dem Kippen eines Fahrzeuges führen kann. Um die Zentrifugalkraft mit einem Teil der Schwerkraft des Zuges kompensieren zu können, wird eine Überhöhung angeordnet. Dabei wird in Österreich und Deutschland die bogenäußere Schiene angehoben, in der Schweiz zusätzlich die innenliegende Schiene abgesenkt (Jochim und Lademann 2018).

Die notwendige Überhöhung u ergibt sich aus dem Quadrat der Geschwindigkeit v , dem Bogenradius R , der Gravitation g , dem Rollkreisabstand e sowie dem zulässigen Überhöhungsfehlbetrag u_f (Jochim und Lademann 2018):

$$u + u_f = \frac{e}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \quad (3.6)$$

Berücksichtigt man den Rollkreisabstand sowie den Umrechnungsfaktor zum Einsetzen der Geschwindigkeit in km/h ergibt sich die notwendige Überhöhung für die Meterspur (BAV 2020a) und eine Spurweite von 760 mm (ÖBB 1980) in mm zu:

- Meterspur / 1000 mm ($e = 1050$ mm):

$$u + u_f = 8,3 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (3.7)$$

- Bosnische Spurweite / 760 mm ($e = 810$ mm):

$$u + u_f = 6,4 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (3.8)$$

Der in der Regel auftretende Überhöhungsfehlbetrag u_f bezeichnet die fiktive Überhöhung, die notwendig ist, um die beim Durchfahren des Bogens auftretende Seitenbeschleunigung vollkommen zu kompensieren und ergibt sich nach Jochim und Lademann (2018) direkt aus Spurkreisabstand e , der Gravitation g und der unausgeglichenen Seitenbeschleunigung a_q zu:

$$u_f = \frac{e}{g} \cdot a_q \quad (3.9)$$

Folglich entsprechen die maximalen Überhöhungsfehlbeträge der maximal zulässigen freien Seitenbeschleunigung im Bogen (siehe Abschnitt 3.1.2). In Österreich ($a_{z,max} = 0,654$ m/s²) gilt somit für eine Spurweite von 760 mm ein Überhöhungsfehlbetrag vom 54 mm (ÖBB 1980) und für die Meterspur von 70 mm (N. N. 1958). Schweizer Meterspurbahnen wenden hingegen einen maximalen Überhöhungsfehlbetrag von 86 mm (0,8 m/s²) bzw. 107 mm (1 m/s²) an (BAV 2020a). In der deutschen ESBO wird ein maximaler Überhöhungsfehlbetrag für die Normalspur auf die Schmalspur umgelegt, womit sich ein Grenzwert für die Meterspur von 87 mm und von 65 mm für eine Spurweite von 750 mm ergibt. Beides entspricht in etwa einer Seitenbeschleunigung von 0,8 m/s².

Neben einem, sich aus bautechnischen Gründen ergebenden, Mindestwert für die Überhöhung legen die Richtlinien bzw. Verordnungen in Österreich, der Schweiz und Deutschland auch Höchstwerte für die Überhöhung fest. Dabei wird in allen Ländern unterschieden, ob auf der Strecke Rollfahrzeugbetrieb stattfindet oder nicht (siehe Tabelle 3.1). Eine Begrenzung der

maximalen Überhöhung ist im Allgemeinen notwendig, weil große Überhöhungen bei kleinen Radien das Entgleisungsrisiko langsam fahrender Züge erhöhen, da die Belastung der äußeren, führenden Räder durch das nach bogeninnen wirkende Kippmoment vermindert wird (BAV 2020a).

Tab. 3.1: Höchste zulässige Überhöhungen bei Schmalspurbahnen

Staat	Grundlage	Spurweite	u_{max} bei Rollfahrzeugen	u_{max} ohne Rollfahrzeuge
Österreich	DV B 52	760 mm	35 mm	60 mm
Österreich	RL B 51/P	1000 mm	50 mm	100 mm
Deutschland	ESBO	750 mm	40 mm	50 mm
Deutschland	ESBO	1000 mm	80 mm	100 mm
Schweiz	AB-EBV	1000 mm	90 mm	105 mm

Bei einer vereinfachten statischen Betrachtung der Fahrt durch einen überhöhten Bogen (siehe Abb. 3.1b) ergibt sich das Momentengleichgewicht folgendermaßen:

$$G \cdot \sin \alpha \cdot h_s = F_z \cdot \cos \alpha \cdot h_s + G \cdot \cos \alpha \cdot \frac{e}{2} \quad (3.10)$$

$$G \cdot \left(\sin \alpha \cdot h_s - \cos \alpha \cdot \frac{e}{2} \right) = F_z \cdot \cos \alpha \cdot h_s \quad (3.11)$$

Nachdem α die Querneigung des Gleises zufolge der Überhöhung bezeichnet, gilt $\sin \alpha = u/e$. Aufgrund des im Vergleich zur Spurweite geringen Betrags der Überhöhung gilt außerdem $\cos \alpha \approx 1$ (Jochim und Lademann 2018). Dadurch ergibt sich für die Gewichtskraft G die über den Anteil $G \cdot \cos \alpha$ zur Hälfte in die Radkraft Q eingeht, folgende Größe:

$$G \cdot \left(\frac{u}{e} \cdot h_s - \frac{e}{2} \right) = F_z \cdot h_s \quad (3.12)$$

$$G = m \cdot a_z \cdot \frac{h_s}{\frac{u}{e} \cdot h_s - \frac{e}{2}} \quad (3.13)$$

Aus Formel (3.13) ist erkennbar, dass die Gewichtskraft G durch eine höhere Masse des Fahrzeugs m , eine größere Seitenbeschleunigung a_z sowie ein höheres Spurmaß e , vor allem bei einem niedrigen Schwerpunkt, vergrößert wird. Eine größere Überhöhung u sowie ein höherer Abstand zum Schwerpunkt h_s wirken sich hingegen negativ aus. Die Gewichtskraft G geht über den Anteil $G \cdot \cos \alpha$ direkt in die Radkraft Q ein, die relevant für Entgleisungssicherheit im Bogen ist.

Eine vereinfachte, statische Betrachtung der Entgleisungssicherheit in engen Bögen stellt das *Entgleisungskriterium nach Nadal* dar. Im Idealzustand berühren sich Rad und Schiene an einem Punkt. In diesem Punkt wirkt im Querschnitt neben der Radkraft Q auch eine Profilsitenkraft Y , diese wird auch als laterale Führungskraft bezeichnet (siehe Abb. 3.2). Wird am bogenäußeren Rad die Profilsitenkraft im Verhältnis zur Radkraft zu hoch, klettert der Spurkranz auf der Schiene auf und es kommt zu einer Entgleisung. Folglich ist das Verhältnis Y/Q mit einem Grenzwert so beschränkt, dass eine Entgleisung unwahrscheinlich wird (Dede und Reimann 2014).

Bei Schmalspurbahnen tritt sowohl ein im Vergleich zur geringen Spurweite hoch liegender Schwerpunkt als auch eine durch die geringe Achslast (siehe Abschnitt 3.4.1) niedrige Masse

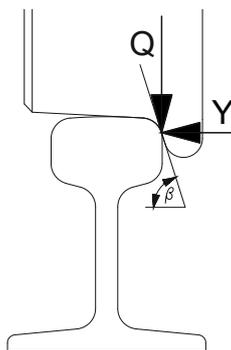


Abb. 3.2: Kräfte im Berührungspunkt Rad/Schiene

der Fahrzeuge auf. Wie oben gezeigt wurde, erhöhen diese Faktoren die Entgleisungsgefahr von Schmalspur-Güterzügen in überhöhten Bögen. Dazu kommt, dass ein torsionssteifer Aufbau des Fahrzeuges die Radentlastung fördert (Ihme 2019). Ein solcher torsionssteifer Aufbau ist beispielsweise bei beladenen Rollwagen gegeben (Fellinger 2017). Auch kann, wie bereits in Abschnitt 3.1.2 geschildert, Seitenwind einen negativen Einfluss haben.

In der Praxis zeigt sich allerdings, dass in Österreich höhere Grenzwerte, als in der DV B 52 vorgesehen, angewendet werden. So finden sich auf der Mariazellerbahn mehrere Bögen mit einer Überhöhung von mehr als den in der DV B 52 vorgesehenen 60 mm. Bei zwei Bögen wird sogar eine Überhöhung von 70 mm angewandt (Tschudnig, E-Mail vom 22.10.2022). Auf der Zillertalbahn (Obholzer, Interview vom 7.11.2022) und der Pinzgauer Lokalbahn (Weis 2012) werden Überhöhungen von 40 mm angewendet, obwohl auf diesen Bahnen Rollwagenverkehr angeboten wird bzw. wurde und der Grenzwert laut DV B 52 35 mm beträgt.

3.1.5 Überhöhungsrampe

Um die Überhöhung am Gleis aufbauen zu können, muss eine Überhöhungsrampe angeordnet werden. Diese kann im einfachsten Fall eine lineare Form aufweisen, es sind aber auch „geschwungene“, also nicht-lineare Rampen möglich (Jochim und Lademann 2018). Beim Befahren der Überhöhungsrampe ändert sich die Überhöhung über den Weg, womit sich die gegenseitige Höhenlage der Schienen verändert und eine Verwindung des Gleisrostes entsteht. Im Bereich der abfallenden Überhöhungsrampe wird das bogenäußere Rad entlastet, gleichzeitig steigt die Horizontalkraft durch die erhöhte Reibung am inneren Rad an und es wirkt zusätzlich das durch die Überhöhung verursachte Kippmoment nach bogeninnen (siehe auch Abschnitt 3.1.4). Ist die Überhöhungsrampe zu steil, können die erwähnten Faktoren vor allem bei langsamer Fahrt zur Entgleisung des Zuges führen (Rießberger 2019). Zusätzlich kommt es im Übergangsbereich zwischen Überhöhungsrampe und Bogen zu einer plötzlichen Entlastung einzelner Räder oder Drehgestelle von der Gewichtskraft, die ebenfalls zu einer Entgleisung führen kann (Jochim und Lademann 2018). Weitere Einflussgrößen auf die Entgleisungssicherheit bei Verwindungen sind die Abstände zwischen den Radsätzen des Fahrzeugs, eine eventuell auftretenden außermittige Schwerpunktlage, eine zusätzliche Verwindung von Drehgestell und Fahrzeugkasten aufgrund der Konstruktion des Fahrzeugs sowie ein Wankmoment der Radsatzlagerquerkräfte. Auch tritt bei der Verwindung eine Hysterese, also eine verzögerte Antwort des statischen Systems auf (CEN 2016).

Aufgrund der Entgleisungsgefahr im Bereich von Überhöhungsrampen ist die Anrampungneigung nach oben beschränkt (Jochim und Lademann 2018). In Österreich und der Schweiz gelten für die die Rampenneigung θ sowohl geschwindigkeitsabhängige als auch -unabhängige Grenzwerte (siehe Tab. 3.2). Die geschwindigkeitsunabhängigen Grenzwerte für die Rampenneigung θ entsprechen hier im Wesentlichen den Grenzwerten der EN 13803 für Normalspur, wo der *Normale Grenzwert* für θ 2,5 ‰ beträgt. In Ausnahmefällen sind in Österreich laut DV B 52 (ÖBB 1980) Neigungen bis 3,33 ‰ ($V \leq 30$ km/h) und in der Schweiz von 3 ‰ bzw. 2,5 ‰ bei Rollbockbetrieb möglich (BAV 2020a). Geschwindigkeitsabhängig zeigt sich allerdings, dass im Regelfall in Österreich bereits bei einer Geschwindigkeit von 18,75 km/h eine flachere Neigung als 3,33 ‰ bzw. bei 25 km/h als 2,5 ‰ erreicht wird, in der Schweiz ist bei 58 km/h eine flachere Neigung als die generell lt. AB-EBV vorgeschriebenen 2,5 ‰ notwendig. Bei Nutzung der Planungsgrenzwerte lt. R RTE 22546 (Verband öffentlicher Verkehr 2022) sind noch flachere Überhöhungsrampen notwendig. In Deutschland ermöglicht die ESBO hingegen unabhängig von der Geschwindigkeit Überhöhungsrampen mit einer Steigung von bis zu 3,33 ‰.

Tab. 3.2: Grenzwerte für Überhöhungsrampen bei Schmalspurbahnen

Staat	Grundlage	Spurweite	θ_{max}	$\theta(V)$	dD/dt	Anmerkung
Österreich	DV B 52	760 mm	2,5 ‰	$1/(16 \cdot V)$	17,4 mm/s	3,33 ‰ bis 30 km/h
Österreich	RL B 51/P	1000 mm	2,5 ‰	$1/(13 \cdot V)$	21,4 mm/s	3,33 ‰ bis 30 km/h
Deutschland	ESBO	750 mm	3,33 ‰	-	-	
Deutschland	ESBO	1000 mm	3,33 ‰	-	-	
Schweiz	AB-EBV	1000 mm	2,5 ‰	$1/(7 \cdot V)$	40 mm/s	2 ‰ bei Rollbockbetrieb

Wie aus Tabelle 3.2 ersichtlich ist, wird die geschwindigkeitsabhängige Überhöhung nach den Österreichischen Richtlinien in der Form $\theta(V) = 1/(n \cdot V)$ definiert. In der Schweiz ist hingegen ein Grenzwert der Überhöhungsgeschwindigkeit $dD/dt = v * \theta$ festgelegt. Setzt man diese beiden Formeln gleich und berücksichtigt man dabei auch die Beziehung $V = 3,6 \cdot v$, so ergibt sich für die Umrechnung der beiden Grenzwerte folgende Formel:

$$n = \frac{1000}{dD/dt \cdot 3,6} \quad (3.14)$$

Folglich entspricht eine Überhöhungsgeschwindigkeit von 40 mm/s einer maximalen geschwindigkeitsabhängigen Neigung $\theta(V)$ von ungefähr $1 : 7 \cdot V$, womit in der Schweiz geschwindigkeitsabhängig steilere Rampen als in Österreich zulässig sind.

Obwohl Verwindungen die häufigste Ursache für Entgleisungen aus spurführungstechnischen Gründen sind (Rießberger 2019) und Schmalspurfahrzeuge aufgrund der geringeren Masse und der kleineren Spurweite im Vergleich zu Normalspurfahrzeugen ein geringeres Standsicherheitsmoment haben (siehe Abschnitt 3.1.4), sind bei schmalspurigen Bahnen steile Rampen erlaubt. Beim Rollwagenbetrieb wirkt sich zusätzlich die erhöhte Schwerpunktlage und der torsionssteife Fahrzeugaufbau negativ aus (Fellinger 2017). Ein Vergleich der Grenzwerte für Schmalspurbahnen mit jenen für Normalspurbahnen zeigt, dass zwar steilere Rampen angeordnet werden dürfen, diese aber geschwindigkeitsabhängig flacher als jene bei normalspurigen Bahnen sind.

3.2 Längsneigung

Zur Überbrückung von Höhenunterschieden müssen Eisenbahnstrecken mit Längsneigungen versehen werden. Vor allem für den Güterverkehr stellen hohe Lasten verbunden mit dem geringen Reibungsbeiwert zwischen Stahlrad und Stahlschiene sowie starken Längsneigungen ein Problem dar. Deshalb sollte bei normalspurigen Bahnen die Längsneigung bei Neubaustrecken mit Güterverkehr 12,5 ‰ nicht überschreiten (Jochim und Lademann 2018). Auch in Österreich gilt laut Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung (BGBl. Nr. 398/2008) für normalspurige Hauptbahnen bei Neubauten eine größte Längsneigung von 12,5 ‰, auf Nebenbahnen sind bis zu 40 ‰ zulässig. Für Schmalspurbahnen sind keine Grenzwerte festgelegt. In der Schweiz begrenzen die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV) die Längsneigung im Bereich von meterspurigen Bahnen ohne Zahnstangen auf 40 ‰, auf Zahnstangenabschnitten auf 250 ‰. Abweichend davon dürfen mit Genehmigung des Bundesamts für Verkehr auch steilere Strecken angelegt werden (BAV 2020a). In Deutschland gelten die Regeln der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) auch für Schmalspurbahnen, diese begrenzen die Längsneigung für Hauptbahnen auf 12,5 ‰, für Nebenbahnen auf 40 ‰.

Da beim Bau von Schmalspurbahnen eine möglichst gute Anpassung an das Gelände (siehe Abschnitt 1.4) gewünscht war, treten hier auf manchen Strecken sehr große Längsneigungen auf. Beispielsweise beträgt auf der meterspurigen Rhätischen Bahn in der Schweiz die größte Längsneigung rund 70 ‰ (Jochim und Lademann 2018). Im Gegensatz dazu wurde bei den in Österreich errichteten Schmalspurbahnen der bosnischen Spurweite die Längsneigung unter 40 ‰ gehalten. Die größten Steigungen treten bei den im Betrieb stehenden Bahnen auf der Lokalbahn Mixnitz – St. Erhard (30 ‰) sowie der Ybbstalbahn Bergstrecke (31 ‰) auf. Anders ist die Situation bei den meterspurigen Bahnen, bei der Stubaitalbahn (heute Teil der Straßenbahn Innsbruck) wurden Steigungen von 45 ‰, zwischen Vöcklamarkt und dem Attersee von 47 ‰ errichtet (Krobot 1975).

Werden zu große Neigungen angewendet, wird vor allem das Anfahren von Güterzügen in den Neigungsabschnitten erschwert. Das Triebfahrzeug muss in diesem Fall die Hangabtriebskraft sowie die Laufwiderstände des Zuges überwinden. Die maximale Neigung s aus dem Zusammenhang $\sin \alpha \approx \tan \alpha = s/1000$ ergibt sich nach Menius und Matthews (2020) vereinfacht zu:

$$s = 1000 \cdot \mu \cdot \frac{m_r}{m_r + m_w} - w \quad (3.15)$$

Die maximale Neigung s in ‰ ergibt sich nach Formel 3.15 näherungsweise aus dem Reibungsbeiwert μ , der Radsatzmasse der angetriebenen Achsen m_r , der Radsatzmasse der nicht angetriebenen Achsen m_w sowie der Widerstandsbeiwerte (in ‰). Letztere liegen üblicherweise im Bereich von 2 bis 3 ‰ (Menius und Matthews 2020). Folglich beschränken starke Neigungen die maximale Anhängelast von Güterzügen. Um mehr Last transportieren zu können, müssen bei größeren Neigungen Triebfahrzeuge mit größerer angetriebener Radsatzmasse verwendet werden. Auf Schmalspurbahnen ist allerdings die Achslast und somit auch die Radsatzmasse in der Regel beschränkt (siehe Abschnitt 3.4.1).

3.3 Lichtraum

Zur Dimensionierung des von festen Einbauten freizuhaltenden Querschnitts einer Eisenbahnstrecke werden Lichträume festgelegt. Ausgangspunkt dieser Überlegungen ist der maximale Platzbedarf eines Fahrzeugs im Stillstand (Fahrzeugbegrenzungslinie). Werden Horizontal- und Vertikalbewegungen des Zuges während der Fahrt hinzugerechnet, so ergibt sich die Grenzlinie

für den kinematischen Regellichtraum. Um das Lichtraumprofil zu erhalten wird dieser Bereich noch etwas vergrößert (Jochim und Lademann 2018).

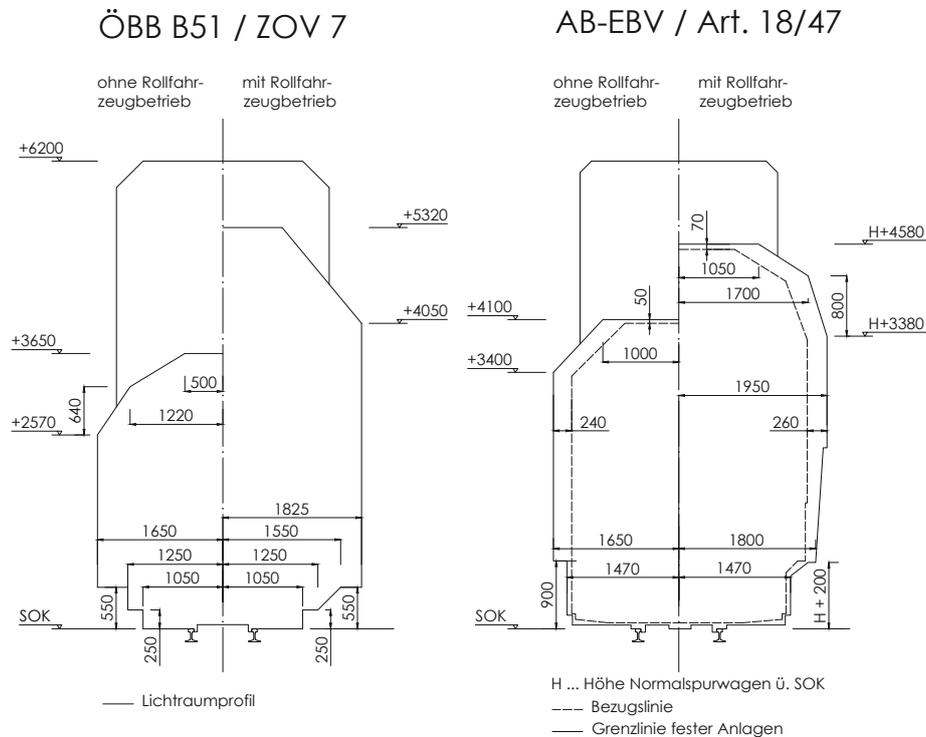


Abb. 3.3: Schmalspurlichträume in Österreich und der Schweiz, eigene Darstellung nach BAV 2020a und ÖBB 1975

Grundsätzlich gilt für ehemalige ÖBB-Schmalspurbahnen weiterhin das Lichtraumprofil laut siebter *Zusatzbestimmung zur Oberbauvorschrift DV B 51* kurz ZOV 7 (ÖBB 1975). Auch die *Oberbauvorschrift für Österreichische nicht vom Bunde betriebene Haupt- und Nebenbahnen B 51/P* verweist hinsichtlich Lichträume auf die ZOV 7 (N. N. 1958). In der ZOV 7 wird die Umgrenzung des lichten Raums und der Gleisabstand behandelt. Dabei wird unterschieden, ob auf einer Strecke Rollfahrzeugbetrieb stattfindet oder nicht und ob die Strecke elektrifiziert ist (ÖBB 1975). In der Praxis weichen die österreichischen Schmalspurbahnen teilweise vom Lichtraumprofil nach ZOV 7 ab. Während die Steiermärkischen Landesbahnen das Profil ZOV7 ohne Rollfahrzeugbetrieb (siehe Abb. 3.3) anwenden (Greiner, E-Mail vom 3.10.2022) und jenes der Pinzgauer Lokalbahn dem Lichtraumprofil nach ZOV 7 mit Rollwagenverkehr entspricht (Edlinger 2020), wurde bei Stern & Haferl das Lichtraumprofil an die im Einsatz befindlichen Fahrzeuge angepasst (Zwirchmayr, E-Mail vom 10.10.2022). Auch bei den Niederösterreich Bahnen (NÖVOG) wird auf der Mariazellerbahn und der Citybahn Waidhofen ein an die eingesetzten Fahrzeuge angepasstes Lichtraumprofil angewendet, während auf den Waldviertelbahnen weiterhin das Profil nach ZOV 7 gilt (Tschudnig, E-Mail vom 22.10.2022). Die Zillertalbahn wendet für Ihre Personenzüge ein breiteres Lichtraumprofil als jenes der ZOV7 an (Obholzer, Interview vom 7.11.2022).

In der Schweiz legen die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (BAV 2020a) eine *Bezugslinie* fest, die vom Fahrzeug bei keiner Stellung im Gleis unter Berücksichtigung dynamischer Effekte überschritten werden darf. Ausgehend von dieser Bezugslinie wird eine Grenzlinie fester Anlagen für die Meterspurbahn festgelegt. Diese ist funktional wie ein Lichtraum und muss von festen Einbauten freigehalten werden. Für die *Spezialspur* (von Meter- und Normalspur abweichende

Lademaß galt (Simmering-Graz-Pauker AG 1988). Ein Spezialfall auf der Mariazellerbahn war aufgrund des Fahrdrabtes die Verwendung von Rollböcken statt Rollwagen, da die transportierten Normalspurwagen bei ersteren tiefer aufliegen (Österreichisches Institut für Raumplanung 1980).

3.4 Belastbarkeit des Oberbaus und der Bauwerke

3.4.1 Maximale Radsatz- und Meterlasten

Durch den Rad-Schiene-Kontakt werden über die Radkräfte die Lasten der Eisenbahnfahrzeuge in das Gleis eingeleitet. Die in alle drei Raumrichtungen wirkenden Kräfte müssen vom Gesamtsystem aus Oberbau (Schienen, Schwellen, Bettung), Unterbau und Untergrund abgetragen werden (Göbel und Lieberenz 2013). Neben statischen Kräften treten aufgrund der Welligkeit der Schienenoberfläche und der Nachgiebigkeit des Oberbaus auch dynamische Kräfte auf. Letztere sind allerdings bei der Bemessung des Oberbaus nur für die Kontaktspannungen zwischen Rad und Schiene bedeutend und können für die Bemessung der anderen Komponenten der Lastableitung aufgrund der dynamischen Entkoppelung von Schiene und übriger Tragkonstruktion vernachlässigt werden (Gerber 2019). In der Tragkonstruktion erzeugen die vertikalen Lasten Pressungen, die von dieser schadlos aufgenommen werden müssen. Aus diesem Grund werden im Eisenbahnbauwesen maximale Radsatzlasten (auch *Achslasten* genannt) sowie Massen je Längeneinheit (auch *Meterlasten* genannt) definiert (Göbel und Lieberenz 2013).

Tab. 3.3: Achslasten auf Österreichischen Schmalspurbahnen (Auswahl)

Bahn	Achslast	Meterlast	Anmerkung	Quelle
Mariazellerbahn	12,5 t	5 t/m		Tschudnig, 22.10.2022
Citybahn Waidhofen	8,44 t	4,5 t/m		Tschudnig, 22.10.2022
Waldviertelbahn	9,45 t	4,8 t/m	für Triebfahrzeuge	Tschudnig, 22.10.2022
Waldviertelbahn	10 t	5,5 t/m	für Wagen	Tschudnig, 22.10.2022
Pinzgauer Lokalbahn	12,5 t			Weis (2012)
Zillertalbahnhof	12,5 t			Obholzer, 7.11.2022
Murtalbahnhof	10,2 t	3,5 t/m		Gößler, 16.1.2023
Attergaubahn	18,78 t	6 t/m		Zwirschmayr, 10.10.2022

Für das ÖBB-Netz gilt als Nachfolgerin der DV B 52 u.a. die Dienstvorschrift *B 50 - Teil 3. Oberbauberechnung* (ÖBB-Infrastruktur AG 2012). Die Ausgabe dieser DV von März 2012 enthält neben Vorgaben für die Normalspur auch solche für Schmalspurbahnen. Die Richtlinie B 50-3 sieht für Schmalspurbahnen eine maximale Achslast von 10 t und eine maximale Radlast von 55 kN vor (ÖBB-Infrastruktur AG 2012). In der Praxis wurde die zulässige Achslast allerdings aufgrund der vorhandenen Infrastruktur in der Dienstvorschrift *V7 Betrieb auf Schmalspurbahnen* (ÖBB 1989) strenger ausgelegt. Die DV V 7 sah beispielsweise auf manchen Schmalspurbahnen, wie auf Teilen der Mariazeller- oder Ybbstalbahn, nur eine Achslast von 8,5 t vor, während auf der Pinzgauer Lokalbahn zwischen Zell am See und Mittersill eine maximale Achslast von 12 t galt. Die zulässige Meterlast schwankte je nach Strecke zwischen 2,5 t/m und 5 t/m, teilweise galten auch Reihungsbeschränkungen, bei denen Zwischenwagen mitgeführt werden mussten. Mit Reihungsbeschränkung galten lt. DV V7 höhere Grenzwerte für die Meterlast.

Wie aus Tabelle 3.3 erkennbar ist, unterscheiden sich in Österreich die Achslasten auf Schmalspurbahnen. Während auf den vom Land Niederösterreich übernommenen und zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit von der NÖVOG betriebenen ehemaligen ÖBB-Bahnen auf die eingesetzten Fahrzeuge angepasste Achs- und Meterlasten gelten, gelten auf der Murtalbahnhof 10,2 t, auf der

Pinzgauer Lokalbahn und der Zillertalbahn 12,5 t Achslast. Bei Stern & Hafferl wird die Achslast hingegen laut Zwirchmayr (E-Mail vom 10.10.2022) durch die Bemessung von Brückenbauwerken bestimmt, die Achslast von 18,78 t ergibt sich aus der Anwendung der Belastungsnorm EN 1991-2 (CEN 2010) mit einem Abminderungsfaktor. Auch bei der Zillertalbahn wird der Oberbau auf eine Achslast von ca. 20 t und die Brückenbauwerke nach EN 1991-2 (CEN 2010) auf 22,5 t ausgelegt.

In der Schweiz wird im Meterspurnetz laut Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV) grundsätzlich eine Achslast von 16 Tonnen angestrebt. Die Deutsche Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen (ESBO) definiert keine Radsatzlasten, sondern schreibt nur vor, dass Radsatz- und Meterlasten die Belastbarkeit von Oberbau und Bauwerken nicht überschreiten darf.

3.4.2 Einflüsse auf die mögliche Belastung der Eisenbahninfrastruktur

Wie bereits in Abschnitt 3.4.1 ausgeführt, ergibt sich die Belastbarkeit der Eisenbahninfrastruktur im Allgemeinen aus der Belastbarkeit des Oberbaus, Unterbaus sowie der Kunstbauten. Äußere Belastungen des Oberbaus rufen eine innere Belastung der Komponenten des Oberbaus hervor.

Neben der bereits erwähnten Kontaktspannungen erfahren die Schienen zwischen den Stützpunkten ein Biegemoment, das Biegespannungen in der Schiene hervorruft. Die Biegespannung ergibt sich dabei als Quotient $\sigma = M/W$ von Biegemoment M und Widerstandsmoment W . Da die Schiene über die Schwellen im Schotterbett elastisch gelagert ist, erreicht das Biegemoment nach Gerber (2019) als Maximum einen Wert, der von der Vertikalkraft F und der charakteristischen Länge L des elastisch gelagerten Zimmermann-Balkens abhängig ist:

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \quad (3.16)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I \cdot a}{c_z}} \quad (3.17)$$

In die charakteristische Länge L geht neben dem Elastizitätsmodul des Schienenmaterials E und dem Trägheitsmoment I des Schienenprofils auch der Stützpunktstand a und die Stützpunktsteifigkeit c_z ein. Zusätzlich zu den Biegespannungen müssen auch temperaturbedingte Zugspannungen sowie auch Längskräften zufolge Anfahren und Bremsen entstehende Spannungen in der Schiene berücksichtigt werden (Gerber 2019). Grundsätzlich steigt mit der Größe des Querschnitts nicht nur die Metermasse der Schienen, sondern auch das Widerstandsmoment W . Dadurch weisen Schienen mit höherer Metermasse ein höheres Widerstandsmoment und somit eine größere Belastbarkeit durch Radkräfte auf (siehe Tabelle 3.4).

Tab. 3.4: Querschnittswerte gängiger Schienenprofile bei Schmalspurbahnen nach EN 13674-1 und EN 13674-4

Bezeichnung lt. EN	alternative Bezeichnung	Masse je m	W Kopf	W Fuß
33E1	S 33	33,47 kg/m	156 cm ³	155 cm ³
35E1	Xa	35,76 kg/m	147 cm ³	153 cm ³
49E1	DIN S49	49,39 kg/m	240 cm ³	248 cm ³
54E1	UIC 54	54,77 kg/m	279 cm ³	311 cm ³
54E3	DIN S54	54,57 kg/m	263 cm ³	276 cm ³

Anders als bei normalspurigen Strecken, auf denen in der Regel Schienenprofile größer 49E1 verbaut werden (ÖBB-Infrastruktur AG 2012), kommen auf Schmalspurbahnen in Österreich oft kleinere Profile zum Einsatz. So finden sich auf den Waldviertelbahnen (Tschudnig E-Mail vom 22.10.2022) und der Murtalbahn (Gößler, Interview vom 16.1.2023) noch immer Abschnitte, in denen das Schienenprofil XXIVa (26,15 kg/m) zum Einsatz kommt. Dieses Schienenprofil wird von der Normung gar nicht mehr berücksichtigt und bei Erneuerungsarbeiten nach Möglichkeit durch ein schwereres Profil wie 33E1 oder 35E1 ersetzt. Nach Einschätzung von Gößler (Interview vom 16.1.2023) ist die maximale Achslast beim Profil XXIVa auf etwa 10,5 t beschränkt. Bei den Meterspurbahnen von Stern & Hafferl (Zwirschmayr, E-Mail vom 10.10.2022) und auf der Zillertalbahn (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022) kommt inzwischen das Profil 49E1 zur Anwendung, bei der Pinzgauer Lokalbahn zusätzlich das Profil 54E3 (Weis 2012).

Beim Schotteroberbau ergibt sich durch die elastische Wirkung der Bettung die Kraft in den Stützpunkten der Schiene F_s nach Gerber (2019) in Abhängigkeit von der Radkraft F , dem Stützpunktabstand a sowie der charakteristischen Länge L .

$$F_s = \frac{a}{2 \cdot L} \cdot F \quad (3.18)$$

Nach den Formeln 3.17 und 3.18 verkleinert eine größere Biegesteifigkeit der Schienen sowie eine weichere Bettung die Stützpunktkraft. Auch der vom Abstand der Schwellen abhängige Stützpunktabstand a hat einen Einfluss. Die Niederösterreich Bahnen (NÖVOG) (Tschudnig, E-Mail vom 22.10.2022) und die Zillertalbahn (Obholzer, Interview vom 7.11.2022) wenden inzwischen eine Schwellenteilung von 650 mm an. Zum Vergleich: auf den Waldviertelbahnen war in den 1980ern noch ein Schwellenabstand von 810 mm üblich, dieser wurde im Rahmen von Oberbauverstärkungen auf 700 mm verringert (Marek 1989).

Die weitere Lastabtragung unterhalb der Schwellen erfolgt über Flächenpressung. Da diese ein Quotient aus Kraft und Fläche ist, haben die jeweiligen Aufstandsflächen einen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Ober- und Unterbaus. Im Allgemeinen kommen bei Schmalspurbahnen kürzere Schwellen zum Einsatz, wodurch auch die Aufstandsfläche der Schwelle geringer wird und bei gleicher Schotterpressung geringere Lasten abgeleitet werden können. Beispielsweise sind die von der Firma Kirchdorfer hergestellten Schmalspur-Betonschwellen 1.800 mm lang (Kirchdorfer Concrete Solutions 2015b), während jene für Normalspur bei gleicher Breite 2.500 mm lang sind (Kirchdorfer Concrete Solutions 2015a). Auch im Bereich des Unterbaus kommt durch den schmäleren Oberbau bei Schmalspurbahnen eine kleinere Fläche zur Lastabtragung zum Einsatz (BAV 2020a). Folglich kann der Unterbau bei Schmalspurbahnen geringere Lasten aufnehmen als jener bei Normalspurbahnen.

Eine weitere Einflussgröße auf die Tragfähigkeit des Unterbaus stellen nach Tschudnig (E-Mail vom 22.10.2022) Stützkonstruktionen dar. Wird ein Geländesprung unterhalb der Eisenbahnstrecke nicht mit einer Böschung gesichert, so muss die Stützkonstruktion die aus dem Eisenbahnverkehr resultierenden Lasten so aufnehmen, dass Verformungen und Setzungen mit negativem Einfluss auf die Gleislage ausgeschlossen werden können (Göbel und Lieberenz 2013).

Neben dem Ober- und Unterbau stellen Ingenieurbauwerke einen weiteren Faktor für die mögliche Belastung der Eisenbahninfrastruktur dar. In der Bemessung neuer Bauwerke bzw. der Beurteilung bestehender Bauwerke ist neben der Radsatzlast auch die Belastung je Meter, die sogenannte *Meterlast* relevant. Neue Bauwerke müssen im Allgemeinen nach der Belastungsnorm EN 1991-2 *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken* (CEN 2010) bemessen werden. Der Eurocode 1 definiert dabei verschiedene Lastmodelle, das *Lastmodell 71* gilt beispielsweise für den Regelverkehr auf Hauptstrecken. Bei Neubauten auf meterspurigen Bahnen von Stern & Hafferl wird laut Zwirschmayr (E-Mail vom 10.10.2022) das Lastmodell 71 laut

EN 1991-2 (CEN 2010) mit einem Abminderungsfaktor von 0,751 angewendet. Dadurch wird die in diesem Lastmodell vorgesehene Achslast von 25 t um den erwähnten Faktor abgemindert. Der Abminderungsfaktor ergibt sich aus der Klassifizierung der Brücken und wurde so gewählt, dass Regelfahrzeuge mit 18 t Achslast verkehren können (Zwirschmayr, E-Mail vom 9.11.2022). Auch bei der Zillertalbahn werden neue Brückenbauwerke auf eine Belastbarkeit von 22,5 t ausgelegt, obwohl die maximale Achslast nur 12,5 t beträgt. Als Grund dafür nennen Obholzer und Schreiner (Interview vom 7.11.2022), dass eine höhere Belastbarkeit des Bauwerks einerseits den Instandhaltungsaufwand signifikant senkt und andererseits eine zukünftige Umspurgung bzw. ein Dreischienengleis ermöglicht.

Zudem ist neben der durch die Achslast definierten Belastung der Infrastruktur auch deren Belastbarkeit relevant. Nachdem die Belastung durch die Radkraft F zyklisch auftritt, kann eine bestimmte Anzahl an Lastzyklen über einen definierten Zeitraum ermittelt werden. Diese ergibt sich nach Gerber (2019) zu:

$$n_{Last} = \frac{m_{Zug} \cdot g}{2 \cdot F} \quad (3.19)$$

Mit Zunahme der akkumulierten Belastung steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit. Nach Formel 3.19 ist die Zahl der Lastzyklen n_{Last} direkt proportional zur Masse des Zuges m_{Zug} . Höhere Zugmassen, wie im Güterverkehr, verkürzen also die Lebensdauer des Oberbaus und der Ingenieurbauwerke. Umgekehrt fordert eine höhere Anzahl an Lastzyklen eine stärkere Dimensionierung der Bauteile um die geforderte Lebensdauer zu erreichen (Gerber 2019).

In Längsrichtung wird das Gleis zusätzlich zu Brems- und Beschleunigungskräften des Zuges auch durch thermische Spannungen belastet. Überschreiten diese Kräfte eine kritische Schienenspannung, kommt es zu einer Gleisverwerfung. Dieses seitliche Ausknicken des Gleisrostes wird durch enge Bogenradien begünstigt (Gerber 2019). Um den Schienen Raum zur Ausdehnung zu lassen, wurden Gleise bei Schmalspurbahnen in engen Bögen lange Zeit verlascht und nicht verschweißt. Ein dadurch entstehendes Stoßlückengleis kommt allerdings mit dem Nachteil eines erhöhten Verschleißes im Bereich der Stoßlücken und des Gleisschotters. Verschärft wird dieses Problem durch hohe Achslasten wie sie beim Güterverkehr auftreten (Bopp et al. 2016). Dieser erhöhte Verschleiß führt nicht nur zu einem größeren Wartungsaufwand sondern erhöht auch die Entgleisungsgefahr. Aus diesem Grund werden auch bei Schmalspurbahnen zunehmend Gleise in engen Bögen lückenlos verschweißt. Ein lückenlos verschweißtes Gleis bei engen Bögen führt aber zu höheren Querverschiebungen, dem „Atmen“ des Gleises. Folglich wurden beispielsweise in der Schweiz maximal zulässige Querverschiebungen definiert, werden diese zu hoch, sind Maßnahmen zur Erhöhung des Querverschiebewiderstands notwendig (Hejda et al. 2006). Der Querverschiebewiderstand kann beispielsweise durch Einbau von Y-Schwellen verbessert werden (siehe Abb. 3.5). Eine Y-Schwelle besteht jeweils aus zwei S-förmigen I-Trägern aus Stahl, auf denen die Schienen befestigt sind (Menius und Matthews 2020). Eine Alternative dazu sind spezielle beschlachte Stahlbetonschwellen, die von ihrer Geometrie derart modifiziert wurden, dass sie einen möglichst großen Querverschiebewiderstand aufweisen. Solche Schwellen kommen beispielsweise auf der Mariazellerbahn zum Einsatz (Steiner und Krüger 2022).

3.4.3 Auswirkungen von Belastungsbeschränkungen auf den Güterverkehr

Ein Fahrzeug gilt nach der EN 15528 (CEN 2021) als für eine Streckenklasse geeignet, wenn die durch einen Zug mit einer unbegrenzten Zahl dieser Fahrzeuge verursachten statischen vertikalen Lasten die durch die Streckenklasse definierte maximale Belastbarkeit nicht überschreiten. Der Betrag dieser Last ergibt sich aus den Radsatzlasten, der Anzahl an Radsätzen sowie



Abb. 3.5: Enger Bogen der Zillertalbahn mit Y-Schwellen und einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 35 km/h für Personenzüge und 25 km/h für Güterzüge (7.11.2022)

der Fahrzeuglänge. Für Güterwagen ergibt sich folglich eine Nutzlastgrenze abhängig von der Streckenklasse, die im sogenannten Nutzlastraster festgehalten wird.

Analog dazu beschränkt die Belastbarkeit des Oberbaus und der Bauwerke auch die Beladung der verwendeten Güterwagen. Auch wird die Radsatzlast von Triebfahrzeugen beschränkt. Wie bereits in Abschnitt 3.2 ausgeführt, ist vor allem im Bereich von Steigungen eine höhere Reibungsmasse der Triebfahrzeuge notwendig – womit die Anhängelast beschränkt wird.

Im Rollfahrzeugbetrieb (siehe Abschnitt 4.2.3) teilt sich die Achslast des aufgeladenen Normalspurfahrzeuges auf mehrere Achsen des Rollfahrzeuges auf. Beispielsweise können die von den Jenbacher Werken ab 1984 für die ÖBB und Zillertalbahn gelieferten sechsachsigen Rollwagen bei 9,3 t Eigengewicht 45 t zuladen. Somit können von einem Rollwagen zwei Drehgestelle mit 22,5 t Achslast aufgenommen werden (Schneider und Seelmann 1986). Damit kann eine Achslast von 10 t auf der Schmalspurbahn eingehalten werden. Allerdings war aufgrund der geringen Meterlast die Zuladung der Rollwagen auf ÖBB-Strecken auf 40 t beschränkt (ÖBB 1989).

Kapitel 4

Betriebliche Voraussetzungen

4.1 Multimodale Schnittstellen

Wie bereits in Abschnitt 1.4.3 formuliert, fungieren Schmalspurbahnen in Europa meist als Inselbetriebe. Aus diesem Grund ist der Güterverkehr auf Schmalspurbahnen in Europa in der Regel multimodal, es findet also der Übergang von einem Verkehrsträger auf einen anderen statt (siehe auch Abschnitt 1.2).

Bei multimodalen Verkehren wird zwischen gebrochenen Verkehren und intermodalen Verkehren unterschieden. Bei ersterem müssen die Güter an der multimodalen Schnittstelle von einem Verkehrsträger auf einen anderen verladen werden, während bei zweiterem das Transportgefäß mit den Gütern verladen wird. Klassische Anwendungen gebrochener Verkehre sind Massengüter, die in unverpackter Form transportiert werden, beispielsweise Treibstoff in einem Kesselwagen. Bei intermodalen Verkehren sind hingegen verladbare Ladungsträger notwendig, beispielsweise Container. Bei intermodalen Transportketten tritt typischerweise ein Vorlauf (Transport der Ladeinheit zum Umschlagknoten), ein Hauptlauf (Transport der Ladeinheit auf weiter Strecke) sowie ein Nachlauf (Transport der Ladeinheit zum Empfänger) auf (Gronalt et al. 2010). Die Zustellung der Sendung zu den Kund:innen kann einerseits über einen Gleisanschluss erfolgen, andererseits kann ein weiterer Umschlag auf Lastkraftwagen (LKW) notwendig sein. Auf Schmalspurbahnen findet sich zudem mit dem Rollfahrzeugverkehr eine Sonderform des Güterverkehrs. Hier werden Normalspurfahrzeuge samt Ladung auf schmalspurige Rollfahrzeuge (Rollböcke oder Rollwagen) verladen und dem Empfänger zugestellt.

Die Rhätische Bahn (RhB) in der Schweiz bietet in ihrem Netz beispielsweise mehr als 30 Bedienungspunkte für den Güterverkehr an. Der Großteil dient dem Holzumschlag, daneben bestehen acht Mineralölumschlagstellen sowie neun Umschlagstellen für den kombinierten Verkehr (Rhätische Bahn AG 2022a). Die größte Umschlaganlage ist das Güterumschlagzentrum (GUZ) Landquart. Hier können alle von der RhB transportierten Güter, auch Spezialtransporte, von Normalspur und Straße auf Schmalspur umgeladen werden (Rhätische Bahn AG o. D.[i]).

In Österreich wird noch auf drei Schmalspurstrecken Güterverkehr angeboten (siehe Abschnitt 1.6.2). Für jede dieser Bahnen besteht ein Anschluss an das normalspurige Netz der ÖBB-Infrastruktur. Die Murtalbahn besitzt Umladeanlagen im Bahnhof Unzmarkt, die Breitenauerbahn im Bahnhof Mixnitz-Bärenschützklamm und die Zillertalbahn in Jenbach. In Jenbach können auch normalspurige Wagen auf Rollwagen verladen werden.

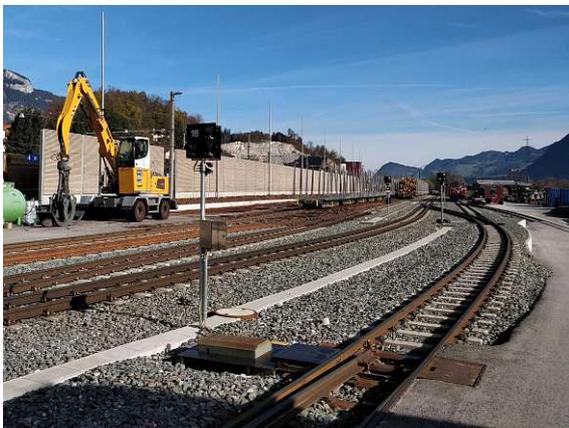
4.1.1 Gebrochene Verkehre

Bei gebrochenen Verkehren erfolgt eine Umladung des Transportguts von einem Verkehrsträger auf den anderen, nicht aber eine Umladung des Ladungsträgers (Gronalt et al. 2010). Die umgeladenen Güter können sowohl Massen- als auch Stückgüter sein. Entsprechend der unterschiedlichen Beschaffenheit des Ladeguts müssen die Anlagen zur Manipulation des Ladeguts ausgestaltet sein. Im einfachsten Fall sind dies Ladestraßen und Rampen. Ladestraßen sind befestigte Verkehrsflä-

chen in, neben oder zwischen den Gleisen, die Straßenfahrzeuge und Umschlagtechnik aufnehmen. Über Rampen können Flurfördergeräte, wie Gabelstapler, die Verladehöhe von Güterwagen erreichen. Beim Verladen von Chemie- und Mineralölprodukten sind neben entsprechenden Pumpen Gleistassen notwendig. Diese verhindern eine Verunreinigung des Untergrunds durch austretendes Ladegut. Für das Verladen von Schüttgütern können Wagenkippanlagen zum Einsatz kommen, bei denen der gesamte Güterwagen über die Stirnseite, seitlich oder über Kopf gekippt wird. Neben den genannten Anlagen sind oft auch Gleisfahrzeugwagen zur Ermittlung der Lademasse des Güterwagens notwendig (Berndt 2001). Beim Umschlag von Stückgütern ist darüber hinaus in der Regel ein Wetterschutz für Personal und Ware notwendig. Im einfachsten Fall sind das Dächer über Verladerampen, es sind aber auch geschlossene Hallen möglich (Martin 2021).

Ein typisches Massengut auf Schmalspurbahnen sind Rundhölzer. Bei der Rhätischen Bahn werden diese beispielsweise an Ladestellen entlang der Strecke von Holzlieferant:innen selbstständig mit einem Ladekran auf Schmalspurwagen verladen. Der Umschlag von Schmal- auf Normalspur in Landquart geschieht ebenfalls mit einem Ladekran mit entsprechendem Greifer (Rhätische Bahn AG o. D.[m]). Die Zillertalbahn in Tirol transportiert hingegen Rundholz zu einem Sägewerk in Fügen (Kenning 2022). Das Holz wird dabei in Jenbach mit einem Bagger mit Greifarm verladen (siehe Abb. 4.1a).

Weitere typische Verkehre auf Schmalspurbahnen sind Mineralöltransporte. Das Streckennetz der Rhätischen Bahn schließt beispielsweise an ein Tanklager in Landquart an. An mehreren Stellen im Netz können Mineralölprodukte von schmalspurigen Kesselwagen auf LKW umgeladen werden und umgekehrt (Rhätische Bahn AG o. D.[j]). Die Muraltalbahn transportiert ebenfalls Mineralölprodukte von Unzmarkt nach Murau (Beier 2022b). Wie auf Abbildung 4.1b erkennbar ist, befindet sich im Bahnhofsbereich von Unzmarkt eine Umladeanlage, die neben der Verladung von Containern und Stückgütern das Umpumpen von Mineralölprodukten ermöglicht.



(a) Jenbach (7.11.2022)



(b) Unzmarkt (8.11.2022)

Abb. 4.1: Umladeanlagen von Schmalspurbahnen

Schüttgüter werden beispielsweise auf der Breitenauerbahn transportiert. Das hier transportierte Magnesit wird entweder mit Bigbags, die mit dem Gabelstapler verladen werden, oder mit gedeckten Niederbordwagen, die im Bahnhof Mixnitz als ganze über die Stirnseite gekippt werden, transportiert (Strässle 2020). Die RhB bietet den Transport von Schüttgütern zu Baustellen bzw. den Abtransport von Aushubmaterial an. Dabei kommen Güterwagen zum Einsatz, die von oben befüllt und seitlich in einen Schüttbunker entleert werden können (Rhätische Bahn AG o. D.[c]). Der Transport des Schüttguts in der Verladeanlage kann sowohl mit Stetigförderern als auch mit Unstetigförderern (z.B. mit Flurförderfahrzeugen) erfolgen (Martin 2021).

Stückgüter werden in der Regel auf (z.B. Paletten) oder in (z.B. Boxen) einem Transporthilfsmittel transportiert (Katterfeld et al. 2020). Für das Ver- und Entladen der Stückgüter bzw. Transporthilfsmittel aus den Transportfahrzeugen am Umladepunkt kommen je nach Masse der Güter entweder Flurförderfahrzeuge oder Kräne zum Einsatz. Flurförderfahrzeuge sind am Boden fahrende Fördermittel. Diese können hand- oder motorbetrieben sein und zeichnen sich durch ihr Hubgerüst aus, mit dem Lasten aufgenommen und vertikal bewegt werden können. Flurförderfahrzeuge werden nach ihrer Tragfähigkeit unterschieden (Bruns 2020).

4.1.2 Intermodale Verkehre

Wie oben beschrieben, wechselt sowohl bei gebrochenen als auch bei intermodalen Verkehren das Ladegut an einer multimodalen Schnittstelle den Verkehrsträger. Anders als beim gebrochenen Verkehr wird beim intermodalen Verkehr auch die Ladeinheit umgeladen. Dabei wird eine möglichst hohe Standardisierung der Ladeeinheiten angestrebt, um den Umschlag, die Lagerung sowie Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Raums zu optimieren. Weltweit hat sich als Standard für Ladeeinheiten der Container nach ISO 668 durchgesetzt (Gronalt et al. 2010).

4.1.2.1 Transportbehälter

Neben der Verbesserung von Umschlag und Lagerung haben Transportbehälter vor allem die Aufgabe, die Ladung zu transportieren und vor äußeren Einflüssen zu schützen. Dementsprechend müssen die Transportbehälter auf das transportierte Gut angepasst sein. Dabei wird zwischen Stückgütern, Schüttgütern, Gasen und Flüssigkeiten unterschieden (Martin 2021).

Die weltweit verbreitetsten Transportbehälter sind Container. Dabei handelt es sich um genormte Großbehälter mit einem Fassungsvermögen von 10 bis 80 m³ (Martin 2021). Übliche Formen in Europa sind:

- *ISO-Container*: nach ISO 668 (ISO 2020) normierte Transportbehälter mit einer Außenhöhe von 2.591 mm (8 Fuß 6 Zoll), einer Außenbreite von 2.438 mm (8 Fuß), einer Länge von 10, 20, 40 oder 45 Fuß (ca. 3, 6, 12 und 13,7 m) sowie einer maximalen Zuladung von ca. 11, 21, 26 sowie 29 Tonnen (Martin 2021).
- *UIC-Binnencontainer*: an europäische Gegebenheiten angepasste Container mit einer Breite von 2,55 m. Damit können die Behälter mit Europaletten beladen werden, während das Lichtraumprofil bei Normalspur eingehalten wird (Gronalt et al. 2010).

Auf Basis der Abmessungen des ISO-Containers sind eine Reihe an Containern mit an das Ladegut angepasstem Aufbau und Abmessungen entstanden, wie Bulk-Container für Schüttgüter, Flat-Container für schwere Lasten, High-Cube Container mit einer Höhe von bis zu 9,6 Fuß (2.926 mm), nach oben offene Open-Top-Container, Kühlcontainer oder Tankcontainer. Eine weitere Spezialform des Containers ist der Abrollcontainer (ACTS-Container). Dieser ist nach DIN 30722 (DIN 2021) genormt und auf eine vereinfachte Umladung mittels LKW angepasst. Ein entsprechend ausgerüsteter LKW kann den Container sowohl vom Boden auf das Fahrzeug als auch vom Straßenfahrzeug auf einen Waggon laden. ACTS-Container können für den Transport von Stück- und Schüttgütern sowie Flüssigkeiten eingesetzt werden. Durch die einfache Handhabung ist das System für den Einsatz auf kurzen Strecken geeignet (Gronalt et al. 2010). Beispielsweise transportiert die Rhätische Bahn (RhB) auf ihrem Meterspur-Netz Abrollcontainer mit einem Volumen von bis zu 30 m³ und einer maximalen Zuladung von 44 Tonnen. Diese werden vor allem für Schüttgüter, wie beispielsweise Abfälle, verwendet (Rhätische Bahn AG o. D.[a]).

Eine Sonderform von Ladungsträgern stellt die Firma Innofreight her, diese sind auf das transportierte Gut angepasst und nutzen die durch den ISO-Container definierte Schnittstelle

zum Waggon. So können Container-Tragwagen mit entsprechenden Aufbauten für Schüttgüter oder Flüssigkeiten versehen werden. (Innofreight 2021). Die RhB setzt spezielle Ladungsträger im Rundholztransport ein. Diese 20 Fuß langen *Flatracks* können mit 17 t beladen und mit Einrichtungen für den Containerumschlag verladen werden (Rail Business 2014).

Mit der Bahn können auch vom LKW abnehmbare Aufbauten, so genannte *Wechselbehälter*, transportiert werden. Diese sind im Gegensatz zu Containern nur im kontinentaleuropäischen Verkehr einsetzbar, in der Regel nicht stapelbar und an die Anforderungen des:der Kund:in angepasst. Wesentlicher Vorteil im Vergleich zu ISO-Containern ist, dass sie wie ACTS-Container vom LKW mit bordeigenen Einrichtungen verladen werden können. Wechselaufbauten sind auf eine Breite von 2.500 mm und eine Höhe von 2.670 mm genormt und weisen unterschiedliche Längen auf (Gronalt et al. 2010). Die RhB bietet in ihrem Netz ein Wechselbehälter-Transportsystem an, bei dem Wechselbehälter der Kund:innen mit der Bahn zwischen den Güterumschlaganlagen und verschiedenen Bahnhöfen transportiert werden (Rhätische Bahn AG 2020).

Neben den bereits erwähnten Transportbehältern können im intermodalen Verkehr Sattelanhänger mit Eisenbahnwaggons transportiert werden. Dabei wird zwischen kranbaren und nicht kranbaren Anhängern unterschieden. Erstere kommen im unbegleiteten Kombinierten Verkehr, bei dem ausschließlich der Anhänger transportiert wird, zum Einsatz, zweitere im Bereich der *Rollenden Landstraße* (ROLA). Sattelanhänger weisen eine maximale Breite von 2.550 mm und eine Höhe von 4.000 mm auf (Gronalt et al. 2010). Auf europäischen Schmalspurbahnen konnte im Zuge der Recherche für die vorliegende Arbeit keine Anwendung der ROLA gefunden werden. Ein Sonderfall ist der Autoverlad der Rhätischen Bahn durch den meterspurigen Vereinatunnel, der auch LKW bis 4 m Eckhöhe transportiert (Rhätische Bahn AG o. D.[b]), aber nicht zum Güterverkehr auf Schmalspurbahnen gezählt werden kann.

4.1.2.2 Umschlagsysteme

Das Umladen der Ladeeinheiten (siehe Abschnitt 4.1.2.1) im Intermodalen Verkehr wird als *Umschlag* bezeichnet. Nach Gronalt et al. (2010) kann hierbei zwischen vertikalem und horizontalem Umschlag unterschieden werden. Bei Ersterem wird die Ladeeinheit in einem Terminal angehoben und schwebend zum anderen Transportträger transportiert, während bei Zweiterem das Straßenfahrzeug mit entsprechender Ausrüstung versehen ist, um den Ladeträger mit geringfügigen Anheben verladen zu können. Terminals sind hierbei Umschlaganlagen mit spezieller Infrastruktur und eigenen Umschlaggeräten. Daneben gibt es noch semistrukturale Einrichtungen wie Anschluss- und Freiladegleise auf denen horizontaler Umschlag stattfinden kann (Gronalt et al. 2010).

Typische Umschlaggeräte in Terminals sind Flurförderfahrzeuge. Diese können schienengebunden oder schienenlos verkehren. Schienengebundene Flurförderfahrzeuge sind beispielsweise Portalkräne, auch Verladebrücken genannt. Diese bestehen aus einem erhöht liegenden, quer zur Schiene angeordneten Träger, auf dem eine Laufkatze montiert ist, die sowohl dem Heben als auch der Querbewegung der Last dient. Als Lastaufnahmemittel kommen dabei *Spreader* zum Einsatz, diese greifen den Container an seinen oberen Ecken (Scholten 2020). Der Spreader kann mit Greifern ausgestattet werden, dann können neben Containern auch andere Transportbehälter, wie Wechselbehälter, gehoben werden. Zu den schienenlos verkehrenden Flurförderfahrzeugen gehören Greifstapler (Reach Stacker) und Frontstapler (Top Lifter). Dabei handelt es sich um mit Spreadern ausgerüstete Fahrzeuge, die Container und teilweise auch andere Ladungsträger heben und transportieren können. Zum Umschlag von dafür geeigneten Transportbehältern können zudem Gabelstapler eingesetzt werden (Gronalt et al. 2010). Ein Praxisbeispiel für den Einsatz von mit Gabelstaplern verladbaren Transportbehältern ist das System der Firma Bernegger, mit dem mineralische Rohstoffe mit Bahn und LKW transportiert werden (Bernegger GmbH o. D.).

Auch auf Schmalspurbahnen wird der vertikale Umschlag praktiziert. So sind die Umladeanlagen der Murtalbahn (siehe Abb. 4.1b) und das Güterumschlagszentrum (GUZ) Landquart der Rhätischen Bahn mit Portalkränen ausgerüstet. Letzteres verfügt außerdem über einen Greifstapler mit einer Tragkraft von 45 t. Sowohl die Portalkräne als auch der Greifstapler des GUZ Landquart sind mit Spreader und Greifarmen für die Verladung von Containern und Wechselbehältern ausgerüstet (Rhätische Bahn AG o. D.[h]). Portalkräne zeichnen sich durch eine hohe Umschlagrate aus, so können im Mittel 32 Container pro Stunde umgeschlagen werden (Scholten 2020). Reach Stacker weisen eine geringere Umschlagsleistung als Portalkräne auf, sind dafür aber flexibler einsetzbar und günstiger. Durch ihre Konstruktion erreichen sie Ladeeinheiten in der Höhe und können über Hindernisse hinweg greifen (Gronalt et al. 2010).

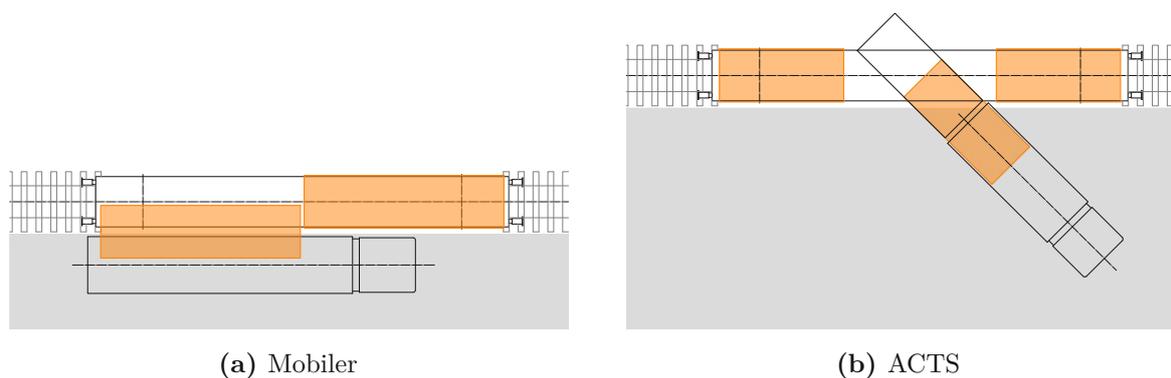


Abb. 4.2: Platzbedarf bei horizontalem Umschlag (Förster 2022)

Außerhalb von Terminals können Ladungsträger mithilfe von auf den Transportfahrzeugen, üblicherweise LKW, angebrachten Einrichtungen verladen werden. Der Umschlag erfolgt dabei horizontal, d.h. mit nur geringem Anheben des Ladungsträgers. Ein Beispiel für ein solches System ist der *Mobiler*. Dabei handelt es sich um ein hydraulisches System, das direkt auf einem LKW montiert ist und einen horizontalen Umschlag von Containern und Wechselbehältern zwischen Eisenbahnwagen und parallel dazu geparkten LKW ermöglicht. Neben Mobilern können auch Abrollcontainer mittels LKW auf einen Eisenbahnwagen verladen werden. Dabei greift ein spezielles Hackengerät in eine stirnseitig montierte Schlaufe am Container ein, der mittels auf der Unterseite angebrachten Rollen bewegt werden kann (Gronalt et al. 2010). Anders als beim *Mobiler* steht der LKW beim Verladen von Abrollcontainern schräg zum Eisenbahnwagen, womit der Platzbedarf dieses Systems steigt (siehe Abbildung 4.2).

4.1.3 Rollfahrzeugverkehr

Für den Einsatz von Rollfahrzeugen (siehe Abschnitt 4.2.3) muss eine entsprechende Infrastruktur an der Schnittstelle zwischen Normal- und Schmalspur bereitgestellt werden. Diese muss das *Aufschemeln* der normalspurigen Wagen auf das Rollfahrzeug ermöglichen. Dabei sind je nach Typ des Rollfahrzeugs, also Rollbock oder Rollwagen, unterschiedliche Anlagen notwendig.

Eine Rollbockanlage besteht im Wesentlichen aus erhöht geführten Normalspurgleisen, die gegen Ende hin abgesenkt werden, und dazwischenliegenden Schmalspurgleisen. Auf diesen schmalspurigen Gleisen werden die Rollböcke bereitgestellt, während der Normalspurwagen so lange über die Anlage geschoben wird, bis die Achsen des Normalspurwagens auf dem Rollbock aufsitzen. Dort werden die Normalspur-Achsen fixiert. Dieser Vorgang wird für alle Achsen des Wagens wiederholt. Das Aufbocken kann wie beim System Vevey weitgehend automatisiert werden. Hier werden die Rollböcke durch gefederte Mitnehmer von der Achse des Normalspurwagens

bis zum Ende der Rollbockgrube mitgezogen, wo das Rad des normalspurigen Wagens am Rollbock aufsitzt und automatisch mit einer Verriegelung gesichert wird. Das Abbocken erfolgt in umgekehrter Reihenfolge (Ringseisen 2013).

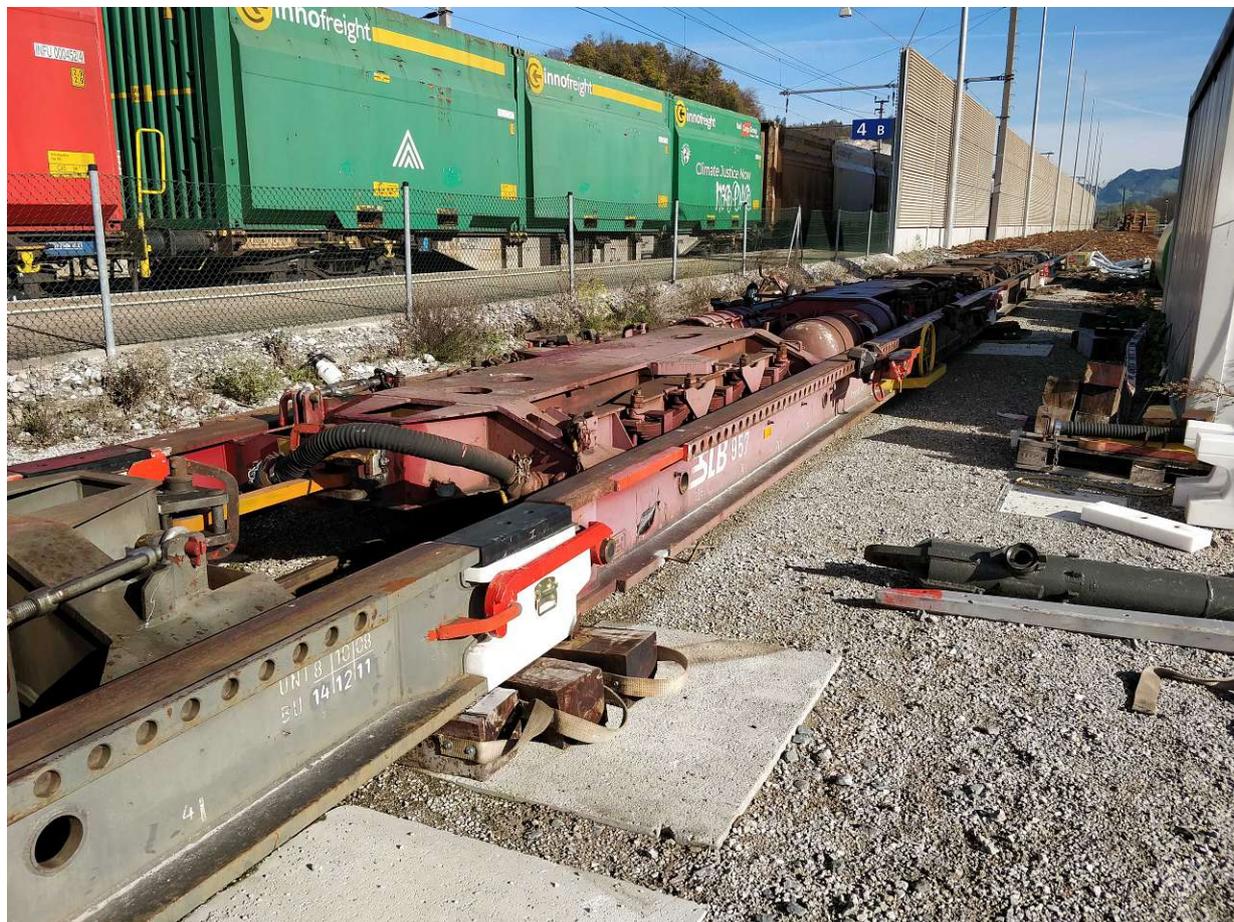


Abb. 4.3: Rollwagenanlage im Bahnhof Jenbach (7.11.2022)

Die Aufschemelanlage für Rollwagen ist im Vergleich zur Rollbockgrube relativ einfach konstruiert und besteht aus einem mit einer Rampe auf die Höhe der Rollwagen geführten Normalspurgleis, an das die auf einem tiefer liegenden Schmalspurgleis abgestellten Rollwagen anschließen. Beim Aufschemeln werden die Normalspurwagen über die aneinander gereihten Rollwagen geschoben bis die erste Achse bzw. das erste Drehgestell die gewünschte Position erreicht hat und an dieser gesichert wird. Beim „klassischen“ Rollwagenbetrieb wird durch das Bewegen des ersten Rollwagens ein Zwischenraum zum zweiten Rollwagen geschaffen, der mit einer Kuppelstange gesichert wird. Einen anderen Ansatz verfolgen die Zillertaler Verkehrsbetriebe, wo für den Transport zweier vierachsiger Normalspurwagen sechs Rollwagen zu einer fixen Garnitur gekuppelt werden und somit der Einsatz der schweren Kuppelstangen entfällt (Petrovitsch 2022). Die leer mitlaufenden Rollwagen dienen bei der Beladung als Überfahrbrücken, wobei die verbleibenden Zwischenräume zwischen den Rollwagen mit entsprechenden Formstücken gesichert werden (siehe Abbildung 4.3).

4.2 Fahrzeuge

Eisenbahnfahrzeuge werden im Allgemeinen in Regel- und Nebenfahrzeuge eingeteilt. Nebenfahrzeuge sind Fahrzeuge für Sonderzwecke, wie beispielsweise Arbeitsfahrzeuge. Regelfahrzeuge kommen hingegen im regulären Personen- und Güterverkehr zum Einsatz und können wiederum in Triebfahrzeuge und Wagen eingeteilt werden (Pachl 2021). Im folgenden Abschnitt werden sowohl Triebfahrzeuge als auch Wagen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen behandelt.

4.2.1 Triebfahrzeuge

Bei Triebfahrzeugen handelt es sich um Schienenfahrzeuge mit eingebauten Antrieb. Diese können in Lokomotiven und Triebwagen unterschieden werden. Während Lokomotiven nur die zum Antrieb notwendigen Einrichtungen enthalten, können Triebwagen auch Reisende und Lasten transportieren (Filipović 2005). Auf Schmalspurbahnen in Österreich und Deutschland kommen im Güterverkehr ausschließlich Lokomotiven zum Einsatz. Anders ist die Situation in der Schweiz, wo auch Triebwagen im Güterverkehr zum Einsatz kommen, z.B. wenn Güterwagen an reguläre Personenzüge angehängt werden (Metz 2012). Lokomotiven können wiederum in Strecken- und Rangierlokomotiven unterteilt werden. Rangierlokomotiven sind auf die Anforderungen des Rangierdienstes angepasst und weisen hohe Zugkräfte bei geringen Höchstgeschwindigkeiten auf (Berndt 2001). Im folgenden Abschnitt werden ausschließlich Streckenlokomotiven behandelt.

Grundsätzlich können Triebfahrzeuge mit Dampfmaschinen, Elektromotoren, Verbrennungsmotoren und Gasturbinen angetrieben werden. Während die Dampftraktion bis auf touristische Verkehre in Europa nicht mehr zum Einsatz kommt, kamen Gasturbinen über das Versuchsstadium nicht hinaus. Somit sind für den Eisenbahnverkehr nur elektrische Antriebe und Verbrennungsmotoren bzw. Hybridantriebe als Kombination dieser relevant. Ein Spezialfall des elektrischen Antriebs sind Batterie- und Wasserstoffantriebe. Hier wird die für den Antrieb notwendige Energie nicht über eine Fahrleitung zugeführt, sondern in einem anderen Medium gespeichert (Ihme 2019). Während im Waldviertel noch bis Mitte der 1980er Dampflokomotiven im Güterverkehr eingesetzt wurden (Lueglinger 2018), wird Güterverkehr auf Schmalspurbahnen in Österreich heute überwiegend mit Diesellokomotiven abgewickelt. Einzig auf der Breitenauer Bahn besteht elektrifizierter Güterverkehr, auf der Mariazellerbahn endete dieser 1999 (Hardmeier 2019). In der Schweiz ist die Situation hingegen eine andere, hier sind die Schmalspurbahnen fast lückenlos elektrifiziert (Bärtschi 2019).

Elektrische Antriebe weisen im Vergleich zu Triebfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren eine Reihe von Vorteilen auf – u.a. stoßen sie keine Treibhausgasemissionen aus, sind leiser, haben einen besseren Wirkungsgrad und sind günstiger im Betrieb. Jedoch haben sie den Nachteil, dass entsprechende Infrastruktur zur Energieversorgung (Fahrleitungen, Unterwerke usw.) vorhanden sein muss. Aus diesem Grund sind die Gesamtkosten des elektrischen Antriebs einer Bahn erst ab einer gewissen Transportleistung günstiger als bei einer Bahn mit Dieseltraktion (Filipović 2005).

4.2.1.1 Elektrische Traktion

Der einzige noch bestehende Güterverkehr auf Schmalspurbahnen mit elektrischer Traktion in Österreich ist jener auf der Lokalbahn Mixnitz – St. Erhard in der Steiermark. Bis heute ist hier eine Lokomotive aus der Zeit der Inbetriebnahme der Lokalbahn im Jahr 1913 im Einsatz. Diese weist bei einer Masse von 14 t und einer Leistung von etwa 100 kW eine Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h auf. 1957 und 1963 wurden weitere Elektrolokomotiven mit einer Leistung von je 148 kW beschafft (siehe Tabelle 4.1). Diese erreichen ebenfalls eine Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h (Straka und Müller 2018). Auf der Mariazellerbahn kamen bis zur Einstellung des Güterverkehrs die 1911 bis 1914 gebauten Lokomotiven der Reihe 1099 zum Einsatz (Lueglinger

2018). Diese Lokomotiven der Reihe 1099 weisen eine Leistung von 405 kW bei einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h auf (Felsing 2002). Drei Stück stehen als *Reihe E* bis heute bei der NÖVOG vor Nostalgiezügen im Einsatz (Eisenbahn Österreich 2021b).

In der Schweiz kommen auf meterspurigen Bahnen sowohl Lokomotiven als auch Triebwagen zum Einsatz. So unterhält die Rhätische Bahn (RhB) zahlreiche vier- und sechsachsige Lokomotiven verschiedener Baujahre mit Leistungen zwischen 1.100 kW und 2.400 kW. Diese erreichen Höchstgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h. Die RhB besitzt neben Lokomotiven moderne, stark motorisierte, Triebwagen der Reihe ABe 8/12 „Allegra“ mit einer Leistung von 2.400 kW unter Gleichstrom bzw. 2.800 kW unter Wechselstrom (Seifert 2021). Die RhB setzt ihre „Allegra“-Triebwagen auch im Güterverkehr ein (Ritler et al. 2009). Die Aare Seeland mobil AG (Asm) besitzt ebenfalls mehrere Triebwagen für den Gütertransport. Die 368 kW starke Be 4/4 kommen vor Kies-Ganzzügen zum Einsatz, während die 265 kW bzw. 620 kW starken Gütertriebwagen für den Einsatz auf Dreischienengleisen und im Rollbockverkehr bestimmt sind und entsprechend ausgerüstet sind (Seifert 2021).

4.2.1.2 Dieseltraktion

Den Rückgrat des Dieselbetriebs auf ÖBB-Schmalspurbahnen bildete die Reihe 2095. Diese 1958 bis 1962 gelieferten Lokomotiven galten mit einer Leistung von 440 kW zum Zeitpunkt ihrer Auslieferung als stärkste Diesellokomotiven auf einer Spurweite von 760 mm. Im regulären Betrieb erreichen sie eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h (Kuderna und Pühringer 2007). Inzwischen stehen nach Übernahme der ÖBB-Schmalspurbahnen die Maschinen im Eigentum der NÖVOG und der Salzburg AG (Eisenbahn Österreich 2021b). Trotz ihres Alters von über 60 Jahren kommen die Lokomotiven noch immer vor Bauzügen zum Einsatz (Oberkalmsteiner 2021). Im Bereich der Privatbahnen wurden ab den 1960ern verschiedene Diesellokomotiven beschafft, um den bis dahin vorherrschenden Dampfbetrieb abzulösen. Beispielsweise beschaffte die Steiermärkischen Landesbahnen die Reihe VL 11–16 mit 500 PS (rund 370 kW) oder die Zillertalbahn die Lokomotiven D 8 und 9 mit 520 PS (rund 380 kW). Nach dem Ende der jugoslawischen Schmalspurbahnen kauften die Steiermärkischen Landesbahnen und die Zillertalbahn in den 1980ern mehrere Exemplare der Baureihe JŽ 740 von den Jugoslawischen Staatsbahnen (JŽ), modernisierten und reihten sie als VL 22–24 bzw. als D 10 in ihren Bestand ein (Lueglinger 2018). Im Zuge der Modernisierung erhielten die ehemals jugoslawischen Lokomotiven einen 450 kW starken Motor (Fladerer 1984). Diese Lokomotiven stehen bis heute teilweise im Bestand der Steiermarkbahn Transport und Logistik sowie der Zillertalbahn (Eisenbahn Österreich 2021b). Zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit kommt die VL 23 der Steiermarkbahn leihweise bei den Zillertaler Verkehrsbetrieben vor Güterzügen zum Einsatz (siehe Abb. 4.4a).

Die modernsten Schmalspur-Diesellokomotiven in Österreich sind die 2004 bis 2013 beschafften Lokomotiven Gmeinder D75 BB-SE der Zillertalbahn (D 13–16) und der Salzburg AG (Vs 81–83). Diese wurden sowohl für einen Einsatz im Güter- als auch im Personenverkehr beschafft (Lueglinger 2018). Die Lokomotiven sind mit einer Leistung von 746 kW ausgerüstet und erreichen eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h (Gmeinder Lokomotiven GmbH o. D.). In der Schweiz kommen moderne Diesellokomotiven auf Meterspurbahnen zum Einsatz. So besitzt die Rhätische Bahn (RhB) Diesellokomotiven der Type Gmf 4/4 234 mit einer Leistung von 1.800 kW und einer Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Diese 2013/2014 in den Dienst gestellten Lokomotiven kommen beispielsweise vor Bauzügen und zum Schneeräumen zum Einsatz (Seifert 2021).



(a) Steiermarkbahn VL 23



(b) Zillertalbahnhof D 15

Abb. 4.4: Von den Zillertaler Verkehrsbetrieben im Güterverkehr eingesetzte Lokomotiven (Jenbach, 7.11.2022)

4.2.1.3 Alternative Antriebe

Zweikraftlokomotiven werden sowohl elektrisch über Fahrdrabt als auch über einen eingebauten Dieselmotor mit Energie versorgt. Sie werden im Güterverkehr eingesetzt, wenn elektrifizierte und nicht-elektrifizierte Strecken am Laufweg des Zuges befahren oder wenn nicht-elektrifizierte Anschlussbahnen bedient werden sollen. Für letzteren Einsatz reichen oft bereits Hilfsaggregate mit relativ geringer Leistung. Als Beispiel für eine Zweikraftmaschine kann die 1968 beschaffte meterspurige Gem 4/4 801–802 im Bestand der Rhätischen Bahn (RhB) genannt werden. Unter 1000 V Gleichspannung hat die Lokomotive am Treibrad eine maximale Leistung von 680 kW und im Dieselmotorbetrieb von 780 kW (Seifert 2021). Mit einer installierten Leistung von 1200 kW elektrisch und einer Dieselmotorleistung von 1500 kW bringen die 2009 bis 2011 gebauten meterspurigen Lokomotiven des Typs TD 2000 BB weit höhere Leistungen als die Gem 4/4. Eingesetzt werden diese auf Schmalspurbahnen in Spanien (Kache 2016).

Als Alternative zu Dieselantrieben wird der Einsatz von Wasserstoffzügen diskutiert. Im Zillertal ist eine Beschaffung von Wasserstofftriebzügen für den Personenverkehr geplant. Der Güterverkehr soll allerdings weiterhin mit Dieseltraktion abgewickelt werden (Schrempf 2022).

4.2.1.4 Anforderungen an Triebfahrzeuge

Um Züge über eine Eisenbahnstrecke befördern zu können, müssen Triebfahrzeuge eine entsprechende Zugkraft aufweisen. Die Zugkräfte des Antriebs eines Schienenfahrzeuges werden einerseits durch den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene, die Antriebsleistung sowie die Drehzahlgrenze beschränkt. Folglich ergeben sich drei Grenzl意思: die Kraftschlussgrenze, die Leistungsgrenze und die Drehzahlgrenze, wobei letztere die Höchstgeschwindigkeit der Lokomotive definiert (Ihme 2019).

Die Kraftschlussgrenze beschränkt die nutzbare Zugkraft bei geringeren Geschwindigkeiten. Nach Ihme (2019) gehen dabei der Kraftschlussbeiwert μ zwischen Rad und Schiene sowie die Radlast F_R auf den Antriebsrädern ein:

$$Z_{max} = \mu \cdot F_R = \mu \cdot m_R \cdot g \quad (4.1)$$

Während der Kraftschlussbeiwert von den Fahrwegverhältnissen abhängt, ergibt sich die Radlast direkt aus der auf den Antriebsrädern lagernden Masse m_R . Nach Formel 4.1 ist eine größere Zugkraft bei geringeren Geschwindigkeiten durch eine höhere Radsatzfahrmasse m_R realisierbar. Betrachtet man die Beispiele von Schmalspurlokomotiven aus Österreich und der Schweiz (Tabelle 4.1), so fällt auf, dass die in der Schweiz verwendeten Meterspurlokomotiven höhere Massen und somit höhere Radsatzlasten aufweisen. Die Masse der Triebfahrzeuge kann allerdings nicht beliebig gesteigert werden, weil sie durch die Achslast der Strecke (siehe Abschnitt 3.4.1) beschränkt ist.

Tab. 4.1: Kennwerte von Schmalspurlokomotiven in Österreich und der Schweiz

Bezeichnung	Antrieb	Spurweite	Achsfolge	Masse	Leistung	Baujahre
MStE 3–4	elektrisch	760 mm	Bo'Bo'	30 t	148 kW	1957-1963
RhB Ge 4/4 III	elektrisch	1000 mm	Bo'Bo'	62 t	2400 kW	1993-1999
ÖBB 2095	Diesel	760 mm	B'B'	30,8 t	440 kW	1958-1962
StB VL 22–24 / JŽ 740	Diesel	760 mm	B'B'	31,6 t	450 kW	1970-1972
Gmeinder D75 BB-SE	Diesel	760 mm	B'B'	50 t	746 kW	2004-2013
RhB Gmf 4/4 II	Diesel	1000 mm	Bo'Bo'	64 t	1800 kW	2013-2014

Bei höheren Geschwindigkeiten wird die Kraftschlussgrenze erreicht. Nun ist die installierte Leistung der begrenzende Faktor und der Kraftschlussbeiwert wird nicht mehr erreicht. Die Zugkraft ergibt sich nach Ihme (2019) nun als Quotient aus Leistung P und Fahrgeschwindigkeit v :

$$Z = \frac{P}{v} \quad (4.2)$$

Betrachtet man wiederum die Lokomotiven in Tabelle 4.1, so fällt auf, dass auf der Meterspur in der Schweiz weit stärkere Lokomotiven im Einsatz sind als auf der „Bosnischen Spurweite“ (760 mm) in Österreich. Dividiert man die Leistung der Lokomotiven durch ihre Masse, so ergibt sich eine *Leistungsziffer*. Berechnet man diese Kennzahl, so ergibt sich für die in Österreich üblicherweise verwendeten Diesellokomotiven eine Leistungsziffer zwischen 14,2 kW/t (StB VL 22–24) und 14,9 kW/t (Gmeinder D75 BB-SE). In der Schweiz erreichen Lokomotiven auf der Meterspur hingegen mit 28,1 kW/t (Gmf 4/4 II) bzw. 38,7 kW/t (Ge 4/4 III) weit höhere Leistungsziffern. Eine mit 4,9 kW/t besonders geringe Leistungsziffer weisen die auf der elektrischen Lokalbahn Mixnitz - St. Erhard (MStE) verkehrenden Lokomotiven 3 und 4 auf.

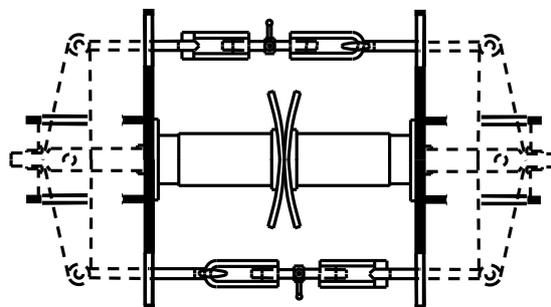
Im Zillertal wird der Güterverkehr zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit mit der von der Steiermarkbahn (StB) geliehenen Lokomotive VL 23 (ex. JŽ 740) abgewickelt, da alle Gmeinder-Lokomotiven im Personenverkehr benötigt werden. Da allerdings die Gmeinder-Lokomotiven eine höhere Leistung, Radsatzmasse und somit höhere Zugkraft aufweisen, wird laut Obholzer (Interview vom 7.11.2022) die Lokomotive D 10 (ebenfalls ex. JŽ 740) für den Personenverkehr aufgearbeitet, um eine der Gmeinder-Lokomotiven für den Güterverkehr freizuspielen. Mit diesen können statt bisher acht Wagen pro Zug bis zu vierzehn Wagen transportiert werden.

In Österreich und der Schweiz kommen im Personenverkehr auf Schmalspurbahnen verbreitet Triebwagen zum Einsatz. Anders als in Österreich werden in der Schweiz leistungsstarke Triebwagen auch im Güterverkehr eingesetzt. Beispielsweise besitzt die Rhätische Bahn 2.400 kW (unter Gleichstrom) bzw. 2.800 kW (unter Wechselstrom) starke „Allegra“-Triebwagen (ABe 8/12). Diese können mit einer Anfahrzugkraft von 280 kN eine Anhängelast von 160 t über eine Steigung von 70 ‰ transportieren (Schöning und Zimmermann 2012). Damit erreichen die

„Allegra“-Triebzüge höhere Anfahrzugkräfte als die derzeit stärksten Schmalspurlokomotiven in Österreich, die Gmeinder D75 BB-SE (Gmeinder Lokomotiven GmbH o. D.).



(a) Bosnakupplung mit zusätzlichen seitlichen Schraubenkupplungen im gekuppelten Zustand (Waldviertel, 22.10.2022)



(b) Balancierhebelkupplung (BAV 2020b)

Abb. 4.5: In Österreich und der Schweiz angewendete Kupplungen

Neben den bereits erwähnten Anforderungen an die Leistung von Triebfahrzeugen müssen diese die bei der Beförderung von Güterwagen auftretenden Zug- und Druckkräfte aufnehmen können. Diese Kräfte treten nicht nur beim Ziehen der Waggons, sondern auch beim Bremsen auf. Entsprechend der auftretenden statischen und dynamischen Kräfte muss der Triebfahrzeugkasten bzw. -rahmen ausgelegt sein. Lokomotiven haben diesbezüglich aufgrund der massiven Konstruktion einen Vorteil gegenüber Triebwagen, die primär dem Personenverkehr dienen und entsprechend leicht gebaut sind (Ihme 2019). Um einen Zug bilden zu können, sind Zug-Stoßeinrichtungen (auch *Kupplung* genannt) notwendig. Grundsätzlich kann zwischen Schraubenkupplungen mit außenliegenden Puffern (UIC-Standardkupplung), wie sie bei lokbespannten Zügen in Europa vorherrschend sind, und Mittelpufferkupplungen, wie beispielsweise Scharfenbergkupplungen, unterschieden werden (Hecht et al. 2020). Weil Schraubenkupplungen mit außen liegenden Puffern für die bei Schmalspurbahnen auftretenden engen Bogenradien nicht geeignet sind, haben sich in diesem Bereich Mittelpufferkupplungen durchgesetzt (Lämmli 2021). Ein Spezialfall sind Schleppfahrzeuge für den Rollbockbetrieb. Diese müssen (sofern keine Kuppelstange verwendet wird) auch mit UIC-Standardkupplungen ausgerüstet sein, um die aufgebockten Normalspur-Wagen ziehen zu können (Ringseisen 2013).

Bei Schmalspurbahnen „Bosnische Spurweite“ (760 mm) wird bis heute die Bosna-Kupplung angewandt. Diese besteht aus einem Mittelpuffer mit trichterförmiger Aufnahme. Der Trichter nimmt dabei ein kurzes Verbindungsstück auf, kann aber auch Kupplungsstangen im Rollwagenverkehr aufnehmen. Diese Kupplungen können zusätzlich mit zwei seitlich davon liegenden asymmetrischen Schraubenkupplungen ausgestattet sein (siehe Abb. 4.5a). Dadurch sind die Fahrzeuge dreifach gekuppelt und erlauben so einen Schiebetrieb (Schiendl 2015). In der Schweiz kommen einerseits Mittelpufferkupplungen mit seitlichen Kupplungshaken und andererseits Mittelpufferkupplungen mit zentralem Kupplungshaken zum Einsatz. Bei Ersterer befinden sich zwei Schraubenkupplung jeweils seitlich des mittig liegenden Puffers, bei Zweiterer befindet sich eine Schraubenkupplung unterhalb des Puffers. Bei Mittelpufferkupplungen mit seitlichen Kupplungshaken sind die Kupplungshaken mit einem *Balancierhebel* verbunden, die Schraubenkupplung bleibt also bei Bogenfahrt gespannt (BAV 2020b).

4.2.2 Güterwagen

Um Güter mit der Bahn transportieren zu können, sind Waggons, die diese Güter aufnehmen, notwendig. Dabei kann auf Schmalspurbahnen sowohl ein normalspuriger Güterwagen auf Rollfahrzeuge verladen (siehe Abschnitt 4.2.3), als auch eigene schmalspurige Güterwagen eingesetzt werden. Für einen optimalen Einsatz des Güterwagen bestehen Bestrebungen, diese möglichst gut an das Transportgut anzupassen. Dadurch ist neben universell einsetzbaren Güterwagen eine große Anzahl an Spezialfahrzeugen entstanden (Berndt 2001).

Je nach Bauart weisen Güterwagen unterschiedliche bauliche Eigenschaften auf. Aufgrund der Vielzahl der im Einsatz stehenden Güterwagen erfolgt die Einteilung nach Wagengattungen (Berndt 2001). Vom Internationalen Eisenbahnverband (UIC) werden die Gattungsbezeichnungen für Güterwagen durch das Merkblatt UIC 438-2 (UIC 2004) definiert. Grundsätzlich besteht dieses Klassifizierungssystem aus einer Reihe an Buchstaben, wobei der (oder die) Großbuchstabe(n) am Anfang die Hauptgattung und folgende Kleinbuchstaben weitere Eigenschaften definieren. Die Hauptgattungen werden mit Buchstaben *E* bis *Z* beschrieben (*A* und *B* sind für Personenwagen reserviert, *D* für Gepäckwagen), dabei steht beispielsweise *H* für einen gedeckten Güterwagen in Sonderbauart. Folgende Kleinbuchstaben beschreiben weitere Eigenschaften, in Kombination mit dem Buchstaben *H* steht beispielsweise *a* für einen Einzelwagen mit vier Radsätzen, *i* für öffnungsfähige Seitenwände und *k* für eine Lastgrenze kleiner 40 t. Die Gattungsbezeichnung *Haik* steht also für einen meterspurigen, gedeckten Schiebewandwagen mit einer maximalen Zuladung von 26 t (Rhätische Bahn AG o.D.[g]). Es werden allerdings im Schmalspurbereich auch vom UIC-Kodex abweichende Gattungsbezeichnungen verwendet. Beispielsweise bezeichnet die Steiermarkbahn mit dem vom UIC-Kodex 438-2 nicht belegten Buchstaben *J* Schmalspur-Plateauwagen (Steiermarkbahn Transport und Logistik o.D.[b]). Im Folgenden wird eine Auswahl an typischen Fahrzeugen auf österreichischen und schweizerischen Bahnen vorgestellt.

4.2.2.1 Offene Güterwagen

Offene Güterwagen der Regelbauart (Gattung *E*) haben einen nach oben offenen kastenförmigen Aufbau mit Seitentüren und aufklappbaren Stirnwänden, können somit von drei Seiten be- und entladen werden. Diese Wagen kommen meistens für den Transport von nässeunempfindlichen Stück- und Schüttgütern zum Einsatz. Offene Güterwagen der Sonderbauart (Gattung *F*) sind zusätzlich mit Einrichtungen zur Schwerkraftentladung ausgestattet (Berndt 2001). Als Beispiel für einen offenen vierachsigen Schmalspur-Güterwagen können Wagen der Gattung *Fac* der Rhätischen Bahn (RhB) mit einem Volumen von 22 m³ und Ladevermögen von 33 t bei einer Eigenmasse von 15,3 t genannt werden (Rhätische Bahn AG o.D.[k]).

4.2.2.2 Gedeckte Güterwagen

Bei gedeckten Güterwagen wird zwischen solchen der Regelbauart (Gattung *G*) und der Sonderbauart (Gattung *H*) unterschieden. Daneben gibt es solche mit Temperaturbeeinflussung (Gattung *I*). Gedeckte Güterwagen gehören zu den „klassischen“ Güterwagen und bestehen aus einem geschlossenen Wagenkasten mit Tonnendach und seitlichen Schiebetüren sowie Belüftungsklappen. Eine Weiterentwicklung sind gedeckte Güterwagen der Sonderbauart. Diese großräumigen Wagen weisen verschiebbare Seitenwände auf, womit der Zugang zur gesamten Ladefläche von außen sichergestellt ist. Außerdem kann der Laderaum mit verschiebbaren Trennwänden unterteilt werden. Gedeckte Wagen werden in der Regel für den Transport von Stückgütern eingesetzt (Berndt 2001).

Die Steiermärkischen Landesbahnen (StLB) beschafften in den 1970ern gedeckte zweiachsige Güterwagen der Gattung *Glm* mit einer Tragfähigkeit von bis zu 15 t bei einer Eigenmasse von 5 t (Steiermarkbahn Transport und Logistik o.D.[a]). Die RhB besitzt eine Reihe an Schiebewardwagen der Gattung *H*, teilweise mit Kühlaggregat. Der oben bereits erwähnte vierachsige Schiebewardwagen der Gattung *Haik* kann auf einer Ladefläche von etwa 32 m² eine Masse von 26 t bei 14 t Eigengewicht transportieren (Rhätische Bahn AG o.D.[g]).

Eine Sonderform des gedeckten Wagens sind solche mit öfnungsfähigem Dach (Gattung *T*). Hierbei handelt es sich um großvolumige Wagen für den Transport von nässeempfindlichen Stück- und Schüttgütern. Das öfnungsfähige Dach erleichtert einerseits das Verladen von schweren Stückgütern und ermöglicht andererseits das Beladen mit Schüttgütern von oben. Wagen der Gattung *T* für Schüttgüter besitzen eine dosierbare Schwerkraftentladung und können nach unten entladen werden. Im Bestand der Steiermärkischen Landesbahnen (StLB) befanden sich beispielsweise in den 1980ern mehrere zweiachsige Schüttgutwagen der Gattungen *Tm* und *Tdm* (Slezak 1986). Die Wagen der Gattung *Tdm* der StLB weisen ein Volumen von 20,8 m³, eine Eigenmasse von 6,4 t und eine maximale Zuladung von 14 t bei 10,5 t Achslast auf (Franz Knotz KG 1980).

4.2.2.3 Flachwagen

Flachwagen sind Güterwagen, die im Grunde nur aus der Ladefläche und Einrichtungen zur Ladungssicherung, wie Seitenbordwände oder Rungen, bestehen. Die Gattungen *K* und *L* decken zweiachsige Flachwagen ab, wobei es sich bei letzteren um Sonderbauformen wie Autotransportwagen handelt. Vierachsige Flachwagen fallen unter die Gattungsbezeichnungen *R* (Regelbauart) und *S* (Sonderbauart). Als Gattung *O* werden inzwischen im Normalspurbereich sehr seltene gemischte offene Mehrzweckwagen bezeichnet. Flachwagen werden zum Transport schwerer Stückgüter und von Ladeeinheiten des kombinierten Verkehrs eingesetzt. Wagen der Gattung *S* können außerdem mit Einrichtungen zum Schutz nässeempfindlicher Güter mit Teleskophauben oder Schutzplanen versehen werden (Berndt 2001).

Die Steiermarbahn (StB) besitzt beispielsweise zweiachsige Plateauwagen der Gattung *Jkm* und *Jrm*, mit und ohne Rungen. Diese können bei einer Eigenmasse von 4,3 t eine Ladung mit Massen von bis zu 16 t transportieren (Steiermarkbahn Transport und Logistik o.D.[b]). Außerdem befinden sich Flachwagen der Gattung *SSrm* im Bestand der StB. Diese sind sowohl mit vier Containerzapfen zur Aufnahme eines 20-Fuß-Containers als auch mit Rungen zum Holztransport ausgestattet und können bei 12 t Eigenmasse bis zu 28 t zuladen (Greiner, E-Mail vom 3.10.2022). Auch die RhB setzt verschiedene Flachwagen für ACTS-Transporte, schwere Stückguttransporte (wie Holz oder Baumaterialien) sowie den Containertransport ein. Zweiachsige Flachwagen der Gattung *Kk* können beispielsweise bei 5,6 t Eigenmasse bis zu 12 t zuladen (Rhätische Bahn AG o.D.[l]) und vierachsige Flachwagen der Gattung *Re-t* 46 t bei 17,8 t Eigenmasse transportieren (Rhätische Bahn AG o.D.[d]). Für Containertransporte existieren sowohl Flachwagen der Gattung *Sgp* für den Transport von 20 und 40 Fuß langen ISO-Containern und von Rundholz mit einem maximalen Ladegewicht von 47 t bei 17 t Eigenmasse (Rhätische Bahn AG o.D.[f]), sowie spezielle Niederflur-Flachwagen der Gattung *Sb* für den Transport von 20-Fuß-Containern auf Abschnitten mit beschränktem Lichtraumprofil mit einer maximalen Zuladung von 30 t bei einer Eigenmasse von 14,4 t (Rhätische Bahn AG o.D.[e]).

Eine Sonderform von Flachwagen verwendet die Zillertalbahnen (ZB). Im Rahmen der Wiederaufnahme des Güterverkehrs wurden dutzende Rollwagen der Gattung *WW* mit Rungenaufbauten versehen und zu fixen Zügen mit je acht Wagen gekuppelt. Mit diesen Aufbauten kann mit einem Wagen bis zu 41 t Rundholz transportiert werden (Innofreight 2021). Dabei haben laut

Aufschrift (siehe Abb. 4.6b) auf den Wagen die Rungenaufbauten ein Tara von 3,6 t während die verwendeten Rollwagen eine Leermasse von 9,5 t bis 9,8 t haben.



(a) Rollwagen mit aufgesetzten Rungenaufbauten



(b) Aufschriften am Holztransportwagen

Abb. 4.6: Holztransportwagen der Zillertalbahn (Jenbach, 7.11.2022)

4.2.2.4 Sonderwagen

Zu den Sonderwagen der Gattung *U* zählen neben Schwerlastwagen auch Behälterwagen mit Druckluftentladung für staubförmige Güter. Die Rhätische Bahn (RhB) besitzt beispielsweise einen modular aufgebauten Spezialtransportwagen der Gattung *Uaa-z*. Mit diesem können auf zwölf Achsen bis zu 97 t transportiert werden (Rhätische Bahn AG o. D.[p]). Als weitere Sonderwagen stehen Silowagen der Type *Uac* im Dienst der RhB. Diese verfügen über ein maximales Ladegewicht von 36 t bei einer Eigenmasse von 16,8 t (Rhätische Bahn AG o. D.[n]).

4.2.2.5 Kesselwagen

Für den Transport von flüssigen und gasförmigen Gütern werden Kesselwagen (Gattung *Z*) eingesetzt. Diese sind auf das jeweilige Transportgut abgestimmt und müssen hohen Sicherheitsanforderungen genügen (Berndt 2001). Die Steiermarkbahn besitzt mehrere Kesselwagen der Gattung *ZZm* für den Mineralöltransport auf der Muraltalbahn. Diese weisen ein Volumen von 33 m³ und eine maximale Zuladung von 28 t bei einer Eigenmasse von knapp 12 t auf (siehe Abb. 4.7b). Auch die RhB setzt Kesselwagen für den Mineralöltransport ein. Diese Wagen der Gattung *Za* fassen ein Volumen von 52 m³ bzw. eine Zuladung von max. 32 t bei einer Eigenmasse von 13,4 t. Ein Teil der Fahrzeuge ist mit der für den Transport von Benzin notwendigen Gasrückführung ausgestattet (Rhätische Bahn AG o. D.[o]).

4.2.2.6 Anforderungen an Güterwagen

Da der Güterverkehr auf der Schiene im Wettbewerb mit jenem auf der Straße steht, müssen Güterwagen eine Vielzahl an Anforderungen erfüllen. Das betrifft etwa niedrige Kosten von Herstellung und Betrieb, eine optimierte Be- und Entladung sowie eine maximale Zuladung bei minimaler Totlast. Gleichzeitig müssen aber auch ökologische Aspekte, wie Schallschutz, berücksichtigt werden (Berndt 2001). Zudem müssen die Waggons die im Betrieb auftretenden hohen Belastungen durch ihre Konstruktion aufnehmen können. Daraus ergeben sich spezielle Anforderungen an eine möglichst leichte, aber stabile, Konstruktion der Wagen (Jänsch 2016).



(a) Kesselwagen Type *ZZm* und Containertransportwagen Type *SSrm* (b) Aufschriften am Kesselwagen der Type *ZZm*

Abb. 4.7: Güterwagen der StB in der Ladestelle Murau (8.11.2022)

Im Güterverkehr wird hinsichtlich der beförderten Massen zwischen verschiedenen Größen unterschieden: während mit den Brutto-Tonnen die gesamte zu bewegende Masse summiert wird, wird unter Netto-Tonnen die Masse der beförderten Ladung bzw. der intermodalen Transporteinheit verstanden. Im intermodalen Verkehr muss auch noch die Eigenmasse des Ladungsträgers abgezogen werden um die tatsächlich transportierte Masse der Ladung, die Netto-Netto-Tonnen, zu ermitteln (Gronalt et al. 2010). Betrachtet man nun die Belastbarkeit der Eisenbahninfrastruktur, so wirken die Brutto-Tonnen dividiert durch die Anzahl an Achsen als Achslast auf den Oberbau (siehe Abschnitt 3.4.1). Insofern können bei einer höheren zulässigen Achslast der Infrastruktur mehr Brutto-Tonnen transportiert werden. Ein weiterer Faktor für die Erhöhung der möglichen Netto-Tonnen ist die Reduktion der *Totlast*, also der Masse des Wagens. Diese macht im Normalspurbereich etwa $1/4$ des zulässigen Gesamtgewichts aus (Jänsch 2016).

Tab. 4.2: Kennwerte von Schmalspur-Güterwagen in Österreich und der Schweiz

Bezeichnung	Spurweite	Achsen	Eigenmasse	Ladegewicht	Gesamtmasse	Achslast
RhB <i>Fac</i>	1000 mm	4	15,3 t	33 t	48,3 t	12 t
StB <i>Glm</i>	760 mm	2	5 t	15 t	20 t	10 t
RhB <i>Haik</i>	1000 mm	4	14 t	26 t	40 t	10 t
StB <i>Jkm</i>	760 mm	2	4,3 t	16 t	20,3 t	10,2 t
RhB <i>Kk</i>	1000 mm	2	5,6 t	12 t	17,6 t	8,8 t
RhB <i>Re-t</i>	1000 mm	4	17,8 t	46 t	63,8 t	15,95 t
RhB <i>Sgp</i>	1000 mm	4	17 t	47 t	64 t	16 t
StB <i>SSrm</i>	760 mm	4	12 t	28 t	40 t	10 t
RhB <i>Za</i>	1000 mm	4	13,4 t	32 t	45,4 t	11,4 t
StB <i>ZZm</i>	760 mm	4	12 t	28 t	40 t	10 t
ZB <i>WW</i>	760 mm	6	13,1 t	41,4 t	54,5 t	9,1 t

Betrachtet man die in der Tabelle 4.2 aufgelisteten Schmalspur-Güterwagen, so fällt auf, dass im Schnitt 29 % der zulässigen Gesamtmasse auf das Eigengewicht entfällt. Damit schneiden die hier aufgelisteten Schmalspur-Güterwagen (außer den Wagen der Zillertalbahn) hinsichtlich Totlastanteil schlechter ab, als der Normalspurbereich laut Jänsch (2016). Im Bereich der „Bos-

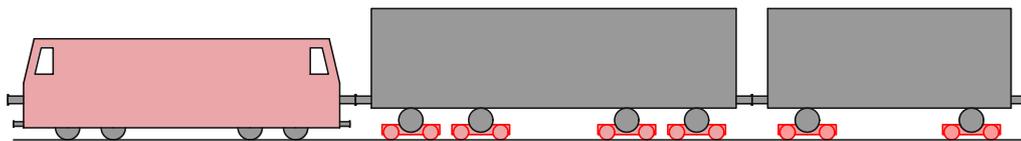
nischen Spurweite“ (760 mm) nähert man sich mit rund 26 % Totlastanteil den Werten der Normalspur, während der Totlastanteil bei Meterspurbahnen bei über 30 % liegt. Trotzdem liegen die Werte noch immer besser als im Straßengüterverkehr, wo ein Sattelschleppfahrzeug mit 40 t höchstzulässiges Gesamtgewicht ca. 25 t zuladen kann, womit der Totgewichtsanteil bei etwa 38 % liegt (Ihme 2019). Eine Ausnahme bilden die sechsachsigen Rollwagen mit Rungenaufbau der Zillertalbahn (ZB), diese weisen einen Totlast-Anteil von nur 24 % auf.

Ein weiteres, vor allem für den Bahnbetrieb (siehe Abschnitt 4.3) wichtiges Kriterium ist die Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge. Diese liegt beispielsweise bei den Güterwagen der Gattung *Glm* der Steiermarkbahn bei 60 km/h (Steiermarkbahn Transport und Logistik o. D.[a]), die mit Rungenaufbauten versehenen Rollwagen der Zillertalbahn verkehren mit 50 km/h (Obholzer, Interview vom 7.11.2022). Ein wesentlicher Faktor für die Beschränkung der Geschwindigkeit von Güterwagen ist das Bremssystem, das in der Lage sein muss, mit den beladungsabhängig unterschiedlichen Achslasten der Wagen umzugehen (Berndt 2001). Scheibenbremsen ermöglichen beispielsweise höhere Bremsleistungen als die bei Güterwagen verbreiteten Klotzbremsen. Im Bereich der Güterwagen war zudem bis in die 1930er aus technischen Gründen die Saugluftbremse, bei der mit Drücken unter 1 bar gearbeitet wird, vorherrschend. Später setzt sich die Druckluftbremse, die mit Drücken über 1 bar arbeitet, durch (Ihme 2019). Bei Güter- und Personenwagen vieler Schmalspurbahnen blieb allerdings bis heute die Saugluftbremse vorherrschend, so teilweise auch in Österreich. Saugluftbremsen haben im Vergleich zu Druckluftbremsen den Nachteil, dass sie einen geringeren Regelbereich aufweisen und träger sind (Simmering-Graz-Pauker AG 1988). Schmalspurfahrzeuge müssen zudem eine ausreichende Entgleisungssicherheit aufweisen. Im Vorfeld der Einführung der neuen Holzwagen der Zillertalbahn wurden beispielsweise Kippversuche durchgeführt (Obholzer, Interview vom 7.11.2022).

4.2.3 Rollfahrzeuge

Wie bereits in Abschnitt 1.6.1 ausgeführt, können auf Schmalspurbahnen neben eigenen Güterwagen auch Rollböcke bzw. Rollwagen eingesetzt werden. Dabei werden normalspurige Güterwagen auf Schmalspurfahrzeuge verladen. Wie aus Abbildung 4.8 erkennbar ist, nehmen Rollböcke einzelne Achsen des normalspurigen Wagens auf, während Rollwagen den gesamten zweiachsigen Wagen bzw. ein Drehgestell eines vierachsigen Wagens aufnehmen.

Rollbockverkehr



Rollwagenverkehr

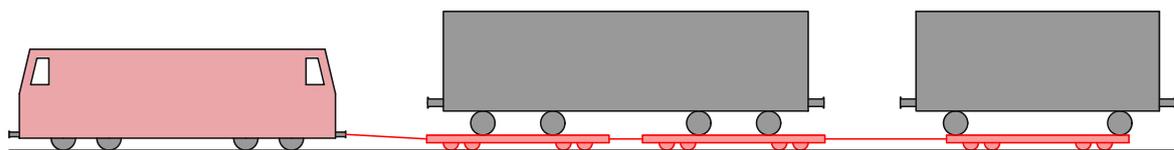


Abb. 4.8: Schematische Darstellung von Rollböcken (oben) und Rollwagen (unten). Eigene Darstellung nach Gottraux (2012), online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_rollbocks_trucks.PNG [Abruf am 12.11.2022]

4.2.3.1 Rollböcke

Bei Rollböcken, auch Rollschemel genannt, handelt es sich um niedrige Wagen mit kurzem Achsstand, die jeweils ein Rad des normalspurigen Fahrzeugs aufnehmen. Bei den ältesten im deutschsprachigen Raum verwendeten Rollböcken vom System *Langbein* befindet sich am Rollbock ein um einen Zapfen drehbarer Querbalken, der die Räder des normalspurigen Wagens aufnimmt. Die Lagesicherung erfolgt über Gabeln, die die Achse des normalspurigen Radsatzes aufnehmen. Eine Kupplung der Rollböcke untereinander erfolgt mit Kuppelstangen. Die Radsätze wurden gegen Abheben mit Befestigungsklauen an der Innenseite der Räder fixiert (Röll 1917). Modernere Rollböcke des Typs Langbein wurden beispielsweise bis 2012 von der ehemaligen⁷ Wynental- und Suhrentalbahn (WSB) in der Schweiz eingesetzt. Die 1957 und 1973 beschafften Rollböcke hatten eine Eigenmasse von 4,2 Tonnen und eine Tragkraft von 20 Tonnen. Dadurch, dass die Kuppelstange mit einer Druckluftleitung ausgerüstet war, konnten die Rollböcke auch gebremst werden (Ringseisen 2013). Anders als bei der WSB waren die von den ÖBB bis 1984 verwendeten Rollböcke nicht gebremst und es musste immer ein Hilfsbremswagen mitgeführt werden (O. Knoll 1985).

1974 entwickelte die Schweizer Maschinenfabrik *Ateliers de constructions mécaniques de Vevey* (ACMV) gemeinsam mit der *Chemin de fer Yverdon–Ste-Croix* (YStC) Rollböcke vom System Vevey. Anders als beim System Langbein werden die Normalspurwagen nicht über hochklappbare Gabeln fixiert, sondern mit Bolzen, die in den Radrücken greifen während das Rad auf einem mit einer Mulde vertieften Querträger steht. Ein wesentlicher Vorteil von Rollböcken vom System Vevey ist das weitgehend automatisierte Auf- und Abschemeln der Normalspurfahrzeuge. Die Rollböcke des Systems Vevey sind mit Bremsen ausgerüstet, allerdings muss dafür extra ein Bremsschlauch zwischen die Rollböcke gelegt werden. Bei ausreichender Bremsmasse des Triebfahrzeugs können Rollböcke des Systems Vevey ungebremst zum Einsatz kommen. Die einzelnen Rollböcke haben ein Eigengewicht von 1,65 t bis 1,8 t und eine Tragfähigkeit von 22 t (Ringseisen 2013). Die Zillertalbahn überlegte im Jahr 2005 die Einführung des Systems Vevey, allerdings wurde laut Obholzer (Interview vom 7.11.2022) diese Idee aufgrund der hohen Kosten des Systems, bei dem auch zwei neue Rollbockgruben gebaut werden sollten, wieder verworfen.

Beim Verkehr mit Rollböcken bleiben die Normalspurfahrzeuge gekuppelt, das führende Schmalspurfahrzeug ist üblicherweise mit einer Schraubenkupplung auf Höhe der aufgebockten Wagen ausgerüstet. Bei manchen Bauarten von Rollböcken ist auch der Einsatz einer Kuppelstange zwischen Triebfahrzeug und erstem Rollbock möglich. Alternativ können Pufferwagen zum Einsatz kommen. Diese besitzen Zug- und Stoßvorrichtungen sowohl für Schmalspur- als auch für Normalspurfahrzeuge (Ringseisen 2013).

Im Vergleich zu Rollwagen (siehe unten) haben Rollböcke den Vorteil, dass sie leichter als Rollwagen sind und so weniger Totmasse mitgeführt werden muss. Außerdem sitzt der Normalspurwagen tiefer auf, womit einerseits ein kleineres Lichtraumprofil eingehalten werden kann sowie andererseits der Schwerpunkt tiefer liegt und somit nach Ringseisen höhere Geschwindigkeiten realisierbar sind. Gleichzeitig besitzen Rollböcke allerdings den Nachteil, dass aufgrund des begrenzten Raums die Installation einer Bremsanlage wesentlich schwieriger ist (Ringseisen 2013).

⁷Seit 2018 Teil der Aargau Verkehr AG.

4.2.3.2 Rollwagen

Eine Weiterentwicklung von Rollböcken stellen Rollwagen dar. Hier handelt es sich um niedrige Flachwagen mit zwei- oder dreiachsigen Drehgestellen, auf denen Schienen montiert sind. Diese Schienen nehmen die Räder der Normalspurwagen auf (Österreichisches Institut für Raumplanung 1980). Bei den Waldviertler Schmalspurbahnen wurden beispielsweise erstmals Rollwagen im Jahr 1943 von der Deutschen Reichsbahn beschafft. Erst ab 1984 wurden von den ÖBB für ihre Schmalspurbahnen moderne Rollwagen vom System Jenbacher beschafft (Marek 1989). Diese gebremsten Wagen ersetzen u.a. die ungebremsten Rollböcke auf der Mariazellerbahn (O. Knoll 1985).

Konstruktiv bestehen die Rollwagen System Jenbacher aus einem Außenrahmen, der gleichzeitig als Aufnahme für die Räder des normalspurigen Fahrzeuges dient und sich auf zwei dreiachsige Drehgestelle stützt. Auf einen Rollwagen mit rund 9,5 m Länge kann ein (kurzes) zweiachsiges Fahrzeug geladen werden, bei vierachsigen Fahrzeugen sind zwei Rollwagen notwendig (siehe Abb. 4.9). Bei einer Eigenmasse von 9,3 t können 45 t zugeladen werden (Schneider und Seelmann 1986). Nach dem Aufladen des Normalspurwagens wird dieser mittels Radvorlegern und Ketten fixiert. Bei Normalspurwagen mit zwei Drehgestellen wird nur ein Drehgestell fixiert, damit der Wagen in Bögen genügend Längsspiel hat. In diesem Fall wird das zweite Drehgestell nur gegen Entrollen mit Radvorlegern gesichert (Ringseisen 2013).

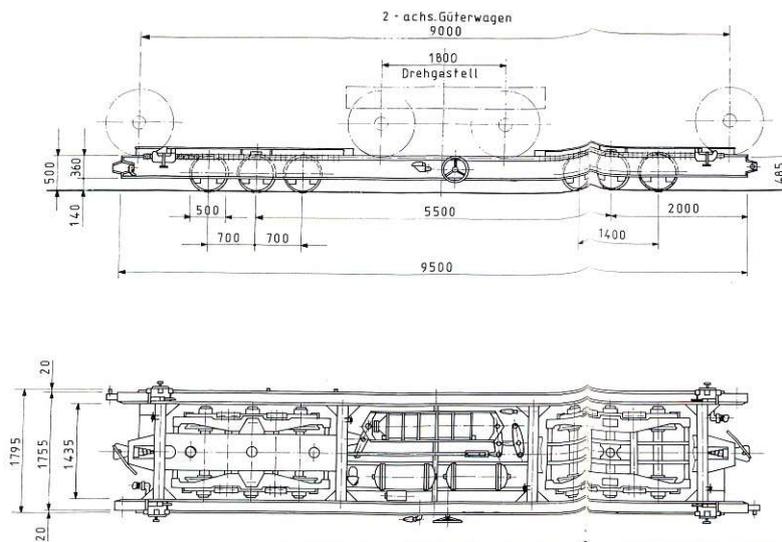


Abb. 4.9: Typenskizze der sechssachsigen ÖBB-Rollwagen WW/s 89700 bis 89729 (Schneider und Seelmann 1986)

Die Rollwagen System Jenbacher wurden auch von der Zillertalbahn beschafft, wo sie bis heute im Einsatz sind. Eine Kupplung zwischen den Rollwagen und der Lokomotive bzw. anderen Wagons erfolgt in der Regel mit Kuppelstangen, die auch die Bremsleitungen aufnehmen (Ringseisen 2013). Um das Beladen der Rollwagen vereinfachen zu können, setzt die Zillertalbahn eine fixe Garnitur aus sechs Rollwagen ein. Auf diesen können zwei vierachsige Normalspurwagen transportiert werden, der zweite und fünfte Rollwagen dienen nur der Be- bzw. Entladung und laufen leer mit. Somit kann auf das mühsame Einsetzen der schweren Kuppelstangen nach dem Beladen der Rollwagen verzichtet werden (Petrovitsch 2022).

4.3 Betrieb und Fahrplangestaltung

4.3.1 Rechtlicher Rahmen des Betriebs auf Schmalspurbahnen

Der Betrieb auf Eisenbahnstrecken ist in Europa stark nach nationalen Regeln orientiert (Pachl 2019). In Österreich wird der Betrieb auf Haupt- und Nebenbahnen von der, auf Basis des Eisenbahngesetzes erlassenen, *Eisenbahnverordnung* (EisbVO, BGBl. II Nr. 209/2003) normiert. Als Betrieb gilt nach § 2 Abs. 2 EisbVO „die Gesamtheit aller Handlungen und Vorgänge, die der Beförderung von Personen und Gütern durch Bewegung der Fahrbetriebsmittel dienen oder diese zumindest unmittelbar vorbereiten, sichern oder abschließen, einschließlich der Ausbildung der Betriebsbediensteten.“ Die EisbVO regelt Pflichten von Eisenbahnunternehmen, wie die Verpflichtung, Dienstvorschriften zu erstellen. Folglich galt beispielsweise auf ÖBB-Schmalspurbahnen die Dienstvorschrift *V 7 – Betrieb auf Schmalspurbahnen*. Diese ergänzte die für Normalspurbahnen geltenden Dienstvorschriften *V 2 – Signalvorschrift* und *V 3 – Betriebsvorschrift* (ÖBB 1989).

In Deutschland erstellen Bahnbetreiber:innen auf Basis der Rechtsvorschriften betriebliche Regelwerke. In Deutschland werden diese Rechtsvorschriften in der *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung* (EBO), Neufassung vom 8. Mai 1967 (dBGBl. II S. 1536), letzte Änderung durch Art. 2 VO vom 5. April 2019 (dBGBl. I S. 479), festgehalten. Zusätzlich gilt für Schmalspurbahnen die bereits in Abschnitt 3.1.1 erwähnte *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen* (ESBO). Anders ist die Situation in der Schweiz. Hier gibt das Bundesamt für Verkehr (BAV) die *Schweizerischen Fahrdienstvorschriften* (FDV) heraus. Die FDV regelt sowohl Betriebs- als auch Signalvorschriften für alle Schweizer Bahnen. Notwendige Ausführungsbestimmungen, Abweichungen und Erläuterungen zur FDV sind von den Eisenbahnunternehmen in Betriebsvorschriften festzulegen (BAV 2020b).

4.3.2 Fahrten von Güterzügen

4.3.2.1 Zusammenstellung der Züge

Um Zugfahrten überhaupt durchführen zu können, müssen Züge aus einzelnen Fahrzeugen (Wagons und Triebfahrzeuge) zusammengestellt werden. Diese Fahrzeuge müssen den Anforderungen des transportierten Guts entsprechen. Die grundlegenden Anforderungen an Schmalspurfahrzeuge wurden bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben. Für die Reihung der Fahrzeuge können unter Umständen Beschränkungen vorgeschrieben sein. Beispielsweise betraf dies auf ÖBB-Schmalspurstrecken laut DV V 7 *Betrieb auf Schmalspurbahnen* manche Strecken aufgrund der beschränkten Meterlast. Außerdem durften pro Zug nur maximal zwei Normalspur-Drehgestellwagen auf Rollwagen transportiert werden, wenn diese Rollwagen nur durch den aufgesetzten Wagen verbunden waren (ÖBB 1989). In Deutschland dürfen beispielsweise laut § 35 Abs. 6 ESBO in einem Zug bis zu einer Neigung von 10 ‰ bis zu acht ungebremste Rollfahrzeuggradsätze mit höchstens 60 t Gesamtgewicht mitlaufen, während in der Schweiz grundsätzlich der erste und letzte Wagen eines Zuges gebremst sein muss (BAV 2020b).

4.3.2.2 Fahrdynamik

Die Fahrdynamik einer Zugfahrt hat einen großen Einfluss auf zeitliche Abläufe, wie das Beschleunigen oder das Bremsen der Züge. Betrieblich betrifft das beispielsweise die Fahrzeitberechnung bei Fahrplanerstellung, die benötigten Energiemengen für eine Zugfahrt, Bremsweg- oder Grenzlastberechnungen (Poetsch 2016). Mechanisch kann die Fahrdynamik in Längsrichtung durch das Kräftegleichgewicht $\sum F = 0$ ausgedrückt werden. Je nach Phase der Fahrt gehen in dieses Gleichgewicht Kräfte zur Aufrechterhaltung und beabsichtigten Änderung des Bewegungszu-

standes sowie Kräfte, die sich der Aufrechterhaltung bzw. Änderung des Bewegungszustandes widersetzen, ein (Pachl 2021).

Beim Anfahren des Zuges wird die Zugkraft durch die Summe der Widerstandskräfte verringert. Diese ergeben sich im Moment des Anfahrens vor allem aus dem Anfahrwiderstand und dem Neigungswiderstand. Ersterer ergibt sich, weil im Moment des Bewegungsbeginns der am Lagerring haftende Wälzkörper des Achslagers losgebrochen werden muss. Die Zugmasse, die bei einer gegebenen Steigung noch sicher angefahren werden kann, wird als *Anfahrrenzmasse* bezeichnet und ergibt sich nach Pachl (2021) aus der Anfahrzugkraft F , der Masse der Lokomotive m_L , dem Neigungsverhältnis $i = \tan \alpha$, der Gravitation g sowie aus dem spezifischen Anfahrwiderstand f_{WA} :

$$m_A = \frac{F - m_L \cdot g \cdot i}{g \cdot (i + f_{WA})} \quad (4.3)$$

Neben der Fahrdynamik wird die Anfahrrenzmasse auch von fahrzeugseitigen Faktoren, wie der Festigkeit der Zugeinrichtung, beeinflusst (Poetsch 2016). Auf der Mariazellerbahn galt beispielsweise, dass auf der Steilstrecke von Gußwerk bis Mariazell von einer Elektrolokomotive der Reihe *ÖBB 1099* 120 t bergauf transportiert werden konnten, während es in die Gegenrichtung 250 t waren (Felsing 2002). Im Fahrzustand wird die vom Zug maximal überwindbare Steigung in Abhängigkeit von der Anhängemasse sowie der Fahrgeschwindigkeit von einem *Steigungs-Geschwindigkeitsdiagramm* dargestellt (Pachl 2021).

Während der Fahrt wirken vor allem Widerstandskräfte, die sich aus Längsneigung (siehe Abschnitt 3.2), Bogenwiderstand (siehe Abschnitt 3.1.2), Rollwiderstand, Lagerreibungswiderstand, Triebwerkswiderstand, Luftwiderstand sowie dynamischen Widerständen ergeben. Um die Fahrgeschwindigkeit des Zuges zu verringern bzw. den Zug zum Halt zu bringen ist der Einsatz von Bremsen notwendig. Im Bereich des Güterverkehrs kommen in der Regel reibungsbehaftete Bremsen, wie Klotzbremsen, zum Einsatz. Die Bremsleistung von reibungsbehafteten Bremsen ist vom Kraftschluss zwischen Rad und Schiene abhängig. Dieser wird wiederum u.a. von Witterungsbedingungen und Verunreinigungen beeinflusst. Allgemein werden im Zugverband durchgehende Bremsen eingesetzt, d.h. diese wirken sowohl auf das Triebfahrzeug als auch auf die Waggons und können von einer Stelle im Zug aus betätigt werden. Während im Normalspurbereich inzwischen Druckluftbremsen zum Einsatz kommen, finden sich bei Schmalspurbahnen noch immer Saugluftbremsen, so auch in Österreich (siehe Abschnitt 4.2.2). Damit der Zug sicher den maximalen Bremsweg einhalten kann, ist es notwendig, das Bremsvermögen eines Zuges zu kennen. Die Bremsleistung wird im Eisenbahnwesen angelehnt an das physikalische Gesetz „Verzögerung = Bremskraft / Masse“ als dimensionslose *Bremshundertstel* λ dargestellt (Gräber 2016).

Diese Bremshundertstel berechnen sich als Quotient aus *Bremsgewichten* B und Masse m der Fahrzeuge. Die Bremsgewichte ergeben sich dabei aus der Normierung „Bremskraft / Musterverzögerung“ und ermöglichen somit eine dimensionslose Angabe der Bremshundertstel. Der zeitliche Verlauf des Bremsdrucks am Bremszylinder kann zudem oft durch Einstellungen am Waggon beeinflusst werden (Gräber 2016). Da die Bremshundertstel masseabhängig sind, kann bei Güterwagen in der Regel auch zwischen Bremsgewichten für den beladenen und unbeladenen Zustand des Wagens umgestellt werden (Ihme 2019). Auf Schmalspurstrecken der ÖBB war laut DV V 7 vorgeschrieben, die Bremse bei leeren Rollwagen überhaupt auszuschalten (ÖBB 1989).

4.3.2.3 Höchstgeschwindigkeiten

Die vom Zug fahrbare Höchstgeschwindigkeit wird sowohl seitens der Fahrzeuge als auch der Infrastruktur bestimmt. Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, hat die Trassierung, allen voran die Bogenradien, einen Einfluss auf die Höchstgeschwindigkeit der Züge. Allgemein liegen auf Schmalspurbahnen die Höchstgeschwindigkeiten von Güterzügen durch die höhere Lage des Schwerpunkts unter jenen von Personenzügen (siehe dazu auch Abschnitt 3.1.2). Für den Rollwagenverkehr gelten noch strengere Geschwindigkeitsbegrenzungen.

In der DV V 7 war für ÖBB-Schmalspurstrecken vorgeschrieben, dass beladene Rollwagen maximal mit 40 km/h und leere Rollwagen mit maximal 50 km/h transportiert werden dürfen. Für Streckenabschnitte mit Bogenradien unter 100 m galt für beladene Rollwagen eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 30 km/h (ÖBB 1989). Auf der Zillertalbahn gilt eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 40 km/h für Rollwagen und von 50 km/h für Güterzüge, während der Personenverkehr mit bis zu 70 km/h verkehrt (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022). In Deutschland liegen die Höchstgeschwindigkeiten nach § 40 ESBO für Züge mit durchgehender Bremse bei 80 km/h bei einer Spurweite von 1000 mm bzw. bei 60 km/h für eine Spurweite von 750 mm. Züge mit Rollfahrzeugen dürfen überhaupt nur mit einer Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h (1000 mm) bzw. 20 km/h (750 mm) verkehren. In der Schweiz wird für Normal- und Schmalspurbahnen das System der *Zugreihen*, angewandt. Für jede Zugreihe gelten auf der Strecke unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten und jeder verkehrende Zug wird einer Zugreihe zugeordnet (BAV 2020b). Die in der Schweiz eingesetzten Rollböcke des Typs Vevey haben mit 60 km/h eine höhere Höchstgeschwindigkeit als die in Österreich eingesetzten Rollwagen des Typs Jenbacher (Ringseisen 2013).

Neben den aus den Bogenradien und der Konstruktion der Fahrzeuge resultierenden Höchstgeschwindigkeiten werden die auf der Strecke fahrbaren Geschwindigkeiten auch durch das Bremsvermögen des Zuges beeinflusst. Die Höchstgeschwindigkeit darf im Allgemeinen nur so groß sein, dass jederzeit ein sicheres Anhalten des Zuges möglich ist, vor allem vor Signalen. Aus diesem Grund werden für alle Strecken vom Vorsignalabstand, den Neigungsverhältnissen und der Höchstgeschwindigkeit abhängige Bremsleistung (siehe oben) in Bremsstufen angegeben (Gräber 2016). Reichen die am Zug vorhandenen Bremsleistung nicht aus, so muss die Höchstgeschwindigkeit verringert werden (Ihme 2019). Bei der Zillertalbahn ist die beschränkte Bremsleistung u.a. der Grund für die Beschränkung der Geschwindigkeit von Güterzügen auf 50 km/h (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022). In der Schweiz werden zusätzlich zu den bereits erwähnten *Zugreihen* auch *Bremsreihen* festgelegt. Für jede Zugfahrt gilt eine Kombination aus Zug- und Bremsreihe (BAV 2020b). Zudem hat die Steigung einen Einfluss auf die tatsächlich fahrbare Geschwindigkeit. Abhängig von der Leistung des Triebfahrzeuges und der Anhängelast sind eventuell nur verringerte Geschwindigkeiten möglich (Pachl 2021).

4.3.3 Betriebssteuerung

In den meisten europäischen Ländern werden Fahrten auf einer Eisenbahninfrastruktur in Zug- und Rangierfahrten (in Österreich *Verschubfahrten*) unterschieden. Während mit Zugfahrten der eigentliche Transportprozess stattfindet, dient das Rangieren dem Bilden und Zerlegen von Zügen sowie der Bedienung von Anschlussgleisen. Jede Zugfahrt findet nach einem Fahrplan (siehe Abschnitt 4.3.4) statt und wird von einer:m Fahrdienstleiter:in überwacht (Pachl 2019). Da der Bremsweg des Zuges die Sichtweite des:r Triebfahrzeugführer:in übersteigt, sind Verfahren zur Abstandshaltung zwischen den Fahrzeugen notwendig. Hier hat sich das Prinzip des Fahrens im festen Raumabstand durchgesetzt. In der Regel werden die Strecken deshalb in Streckenblöcke

eingeteilt, wobei ein Zug nur in den Streckenblock einfahren darf, wenn dieser nicht von einem anderen Zug belegt ist (Pachl 2021).

Die Überwachung der Zugfahrt kann dabei mit oder ohne technische Sicherung erfolgen. Bei Überwachungsverfahren ohne technische Sicherung wird zwischen örtlichen und zentralen Fahrdienstleitungen unterschieden. Bei ersteren überwacht ein:e Fahrdienstleiter:in durch Beobachtung der an ihr:ihm vorbeifahrenden Züge das Freisein des Streckenabschnitts, während bei zweiterem das Zugpersonal und Personal entlang der Strecke einem:r Zugleiter:in fernmündlich Fahrmeldungen überträgt, womit die:der Zugleiter:in immer einen Überblick darüber behält, wo sich die Züge auf der Strecke gerade befinden (Zugleitbetrieb). Aufgrund der Fehleranfälligkeit der beschriebenen Verfahren wurden auf vielen Strecken technische Sicherungsverfahren eingeführt, bei denen einerseits das Freisein eines Streckenblocks durch streckenseitige Einrichtungen (wie z.B. Achszähler) überwacht und andererseits durch technische Abhängigkeit zwischen den Blöcken ein Gegenfahr- und Folgefahrerschutz hergestellt wird (Pachl 2021).

Da eine technische Sicherung der Zugfolge hohe Kosten verursacht, werden auf Regionalbahnen und so auch auf vielen Schmalspurbahnen noch immer Überwachungsverfahren ohne technische Sicherung, meist in Form des Zugleitbetriebs, eingesetzt. Um den Zugleitbetrieb trotzdem sicherer gestalten zu können, wurden Verfahren zur satellitengestützten Sicherung der Zugfolge entwickelt. Hierbei wird die aktuelle Position der Züge durch satellitengestützte Ortung festgestellt und an den:die Fahrdienstleiter:in gemeldet. Solche Systeme können die Fahrerlaubnisgrenzen überwachen, indem bei Überschreitung dieser eine Zwangsbremmung ausgelöst wird (Pachl 2021). Auf Schmalspurbahnen in Österreich kommen solche Systeme beispielsweise bei Stern & Hafferl (Stadlmann und Zwirchmayr 2004) oder auf der Pinzgauer Lokalbahn (Stadlmann, F. Kaiser et al. 2012) zum Einsatz. Auch die Zillertalbahn und die NÖVOG nutzen derartige Systeme (Obholzer und Schreiner, Interview am 7.11.2022). Auf der Murtalbahnen wird die Einführung eines Zugsicherungssystems, das jenem auf der Pinzgauer Lokalbahn entspricht, zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit vorbereitet (Gößler, Interview vom 16.1.2023).

Die Sicherung der Zugfolge basiert auf Fahrstraßen, bei denen alle beweglichen Fahrweegelemente (z.B. Weichen) in die richtige Lage gebracht und gesichert werden. Fahrweegelemente können ortsgestellt sein oder von Stellwerken aus gestellt werden. Traditionell war die Betriebssteuerung der europäischen Eisenbahnen durch dezentrale Fahrdienstleitungen gekennzeichnet, die jeweils für einen Steuerbereich verantwortlich waren und die Bedienung des Stellwerks für diesen übernahmen. Über diesen war in der Regel eine Betriebsleitstelle angeordnet, welche die Regelung der Zugfolge (z.B. Verlegungen von Kreuzungen im Verspätungsfall) übernahm. Durch den hohen Personalaufwand dieser Art der Betriebssteuerung gehen die Eisenbahninfrastrukturunternehmen zunehmend dazu über, die Betriebssteuerung zu zentralisieren. Dabei übernimmt eine zentrale Stelle nicht nur die Disposition der Züge, sondern auch das Stellen der Fahrwege für diese in einem definierten geografischen Bereich. Als Alternative zur Fernbedienung der Weichen durch ein zentrales Stellwerk kann auf Strecken mit geringer Betriebsdichte das Zugpersonal von der Fahrdienstleitung beauftragt werden, das lokale Stellwerk zu bedienen (Pachl 2021). Neben der Orts- und Fernbedienung von Weichen können in Kreuzungsbahnhöfen Rückfallweichen zum Einsatz kommen. Diese werden beim stumpfen Befahren durch das erste Rad des Zuges umgelegt und kehren später selbständig wieder in ihre Endlage zurück. Falls die Weiche nicht in Grundstellung befahren werden soll, kann sie mechanisch ortsbedient gestellt werden (Maschek 2015). Auf Schmalspurbahnen in Österreich finden sich unterschiedliche Ausprägungen der zentralisierten Betriebssteuerung. Die Zillertalbahn steuert alle Fahrweegelemente von einer zentralen Betriebsführungszentrale (BFZ) aus (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022), auf der Mariazellerbahn steuert die BFZ die Stellwerke zweier Bahnhöfe fern (Niederösterreich Bahnen 2020). Im Gegensatz dazu beschränkt sich die Pinzgauer Lokalbahn auf die zentrale Disposition, während Rückfallweichen und handbetriebene Weichen zum Einsatz kommen (Stadlmann, F.

Kaiser et al. 2012). Auf der Murtalbahn ist nur der Bahnhof Murau besetzt, in allen anderen Betriebsstellen mit Weichen kommen entweder Rückfallweichen oder mechanische Perronstellwerke, die beispielsweise von Verschieber:innen gestellt werden können, zum Einsatz (Gößler, Interview vom 16.1.2023).

4.3.4 Fahrplangestaltung

Wie bereits beschrieben, findet jede Zugfahrt nach einem Fahrplan statt. Dieser beschreibt nicht nur die zeitliche, sondern auch die räumliche Belegung der Infrastruktur. Grundsätzlich muss ein Fahrplan für jeden Zug die Informationen Zugnummer, Verkehrstage, Laufweg, Ankunfts-, Abfahr- und Durchfahrtszeiten in den Betriebsstellen sowie die zulässigen Geschwindigkeiten in den einzelnen Abschnitten des Laufwegs enthalten (Pachl 2021). Zusätzlich werden für einen Zug das erforderliche Bremsvermögen, die Wagenreihung sowie die Last festgelegt. Infrastrukturseitig werden Fahrpläne aufgrund der Übersichtlichkeit als Bildfahrpläne erstellt. Davon werden andere Darstellungsformen, wie der Fahrplanaushang für Reisende, Datensätze für elektronische Fahrplanauskünfte oder der Buchfahrplan für die:den Triebfahrzeugführer:in abgeleitet (W. Weigend 2016).

Da der Fahrplan das Angebot des Verkehrsträgers Schiene widerspiegelt, ist die Erstellung von Fahrplänen immer auch Angebotsplanung. Neben wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten herrscht hierbei eine Zeitabhängigkeit, im Güterverkehr beispielsweise von Produktionsprozessen der belieferten Unternehmen. Im Vergleich zum Personenverkehr kommt es im Güterverkehr zu einer stärkeren Schwankung der Transportnachfrage, was dazu führt, dass ein Teil der Güterzüge nur verkehrt wenn eine entsprechende Nachfrage vorliegt. Trotzdem müssen für diese Züge Fahrplantrassen im Jahresfahrplan vorgehalten werden (W. Weigend 2016).

Bei vielen Bahnen in Deutschland, Österreich und der Schweiz wurde in den letzten Jahrzehnten dazu übergegangen, Taktfahrpläne anzubieten, so auch auf allen in Österreich im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) aktiven Schmalspurbahnen. Auf der Murtalbahn ist das ein Zweistundentakt (Steiermarkbahn und Bus 2022b), auf der Mariazellerbahn (Niederösterreich Bahnen 2022b) und der Atterseebahn (OÖVV 2022) verkehren die Züge Montag bis Freitag im Stundentakt, auf der Citybahn Waidhofen (Niederösterreich Bahnen 2022a), der Pinzgauer Lokalbahn (Salzburg Verkehr und Salzburg AG 2022) und der Zillertalbahn (Zillertaler Verkehrsbetriebe 2022) sogar im Halbstundentakt. Taktfahrpläne haben für Fahrgäste Vorteile, wie eine leichte Merkbarkeit und eine hohe Verfügbarkeit des Verkehrsmittels (W. Weigend 2016). Gleichzeitig führt ein Taktfahrplan im Personenverkehr allerdings dazu, dass sich der Güterverkehr nach der nicht vom Personenverkehr belegten Fahrwegskapazität richten muss. Die Zillertalbahn hat deshalb beispielsweise fixe Slots zwischen den Personenzügen eingerichtet, die bei Bedarf mit Güterzügen belegt werden (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022).

4.3.5 Anforderungen an die Infrastruktur

Aus den in diesem Abschnitt bereits erwähnten betrieblichen Rahmenbedingungen ergeben sich diverse Anforderungen an die Infrastruktur. Abseits von Neigungsverhältnissen und Bogenradien, welche die Höchstgeschwindigkeit der Strecke beeinflussen, hat die allgemeine Streckengestaltung einen Einfluss auf das mögliche Betriebsprogramm und somit auch auf Kapazitäten für den Güterverkehr auf einer Strecke. Das betrifft beispielsweise die Anzahl an Streckengleisen und den Abstand von Betriebsstellen, die eine Änderung der Zugfolge ermöglichen (Fengler 2016). In Europa sind die meisten Schmalspurbahnen eingleisig angelegt. Dies erfordert, dass sich zwei in zueinander entgegengesetzte Richtungen bewegend Züge *kreuzen*, also begegnen, können. Eine besondere Bedeutung bekommt das Kreuzen von Zügen bei Taktfahrplänen. Hier findet

die Kreuzung immer zur halben Taktzeit statt, womit auf eingleisigen Strecken Zwangspunkte entstehen (Pachl 2021).

Doch auch der Güterverkehr, der in der Regel nicht nach einem Taktfahrplan verkehrt, muss den Personenverkehr kreuzen können. Dafür müssen geeignete Kreuzungsbahnhöfe vorgesehen werden. Außerdem müssen unter Umständen in diesen Bahnhöfen Überholungen von langsameren Güterzügen durch schnellere Personenzüge möglich sein. In diesen Bahnhöfen muss die Nutzlänge der Gleise ausreichend sein, um Kreuzungen und Überholungen durchführen zu können. Die Mindest-Nutzlänge ergibt sich dabei aus der zulässigen Wagenzuglänge und einem Zuschlag für ungenaues Halten (Freystein et al. 2015). Die Kreuzungsbahnhöfe entlang der Zillertalbahn sind beispielsweise so gestaltet, dass Güterzüge mit bis zu 14 Wagen kreuzen können, auch wenn in der Praxis aktuell Züge mit acht Wagen verkehren (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022)

Maßgebend für die Stabilität eines Fahrplanes ist es, dass eingetretene Verspätungen wieder abgebaut werden können. Taktfahrpläne sind durch ihr starres Konzept hierbei besonders gefährdet, dass sich die Verspätung eines Zuges auf einen anderen überträgt. Auf eingleisigen Strecken müssen deshalb im Verspätungsfall planmäßige Kreuzungen auf andere Kreuzungsbahnhöfe verlegbar sein (Pachl 2021). Um dies realisieren zu können müssen auf einer Strecke ausreichend Kreuzungsbahnhöfe vorhanden und diese entweder mit ferngestellten Weichen oder Rückfallweichen ausgestattet sein (siehe Abschnitt 4.3.3). Müssen die Weichen erst vom Zugpersonal vor Ort gestellt werden, kann eine weitere Verzögerung im Betriebsablauf eintreten (Jochim und Lademann 2018). Idealerweise sollte die Infrastruktur eines Kreuzungsbahnhofes eine gleichzeitige Einfahrt aus beiden Richtungen ermöglichen (Pachl 2021). Grundsätzlich können Strecken auch zweigleisig angelegt werden, womit die Notwendigkeit der Zugkreuzungen entfällt und die Durchlässigkeit der Strecke etwa um den Faktor drei steigt (Fengler 2016). Doch ein zweigleisiger Ausbau ist mit hohen Kosten verbunden, weshalb weniger stark belastete Strecken oft nur teilweise zweigleisig ausgebaut werden. Ein zweigleisiger Begegnungsabschnitt zwischen zwei Kreuzungsbahnhöfen erhöht dabei die Fahrplanstabilität stark, da Kreuzungen *fliegend*, also ohne Anhalten der Züge zwischen den Betriebsstellen, stattfinden können und eine betriebliche Flexibilität geschaffen werden kann, da die Kreuzung nicht zwingend im Bahnhof stattfinden muss (Pachl 2021). Wie aus dem online-Eisenbahnatlas openrailwaymap.org erkennbar ist, sind Schmalspurbahnen in Europa nur selten zweigleisig ausgebaut. Ein Beispiel für zweigleisige Meterspurbahnen sind die Rhätische Bahn zwischen Chur und Reichenau-Tamins oder die Meterspurbahn Andana – Martorell – Barcelona. Mit Begegnungsabschnitten ist beispielsweise die Zillertalbahn ausgestattet.

Die Möglichkeiten Güterverkehr anzubieten können durch die Leistungsfähigkeit einer Strecke eingeschränkt sein. Auf der Zillertalbahn bringt der Halbstundentakt im Personenverkehr mit vereinzelt eingelegten Güterzügen die Strecke im Bereich Strass bereits an die Kapazitätsgrenze (Schreiner, Interview vom 7.11.2022). Als Leistungsfähigkeit wird der maximale Durchlass eines Verkehrsweges in Beförderungselementen je Zeiteinheit (z.B. Züge/h) bezeichnet. Die Leistungsfähigkeit ergibt sich im Allgemeinen aus der Länge der Blockabschnitte, der Höchstgeschwindigkeit der Züge, der Anfah- und Bremseigenschaften der Züge, der Zuglänge sowie der Haltezeit in den Stationen. Auf eingleisigen Strecken hat auch die Länge der eingleisigen Abschnitte sowie die Lage der Kreuzungsbahnhöfe einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Strecke (Fiedler und Scherz 2012). Neben dem kostenintensiven Ausbau der Infrastruktur kann die Leistungsfähigkeit einer Strecke durch Anpassung des Betriebsprogramms, beispielsweise eine zeitliche Entmischung von Personen- und Güterverkehr, oder durch die Verkürzung von Blockabschnitten, erhöht werden. Die wirkungsvollsten Maßnahmen sind allerdings bauliche Maßnahmen, wie die Beseitigung von Geschwindigkeitsbrüchen oder der Bau zusätzlicher Bahnhofs- und Streckengleise (Pachl 2021).

Kapitel 5

Beispiel Muraltbahn

5.1 Streckenbeschreibung

Mit einer Betriebslänge von 64 km bzw. mit einer Baulänge von 76 km ist die Muraltbahn die zweitlängste Schmalspurbahn Österreichs (siehe Tabelle 1.1). Angelegt in einer Spurweite von 760 mm („Bosnische Spurweite“) folgt sie zwischen Unzmarkt und Tamsweg dem Murtal, einem in etwa Ost-West verlaufenden Alpental, das im Bereich Tamsweg ins Lungauer Becken, einen alpinen Talkessel, mündet. Dabei beginnt die Bahn im steirischen Bezirk Murtal, durchquert den ebenfalls in der Steiermark liegenden Bezirk Murau und endet im Salzburger Bezirk Tamsweg. In den Bezirken Murau und Tamsweg leben aktuell rund 47.000 Menschen, wobei in beiden Bezirken für die kommenden Jahrzehnte ein Bevölkerungsrückgang prognostiziert wird (ÖROK 2021). Mit der Muraltbahn werden die Bezirkshauptorte Murau (3.400 Einwohner:innen) sowie Tamsweg (5.600 Einwohner:innen) an das Schienennetz angeschlossen.

5.1.1 Geschichte

In den 1880er begannen Diskussionen über den Anschluss des Bezirks Murau an die Rudolfsbahn Leoben – St. Michael in der Obersteiermark – St. Veit an der Glan. Aufgrund der hohen Kosten einer normalspurigen Lokalbahn wurde beschlossen, die Muraltbahn in einer Spurweite von 760 mm zu errichten. Nachdem die Bauarbeiten im August 1893 begonnen wurden, konnte die 76 km lange Strecke Unzmarkt – Mauterndorf bereits im Oktober 1894 eröffnet werden. Eine später geplante Verlängerung der Bahn um 12 km bis St. Michael im Lungau kam nie zustande (Wittmann 1994).

Nach dem Zweiten Weltkrieg begann eine Modernisierung der Strecke. Die zulässige Achslast wurde von 6,5 t auf 10 t und die Höchstgeschwindigkeit auf 70 km/h angehoben. Zudem haben die Steiermärkischen Landesbahnen (StLB) neue Fahrzeuge, wie moderne Diesellokomotiven und Güterwagen, beschafft. Trotzdem wurde 1973 der Personenverkehr zwischen Tamsweg und Mauterndorf eingestellt, 1981 auch der Güterverkehr (Tezak 1987). Heute wird dieser etwa 10 km lange Teil der Bahn als *Taurachbahn* vom Verein *Club 760* betrieben und ein touristischer Verkehr mit Dampfzügen angeboten (Taurachbahn Ges.m.b.H. o. D.).

In den 1980ern und 1990ern rationalisierten die Landesbahnen den Betrieb auf der Muraltbahn und beschafften die Dieseltriebwagen VT 31–35 mit Steuerwagen VS 41–44 (Neuhold 2014). 1985 begann auf der Muraltbahn der fernmündliche Zugleitbetrieb mit Zugleitbahnhof Murau, in weiterer Folge wurden in mehreren Betriebsstellen Rückfallweichen eingebaut. Außerdem erhielt der Bahnhof Unzmarkt in den 1980ern eine neue Umladeanlage mit Portalkran zum Umschlag zwischen Normal- und Schmalspur (Wittmann 1994). Neben dem Personenverkehr wurde auf der Muraltbahn immer auch Güterverkehr angeboten. War anfangs vor allem Holz ein wichtiges Transportgut (Tezak 1987), so ermöglichte in den 1970ern und 1980ern der Bestand von dutzenden Schmalspurgüterwagen unterschiedlicher Gattungen den Transport verschiedenster Güter (Slezak 1986). Noch in den 1990ern wurden zwischen 25.000 und 30.000 t Fracht jährlich transportiert,

der Großteil des Aufkommens entfiel dabei auf Holz, landwirtschaftliche Produkte, Brennstoffe und Mineralölzeugnisse (Wittmann 1994). Später ging das Güterverkehrsaufkommen allerdings stark zurück und es wurden zahlreiche Fahrzeuge für den Güterverkehr verkauft (Lassbacher 2015).

In den letzten Jahren kamen Diskussionen über die Zukunft der Murtalbahn auf (siehe auch Abschnitt 5.2). Infolge der Verlagerung des Nord-Süd-Verkehrs von der Rudolfsbahn auf die Koralmbahn wird befürchtet, dass sich die Erreichbarkeit des Bezirks Murau verschlechtern wird. So forderte eine von der Wirtschaftskammer beauftragte Studie die Umspurung der Murtalbahn im Abschnitt Unzmarkt – Murau auf Normalspur, um eine umsteigefreie Verbindung Richtung steirischen Zentralraum zu schaffen (Absenger 2016). 2018 sprach sich eine von der Landespolitik eingesetzte Steuerungsgruppe allerdings für die Beibehaltung der Schmalspur bei gleichzeitiger Anpassung des Fahrplanangebots der Murtalbahn auf den Fahrplan der Rudolfsbahn nach Eröffnung der Koralmbahn und die Beschaffung neuer Fahrzeuge aus, da diese Option nur einen Bruchteil der Kosten einer Umspurung verursacht (Land Steiermark 2018). Da keine Budgetmittel für eine Anpassung der Infrastruktur vorhanden sind, werden diese Überlegungen aktuell nicht weiter verfolgt (Göbler, Interview vom 16.1.2023). Ende 2021 wurden schließlich Investitionen zur Verlängerung der Lebensdauer der Fahrzeuge beschlossen, womit der Bestand der Murtalbahn für die nächsten Jahre gesichert scheint (Kleine Zeitung 2021).

5.1.2 Beschreibung der Infrastruktur

Die Murtalbahn beginnt im Bahnhof Unzmarkt an der ÖBB-Strecke Leoben – St. Michael – St. Veit an der Glan (Rudolfsbahn), wo sich neben dem von den Personenzügen der Murtalbahn benutzten Bahnsteig 21 auch Umladeanlagen für den Güterverkehr befinden. Den Bahnhof Unzmarkt verlässt die Bahn Richtung Süden parallel zu den Gleisen der ÖBB, welche sie nach etwa einem Kilometer im Bereich der Murbrücke der Rudolfsbahn unterquert, um am (flussaufwärts) rechten Ufer der Mur bleibend Richtung Südwesten zu schwenken. Die Bahn verläuft am Talboden des bis Murau breit ausgeformten Murtals. Am Rande der Ortschaft Teufenbach wechselt die Bahn auf das linke Flussufer der Mur. In der Bezirkshauptstadt Murau befindet sich das Betriebszentrum der Murtalbahn mit Fahrdienstleitung, Werkstätte, Bahnmeisterei und Remise. Im Bereich von Murau verengt sich das Murtal etwas und kurz nach dem Bahnhof Murau bei km 27,7 folgt mit dem 102 m langen Murauer Tunnel (Steiermärkische Landesbahnen 1994) der erste Tunnel der Strecke. Zwischen St. Lorenzen und Stadl verläuft die Bahn am unbesiedelten südlichen Ufer der Mur, während die Ortschaften auf der anderen Seite der Mur mit Brücken an die Haltestellen angebunden sind. Bei Predlitz wechselt die Bahn wieder auf das nördliche Ufer der Mur, um kurz nach dem Ort das Bundesland Salzburg zu erreichen. Bei Kendlbruck (km 52,3) und Ramingstein (km 56,1) befinden sich zwei weitere 34 bzw. 98 m lange Tunnel (Steiermärkische Landesbahnen 1994). Nach Madling verengt sich das Murtal und die Murtalbahn schwenkt der Mur folgend Richtung Norden, bevor sich das Murtal zu einem breiten Talbecken aufweitet und die Bezirkshauptstadt Tamsweg erreicht wird. Im Bereich der Verengung des Murtals setzt die Bahn auf das linke Ufer der Mur über, um kurz vor Tamsweg wieder auf das rechte Ufer zu wechseln. In Tamsweg endet aktuell der reguläre Verkehr auf der Murtalbahn. Ab Tamsweg folgt die Murtalbahn in einem weiten Tal der Taurach, weshalb dieser Abschnitt auch als *Taurachbahn* bezeichnet wird, bevor der Endpunkt der Bahn in Mauterndorf erreicht wird.

Im Fahrplanjahr 2023 weist die Murtalbahn auf der 64 km langen Strecke zwischen Unzmarkt und Tamsweg 34 Haltepunkte auf (Steiermarkbahn und Bus 2022b). Wie in Tabelle 5.1 dargestellt, sind zwölf Betriebsstellen mit Weichen als Bahnhöfe bzw. Verkehrsstellen mit Kreuzungsmöglichkeit ausgebaut. Dabei sind vier Verkehrsstellen mit Rückfallweichen (siehe dazu auch Abschnitt 4.3.3) ausgestattet, ermöglichen also eine Zugkreuzung ohne Bedienung der

Sicherungsanlage. Allerdings sind alle Rückfallweichen, außer jener in Kendllbruck, im Winter außer Betrieb weil diese nicht beheizt werden (Gößler, Interview vom 16.1.2023). Verkehrsstellen ohne Rückfallweichen sind mit mechanischen Perronstellwerken ausgerüstet, eine Kreuzung kann hier also durch Bedienungshandlung des Zugpersonals abgewickelt werden (Wittmann 1994).

Tab. 5.1: Bahnhöfe und Kreuzungsmöglichkeiten der Murtalbahn, Kilometrierung nach Steiermärkische Landesbahnen (1994)

km	Bezeichnung	Funktion	Anmerkung
0,0	Unzmarkt	Bahnhof	Anschluss an Normalspurnetz
8,9	Niederwölz	Verkehrsstelle	Rückfallweichen
10,7	Teufenbach	Verkehrsstelle	
15,3	Frojach	Verkehrsstelle	Anschlussbahn Eisenbahnmuseum
27,0	Murau	Bahnhof	Fahrdienstleitung, Ladegleis
34,1	St. Lorenzen ob Murau	Verkehrsstelle	Rückfallweichen
38,6	Wandritsch	Betriebsausweiche	
44,0	Stadl an der Mur	Verkehrsstelle	Rückfallweichen
48,2	Predlitz-Ladin	Verkehrsstelle	
52,4	Kendllbruck	Betriebsausweiche	Rückfallweichen
56,7	Ramingstein-Thomatal	Verkehrsstelle	
64,3	Tamsweg	Bahnhof	Anschlussbahn Lagerhaus

Zwischen Unzmarkt (733 m ü. A.) und Tamsweg (1019 m ü. A.) überwindet die Bahn einen Höhenunterschied von 286 m. Die größte Längsneigung tritt dabei mit 20 ‰ zwischen Murau und Kaindorf sowie zwischen Ramingstein und Tamsweg auf. Der kleinste Bogenradius der Strecke beträgt 85 m (Harer et al. 2019). Aktuell beträgt die größte Überhöhung 54 mm, womit die Grenzwerte der DV B 52 eingehalten werden (Gößler, Interview vom 16.1.2023). Insgesamt überquert die Murtalbahn viermal die Mur: bei km 10, km 48,9, km 63,8 befinden sich drei je 45 m lange Stahlbrücken, bei km 58,7 befindet sich eine 73 m lange Spannbetonbrücke (Steiermärkische Landesbahnen 1994). Alle Murbrücken, außer jener bei km 58,7, die in den 1980ern erneuert wurde (Wittmann 1994), stammen aus dem Baujahr der Bahn (Gößler, Interview vom 16.1.2023). Neben diesen Brücken gibt es mehrere Querungen von Bächen entlang der Strecke. Wie bereits erwähnt befinden sich zwischen Murau und Tamsweg drei kürzere Tunnel, außerdem überqueren bei Unzmarkt die Gleise der ÖBB und bei Lind die Murtalstraße B 96 die Murtalbahn.

Aktuell ist die Murtalbahn für eine Achslast von 10,2 t und eine Meterlast von 3,5 t/m ausgelegt. Auch wenn seit den 1980ern bei Erneuerungsarbeiten der bis dahin verwendete Oberbau mit Schienen des Profils XXIVa (26,15 kg/m) durch einen solchen mit dem Schienenprofil 33E1 (33,47 kg/m) mit geringerer Schwellenteilung, Betonschwellen und lückenlos verschweißten Gleis ersetzt wird (Wittmann 1994), finden sich noch immer Abschnitte mit dem Profil XXIVa im Bestand (Gößler, Interview vom 16.1.2022). Ein Problem stellt laut Wittmann (1994) zudem der aufgrund der kurzen Bauzeit nur unzureichend hergestellte Unterbau der Murtalbahn dar. Allerdings wird inzwischen bei Erneuerungen des Oberbaus auch der Unterbau saniert (Gößler, Interview vom 16.1.2022).

Wie das im FBS-Österreichnetz der Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Verkehrsverbund-Organisationsgesellschaften hinterlegte Geschwindigkeitsband zeigt, beträgt die Höchstgeschwindigkeit auf der Murtalbahn derzeit über weite Strecken 60 km/h, die Streckenhöchstgeschwindigkeit von 70 km/h wird nur auf kurzen Streckenabschnitten erreicht. Zusätzlich bestehen Geschwindigkeitsbrüche im Bereich von Eisenbahnkreuzungen. Aktuell wird der Betrieb auf

der Murtalbahn im Fernmündlichen Zugleitbetrieb abgewickelt. Demnächst soll allerdings ein rechnergestützter Zugleitbetrieb eingeführt werden (Gößler, Interview vom 16.1.2023).

5.1.3 Derzeitiges Verkehrsangebot

Im Fahrplan 2023 wird Montag bis Freitag zwischen Unzmarkt und Murau ein annähernder Zweistundentakt mit 7 Zugpaaren, zwischen Murau und Tamsweg mit sechs Zugpaaren, angeboten, wobei der jeweils letzte Zug des Tages beschleunigt als Regionalexpress (REX) verkehrt. An Samstagen, Sonn- und Feiertagen außerhalb der Fahrradsaison verkehren auf der Strecke nur 5 Zugpaare. In Unzmarkt besteht bei allen Zügen ein zeitnaher Anschluss an ÖBB-Züge von und nach Leoben (Übergangszeit 5 bis 12 Minuten). Richtung St. Veit an der Glan sind die Umstiegszeiten mit etwa 27 Minuten länger (Steiermarkbahn und Bus 2022b). Die im Takt verkehrenden Züge der Murtalbahn kreuzen zur Minute '00 in Murau. Hier besteht dadurch ein zeitnaher Anschluss an Regionalbusse. Dieses Knoten-Konzept wird als *Murautakt* vermarktet (Land Steiermark o. D.). Außerdem wurden Schulzeiten in Murau an den Murautakt angepasst (Verkehrsclub Österreich 2009).

Abseits der Taktkreuzungen in Murau besteht nur bei zwei Zügen an Schultagen Bedarf für eine Zugkreuzung. Diese findet um 7:08 in der Betriebsausweiche Kendlbruck, die mit Rückfallweichen ausgestattet ist (siehe Tabelle 5.1), statt. Für die Strecke Unzmarkt - Murau (27 km) benötigen Regionalzüge aktuell 36 Minuten, der Regionalexpress 34 Minuten. Von Murau nach Tamsweg (37 km) beträgt die Fahrzeit aktuell 57 Minuten (Regionalzug) bzw. 48 Minuten beim REX (Steiermarkbahn und Bus 2022b). Parallel zur Murtalbahn verkehren vereinzelt Busse der Linie 890, die für die Strecke Murau - Tamsweg 45 Minuten benötigen (Steiermarkbahn und Bus 2022a). Allerdings wirkt durch die Fahrzeit von 57 Minuten zwischen Murau und Tamsweg auch Tamsweg als Taktknoten zur Minute '00, der Anschlüsse mit kurzer Übergangszeit auf den Regionalbus ermöglicht.

Der einst bedeutende Güterverkehr auf der Murtalbahn ist fast vollständig zum Erliegen gekommen. Aktuell verkehren bei Bedarf Züge mit Mineralölerzeugnissen von Unzmarkt zur Ladestelle Murau. In Zukunft sollen diese um Containertransporte für die Murauer Brauerei ergänzt werden (Beier 2022b). Neben der Ladestelle im Bahnhof Murau besteht in Tamsweg ein Anschlussgleis zum dortigen Lagerhaus. Das laut Wittmann (1994) in den 1990ern noch bestehende Anschlussgleis zu einem Ziegelhersteller bei der Haltestelle Madling (km 57,24) wurde inzwischen abgebaut.

5.2 Zukunftsszenarien Murtalbahn

Mit Inbetriebnahme der Koralmbahn im Dezember 2025 (Mörth 2022) kommt es zu einer Verlagerung des Fernverkehrs Wien – Villach von der Rudolfsbahn auf die Koralmbahn. Wie aus der Vergabeinformation des Fernverkehrs in Österreich (Bundesministerium für Klimaschutz 2018) hervorgeht, soll statt des bisherigen Zweistundentakts im Fernverkehr die Relation Bruck an der Mur – Leoben – Unzmarkt – St. Veit an der Glan – Klagenfurt ab Eröffnung des Koralmtunnels stündlich mit einem Interregio (IR) bedient werden. Durch die Anschlüsse an die Taktknoten Bruck an der Mur und Klagenfurt ergibt sich ein neuer Taktknoten zur Minute '30 in Unzmarkt.

Da die Beibehaltung des Taktknotens zur Minute '00 in Murau gewünscht ist und gleichzeitig ein Anschluss an den Fernverkehr zur Minute '30 in Unzmarkt angestrebt wird, muss die Kantenfahrzeit, also der zeitliche Abstand zwischen den Taktknoten, 30 Minuten betragen. Daraus ergibt sich eine angestrebte Fahrzeit von unter 30 Minuten, statt derzeit 38 Minuten, zwischen Unzmarkt und Murau. Zudem soll das Fahrplanangebot schrittweise auf einen Stundentakt

verdichtet werden. Die Trassierung soll allerdings so erfolgen, dass weiterhin Güterverkehr angeboten werden kann. Außerdem sollen neue, schnellere und beschleunigungsstärkere Fahrzeuge für den Personenverkehr beschafft werden (Harer et al. 2019).

Um die angestrebte Fahrzeit von unter 30 Minuten zwischen Unzmarkt und Murau zu ermöglichen, sind Maßnahmen seitens der Infrastruktur notwendig. Von der Steuerungsgruppe zur Zukunft der Murtalbahn wurde die technische Sicherung bzw. Auflassung von Eisenbahnkreuzungen, Anpassungen der Trassierung sowie die Auflassung von frequenzschwachen Haltestellen empfohlen. Im Abschnitt Murau – Tamsweg sind hingegen keine Maßnahmen vorgesehen (Harer et al. 2019). Hinsichtlich der Trassenführung wäre eine Anhebung der Überhöhung sowie eine teilweise Neutrassierung geplant (Gößler, Interview vom 16.1.2023). Die Achslast soll durch Verbesserung des Oberbaus und Ertüchtigung des Unterbaus auf 11 t angehoben werden (Land Steiermark 2021). Da für die vorliegende Arbeit keine Unterlagen zur konkreten Planung dieser Maßnahmen vorlagen, wurden Annahmen hinsichtlich der Anpassung der Infrastruktur für den Fahrplan 2025+ angenommen. Konkret betrifft das die Anhebung der Höchstgeschwindigkeit auf weiten Teilen des Abschnitts Unzmarkt – Murau auf bis zu 80 km/h (siehe Tabelle A.1 im Anhang) sowie die Reduktion der bedienten Haltestellen. Zur Erhöhung der betrieblichen Stabilität (z.B. bei Verspätung des IR auf der Rudolfsbahn) wurde zudem der zweigleisige Ausbau der Murtalbahn auf einer Länge von ca. 600 m zwischen dem Bahnhof Murau und der Haltestelle Murau - St. Egidii angenommen. Allerdings ist ein derartiger Ausbau in den nächsten Jahren aufgrund fehlender Budgetmittel nicht realistisch (Gößler, Interview vom 16.1.2023).

5.2.1 Personenverkehr 2025+

Von der Steuerungsgruppe zur Zukunft der Murtalbahn wurde als zukünftiges Grundangebot im Personenverkehr ein Stundentakt angeregt (Harer et al. 2019). Durch die dadurch steigende Attraktivität der Murtalbahn wird eine Verdoppelung der Fahrgäste erwartet. Hinsichtlich der zukünftigen Antriebsform wird seitens der vom Land Steiermark eingesetzten Arbeitsgruppe ein Oberleitungsbetrieb favorisiert, da dieser unter anderem das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist (Land Steiermark 2021).

In der vorliegenden Arbeit wurden für den zukünftigen Personenverkehr zwei Szenarien betrachtet. Das erste Szenario nimmt den Ersatz der derzeitigen Dieseltraktion durch einen Oberleitungsbetrieb an. Als Fahrzeug für den Personenverkehr wurde folglich mit dem Triebwagen ET 1–9 der NÖVOG ein moderner Elektrotriebwagen auf bosnischer Spurweite als Referenzfahrzeug gewählt. Mittels der erwähnten Anpassungen an der Infrastruktur, einem angepassten Haltemuster sowie dem Einsatz des modernen Schmalspurtriebwagens konnte für die vorliegende Arbeit eine Fahrzeit zwischen Unzmarkt und Murau von 28 Minuten berechnet werden. Folglich können die Taktknoten zur Minute '30 in Unzmarkt sowie zur Minute '00 in Murau und Tamsweg bedient werden. Eine weitere Kreuzung zur Minute '30 findet in Stadl an der Mur statt (siehe Abb. A.1 im Anhang).

Da aufgrund der Entscheidung, die Lebensdauer der derzeit eingesetzten Fahrzeuge zu verlängern, in den nächsten 10 Jahren keine Anpassung der Infrastruktur realistisch ist (Gößler, Interview vom 16.1.2023), wurde als zweites Szenario der Einsatz der Bestandsfahrzeuge bei einem an den neuen Fahrplan auf der Rudolfsbahn angepassten Fahrplan der Murtalbahn untersucht. Für dieses Szenario wurde eine zeitnahe Anbindung an den Knoten Unzmarkt zur halben Stunde (an '22, ab '38) mit Kreuzungen in Frojach (Minute '00), St. Lorenzen (Minute '30) sowie Ramingstein-Thomatal (Minute '00) angenommen. Durch die zeitliche Lage der Trasse ergibt sich sowohl in Murau als auch in Tamsweg ein Halbknoten zur Minute '15 bzw. '45 (siehe Abb. A.2 im Anhang).

5.2.2 Güterverkehr 2025+

Für den Güterverkehr auf der Murtalbahn wird für die vorliegende Arbeit neben den bestehenden Mineralöltransporten eine Zunahme des Güterverkehrs angenommen. So werden aktuell Containertransporte für eine Brauerei in Murau geplant (Beier 2022b) sowie am „intelligenten“ Holztransport aus dem Lungau nach Unzmarkt geforscht (TU Wien 2022). Zudem besteht in Tamsweg eine Anschlussbahn des dortigen Lagerhauses, sowie Ladegleise in den Betriebsstellen Niederwölz, Teufenbach, Triebendorf, St. Lorenzen, Stadl an der Mur, Predlitz-Ladin und Tamsweg. Neben dem bereits erwähnten Holztransport könnten diese Ladestellen beispielsweise für den Abfalltransport verwendet werden. In Madling bestand zudem ehemals eine Anschlussbahn an das dortige Baustoffwerk (Wittmann 1994).

In der vorliegenden Arbeit wurde ein tägliches Güterzugpaar angenommen, dass von Unzmarkt aus Mineralöl und Container nach Murau sowie Holz nach Tamsweg bzw. auch in die Gegenrichtung transportiert. Als Mustergüterzug wurde folglich ein Zug mit einer Lokomotive der Reihe ZV D 10 (entspricht den Lokomotiven VL 22–23 der StB) definiert. Dabei wurde angenommen, dass dieser Güterzug zwischen Unzmarkt und Murau zwei Kesselwagen der Gattung ZZm, zwei Containertragwagen der Gattung SSrm sowie vier Plateauwagen der Gattung Jkrm transportiert. Nach dem Verschub in Murau setzt der Zug seine Fahrt mit den vier Plateauwagen bis Tamsweg fort. Am Rückweg transportiert der Güterzug vier Plateauwagen bis Murau, wo er wiederum zwei Kesselwagen und zwei Containertransportwagen aufnimmt (siehe Tab. A.2 im Anhang). Da mit voller Zuladung gerechnet wurde, ergibt sich zwischen Unzmarkt und Murau eine Zugmasse von 272 t, zwischen Murau und Tamsweg von 112 t. Die Zuglänge beträgt 93 m bzw. 43 m.

Wie der Bildfahrplan für das Szenario Personenverkehr mit neuen Fahrzeugen auf adaptierter Infrastruktur zeigt (siehe Abb. A.1 in Anhang), können im Abschnitt Unzmarkt - Murau, trotz im Vergleich zum Personenverkehr längeren Fahrzeiten, Güterzüge ohne Notwendigkeit zum Überholen zwischen zwei Personenzügen geführt werden. Die Kreuzung mit dem entgegenkommenden Personenzug kann in Niederwölz (Rückfallweichen) abgewickelt werden. In Murau besteht somit ein Zeitfenster von 45 Minuten für Verscharbeiten. Zwischen Murau und Tamsweg wurde die Güterzugtrasse so gelegt, dass Kreuzungen in der Betriebsstelle St. Lorenzen ob Murau sowie in der Betriebsausweiche Kendlbruck und bei der Rückfahrt in Ramingstein-Thomatal sowie St. Lorenzen abgewickelt werden können. Tamsweg wird so nach einer Fahrzeit von etwas über einer Stunde erreicht. Die Rückfahrt ist eine Stunde später ab Tamsweg möglich, in Murau besteht wiederum ein Zeitfenster von ca. 45 Minuten für den Verschub.

Für das Szenario Betrieb mit Bestandsfahrzeugen (siehe Abbildung A.2 im Anhang) zeigt sich, dass hier nur zwei Kreuzungen zwischen Güter- und Personenzügen in Teufenbach und Stadl an der Mur notwendig sind. In Murau besteht ein Zeitfenster von ungefähr 25 Minuten für den Verschub, in Tamsweg beträgt dieses Zeitfenster rund 30 Minuten.

In beiden Szenarien wäre die Führung mehrerer Güterzüge täglich möglich, wobei die Kreuzungssituation für diesen Fall nicht gesondert untersucht wurde. Der Fahrzeitanteil an der gesamten Beförderungszeit der Güterzüge ist stark von der Kreuzungssituation abhängig. Können die vorhandenen Kreuzungsbahnhöfe ohne längere Kreuzungshalte genutzt werden, liegt der Fahrzeitanteil bei über 90 %. Sind größere Wartezeiten in den Kreuzungsbahnhöfen (wie bei Szenario Neufahrzeuge aus Murau in Richtung Tamsweg) notwendig, sinkt der Fahrzeitanteil, in diesem Fall auf 77 %. Als Kehrwert des Fahrzeitanteils gilt der Beförderungszeitquotient als Maß für die Betriebsqualität (Pachl 2021). In der vorliegenden Arbeit konnte für den Güterverkehr ein Beförderungszeitquotient von 1,04 bis 1,30 und somit eine gute Betriebsqualität erreicht werden.

Kapitel 6

Diskussion

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

6.1.1 Infrastrukturelle Voraussetzungen

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde, unterscheiden sich die Richtlinien für die Trassierung von Schmalspurbahnen in Österreich, Deutschland und der Schweiz hinsichtlich Aktualität und Herausgeber:innenschaft. Die Trassierung der Bahnstrecke beeinflusst in weiterer Folge unter anderem die Geschwindigkeit der Züge (siehe Abb. 6.1), was z.B. zu Zielkonflikten mit anderen Verkehren führen kann (siehe Abschnitt 6.2.1).

Allgemein zeigt sich, dass bei Schmalspurbahnen im Vergleich zur Normalspur zwar Bögen mit engeren Radien angeordnet werden können, gleichzeitig aber durch die kleinere Stützweite bei Schmalspurbahnen eine höhere Entgleisungsgefahr besteht. Verschärft wird dieses Problem im Güterverkehr durch eine höhere Lage des Schwerpunkts im Vergleich zum Personenverkehr. Auch ist der Schmalspur-Oberbau sehr empfindlich für hohe Seitenbeschleunigungen (siehe Abschnitt 3.1.2). Beides schränkt die Höchstgeschwindigkeit von Schmalspur-Güterzügen im Bogen ein.

Bei überhöhten Bögen besteht die Gefahr des Kippens nach bogeninnen, weshalb bei Schmalspurbahnen allgemein kleinere Überhöhungen als im Bereich der Normalspur zulässig sind. Für den Rollfahrzeugverkehr, bei dem ein normalspuriger Güterwagen auf einem schmalspurigen Wagen transportiert wird, gelten aufgrund des höheren Schwerpunktes noch niedrigere Grenzwerte für die Überhöhung (siehe Abschnitt 3.1.4). Zusätzlich ist die Neigung der Überhöhungsrampe beschränkt, da in diesem Bereich eine erhöhte Entgleisungsgefahr besteht. Wie in Abschnitt 3.1.5 gezeigt wurde, sind deshalb bei der Trassierung von Schmalspurbahnen im Vergleich zur Normalspur zwar steilere Überhöhungen zulässig, diese sind aber geschwindigkeitsabhängig weniger steil als bei Normalspurbahnen.

Betrachtet man die Lichträume bei Schmalspurbahnen in Österreich, der Schweiz und Deutschland (siehe Abschnitt 3.3), so fällt auf, dass durch die Richtlinien in diesen Ländern unterschiedliche Lichtraumprofile für Strecken mit und ohne Rollfahrzeugbetrieb festgelegt werden. In Österreich verwendeten die meisten Schmalspurbahnen ursprünglich das durch ÖBB-Richtlinien festgelegte Lichtraumprofil. Doch haben sich hier, je nach Bahnbetreiber, unterschiedliche Lichtraumprofile ausgestaltet, die in der Regel auf die eingesetzten Fahrzeuge angepasst sind. Wie in Abschnitt 6.2.3 diskutiert wird, kann das Lichtraumprofil gewisse Formen des Güterverkehrs verunmöglichen.

Hinsichtlich der Belastbarkeit des Oberbaus haben sich in Österreich im Gegensatz zur Schweiz, wo eine einheitliche Achslast im Meterspurnetz angestrebt wird, für die einzelnen Bahnen unterschiedliche Achslasten herausgebildet. Auf manchen Schmalspurbahnen in Österreich wird die zulässige Belastung des Oberbaus durch die eingesetzten Fahrzeuge bestimmt, auf anderen wird wiederum bewusst eine hohe zulässige Achslast angestrebt, da erwartet wird, dass dadurch beim Einsatz leichterer Fahrzeuge der Erhaltungsaufwand von Oberbau und Kunstbauten sinkt (siehe Abschnitt 3.4.1). Die Belastbarkeit des Oberbaus ergibt sich aus der Dimensionierung der

Komponenten des Fahrwegs. Diese sind im Schmalspurbereich in der Regel schwächer ausgeführt als bei Normalspurbahnen. Allerdings werden inzwischen auch bei Schmalspurbahnen zunehmend Schienenprofile mit höheren Widerstandsmomenten verwendet. Neben dem Oberbau haben auch der Unterbau (kleinere Aufstandsfläche), Brücken sowie Stützbauwerke einen Einfluss auf die aufnehmbare Last der Fahrzeuge (siehe Abschnitt 3.4.2). Die Belastbarkeit der Streckeninfrastruktur beeinflusst unter anderem die mögliche Zuladung der Güterwagen sowie die verfügbaren Zugkräfte der Triebfahrzeuge (siehe Abb. 6.1).

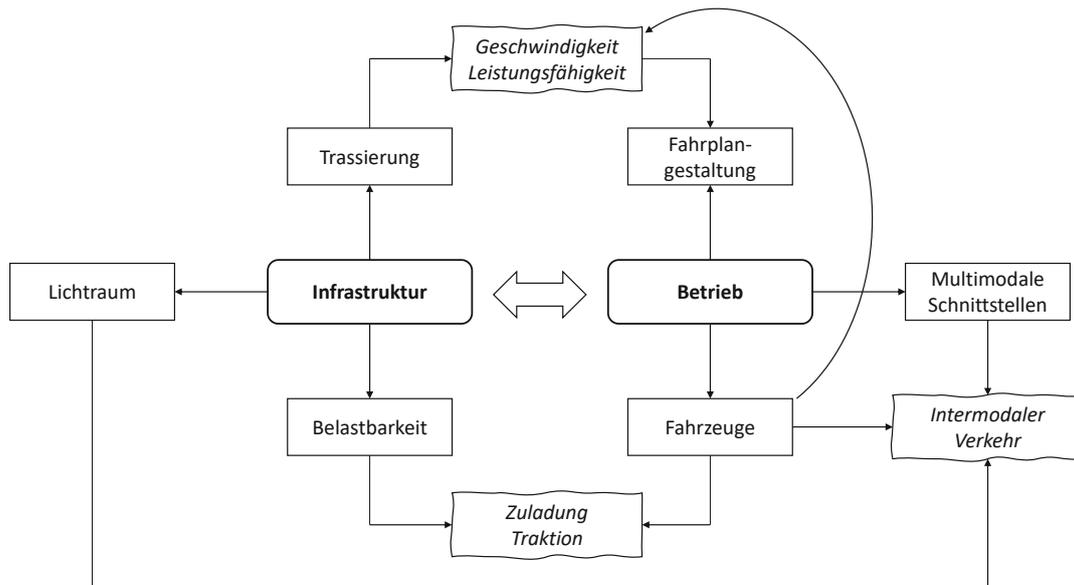


Abb. 6.1: Infrastrukturelle und betriebliche Voraussetzungen sowie deren Beziehung zueinander

6.1.2 Betriebliche Voraussetzungen

Für den Übergang der Güter zwischen Schmalspurbahn und anderen Verkehrsträgern konnten in Abschnitt 4.1 einige Beispiele aus der Praxis identifiziert werden. Die Einrichtung der Umschlaganlage muss dabei auf das umgeschlagene Gut angepasst sein, da Güter unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Rundhölzer können beispielsweise auf einem Freiladegleis mittels LKW-Kran und Greifarm verladen werden, während beim Mineralölumschlag Sicherheitsvorkehrungen, wie Gleistassen, notwendig sind. Ein Spezialfall sind intermodale Verkehre, hier wird neben dem Gut auch der Ladungsträger verladen, z.B. ISO-Container. Auch für den Umschlag von Transportbehältern ist im Grunde keine umfangreiche Infrastruktur notwendig – in der Regel reicht bereits der Einsatz eines entsprechenden Hubgeräts, z.B. eines Reach Stackers.

Ein Sonderfall auf Schmalspurbahnen sind Rollfahrzeugverkehre. Hier wird der Normalspurwagen samt Ladung auf schmalspurige Rollfahrzeuge verladen und über Anschlussbahnen zugestellt. Je nach angewendetem System sind unterschiedliche Anlagen notwendig. Während Rollwagen in der Regel bereits mit einer Normalspurrampe, die auf den Rollwagen führt, auskommen, sind für automatische Rollbockanlagen spezielle Anlagen notwendig, die sicherstellen, dass die Räder der Normalspurwagen sicher auf den Rollböcken aufsitzen (siehe Abschnitt 4.1.3).

Im Bereich der für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen notwendigen Fahrzeuge wurden sowohl Triebfahrzeuge als auch Güterwagen von Schmalspurbahnen in Österreich und der Schweiz betrachtet. Hier zeigen sich einige Unterschiede. Während in der Schweiz auch Triebwagen im

Güterverkehr eingesetzt werden, sind es in Österreich ausschließlich Lokomotiven. Auch ist in der Schweiz das Eisenbahnnetz fast lückenlos elektrifiziert, während Schmalspurbahnen in Österreich bis auf zwei Ausnahmen ausschließlich mit Dieseltraktion verkehren. Hinsichtlich Leistung schneiden Triebfahrzeuge der Meterspurbahnen wesentlich besser ab als jene auf einer Spurweite von 760 mm (siehe Tabelle 4.1).

Für den Güterverkehr müssen auf das transportierte Gut angepasste Güterwagen vorgehalten werden. Die Gestaltung der Fahrzeuge beeinflusst unter anderem die mögliche Zuladung (siehe Abb. 6.1). Innovativ ist die Nutzung ehemaliger Rollwagen mit neuen Rungenaufbauten auf der Zillertalbahn. Diese weisen im Vergleich zu anderen Schmalspur-Güterwagen ein gutes Totlast / Nutzlast-Verhältnis auf und verteilen die Last auf sechs Achsen, womit bei niedrigen Achslasten hohe Zuladungen möglich sind (siehe Abschnitt 4.2.2). Als Abschluss des Abschnitts 4.2 werden verschiedene Rollwagen- und Rollfahrzeugsysteme vorgestellt.

Der rechtliche Rahmen für den Betrieb auf Schmalspurbahnen wird durch nationalstaatliche Gesetze geregelt, aus denen sich Fahrdienstvorschriften der Bahnbetreiber:innen ableiten. Die Fahrdynamik von Zugfahrten auf Schmalspurbahnen unterscheidet sich im Grunde nicht von jener auf Normalspurbahnen. Ein Unterschied liegt in der geringeren Bremsleistung durch Verwendung von Saugluft- statt Druckluftbremsen auf vielen Schmalspurbahnen. Neben der Trassierung hat auch die Bremsleistung von Schmalspurbahnen einen Einfluss auf die fahrbare Höchstgeschwindigkeit und in weiterer Folge auf die Fahrplangestaltung (siehe Abb. 6.1). Da auf vielen Schmalspurbahnen in Österreich und der Schweiz Personenverkehr nach Taktfahrplänen stattfindet, muss die oft eingleisige Streckeninfrastruktur hinsichtlich Möglichkeiten zur Kreuzung und zum Überholen von Güter- durch Personenzüge ausgerüstet sein. Auch ist die Fahrplanstabilität des Taktfahrplans davon abhängig, ob Kreuzungen im Verspätungsfall in andere Betriebsstellen verlegt werden können. Der Einfluss der betrieblichen Gestaltung der Infrastruktur wird in Abschnitt 6.2.2 diskutiert.

6.1.3 Murtalbahn

In Folge der Inbetriebnahme der Koralmbahn kommt es zu Änderungen bei den Abfahrtszeiten der Fernverkehrszüge im Bahnhof Unzmarkt. Um weiterhin einen Anschluss an die Regionalzüge der Murtalbahn zu gewährleisten, müssen diese zur Minute '30 an den Knoten Unzmarkt angeschlossen werden. Da die Fahrzeit zwischen Unzmarkt und Murau im Personenverkehr derzeit 36 Minuten beträgt, ist entweder eine Senkung der Fahrzeit oder eine Aufgabe des Vollknotens in Murau notwendig. Wie in Kapitel 5 gezeigt werden konnte, ist aus Sicht des Fahrplans in beiden Szenarien weiterhin Güterverkehr auf der Murtalbahn möglich. Etwaige Anpassungen der Infrastruktur werden in Abschnitt 6.4.1 diskutiert.

6.2 Zielkonflikte

Im Rahmen der Gestaltung der Eisenbahninfrastruktur werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Dabei stehen Ziele in Beziehungen zueinander. Zwei Ziele können dabei komplementär sein, es wird also bei Erreichung eines Ziels auch der Erfüllungsgrad des anderen Ziels verbessert. Es kann aber auch der gegenteilige Fall eintreten und es kommt zu einer Zielkonkurrenz bzw. einem Zielkonflikt. Es müssen also beim Anstreben eines Ziels Abstriche bei der Erreichung des anderen Ziels in Kauf genommen werden (Laux et al. 2018). Aus den infrastrukturellen und betrieblichen Voraussetzungen für den Güterverkehr auf Schmalspurbahnen ergibt sich eine Reihe an Zielkonflikten, teilweise auch mit anderen Verkehren. In diesem Abschnitt soll auf eine Auswahl von Zielkonflikten eingegangen werden.

6.2.1 Attraktivität des Personenverkehrs / Möglichkeit des Güterverkehrs

Güterzüge auf Schmalspurbahnen verkehren langsamer als Personenzüge. Die Höchstgeschwindigkeit von Güterzügen ist unter anderem durch die geringe Bremsleistung beschränkt (siehe Abschnitt 4.3.2.3). Auch seitens der Fahrzeuge bestehen Geschwindigkeitsbeschränkungen (siehe Abschnitt 4.2). So sind Güterwagen von ihrer Konstruktion her oft für geringere Geschwindigkeiten ausgelegt als Personenwagen. Zusätzlich kann eine zu geringe Traktionsleistung der Lokomotive zu geringeren Geschwindigkeiten auf Steigungsabschnitten führen. Wie im Abschnitt 3.1 ausgearbeitet wurde, besteht auf Schmalspurbahnen bei Güterzügen durch den hohen Schwerpunkt und die geringe Stützweite eine höhere Entgleisungsgefahr in Bögen. Deshalb müssen bei engen Bögen unter Umständen Geschwindigkeitsbeschränkungen für den Güterverkehr erlassen werden. Verschärft wird dieses Problem beim Rollfahrzeugverkehr, für den auch die Überhöhung im Bogen beschränkt ist.

Im Bereich der „bosnischen Spurweite“ (760 mm) in Österreich wird bei Rollfahrzeugbetrieb eine maximale Überhöhung von 40 mm angewandt. Ohne Verkehr von Rollfahrzeugen kommen Überhöhungen von bis zu 70 mm zum Einsatz (siehe Abschnitt 3.1.4). Nach der in Österreich noch immer angewandten Dienstvorschrift (DV) B 52 (ÖBB 1980) ergibt sich die Höchstgeschwindigkeit V in km/h zufolge *Regelüberhöhung* bei einer Spurweite von 760 mm folgendermaßen:

$$V = \sqrt{\frac{(u_r + 15) \cdot R}{6,4}} \quad (6.1)$$

Betrachtet man die engsten auf Schmalspurbahnen in Österreich vorkommenden Bögen, wie beispielsweise jenen mit einem Radius von 82 m zwischen Gmünd und Litschau (ÖBB 1989), so ergibt sich für diesen Radius nach Formel 6.1 eine Höchstgeschwindigkeit von 26,6 km/h ($u = 40$ mm) bzw. 33,0 km/h ($u = 70$ mm). Wie sich hier zeigt, ist der Einfluss der geringeren Überhöhung auf die Höchstgeschwindigkeit bei kleinen Bogenradien klein. Relevanter wird die Wahl der Überhöhung erst bei größeren Bogenradien, z.B. bei einem Radius von 500 m, bei dem eine Höchstgeschwindigkeit von 65,6 km/h ($u = 40$ mm) bzw. 81,5 km/h ($u = 70$ mm) gilt. Dieses Beispiel zeigt, dass die Wahl einer kleineren Überhöhung die Geschwindigkeit vor allem bei Bahnen mit großzügiger Trassierung einschränkt, während der Effekt bei Bahnen mit vielen engen Bögen, wie beispielsweise der Mariazellerbahn, minimal ist. Trotzdem werden auf der Mariazellerbahn Überhöhungen von 70 mm angewandt um Geschwindigkeitsbrüche zu vermeiden (Tschudnig, E-Mail vom 22.10.2022).

Soll auf Schmalspurbahnen Güterverkehr mit Rollfahrzeugen angeboten werden, so kann die Trassierung mit geringeren Überhöhungen zu geringen Geschwindigkeiten und somit längeren Fahrzeiten führen. Im Extremfall kann als Konsequenz z.B. die angestrebte Kantenfahrzeit für einen Taktfahrplan nicht erreicht werden. In solchen Fällen kann die Höchstgeschwindigkeit des Personenverkehrs nur durch Baumaßnahmen, wie größere Bogenradien, gehoben werden. Seitens der Richtlinien könnte dieses Problem durch Einführung einer Berechnung der zulässigen Geschwindigkeit auf Basis von unterschiedlichen Überhöhungsfehlbeträgen für Personen- und Güterverkehr entschärft werden (siehe Abschnitt 6.4.2).

6.2.2 Betriebliche Gestaltung der Infrastruktur / Möglichkeit des Güterverkehrs

Betrieblich bedingt der Güterverkehr, dass auf den meist eingleisigen Schmalspurbahnen Kreuzungsmöglichkeiten zwischen Personen- und Güterverkehr vorhanden sein müssen. Während der Personenverkehr, wenn er nach Taktfahrplan verkehrt, immer in den selben Bahnhöfen kreuzt, müssen für den Güterverkehr weitere Kreuzungsbahnhöfe vorhanden sein. Je nach Art der Betriebsführung müssen Kreuzungsbahnhöfe mit entsprechender Infrastruktur (z.B. Rückfallweichen) ausgerüstet oder mit Personal besetzt sein (siehe auch 4.3.3). Außerdem kann die niedrigere Geschwindigkeit von Güterzügen im Vergleich zu Personenzügen dazu führen, dass die Güterzüge vom Personenverkehr in entsprechend ausgestatteten Bahnhöfen überholt werden müssen. In diesem Fall reichen Rückfallweichen für die Betriebsabwicklung nicht aus, da durch den Verkehr in die gleiche Richtung auf jeden Fall eine Bedienungshandlung an mindestens einer Weiche gesetzt werden muss. Um betriebliche Flexibilität in einem Ausmaß zu gewährleisten, dass sich Verspätungen nicht auf der Strecke von einem Zug auf den nächsten übertragen, sind zudem in der Regel Betriebsstellen notwendig, auf die Kreuzungen verlegt werden können (siehe auch Abschnitt 4.3.5).

Aufgrund der hohen Kosten für die Instandhaltung von Weichen streben Eisenbahninfrastrukturbetreiber:innen danach, deren Zahl möglichst gering zu halten. Hier muss in der Regel ein ausgewogener Kompromiss zwischen betrieblicher Flexibilität und Kosten gefunden werden (Jochim und Lademann 2018). Neben den bereits erwähnten Aspekten der Kreuzungs- und Überholungsmöglichkeiten kann die Eisenbahninfrastruktur auch bereits durch den Personenzugverkehr an die Kapazitätsgrenzen kommen. In solchen Situationen ist ein Güterverkehr unter Umständen nur nach entsprechendem Infrastrukturausbau möglich.

6.2.3 Belastbarkeit des Oberbaus und der Bauwerke / Möglichkeit des Güterverkehrs

Wie in Abschnitt 3.4.2 formuliert, hängt die Belastbarkeit des Fahrwegs durch die Zugfahrten vom Aufbau und den Komponenten des Ober-, Unterbaus und der Ingenieurbauwerke ab. Sollen höhere Achs- und Meterlasten ermöglicht werden, muss der Fahrweg entsprechend stärker dimensioniert sein. Während in der Schweiz eine einheitliche Belastbarkeit der Schmalspurinfrastruktur angestrebt wird, ergibt sich diese in Österreich auf vielen Schmalspurbahnen aus den eingesetzten Fahrzeugen. Werden nur Triebwagen eingesetzt, so sind die auftretenden Achslasten durch die leichte Konstruktion dieser Fahrzeuge geringer als beim Verkehr von Güterzügen. Wird die Infrastruktur nur für geringe Achslasten ausgelegt, verhindert das in der Regel den Verkehr von Güterwagen, bei denen eine hohe Zuladung gewünscht ist. Auch der Einsatz leistungsstärkerer Lokomotiven kann durch eine geringe Achslast verhindert werden, da Lokomotiven mit größerer Traktionskraft in der Regel höhere Radsatzfahrmasse aufweisen (siehe dazu auch Abschnitt 4.2.1.4). In Abschnitt 6.4.3 wird eine Vereinheitlichung der Belastungsnormen in Österreich diskutiert.

6.2.4 Lichtraum / Austauschbarkeit der Fahrzeuge / multimodaler Verkehr

Der Lichtraum von Schmalspurbahnen wird in Österreich, der Schweiz und Deutschland nach der Art des Verkehrs unterschieden, da Rollfahrzeugverkehr einen größeren Lichtraum als der Personenverkehr benötigt. Trotz der Festlegung eines Lichtraums in Regelwerken haben sich in Österreich für die Schmalspurbahnen je nach Eisenbahnunternehmen unterschiedliche Lichträume herausgebildet (siehe Abschnitt 3.3). Dieser Umstand erschwert unter anderem den Austausch von Fahrzeugen zwischen den Schmalspurbahnen und verkleinert das Einsatzspektrum der ohnehin schon in kleiner Stückzahl beschafften Schmalspurfahrzeuge.

Auch hat Förster (2022) in seiner Arbeit gezeigt, dass der Regellichtraum österreichischer Schmalspurbahnen ohne Rollfahrzeugbetrieb beim Transport von ISO-Containern überschritten wird. Aufgrund des Potentials von Schmalspurbahnen im multimodalen Transport (siehe Abschnitt 1.2) wäre die Einführung eines eigenen Lichtraumprofils für den multimodalen Verkehr zu diskutieren (siehe Abschnitt 6.4.4). Indirekt beeinflusst die aus dem Lichtraumprofil folgende Fahrzeugbegrenzungslinie auch die Leistungsfähigkeit von Triebfahrzeugen, da bei größerem Bauraum mehr Platz für die Antriebsaggregate zur Verfügung steht. Je nach Topographie kann eine Eisenbahnstrecke in unterschiedlichem Ausmaß Bauwerke aufweisen, die den Lichtraum einschränken. In der Regel sind das Tunnel, aber auch Überführungen können den Lichtraum bestimmen. Zudem wird der notwendige Gleisabstand durch die Breite der Fahrzeuge bestimmt. Entsprechend ist für die Anpassung an einen größeren Lichtraum ein unterschiedlich großer baulicher Aufwand notwendig.

6.3 Forschungsfragen und Grenzen der vorliegenden Arbeit

Durch die vorliegende Arbeit wurde versucht, die in Abschnitt 1.1 definierten Forschungsfragen zu beantworten. Die Frage des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen in Europa und weltweit wurde im Zuge des Abschnitts 1.6 behandelt. Fragen der Trassierung, der Längsneigung, des Lichtraums und der Belastbarkeit des Oberbaus sind Thema des Kapitels 3 *infrastrukturelle Voraussetzungen*. Die für den Betrieb notwendigen Fahrzeuge, den Übergang von einem anderen Verkehrsträger auf Schmalspurbahnen sowie betriebliche Fragestellungen werden im Kapitel 4 *betriebliche Voraussetzungen* behandelt. Die dabei aufgetretenen Diskussionspunkte werden im folgenden Abschnitt 6.4 thematisiert.

Die vorliegende Arbeit stützt sich ausschließlich auf Angaben aus der Literatur und angefragter Expert:innen. Es wurden bis auf die Erstellung eines Musterfahrplans keine praktischen Versuche durchgeführt. Wo diese aus Sicht des Autors notwendig sind, wird im Text verwiesen. Auch wurden keine Fragen der Ökologie oder Wirtschaftlichkeit des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen behandelt. Auf den weiteren Forschungsbedarf wird in Abschnitt 6.5 eingegangen.

6.4 Ausgewählte Diskussionspunkte

6.4.1 Zukunft des Güterverkehrs auf der Murtalbahn

Die Murtalbahn in der Steiermark gehört zu jenen Schmalspurbahnen in Österreich, auf denen Güterverkehr angeboten wird. Hierfür befinden sich im Bahnhof Unzmarkt an der ÖBB-Strecke Leoben – St. Michael in der Obersteiermark – St. Veit an der Glan umfangreiche Umladeanlagen für den Umschlag von Normal- auf Schmalspur (siehe Abb. 4.1b). Zudem besitzt die Steiermarkbahn für den Güterverkehr geeignete Lokomotiven und Schmalspur-Güterwaggons (siehe Abschnitt 4.2). Rollfahrzeugverkehr ist allerdings aufgrund der Überhöhung von 54 mm derzeit nicht möglich (Gößler, Interview vom 16.1.2023).

Infolge der Inbetriebnahme der Koralmbahn gibt es diverse Überlegungen zur Zukunft der Murtalbahn. In Kapitel 5 wurden zwei Szenarien dazu betrachtet, einerseits Maßnahmen für die Senkung der Fahrzeit zwischen Unzmarkt und Murau von derzeit 36 auf unter 30 Minuten und andererseits den weiteren Einsatz der Bestandsfahrzeuge ohne Anpassung der Streckeninfrastruktur. Wie durch Erstellung eines Musterfahrplans gezeigt werden konnte, ist beim Einsatz von Bestandsfahrzeugen auch bei einer Verdichtung des Angebots im Personenverkehr auf einen Stundentakt und der zeitlichen Verschiebung der Anschlüsse an die Taktknoten weiterhin Güterverkehr möglich (siehe Abb. A.2). Um ausreichend Zeit für Verschubarbeiten in Murau zu haben, wurde die Kreuzung von Güter- und Personenzug nach Teufenbach gelegt. Allerdings zeigt die Analyse von Luftbildern im Geografischen Informationssystem des Landes Steiermark (gis.stmk.gv.at), dass die Nutzlänge der Gleise der Verkehrsstelle Teufenbach derzeit nur etwa 100 m beträgt. Sollten längere Güterzüge geführt werden, muss die Nutzlänge entsprechend verlängert werden.

Für die langfristig geplante Verringerung der Fahrzeit zwischen Unzmarkt und Murau sind, neben dem Einsatz von neuen beschleunigungsstärkeren Fahrzeugen, auch Anpassungen der Trassierung der Murtalbahn notwendig, wobei dabei darauf geachtet werden soll, dass weiterhin Güterverkehr möglich ist (Harer et al. 2019). Wie in einer Trassierungsstudie der TU Graz von Neuhold et al. (2018) festgestellt wurde, sind die Grenzwerte der aktuellen Trassierungsrichtlinie DV B 52 nicht geeignet, das Ziel der Fahrzeitreduktion zu erreichen. Konkret wird angeregt, neben einer Erhöhung der maximalen freien Seitenbeschleunigung auf $0,85 \text{ m/s}^2$ eine maximal zulässige Überhöhung von 70 mm anzuwenden (Neuhold et al. 2018). Wie in Abschnitt 3.1.4 gezeigt wurde, besteht in überhöhten Bögen eine Gefahr der Entgleisung des äußeren führenden Rades des Zuges, die bei Güterwagen durch den hohen Schwerpunkt der Fahrzeuge verschärft wird. Da die höchste Überhöhung der Murtalbahn 54 mm beträgt, sollte vor einer Entscheidung für den Einsatz höherer Überhöhungen überprüft werden, ob die im Güterverkehr verwendeten Bestandsfahrzeuge für eine derartige Überhöhung geeignet sind. Eine ausführlichere Diskussion der Grenzwerte der Trassierungsrichtlinien für Schmalspurbahnen in Österreich folgt in Abschnitt 6.4.2.

Kommt es zu einem Ersatz der Dieseltriebwagen im Personenverkehr durch unter Oberleitung verkehrende Elektrotriebwagen, wie seitens der Arbeitsgruppe zur Zukunft der Murtalbahn angeregt wird, ist eine Erhöhung der zulässigen Achslast auf rund 11 t notwendig. Dafür sind Verbesserungen des Oberbaus und eine Ertüchtigung des Unterbaus sowie der Murbrücke in Teufenbach notwendig (Land Steiermark 2021). In diesem Fall sollte allerdings die Erhöhung der zulässigen Achslast auf 12,5 t geprüft werden, da dadurch größere Zuladungen der Güterwagen und der Einsatz von stärkeren Lokomotiven im Güterverkehr ermöglicht wird (siehe dazu

auch Abschnitt 4.2). Eine Elektrifizierung der Strecke ermöglicht die Dekarbonisierung des Güterverkehrs auf der Murtalbahn. Der Einsatz von Personenzügen mit Güterbeförderung, wie auf manchen Schweizer Schmalspurbahnen, wurde aufgrund der engen Zeitreserven im Fahrplan nicht untersucht.

Im Abschnitt Unzmarkt – Murau bestehen Überlegungen für die Einführung eines regelmäßigen Containertransports. Da dieser den installierten Lichtraum überschreitet, müssen Containerzüge als außergewöhnliche Sendung befördert werden (Göbner, Interview vom 16.1.2023). Wie in Abschnitt 6.4.4 diskutiert wird, sollte zur Förderung des intermodalen Verkehrs auf Schmalspurbahnen die Einführung eines erweiterten Lichtraumprofils erwogen werden. Da sich auf der Murtalbahn ausschließlich zwischen Murau und Tamsweg Tunnel befinden, sollte eine Installation eines entsprechenden Lichtraumprofils ohne weiteres möglich sein.

6.4.2 Anpassung der Trassierungsrichtlinien

Betrachtet man die Normenlage zur Trassierung von Schmalspurbahnen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, so fällt auf, dass hier Unterschiede bezüglich Aktualität und Herausgeber-schaft der kodifizierten Rahmenbedingungen bestehen. In der Schweiz werden die Grenzwerte für die Trassierung vom Bundesamt für Verkehr (BAV) in sehr detaillierten *Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung* (AB-EBV) erlassen (BAV 2020a). Aus diesen leitet sich die Trassierungsrichtlinie R RTE 22546 *Geometrische Gestaltung der Fahrbahn – Meterspur* (Verband öffentlicher Verkehr 2022) des Verband öffentlicher Verkehr ab. In Österreich gilt für die Spurweite 760 mm hingegen noch immer die ÖBB-Dienstvorschrift (DV) *B 52 Oberbau technische Grundsätze* (ÖBB 1980) aus dem Jahr 1980. Die in Österreich für die Meterspur geltende *Oberbauvorschrift für Österreichische nicht vom Bunde betriebene Haupt- und Nebenbahnen* (B 51/P) stammt sogar noch aus dem Jahr 1958. Sowohl AB-EBV als auch R RTE 22546 werden in regelmäßigen Abständen überarbeitet und neu herausgegeben. In Deutschland werden Grenzwerte für die Trassierung durch den Gesetzgeber in der *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen* (ESBO) festgelegt (siehe auch Abschnitt 3.1.1)

Wie im folgenden Abschnitt angeregt wird, besteht im Bereich der Trassierungsrichtlinien für Schmalspurbahnen in Österreich Optimierungspotential, welches die „Konkurrenz“ zwischen Güter- und Personenverkehr etwas entschärfen würde. Abgesehen davon wird durch eine Neufassung der Trassierungsrichtlinien die Trassierung von Schmalspurbahnen auf den Stand der Technik gebracht und eine Basis für den Einsatz neuer Fahrzeuge gelegt. Dabei sollte analog zur Schweiz eine bundesweit gültige Richtlinie, beispielsweise als Teil der von der Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV) herausgegebenen *Richtlinien und Vorschriften für das Eisenbahnwesen* (RVE), eingeführt werden. Wichtig ist dabei die Nachvollziehbarkeit der Grenzwerte, da diese bei den aktuellen Richtlinien in Österreich nicht gegeben ist. Für eine genaue Festlegung der Grenzwerte sind allerdings vertiefende Berechnungen und Messfahrten notwendig.

6.4.2.1 Grenzwert für die freie Seitenbeschleunigung

Hinsichtlich der Grenzwerte finden sich in den genannten Vorschriften teilweise große Unterschiede. Während die freie Seitenbeschleunigung im Bogen für Schmalspurbahnen in Österreich auf $a_Z = 0,654 \text{ m/s}^2$ beschränkt ist, gilt in der Schweiz und Deutschland ein Grenzwert von $a_Z = 0,8 \text{ m/s}^2$ (siehe Abschnitt 3.1.2). Da sich die freie Seitenbeschleunigung aus der Geschwindigkeit zum Quadrat geteilt durch den Bogenradius ergibt, können Bögen bei Anwendung einer höheren Seitenbeschleunigung schneller durchfahren werden. Deshalb wenden Schmalspurbahnen in

Österreich bereits jetzt in der Praxis höhere Grenzwerte, als in den Richtlinien vorgesehen ist, an. Aus diesem Grund ist eine Anpassung der Grenzwerte in Österreich überlegenswert.

Die freie Seitenbeschleunigung kann abhängig von der Spurweite in einen Überhöhungsfehlbetrag, also eine fiktive Überhöhung, die notwendig wäre, um die Seitenbeschleunigung vollkommen zu kompensieren, umgerechnet werden (siehe Abschnitt 3.1.4). Aufgrund der praktischen Erfahrungen der Niederösterreich Bahnen (NÖVOG) mit einem erhöhten Grenzwert für die freie Seitenbeschleunigung sollte dieser Grenzwert für Bahnen mit einer Spurweite von 760 mm angewendet werden. Für die Meterspur können die Schweizer Grenzwerte übernommen werden. Daraus ergeben sich folgende Grenzwerte für den zulässigen Überhöhungsfehlbetrag:

- Spurweite 1000 mm ($e = 1050$ mm): im Normalfall $u_{f,max} = 86$ mm ($a_q = 0,8$ m/s²), maximal 107 mm ($a_q = 1$ m/s²)
- Spurweite 760 mm ($e = 805$ mm): im Normalfall $u_{f,max} = 62$ mm ($a_q = 0,75$ m/s²), maximal 66 mm ($a_q = 0,8$ m/s²)

Eine Erhöhung der maximalen Seitenbeschleunigung dient in der Praxis vor allem der Beschleunigung des Personenverkehrs. Derartige Maßnahmen können allerdings auch dem Güterverkehr zugute kommen, da dadurch einerseits die Anwendung kleinerer Überhöhungen (siehe unten) möglich wird und sich unter Umständen betriebliche Vorteile (siehe auch Abschnitt 6.2.1) ergeben können.

Eine Anwendung des vollen Betrags der Grenzwerte für den Überhöhungsfehlbetrag bedeutet eine hohe Belastung des Oberbaus. Daher sind ab einer gewissen Seitenbeschleunigung Maßnahmen zur Erhöhung der Gleislagestabilität erforderlich. Auf Schmalspurbahnen der NÖVOG werden diese ab einer unausgeglichene Seitenbeschleunigung von $0,7$ m/s² gesetzt (Tschudnig, E-Mail vom 22.10.2022). Da Güterwagen und vor allem aufgebockte bzw. aufgeschemelte Normalspurwagen einen höheren Schwerpunkt sowie eine höhere Masse als Triebwagen des Personenverkehrs aufweisen, und dadurch einerseits der Oberbau stärker belastet wird und andererseits eine höhere Kippgefahr besteht, wäre es überlegenswert, für den Schmalspur-Güterverkehr geringere Überhöhungsfehlbeträge festzulegen.

6.4.2.2 Grenzwerte für die Überhöhung

Hinsichtlich der maximal anwendbaren Überhöhung gelten für Strecken mit Rollfahrzeugverkehr, sowohl in Österreich als auch der Schweiz, geringere Höchstwerte für die Überhöhung als auf Strecken ohne einen solchen Verkehr. Wie in Tabelle 3.1 zusammengefasst wurde, liegen diese Grenzwerte in Österreich bei 35 mm / 60 mm (760 mm) bzw. bei 50 mm / 100 mm (1000 mm) und in der Schweiz bei 90 mm / 105 mm (1000 mm). Wie bereits in Abschnitt 6.2.1 formuliert wurde, kann eine geringere Überhöhung aufgrund des Rollfahrzeugverkehrs zu Fahrzeitverlusten für den Personenverkehr führen. Aus diesem Grund sollte auf Strecken mit Rollwagenbetrieb eine möglichst große Überhöhung angestrebt werden.

In der Praxis zeigt sich, dass in Österreich bereits jetzt größere Überhöhungen, als in den Trassierungsrichtlinien vorgesehen sind, angewendet werden. So wird auf der Zillertalbahn trotz Rollwagenbetrieb bereits jetzt ein Grenzwert von 40 mm (Obholzer, Interview vom 7.11.2022) angewandt, auf der Mariazellerbahn weisen einzelne Bögen eine Überhöhung von 70 mm auf (Tschudnig, E-Mail vom 22.10.2022). Auch auf der Waldenburgerbahn in der Schweiz kamen bei 750 mm Spurweite⁸ Überhöhungen bis 70 mm zum Einsatz (Neuhold et al. 2018). In Österreich sollten die maximalen Überhöhungen für eine Spurweite von 760 mm aufgrund der Erfahrungen

⁸Die Waldenburgerbahn wurde inzwischen auf Meterspur umgebaut (Rail Business 2021).

der Mariazeller- und Zillertalbahn sowie der Praxis in der Schweiz ebenfalls auf 70 mm (ohne Rollfahrzeugbetrieb) bzw. 40 mm (mit Rollfahrzeugbetrieb) angehoben werden. Im Meterspurbereich können die in der Schweiz angewandten Grenzwerte übernommen werden (siehe Tab. 6.1).

Tab. 6.1: Vorschlag für neue Grenzwerte der Trassierungsparameter bei Schmalspurbahnen in Österreich

Spurweite	Stand	$u_{max,RF}$	u_{max}	u_F	a_q	Anmerkung
760 mm	aktuell	35 mm	60 mm	54 mm	0,654 m/s ²	DV B 51
760 mm	zukünftig	40 mm	70 mm	62 mm	0,75 m/s ²	Anpassung an die Praxis
1000 mm	aktuell	50 mm	100 mm	70 mm	0,654 m/s ²	RL B 51/P
1000 mm	zukünftig	90 mm	105 mm	86 mm	0,8 m/s ²	Anpassung an d. Schweiz

Grundsätzlich sollte allerdings darauf geachtet werden, dass die Grenzwerte der Überhöhungen nicht zu sehr ausgereizt werden. So wird von der Schweizer Richtlinie R RTE 22546 die Regelüberhöhung mit 55 % der ideellen Überhöhung, bei der keine freie Seitenbeschleunigung auftritt, festgelegt (Verband öffentlicher Verkehr 2022). Einerseits führen große Überhöhungen zu einem höheren Instandhaltungsaufwand der Gleisanlage (Jochim und Lademann 2018). Andererseits verlängern sich dadurch Überhöhungsrampen, was bei bogenreichen Strecken im Bestand zu Problemen führen kann. Zudem sind, wie in Abschnitt 3.1.4 gezeigt wurde, Schmalspur-Güterwagen durch ihren hohen Schwerpunkt und ihre kleine Spurweite anfällig für Entgleisungen im überhöhten Bogen. Folglich sollte bei Einsatz von Bestandsfahrzeugen überprüft werden, ob diese mit einer höheren Überhöhung kompatibel sind.

6.4.2.3 Grenzwerte für die Überhöhungsrampe

Im Vergleich zu Österreich sind in der Schweiz geschwindigkeitsabhängig steilere Überhöhungsrampen zulässig. So beträgt der Regel-Grenzwert in Österreich $1 : (16 \cdot V)$ (17,4 mm/s) für eine Spurweite von 760 mm bzw. $1 : (13 \cdot V)$ (21,4 mm/s) für eine Spurweite von 1000 mm, während der Grenzwert in der Schweiz 40 mm/s beträgt (siehe Abschnitt 3.1.5). Bei der Betrachtung des Planungsgrenzwerts für Meterspur laut R RTE 22546 (Verband öffentlicher Verkehr 2022) zeigt sich, dass dieser mit 35 mm/s bzw. 32 mm/s ab 50 km/h noch immer deutlich über dem Grenzwert für Österreichische Schmalspurbahnen liegt.

Im Bereich häufiger Bogenwechsel kann eine beschränkte Neigung der Überhöhungsrampe dazu führen, dass im folgenden Bogen die für eine bestimmte Geschwindigkeit notwendige Überhöhung nicht realisiert werden kann. Aus diesem Grund wäre hier die Anhebung der Grenzwerte überlegenswert. Wie in Abschnitt 3.1.5 beschrieben, sind Überhöhungsrampen ein kritisches Element der Trassierung, da sie eine planmäßige Verwindung des Gleisrostes darstellen und beim Befahren dieser eine erhöhte Entgleisungsgefahr besteht. Auch Neuhold et al. (2018) kommen zum Schluss, dass die Neigung der Überhöhungsrampe ein kritischerer Parameter als die Überhöhung an sich ist. Aus diesem Grund müsste eine Anhebung der Grenzwerte für die geschwindigkeitsabhängige Neigung der Überhöhungsrampe (Hubgeschwindigkeit) für eine Spurweite von 760 mm, vor allem im Hinblick auf den höheren Schwerpunkt von Güterwagen, vertiefend untersucht werden.

6.4.3 Vereinheitlichung der Belastungsnormen

Da die in Europa geltenden Normung der Lastgrenzen für Eisenbahnfahrzeuge nicht für Schmalspurbahnen gilt, werden bei Schmalspurbahnen in Österreich je nach Bahnstrecke unterschiedliche maximale Belastungen der Infrastruktur festgelegt (siehe Abschnitt 3.4.1). Wie bereits in Abschnitt 6.2.3 formuliert, erschwert dieser Umstand sowohl die Austauschbarkeit von Fahrzeugen als auch den Güterverkehr. In der Schweiz wird hingegen auf Meterspurbahnen eine einheitliche Achslast von 16 t angestrebt (BAV 2020a). Auch in Österreich sollte im Bereich der Spurweite von 760 mm eine einheitliche Achs- und Meterlast angestrebt werden, da dadurch der Einsatz von Triebfahrzeugen mit einer definierten Leistung möglich und eine möglichst hohe Beladung von Güterwagen sichergestellt wird.

Bereits jetzt werden, wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, bei Erneuerungen des Oberbaus von Schmalspurbahnen in Österreich oft Bauteile verbaut, die eine höhere Belastung des Oberbaus ermöglichen als sie durch die maximale Achs- und Meterlast festgelegt sind. Bei Brückenbauwerken senkt zudem eine Auslegung für höhere Lasten den Instandhaltungsaufwand für diese Bauwerke massiv (Obholzer und Schreiner, Interview vom 7.11.2022). Für Schmalspurbahnen der Spurweite von 760 mm scheint dabei eine Achslast von 12,5 t, wie sie auf mehreren Schmalspurbahnen in Österreich angewendet wird (siehe Tabelle 3.3), zielführend. Unter dieser Achslast können beispielsweise die modernen Diesellokomotiven des Typs D75 BB-SE eingesetzt werden (Gmeinder Lokomotiven GmbH o. D.). Da der Güterverkehr auf der Schiene in Konkurrenz zum Straßengüterverkehr steht, sollte eine möglichst hohe Zuladung der Güterwagen angestrebt werden. Um diese zu erreichen, ist eine hohe Meterlast notwendig. Beispielsweise halten die sechssachsigen Holzgüterwagen der Zillertalbahn bei einer Zuladung von über 41 t und einer Gesamtmasse von 54,5 t zwar eine Achslast von unter 10 t ein (siehe Tabelle 4.2), allerdings ergibt sich bei einer Länge von 9 m (siehe Abb. 4.3) eine Meterlast von rund 6 t/m, die von der Infrastruktur aufgenommen werden muss. Durch diese hohe Zuladung ersetzt ein Güterwagen der Zillertalbahn mehr als einen LKW, der laut § 4 Abs. 7a Kraftfahrzeuggesetz (BGBl. Nr. 267/1967, zuletzt geändert durch BGBl. I Nr. 134/2020) eine Gesamtmasse von maximal 40 t, im kombinierten Verkehr von 44 t aufweisen darf.

6.4.4 Überarbeitung des Lichtraumprofils

Vergleicht man das derzeit in Österreich für Schmalspurbahnen geltende Lichtraumprofil mit jenem in der Schweiz (siehe Abb. 3.3), so fällt auf, dass das reguläre Lichtraumprofil in Österreich viel gedrungener als jenes in der Schweiz ist, also eine geringere Höhe über Schienenoberkante (SOK) und eine rundere Form aufweist. Zudem ist in Österreich für Schmalspurfahrzeuge, im Gegensatz zur Schweiz, keine Fahrzeugbegrenzungslinie festgelegt. Außerdem haben sich, wie in Abschnitt 3.3 erläutert, aufgrund der fehlenden Weiterentwicklung des Lichtraums bei verschiedenen Bahnbetreiber:innen unterschiedliche Lichtraumprofile herausgebildet. Dieser Umstand erschwert den Austausch von Fahrzeugen zwischen den Bahnen.

Wie in Abschnitt 6.2.4 beschrieben, erschwert das kleine Lichtraumprofil auf Schmalspurbahnen in Österreich den Transport von ISO-Containern und anderen Ladungsträgern des Intermodalen Verkehrs. Da die Anpassung bestehender Strecken an ein neues Lichtraumprofil in vielen Fällen aufwendig ist, sollte für Strecken ohne größere lichtraumeinschränkende Bauwerke ein eigenes Lichtraumprofil für den intermodalen Verkehr eingeführt werden (siehe Abb. 6.2). Nimmt man die schmalspurigen Containertragwagen der Steiermarkbahn mit einer Ladehöhe von 820 mm (Greiner, E-Mail vom 3.10.2022) als Basis, so muss bei einer Höhe des ISO-Containers von

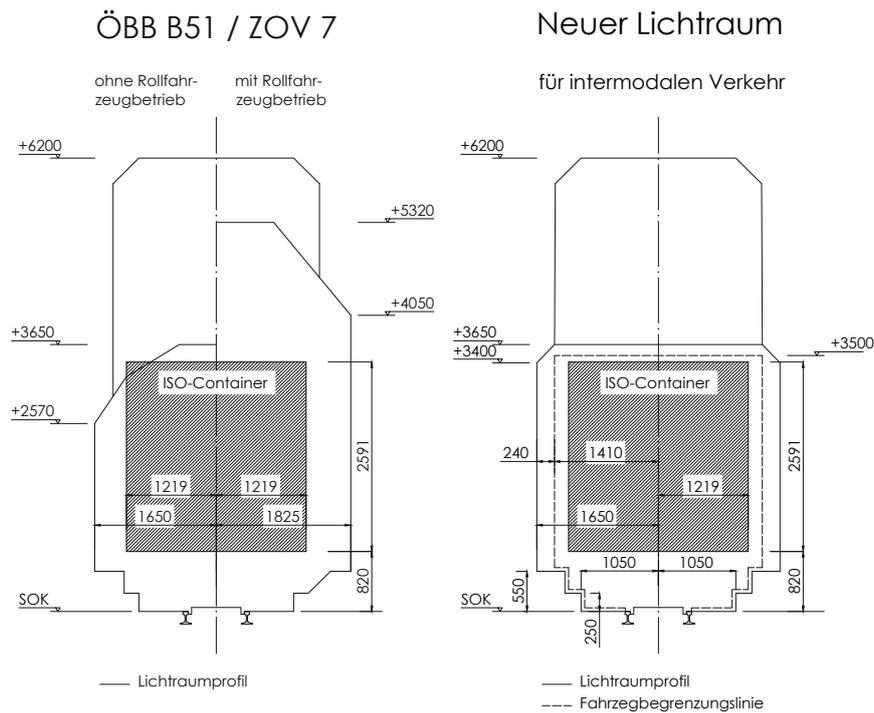


Abb. 6.2: Vorschlag für einen angepassten Lichtraum für den intermodalen Verkehr

2.591 mm (8'-6") (ISO 2020) und einem dem Schweizer Lichtraum entsprechenden horizontalen Abstand zwischen Fahrzeugbegrenzungslinie und Lichtraum von 50 mm für dynamische Effekte während der Fahrt (BAV 2020a), die Höhe des Lichtraums mindestens 3461 mm über SOK betragen. Aufgerundet wird eine Eckhöhe von 3.500 mm vorgeschlagen (siehe Abb.). Bezüglich der Breite besteht bei einem Maß von 2.438 mm für den ISO-Container (ISO 2020) oder auch 2.550 mm für den UIC-Binnencontainer (Gronalt et al. 2010) und einem wie in der Schweiz geltenden Zuschlag von beidseitig 240 mm kein Bedarf für eine Erweiterung des Lichtraumprofils. Eine Eckhöhe von 3.500 mm ermöglicht zudem den Transport von Abrollcontainern (ACTS-Container), da bahnverladbare ACTS-Container eine Höhe von unter 2.600 mm aufweisen (ACTS AG o. D.).

6.4.5 Fahrzeuge für den Güterverkehr

6.4.5.1 Triebfahrzeuge

Wie bereits im Abschnitt 4.2 formuliert, besteht im Güterverkehr ein Interesse an der Beförderung möglichst großer Lasten im Zugverband. Aus diesem Grund ergeben sich gewisse Anforderungen an Triebfahrzeuge und Waggonen. Im Bereich der Triebfahrzeuge wird eine möglichst hohen Zugkraft gefordert, die einerseits durch die Reibungsmasse und andererseits durch die Leistung der Triebfahrzeuge beschränkt ist. Wie der Vergleich üblicher Triebfahrzeuge auf Schmalspurbahnen (siehe Tabelle 4.1) zeigt, weisen Triebfahrzeuge auf Schweizer Meterspurbahnen im Allgemeinen höhere Leistungen auf, als Fahrzeuge auf einer Spurweite von 760 mm in Österreich. Hier zeigt sich der Einfluss höherer Achslasten, wie sie auf Schweizer Schmalspurbahnen vorherrschen (siehe Abschnitt 3.4.1). Außerdem zeigt sich, dass mit Elektrotraktion höhere Leistungen realisierbar sind. So konzipierte der ehemalige österreichische Hersteller Simmering-Graz-Pauker AG (SGP) in den 1980ern eine Elektrolokomotive für den Güterverkehr auf der Mariazellerbahn, die

bei 10 t Achslast eine Traktionsleistung von 1525 kW und eine Anfahrzugkraft von 130 kN aufweist (Simmering-Graz-Pauker AG 1988). Damit werden weit höhere Leistungen als bei den derzeit stärksten Diesellokomotiven auf einer Spurweite von 760 mm Gmeinder D75 BB-SE erreicht (Gmeinder Lokomotiven GmbH o. D.).

Als Alternative zu Lokomotiven können, wie in der Schweiz, Triebwagen des Personenverkehrs eingesetzt werden. Dafür hält beispielsweise die Rhätische Bahn die mit einer Leistung von bis zu 2.800 kW und einer Anfahrzugkraft von 280 kN ausgerüsteten „Allegra“-Triebwagen vor (Schöning und Zimmermann 2012). Auf Schmalspurbahnen in Österreich würden für einen derartigen Einsatz am ehesten die ET 1–9 der NÖVOG mit einer Leistung von 1.200 kW und einer Anfahrzugkraft von 140 kN (Stadler Rail Group o. D.) in Frage kommen, während die Dieseltriebwagen StB VT 31–35 bzw. die baugleichen Triebwagen ex-ÖBB 5090 mit einer Leistung von 220 bis 250 kW (Steiermärkische Landesbahnen 1994) weniger geeignet scheinen. Neben einer ausreichenden Traktionsleistung müssen die Wagenkästen der Fahrzeuge eine den Belastungen des Güterverkehrs entsprechende Festigkeit aufweisen (Ihme 2019).

6.4.5.2 Güterwagen

Bei Güterwagen soll die Zuladung möglichst maximiert werden. Diese wird einerseits durch die Belastbarkeit der Streckeninfrastruktur und andererseits durch das Eigengewicht der Fahrzeuge beschränkt. Der Vergleich unterschiedlicher Güterwaggons zeigt, dass durch die Konstruktion der Güterwaggons die „Totlast“ reduziert werden kann. Als Beispiel für einen Wagen mit einem vergleichsweise niedrigen Totlastanteil können die zu Holztransportwagen umgebauten Rollwagen der Zillertalbahn genannt werden (siehe Tabelle 4.2). Die Achslast dieser Wagen reduziert sich durch die Verwendung sechssachsiger Rollwagen. Zu beachten ist allerdings, dass sich, wie bereits in Abschnitt 6.4.3 angemerkt, für diese Fahrzeuge eine relativ hohe Meterlast ergibt. Aufgrund des Umstandes, dass in den letzten Jahrzehnten der Rollwagenbetrieb auf allen Schmalspurbahnen in Österreich, mit Ausnahme der Zillertalbahn, aufgegeben wurde (siehe Abschnitt 1.5), wäre zu prüfen, ob weitere überzählige Rollwagen zu Güterwagen umgebaut werden können.

Hinsichtlich des Lichtraums zeigt sich, dass der Transport von Ladungsträgern des intermodalen Verkehrs, wie ISO-Container, den Lichtraum österreichischer Schmalspurbahnen (siehe Abschnitt 6.2.4) überschreitet. Neben der Einführung eines eigenen Lichtraumprofils für den Transport von Ladungsträgern des intermodalen Verkehrs (siehe Abschnitt 6.4.4) besteht auch die Möglichkeit, Fahrzeuge mit einer niedrigen Bodenhöhe zu verwenden. Als Beispiel kann der von der Rhätischen Bahn verwendete Flachwagen der Gattung *Sb* genannt werden. Dieser weist eine Bodenhöhe von nur 595 mm über SOK auf (Rhätische Bahn AG o. D.[e]). Wie Förster (2022) in seiner Arbeit hinweist, muss für einen Containertransport auf einer Spurweite von 760 mm bei Verwendung des österreichischen Lichtraums ohne Rollfahrzeugbetrieb die Bodenhöhe der Waggons noch weiter gesenkt werden – ein Umstand, der einer gesonderten Untersuchung bedarf. Ein Vorteil von Containertransportwagen besteht in der normierten Schnittstelle zwischen ISO-Container und Wagen. Dadurch können Containertransportwagen mit diversen Aufbauten, wie sie beispielsweise von der Firma Innofreight hergestellt werden (Innofreight 2021), versehen werden, womit ein flexibler Einsatz der Waggons je nach anfallendem Transportgut möglich ist.

6.4.6 Möglichkeiten des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen in Österreich

Durch das Ziel der Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene (siehe Abschnitt 1.2) stellt sich die Frage, ob neben den drei Schmalspurbahnen mit regelmäßigem Verkehr in Österreich aus Sicht der Infrastruktur auf weiteren Schmalspurbahnen Güterverkehr angeboten werden kann. Nimmt man die zulässige Achslast der Schmalspur-Infrastruktur in Österreich als

Kriterium, liegt diese neben der Zillertalbahn, auf der bereits jetzt Güterverkehr angeboten wird, bei drei Bahnen bei 12,5 t oder darüber: der Pinzgauer Lokalbahn, der Mariazellerbahn sowie der Atterseebahn (siehe Tabelle 3.3). Auf der Pinzgauer Lokalbahn wurde bis ins Jahr 2020 Güterverkehr mit Rollwagen angeboten. Nach Abbau der Verladeanlage in Zell am See besteht diese Möglichkeit nicht mehr. Darüber hinaus muss nach dem im Zuge des zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit laufenden Wiederaufbaus der Bahn nach den schweren Unwetterschäden des Jahres 2021 geprüft werden, ob die dabei gewählten Trassierungsparameter Güterverkehr erlauben. Gleichzeitig besitzt die Pinzgauer Lokalbahn vier Stück der modernen Diesellokomotiven des Typs Gmeinder D75 BB-SE, die durch ihre große Reibungsmasse und Zugkraft für den Güterverkehr geeignet sind (Oberkalmsteiner 2022). Durch den ehemaligen Rollwagenverkehr besteht zudem ein großzügiges Lichtraumprofil. Auf der Pinzgauer Lokalbahn wäre folglich ein Verkehr mit eigenen Schmalspur-Güterwagen, auch im intermodalen Verkehr, möglich. Angesichts des dichten Personenzugangebots muss der mögliche Umfang des Güterzugangebots separat geprüft werden.

Auch auf der Mariazellerbahn besteht mit 12,5 t eine hohe zulässige Achslast. Hier wurde bis 1999 Güterverkehr, unter anderem mit Rollwagen, angeboten. Inzwischen wurden allerdings, wie bereits beschrieben, Überhöhungen von bis zu 70 mm eingebaut, womit ein Rollfahrzeugbetrieb in Abschnitten mit derartiger Trassierung nicht mehr möglich ist. Außerdem besteht die Rollwagengrube in St. Pölten Alpenbahnhof nicht mehr. Da der reguläre Verkehr auf der Mariazellerbahn heute mit Triebwagen abgewickelt wird und die Elektrolokomotiven der Reihe E (ex ÖBB 1099) bereits ein Alter von über 100 Jahren erreicht haben, wäre auf der Mariazellerbahn ein Güterverkehr mit Triebwagen nach dem Vorbild der Schweiz eine Option. Mit einer Leistung von 1.200 kW und einer Anfahrzugkraft von 140 kN (Stadler Rail Group o. D.) weisen die elektrischen Triebwagen der ET 1–9 eine höhere installierte Leistung auf als die derzeit auf einer Spurweite von 760 mm eingesetzten Diesellokomotiven (siehe Tabelle 4.1). Ein solcher Einsatz wäre im Verkehr von und nach Mariazell eine Option, falls der Fahrplan der Personenzüge dies erlaubt. Auf der Talstrecke zwischen St. Pölten und Loich bestand bis 1999 Güterverkehr mit Rollwagen (Felsinger 2002), hier ist eventuell der Einsatz von Container-Tragwagen möglich. Da ein Verkehr mit Personenzügen mit Güterbeförderung aufgrund der kurzen Halte in den Bahnhöfen nur zwischen den Endpunkten der Züge realistisch scheint, könnten im Nahbereich von St. Pölten potentielle Güterkunden mit einem eigenen Fahrvershub bedient werden. Kurzfristig wären dafür Dieselfahrzeuge geeignet, bei entsprechender Nachfrage wäre die Beschaffung von Elektro- oder Zweikraftlokomotiven für diese Aufgabe zu überlegen.

Als dritte Bahn mit hoher Belastbarkeit der Infrastruktur kann die meterspurige Atterseebahn genannt werden. Hier beträgt die zulässige Achslast über 18 t bei einer Meterlast von 6 t/m. Der Personenverkehr auf der Atterseebahn wird inzwischen mit leichten, straßenbahnähnlichen, Fahrzeugen betrieben, die wenig für den Güterverkehr geeignet sind. Im Bestand des Betreibers der Bahn (Stern & Hafferl) findet sich allerdings der ehemalige Schweizer Triebwagen XET 23 111, der heute als Arbeitsfahrzeug dient (Eisenbahn Österreich 2021b). Mit 376 kW Leistung hat dieses Fahrzeug eine ähnliche Leistung wie die von der Aare Seeland Mobil (Asm) im Güterverkehr eingesetzten Triebwagen. Dementsprechend könnte bei Bedarf auch auf der Atterseebahn ein Triebwagen im Güterverkehr eingesetzt werden (Seifert 2021). Zudem besteht im Bereich des Bahnhofs Vöcklamarkt eine Ladestelle mit Anschluss an das normalspurige Netz der ÖBB-Infrastruktur.

Zwei weitere Schmalspurstrecken mit einer geringeren zulässigen Achs- und Meterlast, aber entsprechenden Streckenlängen, sind die Waldviertler Schmalspurbahnen Gmünd – Groß Gerungs (43 km) sowie Gmünd – Litschau (23 km). Hier liegt die zulässige Achslast für Wagen bei 10 t und die zulässige Meterlast bei 5,5 t (siehe Tabelle 3.3). Auf den Waldviertelbahnen wurde bis 2001 Güterverkehr mit Rollwagen angeboten, wobei hier allerdings mittlerweile keine Rollwagengrube

mehr besteht. Da ehemals das große Lichtraumprofil für Rollfahrzeugverkehr angewendet wurde, sind beispielsweise die Tunnel entlang der Strecke mit einem großen Tunnelprofil ausgestattet, welches den Transport von intermodalen Ladungsträgern erlaubt. Bezüglich der geringen Achslast wäre der Einsatz von ehemaligen sechssachsigen Rollwagen mit entsprechenden Aufbauten eine Option. Im Bereich des Bahnhofs Gmünd müssten allerdings Anlagen zum Umschlag der Güter auf die Normalspur wiederhergestellt werden.

Die erwähnten Beispiele zeigen, dass seitens der Infrastruktur auch auf anderen Schmalspurbahnen in Österreich potentiell Güterverkehr möglich wäre. Da die Betrachtung der Bahnen in diesem Abschnitt nur sehr oberflächlich erfolgte, sind dazu noch nähere Untersuchungen notwendig. Außerdem wurde nicht untersucht, ob überhaupt Bedarf nach Güterverkehr besteht bzw. ob dieser generiert werden kann. Bezüglich Umladen auf andere Verkehrsträger kann festgehalten werden, dass ein solches bei vielen Gütern mit einfacher Infrastruktur (Bagger, Gabelstapler, Reach Stacker,...) bewerkstelligt werden kann (siehe Abschnitt 4.1).

6.5 Weiterer Forschungsbedarf

Wie bereits im Abschnitt 6.3 beschrieben wurde, deckt die vorliegende Arbeit keine, die Bereiche der Infrastruktur und des Betriebs überschreitende, Themen wie Ökologie oder Wirtschaftlichkeit des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen ab. Zum Thema der volkswirtschaftlichen Bedeutung von Schmalspurbahnen in Österreich konnte im Zuge der Recherche zu dieser Arbeit lediglich die Untersuchung von Nebenbahnen durch die Österreichische Raumordnungskonferenz Ende der 1970er gefunden werden (Standort + Markt Beratungsgesellschaft 1980). Zwar gab es vereinzelt neuere Untersuchungen des Potentials von Güterverkehr auf Schmalspurbahnen, wie die *Potential- und Umfeldanalyse Güterverkehr* des Österreichischen Instituts für Raumplanung (ÖIR GmbH o. D.), jedoch sind diese nicht öffentlich zugänglich. Hinsichtlich der Ermittlung des Potentials der noch vorhandenen Schmalspur-Infrastruktur für den Güterverkehr sind derartige Untersuchungen für alle Strecken sinnvoll. Zudem sollten im Sinne einer inter- bzw. transdisziplinären Forschung neben volkswirtschaftlichen auch sozialwissenschaftliche Aspekte des Themas untersucht werden. Einen solchen Aspekt könnten Auswirkungen auf die Demographie einer Region durch das Verkehrsangebot auf einer Schmalspurbahn darstellen.

Forschungsbedarf besteht außerdem hinsichtlich wirtschaftlich günstiger Betriebsformen des Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen. Zwar beschäftigte sich Ringseisen (2013) mit monetären Aspekten des Rollbock- und Rollwagenbetriebs, allerdings fehlt eine Gegenüberstellung mit jenem Güterverkehr, der mit Schmalspur-Güterwagen abgewickelt wird.

Hinsichtlich Trassierungsrichtlinien für Schmalspurbahnen bestehen einzelne Arbeiten, wie jene von Fellinger (2017) oder Neuhold et al. (2018), wobei letztere nicht publiziert wurde. In der vorliegenden Arbeit wurden Anregungen für Anpassungen der Grenzwerte für die Trassierung von Schmalspurbahnen gegeben. Um diese in eine österreichweit gültige Richtlinie zu überführen, sind allerdings noch genaue Kontrollrechnungen sowie Fahrversuche notwendig. Nach Veröffentlichung einer derartigen Richtlinie muss die Eignung der vorhandenen Schmalspur-Infrastruktur für den Güterverkehr jede Strecke einzeln untersucht werden.

Abkürzungen

AB-EBV Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung

ACTS Abrollcontainer Transportsystem

Asm Aare Seeland mobil AG

BAV Bundesamt für Verkehr

BFZ Betriebsführungszentrale

BMK Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

bzw. beziehungsweise

CEN Comité Européen de Normalisation / Europäisches Komitee für Normung

DV Dienstvorschrift

EBO Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

EisbVO Eisenbahnverordnung

EN Europäische Norm

ESBO Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen

FBS Fahrplanbearbeitungssystem

FDV Schweizerische Fahrdienstvorschriften

FSV Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr

GUZ Güterumschlagzentrum

IR Interregio

iRFP Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung

ISO International Organization for Standardization / Internationale Organisation für Normung

JŽ Jugoslovenske Železnice / Jugoslawische (Staats-)Bahnen

LKW Lastkraftwagen

LSVA Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe

lt. laut

m ü. A. Meter über Adria (Pegel Triest 1875)

MStE Lokalbahn Mixnitz – St. Erhard

NÖVOG Niederösterreichische Verkehrsorganisationsgesellschaft / Niederösterreich Bahnen

REX Regionalexpress

RhB Rhätische Bahn

ROLA Rollende Landstraße

RTE Regelwerk Technik Eisenbahn

RVE Richtlinien und Vorschriften für das Eisenbahnwesen

SCHIG Schieneninfrastruktur-Dienstleistungsgesellschaft

SGP Simmering-Graz-Pauker AG

SOK Schienenoberkante

StLB Steiermärkische Landesbahnen

u.a. unter anderem

usw. und so weiter

v.a. vor allem

WSB Wynental- und Suhrentalbahn

z.B. zum Beispiel

ZB Zillertalbahn

ZOV Zusatzbestimmungen Oberbauvorschrift

zw. zwischen

ÖBB Österreichische Bundesbahnen

ÖPNV Öffentlicher Personennahverkehr

Literatur

- Absenger, J. (2016). *Infrastruktur und öffentliche Rahmenbedingungen*. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. ISBN: 978-3-7001-7922-1.
- ACTS AG (o. D.). *ACTS-Container*. Online unter: <https://www.actsag.ch/de/produkte/container> [Zugriff am 18.12.2022].
- Bärtschi, H.-P. (2019). *Schweizer Bahnen 1844-2024: Mythos, Geschichte, Politik*. Zürich: Orell Füssli Verlag. ISBN: 978-3-280-05691-2.
- BAV (2020a). *Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung*. Bern.
- (2020b). *Schweizerische Fahrdivensvorschriften FDV*. Bern.
- Beier, R. (2022a). „Ausweitung des Güterverkehrs“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 4/2022, S. 216–217. ISSN: 1663-5248.
- (2022b). „Biertransporte auf der Murtalbahnhof?“ In: *Eisenbahn Österreich* 9/2022, S. 480. ISSN: 1421-2900.
- Berndt, T. (2001). *Eisenbahngüterverkehr: mit 50 Tabellen*. 1. Aufl.. Stuttgart [u.a.]: Teubner. ISBN: 978-3-519-06387-2.
- Bernegger GmbH (o. D.). *Bernegger verlagert den Transport hochwertiger Rohstoffe nachhaltig auf die Schiene*. Online unter: <https://www.bernegger.at/index.php/ueber-uns/308-bahnverladung.html> [Zugriff am 18.11.2022].
- Bogner, A., B. Littig und W. Menz (2014). *Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung*. Qualitative Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-19415-8. DOI: 10.1007/978-3-531-19416-5.
- Bopp, B., P. Braess und U. Weidmann (2016). „Das reale Verhalten lückenlos verschweißter Gleise in kleinen Radien in Meterspur“. In: *Eisenbahn Österreich* 3/2016, S. 124–130. ISSN: 1421-2900.
- Bruns, R. (2020). „Flurförderfahrzeuge“. In: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme*. Hrsg. von B. Bender und D. Göhlich. 26. Ausgabe. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-59715-6. DOI: 10.1007/978-3-662-59715-6.
- Bundesministerium für Klimaschutz (Nov. 2018). *Österreich-Wien: Öffentlicher Schienentransport/ Öffentliche Schienenbeförderung 2018/S 229-524862. Vorinformation für öffentliche Dienstleistungsaufträge*. Online unter: <https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:04a29e2d-a8af-4c40-bdb7-c6ceb942f291/at0.pdf> [Zugriff am 6.1.2023].
- (2021). *Mobilitätsmasterplan 2030 - Neuausrichtung des Mobilitätssektors*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- CEN (2010). *EN 1991-2 - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Brüssel.
- (2016). *EN 14363 - Bahnanwendungen - Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche*. Brüssel.
- (2017). *EN 13803 - Bahnanwendungen - Oberbau - Trassierungsparameter - Spurweiten 1 435 mm Und Größer*. Brüssel.
- (2021). *EN 15528 - Bahnanwendungen - Streckenklassen zur Behandlung der Schnittstelle zwischen Lastgrenzen der Fahrzeuge und Infrastruktur*. Brüssel.

- cia.gov (Nov. 2022). *Japan*. Online unter: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/japan/> [Zugriff am 25.11.2022].
- Dede, J. und U. Reimann (2014). „Nadals Gleichung, erweitert um den Anlaufwinkel“. In: *ZEV Rail* 4/2014, S. 210–215. ISSN: 1618-8330.
- DIN (Dez. 2021). *DIN 30722-1 Abrollkipperfahrzeuge, Abrollbehälter – Allgemeine Anforderungen und Kennzeichnung*. Berlin.
- Divall, C. (2003). „Railway imperialism, railway nationalism“. In: *Die Internationalität der Eisenbahn 1850-1970*. Hrsg. von M. Burri, K. Elsasser und D. Gugerli. Zürich: Chronos. ISBN: 978-3-0340-0648-4.
- Edlinger, S. J. (2020). „Variantenvergleich und Ausarbeitung Betriebskonzept für die Lokalbahn Zell am See - Kaprun“. Diplomarbeit. TU Wien. DOI: 10.34726/hss.2020.57339.
- Eisenbahn (1985). „St&H; VA“. In: *Eisenbahn* 4/1985, S. 56.
- Eisenbahn Österreich (2018). „Schwedische Schüttgutwägen für Katalonien“. In: *Eisenbahn Österreich* 8/2018, S. 430. ISSN: 1421-2900.
- (2021a). „Teileinstellung der Citybahn Waidhofen“. In: *Eisenbahn Österreich* 2/2021, S. 65. ISSN: 1421-2900.
- (2021b). „Triebfahrzeuge der Privatbahnen sowie Fahrzeuge der Strassenbahn- und Obusbetriebe in Österreich. Stand 1. Jänner 2021“. In: *Eisenbahn Österreich* 3/2021, S. 122–123. ISSN: 1421-2900.
- Faller, P., W. Stöhr und M. Matelka (1980). *Die Nebenbahnen in Österreich: ihre verkehrs- und raumwirtschaftliche Bedeutung. a. Globalanalyse und vergleichende Einzelbewertung*. Wien: Eigenverl. d. Geschäftsstelle d. Österr. Raumordnungskonferenz ÖROK.
- Fellinger, L. (2017). „Trassierungsrichtlinien von Schmalspurbahnen: Maßnahmen zur Effizienz- und Potenzialsteigerung der Schmalspurtrassierungsrichtlinie in Österreich“. Diplomarbeit. FH St. Pölten.
- Felsinger, H. (2002). *Die Mariazellerbahn*. 3., erw. Aufl.. Wien: Pospischil.
- Fengler, W. (2016). „Bahnanlagen“. In: *Handbuch das System Bahn*. Hrsg. von E. Jänsch. 2., komplett überarbeitete Auflage. Hamburg: Eurailpress, S. 364–414. ISBN: 978-3-87154-511-5.
- Fiedler, J. und W. Scherz (2012). *Bahnwesen: Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen*. 6., neu bearb. u. erw. Aufl.. Köln: Werner. ISBN: 978-3-8041-1625-2.
- Filipović, Ž. (2005). *Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. 4., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-26438-5. DOI: 10.1007/b137584.
- Fladerer, H. (2016a). „Land Steiermark verkauft Feistritztalbahn“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 5/2016, S. 217. ISSN: 1663-5248.
- (2016b). „Starker Verkehr auf der Lokalbahn Mixnitz - St. Erhard“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 6/2016, S. 303. ISSN: 1663-5248.
- Fladerer, H. (1984). „StLB VL 22 Ex. JŽ 740-023“. In: *Eisenbahn* 8/1984.
- Förster, F. (2022). „Möglichkeiten des intermodalen Güterverkehrs auf Schmalspurbahnen“. Bachelorarbeit. TU Wien.
- Franz Knotz KG (Feb. 1980). *St.L.B Offener Trichterwagen Tm zweiachsig*. Typenzeichnung.
- Freystein, H., M. Muncke und P. Schollmeier (2015). *Handbuch Entwerfen von Bahnanlagen: Regelwerke, Planfeststellung, Bau, Betrieb, Instandhaltung*. 3., komplett überarb. Aufl.. Hamburg: Eurailpress. ISBN: 978-3-7771-0457-7.
- Gerber, U. (2019). „Auslegung des Eisenbahnoberbaus“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. 3. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-56062-4. DOI: 10.1007/978-3-662-56062-4.

- Gmeinder Lokomotiven GmbH (o. D.). *D75 BB-SE - Große Leistung auf schmaler Spur*. Online unter: <https://www.zagro-group.com/produkte/lokomotiven/d75-bb-se.html> [Zugriff am 3.11.2022].
- Göbel, C. und K. Lieberenz, Hrsg. (2013). *Handbuch Erdbauwerke der Bahnen: Planung, Bemessung, Ausführung, Instandhaltung*. 2. komplett überarb. Neuaufl.. Hamburg: Eurailpress in DVV Media Group. ISBN: 978-3-7771-0430-0.
- Gopalakrishnan, S. (2007). „In search of a SMOOTHER ride on narrow gauge track“. In: *Railway gazette international* 163.4, S. 214–217. ISSN: 0373-5346.
- Gräber, J. (2016). „Bremsen“. In: *Handbuch das System Bahn*. Hrsg. von E. Jänsch. 2., komplett überarbeitete Auflage. Hamburg: Eurailpress. ISBN: 978-3-87154-511-5.
- Gronalt, M., L. Höfler, D. Humpl, A. Käfer, H. Peherstorfer, M. Posset, H. Pripfl und F. Starkl (2010). *Handbuch intermodaler Verkehr: kombinierter Verkehr: Schiene - Straße - Binnenwasserstraße*. Wien: Bohmann. ISBN: 978-3-99015-002-3.
- Haarmann, A. (1891). *Das Eisenbahn-Geleise. Geschichtlicher Theil. Zweite Hälfte*. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann.
- Hardmeier, W. (2019). *Schmalspur-Güterverkehr in Österreich ab 1977: Fotozeitreisen mit Werner Hardmeier*. Wien: bahnmedien.at. ISBN: 978-3-903177-16-1.
- Harer, G., R. Kiss und S. Walter (2019). „Zukunft Muraltbahn - Ein komplexer Prozess zur Definition maßgeschneiderter Schmalspufahrzeuge“. In: *ZEV Rail* 143, S. 70–75. ISSN: 1618-8330.
- Hecht, M., O. Polach und U. Kleemann (2020). „Schienenfahrzeuge“. In: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme*. Hrsg. von B. Bender und D. Göhlich. 26. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-59715-6. DOI: 10.1007/978-3-662-59715-6.
- Heinersdorff, R. (1975). *Die k. u. k. privilegierten Eisenbahnen der österreichisch-ungarischen Monarchie: 1828 - 1918*. 1. Aufl.. Wien [u.a.]: Molden. ISBN: 978-3-217-00571-6.
- Hejda, G., A. Beyeler, W. In-Albon, K. Zingg, L. Risen und M. Kohler (2006). „Lückenlos verschweißte Gleise in kleinen Radien bei Meterspurbahnen“. In: *Eisenbahningenieur* 11/2006.
- Hofmann, E. und K. Gebert (2010). „Güterverkehrsrelevante Marktsegmente“. In: *Güterverkehr kompakt*. Hrsg. von W. Stölzle und H. P. Fagagnini. Lehrbuch kompakt. München: Oldenbourg. ISBN: 978-3-486-59003-6.
- Hörz, P. und M. Richter (Dez. 2011). „Preserved as Technical Monuments, Run as Tourist Attractions: Narrow-Gauge Railways in the German Democratic Republic“. In: *The Journal of Transport History* Volume 32, Issue 2, S. 192–213. ISSN: 0022-5266.
- Hötzelsperger, A. (Jan. 2022). *Neues von der Kiefersfeldner Wachtl-Bahn*. Online unter: <https://www.samerbergernachrichten.de/neues-von-der-kiefersfeldner-wachtl-bahn/> [Zugriff am 7.6.2022].
- Ihme, J. (2019). *Schienenfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-24923-6. DOI: 10.1007/978-3-658-24923-6.
- Innofreight (2021). *Jahresrückblick 2021*. Bruck an der Mur.
- iRFP (o. D.[a]). *Benutzerfreundlich, Simpel & Unkompliziert: Fahrplanerstellung in FBS*. Online unter: <https://www.irfp.de/fahrplanerstellung.html> [Zugriff am 13.1.2023].
- (o. D.[b]). *Die Anwendungsbereiche von FBS*. Online unter: <https://www.irfp.de/anwendungsbereiche.html> [Zugriff am 13.1.2023].
- ISO (2020). *ISO 668. Series 1 Freight Containers - Classification, Dimensions and Ratings*. seventh edition.
- Jänsch, E. (2016). „Schienenfahrzeuge“. In: *Handbuch das System Bahn*. 2., komplett überarbeitete Auflage. Hamburg: Eurailpress. ISBN: 978-3-87154-511-5.

- Jochim, H. E. und F. Lademann (2018). *Planung von Bahnanlagen: Grundlagen - Planung - Berechnung : mit zahlreichen Bildern, Tabellen und Beispielen*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44220-7.
- Kabelka (2008). „Salzburg übernimmt Pinzgauer Lokalbahn“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 9/2008, S. 6–8. ISSN: 1663-5248.
- Kache, M. (2016). „Vielseitig einsetzbar: Zweikraftlokomotiven“. In: *Eisenbahn Ingenieur Kompendium*. Hrsg. von Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure. Hamburg: Eurailpress, S. 119–138.
- Kaindl, A. (Nov. 2020). „Güterverkehr auf der Pinzgauer Lokalbahn ist nicht mehr möglich“. In: *Salzburger Nachrichten*, 9.11.2020, S. 11.
- Kaiser, W. (2003). *Schmalspurbahn-Paradies Österreich*. 1. Aufl.. München: GeraMond-Verl. ISBN: 978-3-7654-7183-4.
- Kaizler, C. (2020). „Abbruch der IRR-Dienstbahnbrücke zwischen Mäder und Kriessern“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 5/2020, S. 231. ISSN: 1663-5248.
- Katterfeld, A., F. Krause, W. Günthner und M. ten Hompel (2020). „Stetigförderer“. In: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme*. Hrsg. von B. Bender und D. Göhlich. 26. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-59715-6. DOI: 10.1007/978-3-662-59715-6.
- Kenning, L. (2022). *Güterverkehr auf schmaler Spurweite in Österreich: Band 1. Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Oberösterreich, Kärnten*. Nordhorn: Verlag Kenning. ISBN: 978-3-944390-22-2.
- Kirchdorfer Concrete Solutions (2015a). *Produktdatenblatt Betonschwelle L1*. Online unter: <https://www.concrete-solutions.eu/pog3/streckenschwellen/> [Zugriff am 30.10.2022].
- (2015b). *Produktdatenblatt Betonschwelle SS*. Online unter: <https://www.concrete-solutions.eu/pog3/streckenschwellen/> [Zugriff am 30.10.2022].
- Kleine Zeitung (2021). „Maßnahmen für die Murtalbahn“. In: *Kleine Zeitung*, 10.12.2021, S. 17.
- Knoll, B. (1998). „Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen“. Dissertation. TU Wien.
- Knoll, O. (1985). „Möglichkeiten einer Rationalisierung im Betrieb von Nebenbahnen bei gleichzeitiger Verbesserung des Verkehrsangebotes“. Diplomarbeit. TU Wien.
- Koch, K.-W. (2012). *Eisenbahnatlas Europa*. München: GeraMond. ISBN: 978-3-86245-120-3.
- Krobot, W. (1975). *Schmalspurig durch Österreich: Geschichte und Fahrpark der Schmalspurbahnen Österreichs*. 2., erw. Aufl.. Internationales Archiv für Lokomotivgeschichte. Wien: Slezak. ISBN: 978-3-900134-29-7.
- Kuderna, P. und C. Pühringer (2007). *ÖBB-Baureihe 2095*. Edition Bahn im Film. Wien: Bahn im Film. ISBN: 978-3-9502250-3-7.
- Lämmli, B. (2021). *Zug- und Stossvorrichtung*. Online unter: <https://www.lokifahrer.ch/Lukmanier/Rollmaterial/Kupplung/Zug-Druck.htm> [Zugriff am 11.11.2022].
- Land Steiermark (Juni 2018). „Strategie zur Zukunft der Murtalbahn wird vorgestellt“. In: *Pressepapier*, 28.6.2018.
- (März 2021). *Ausbau Murtalbahn*. Präsentation am 19.3.2021.
- (o.D.). *Murautakt*. Online unter: <https://www.verkehr.steiermark.at/cms/beitrag/10077164/17305714/> [Zugriff am 6.1.2023].
- Lassbacher, E. (2015). „Steiermärkische Landesbahnen (STLB); Aufräumaktion“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 4/2015, S. 202. ISSN: 1663-5248.
- (2017a). „Der Niedergang der „Krumpe““. In: *Schienenverkehr Aktuell* 11/2017, S. 543. ISSN: 1663-5248.
- (2017b). „Ybbsitz endgültig ohne Eisenbahn“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 11/2017, S. 544–545. ISSN: 1663-5248.

- Lassbacher, E. (2019). „Wieder Züge auf der "Krumpe"“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 9/2019, S. 465. ISSN: 1663-5248.
- Laux, H., R. M. Gillenkirch und H. Y. Schenk-Mathes (2018). *Entscheidungstheorie*. 10., aktualisierte und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Berlin: Springer Gabler. ISBN: 978-3-662-57817-9.
- Lay, E. und R. Rensing (2019). „Weichen“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. 3. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-56062-4. DOI: 10.1007/978-3-662-56062-4.
- Lueglinger, S. (2018). *Lexikon der österreichischen Schmalspur-Triebfahrzeuge*. Gifhorn: Verlag Ingrid Zeunert. ISBN: 978-3-945336-10-6.
- Machel, W.-D. (2011). *Enzyklopädie der deutschen Schmalspurbahnen: Geschichte, Strecken, Fahrzeuge*. München: GeraMond. ISBN: 978-3-86245-101-2.
- Marek, C. (1989). „Die Entwicklung der Schmalspurbahnen in Österreich: Anlagen- und betriebstechnische Analyse mit Verbesserungsmöglichkeiten, dargestellt am Beispiel der Schmalspurbahnen im Waldviertel“. Diplomarbeit. TU Wien.
- Martin, H. (2021). *Technische Transport- und Lagerlogistik*. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-34037-7. DOI: 10.1007/978-3-658-34037-7.
- Maschek, U. (2015). *Sicherung des Schienenverkehrs: Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik*. 3., überarb. u. erw. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-10758-1. DOI: 10.1007/978-3-658-10758-1.
- Matterhorn Gotthard Bahn (2022). *Geschäftsbericht 2021*. Brig.
- Menius, R. und V. Matthews (2020). *Bahnbau und Bahninfrastruktur: Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN: 978-3-658-27733-8. DOI: 10.1007/978-3-658-27733-8.
- Metz, K. (2012). „Quo vadis, Wagenladungsverkehr? Vor Weichenstellungen im Schweizer Binnengüterverkehr“. In: *Güterbahnen* 3/2012, S. 45–48. ISSN: 1610-5273.
- Mieg, H. A. und M. Näf (2005). *Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung*. 2. Auflage. Zürich: Institut für Mensch-Umwelt-Systeme (HES), ETH Zürich.
- Molitor, R. (1987). „Auswirkungen bei Stilllegungen von Nebenbahnen im Vergleich zu weiterbetrieblenen“. Diplomarbeit. TU Wien.
- Mörth, P. (Okt. 2022). „Zug um Zug in die Zukunft“. In: *Kleine Zeitung*, 26.10.2022, S. 18–19.
- Moser, A. (2020). „Neue Fahrzeuge auf der Lokalbahn Mixnitz - St. Erhard“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 3/2020, S. 128. ISSN: 1663-5248.
- N. N. (1958). *B 51/P - Oberbauvorschrift für Österreichische nicht vom Bunde betriebene Haupt- und Nebenbahnen*. Wien.
- Neuhold, J. (2014). „Die regionale Bedeutung von Eisenbahnstrecken am Beispiel der Murtalbahn“. Diplomarbeit. TU Graz.
- Neuhold, J., M. Smoliner und P. Veit (2018). *Optimierung Trassierungsparameter Murtalbahn*. Graz.
- Niederösterreich Bahnen (Feb. 2020). *Die Betriebsführungszentrale: Das Herz unserer Bahnen*. Online unter:
<https://blog.niederösterreichbahnen.at/die-betriebsfuehrungszentrale-das-herz-unserer-bahnen/> [Zugriff am 4.12.2022].
- (2022a). *Citybahn Waidhofen. Fahrplan 2023*. Online unter: <https://www.citybahn.at/fahrplan-cbw> [Zugriff am 4.12.2022].
- (Okt. 2022b). *Mariazellerbahn. Fahrplan und Angebote 2023*. Online unter: <https://www.mariazellerbahn.at/fahrplan-mzb> [Zugriff am 4.12.2022].
- Nördling, W. von (1871). *Stimmen über schmalspurige Eisenbahnen*. Wien: Lehmann & Wentzel.

- Novoszel, L. M. (2008). „Innovative Technologien im Kombinierten Verkehr: Transportbehälter - Umschlagtechnik - Waggonbau“. Diplomarbeit. TU Wien.
- ÖBB (1975). *ZOV 7: Zusatzbestimmungen zur Oberbauvorschrift DV B 51 - Umgrenzung des lichten Raumes*. Wien: Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen.
- (1980). *DV B52 Oberbau; Technische Grundsätze*. Wien: Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen.
- (1989). *DV V 7 Betrieb auf Schmalspurbahnen*. Wien: Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen.
- ÖBB-Infrastruktur AG (2012). *DV B 50 - Teil 3 Oberbauberechnung*. Wien.
- (2016). *Regelwerk 01.03. Linienführung von Gleisen*. Wien.
- Oberkalmsteiner, T. (2021). „Salzburg AG. Infrastrukturausbau im Pinzgau“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 1/2021, S. 50–51. ISSN: 1663-5248.
- (Feb. 2022). *Fahrzeugbestand Pinzgauer Lokalbahn. Stand 2.2.2022*.
- ÖIR GmbH (o. D.). *Potenzial- und Umfeldanalyse Güterverkehr Murtalbahnhof*. Online unter: <https://www.oir.at/project/potenzial-und-umfeldanalyse-gueterverkehr-murtalbahnhof/> [Zugriff am 19.12.2022].
- ÖÖVV (2022). *180 Atterseebahn. Vöcklamarkt - Attersee. Gültig ab 11.12.2022*.
- ÖROK (2021). *ÖROK-Regionalprognosen 2021 Bis 2050*. Wien: Eigenverlag.
- Orosz, C. und D. Bachmann (2016). „Green Future for Narrow Gauge Railways – Vision and Reality in Hungary“. In: *Road and Rail Infrastructure IV, Proceedings of the Conference CETRA 2016*. Hrsg. von S. Lakušić und Department of Transportation, University of Zagreb, S. 567–572. ISSN: 1848-9850.
- Österreichisches Institut für Raumplanung (1980). *Die Nebenbahnen in Österreich: ihre verkehrs- und raumwirtschaftliche Bedeutung. Teil 3. Bewertungsergebnisse und Empfehlungen / Österreichisches Institut für Raumplanung*. Wien: Eigenverl. d. Geschäftsstelle d. Österr. Raumordnungskonferenz ÖROK.
- Pachl, J. (2019). „Betriebsführung der Infrastruktur“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. 3. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-56062-4. DOI: 10.1007/978-3-662-56062-4.
- (2021). *Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-31164-3.
- Pawlik, C. (1924). „Entwicklung des Rechtes der Bahnen niederer Ordnung in Österreich“. Dissertation. Universität Innsbruck.
- Petrovitsch, H. (Juni 2022). „Rollwagenbeladung mit Überfahrbrücken im Zillertal“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 6/2022. ISSN: 1663-5248.
- Poetsch, G. (2016). „Fahrdynamik“. In: *Handbuch das System Bahn*. Hrsg. von E. Jänsch. 2., komplett überarbeitete Auflage. Hamburg: Eurailpress. ISBN: 978-3-87154-511-5.
- Rail Business (März 2010). „FEVE befördert 2009 weniger Jahrestonnage“. In: *Rail Business* 12/10, S. 7. ISSN: 1867-2728.
- (Juni 2011a). „Brohltalbahnhof: EVU profitabel, Infrastruktur muss Investitionen wieder einfahren“. In: *Rail Business* 23/11, S. 4. ISSN: 1867-2728.
- (Mai 2011b). „Euskokargo nimmt Güterverkehr auf“. In: *Rail Business* 22/11, S. 11. ISSN: 1867-2728.
- (Mai 2012). „Ministerrat billigt Zerschlagung der FEVE“. In: *Rail Business* 19/12, S. 4. ISSN: 1867-2728.
- (Juni 2014). „Rundholztransporte im Kombiverkehr“. In: *Rail Business* 23/2014, S. 7. ISSN: 1867-2728.
- (Apr. 2021). „Zwei Umspurprojekte in Arbeit“. In: *Rail Business* 15/21. ISSN: 1867-2728.

- Reithofer, R. (Nov. 2022). „Mit Volldampf in eine ungewissen Zukunft“. In: *Der Standard*, 3.11.2022, S. 19.
- Rellstab, M. (2007). „Müll auf schmaler Spur“. In: *Schweizer Eisenbahn-Revue* 10/2007. ISSN: 1022-7113.
- (2019). „RhB Mit Nachfragewachstum und vielen Bauprojekten“. In: *Eisenbahn Österreich* 2/2019, S. 95–97. ISSN: 1421-2900.
- Rhätische Bahn AG (2020). *Wechselbehälter. Kombiniert Strasse und Schiene*. Chur.
- (2022a). *Bündner Güterbahnen. Ökologisch sinnvolle Transporte auf der Schiene schonen die Umwelt*. Landquart.
 - (2022b). *Geschäftsbericht 2021*. Chur.
 - (o. D.[a]). *Abrollcontainer. Die Sache mit dem Hacken*. Chur.
 - (o. D.[b]). *Autoverlad Vereine*. Online unter: <https://www.rhb.ch/de/autoverlad-vereina> [Zugriff am 21.10.2022].
 - (o. D.[c]). *Baustellentransporte*. Online unter: <https://www.rhb.ch/de/buendner-gueterbahn/angebote/baustellentransporte> [Zugriff am 21.10.2022].
 - (o. D.[d]). *Flachwagen Typ «Re-t»*.
 - (o. D.[e]). *Flachwagen Typ «Sb»*.
 - (o. D.[f]). *Flachwagen Typ «Sgp»*.
 - (o. D.[g]). *Gedeckter Wagen Typ «Haik»*.
 - (o. D.[h]). *Güterumschlagszentrum Landquart - Das Tor zu Graubünden*.
 - (o. D.[i]). *GUZ Landquart*. Online unter: <https://www.rhb.ch/de/buendner-gueterbahn/bedienungspunkte/guz-landquart> [Zugriff am 21.10.2022].
 - (o. D.[j]). *Mineralöltransporte*. Online unter: <https://www.rhb.ch/de/buendner-gueterbahn/angebote/mineraloeltransporte> [Zugriff am 21.10.2022].
 - (o. D.[k]). *Offene Wagen Typ «Fac»*.
 - (o. D.[l]). *Offene Wagen Typ «Kk»*.
 - (o. D.[m]). *Rundholztransporte*. Online unter: <https://www.rhb.ch/de/buendner-gueterbahn/angebote/rundholztransporte> [Zugriff am 21.10.2022].
 - (o. D.[n]). *Silo Wagen Typ «Uac»*.
 - (o. D.[o]). *Silo Wagen Typ «Za»*.
 - (o. D.[p]). *Spezialtransporte*. Online unter: <https://www.rhb.ch/de/buendner-gueterbahn/gueterwagen/spezialtransporte> [Zugriff am 21.10.2022].
- Rhein-Schauen (o. D.). *Rhein-Schauen. Museum und Rheinbähnle*. Online unter: <https://www.rheinschauen.at/> [Zugriff am 7.6.2022].
- Rießberger, K. (2019). „Das Zusammenwirken von Rad und Schiene“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. 3. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-56062-4. DOI: 10.1007/978-3-662-56062-4.
- Ringseisen, P. (2013). „Erfolgsfaktoren für den Rollwagen- bzw. Rollbockbetrieb im Güterverkehr: Untersuchung von technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und möglichen Einsatzbereichen in Österreich“. Diplomarbeit. FH St. Pölten.
- Ritler, D., J. Schöning und N. Wiesent (2009). „„Allegra“ Der neue Zweistromtriebzug der Rhätischen Bahn“. In: *Eisenbahn Österreich* 8/2009. ISSN: 1421-2900.
- Röll, V. von (1917). *Enzyklopädie des Eisenbahnwesens: 8. Personentunnel - Schynige Platte-Bahn*. Berlin, Wien: Urban & Schwarzenberg.
- Salzburg Verkehr und Salzburg AG (2022). *Fahrplan Zell am See Lokalbahn - Krimml. Gültig ab 11.12.2022 bis auf Weiteres - Schienenersatzverkehr ab Niedernsill*.
- Schiendl, W. (2015). *Die Eisenbahnen in Bosnien und der Herzegowina: 1867 - 1918*. Wien: Verlag Bahn im Film. ISBN: 978-3-9503096-5-2.

- (2017). *Die Eisenbahnen in Bosnien und der Herzegowina: 1918 - 2016*. Wien: Verlag Bahn im Film. ISBN: 978-3-9503096-7-6.
- Schienen-Control GmbH (Juni 2022). *Jahresbericht 2021. Ihr Recht am Zug. Schienen-Control*. Techn. Ber. Wien.
- Schneider, M. und P. Seelmann (1986). „Die neuen Rollwagen der ÖBB WW/s 89700 Bis 89729“. In: *Modelleisenbahn* 5/1986.
- Scholten, J. (2020). „Hebezeuge und Krane“. In: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme*. Hrsg. von B. Bender und D. Göhlich. 26. Ausgabe. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-59715-6. DOI: 10.1007/978-3-662-59715-6.
- Schöning, J. und A. Zimmermann (2012). „Triebzüge für Schweizer Bahnen mit spezifischen Anforderungen“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 9/2012, S. 158–162. ISSN: 0013-2845.
- Schrempf, R. (2022). „Zillertalbahn. Land verzögert Beschaffung der Brennstoffzellenzüge“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 10/2022, S. 548–549. ISSN: 1663-5248.
- Schrön, M. (2015). „Strategien zur Kostenanlastung im motorisierten Straßenindividualverkehr“. Diplomarbeit. TU Wien.
- Seifert, C. (2021). *Schmalspurbahnen in der Schweiz: alle Lokomotiven und Triebwagen*. Stuttgart: transpress. ISBN: 978-3-613-71626-1.
- Sendlhofer, T. (März 2022). „Auf der Pinzgauer Lokalbahn sollen wieder Güter rollen“. In: *Salzburger Nachrichten*, 23.3.2022, S. 12.
- Sima, J. (2008). „Die Pferdeisenbahn Budweis - Linz - Gmunden: ein Beispiel der Technikgeschichte aus der Sicht des Denkmalschutzes“. Diplomarbeit. TU Wien.
- Simmering-Graz-Pauker AG, Hrsg. (1988). *Die neue Mariazellerbahn. Ein Fahrzeug- und Betriebskonzept*. Wien.
- Slezak, J. O. (1986). *Renaissance der Schmalspurbahn in Österreich*. Internationales Archiv für Lokomotivgeschichte. Wien: Slezak. ISBN: 978-3-85416-097-7.
- Smoliner, M. (2015). „Politische Aspekte des Eisenbahnbaues in Südosteuropa vor 1914“. Masterarbeit. Universität Graz.
- Stadler Rail Group (o. D.). *NIEDERFLURTRIEBZUG «HIMMELSTREPPE»*. NÖVOG/Mariazellerbahn.
- Stadlmann, B., F. Kaiser und S. Maihofer (2012). „Rechnergestütztes Zugleitsystem für die Pinzgauer Lokalbahn“. In: *Signal + Draht* 5/2012, S. 28–33. ISSN: 0037-4997.
- Stadlmann, B. und H. Zwirchmayr (2004). „Einfaches Zugleitsystem für Regionalstrecken“. In: *Signal + Draht* 6/2004, S. 11–16. ISSN: 0037-4997.
- Standort + Markt Beratungsgesellschaft (1980). *Die Nebenbahnen in Österreich: ihre verkehrs- und raumwirtschaftliche Bedeutung. b. Güterverkehr*. Wien: Eigenverl. d. Geschäftsstelle d. Österr. Raumordnungskonferenz ÖROK.
- Statistik Austria (Nov. 2020). *Verkehrsstatistik 2019*. Wien: Statistik Austria.
- Steiermarkbahn Transport und Logistik (o. D.[a]). *Gedeckter Güterwagen (Schmalspur) Glm*.
- (o. D.[b]). *Schmalspur-Plateauwagenverkauf Jkm, Jrm*.
- Steiermarkbahn und Bus (Dez. 2022a). *890. Neumarkt in Der Steiermark / Unzmarkt - Murau - Tamsweg (S). Gültig Ab 12. Dezember 2022*.
- (Dez. 2022b). *R630. Unzmarkt - Murau - Tamsweg (S). Gültig Ab 12. Dezember 2022*.
- Steiermärkische Landesbahnen (1994). *Die Murtalbahn. Steckbrief der zweitlängsten Schmalspurbahn Österreichs*. Graz. ISBN: 3-901474-00-5.
- Steiner, E. und M. Krüger (2022). „Verwerfungssichere durchgehend verschweißte Schmalspurgleise bei der Mariazellerbahn der Niederösterreich Bahnen (NÖVOG)“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 9/2022, S. 136–143. ISSN: 0013-2845.

- Straka, F. und M. Müller (2018). *Die Lokalbahn Mixnitz - St. Erhard: die Breitenauerbahn in Bildern*. Hrsg. von Railway Media Group. Wien: Railway-Media-Group. ISBN: 978-3-902894-40-3.
- Strässle, M. (2020). „Letzte österreichische Schmalspurbahn mit regelmäßigem Güterverkehr“. In: *Schienenverkehr Aktuell* 11/2020, S. 586–587. ISSN: 1663-5248.
- Taurachbahn Ges.m.b.H. (o. D.). *Taurachbahn – Touristikbahn im Lungau / Salzburger Land*. Online unter: <https://www.taurachbahn.eu/> [Zugriff am 2.1.2023].
- Tezak, S. (1987). *Bahn im Bild 56. Steiermärkische Landesbahnen IV: Murtalbahnen*. 1. Aufl.. Bahn im Bild. Wien: Pospischil.
- Thurnher, C. (Juli 2021). *Rheinbähnle verschwindet nach über 100 Jahren*. Online unter: <https://www.vol.at/rheinbaehnle-verschwindet-nach-ueber-100-jahren/7061162> [Zugriff am 7.6.2022].
- TU Wien (Mai 2022). *Eventtipp! Effizienter und klimafreundlicher Holztransport im österreichischen Leitprojekt PhysICAL*. Online unter: <https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/news/news/eventtipp-effizienter-und-klimafreundlicher-holztransport-im-oesterreichischen-leitprojekt-physical> [Zugriff am 13.1.2023].
- UIC (2004). *UIC Kodex 438-2: Kennzeichnung der Güterwagen*. 7. Ausgabe. Paris.
- Umweltbundesamt (2021). *Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren*. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news210119/sektoren> [Zugriff am 30.5.2022].
- Van der Mescht, J. (2002). „Providing a sustainable rail freight service on the Port Elizabeth-Avontuur narrow gauge railway“. In: *21st Annual South African Transport Conference 2002*.
- Verband öffentlicher Verkehr (2022). *R RTE 22546 - Geometrische Gestaltung der Fahrbahn - Meterspur*. Bern.
- Verkehrsclub Österreich (2009). *Murautakt neu in Abstimmung mit den Murauer Schulen*. <https://mobilitaetsprojekte.vcoe.at/murautakt-neu-in-abstimmung-mit-den-murauer-schulen>.
- Voithofer, M. (2013). „Neutrassierung der Pinzgauer Lokalbahn von Zell am See bis Mittersill“. Diplomarbeit. Universität Innsbruck.
- Wegenstein, P. (2007). *Österreichs Eisenbahnstrecken*. Wien: Verlag Pospischil.
- Weigend, M. (2019). „Trassierung und Gleisplangestaltung“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. 3. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-56062-4. DOI: 10.1007/978-3-662-56062-4.
- Weigend, W. (2016). „Produktions-, Angebots- und Kapazitätsplanung“. In: *Handbuch das System Bahn*. Hrsg. von E. Jänsch. 2., komplett überarbeitete Auflage. Hamburg: Eurailpress. ISBN: 978-3-87154-511-5.
- Weis, P. (2012). „Wiederaufbau der Pinzgauer Lokalbahn und deren organisatorische Abwicklung“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 3/2012, S. 71–76. ISSN: 0013-2845.
- Wittmann, H. (1994). *Das Buch der Murtalbahnen*. Graz: Steiermärk. Landesbahnen STL B, Direktion. ISBN: 978-3-901474-02-6.
- Woker, K. (2013). „Die meterspurige „Autometro“ in Katalonien“. In: *Eisenbahn Österreich* 3/2013, S. 131. ISSN: 1421-2900.
- Žežula, F. (1983). *Die Frühzeit der Schmalspurbahn*. Wien: Slezak. ISBN: 978-3-85416-086-1.
- Zillertaler Verkehrsbetriebe (2022). *Fahrplan 2023. Gültig ab 11.12.2022 bis 9.12.2023*.

Anhang A

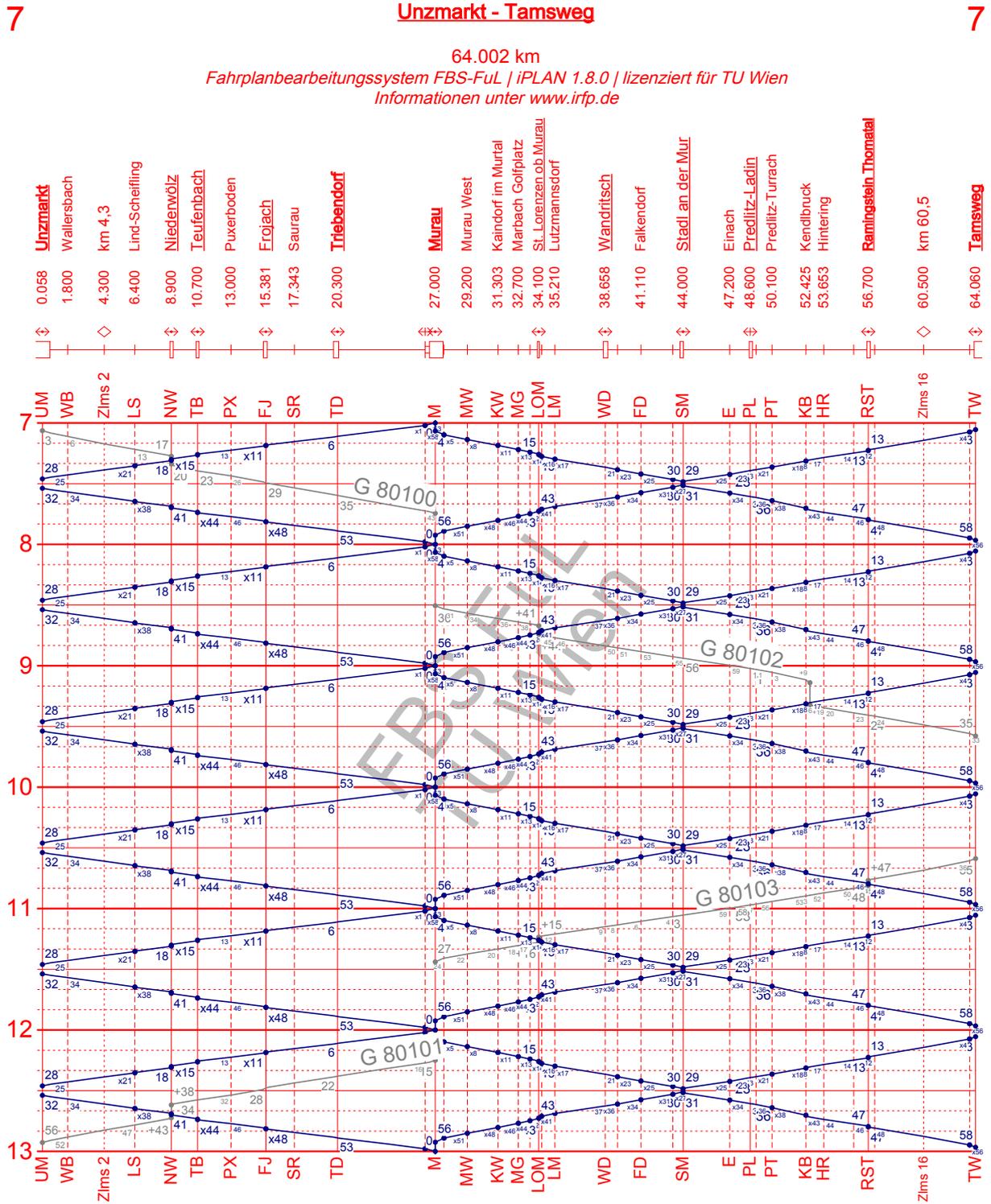
Musterfahrplan Murtalbahn

Tab. A.1: Angenommene Zielgeschwindigkeiten Unzmarkt - Murau

km	V_{neu}	$V_{Bestand}$ lt. SCHIG	Anmerkung
0,2 bis 1,8	65 km/h	45 - 55 km/h	Ausfahrt Unzmarkt - Hst. Wallersbach
1,8 bis 3,2	60 km/h	50 - 55 km/h	Bogenfolge bei Wallersbach
3,2 bis 4,0	80 km/h	45 - 70 km/h	gerade Strecke
4,0 bis 4,5	60 km/h	50 - 60 km/h	Bogenfolge
4,5 bis 6,0	80 km/h	50 - 60 km/h	Begradigung der Strecke
6,5 bis 7,0	70 km/h	60 km/h	große Bogenradien im Bestand
7,0 bis 7,8	80 km/h	60 - 65 km/h	Begradigung der Strecke
7,8 bis 9,0	80 km/h	60 - 65 km/h	gerade Strecke
9,2 bis 10,0	80 km/h	60 - 70 km/h	große Bogenradien im Bestand
11,0 bis 12,5	80 km/h	60 - 70 km/h	Anpassung Bogenradien
12,5 bis 13,7	80 km/h	60 - 70 km/h	gerade Strecke
14,2 bis 15,1	80 km/h	60 km/h	gerade Strecke
16,2 bis 17,5	80 km/h	55 - 70 km/h	Begradigung der Strecke
17,5 bis 18,2	80 km/h	55 - 60 km/h	gerade Strecke
18,2 bis 18,4	80 km/h	55 km/h	Anpassung Bogenradius
18,4 bis 19,5	80 km/h	60 - 70 km/h	gerade Strecke
20,7 bis 21,9	80 km/h	55 - 60 km/h	große Bogenradien im Bestand
22,6 bis 24,7	80 km/h	55 - 70 km/h	große Bogenradien im Bestand
24,9 bis 26,3	80 km/h	60 - 70 km/h	große Bogenradien im Bestand

Tab. A.2: Für die Fahrplanerstellung verwendete Zuggarnituren

Szenario	Abschnitt	Triebfahrzeug	Anhängelast
GV Bestand	Unzmarkt - Murau	ZV D 10	2 SSrm + 2 ZZm + 4 Jkrm (240 t)
GV Bestand	Murau - Tamsweg	ZV D 10	4 Jkrm (80 t)
PV Bestand	Unzmarkt - Tamsweg	NÖVOG VT 8-14	-
PV Zukunft	Unzmarkt - Tamsweg	NÖVOG ET 1-9	-



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

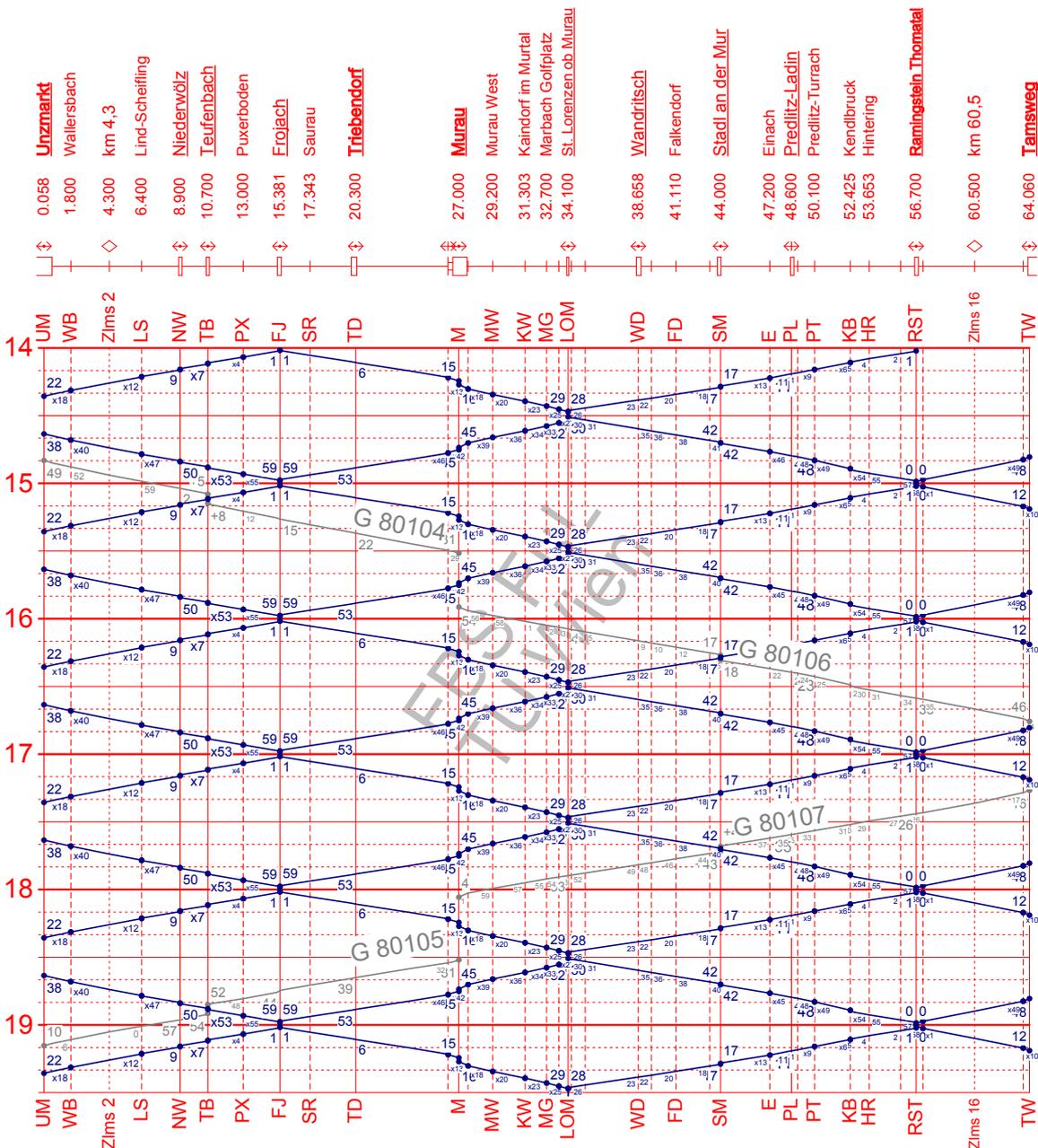
Abb. A.1: Bildfahrplan Szenario Infrastrukturmaßnahmen und Einsatz neuer Fahrzeuge

14

Unzmarkt - Tamsweg

14

64.002 km
 Fahrplanbearbeitungssystem FBS-FuL | iPLAN 1.8.0 | lizenziert für TU Wien
 Informationen unter www.irfp.de



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. A.2: Bildfahrplan Szenario Einsatz Bestandsfahrzeuge