

Master's Thesis

Analysis of influencing factors on the capacity of railway junctions on the open track

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnknoten auf der freien Strecke

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Patrick Lechner, BSc

Matr.Nr.: 01526017

unter der Anleitung von

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

Dipl.-Ing. **Benno Schmieder, BSc**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/230-2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Oktober 2021



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.

Kurzfassung

Eisenbahnknoten außerhalb von Bahnhöfen dienen der Verknüpfung von zwei Eisenbahnstrecken. Für die Planung von Eisenbahnknoten ist die Leistungsfähigkeit als Kennwert des Leistungsverhaltens ein wichtiger Parameter. Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit steht im Mittelpunkt dieser Untersuchung. Dadurch werden die Einflussfaktoren auf die Mindestzugfolgezeit lokalisiert und ihre Auswirkungen diskutiert.

Zur Berechnung der Leistungsfähigkeit werden die vier zur Verfügung stehenden Verfahren, analytisch, konstruktiv, statistisch-deterministisch und die Simulation, verglichen. In weiterer Folge werden das analytische und das Simulationsverfahren für die Untersuchung getestet und das analytische Verfahren als das einzig geeignete festgestellt. Ein Vergleich von acht unterschiedlichen Verknüpfungsvarianten für die Verbindung zweier Eisenbahnstrecken bringt die drei Einflussfaktoren, Streckeneigenschaften (a), Weichenform (b) und Fahrwegsicherung (c), hervor. Die Streckeneigenschaften (a) werden durch die Berechnung der Fahrzeiten im Knoten untersucht. Zuvor hergeleitete Formeln werden mit einer Streckengeschwindigkeit von 160 km/h, einer Zuglänge von 200 Metern und der Weichenform EW 60-760-1:18,5 ausgewertet. Dabei zeigt sich zwischen niveaufreien und niveaugleichen Varianten eine Differenz der Fahrzeit im Knoten von bis zu 5,7 Sekunden.

Durch eine Erweiterung des Untersuchungsgebiets auf eine angrenzende Strecke wird die Weichenform (b) analysiert. Dabei ist es möglich, dass die gewählte Verknüpfungsvariante keinen Einfluss auf die Mindestzugfolgezeit hat. Ob eine Auswirkung auf die Mindestzugfolgezeit besteht, kann durch die Abzweiggeschwindigkeit der Weiche beeinflusst werden. Durch Einbeziehen einer zusätzlichen Gleisfreimeldeanlage als Teil der Fahrwegsicherung (c) sind die Zeitpunkte der Gleisfreimeldung für einen Wechsel von der Haupt- auf die Nebenstrecke bei niveaufreien und niveaugleichen Knotenvarianten ident.

Abschließend wird der Fall des entgegenkommenden Zuges untersucht. Dadurch zeigt sich, dass die Sperrzeit für zwei sich kreuzende Fahrwege mit den selben Rahmenbedingungen wie bei der Fahrzeitermittlung im Knoten bei 100 bis 112 Sekunden für eine niveaugleiche Variante liegt. Diese Zeitspanne ist zugleich die Differenz zu den niveaufreien Varianten, bei denen die Sperrzeit komplett entfällt.



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

One function of railway junctions outside of stations is the connection of two tracks. The capacity as a specific value of the performance is an important parameter for the planning of railway junctions. The calculation of the capacity is the core of the research. Therefore, the influence factors on the minimum headway are localized and their effect will be discussed.

To calculate the capacity the four available procedures, analytical, constructive, statistical-deterministic and the simulation are compared. In the ongoing research the analytical and the simulation method are tested for the analysis and then the analytical method is determined as the only appropriate one. The comparison of eight different types of railway junctions to connect two tracks shows the three influence factors line characteristics (a), switch type (b) and route protection (c). The line characteristics are analysed in a calculation of the travel times in the junction. Previously derived formulas are evaluated with a line speed of 160 km/h, a train length of 200 meters and the switch type EW 60-760-1:18,5. The results show a difference between one and two-level junctions of up to 5,7 seconds on the travel time in the junction.

By the expansion of the research area to the adjacent tracks the switch type (b) is analysed. It is possible, that the railway junction has now influence on the minimum headway. It depends on the speed of the junction, if there is an influence on the minimum headway. By the inclusion of an additional clear track detection as a part of the route protection (c) there is no difference of the travel time in the junction for ways from the main track onto the side track between one or two-level junctions.

Finally, the case of an approaching train is analysed. In this research, the blocking time for two crossing routes in the case study for a one-level junction is between 100 and 112 seconds. This time is the difference between one and two-level junctions because this blocking time would be completely eliminated for a two-level junction.



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

Zu Beginn dieser Arbeit möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann bedanken, der durch seine informativen Vorlesungen mein Interesse in das Eisenbahnwesen bestärkt hat und mich dadurch dazu bewogen hat, eine Arbeit in diesem Fachgebiet zu verfassen.

Des Weiteren gilt mein Dank Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Benno Schmieder BSc., der mir eine außerordentliche Betreuung ermöglicht hat und immer ein offenes Ohr für Rückfragen hatte.

Bedanken möchte ich mich auch bei jenen Personen, die mir durch unermüdliches Korrekturlesen eine wichtige Stütze waren: Nicole, Simone und mein Vater Dieter.

Auch meine Freundin Selina selbst sowie meine Mutter Andrea und mein Bruder Tobias hatten immer motivierende Worte übrig, mit denen ich so manches Tief überstehen konnte. Ein zusätzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir durch die finanzielle und emotionale Unterstützung ein sorgenfreies Studium ermöglicht haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Studienkollegen bedanken, durch die ich immer Freude und Spaß am Studieren hatte. Besonders hervorheben möchte ich hier Alexander und Lukas, die auch während des Schreibens dieser Arbeit durch Gespräche meine Laune immer wieder heben konnten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Aufbau eines Eisenbahnknotens	11
1.1.1	Netz	11
1.1.2	Strecke	12
1.1.3	Knoten	13
2	Verknüpfungsmöglichkeiten bei Knoten ein- und zweigleisiger Strecken	15
2.1	Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken	16
2.2	Verknüpfung von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke	16
2.3	Verknüpfung von zwei zweigleisigen Strecken	21
3	Theoretische Grundlagen der Leistungsuntersuchung von Knoten	24
3.1	Leistungsfähigkeit eines Eisenbahnknotens	24
3.1.1	Verfahrensauswahl für die Leistungsuntersuchung	24
3.2	Verfahrensunabhängiger Teil der Leistungsuntersuchung	25
3.3	Analytisches Verfahren der Leistungsuntersuchung	26
3.3.1	Grundlagen	26
3.3.2	Vereinfachte Verfahren	27
3.3.3	Standardverfahren	27
3.4	Simulationsverfahren der Leistungsuntersuchung	28
3.4.1	Grundlagen	28
3.4.2	Standardverfahren	28
4	Vorgehen bei der Leistungsuntersuchung bei Knoten ein- und zweigleisiger Strecken	29
4.1	Vorgehen bei der analytischen Leistungsuntersuchung	29
4.1.1	Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken	29
4.1.2	Verknüpfung von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke	33
4.1.3	Verknüpfung von zwei zweigleisigen Strecken	34
4.2	Vorgehen bei der Leistungsuntersuchung mit Simulation	35
5	Beispiel für eine analytische Leistungsuntersuchung	37
5.1	Rahmenbedingungen	37
5.1.1	Streckengeschwindigkeit	37
5.1.2	Weichen	38
5.2	Berechnung der Fahrzeit	38
5.2.1	Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken	39
5.2.2	Verknüpfung von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke	41
5.2.3	Verknüpfung von zwei zweigleisigen Strecken	42
5.3	Vergleich	44
6	Erweiterung der Leistungsuntersuchung durch Einbeziehung der Strecke	46
6.1	Rahmenbedingungen	46
6.1.1	Streckenabschnitt	46

6.1.2	Betriebsprogramm	47
6.1.3	Fahrwegsicherung	47
6.2	Berechnung der Mindestzugfolgezeit	48
6.2.1	Ausgangsvariation	48
6.2.2	Änderung der Weichenform	52
6.2.3	Zusätzliche Gleisfreimeldeanlage	55
6.3	Ergebnisdiskussion	57
6.4	Entgegenkommender Zug	58
7	Resümee	61
7.1	Schlussfolgerung	61
7.2	Ausblick	63
Anhang		70
A.1	Übersicht über die untersuchten Verknüpfungsvarianten	70
A.2	Python-Code	73

Kapitel 1

Einleitung

Eisenbahnstrecken verbinden Quellorte und Zielorte miteinander, um Personen oder Güter zu transportieren (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 1). Um direkte Verbindungen von Orten sicherzustellen, gibt es Verknüpfungen, die das Wechseln von einer Eisenbahnstrecke auf die andere möglich machen (Vgl. ebd.: S. 1). Eine solche Wechsellmöglichkeit von einer Eisenbahnstrecke auf eine andere wird als Knoten beziehungsweise Verknüpfung bezeichnet.

Die Verbindung von verschiedenen Strecken stellt das Eisenbahnnetz dar (Vgl. ebd.: S. 3). Knoten im Eisenbahnnetz können in Städten liegen, weil bei diesen eine Häufung an Quell- und Zielorten auftritt. In Städten sind Knoten häufig in Bahnhöfen, da dort überwiegend Züge halten, beginnen oder enden (Vgl. Pachl 2021: S. 6). Bahnhöfe werden durch Einfahr- und Ausfahrtsignale begrenzt (Vgl. ebd.: S. 6).

Es kann aufgrund von örtlichen Gegebenheiten notwendig sein, einen Knoten statt in einem Bahnhofsbereich auf der freien Strecke anzuordnen. Die freie Strecke benennt alle Abschnitte außerhalb von Bahnhöfen (Vgl. ebd.: S.293). Knoten auf der freien Strecke unterscheiden sich von jenen im Bahnhofsbereich in Hinblick auf die Geschwindigkeit der verkehrenden Züge und die Anzahl der Wartemöglichkeiten für sich kreuzende Fahrten. Diese Unterscheidung ist bei der Planung eines Eisenbahnknotens zu berücksichtigen.

Die Planung eines Neubaus oder Umbaus eines Eisenbahnknotens hat zum Ziel, die Belastung eines Knotens (meistens Züge pro Zeiteinheit) in einem festgelegten Niveau an Betriebsqualität aufzunehmen (Vgl. ebd.: S. 153). Der Zusammenhang aus Belastung und Betriebsqualität wird als Leistungsverhalten bezeichnet (Vgl. ebd.: S. 153). Um zu bestimmen, ob und in welcher Qualität ein Eisenbahnknoten die Belastung aufnehmen kann, wurden Verfahren für Leistungsuntersuchungen entwickelt (Vgl. ebd.: S. 153).

Bei Leistungsuntersuchungen stehen je nach Eingangswerten und Untersuchungsgebiet bis zu vier verschiedene Verfahren zur Verfügung (Vgl. Weigand und Heppe 2013: S. 485). Diese sind das analytische, das statistisch-deterministische, das konstruktive und das Simulationsverfahren (Vgl. ebd.: S. 485). Die Auswahl des geeignetsten Verfahrens für den zu untersuchenden Abschnitt ist von Bedeutung, um die Einflüsse auf das Leistungsverhalten analysieren zu können.

Es ist nicht ohne Untersuchung ersichtlich, welche Parameter das Leistungsverhalten beeinflussen und in welcher Größenordnung diese verschiedenen Einflüsse das Leistungsverhalten verändern. Eine genaue Ermittlung der Leistungsfähigkeit ist mit großem Aufwand verbunden (Vgl. Schüttert et al. 2018: S. 2).

Um Einflussparameter auf das Leistungsverhalten von Verknüpfungsvarianten auf der freien Strecke untersuchen zu können, ergeben sich die nachfolgenden Leitfragen für diese Arbeit.

1. *Wie kann eine Bewertung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnknoten durchgeführt werden?*
2. *Welche Parameter beeinflussen das Leistungsverhalten von Eisenbahnknoten auf der freien Strecke?*

3. Kann die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnknoten auf der freien Strecke durch eine bestimmte Auswahl der Parameter erhöht werden?

Die Leitfragen sollen in der nachfolgenden Untersuchung beantwortet werden und stellen das Grundgerüst für die weitere Vorgehensweise dar. Das Eingehen auf diese Fragen macht eine Absteckung von Rahmenbedingungen erforderlich.

1.1 Aufbau eines Eisenbahnknotens

1.1.1 Netz

Das Eisenbahnnetz wurde bereits als Verbindung verschiedener Strecken definiert. Es besteht aus Bahnhöfen und Strecken, die diese Bahnhöfe verbinden. Alle Stellen im Eisenbahnnetz, die der Regelung oder Sicherung der Zugfahrten sowohl im Bahnhof als auch auf den Eisenbahnstrecken dienen, werden als Betriebsstellen bezeichnet (Vgl. Pachl 2021: S. 6). Betriebsstellen werden zusätzlich je nach Position und Funktion weiter unterschieden (Vgl. Pachl 2013: S. 407f.). Die Abzweigstelle ist eine Betriebsstelle der freien Strecke, wo Züge von einer auf eine andere Strecke wechseln können und umfasst somit auch den Eisenbahnknoten (Vgl. Pachl 2021: S. 7).

In Abbildung 1.1 ist zur Veranschaulichung in der oberen Hälfte ein fiktives Eisenbahnnetz dargestellt. Die grünen Punkte markieren Städte mit Bahnhöfen, die schwarzen Linien stellen die Eisenbahnstrecken dar. Im Eisenbahnnetz können Knoten in Bahnhöfen oder außerhalb auf der freien Strecke liegen.

Eine Eisenbahnstrecke besteht aus einem oder zwei Streckengleisen (Vgl. Weigand und Heppe 2013: S. 471). Dadurch ergibt sich jegliche größere Anzahl an Streckengleisen nur durch mehrere parallele Strecken (Vgl. ebd.: S. 471). Die Untersuchung wird in weiterer Folge auf die Verknüpfung einer Eisenbahnstrecke mit einer weiteren Eisenbahnstrecke eingegrenzt und umfasst deshalb ein- und zweigleisige Eisenbahnknoten.

Die einzelnen Eisenbahnstrecken selbst können nach der Verkehrsbedeutung kategorisiert werden. Hierbei sei auf §4 EisebG verwiesen:

“Hauptbahnen sind für den öffentlichen Verkehr bestimmte Schienenbahnen von größerer Verkehrsbedeutung. [...] Nebenbahnen sind für den öffentlichen Verkehr bestimmte Schienenbahnen, sofern sie nicht Hauptbahnen oder Straßenbahnen sind.”
(*Eisenbahngesetz 1957 - EisebG 1957: §4*)

Im Vergleich zwischen Haupt- und Nebenbahnen ist aufgrund dieser Definition davon auszugehen, dass bei einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke die zweigleisige Strecke die Hauptbahn darstellt. Daher wird in weiterer Folge die zweigleisige Strecke als Hauptstrecke bezeichnet. Neben der Verkehrsbedeutung stellt der Gleisachsabstand bei zweigleisigen Strecken eine grundlegende Eigenschaft dar. Beim Gleisachsabstand ist aufgrund der aktuell geltenden Vorschriften der *Technischen Spezifikation für die Interoperabilität (TSI)* ein Mindestwert von 4,00 Metern erforderlich¹. Für Gleisverbindungen zwischen zwei parallelen Gleisen, die in weiterer Folge in Erscheinung treten, ist ein Gleisachsabstand von mindestens 4,5 Metern notwendig (Vgl. Weigand 2013: S.635). Diese Vergrößerung des Gleisachsabstandes dient der Vermeidung der Überschneidung der letzten durchgehenden Schwellen (Vgl. ebd.: S.635). Um Kontinuität in der Untersuchung sicherzustellen, wird der Gleisachsabstand für die Eisenbahnstrecke im weiteren Verlauf sowohl im Knotenbereich als auch außerhalb auf 4,5 Meter festgelegt.

¹Vgl. *Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission* 2014: S. 21, Abschnitt 4.2.3.2 Absatz 2 Tabelle 4

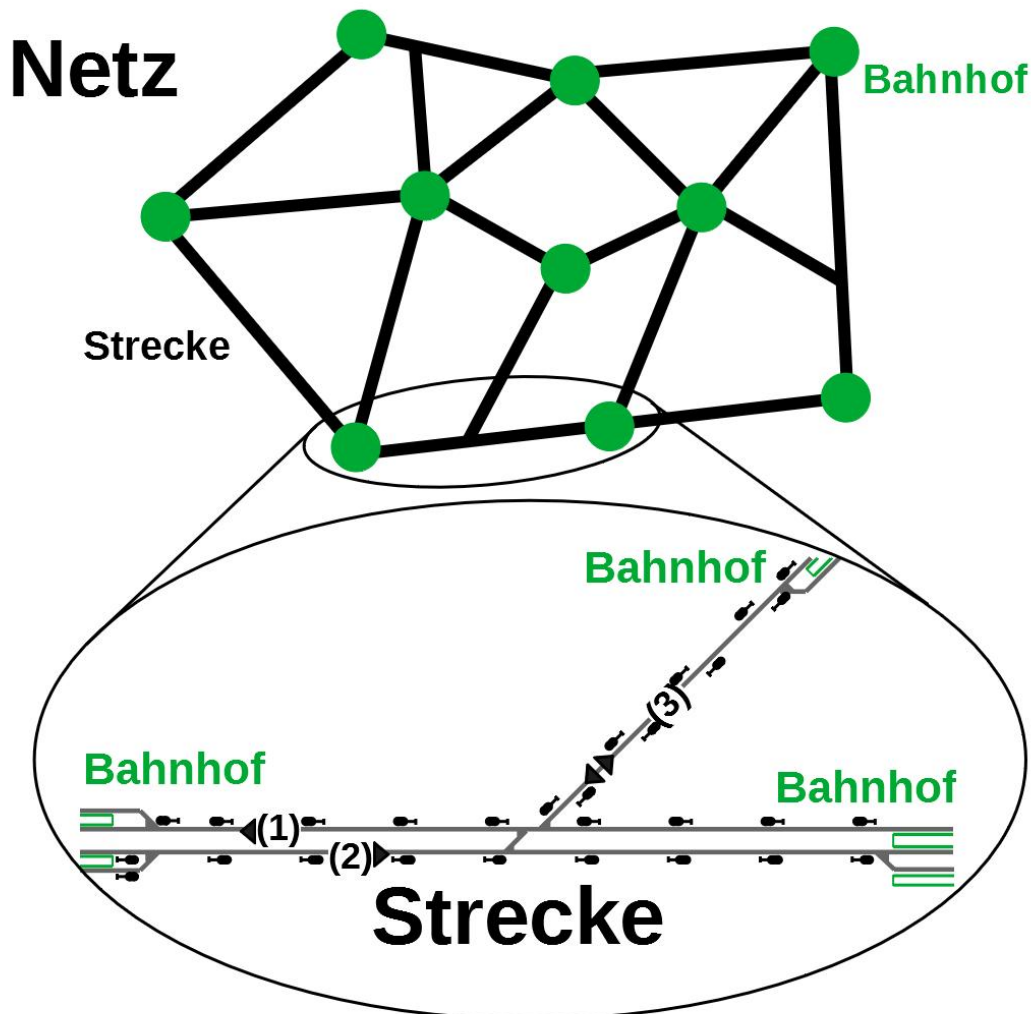


Abb. 1.1: Eisenbahnnetz mit vergrößerter Eisenbahnstrecke

1.1.2 Strecke

Die Eisenbahnstrecke umfasst per Definition ein oder zwei Streckengleise (Vgl. Weigand und Hepp 2013: S. 471). In der unteren Hälfte von Abbildung 1.1 ist eine Strecke mit zwei Streckengleisen und eine Strecke mit einem Streckengleis abgebildet. Die eingleisige Strecke mündet in die zweigleisige Strecke außerhalb von Bahnhöfen ein. Die Pfeile neben den Gleisnummern beschreiben hierbei die Richtung, in welche eine Zugfahrt auf einem Streckengleis möglich ist.

Für die Fahrt eines Zuges auf einem Streckengleis ist es erforderlich, dass das Unfallrisiko der Zugfahrt minimiert wird. Das Fahren in festem Raumabstand ist hierbei weltweit am häufigsten zur Sicherung der Zugfolge in Verwendung (Vgl. Pachl 2021: S. 43). Ein fester Raumabstand bedeutet, dass die Strecke in Abschnitte eingeteilt wird (Vgl. ebd.: S. 42). Diese werden als

Blockabschnitte bezeichnet (Vgl. ebd.: S. 42). Blockabschnitte werden durch sogenannte Blockstellen begrenzt, die mit Hauptsignalen ausgerüstet sind (Vgl. Pachl 2013: S. 408). Blockstellen sind Betriebsstellen der freien Strecke und können beispielsweise als Abzweigstellen oder Überleitstellen eingerichtet sein (Vgl. Pachl 2021: S. 7). Die zuvor vorgestellten Abzweigstellen sind somit immer auch Blockstellen. (Vgl. ebd.: S. 7).

Eine Einfahrt in einen Blockabschnitt ist nur möglich, wenn der Abschnitt und der dazugehörige Durchrutschweg² nicht belegt sind und ein zuvor gefahrener Zug durch ein auf Halt gestelltes Signal geschützt ist (Vgl. ebd.: S. 44). Ob ein Blockabschnitt unbesetzt ist, wird über eine Gleisfreimeldeanlage kontrolliert (Vgl. ebd.: S. 282).

Gleisfreimeldeanlagen können beispielsweise Gleisstromkreise³ oder Achszähler⁴ sein.

Signale und Gleisfreimeldeanlagen können laut Maschek (2018: S. 46ff, S. 77) unter dem Begriff Fahrwegsicherung zusammengefasst werden.

1.1.3 Knoten

Ein Eisenbahnknoten oder eine Verknüpfung definiert sich aus der Verbindung von mehreren Eisenbahnstrecken (Vgl. Pachl 2021: S. 177). Abbildung 1.2 zeigt in der unteren Hälfte eine Vergrößerung des Knotens aus Abbildung 1.1. Analog zur vorherigen Abbildung ist die Verknüpfung von einer zweigleisigen und einer eingeleisigen Strecke zu sehen.

Ein Eisenbahnknoten besteht laut Pachl (ebd.: S. 177) aus Fahrstraßenknoten, die Strecken miteinander physisch verbinden, und Gleisgruppen, die im Bahnhofsbereich Linien miteinander verknüpfen. Aufgrund der Betrachtung der freien Strecke werden in weiterer Folge ausschließlich Fahrstraßenknoten beachtet. Fahrstraßenknoten können nach Pachl (ebd.: S. 177) von der Strecke per Definition abgegrenzt werden.

“Ein Fahrstraßenknoten wird durch die entgegengesetzt gerichteten Hauptsignale begrenzt, zwischen denen sich keine weiteren Wartepositionen für Züge mehr befinden.”
(ebd.: S. 177)

In Abbildung 1.2 stellen die drei dargestellten Signale somit die Grenze des zu untersuchenden Knotens dar.

Die physische Verbindung von Eisenbahnstrecken in der Definition des Fahrstraßenknotens von Pachl (ebd.: S. 177) erfolgt über Weichen, die im Eisenbahnwesen zur Verknüpfung von Gleisen verwendet werden (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 211).

Bei einer einfachen Weiche gibt es ein Stammgleis ohne Krümmung und ein Zweiggleis mit einer bestimmten Krümmung (Vgl. ebd.: S. 211f.). Bei Bogenweichen hat auch das Stammgleis eine Krümmung (Vgl. ebd.: S. 212, Tab. 12.1). Für den Weicheneinbau ist die Definition der Haupt- und der Nebenstrecke von Abschnitt 1.1.1 von Bedeutung, da auf der Hauptstrecke das Stammgleis eingebaut werden soll, um ein durchgehendes Befahren der Hauptstrecke mit der Streckengeschwindigkeit zu ermöglichen.

²Der Durchrutschweg beschreibt einen Sicherheitsabstand nach einem Signal, der in Österreich auch als Schutzweg bezeichnet wird (Vgl. Maschek 2013: S. 518). Er wird eingeplant, damit ein Zug, welcher nicht mehr rechtzeitig vor dem Signal anhalten kann, keine darauffolgenden Streckenteile gefährdet (Vgl. Maschek 2018: S. 133). Die Gründe dafür können beispielsweise Gleiten oder Verbremsten der Eisenbahn sein (Vgl. ebd.: S. 133).

³Bei einem Gleisstromkreis gibt es einen Sender und einen Empfänger, wobei bei Besetzung durch eine Radachse kein Strom über den Empfänger fließt und der Stromkreis kurzgeschlossen wird (Vgl. ebd.: S. 47).

⁴Bei einem Achszähler erfolgt die Gleisfreimeldung indem die ein- und ausgefahrenen Achsen gezählt werden und bei einer Differenz von Null ein freier Abschnitt angenommen wird (Vgl. ebd.: S. 53).

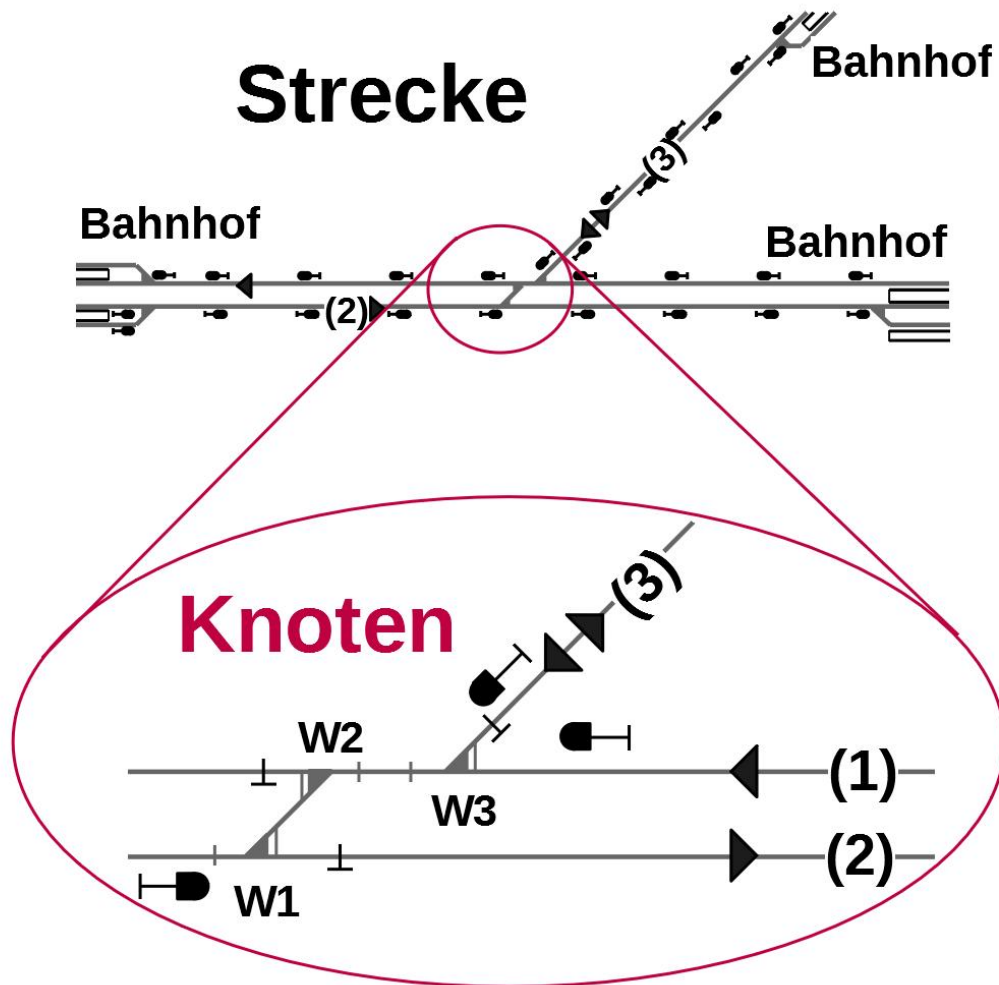


Abb. 1.2: Eisenbahnstrecke mit vergrößertem Eisenbahnknoten

Weitere Einflüsse auf den Weicheneinbau sowie auf die zuvor diskutierte Fahrwegsicherung ergeben sich durch Betrachtung eines einzelnen Knotens, wie dies in Abbildung 1.2 in der unteren Hälfte zu sehen ist. Um die zusätzlichen Auswirkungen der Knotenbestandteile genauer zu beleuchten, werden verschiedene unterschiedliche Verknüpfungsmöglichkeiten für die weitere Analyse diskutiert.

Kapitel 2

Verknüpfungsmöglichkeiten bei Knoten ein- und zweigleisiger Strecken

Bei der Leistungsuntersuchung eines Knotens muss im Rahmen der Bestandsaufnahme die geplante oder vorhandene Infrastruktur analysiert werden (Vgl. Böttcher und Fengler 2007: S. 528). Dabei ist es unerheblich, ob es sich um einen Neubau oder eine Bestandsuntersuchung handelt (Vgl. ebd.: S. 528). Unterschiedliche Einflüsse auf die Infrastruktur eines Knotens zeigen sich nachfolgend mittels der Untersuchung von acht verschiedenen Verknüpfungsmöglichkeiten.

Die Aufteilung der Varianten basiert auf der Anzahl zulaufender Streckengleise. Bezugnehmend auf die in der Einleitung vorgenommen Beschränkung auf jeweils eine zulaufende Eisenbahnstrecke, ist die Anzahl der Gleise auf eins oder zwei begrenzt. Dadurch ergibt sich eine Unterscheidung in Verknüpfungen von zwei eingeleisigen, einer ein- und einer zweigleisigen und zwei zweigleisigen Strecken.

Ein Streckengleis kann im Regelbetrieb in eine oder beide Richtungen genutzt werden. Die Festlegung der Fahrtrichtung eines Gleises stellt die Grundlage für die Anzahl der möglichen Fahrwege dar. Um den Umfang der Untersuchung im Rahmen zu halten, wird bei allen zweigleisigen Strecken für jedes Gleis nur ein Einrichtungsbetrieb vorgesehen.

Bei zweigleisigen Strecken mit Zweirichtungsbetrieb wären zusätzlich Überleitstellen¹ anzuordnen, um alle Fahrwege zu ermöglichen (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 48). Abbildung 2.1 zeigt eine Überleitstelle. Die schwarzen Pfeile neben der Gleisnummer zeigen hierbei die im Regelbetrieb genutzten Fahrtrichtungen an. Die Erfordernisse für einen Zweirichtungsverkehr werden in

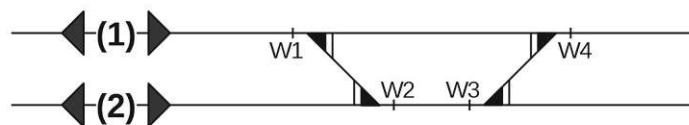


Abb. 2.1: Überleitstelle bei einem Zweirichtungsverkehr
Quelle: In Anlehnung an Menius und Matthews (2020: S. 48, Abb. 5.3)

weiterer Folge mehrmals zur Vollständigkeit erwähnt, finden jedoch in den Berechnungen keine weitere Berücksichtigung.

¹Die Überleitstelle ist eine Blockstelle der freien Strecke, auf der ein Wechsel der Züge auf ein anderes Gleis derselben Strecke möglich ist (Vgl. Pacht 2021: S. 7f.).

2.1 Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken

Die Infrastruktur einer Verknüpfung kann in unterschiedliche Teile zerlegt werden. Abbildung 2.2 zeigt die Möglichkeit der Aufteilung analog zu den Planungsschritten eines Eisenbahnknotens. Den Ausgangspunkt eines Knotens bilden zwei zu verknüpfende Eisenbahnstrecken. Streckeneigenschaften, wie Fahrtrichtung oder Streckengeschwindigkeit, sind dabei bereits bekannt (Abb. 2.2a). Die Verbindung der einzelnen Strecken erfolgt durch Weichen (Abb. 2.2b). In Kapitel 1.1.3 wurde bereits erläutert, dass bei einem geraden Hauptgleis ausschließlich eine einfache Weiche eingebaut werden kann. Die Fahrwegsicherung des Knotens wird mittels Hauptsignalen und Gleisfreimeldeanlagen sichergestellt (Abb. 2.2c). Abbildung 2.2c ist eine aggregierte Darstellung aller Teile mit unterschiedlichen Farben.

Bei der Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken kann der Knoten durch den Einbau von unterschiedlichen Weichenform verändert werden. Die Wahl der Weichenform hat zum Ziel die Abzweiggeschwindigkeit der Streckengeschwindigkeit auf der Nebenstrecke anzunähern. Dadurch soll die Geschwindigkeitsreduktion, die zum Abzweigen erforderlich ist, möglichst gering gehalten werden. Bei der Auswahl der Weiche ist zu beachten, dass ein größerer Zweiggleisradius mit höheren Kosten verbunden ist (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 242).

Die zulässige Geschwindigkeit für das Befahren eines Bogens oder Zweiggleises berechnet sich über den Überhöhungsfehlbetrag (Vgl. ebd.: S. 219f.). Der Überhöhungsfehlbetrag beschreibt die entstehende Seitenbeschleunigung, wenn ein Bogen mit einer zu hohen Geschwindigkeit durchfahren wird (Vgl. ebd.: S. 104). Bei jedem Bogen mit oder ohne Überhöhung² überlagern sich die wirkenden Kräfte nur bei einer Fahrgeschwindigkeit so, dass keine Seitenbeschleunigung entsteht (Vgl. ebd.: S. 104). Gleichung (2.1) zeigt die Berechnung der maximalen zulässigen Fahrgeschwindigkeit v^3 .

$$v = \sqrt{\frac{(I + D) * R}{11,8}} \quad (2.1)$$

Hierbei beschreibt I den Grenzwert für den Überhöhungsfehlbetrag, D die ausgeglichene Überhöhung und R den Bogenradius⁴. Der Grenzwert für den Überhöhungsfehlbetrag findet sich in der TSI^5 .

Bahnunternehmen verwenden laut Menius und Matthews (ebd.: S. 219f.) üblicherweise nicht die Grenzwerte laut TSI für die Berechnung der maximalen Abzweiggeschwindigkeit. Stattdessen kommen von Bahnunternehmen eigens festgelegte Grenzwerte zur Anwendung (Vgl. ebd.: S. 219f.).

2.2 Verknüpfung von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke

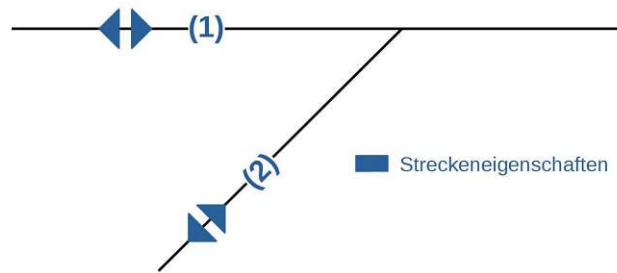
Bei der Verknüpfung von ein- und zweigleisigen Strecken werden drei unterschiedliche Varianten aufgezeigt.

²Die Überhöhung ist eine Anhebung der Außenschienen, wodurch sich ein Höhenunterschied zwischen den beiden Schienen ergibt (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 101).

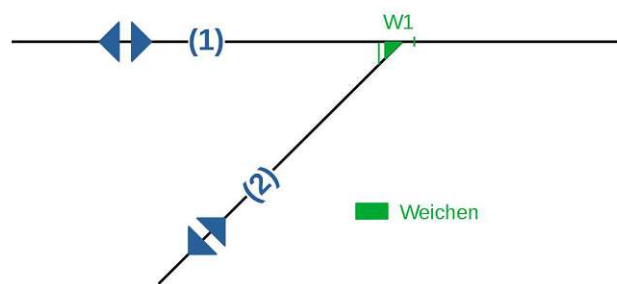
³Vgl. *ÖNORM EN 13803:2017 09 01* 2017: S. 15, (1)

⁴Vgl. ebd.: S. 15, (1)

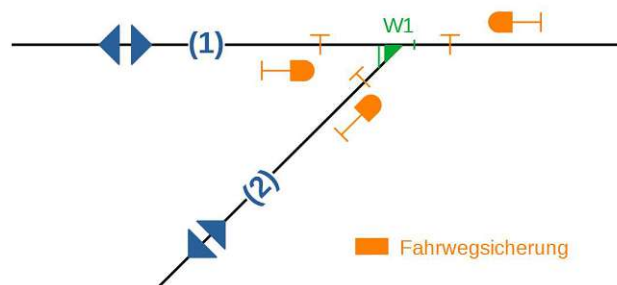
⁵Vgl. *Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission* 2014: S. 22, Abschnitt 4.2.4.3. (1)



(a) Streckeneigenschaften



(b) Weichen



(c) Fahrwegsicherung

Abb. 2.2: Schrittweiser Aufbau einer Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken

Variante 1

Die erste Variante ist eine Erweiterung von Abbildung 2.2 um ein zweites paralleles Gleis. Dazu wird das zweite parallele Gleis an das andere Streckengleis angeschlossen, wie in Abbildung 2.3 ersichtlich.

Bei dieser Verknüpfung führt eine Fahrt von Gleis 1 auf die Nebenstrecke zu einer Sperre für

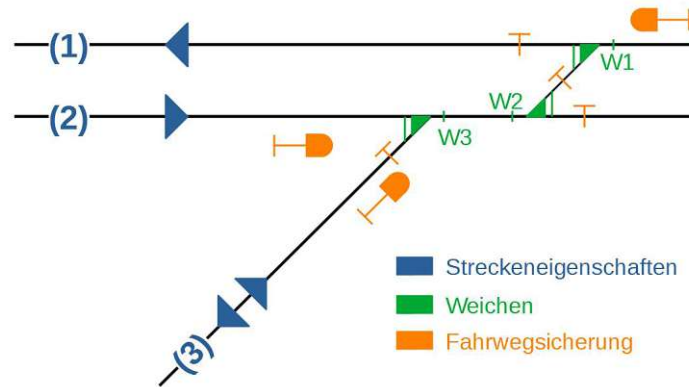


Abb. 2.3: Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke-Variante 1

Gleis 2, da „dieser Fahrwegabschnitt durch eine Fahrt betrieblich beansprucht und somit für die Nutzung durch andere Fahrten gesperrt ist“ (Pachl 2021: S. 52).

Der Abschnitt zwischen Weiche 1 und 2 in Abbildung 2.3 wird als gerade Gleisverbindung bezeichnet (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 269). Bei einer geraden Gleisverbindung sollte der Gleisachsabstand von zwei parallel verlaufenden Gleisen mindestens 4,5 Meter betragen (Vgl. Weigend 2013: S. 635). Dies ist erforderlich, um die bereits eingangs erwähnte Überschneidung der letzten durchgehenden Schwelle zu vermeiden (Vgl. ebd.: S. 635).

Zusätzlich ist bei zwei entgegengesetzt gekrümmten und aufeinanderfolgenden Weichen eine Zwischengerade vorzusehen (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 244). Daher ist in Variante 1 (Abb. 2.3) sowohl zwischen Weiche 1 und 2, als auch zwischen Weiche 2 und 3 eine Zwischengerade erforderlich.

Die erforderlichen Mindestlängen für die Zwischengeraden zwischen Weichenanfang und Weichenende sind von der Geschwindigkeit v abhängig und ergeben sich nach Menius und Matthews (ebd.: S. 244) in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1 zeigt zusätzlich, dass für eine höhere Geschwindigkeit eine längere Zwischengerade

Tab. 2.1: Mindestlängen für Zwischengeraden

Quelle: In Anlehnung an Menius und Matthews (2020: S. 244, S. 269)

Geschwindigkeit v [km/h]	Mindestlänge l [m]
$v \leq 70$	$l \geq 0,1 \cdot v$
$70 \leq v \leq 100$	$l \geq 0,15 \cdot v$

und somit auch eine größere Längsausdehnung der Verknüpfung erforderlich sind.

Die Länge der Zwischengerade in der geraden Gleisverbindung berechnet sich laut Menius und Matthews (ebd.: S. 271) nach Gleichung (2.2).

$$lg = \sqrt{(e * n)^2 + e^2} - 2 * l_t \quad (2.2)$$

Hierbei steht e für den Gleisachsabstand zwischen den parallel verlaufenden Gleisen und n für die Weichenneigung 1:n (Vgl. ebd.: S. 270f.). l_t ist die Weichentangentenlänge (Vgl. ebd.: S. 218). Abbildung 2.4 zeigt eine gerade Gleisverbindung mit Darstellung der Variablen von Gleichung (2.2).

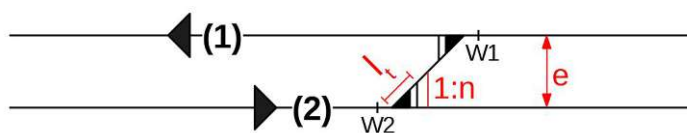


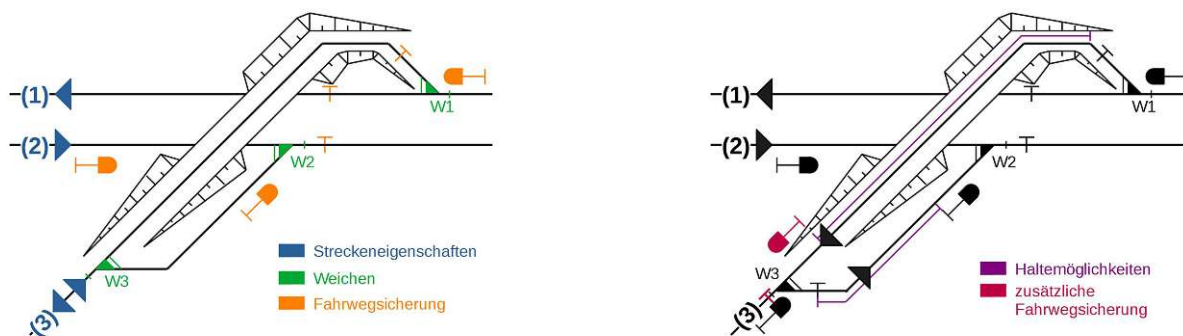
Abb. 2.4: Gerade Gleisverbindung

Quelle: In Anlehnung an Menius und Matthews (2020: S. 270, Abb. 14.1)

Variante 2

Bei Variante 2 der Verknüpfung ein- und zweigleisiger Strecken erfolgt die Verbindung von Gleis 1 zur Nebenstrecke durch eine Überwerfung über die Hauptstrecke. Die Verknüpfung ist in Abbildung 2.5a zu sehen. Eine Zufahrt von Gleis 1 auf Gleis 3 blockiert somit Gleis 2 nicht mehr.

Die zuvor diskutierten Verknüpfungen sind niveaugleich. Niveaugleich beschreibt dem Namen



(a) ohne zusätzlicher Haltemöglichkeit

(b) mit zusätzlichen Haltemöglichkeiten

Abb. 2.5: Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke-Variante 2

entsprechend alle Verknüpfungen, bei denen kein Höhenunterschied zwischen verschiedenen Gleisen auftritt. Bei der in Variante 2 diskutierten niveaufreien Ausbildung muss zumindest von einem Gleis ein Höhenunterschied bewältigt werden. Der Höhenunterschied kann mittels einer

Überwerfung oder einer Unterführung ausgeführt werden. Um eine einheitliche Vorgehensweise sicherzustellen, werden im Folgenden die niveaufreien Verknüpfungen mit einer Überwerfung dargestellt. Alle Überlegungen im Rahmen dieser Untersuchung gelten analog für Unterführungen. Bei niveaufreien Verknüpfungen muss ein Höhenunterschied durch parallel zu den Gleisen verlaufenden Rampen ab- beziehungsweise aufgebaut werden. Bei der Bewältigung von Höhenunterschieden ist laut *TSI* eine maximale Längsneigung von 35 ‰ zulässig⁶. Die Längsneigung kann insbesondere bei beengten Platzverhältnissen ein Problem darstellen, da dadurch große Rampenlängen erforderlich sind. Die erforderliche Länge der Rampe lässt sich durch den Höhenunterschied der Schienenoberkanten bestimmen. Die Schienenoberkante auf der Brücke ergibt sich aus dem notwendigen Lichtraumprofil⁷ auf der Hauptstrecke, der Fahrdrachhöhe und der Brückenstärke sowie dem Aufbau mit Gleisschotter und Schienen. Der Lichtraum lässt sich mittels *TSI* und in weiterer Folge anschließend mittels EN 15273-3:2018 bestimmen⁸.

In Abbildung 2.5b ist eine Variante dargestellt, die sich von jener aus Abbildung 2.5a durch ein weiteres Signal vor Weiche 3 und zusätzlichen Gleisfreimeldeanlagen unterscheidet. Durch die zusätzlichen Teile der Fahrwegsicherung ist bei gleichzeitiger Freigabe für Zugfahrten von Gleis 3 auf die Hauptstrecke ein Halt auf der Brücke möglich. Dadurch ergeben sich zwei Haltemöglichkeiten für Züge, die vom oder auf das Hauptgleis wechseln. Die zweite Haltemöglichkeit für einen von der Nebenstrecke kommenden Zug entsteht durch Verlängerung des zweigleisigen Abschnitts auf Gleis 3. Abbildung 2.5b zeigt beide Haltemöglichkeiten. Als Folge davon ist es im Betrieb unabhängig von der Position der nächsten Ausweichstelle möglich, einen entgegenkommenden Zug vorbeizulassen.

In der weiteren Untersuchung findet die in Abbildung 2.5a dargestellte Variante Anwendung. Auf die Variante aus Abbildung 2.5b wird der Vollständigkeit halber in Einzelfällen verwiesen.

Variante 3

Bei Variante 3 der Verknüpfungen von ein- und zweigleisigen Strecken wird Gleis 3 zwischen Gleis 2 und Gleis 1 geführt und dort mit beiden Gleisen verbunden. Dadurch entfällt das zweite auf der Nebenstrecke parallel verlaufende Gleis, wie in Abbildung 2.6a zu sehen.

Um für Gleis 3 Platz zwischen den Gleisen der Hauptstrecke zu schaffen, ist eine Gleisverziehung erforderlich. Aufgrund eines Verziehungsmaßes von mehr als 1,5 Metern ist die Gleisverziehung mit Überhöhung und Übergangsbogen auszuführen (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 135). Laut Menius und Matthews (ebd.: S. 139) wird in der Regel nur ein Gleis verzogen. Um den erforderlichen Gleisachsabstand zwischen allen parallel verlaufenden Gleisen einzuhalten, ist eine Gleisverziehung von mindestens 4,5 Metern erforderlich (Vgl. ebd.: S. 139; Vgl. Weigend 2013: S. 635).

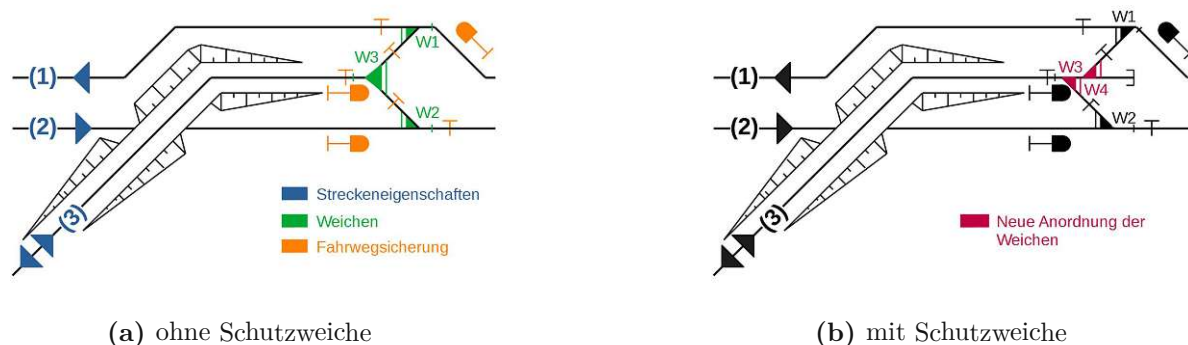
Bei dieser Variante muss zusätzlich der Flankenschutz⁹ diskutiert werden. Die mögliche Anordnung einer Schutzweiche ist in Abbildung 2.6b zu sehen. Da es sich um eine Abzweigstelle handelt, ist eine Schutzweiche jedoch laut Pachl (2021: S. 117) nicht unbedingt erforderlich.

⁶Vgl. *Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission* 2014: S. 22, Abschnitt 4.2.3.3., Absatz 3

⁷Der Lichtraum basiert auf dem Raumbedarf eines Schienenfahrzeuges und gibt den freizuhaltenden Bereich um ein Gleis an (Vgl. Schmitt und Jänsch 2013: S. 307f.).

⁸Vgl. *Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission* 2014: Abschnitt 4.2.1, Abschnitt 4.2.3.1
Vgl. *ÖNORM EN 15273-3:2018 12 15 2018*

⁹Der Flankenschutz beschreibt Maßnahmen, die ein Hineinfahren von Zügen oder Zugteilen in einen freien Abschnitt über Weichen oder Kreuzungen verhindern sollen (Vgl. Pachl 2021: S. 293).



(a) ohne Schutzweiche

(b) mit Schutzweiche

Abb. 2.6: Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke-Variante 3

2.3 Verknüpfung von zwei zweigleisigen Strecken

Variante 1

Die erste Verknüpfungsvariante stellt eine Erweiterung von Variante 1 der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke dar, indem ein zweites Gleis auf der Nebenstrecke eingeplant wird. Hierbei werden analog zu den Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke Gleis 1 und 2 als Hauptstrecke definiert. Abbildung 2.7 zeigt die Verknüpfung. Der Abstand

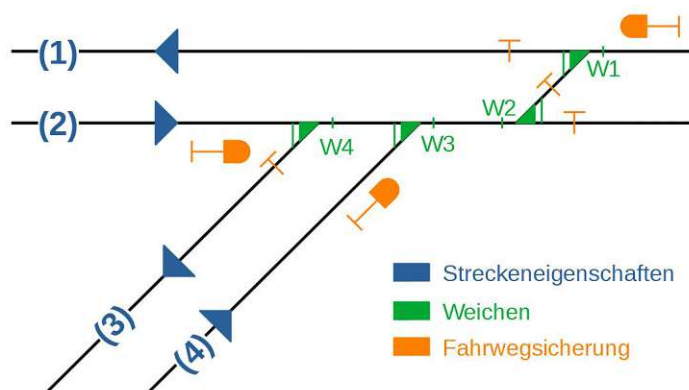


Abb. 2.7: Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 1

von Weiche 3 zu Weiche 4 ist aufgrund der Weichenabmessungen größer als der erforderliche Gleisachsabstand auf der Nebenstrecke. Dadurch ist eine Gleisverziehung auf Gleis 4 notwendig. Das erforderliche Verziehungsmaß ergibt sich aus den jeweiligen Absteckmaßen der Weichen. Weiche 4 soll erst auf dem Regelschwellensatz nach Weiche 3 angeordnet werden (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 244).

Variante 2

Bei Variante 2 ermöglicht ein größeres Verziehungsmaß auf der Nebenstrecke eine Verschiebung der geraden Gleisverbindung auf der Hauptstrecke zwischen Weiche 3 und Weiche 4. Gleis 4 wird hierbei länger, da sich das Verziehungsmaß um mindestens eine Weichenlänge vergrößert. Eine Gleisverziehung in dieser Größenordnung ist mit Überhöhung und Übergangsbogen auszuführen (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 135). Dadurch können nun gleichzeitig Züge von und zur Nebenstrecke fahren, wie in Abbildung 2.8 ersichtlich. Im Gegensatz dazu können bei Variante 1 nur Züge auf Gleis 1 und 2 beziehungsweise 1 und 4 gleichzeitig verkehren. Im Fall

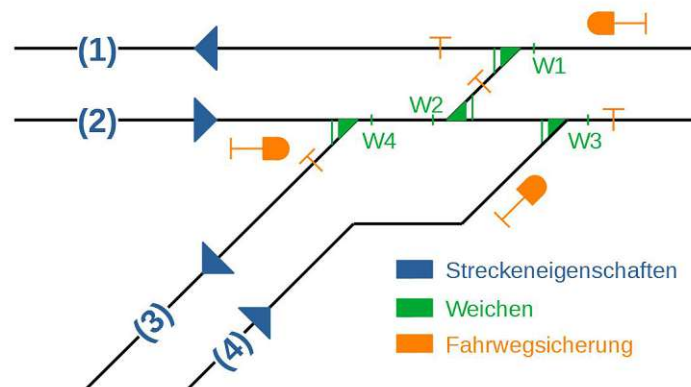


Abb. 2.8: Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 2

des in dieser Untersuchung nicht diskutierten Zweirichtungsbetriebes muss die Planung der Überleitstellen berücksichtigt werden. Bei Variante 2 kann die gerade Gleisverbindung nicht als Teil der Überleitstellen genutzt werden, da sie zwischen Weiche 3 und Weiche 4 liegt. Die Überleitstelle muss außerhalb des Knotens eingeplant werden. Bei Variante 1 ist dies nicht erforderlich, da sich die gerade Gleisverbindung vor dem gesamten Knoten befindet.

Variante 3

Eine Erweiterung von Variante 2 der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke um ein paralleles Gleis auf der Nebenstrecke ergibt die dritte Variante. Abbildung 2.9 zeigt die Verknüpfung. Die niveaufreie Ausführung des Knotens führt zu einem erhöhten Platzbedarf aufgrund der Rampe, die zur Höhenüberwindung erforderlich ist.

Variante 4

Variante 4 wird mit einer Unterführung anstatt einer Überwerfung ausgeführt und ist in Abbildung 2.10 ersichtlich. Der Höhenunterschied wird nicht von Gleis 3 bewältigt, sondern von Gleis 2. Der Vorteil dieser Variante ist das Wegfallen des Platzbedarfs auf der Seite von Gleis 1. Dies kann insbesondere bei beengten Platzverhältnissen von Vorteil sein. Allerdings muss bei Gleis 2 der Hauptstrecke aufgrund seiner Nähe zu Gleis 1 anstatt einer Rampe ein vertikaler Verbau angeordnet werden. Dadurch wird eine größere Gleisverziehung vermieden.

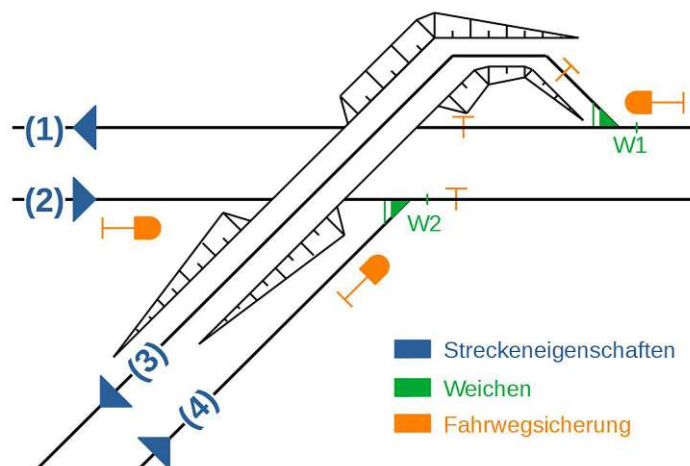


Abb. 2.9: Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 3

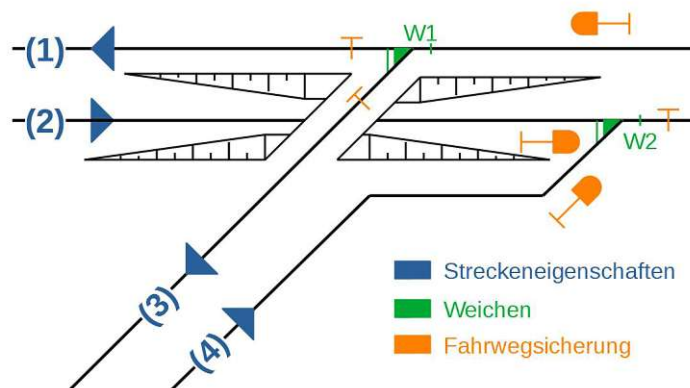


Abb. 2.10: Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 4

Eine tabellarische Zusammenfassung aller diskutierten Knotenvarianten von ein- und zweigleisigen sowie zwei- und zweigleisigen Strecken befindet sich im Anhang.

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen der Leistungsuntersuchung von Knoten

3.1 Leistungsfähigkeit eines Eisenbahnknotens

Aufbauend auf der Untersuchung der Infrastruktur eines Eisenbahnknotens ist es möglich, Kennwerte für die Ermittlung der Belastung einer bestehenden oder geplanten Verknüpfung zu berechnen. Dies geschieht mittels Verfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit. Die Ergebnisse der Leistungsuntersuchung können zusätzlich für einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Verknüpfungsvarianten genutzt werden.

Um die Überlegungen hinter den Verfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit verstehen zu können, wird ein kurzer theoretischer Überblick gegeben.

Die Betriebsqualität eines zu untersuchenden Betriebsprogramms¹ wird mittels Leistungsuntersuchungen ermittelt (Vgl. Pachl 2021: S. 153). Der Zusammenhang zwischen Betriebsqualität und Belastung eines Abschnitts, zum Beispiel Züge pro Stunde, wird als Leistungsverhalten bezeichnet (Vgl. ebd.: S. 153). Wird die Belastung erhöht, steigen die Wartezeiten im System überproportional an (Vgl. ebd.: S. 157ff.). Die Darstellung der Wartezeiten in Abhängigkeit von der Belastung ergibt die Wartezeitfunktion (Vgl. ebd.: S. 153). Es ergibt sich ein exponentielles Wachstum der Wartezeitfunktion bis ein maximaler Wert erreicht wird, der als maximale Leistungsfähigkeit bezeichnet wird (Vgl. ebd.: S. 154). Zur Bestimmung des optimalen Leistungsbereichs erfolgt anschließend die Überlegung, in welchem Bereich der Wartezeitfunktion die Belastung sein sollte (Vgl. ebd.: S. 157ff.).

Aus diesem theoretischen Hintergrund haben sich Verfahren zur Bewertung der Leistungsfähigkeit entwickelt. Ihre Einsatzbereiche unterscheiden sich durch verschiedene Eingangswerte und Berechnungsverfahren (Vgl. Weigand und Heppe 2013: S. 485, S. 488).

3.1.1 Verfahrensauswahl für die Leistungsuntersuchung

Die Eingrenzung der Verfahren auf die für die Analyse von Eisenbahnknoten geeigneten Methoden bedarf einer Literaturrecherche.

Pachl (2021: S. 161) unterscheidet bei Methoden zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit zwischen analytischem Verfahren und Simulationsverfahren. Im Werk von Weigand und Heppe (2013: S. 485) werden zusätzlich auch die statistisch-deterministische und die konstruktive Methode aufgelistet.

Der Einsatz der jeweiligen Varianten wird bei Weigand und Heppe (ebd.: S. 488, Abb. 9.33) nach Untersuchungsgegenständen eines Eisenbahnnetzes und der Qualität der Daten gegliedert.

¹Ein Betriebsprogramm beinhaltet die betrieblichen Vorgaben wie zum Beispiel unter anderem den Einsatz von Zügen, deren Last, Leistung und Länge sowie den Fahrplan (Vgl. Schmitt und Jänsch 2013: S. 331, vgl. Weigand und Heppe 2013: S. 444, vgl. Menius und Matthews 2020: S. 81).

Die Untersuchungsgegenstände reichen vom gesamten Netz über Gleisgruppen bis hin zu Fahrstraßenknoten (Vgl. ebd.: S. 488, Abb. 9.33). Der maßgebende Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung von Fahrstraßenknoten. Bei Weigand und Heppe (ebd.: S. 488) werden für den Fahrstraßenknoten die analytische und die konstruktive Methode sowie die Simulation aufgezeigt. Für die Leistungsfähigkeit als zentrales Thema dieser Arbeit wird jedoch die analytische Methode hervorgehoben, da diese für Leistungskennwerte und Bemessung der Fahrstraßenknoten genutzt werden kann (Vgl. ebd.: S. 489).

Eine unsystematische Nutzung spricht ebenfalls für die analytische Methode als eine passende Auswahl (Vgl. ebd.: S. 488, Abb. 9.33). Die unsystematische Nutzung liegt vor, da in dieser Untersuchung kein konkreter Fahrplan gegeben ist. Zusätzlich wird die Simulation in Betracht gezogen, da die Berechnungsmöglichkeiten der anderen Verfahren in ihr vereint werden (Vgl. ebd.: S. 486). Ihre Rolle für die Analyse eines Eisenbahnknotens soll im Rahmen dieser Arbeit beleuchtet werden.

Bei Pachl (2021: S. 162f.) wird in Bezug auf die analytische Methode vor allem der Vorteil der Möglichkeit der manuellen Berechnung für kleinere Untersuchungen erwähnt. Komplexere analytische als auch sämtliche Simulationsverfahren müssen rechnergestützt durchgeführt werden (Vgl. ebd.: S. 162f.).

Somit erscheinen zusammenfassend sowohl bei Weigand und Heppe (2013) als auch bei Pachl (2021) die analytische Methode zusammen mit der Simulation als passende Wahl.

Die unterschiedliche Aufteilung der Verfahren mit vier Vorgehensweisen bei Weigand und Heppe (2013) und zwei bei Pachl (2021) ist für die Analyse nicht relevant. Im Rahmen dieser Untersuchung werden die zwei bei beiden Werken genannten Verfahren gewählt.

3.2 Verfahrensunabhängiger Teil der Leistungsuntersuchung

Die Vorgangsweise einer Leistungsuntersuchung verläuft zu einem Teil unabhängig vom gewählten Verfahren. Zu einem anderen Teil unterscheidet sich das Prozedere dennoch, auch aufgrund von unterschiedlichen Eingangsparametern oder Untersuchungsgegenständen. Die Aufteilung der nachfolgenden Abschnitte erfolgt daher in eine anfangs verfahrensunabhängige Vorgehensweise und den anschließenden verfahrensspezifischen Abläufen.

Die vorgestellten Vorgehensweisen sind auf die in dieser Arbeit untersuchte Problematik zugeschnitten und stellen kein allgemeines Verfahren für sämtliche Leistungsuntersuchungen dar. Die Untersuchung konzentriert sich auf Eisenbahnknoten auf der freien Strecke.

Bevor auf die verfahrensspezifische Vorgehensweise genauer eingegangen werden kann, werden Punkte diskutiert, die sowohl das analytische Verfahren als auch die Simulation betreffen. Zu Beginn einer Untersuchung steht immer die Festlegung der Ziele, die zum Beispiel eine höhere Pünktlichkeit oder eine Kapazitätsanpassung sein können. (Vgl. Böttcher und Fengler 2007: S. 527).

Aufbauend auf der Zielfestlegung wird eine Bestandsaufnahme durchgeführt (Vgl. ebd.: S. 528). Elemente dieser Bestandsaufnahme sind Gleispläne, Streckenbeschreibung und Knotenbetrachtung im Eisenbahnnetz (Vgl. ebd.: S. 528).

Anschließend wird die Analyse des Knotens vorgenommen, um die Möglichkeiten des Knotens wiederzugeben (Vgl. ebd.: S. 528f.). Hierzu wird von Böttcher und Fengler (ebd.: S. 528f.) die Untersuchung eines Bestandsknotens beschrieben. Sinngemäß können die Überlegungen auch auf einen Entwurfsvorschlag im Neubau angewendet werden.

Der erste Teil einer Untersuchung kommt ohne Betriebsprogramm und somit ohne Zuganzahl aus und befasst sich ausschließlich mit der vorhandenen Infrastruktur (Vgl. Böttcher und Fengler 2007: S. 529). Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Funktion eines Knotens, die sich als Verknüpfung von Strecken zeigt (Vgl. ebd.: S. 530). Bei der Untersuchung der Infrastruktur zeigen sich vor allem Elemente, wie durchgehende Hauptgleise, die Erreichbarkeit von Gleisen oder die Analyse von Fahrstraßenausschlüssen (Vgl. ebd.: S. 530).

Zwei weitere Untersuchungsfaktoren betreffen die Fahrtenanalyse und die verkehrliche Analyse (Vgl. ebd.: S. 531). Während die Fahrtenanalyse anhand von Zugzahlen die Nachfrage in die Untersuchung einbringt, lässt die verkehrliche Analyse das Personenaufkommen und damit die Dimensionierung von Bahnhofseinrichtung oder Umsteigevorgänge einfließen (Vgl. ebd.: S. 531). Zum Abschluss des verfahrensunabhängigen Teils einer strukturierten Leistungsuntersuchung wird das Betriebsprogramm und die Kompatibilität mit der Knotenhauptausrichtung untersucht (Vgl. ebd.: S. 531). Die Knotenhauptausrichtung ist aufgrund der im Rahmen dieses Werks ausgeführten Untersuchung nicht von Bedeutung, da Hauptstrecke und Nebenstrecke klar definiert wurden.

Der vorgestellte verfahrensunabhängige Teil dieser Untersuchung mit dem Hauptaugenmerk auf die vorhandene oder geplante Infrastruktur wurde durch die Variantendiskussion in Kapitel 2 behandelt. Anschließend erfolgt die weitere Analyse durch Anwendung der in Kapitel 3.1 vorgestellten Verfahren, dem analytischen und dem Simulationsverfahren.

3.3 Analytisches Verfahren der Leistungsuntersuchung

Nach dem verfahrensunabhängigen Vorgehen wird bei der analytischen Leistungsuntersuchung mit nachfolgender Vorgehensweise fortgesetzt.

3.3.1 Grundlagen

Pachl (2021: S. 161f.) beschreibt das analytische Verfahren als eine Zerlegung der Infrastruktur in Teile, die nur nacheinander von mehreren Zügen mindestens im Abstand der Mindestzugfolgezeit belegt werden können. Es dient zur Berechnung von Kennwerten zur Qualitätseinschätzung aus der gegebenen Infrastruktur und dem Betriebsprogramm. Die Mindestzugfolgezeit beschreibt die "kleinste technisch mögliche Zugfolgezeit zur behinderungsfreien Durchführung zweier Durchfahrten (Pachl (ebd.: S. 296.))".

Die analytische Leistungsuntersuchung basiert auf der theoretischen Grundlage der Bedienungstheorie (Vgl. Ferchland und Körner 2004: S. 500). Hierbei werden Warteschlangen, die aufgrund der Belegung eines Abschnitts entstehen, untersucht (Vgl. ebd.: S. 500). Der als Qualitätskriterium definierter Maximalwert ist dann erreicht, wenn er in Hinblick auf Kundenfreundlichkeit oder andere Parameter nicht mehr vertretbar ist (Vgl. ebd.: S. 500). Wartezeiten können unplanmäßig, zum Beispiel durch Verspätungen, auftreten oder planmäßig für die Fahrplanerstellung erforderlich sein (Vgl. ebd.: S. 500).

Pachl (2021: S. 161) beschreibt des Weiteren, dass Wartezeiten immer nur vor einem Abschnitt auftreten können und nicht in diesem. Dadurch können Qualität und Auslastung immer nur einem einzelnen Abschnitt zugeordnet werden (Vgl. ebd.: S. 161). Folglich kann keine allgemeine Beschreibung mehrerer Abschnitte erstellt werden (Vgl. ebd.: S. 161).

Es gibt beim analytischen Verfahren die Möglichkeit komplexere Problemstellungen rechnergestützt zu behandeln (Vgl. ebd.: S.162). Alternativ können einfachere Modelle angewendet werden, welche mittels Auslastung und empirischen Ansätzen die Betriebsqualität erfassen (Vgl. ebd.:

S.162).

Genauere Angaben beim Fahrplan erfordern laut Weigand und Heppe (2013: S. 486) eine Reduktion der Eingangsparameter. Dadurch gehen konkrete Angaben verloren, weshalb die Ergebnisse nur einen charakteristischen Wert haben (Vgl. ebd.: S. 486). Vertaktete Fahrpläne sind deshalb nicht ohne Anpassungen mit dieser Methode untersuchbar (Vgl. ebd.: S. 486).

Des Weiteren wird bei der analytischen Leistungsuntersuchung bei Pachl (2021: S. 177) der Knoten in Fahrstraßenknoten und Gleisgruppen unterteilt. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die Fahrstraßenknoten beachtet. Da nur auf der freien Strecke liegende Knoten untersucht werden, werden Gleisgruppen nicht analysiert (Vgl. ebd.: S. 177). Sie befinden sich im Bahnhofsbereich (Vgl. ebd.: S. 177). Die Fahrstraßenknoten werden in Teilfahrstraßenknoten (TFSK) zerlegt (Vgl. ebd.: S. 178). Teilfahrstraßenknoten definieren sich dadurch, dass sich alle darüber führenden Fahrstraßen gegenseitig ausschließen (Vgl. ebd.: S. 178).

3.3.2 Vereinfachte Verfahren

Wie im folgenden Abschnitt aufgezeigt wird, erweisen sich die bei Pachl (ebd.: S. 179ff.) vorgestellten vereinfachten Verfahren für diese Untersuchung als ungeeignet.

Das erste Verfahren reduziert die Untersuchung auf einzelne Punkte und analysiert diese mittels Behinderungstheorie (Vgl. ebd.: S. 179). Hierbei wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass eine beliebige Zugfahrt durch eine andere Zugfahrt behindert wird (Vgl. ebd.: S. 179). Aufgrund der Betrachtung von einzelnen Punkten entfernt sich das Ergebnis stark von einer Infrastrukturabhängigkeit hin zu einer Betriebsprogrammabhängigkeit. Ziel dieser Arbeit ist es jedoch, möglichst die Abhängigkeit der Ausbildung eines Knotens zu diskutieren und die Einflüsse des Betriebsprogrammes so klein wie möglich zu halten.

Das zweite Verfahren befasst sich mit Fahrstraßenausschusstafeln, die vor allem bei sehr komplexen Knoten ein gutes Hilfsmittel sind (Vgl. ebd.: S. 182f.). Sie zeichnen sich durch das Auftragen aller Fahrtkombinationen in Tabellenform aus (Vgl. ebd.: S. 182f.). Die hier untersuchten Knoten sind unkompliziert, sodass dieses Verfahren nicht geeignet ist.

3.3.3 Standardverfahren

Um eine Analyse durchführen zu können, ist eine Abgrenzung des untersuchten Gebiets erforderlich. Dabei sollte das Untersuchungsgebiet so klein wie möglich gewählt werden, allerdings auch groß genug, um alle maßgebenden Parameter zu enthalten (Vgl. Ferchland und Körner 2004: S. 501). Das untersuchte Element muss im Analysebereich liegen (Vgl. ebd.: S. 501). Als Untersuchungsgebiet wird der Abschnitt zwischen den beiden nächstgelegenen Bahnhöfen, Haltestellen oder Ähnlichem gewählt (Vgl. ebd.: S. 501).

Die Leistungsuntersuchung beim analytischen Grundverfahren erfolgt über die mittlere Mindestzugfolgezeit (Vgl. Pachl 2021: S. 178). Als Mindestzugfolgezeit ist jener Zeitabstand zwischen zwei Zugfahrten zu verstehen, welcher ohne Sperrzeitüberschneidung² stattfindet (Vgl. ebd.: S. 167). Der Ablauf der Untersuchung beginnt mit der Feststellung der Mindestzugfolgezeiten der einzelnen Fahrten (Vgl. ebd.: S. 178). Daraus errechnet sich die mittlere Zugfolgezeit (Vgl. ebd.: S. 178). Die Analyse findet getrennt für jeden Teilfahrstraßenknoten statt (Vgl. ebd.: S. 178).

²Die Sperrzeit ist jene Zeit, in der ein Zug einen Blockabschnitt durchfährt und ihn betrieblich beansprucht und dadurch für andere Zugfahrten sperrt (Vgl. Pachl 2021: S. 299).

3.4 Simulationsverfahren der Leistungsuntersuchung

Der Ablauf des Simulationsverfahrens schließt an den verfahrensunabhängigen Teil der Leistungsuntersuchung an.

3.4.1 Grundlagen

Mit dem Simulationsverfahren werden Kennwerte bestimmt, die bei einer bestimmten Belastung die Betriebsqualität beschreiben (Vgl. Pachtl 2021: S. 163). Die Belastung wird solange gesteigert, bis ein gewisses Qualitätsniveau erreicht ist, um die praktische Leistungsfähigkeit zu bestimmen (Vgl. ebd.: S. 164). Alternativ wird untersucht, ob die Kennwerte bei einem bestimmten Programm überschritten werden (Vgl. ebd.: S. 164). Der Vorteil von Simulationen ist das Einbringen von Zufällen in die Berechnungen durch wiederholte Simulation vom Fahrplan (Vgl. Weigand und Heppe 2013: S. 487). Mit diversen unterschiedlichen Ereignissen wird ein möglichst realistisches Ergebnis erzielt (Vgl. ebd.: S. 487).

Eine grundlegende Unterscheidung bei Simulationsverfahren ist jene zwischen der asynchronen und der synchronen Simulation (Vgl. Pachtl 2021: S. 165). Bei der asynchronen Simulation wird zuerst die Fahrplanerstellung untersucht (Vgl. ebd.: S. 165f.). Hierbei wird die Fahrplankonstruktion durch Einlegen der Zugkategorien nach den Fahrtwünschen simuliert (Vgl. ebd.: S. 165f.). Die asynchrone Verhaltensweise charakterisiert sich durch ein aufeinanderfolgendes Abhandeln der einzelnen Sperrzeitentreppe³ (Vgl. ebd.: S. 165f.). Anschließend erfolgt als zweiter Teil der asynchronen Simulation die Untersuchung der Betriebsdurchführung (Vgl. ebd.: S. 166).

Die synchrone Simulation befasst sich ausschließlich mit der Betriebsdurchführung (Vgl. ebd.: S. 166). Hierbei wird im Unterschied zur asynchronen Simulation auf die Untersuchung von Sperrzeitentreppe verzichtet (Vgl. ebd.: S. 166). Es wird jedoch die realistische Nachbildung des Ablaufs analysiert (Vgl. ebd.: S. 166).

Weigand und Heppe (2013: S. 486) schreiben hierzu, dass die enorme Zunahme an Qualität bei der Simulation zu einem sehr großen Bedarf an Eingangswerten führt.

3.4.2 Standardverfahren

Um Kenngrößen der Leistungsfähigkeit zu erhalten, wird der Betrieb simuliert (Vgl. Kuckelberg et al. 2013: S. 51). Dazu werden verschiedene Störungen in den Fahrplan gebracht und anschließend statistisch ausgewertet, wie sich diese unterschiedlich auswirken (Vgl. ebd.: S. 51).

Somit ist keine Vorgehensweise im klassischen Sinne gegeben, sondern vielmehr sind bestimmte Eingangsdaten erforderlich, die in das Simulationsprogramm eingespielt werden (Vgl. ebd.: S. 51). Eingangsparameter sind unter anderem ein konfliktloser Fahrplan, Infrastrukturdaten (zum Beispiel Sicherheitstechnik, Trasse), Angaben zu möglichen Fahrwegen, Stammdaten (zum Beispiel Fahrzeugdaten) und Verknüpfungen (zum Beispiel Umsteigeanschlussverbindungen) (Vgl. ebd.: S. 51).

Die Simulation der Fahrplanerstellung ist wegen der Konzentration der Untersuchung auf die Infrastruktur nicht relevant und bedarf daher keiner weiteren Beachtung (Vgl. ebd.: S. 50f.).

³Die Sperrzeitentreppe ergibt sich aus der grafischen Darstellung von Sperrzeiten, wenn ein Zug aufeinanderfolgende Blöcke durchfährt (Vgl. Pachtl 2021: S. 299).

Kapitel 4

Vorgehen bei der Leistungsuntersuchung bei Knoten ein- und zweigleisiger Strecken

4.1 Vorgehen bei der analytischen Leistungsuntersuchung

Die verfahrensunabhängige Infrastrukturanalyse in Kapitel 2 sowie die Diskussion der Verfahren zur Leistungsermittlung in Kapitel 3 stellen die Grundlage für die analytische Leistungsuntersuchung dar.

Für Leistungsuntersuchungen ist die Eingrenzung des genauen Untersuchungsgebiets wichtig. Damit ein Vergleich der Knotenvarianten möglich ist und nicht Umgebungseinflüsse einbezogen werden, ist eine Beschränkung auf den engsten Knotenumkreis erforderlich (Vgl. Ferchland und Körner 2004: S. 501).

Um die Untersuchung enger einzugrenzen als die Größe eines Blockabschnitts, wird statt des kompletten Blockabschnitts lediglich der Knoten betrachtet. Die Sperrzeit eines Blockabschnitts wurde in Kapitel 2.2 bereits als jene Zeit definiert, in der ein Abschnitt von einer Zugfahrt blockiert ist (Vgl. Pachl 2021: S. 52). Sie umfasst zusätzlich zur Fahrzeit zwischen Vorsignal und Blockabschnitt auch die bedienungstechnischen Reaktionszeiten und die Zeit zum Erkennen des Signals (Vgl. ebd.: S. 52). Ebenfalls enthalten sind die Fahrzeiten im Blockabschnitt sowie um den Blockabschnitt zu verlassen (Vgl. ebd.: S. 52).

Mit Ausnahme der Fahrzeit vom Hauptsignal vor dem Knoten bis zum Verlassen des Knotens können alle weiteren Anteile der Sperrzeit nicht durch die Knotengestaltung verändert werden (Vgl. ebd.: S. 52). Durch das nicht Beachten dieser können die direkten Einflüsse des Knotens auf die Fahrzeit diskutiert werden (Vgl. ebd.: S. 52). Somit wird in dieser Untersuchung mit dem Begriff Fahrzeit jene Dauer beschrieben, die der Zug für eine Fahrt vom Hauptsignal vor dem Knoten bis zum Verlassen des Knotens benötigt.

Mit den ermittelten Fahrzeiten der in Kapitel 2 gezeigten Verknüpfungsvarianten kann in weiterer Folge die Mindestzugfolgezeit berechnet werden. Dazu wird exemplarisch je eine Verknüpfungsvariante zweier eingleisiger, einer ein- und einer zweigleisigen und zweier zweigleisiger Strecken veranschaulicht. Die Vorgehensweise für die nicht behandelten fünf Varianten kann direkt abgeleitet werden.

In dieser Berechnung werden Variablen eingesetzt, um anschließend eine Ermittlung der Fahrzeiten für verschiedene Weichen und Hauptstreckengeschwindigkeiten möglich zu machen.

4.1.1 Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken

Bei der Berechnung der Fahrzeiten wird zuerst die Länge der Fahrwege bestimmt und anschließend durch die Geschwindigkeit dividiert. Für die Längen der Fahrwege ist neben der Entfernung des Hauptsignals und der Gleisfreimeldeanlage vom Knoten der zurückgelegte Weg im Knoten von Bedeutung.

Die Entfernung des Hauptsignals zum Knoten ergibt sich durch den Durchrutschweg. Während

in Österreich als Mindestlänge für den Durchrutschweg 50 Meter gefordert sind, gibt es in Deutschland eine geschwindigkeitsabhängige Staffelung zwischen 50 Metern und 200 Metern (Vgl. Maschek 2013: S. 518). Im Rahmen dieser Untersuchung werden 50 Meter als Durchrutschweg gewählt, um die österreichische Rechtslage abzubilden.

Die Entfernung der Gleisfreimeldeanlagen muss einen Fahrzeugüberhang auf ein anderes Gleis verhindern (Vgl. Pachl 2021: S. 122). Daher darf eine Gleisfreimeldeanlagen nicht direkt nach dem Grenzzeichen¹ der Weiche liegen. (Vgl. ebd.: S. 122). Die Entfernung der Gleisfreimeldeanlage zum Grenzzeichen muss mindestens 6 Meter betragen (Vgl. ebd.: S. 122). Zusätzlich dürfen benachbarte Weichen nur dann in einer Gleisfreimeldeanlage zusammengefasst werden, wenn zwei Züge nicht gleichzeitig die beiden Weichen nutzen können (Vgl. ebd.: S. 121f.). Des Weiteren darf kein Signal zwischen den Weichen liegen (Vgl. ebd.: S. 121f.).

Abbildung 4.1 zeigt die genaue Position der Signale und der Gleisfreimeldeanlage. Die Skizze ist nicht maßstäblich und es sind nur ausgewählte Bemaßungen eingezeichnet.

Die Berechnung des Fahrweges s erfolgt zuerst für Gleis 1. Der Index w_{ee1} beschreibt die

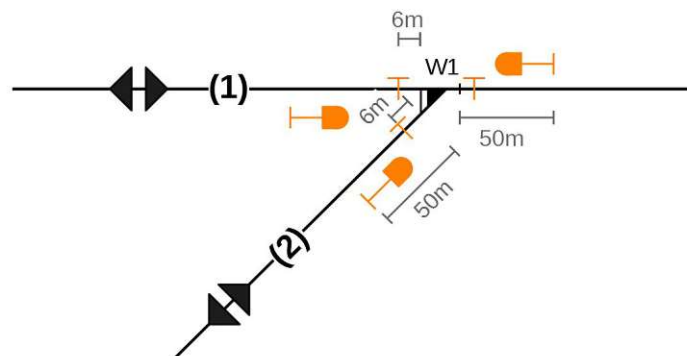


Abb. 4.1: Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken mit bemaßten Sicherheitseinrichtungen (Skizze nicht maßstäblich)

Verknüpfungsvariante und die Nummer des Fahrwegs. Die beiden tiefgestellten Buchstaben zeigen an, ob es sich um einen Knoten zweier eingleisiger (ee), einer eingleisigen und einer zweigleisigen (ez) oder zweier zweigleisigen (zz) Strecken handelt. Die Zahl dahinter beschreibt die Nummer des jeweiligen Fahrwegs.

In Abbildung 4.2 sind die untersuchten Fahrwege eingezeichnet und farblich hervorgehoben. Fahrweg 1 ist in Gleichung (4.1) zu sehen und Fahrweg 2 in die entgegengesetzte Richtung in Gleichung (4.2). Die Fahrwege setzen sich aus dem Durchrutschweg, der Länge der Weiche l_w und der Entfernung der Gleisfreimeldung zusammen. Zusätzlich muss die Zuglänge hinzugerechnet werden, da bei der Gleisfreimeldung erst nach der letzten Achse eine Freigabe erfolgt.

Fahrweg 3, die Fahrt von der Hauptstrecke zur Nebenstrecke, wird in Gleichung (4.3) berechnet. Er besteht aus dem Durchrutschweg, der Tangentenlänge l_t , der Länge des Zweiggleises b und der Entfernung der Gleisfreimeldung. Analog, nur in umgekehrter Reihenfolge zeigt Gleichung (4.4)

¹Das Grenzzeichen ist jene Markierung bei zwei auseinandergehenden Gleisen, ab der ein Zug auf dem einen Gleis die Fahrt auf dem anderen Gleis nicht blockiert (Vgl. Pachl 2021: S. 294).

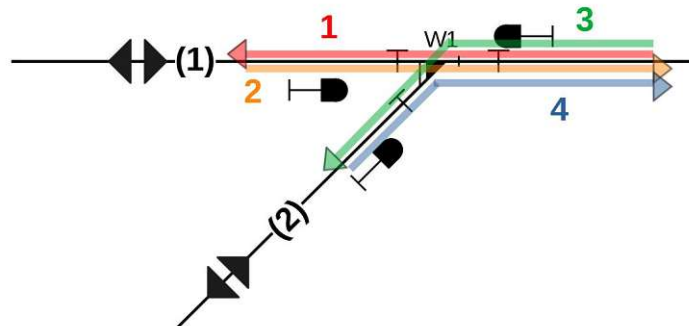


Abb. 4.2: Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken mit nummerierten Fahrwegen

die Berechnung für Fahrweg 4. Die Variablenbezeichnungen erfolgen in Anlehnung an Menius und Matthews (2020: S. 218, S. 247).

$$s_{wee1} = 50 + l_w + 6 + l_{zug} = 56 + l_w + l_{zug} \quad (4.1)$$

$$s_{wee2} = 50 + l_w + 6 + l_{zug} = 56 + l_w + l_{zug} \quad (4.2)$$

$$s_{wee3} = 50 + l_t + b + 6 + l_{zug} = 56 + l_t + b + l_{zug} \quad (4.3)$$

$$s_{wee4} = 50 + b + l_t + 6 + l_{zug} = 56 + l_t + b + l_{zug} \quad (4.4)$$

Aus den Gleichungen kann durch Division durch die Geschwindigkeit v die Fahrzeit t berechnet werden. Gleichung (4.5) zeigt umgeformt nach Schiemann (2002: S. 45, Abb. 2.9), die Berechnung.

$$t = \frac{s}{\frac{v}{3,6}} \quad (4.5)$$

Die Geschwindigkeit ist nicht immer gleich, da auf der Hauptstrecke die Hauptstreckengeschwindigkeit v_{haupt} gefahren werden kann. Bei einer Fahrt von der Hauptstrecke auf die Nebens Strecke ist die Abzweiggeschwindigkeit der Weiche $v_{abzweig}$ maßgebend. Somit ergeben sich in den Gleichungen (4.6), (4.7), (4.8) und (4.9) die Fahrzeiten.

$$t_{wee1} = \frac{56 + l_w + l_{zug}}{\frac{v_{haupt}}{3,6}} \quad (4.6)$$

$$t_{wee2} = \frac{56 + l_w + l_{zug}}{\frac{v_{haupt}}{3,6}} \quad (4.7)$$

$$t_{wee3} = \frac{56 + l_t + b + l_{zug}}{\frac{v_{abzweig}}{3,6}} \quad (4.8)$$

$$t_{wee4} = \frac{56 + l_t + b + l_{zug}}{\frac{v_{abzweig}}{3,6}} \quad (4.9)$$

Die Untersuchung der Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken stellt eine gute Möglichkeit dar, um die grundlegende Vorgehensweise von Leistungsuntersuchungen zu zeigen. Unter Berücksichtigung der Definition von Teilfahrstraßenknoten aus Kapitel 1.1.3 zeigt Abbildung 4.3, dass es lediglich einen zu berechnenden Teilfahrstraßenknoten im Untersuchungsgebiet gibt.

In der Untersuchung wird ausschließlich der Knoten analysiert und es liegt kein konkretes Beispiel

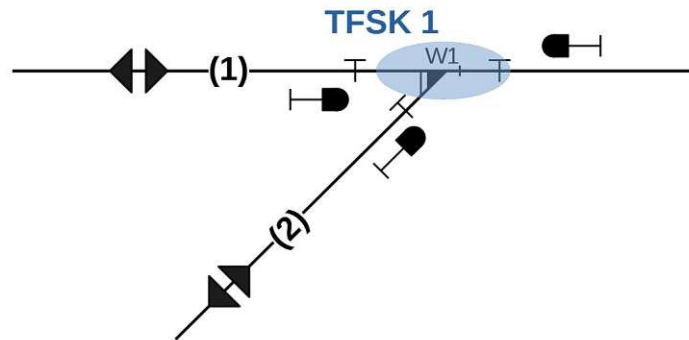


Abb. 4.3: Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken mit Teilfahrstraßenknoten

mit Blockabschnitten und Bahnhöfen vor. Dadurch kann keine Sperrzeitentreppe konstruiert und daraus die Mindestzugfolgezeit abgelesen werden (Vgl. Pachtl 2021: S. 167). Es werden ausschließlich die eingangs erwähnten Fahrzeiten im Knoten berechnet. (Vgl. ebd.: S. 167).

Anstatt der Berechnung der gewichteten mittleren Mindestzugfolgezeit als Kennwert der Leistungsfähigkeit, werden die Berechnungsschritte nach Pachtl (ebd.: S. 170f.) analog auf die ermittelten Fahrzeiten für die Fahrwege angewendet. Daraus ergeben sich die mittleren gewichteten Fahrzeiten für die einzelnen Zugfolgefälle je Teilfahrstraßenknoten (Vgl. ebd.: S. 170f.). Dabei wird der Einfluss der Infrastruktur des Knotens durch die bereits nicht berücksichtigten und nicht vom Knoten beeinflussten Anteile hervorgehoben. Die mittlere Mindestzugfolgezeit, deren Berechnung für die mittleren Fahrzeiten verwendet wird, wird laut Pachtl (ebd.: S. 170) nach Gleichung (4.10) ermittelt. Sie stellt eine Mittelung in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit der einzelnen Zugfolgefälle dar (Vgl. ebd.: S. 170f.):

$$t_{Zf,min} = \sum (t_{Zf,min,ij} * h_{ij}) \quad (4.10)$$

$t_{Zf,min}$ beschreibt dabei die mittlere Mindestzugfolgezeit, $t_{Zf,min,ij}$ die Mindestzugfolgezeit des Zugfolgefalls Zug i vor Zug j und h_{ij} die relative Häufigkeit des Zugfolgefalls Zug i vor Zug j (Vgl. ebd.: S.171).

Die Bestimmung der relativen Häufigkeit der Zugfolgefälle wird bei Pachtl (ebd.: S. 171) wie in Gleichung (4.11) berechnet:

$$h_{ij} = \frac{z_i * z_j}{z^2} \quad (4.11)$$

Hierbei beschreiben z_i und z_j die Anzahl der Züge auf der jeweiligen Fahrstraße und z die Gesamtzahl der Züge (Vgl. ebd.: S. 171). Da relative Häufigkeiten durch Prozente dargestellt werden können, ergeben sich aufsummiert 100 Prozent.

Die Untersuchung sollte ohne Betriebsprogramm durchgeführt werden, um nur den Einfluss der Infrastruktur zu zeigen. Da jedoch die Anzahl der Zugfolgefälle erforderlich ist, kann der Einfluss eines Betriebsprogramms nicht vollkommen ignoriert werden.

4.1.2 Verknüpfung von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke

Bei den eingleisigen und zweigleisigen Strecken ist bei Variante 1 aus Kapitel 2 bei einer Fahrt von Gleis 1 auf Gleis 3 auch Gleis 2 betroffen. Die Fahrwege sind analog zu Abbildung 4.2 farblich markiert und durchnummeriert. Abbildung 4.4 zeigt Variante 1. Fahrweg 1 dieser Variante

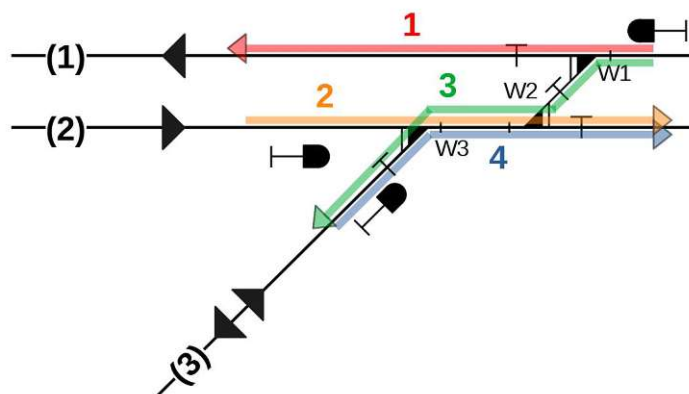


Abb. 4.4: Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke mit nummerierten Fahrwegen

ist ident zu dem bereits berechneten Fahrweg 1 der Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken. Gleichung (4.15) zeigt diesen. Fahrweg 2 setzt sich aus dem Durchrutschweg, der Längen der Weichen 2 und 3, der Zwischengeraden zwischen Weiche 2 und 3 und der Entfernung der Gleisfreimeldung zusammen. Fahrweg 2 ist in Gleichung (4.12) zu sehen. Für Fahrweg 3 werden Durchrutschweg, Tangentenlängen der Weichen 1, 2 und 3, Längen der Zweiggleise der Weichen 1, 2 und 3, Zwischengeraden zwischen Weiche 1 und 2 sowie 2 und 3 und die Entfernung der Gleisfreimeldung addiert. Gleichung (4.13) zeigt Fahrweg 3. Fahrweg 4 ist die Summe von Durchrutschweg, Tangentenlänge der Weiche 3, Länge des Zweiggleises von Weiche 3, Zwischengerade zwischen Weiche 2 und 3, Länge von Weiche 2 und Entfernung der Gleisfreimeldung. Fahrweg ist in Gleichung (4.14) zu sehen.

$$s_{w_{e2}} = 50 + l_{w3} + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w2} + 6 + l_{zug} \quad (4.12)$$

$$s_{w_{e3}} = 50 + l_{t1} + b_1 + \underbrace{\sqrt{(e * n)^2 + e^2} - 2 * l_t + l_{t2} + b_2}_{\text{Gleisverbindung nach (2.2)}} + 0,15 * v_{abzweig} + l_{t3} + b_3 + 6 + l_{zug} \quad (4.13)$$

$$s_{w_{e4}} = 50 + l_{t3} + b_3 + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w2} + 6 + l_{zug} \quad (4.14)$$

Die gerade Gleisverbindung zwischen Weiche 1 und 2 nach Gleichung (2.2) muss die bereits erwähnten Mindestlängen bei Zwischengeraden erfüllen. Abschließend lassen sich analog zu der Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken die Fahrzeiten durch Division durch die Geschwindigkeit

bestimmen. Diese sind für Fahrweg 1 (4.15), Fahrweg 2 (4.16), Fahrweg 3 (4.17) und Fahrweg 4 (4.18) aufgelistet.

$$t_{w_{ez1}} = \frac{56 + l_{w1} + l_{zug}}{\frac{v_{haupt}}{3,6}} \quad (4.15)$$

$$t_{w_{ez2}} = \frac{56 + l_{w3} + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w2} + l_{zug}}{\frac{v_{haupt}}{3,6}} \quad (4.16)$$

$$t_{w_{ez3}} = \frac{50 + l_{t1} + b_1 + \sqrt{(e * n)^2 + e^2} - 2 * l_t + l_{t2} + b_2 + 0,15 * v_{abzweig} + l_{t3} + b_3 + 6 + l_{zug}}{\frac{v_{abzweig}}{3,6}} \quad (4.17)$$

$$t_{w_{ez4}} = \frac{50 + l_{t3} + b_3 + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w2} + 6 + l_{zug}}{\frac{v_{abzweig}}{3,6}} \quad (4.18)$$

Bei dem untersuchten Knoten zeigen sich zwei Teilfahrstraßenknoten für die mittlere Fahrzeitbe-

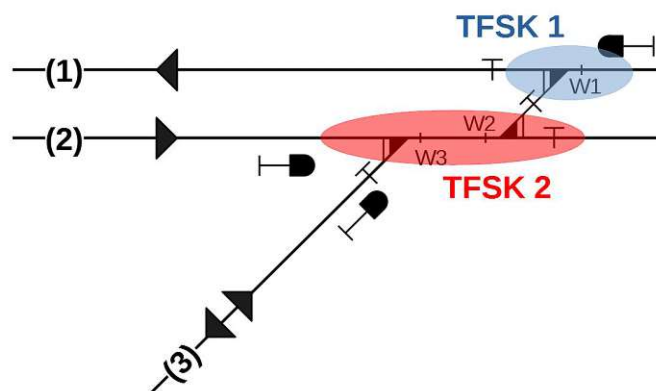


Abb. 4.5: Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke mit Teilfahrstraßenknoten

rechnung, weil sich alle darüber führenden Fahrstraßen gegenseitig ausschließen (Vgl. Pachl 2021: S. 178). Abbildung 4.5 zeigt die beiden Teilfahrstraßenknoten. Die weitere Vorgehensweise zur Bestimmung der mittleren Fahrzeit je Teilfahrstraßenknoten ist analog zu den bereits erwähnten Rechenschritten bei der Verknüpfung der eingleisigen Strecken.

4.1.3 Verknüpfung von zwei zweigleisigen Strecken

Bei Variante 1 der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken sind zwei Gleichungen zur Berechnung der Fahrzeiten der Fahrwege zu jenen von Kapitel 4.1.2 ident (Fahrweg 1 und 4). Die anderen beiden enthalten zusätzliche Terme (Fahrweg 2 und 3). Im Folgenden kommen lediglich die Veränderungen im Vergleich zu der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke zur Sprache. Abbildung 4.6 zeigt die Fahrwegnummerierung und -anordnung. Bei Fahrweg 2 ist zusätzlich die Zwischengerade zwischen Weiche 3 und 4 sowie die Länge von Weiche 4 einzurechnen. Bei Fahrweg 3 sind die Länge von Weiche 3 und die Zwischengerade zwischen Weiche 3 und 4 zu berücksichtigen.

Die Veränderungen stellen im Vergleich zu der ein- und zweigleisigen Strecke lediglich zusätzliche Terme dar, die in fetter Schrift hervorgehoben sind. Im Folgenden wird auf die separate Auflistung

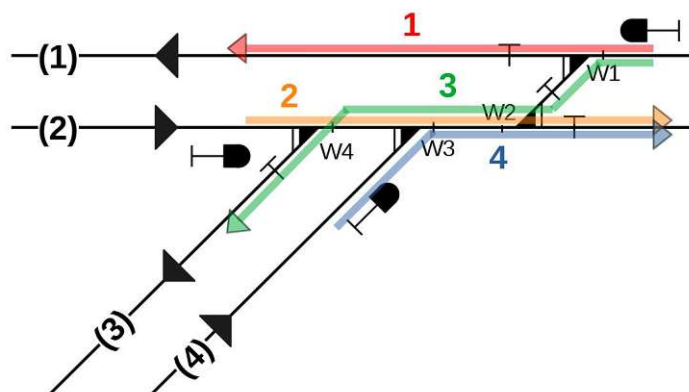


Abb. 4.6: Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken mit nummerierten Fahrwegen

von Weg und Fahrzeit verzichtet und ausschließlich die Fahrzeit berechnet. Die Fahrzeiten der Fahrwege 1 bis 4 sind in den Gleichungen (4.19) bis (4.22) wiedergegeben.

$$t_{w_{z1}} = \frac{56 + l_{w1} + l_{zug}}{\frac{v_{haupt}}{3,6}} \quad (4.19)$$

$$t_{w_{z2}} = \frac{56 + l_{w4} + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w3} + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w2} + l_{zug}}{\frac{v_{haupt}}{3,6}} \quad (4.20)$$

$$t_{w_{z3}} = (50 + l_{t1} + b_1 + \sqrt{(e * n)^2 + e^2} - 2 * l_t + l_{t2} + b_2 + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w3} + 0,15 * v_{abzweig} + l_{t4} + b_4 + 6 + l_{zug}) * \frac{v_{abzweig}}{3,6} \quad (4.21)$$

$$t_{w_{z4}} = \frac{50 + l_{t3} + b_3 + 0,15 * v_{abzweig} + l_{w2} + 6 + l_{zug}}{\frac{v_{abzweig}}{3,6}} \quad (4.22)$$

In Fahrweg 3 (Gleichung (4.21)) ist des Weiteren die Länge der gerade Gleisverbindung laut Gleichung (2.2) nach Menius und Matthews (2020: S. 271) enthalten.

Die Teilfahrstraßenknoten der Variante 1 der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Für die Teilfahrstraßenknoten kann über die Zugfolgefälle die mittlere Fahrzeit analog zu Kapitel 4.1.1 berechnet werden.

4.2 Vorgehen bei der Leistungsuntersuchung mit Simulation

Auf Basis des verfahrensunabhängigen Teils aus Kapitel 2 können die verfahrensabhängigen Schritte der Simulation erläutert werden.

Wie bei der analytischen Leistungsuntersuchung steht bei der Simulation die Abgrenzung des Untersuchungsgebiets zu Beginn im Vordergrund. Die Simulation ist auf komplexe Eisenbahnanlagen zugeschnitten (Vgl. Warninghoff und Ferchland 2004: S. 491). Die Einflussfaktoren auf den in der Simulation zu berücksichtigenden Eisenbahnbetrieb in einem Knoten gehen weit über den Knoten selbst hinaus (Vgl. ebd.: S. 491). Unter Einflussfaktoren werden die gegenseitige Beeinflussung von Zugfahrten und die zur Verfügung stehende Infrastruktur verstanden (Vgl. ebd.:

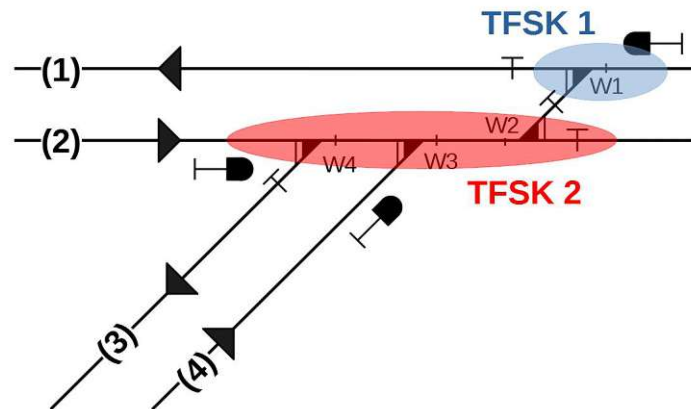


Abb. 4.7: Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken mit Teilfahrstraßenknoten

S. 491). Des Weiteren sollen die Rahmenbedingungen in Hinblick auf Zuganzahl und Fahrzeit bekannt sein (Vgl. Warninghoff und Ferchland 2004: S. 491). Bei Weigand und Heppe (2013: S. 488, Abb. 9.33) ist die Ausrichtung der Simulation auf die systematische Untersuchung zu erkennen. Eine Betrachtung von einzelnen Knoten ist somit nicht ausreichend (Vgl. Warninghoff und Ferchland 2004: S. 491). Ergebnisse der Simulation können nicht für einzelne Punkte wie Fahrstraßenknoten ausgewertet werden (Vgl. ebd.: S. 497).

Die in Kapitel 3.4.2 vorgestellte Herangehensweise der Simulation erweist sich dadurch für die spezifische Anwendung auf Knoten von ein- und zweigleisigen Eisenbahnstrecken als ungeeignet. Das Ziel, die Belastung eines Knotens durch die Simulation bestimmen zu können, wird von Bendfeldt und Warninghoff (2004: S. 364) verfolgt. Diese Methode erfolgt über Addition einzelner Behinderungszeiten, die unter anderem einem Knoten zugeordnet werden können (Vgl. ebd.: S. 366). Behinderungszeiten beschreiben jene Zeitabschnitte, wenn zum Beispiel ein Zug in einen blockierten Bereich einfahren will und es zu einer Wartezeit kommt (Vgl. ebd.: S. 366). Dafür sind fixe Abfahrts- und Belegungszeiten für Züge erforderlich (Vgl. ebd.: S. 366). Diese Methode geht über die Untersuchung der Arbeit hinaus, da hierfür ein genaues Betriebsprogramm erforderlich wäre.

Das Simulationsverfahren ist im Allgemeinen für die Leistungsuntersuchung von Knoten geeignet. Für eine Untersuchung ausschließlich innerhalb der Grenzen eines Knotens und ohne Betriebsprogramm ist es jedoch im Gegensatz zum analytischen Verfahren ungeeignet. Dadurch wird auf eine weitere Anwendung der Leistungsuntersuchung mit Simulation in dieser Arbeit verzichtet.

Kapitel 5

Beispiel für eine analytische Leistungsuntersuchung

Die in Kapitel 4 vorgestellte analytische Leistungsuntersuchung soll durch Anwendung eines Beispiels veranschaulicht werden.

5.1 Rahmenbedingungen

5.1.1 Streckengeschwindigkeit

Die Streckengeschwindigkeit wird unter anderem vom Streckenverlauf, von den Eigenschaften der Züge und von den Bremsverhältnissen beeinflusst. (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 87). Beim Streckenverlauf sind neben der Geraden auch der Bogen und der Übergangsbogen als Zwischenelement möglich (Vgl. ebd.: S. 82). Abrupte Änderungen in der Seitenbeschleunigung stellen eine Grenze für die Streckengeschwindigkeit dar, da zum Beispiel dadurch dem Komfort von Fahrgästen nicht genügend getan wird oder eine Entgleisungsgefahr entsteht (Vgl. ebd.: S. 99f.). Die Ermittlung der maximal möglichen abrupten Änderung erfolgt über den Überhöhungsfehlbetrag von Gleichung (2.1).

Um den Einfluss von Bogenradien auf die Streckengeschwindigkeit auszuschließen und dadurch zu vereinfachen, wird in diesem Beispiel der Streckenverlauf als gerade angenommen.

Neben der Trassierung hat die Länge des Blockabschnitts einen Einfluss auf die Streckengeschwindigkeit. Die untere Grenze für die Länge des Blockabschnitts bei klassischer Signalisierung stellt der Bremsweg dar (Vgl. Pachl 2021: S. 57). Der Bremswegabstand liegt laut Maschek (2018: S. 290) bei Hauptstrecken in der Regel bei 1000 Metern. Daher wird für dieses Beispiel eine Länge des Blockabschnitts von 1000 Metern angenommen.

Ebenfalls wichtig ist das Vorsignal, das für eine rechtzeitige Ankündigung des nächsten Signals verantwortlich ist (Vgl. Pachl 2021: S. 50). Der Bremsweg bei der maximalen Streckengeschwindigkeit stellt das maßgebende Merkmal für den Vorsignalabstand dar. Es muss eine ausreichende Distanz zur Verfügung stehen, damit ein Zug vor einem Hauptsignal anhalten kann. Der Bremsweg wird aus der maximalen Streckengeschwindigkeit berechnet und für den Vorsignalabstand aufgerundet (Vgl. Maschek 2018: S. 91).

Die Formel zur Berechnung des Bremsweges bis zum kompletten Stillstand ist in Gleichung (5.1) in Anlehnung an Schiemann (2002: S. 43, Abb. 2.7) zu sehen. Die Originalgleichung dahingehend verändert wurde, dass die Beschleunigung b hier mit a bezeichnet wird.

$$s_{brems} = \frac{\left(\frac{v}{3,6}\right)^2}{2 * a} \quad (5.1)$$

Hierbei beschreibt s den Bremsweg und v die Geschwindigkeit (Vgl. ebd.: S. 40).

Als maximale Streckengeschwindigkeit für das Beispiel werden 160 km/h festgelegt. Bei diesem

Wert ist der gerundete Vorsignalabstand bei Anwendung von Gleichung (5.1) ident mit der laut Maschek (2018: S. 290) erforderlichen Länge des Blockabschnitts von 1000 Metern. Die Beschleunigung a wurde auf $1 \frac{m}{s^2}$ festgelegt, was in etwa einem Intercity-Zug entspricht (Vgl. Schiemann 2002: S. 45). Gleichung (5.2) zeigt die Berechnung.

$$s_{brems} = \frac{\left(\frac{160}{3,6}\right)^2}{2 * 1} = 987,7m \approx 1000m \quad (5.2)$$

Bei einer höheren maximalen Streckengeschwindigkeiten müsste das Vorsignal bereits vor dem vorherigen Hauptsignal liegen (Vgl. Maschek 2018: S. 210). Somit stellt 160 km/h die Grenze für eine Zweiabschnittssignalisierung dar (Vgl. Pachl 2021: S. 50f.).

5.1.2 Weichen

Die Wahl der Weichenform hat laut Kapitel 2 einen direkten Einfluss auf die Abzweiggeschwindigkeit hat. Zusätzlich fließen die Maße der Weiche nach Kapitel 4.1.1 in die Leistungsuntersuchung ein.

Neben der Unterscheidung zwischen einfacher Weiche und Bogenweiche in Kapitel 1.1.3 wird bei Weichen auch nach dem Herzstück differenziert. Bei einem geraden Herzstück endet der Bogen des Zweiggleises vor dem Herzstück, bei einem gebogenen Herzstück geht der Bogen darüber hinaus (Vgl. Lay und Rensing 2013: S. 265). Der Entwicklung von Weichen mit geradem Herzstück liegt der Gedanke zugrunde, dass eine möglichst lange Zwischengerade bei einer geraden Gleisverbindung entsteht (Vgl. Menius und Matthews 2020: S. 217). Deshalb werden in diesem Beispiel ausschließlich Weichen mit geradem Herzstück berücksichtigt.

In Tabelle 5.1 sind sowohl die Abzweiggeschwindigkeiten als auch die Absteckmaße für die diskutierten Weichen aggregiert zusammengefasst. Analog zu Kapitel 4.1.1 beschreibt l_w die Weichenlänge und l_t die Tangentenlänge (Vgl. ebd.: S. 218). b ist die Länge des Zweiggleises, die sich aus der Tangentenlänge und der Länge der Geraden zusammensetzt (Vgl. ebd.: S. 247). Für alle Weichen in Tabelle 5.1 ist die Bedingung für die Mindestlänge der Zwischengerade

Tab. 5.1: Zur Auswahl stehende Weichen für die Berechnungen

Quelle: In Anlehnung an Menius und Matthews (2020: S. 220, S. 247)

Weichenform	Abzweiggeschwindigkeit $v_{abzweig}$ [km/h]	l_w [m]	l_t [m]	b [m]	Neigung
60-300-1:14	50	37,809	10,701	27,108	1:14
60-500-1:14	60	44,942	17,834	27,108	1:14
60-760-1:18,5	80	52,934	20,526	32,409	1:18,5

laut Tabelle 2.1 erfüllt. Beispielhaft wird für die nachfolgenden Berechnungen die Weicheform EW 60-760-1:18:5 gewählt.

5.2 Berechnung der Fahrzeit

Mit den gegebenen Rahmenbedingungen werden die Schritte aus Kapitel 4 für die analytische Leistungsuntersuchung durchgeführt.

Zur Übersicht werden die gewählten Rahmenbedingungen zusammenfassend aufgezählt:

- Streckengeschwindigkeit: 160 km/h

- Weichenform: EW 60-760-1:18,5
- Zuglänge: 200 Meter (Die Zuglänge wird im Rahmen dieses Beispiels mit 200 Metern festgelegt)

5.2.1 Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken

Die Fahrzeit wird nach den Formeln aus Kapitel 4.1 berechnet. Zu den drei bereits behandelten Varianten, werden in diesem Beispiel zusätzlich die übrigen 5 Verknüpfungen durchgerechnet. Somit können die Ergebnisse von allen acht in Kapitel 2 vorgestellten Varianten verglichen werden.

Die Berechnung der Fahrzeit wird unter Verwendung der Programmiersprache Python durchgeführt. Der Code ist dem Anhang zu entnehmen. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit einer Berechnung ohne Rechnerunterstützung.

In Tabelle 5.2 sind die errechneten Fahrzeiten für die Fahrwege der Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken angegeben. Die Resultate sind für Fahrweg 1 und 2 sowie für Fahrweg 3 und 4 ident, da die gleiche Distanz in die jeweils andere Richtung befahren wird.

In diesem Beispiel wird aufgrund der nicht berücksichtigten Anteile der Sperrzeit die mittlere

Tab. 5.2: Fahrzeiten der Fahrwege für die Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken

	Fahrzeit für			
	Fahrweg 1 [s]	Fahrweg 2 [s]	Fahrweg 3 [s]	Fahrweg 4 [s]
Variante 1	6,95	6,95	13,9	13,9

Fahrzeit anstatt der mittleren Mindestzugfolgezeit für jeden Teilfahrstraßenknoten berechnet. Für die Ermittlung der mittleren Mindestzugfolgezeit müssen die fehlenden Anteile der Sperrzeit zu den einzelnen berechneten Fahrzeiten addiert werden. Mit der gewählten Streckengeschwindigkeit von 160 km/h auf der Hauptstrecke und der sich aus der Weichenform ergebenden Abzweiggeschwindigkeit von 80 km/h lassen sich die fehlenden Anteile berechnen.

Diese sind die Fahrstraßenbildezeit, die Vorsignalsichtzeit, die Fahrzeit zwischen Vorsignal und Hauptsignal sowie die Fahrstraßenauflösezeit (Vgl. Pachl 2021: S. 52). Laut Pachl (ebd.: S. 52) kann die Signalsichtzeit mit 12 Sekunden abgeschätzt werden. Die Fahrstraßenbildezeit und Fahrstraßenauflösezeit betragen in Abhängigkeit von der Stellwerkart zwischen wenigen Sekunden bei hoher Automatisierung und einer deutlich längeren Zeit, wenn die Elemente einzeln bedient werden müssen (Vgl. Maschek 2018: S. 163). Daher werden die Fahrstraßenbildezeit und die Fahrstraßenauflösezeit in den nachfolgenden Berechnungen beispielhaft mit jeweils 20 Sekunden abgeschätzt. Der Abstand zwischen Vorsignal und Hauptsignal beträgt laut Gleichung (5.2) 1000 Meter.

Somit ergibt sich, um von der Fahrzeit auf die Sperrzeit für eine Fahrt auf der Hauptstrecke zu kommen, nach Gleichung (5.3) ein Aufschlag von 74,5 Sekunden.

$$t_{sperr_{haupt}} = 20 + 12 + \frac{1000}{\left(\frac{160}{3,6}\right)} + 20 = 74,5 \text{ s} \quad (5.3)$$

Der Aufschlag auf die Fahrzeit für einen abzweigenden Zug berechnet sich analog, allerdings muss die Reduktion der Geschwindigkeit des Zuges von 160 km/h auf 80 km/h beachtet werden.

Dazu wird die Zeit zum Reduzieren der Geschwindigkeit sowie die dazu erforderliche Strecke berücksichtigt. In Anlehnung an Schiemann (2002: S. 44) berechnet sich die benötigte Zeit nach Gleichung (5.4) und die erforderliche Strecke nach Gleichung (5.5). Die Gleichungen unterscheiden sich im Vergleich zu Schiemann (ebd.) dahingehend, dass die Beschleunigung b hier mit a bezeichnet wird.

$$t_{brems} = \frac{\left(\frac{v_1 - v_2}{3,6}\right)}{a} \quad (5.4)$$

$$s_{brems} = \frac{\left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{3,6}\right)}{2 * a} \quad (5.5)$$

Hierbei beschreibt s den Bremsweg, t die Bremszeit, v_1 die Geschwindigkeit vor der Geschwindigkeitsreduktion und v_2 die Geschwindigkeit nach der Geschwindigkeitsreduktion (Vgl. ebd.: S. 44). Dadurch kann der fehlende Anteil der Sperrzeit nach Gleichung (5.6) mit 85,9 Sekunden beziffert werden.

$$t_{sperr_{neben}} = 20 + 12 + \frac{\frac{160}{3,6} - \frac{80}{3,6}}{1} + \frac{1000 - \frac{\left(\frac{160}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{80}{3,6}\right)^2}{2 * 1}}{\frac{80}{3,6}} + 20 = 85,9 \text{ s} \quad (5.6)$$

Die hinzuzurechnenden Zeitanteile dienen der Vollständigkeit und werden in diesem Beispiel nicht weiter berücksichtigt. Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, liegt der Schwerpunkt auf dem Einfluss der Infrastruktur bei den Berechnungen der Fahrzeit. Mit Gleichung (4.10) kann nachfolgend die mittlere Fahrzeit analog zur mittleren Mindestzugfolgezeit berechnet werden.

Die Ermittlung der mittleren Fahrzeit bei der Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken erfolgt über die Fahrzeit jedes einzelnen Zugfolgefalls (Vgl. Pachl 2021: S.170). Für die Berechnung der relativen Häufigkeit der Zugfolgefälle laut Gleichung (4.11) muss eine Anzahl an Zugfahrten angenommen werden.

Im Rahmen dieses Beispiels wird ein Verhältnis von 70:30 für Zugfahrten zwischen Haupt- und Nebenstrecken frei gewählt. Für die Übersichtlichkeit der Berechnung wird auf der Hauptstrecke mit 70 verkehrenden Zügen und auf der Nebenstrecke mit 30 verkehrenden Zügen gerechnet.

Gleis 1 stellt bei der Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken in Abbildung 2.2 die Hauptstrecke und Gleis 2 die Nebenstrecke dar. Wie in Tabelle 5.2 ersichtlich, ist es für die Fahrzeit unerheblich, ob eine Zugfahrt von der Haupt- auf die Nebenstrecke oder von der Neben- auf die Hauptstrecke führt. Es wird dieselbe Distanz mit derselben Geschwindigkeit zurückgelegt.

Es sind vier Zugfolgefälle zu berechnen. Es fahren beide Züge auf der Hauptstrecke, beide Züge auf der Nebenstrecke, der erste Zug auf der Hauptstrecke und der zweite Zug auf der Nebenstrecke oder umgekehrt.

Die Notation der Fahrstraßen erfolgt über eine Zahl und eine anschließend tiefgestellte Zahl. Dabei beschreibt die erste Zahl von welchem Gleis der Zug in den Knoten einfährt und die tiefgestellte Zahl auf welchem Gleis er den Knoten verlässt. Zum Beispiel wird ein von Gleis 1 auf Gleis 2 fahrender Zug mit z_{12} bezeichnet. Entsprechend der Notation besteht der Index der relativen Häufigkeit aus zwei zusammengesetzten Zahlen.

Zusätzlich stehen ee für eine Verknüpfung von zwei eingleisigen Strecken, ez für eine von einer ein- und einer zweigleisigen Strecke und zz für eine von zwei zweigleisigen Strecken.

Die vier relativen Häufigkeiten h berechnen sich nach Gleichung (4.11) zu:

$$h_{ee_{1111}} = \frac{70 * 70}{100^2} = 0,49 \quad (5.7)$$

$$h_{ee_{1_1 1_2}} = h_{ee_{1_2 1_1}} = \frac{70 * 30}{100^2} = 0,21 \quad (5.8)$$

$$h_{ee_{1_2 1_2}} = \frac{30 * 30}{100^2} = 0,09 \quad (5.9)$$

Mit den berechneten relativen Häufigkeiten kann die mittlere Fahrzeit t_{Fz} für den Knoten mit Hilfe der Gleichung (4.10) berechnet werden. Es werden die Fahrzeiten der vier Zugfolgefälle eingesetzt.

$$t_{Fz} = 0,49 * 6,95 + 0,21 * 6,95 + 0,21 * 13,9 + 0,09 * 13,9 = 9,0sec \quad (5.10)$$

Das Ergebnis von Gleichung (5.10) stellt somit die mittlere Fahrzeit für diese Verknüpfungsvariante dar.

5.2.2 Verknüpfung von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke

Die Vorgehensweise der Verknüpfungen zweier eingleisiger Strecken wird ebenfalls bei der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke angewendet. Tabelle 5.3 stellt die Ergebnisse der berechneten Fahrzeiten für die Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke dar. Wie

Tab. 5.3: Fahrzeiten der Fahrwege für Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke

	Fahrzeit für			
	Fahrweg 1 [s]	Fahrweg 2 [s]	Fahrweg 3 [s]	Fahrweg 4 [s]
Variante 1	6,95	8,41	21,11	16,82
Variante 2	6,95	6,95	13,9	13,9
Variante 3	6,95	6,95	18,19	18,19

in Kapitel 4.1 wird bei den Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke exemplarisch Variante 1 durchgerechnet. Die Rechnungen werden nicht mit Variablen durchgerechnet. Dadurch ist ein Einsetzen beliebiger Werte für die Streckengeschwindigkeit, die Weichenform und die Zuglänge nicht möglich. Eine Berechnung mit anderen Rahmenbedingungen ist jedoch aufgrund des exemplarischen Ablaufs bei dieser Vorgehensweise möglich.

Zur Berechnung der mittleren Fahrzeiten für jeden Teilfahrstraßenknoten wird das gewählte Verhältnis von 70:30 für Fahrten auf der Haupt- und Nebenstrecke beibehalten (Vgl. ebd.: S.178). Da die Fahrzeit laut Tabelle 5.3 von der Fahrtrichtungen abhängt, werden die 100 Zugfahrten anteilmäßig auf die Fahrtrichtungen aufgeteilt. Tabelle 5.4 zeigt die Aufteilung. Die Teilfahrstra-

Tab. 5.4: Aufteilung der Zugfahrten auf die Fahrtrichtungen

Zugfahrten auf der Hauptstrecke 70		Zugfahrten zwischen Hauptstrecke und Nebenstrecke 30	
auf Gleis 1	auf Gleis 2	von Gleis 1 auf Gleis 3	von Gleis 3 auf Gleis 2
35	35	15	15

ßenknoten der Verknüpfungen werden von Abbildung 4.5 übernommen.

Für den Teilfahrstraßenknoten 1 sind die Fahrten auf Gleis 1 und von Gleis 1 auf Gleis 3 zu berücksichtigen. Dabei muss jeder Zugfolgefall beachtet werden. Analog zu Gleichungen (5.7) bis

(5.9) berechnen sich die relativen Häufigkeiten der Zugfolgefälle in den Gleichungen (5.11) bis (5.13) zu:

$$h_{ez_{1_1 1_1}} = \frac{35 * 35}{50^2} = 0,49 \quad (5.11)$$

$$h_{ez_{1_1 1_3}} = h_{ez_{1_3 1_1}} = \frac{35 * 15}{50^2} = 0,21 \quad (5.12)$$

$$h_{ez_{1_3 1_3}} = \frac{15 * 15}{50^2} = 0,09 \quad (5.13)$$

In weiterer Folge werden die Fahrzeiten für Variante 1 der Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke aus Tabelle 5.3 in die Berechnung der mittleren Fahrzeit eingesetzt. Gleichung (5.14) zeigt diese Kalkulation für Teilfahrstraßenknoten 1.

$$t_{Fz_{TFSK1}} = 0,49 * 6,95 + 0,21 * 6,95 + 0,21 * 21,11 + 0,09 * 21,11 = 11,2sec \quad (5.14)$$

Bei der Berechnung der relativen Häufigkeiten der Zugfolgefälle für Teilfahrstraßenknoten 2 wird die Fahrt von Gleis 1 auf Gleis 3 nochmals berücksichtigt. Durch das Vorhandensein von drei anstatt von zwei Fahrwegen entstehen statt der bisher vier unterschiedlichen Werte für die relative Häufigkeiten der Zugfolgefälle neun verschiedene Ergebnisse. Es wird ausschließlich der Knotenbereich berücksichtigt und die Rahmenbedingungen der angrenzenden Strecke finden keine Beachtung. Die Berechnung der relativen Häufigkeiten der Zugfolgefälle erfolgt analog zu Teilfahrstraßenknoten 1. Die Ergebnisse werden aggregiert in Tabelle 5.5 wiedergegeben.

Tab. 5.5: Relative Häufigkeiten der Zugfolgefälle für TFSK 2 bei der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke

	Züge auf		relative Häufigkeit
	Fahrstraße i	Fahrstraße j	
1 ₃ 1 ₃	15	15	0,053
1 ₃ 2 ₂	15	35	0,124
1 ₃ 3 ₂	15	15	0,053
2 ₂ 1 ₃	35	15	0,124
2 ₂ 2 ₂	35	35	0,29
2 ₂ 3 ₂	35	15	0,124
3 ₂ 1 ₃	15	15	0,053
3 ₂ 2 ₂	15	35	0,124
3 ₂ 3 ₂	15	15	0,053

Die mittlere Fahrzeit für Teilfahrstraßenknoten 2 wird anhand Gleichung (4.10) nach Pachel (2021: S. 170) in Gleichung (5.15) berechnet:

$$t_{Fz_{TFSK2}} = (0,053 + 0,124 + 0,053) * 21,11 + (0,124 + 0,29 + 0,124) * 8,41 + (0,053 + 0,124 + 0,053) * 16,82 = 13,2sec \quad (5.15)$$

5.2.3 Verknüpfung von zwei zweigleisigen Strecken

In Tabelle 5.6 sind die Resultate der Fahrzeiten der Verknüpfungen zweier zweigleisiger Strecken zu sehen. Die Berechnung der mittleren Fahrzeit erfolgt für Variante 1.

Tab. 5.6: Fahrzeiten der Fahrwege für die Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken

	Fahrzeit für			
	Fahrweg 1 [s]	Fahrweg 2 [s]	Fahrweg 3 [s]	Fahrweg 4 [s]
Variante 1	6,95	9,87	24,03	16,82
Variante 2	6,95	9,87	21,11	13,9
Variante 3	6,95	6,95	13,9	13,9
Variante 4	6,95	6,95	13,9	13,9

Tab. 5.7: Relative Häufigkeiten der Zugfolgefälle für TFSK 2 bei der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken

	Züge auf		
	Fahrstraße i	Fahrstraße j	relative Häufigkeit
1 ₃ 1 ₃	15	15	0,053
1 ₃ 2 ₂	15	35	0,124
1 ₃ 4 ₂	15	15	0,053
2 ₂ 1 ₃	35	15	0,124
2 ₂ 2 ₂	35	35	0,29
2 ₂ 4 ₂	35	15	0,124
4 ₂ 1 ₃	15	15	0,053
4 ₂ 2 ₂	15	35	0,124
4 ₂ 4 ₂	15	15	0,053

Teilfahrstraßenknoten 1 bei der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken ist ident zu jenem bei der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke. Bei der Berechnung der relativen Häufigkeiten der Zugfolgefälle können die Werte aus den Gleichungen (5.11) bis (5.13) übernommen werden. Die Fahrzeiten der einzelnen Fahrwege in Teilfahrstraßenknoten 1 sind dagegen nach Tabelle 5.6 unterschiedlich. Dadurch errechnet sich nach Gleichung (5.16) ein anderer Wert bei der mittleren Fahrzeit im Vergleich zu der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke. Gleichung (5.16) zeigt die Kalkulation für Teilfahrstraßenknoten 1 der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken.

$$t_{Fz_{TFSK1}} = 0,49 * 6,95 + 0,21 * 6,95 + 0,21 * 24,03 + 0,09 * 24,03 = 12,1sec \quad (5.16)$$

Für Teilfahrstraßenknoten 2 gibt es eine Änderung bei den Zugfolgefällen im Vergleich zur Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke, da Züge nun nicht von Gleis 3 sondern von Gleis 4 in den Knoten einfahren. Tabelle 5.7 zeigt die relativen Häufigkeiten der Zugfolgefälle für die Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken bei Teilfahrstraßenknoten 2.

Mit den in Tabelle 5.7 angegebenen Werten wird die mittlere Fahrzeit für Variante 1 der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken für den Teilfahrstraßenknoten 2 berechnet. Das Ergebnis ist Gleichung (5.17) zu entnehmen.

$$t_{Fz_{TFSK2}} = (0,053 + 0,124 + 0,053) * 24,03 + (0,124 + 0,29 + 0,124) * 9,87 + (0,053 + 0,124 + 0,053) * 16,82 = 14,7sec \quad (5.17)$$

5.3 Vergleich

Abschließend wird ein Vergleich zwischen den einzelnen in Kapitel 2 vorgestellten Knotenvarianten angestellt. Der Fokus liegt auf den Auswirkungen der unterschiedlichen Varianten auf die mittlere Fahrzeit.

Da es bei der Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken nur eine Variante gibt, ist ein Vergleich mit anderen Ergebnissen nicht möglich.

Zusätzlich zu den bereits berechneten Werten für Variante 1 der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke werden die Ergebnisse der übrigen beiden Varianten in Tabelle 5.8 angegeben.

Tab. 5.8: Mittlere Fahrzeiten für die Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke

	Mittlere Fahrzeiten für		
	Variante 1 [s]	Variante 2 [s]	Variante 3 [s]
TFSK 1	11,2	9,0	10,3
TFSK 2	13,2	9,0	10,3
TFSK 3	-	-	18,19

Tabelle 5.8 zeigt die Auswirkungen der niveaufreien Verknüpfungen auf die Fahrzeit. Im Vergleich zu Variante 1 ist in den Varianten 2 und 3 die mittlere Fahrzeit für die Teilfahrstraßenknoten 1 und 2 herabgesetzt. Die mittlere Fahrzeit in Variante 2 zeigt eine Reduktion von maximal 4,2 Sekunden. Bei Variante 3 ist die mittlere Fahrzeit um 2,9 Sekunden geringer. Relativ zur mittleren Fahrzeit im Teilfahrstraßenknoten 2 ergibt sich somit bei niveaufreien Varianten eine Reduktion von maximal 32 Prozent.

Das Ergebnis von Teilfahrstraßenknoten 3 von Variante 3 kann nicht direkt mit den anderen Resultaten verglichen werden. Dieser Teilfahrstraßenknoten liegt ausschließlich auf der Nebensecke und eine Belegung von ihm führt zu keiner Blockierung auf der Hauptstrecke.

Bei der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken werden die Werte für die übrigen drei Varianten berechnet und aggregiert in Tabelle 5.9 dargestellt. Die Varianten 1 und 2 sind niveaugleich.

Tab. 5.9: Mittlere Fahrzeiten für Verknüpfungen zweier zweigleisiger Strecken

	Mittlere Fahrzeiten für			
	Variante 1 [s]	Variante 2 [s]	Variante 3 [s]	Variante 4 [s]
TFSK 1	12,1	11,2	9,0	9,0
TFSK 2	14,7	13,24	9,0	9,0
TFSK 3	-	11,08	-	-

Zwischen diesen beiden niveaugleichen Varianten 1 und 2 zeigt sich eine Differenz um mindestens 1,46 Sekunden beziehungsweise relativ zur mittleren Fahrzeit 10 Prozent. Die Verkürzung lässt sich durch die Verschiebung der geraden Gleisverbindung erklären. Ein von Gleis 1 auf Gleis 3 wechselnder Zug muss im Vergleich zu Variante 1 einen kürzeren Weg gegen die Fahrtrichtung auf Gleis 2 durchfahren. Zusätzlich ermöglicht Variante 2 eine gleichzeitige Fahrt von Zügen von und zur Nebensecke, wie in Abbildung 2.8 zu erkennen ist.

Tabelle 5.9 zeigt in allen Varianten eine Reduktion der mittleren Fahrzeit durch die niveaufreie Ausbildung. Verknüpfungen zweier zweigleisiger Strecken verhalten sich somit gleich wie Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke in Bezug auf die Niveaufreiheit. Die niveaufreien Varianten 3 und 4 unterscheiden sich bezüglich der mittleren Fahrzeit nicht. Die Differenz zu Variante 1 beträgt maximal 5,7 Sekunden oder relativ zur Fahrzeit 39 Prozent. Es ist eine stärkere Reduktion der mittleren Fahrzeit im Vergleich zu den Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke zu beobachten. Die zu befahrende Strecke wird bei den niveaufreien Varianten bei Teilfahrstraßenknoten 2 im Vergleich zu Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke länger, weil ein zusätzliches Gleis vorhanden ist. Bei den niveaufreien Varianten bleibt die zu befahrende Strecke gleich.

Kapitel 6

Erweiterung der Leistungsuntersuchung durch Einbeziehung der Strecke

Die Abhängigkeit der Leistungsuntersuchung von der Größe des Analysebereichs ist in den Kapiteln 3 und 4.2 ersichtlich. Durch die Beschränkung auf den Knotenbereich und die Betrachtung der Fahrzeit in Kapitel 4.1, kann ein Vergleich der mittleren Fahrzeiten ausschließlich für den Knoten angestellt werden. Um die Leistungsfähigkeit eines Knotens auf der freien Strecke zu bestimmen, wird die Untersuchung des in Kapitel 5 durchgerechneten Knotens mittels Erweiterung durch eine fiktive Eisenbahnstrecke diskutiert. Dadurch wird im Unterschied zu Kapitel 4.1 nicht ausschließlich die mittlere Fahrzeit sondern die gesamte Sperrzeit untersucht.

Die bei Pachl (2021: S.178f.) und Weigand und Heppe (2013: S. 486) erwähnten Grenzen des analytischen Verfahrens werden ebenfalls diskutiert. Weigand und Heppe (ebd.: S. 486) schreiben, dass detaillierte Angaben nur grob verwendet werden können und systematische, insbesondere stark vertaktete, Fahrpläne nicht ohne weiteres untersucht werden können. Ein sich vor allem auf Kapitel 5 beziehender Punkt wird bei Pachl (2021: S. 179) erwähnt. Durch die separate Betrachtungsweise der einzelnen Teilfahrstraßenknoten werden Verkettungseffekte unzureichend abgebildet (Vgl.ebd.: S. 179).

6.1 Rahmenbedingungen

Die in Kapitel 5 getroffenen Annahmen zur Streckengeschwindigkeit und Zuglänge bleiben gleich.

- Streckengeschwindigkeit: 160 km/h
- Zuglänge: 200 Meter

Zu Beginn wird Variante 1 aus Kapitel 5.2.2 berechnet. Um die Untersuchung ausweiten zu können, werden getrennt voneinander Weichenform und Fahrwegsicherung variiert.

Bei der Weichenform wird anstatt der zuvor gewählten EW 60-760-1:18,5 eine EW 60-500-1:14 verwendet.

In Bezug auf die Fahrwegsicherung werden die Einflüsse durch Beachtung der zusätzlichen Gleisfreimeldeanlage untersucht.

6.1.1 Streckenabschnitt

Es wird ein Streckenabschnitt zwischen zwei Bahnhöfen betrachtet. Zusätzlich mündet eine eingleisige Strecke zwischen diesen beiden Bahnhöfen ein, auf der sich in einer bestimmten Distanz ebenfalls ein Bahnhof mit Ausweichmöglichkeit befindet. Abbildung 6.1 zeigt eine Skizze des untersuchten Streckenabschnitts mit einer einmündenden Nebenstrecke sowie die Abstände der einzelnen Bahnhöfe zum Knoten. Die einzelnen Blockabschnitte sind, beginnend bei Bahnhof 1, in Rot durchnummeriert.

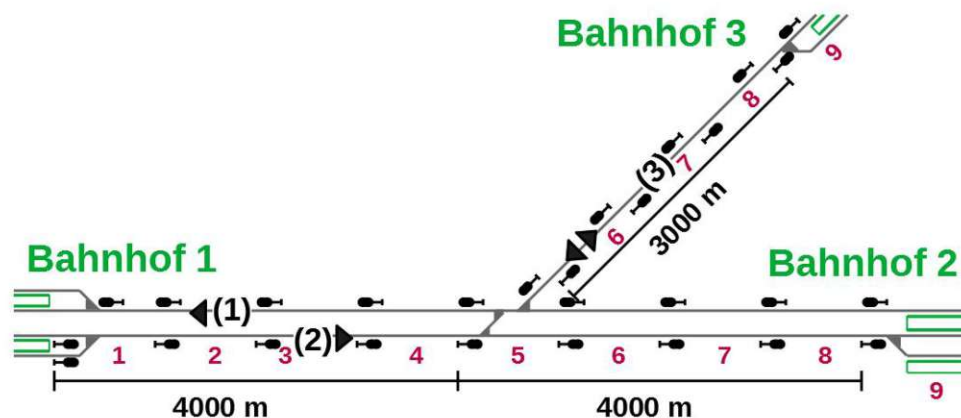


Abb. 6.1: Streckenabschnitt mit einmündender Nebenstrecke (Skizze nicht maßstäblich)

6.1.2 Betriebsprogramm

Um zusätzlich auf das Problem der nicht gleichzeitig möglichen Abfahrt einzugehen, wird ein integraler Taktfahrplanknoten als Teil eines Betriebsprogramms in Bahnhof 1 diskutiert. Ziel ist es eine Abfahrt von zwei parallel haltenden Zügen zu untersuchen, einer in Richtung Bahnhof 2 und einer in Richtung Bahnhof 3.

Das Prinzip eines normalen Taktfahrplans liegt darin, dass Züge in einem bestimmten Zeitabstand verkehren (Vgl.ebd.: S. 229). Als Beispiel für die genannten Zeitintervalle können 60 Minuten für Fernverkehr oder 20 Minuten für Schnellbahnen genannt werden, jedoch sind beliebige Taktzeiten wählbar (Vgl.ebd.: S. 229). Der integrale Taktfahrplan hat zum Ziel, dass vertaktete Linien an bestimmten Umsteigebahnhöfen zur selben Zeit halten, um einen komfortablen Fahrgastwechsel zu ermöglichen (Vgl.ebd.: S. 237). Der Zeitpunkt, in dem alle Fahrten im Bahnhof oder in der Haltestelle zum Stillstand kommen, wird Symmetriezeit genannt (Vgl.ebd.: S. 237).

Anhand von Abbildung 6.1 ist zu erkennen, dass ein integraler Taktfahrplan bei einer solchen Gleisinfrastruktur zu einem Konflikt bei der Abfahrt führt. Da hier, wie bei den meisten Knoten, ein gleichzeitiges Einfahren oder Ausfahren aus Bahnhof 1 nicht möglich ist, sind Wartezeiten erforderlich (Vgl.ebd.: S. 237, S. 300).

Die gewählten Zahlen und der gerade Streckenverlaufs sind frei gewählt und entsprechen keinem realen Beispiel. Der Fokus liegt auf der Anwendung von Verfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit. Bei einem realen Beispiel ist die Vorgehensweise analog.

6.1.3 Fahrwegsicherung

Die Länge des Blockabschnitts wird mit 1000 Metern angenommen. Bei Blöcken auf eingeleisigen Strecken kann es zu Selbstblockierungen, auch "Deadlocks" genannt, kommen (Vgl.ebd.: S. 253).

Hierbei wird durch eine Abweichung vom Betriebsprogramm ein Stillstand erzwungen (Vgl.Pachl 2021: S. 253). Ein Beispiel ist, dass ein Zug von Bahnhof 3 und ein Zug von der Verknüpfung kommend in den für ihn freien Block auf Gleis 3 einfährt. Dadurch stehen sich die beiden Züge auf der eingleisigen Strecke nach einer gewissen Zeit gegenüber. Im Rahmen der Untersuchung werden solche Möglichkeiten ausgeschlossen, da Selbstblockierungen durch bestimmte betriebliche Vorgaben auch in der Realität ausgeschlossen werden können (Vgl.ebd.: S. 254).

6.2 Berechnung der Mindestzugfolgezeit

6.2.1 Ausgangsvariation

Durch Untersuchung der Sperrzeitentrepfen wird die Mindestzugfolgezeit ermittelt, die sich durch zwei nacheinander ausfahrende Züge aus Bahnhof 1 ergibt. Einer der Züge fährt geradlinig auf Gleis 2 und einer anfangs auf Gleis 2 mit anschließendem Wechsel auf Gleis 3. Dazu werden zu Beginn die einzelnen Blockabschnitte mit ihrer Länge aufgelistet, um schließlich für jeden Blockabschnitt die Sperrzeit zu ermitteln. In Tabelle 6.1 sind die Blockabschnitte mit den einzelnen Fahrgeschwindigkeiten für die beiden Zugfahrten dargestellt. Eine Zugfahrt führt von Bahnhof 1 nach Bahnhof 2 und eine von Bahnhof 1 nach Bahnhof 3. Aufgrund der Blocklängen lassen sich anschließend die Sperrzeiten ermitteln.

Die Fahrzeit im Blockabschnitt stellt die Grundlage der Sperrzeit dar. Sie berechnet sich nach Gleichung 4.5 aus der Länge des Blockabschnitts und der Fahrgeschwindigkeit (Vgl.Schiemann 2002: S. 45, Abb. 2.9). Zusätzlich zur Fahrzeit im Blockabschnitt sind, wie bereits erwähnt, in der Sperrzeit eines Blockabschnitts auch andere Zeitanteile vertreten (Vgl.Pachl 2021: S. 52). Neben der Zeit, die zum Befahren des in Kapitel 5.1.1 erwähnten Vorsignalabstands erforderlich ist, ist zusätzlich die Räumfahrzeit zum Verlassen des Blockabschnitts zu berücksichtigen (Vgl.ebd.: S. 52). Außerdem fließen die Signalsichtzeit des Vorsignals und die Fahrstraßenbilde- und Fahrstraßenauflösezeit ein, die die Reaktionszeit des Signals bis zur Fahrtstellung berücksichtigen (Vgl.ebd.: S. 52). Die Räumfahrzeit berechnet sich analog zur Fahrzeit im Blockabschnitt nach Gleichung 4.5, allerdings setzt sich die zu befahrende Länge aus dem Durchrutschweg und der Zuglänge zusammen (Vgl.ebd.: S. 44, S. 52). Die Fahrzeit für den Vorsignalabstand, die Annähe-

Tab. 6.1: Länge der Blockabschnitte und Fahrgeschwindigkeiten mit EW 60-760-1:18,5

	Zugfahrt von			
	Bahnhof 1 nach Bahnhof 2		Bahnhof 1 nach Bahnhof 3	
	Blocklänge l [m]	Fahrgeschwindigkeit v [km/h]	Blocklänge l [m]	Fahrgeschwindigkeit v [km/h]
Block 1	1000	160	1000	160
Block 2	1000	160	1000	160
Block 3	1000	160	1000	160
Block 4	1000	160	1000	160
Block 5	1000	160	1000	80
Block 6	1000	160	1000	160
Block 7	1000	160	1000	160
Block 8	1000	160	1000	160
Block 9	1000	0	1000	0

rungsfahrzeit genannt wird, und die Räumfahrzeit hängen von der Geschwindigkeit ab (Vgl.ebd.: S. 52). Die übrigen drei Teile der Sperrzeit sind konstante Werte (Vgl.ebd.: S. 52). Analog zu Kapitel 4.1 kann laut Pahl (ebd.: S. 52) die Signalsichtzeit mit 12 Sekunden abgeschätzt werden. Die Fahrstraßenbildezeit und die Fahrstraßenauflösezeit werden in den nachfolgenden Berechnungen weiterhin exemplarisch mit 20 Sekunden abgeschätzt.

Auf Basis der erläuterten Sperrzeitenanteile lassen sich die Sperrzeiten der einzelnen Blockabschnitte berechnen. Beginnend mit Bahnhof 1 werden die Blockabschnitte der Hauptstrecke der Reihe nach durchgerechnet. Die Kalkulation für Blockabschnitt 1 ist in Gleichung 6.1 zu sehen. Bei Blockabschnitt 1 ist aufgrund des Stillstands im Bahnhof keine Annäherungsfahrzeit zu berücksichtigen (Vgl.ebd.: S. 53, Abb. 3.5). Außerdem wird vorausgesetzt, dass die Ausfahrtssignale in Bahnhof 1 im Durchrutschweg vor der Weiche liegen. Die Weiche lässt eine ausreichende Abzweiggeschwindigkeit zu, damit Züge mit derselben Beschleunigung anfahren können und somit die Auswahl des Abfahrtsgleises für den Zug irrelevant wird.

$$\text{Blockabschnitt 1} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Fahrstraßenbildezeit} & 20 \text{ s} \\ \text{Signalsichtzeit} & +12 \text{ s} \\ \text{Fahrzeit im Blockabschnitt} & +45 \text{ s} \\ \text{Räumfahrzeit} & +06 \text{ s} \\ \text{Fahrstraßenauflösezeit} & \underline{+20 \text{ s}} \\ \text{Summe} & \underline{103 \text{ s}} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

Bei Blockabschnitt 2 ist die Annäherungsfahrzeit zu berücksichtigen. Sie setzt sich aufgrund der identen Länge von Vorsignalabstand und Blocklänge aus der Fahrzeit im davorliegenden Blockabschnitt zusammensetzt. Die Sperrzeit für Blockabschnitt 2 ist in Gleichung 6.2 berechnet.

$$\text{Blockabschnitt 2} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Fahrstraßenbildezeit} & 20 \text{ s} \\ \text{Signalsichtzeit} & +12 \text{ s} \\ \text{Annäherungsfahrzeit} & +45 \text{ s} \\ \text{Fahrzeit im Blockabschnitt} & +23 \text{ s} \\ \text{Räumfahrzeit} & +06 \text{ s} \\ \text{Fahrstraßenauflösezeit} & \underline{+20 \text{ s}} \\ \text{Summe} & \underline{126 \text{ s}} \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Für die Mindestzugfolgezeit sind die Sperrzeiten bis zu Block 5 relevant, da bis dahin die Züge auf demselben Gleis verkehren. Dennoch wird die Berechnung für beide Fahrten bis zum jeweiligen nächsten Bahnhof fortgeführt, um die vollständige Sperrzeitentreppe bis zum nächsten Bahnhof abbilden zu können. Aus diesem Grund sind die Berechnungen von Blockabschnitt 3 bis 5 in den Gleichungen 6.3 bis 6.5 abgebildet. Für die Fahrt von Bahnhof 1 zu Bahnhof 3 ist eine Verringerung der Geschwindigkeit in Blockabschnitt 4 aufgrund der Abzweiggeschwindigkeit der Weiche erforderlich. Unter Berücksichtigung der Abzweiggeschwindigkeit ergeben sich unterschiedliche Sperrzeiten in Gleichung 6.4 und Gleichung 6.5.

$$\text{Blockabschnitt 3} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Fahrstraßenbildezeit} & 20 \text{ s} \\ \text{Signalsichtzeit} & +12 \text{ s} \\ \text{Annäherungsfahrzeit} & +23 \text{ s} \\ \text{Fahrzeit im Blockabschnitt} & +23 \text{ s} \\ \text{Räumfahrzeit} & +06 \text{ s} \\ \text{Fahrstraßenauflösezeit} & \underline{+20 \text{ s}} \\ \text{Summe} & \underline{104 \text{ s}} \end{array} \right. \quad (6.3)$$

Blockabschnitt 4	{		Bahnhof 2	Bahnhof 3	
		Fahrstraßenbildezeit	20 s	20 s	
		Signalsichtzeit	+12 s	+12 s	
		Annäherungsfahrzeit	+23 s	+23 s	
		Fahrzeit im Blockabschnitt	+23 s	+34 s	(6.4)
		Räumfahrzeit	+06 s	+12 s	
		Fahrstraßenauflösezeit	<u>+20 s</u>	<u>+20 s</u>	
		<i>Summe</i>	<u>104 s</u>	<u>121 s</u>	

Blockabschnitt 5	{		Bahnhof 2	Bahnhof 3	
		Fahrstraßenbildezeit	20 s	20 s	
		Signalsichtzeit	+12 s	+12 s	
		Annäherungsfahrzeit	+23 s	+34 s	
		Fahrzeit im Blockabschnitt	+23 s	+45 s	(6.5)
		Räumfahrzeit	+06 s	+12 s	
		Fahrstraßenauflösezeit	<u>+20 s</u>	<u>+20 s</u>	
		<i>Summe</i>	<u>104 s</u>	<u>143 s</u>	

Da die Fahrten ab Blockabschnitt 6 für das Beispiel nicht mehr von Bedeutung sind, wird auf eine ausführliche Berechnung verzichtet. Sie berechnen sich analog zu den vorherigen Blockabschnitten und sind zusammen mit den anderen Sperrzeiten aggregiert in Tabelle 6.2 zusammengestellt.

Mit den berechneten Sperrzeiten lässt sich die Sperrzeitentreppe konstruieren. Anhand dieser lässt sich die Mindestzugfolgezeit bestimmen, die den Zeitabstand zwischen zwei in den selben Abschnitt einfahrenden Zügen beschreibt (Vgl. Pachl 2021: S. 167). Die Mindestzugfolgezeit wird beim geringsten Abstand zwischen den beiden Zugfahrten gemessen.

In Blockabschnitt 5 befindet sich der Knoten. Wenn aufeinanderfolgende Zugfahrten nicht den identen Fahrweg haben, wird der Blockabschnitt nicht für die gesamte Sperrzeit von einer Zugfahrt blockiert. Im Rahmen der Untersuchung, bei der ein Zug abzweigt und ein Zug der Hauptstrecke folgt, liegt in Blockabschnitt 5 ab dem Knoten ein unterschiedlicher Fahrweg vor. Die Freigabe erfolgt durch eine Fahrstraßenzugschlussstelle, sobald der Fahrweg des nachfolgenden Zuges frei ist. Wie schon in Kapitel 2 bei jedem Knoten eingezeichnet, befindet sich eine Fahrstraßenzugschlussstelle nach der Verknüpfung. Die Fahrstraßenzugschlussstelle gibt den betreffenden Teil einer Fahrstraße frei, nachdem ein Zug sie komplett überfahren hat (Vgl. ebd.: S. 293). Somit

Tab. 6.2: Sperrzeiten der Blockabschnitte mit EW 60-760-1:18,5

	Sperrzeit für eine Zugfahrt von	
	Bahnhof 1 nach Bahnhof 2	Bahnhof 1 nach Bahnhof 3
	[s]	[s]
Block 1	103	103
Block 2	126	126
Block 3	104	104
Block 4	104	121
Block 5	104	143
Block 6	104	137
Block 7	104	115
Block 8	104	104
Block 9	120	120

werden die berechneten Fahrzeiten aus Kapitel 5 verwendet. Die Fahrzeiten stellen einen Teil der Berechnung der Mindestzugfolgezeit zwischen zwei Zügen in Blockabschnitt 5 dar und fließen somit in die Konstruktion der Sperrzeitentreppe ein. Der Zeitpunkt der Freigabe wird in den nachfolgenden Abbildungen durch einen zusätzlichen schwarzen Querstrich in Blockabschnitt 5 dargestellt.

Die Sperrzeitentreppe der Zugfahrt von Bahnhof 1 zu Bahnhof 3 wird nach Blockabschnitt 5 unterbrochen und in Abbildung 6.2 an der x-Achse nach unten versetzt dargestellt. Ab diesem Punkt ist der Zug auf einem anderen Gleis unterwegs. Zur besseren Orientierung ist der vorherige oder darauffolgende Blockabschnitt in grau eingefügt. Es werden zusätzlich die Sperrzeiten nach Blockabschnitt 5 dargestellt, um einen besseren Überblick über die gesamte Sperrzeitentreppe zu geben.

Abbildung 6.2 zeigt die Sperrzeitentreppe und die Mindestzugfolgezeit. Zugfolge 1, bei der der nach Bahnhof 2 fahrende Zug zuerst abfährt, ist grün dargestellt. Abbildung 6.3 zeigt Zugfolge 2, bei der der in blau dargestellte Zug mit dem Ziel Bahnhof 3 zuerst abfährt.

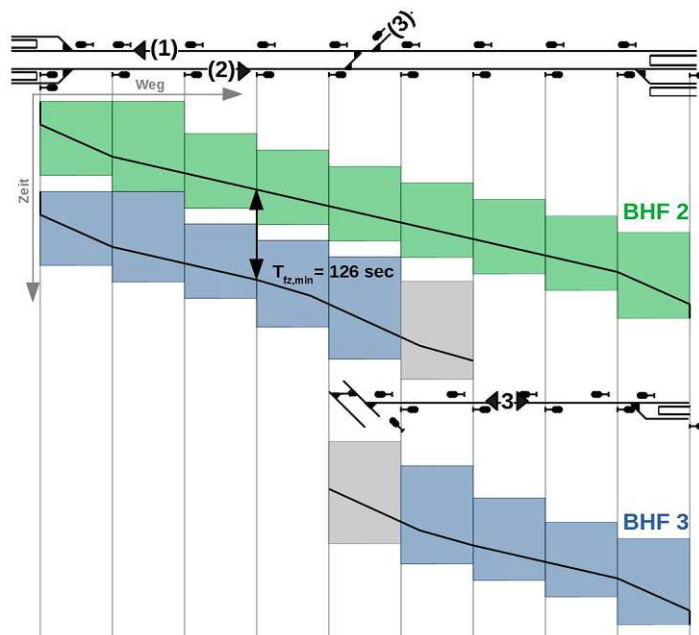


Abb. 6.2: Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-760-1:18,5 - Zugfolge 1
(Skizze nicht maßstäblich)

In den Abbildungen 6.2 und 6.3 berühren sich die Sperrzeitentreppe jeweils in Blockabschnitt 2, welcher näher an Bahnhof 1 als am Knoten liegt. In Abbildung 6.3 überlappen sich die Sperrzeitentreppe zusätzlich in Blockabschnitt 5, aber die zusätzliche schwarze Linie liegt über der Sperrzeitentreppe des nachfolgenden Zuges. Da die eingangs erwähnte schwarze Linie erst die Freigabe nach der Fahrstraßenzugschlussstelle darstellt, ist die Überlappung darunter irrelevant für die Mindestzugfolgezeit. Dadurch ist die Knotenausbildung in diesem Fall für die Mindestzugfolgezeit nicht von Bedeutung.

Der Unterschied in der Mindestzugfolgezeit ergibt sich lediglich dadurch, dass der Zug Richtung Bahnhof 2 im Knotenbereich seine Geschwindigkeit nicht verringern muss. Bei Zugfolgefall 2

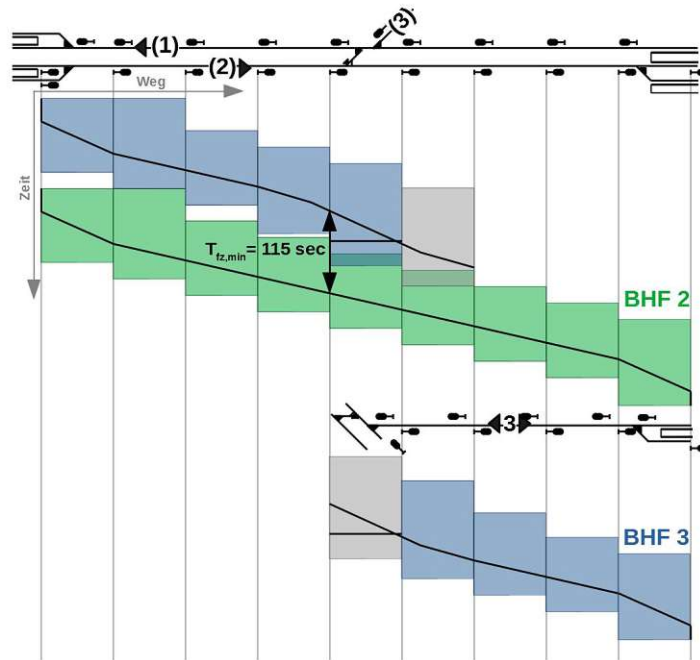


Abb. 6.3: Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-760-1:18,5 - Zugfolge 2 (Skizze nicht maßstäblich)

kann der in Richtung Bahnhof 2 fahrende Zug deshalb aufholen und so die Mindestzugfolgezeit um 11 Sekunden verringern. Das Ergebnis ist unabhängig von der Anzahl der Blockabschnitte vor der Verknüpfung. Die Anzahl an Blockabschnitten steuert lediglich, wie lange der Abstand der beiden Zugfahrten parallel ist. Die Abbildungen 6.2 und 6.3 zeigen diesen Sachverhalt in den Blockabschnitten 2 und 3.

Die Verknüpfung ist direkt nach dem Hauptsignal in Blockabschnitt 5 angeordnet. Je weiter der Knoten in die Mitte eines Blockabschnitts verlegt wird, desto länger dauert es, bis die Fahrstraßenzugschlussstelle passiert wird. Dadurch bewegt sich die Position der zusätzlichen schwarzen Linie weiter nach unten. Die Knotenausbildung ist aus diesem Grund in dieser Untersuchung nicht relevant. Bei einer vom Hauptsignal von Blockabschnitt 5 weiter entfernten Anordnung des Knotens kann die Knotenausbildung sehr wohl relevant sein.

Eine Untersuchung der niveaufreien Varianten der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke würde ebenfalls zu dem Ergebnis führen, dass die Knotenausbildung für die Mindestzugfolgezeit irrelevant ist. Die zwei Varianten verschieben die schwarze Linie nach oben, da sich die Fahrzeit bei den niveaufreien Varianten gegenüber der hier gezeigten niveaugleichen Variante verkürzt. Die Verkürzung der Fahrzeit wurde bereits in Kapitel 5 gezeigt.

6.2.2 Änderung der Weichenform

Der Einfluss der Weichenform auf die Mindestzugfolgezeit wird in dieser Untersuchung durch das Ersetzen der bis jetzt gewählten Weichenform analysiert. Dadurch soll sich zeigen, ob zusätzlich zur Position des Knotens im Blockabschnitt auch die Weichenform zu einer Relevanz

der Knotenausbildung in dieser Analyse führen kann.

Die bisher eingesetzten Weichen EW 60-760-1:18,5 werden durch EW 60-500-1:14 ersetzt. Die übrigen Rahmenbedingungen bleiben gleich. Abbildung 6.1 kann auch für die neu gewählte Weichenform verwendet werden, da am Gleisschema keine Veränderungen notwendig sind. Bei der Aufteilung der Blockabschnitte ist ebenfalls kein Unterschied vorhanden. Die erlaubte Fahrgeschwindigkeit in den Blockabschnitten 4 und 5 für jenen Zug, der Richtung Bahnhof 3 fährt, ändert sich aufgrund der geringeren Abzweiggeschwindigkeit der Weiche. Wie in Tabelle 5.1 zu sehen, reduziert sich die Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h auf 60 km/h. Tabelle 6.3 zeigt die Länge der Blockabschnitte und die dazu gehörigen Fahrgeschwindigkeiten. Somit lassen sich für die Blockabschnitte 1 bis 3 die Sperrzeiten analog zu den Gleichungen 6.1 bis 6.3 berechnen. Aufgrund der Weichenform mit einer geringeren Abzweiggeschwindigkeit unterscheiden sich nur die Sperrzeiten der Blockabschnitte 4 und 5. Daher sind lediglich die Berechnungen für die Blockabschnitte 4 und 5 in Gleichung 6.6 bis Gleichung 6.7 zu sehen.

$$\text{Blockabschnitt 4} \left\{ \begin{array}{l} \text{Fahrstraßenbildezeit} \\ \text{Signalsichtzeit} \\ \text{Annäherungsfahrzeit} \\ \text{Fahrzeit im Blockabschnitt} \\ \text{Räumfahrzeit} \\ \text{Fahrstraßenauflösezeit} \\ \text{Summe} \end{array} \begin{array}{r} \text{Bahnhof 2} \\ 20 \text{ s} \\ +12 \text{ s} \\ +23 \text{ s} \\ +23 \text{ s} \\ +06 \text{ s} \\ +20 \text{ s} \\ \underline{104 \text{ s}} \end{array} \begin{array}{r} \text{Bahnhof 3} \\ 20 \text{ s} \\ +12 \text{ s} \\ +23 \text{ s} \\ +37 \text{ s} \\ +15 \text{ s} \\ +20 \text{ s} \\ \underline{127 \text{ s}} \end{array} \right. \quad (6.6)$$

$$\text{Blockabschnitt 5} \left\{ \begin{array}{l} \text{Fahrstraßenbildezeit} \\ \text{Signalsichtzeit} \\ \text{Annäherungsfahrzeit} \\ \text{Fahrzeit im Blockabschnitt} \\ \text{Räumfahrzeit} \\ \text{Fahrstraßenauflösezeit} \\ \text{Summe} \end{array} \begin{array}{r} \text{Bahnhof 2} \\ 20 \text{ s} \\ +12 \text{ s} \\ +23 \text{ s} \\ +23 \text{ s} \\ +06 \text{ s} \\ +20 \text{ s} \\ \underline{104 \text{ s}} \end{array} \begin{array}{r} \text{Bahnhof 3} \\ 20 \text{ s} \\ +12 \text{ s} \\ +37 \text{ s} \\ +60 \text{ s} \\ +15 \text{ s} \\ +20 \text{ s} \\ \underline{164 \text{ s}} \end{array} \right. \quad (6.7)$$

Tab. 6.3: Länge der Blockabschnitte und Fahrgeschwindigkeiten mit EW 60-500-1:14

	Zugfahrt von			
	Bahnhof 1 nach Bahnhof 2		Bahnhof 1 nach Bahnhof 3	
	Blocklänge l [m]	Fahrgeschwindigkeit v [km/h]	Blocklänge l [m]	Fahrgeschwindigkeit v [km/h]
Block 1	1000	160	1000	160
Block 2	1000	160	1000	160
Block 3	1000	160	1000	160
Block 4	1000	160	1000	160
Block 5	1000	160	1000	60
Block 6	1000	160	1000	160
Block 7	1000	160	1000	160
Block 8	1000	160	1000	160
Block 9	1000	0	1000	0

Tabelle 6.4 zeigt die berechneten Sperrzeiten aller neun Blockabschnitte. Analog zur Untersuchung mit EW-60-760-1:18,5 lassen sich die Sperrzeitentrepfen und die Mindestzugfolgezeit für die beiden Zugfolgefälle aus Bahnhof 1 bilden. Abbildung 6.4 zeigt die Sperrzeitentrepfen für Zugfolge 1. In Abbildung 6.5 sind die Ergebnisse für Zugfolge 2 dargestellt.

Abbildung 6.4 zeigt bei Zugfolge 1 keine Relevanz der Knotengestaltung. Der Zug, der seine Geschwindigkeit nicht reduzieren muss, fährt zuerst und dadurch vergrößert sich in den Blockabschnitten 4 bis 6 der zeitliche Abstand zwischen den Zugfahrten. Anschließend bleibt der Abstand aufgrund konstanter Fahrgeschwindigkeiten gleich. Deshalb ist die Mindestzugfolgezeit mit 126 Sekunden gleich wie in Abbildung 6.2 mit der vorher untersuchten Weichenform. Somit

Tab. 6.4: Sperrzeiten der Blockabschnitte mit EW 60-500-1:14

	Sperrzeit für eine Zugfahrt von	
	Bahnhof 1 nach Bahnhof 2	Bahnhof 3 nach Bahnhof 2
	[s]	[s]
Block 1	103	103
Block 2	126	126
Block 3	104	104
Block 4	104	127
Block 5	104	164
Block 6	104	155
Block 7	104	118
Block 8	104	104
Block 9	120	120

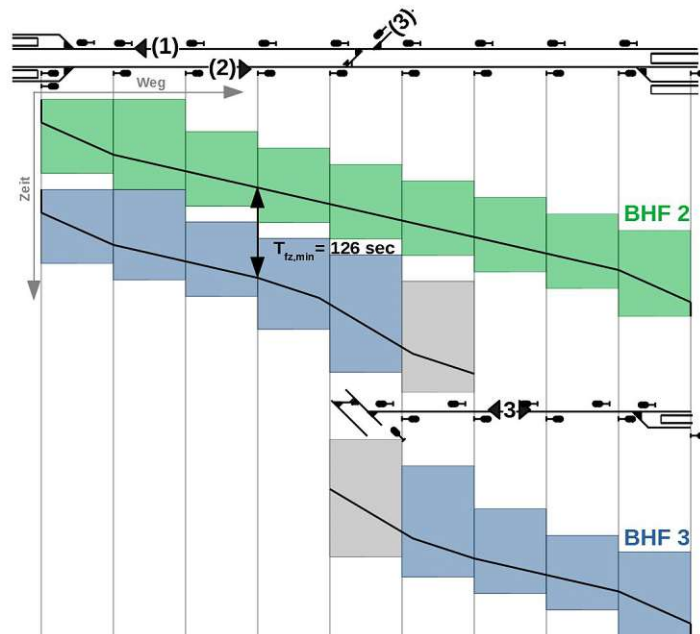


Abb. 6.4: Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-500-1:14-Zugfolge 1 (Skizze nicht maßstäblich)

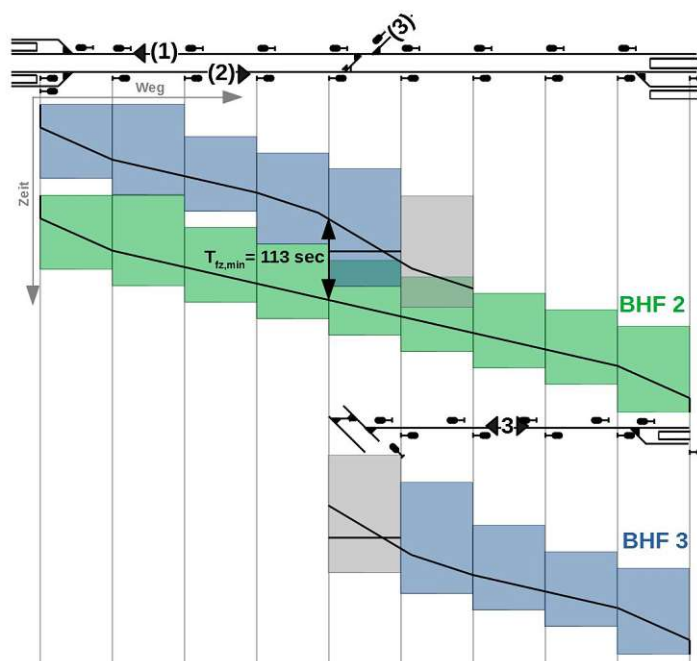


Abb. 6.5: Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-500-1:14-Zugfolge 2 (Skizze nicht maßstäblich)

kann bei Zugfolgefall 1 der zeitliche Abstand zwischen den Zugfahrten nie geringer werden, da ausschließlich der später abfahrende Zug seine Fahrgeschwindigkeit verringern muss.

Abbildung 6.5 zeigt, dass nicht Blockabschnitt 2 sondern Blockabschnitt 4 für die Mindestzugfolgezeit maßgebend ist. Die Sperrzeitentrepfen berühren sich in Blockabschnitt 4. Die schwarze Linie zur Markierung der Fahrstraßenzugschlussstelle für jenen Zug, der in Richtung Bahnhof 3 fährt, ist ebenfalls eingezeichnet. Die Linie ist analog zur anderen Weichenform nicht relevant, da sie sich über der Überlappung der beiden Sperrzeitentrepfen in Blockabschnitt 5 befindet. Da es jedoch zu keiner Überschneidung kommt, ist die Knotenausbildung auch bei dieser Weichenform nicht entscheidend für die Mindestzugfolgezeit.

Wie in Abbildung 6.3 ist bei Weichenform EW 60-500-1:14 die Mindestzugfolgezeit bei Zugfolge 2 geringer. Allerdings kann der nachfolgende Zug aufgrund der geringeren Abzweiggeschwindigkeit des zuerst fahrenden Zuges mehr aufholen als bei der Weichenform EW 60-760-1:18,5. Dadurch verringert sich die Mindestzugfolgezeit im Vergleich zu Zugfolge 1 um 13 Sekunden.

6.2.3 Zusätzliche Gleisfreimeldeanlage

Bei der Untersuchung der beiden unterschiedlichen Weichenformen wurden die Berechnungen ausschließlich mit der Gleisfreimeldeanlage am Ende des Knotens durchgeführt. Durch die Integration der zusätzlichen Gleisfreimeldeanlage in der geraden Gleisverbindung zwischen den beiden Hauptgleisen wird die Berechnung abgeändert.

Durch die Gleisfreimeldeanlage wird der freizumeldende Abschnitt für eine Fahrt von Bahnhof 1 nach Bahnhof 3 in zwei Gleisfreimeldeabschnitte unterteilt. Dadurch kann der Einfluss der Gleis-

freimeldeanlage, die früher als am Knotenende das Gleis freigibt, auf Gleis 1 untersucht werden. Abbildung 6.6 zeigt eine Abwandlung von Abbildung 2.3 mit der zusätzlich in Rot eingezeichneten Gleisfreimeldeanlage.

Analog zu den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 soll nun der Fall der ausfahrenden Züge aus Bahnhof 1,

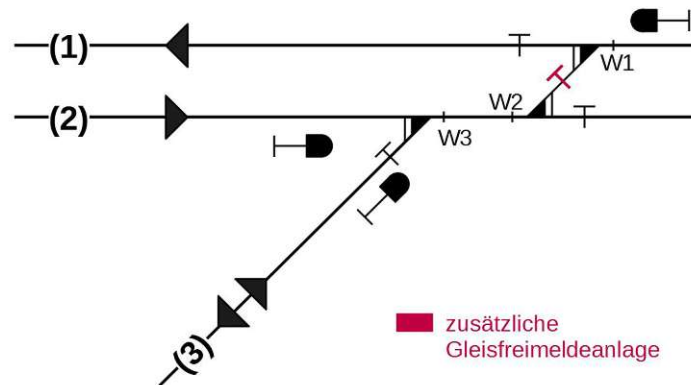


Abb. 6.6: Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke mit zusätzlicher Gleisfreimeldeanlage

einer mit dem Ziel Bahnhof 2 und einer mit dem Ziel Bahnhof 3, untersucht werden. Alle Rahmenbedingungen der vorherigen Berechnungen werden übernommen. Als Weichenform wird die in der Ausgangskonfiguration verwendete EW 60-760-1:18,5 eingesetzt.

Es konnte bereits in Kapitel 6.2.2 gezeigt werden, dass beim Einbau einer Weichenform mit geringerer Abzweiggeschwindigkeit die Gleisfreimeldung zwar kurz vor dem nachfolgenden Zug erfolgt. Der nachfolgende Zug wird jedoch in Blockabschnitt 5 nicht vom vorherfahrenden Zug beeinflusst. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei bestimmten Variationen der Weichenform und der Position des Knotens innerhalb eines Blockabschnitts die Verknüpfungsvarianten einen Einfluss auf die Mindestzugfolgezeit haben. In Analogie zu den vorherigen Berechnungen würde dies bedeuten, dass die schwarze Linie so weit nach unten wandert, dass die gesamte Sperrzeitentreppe des nachfolgenden Zuges verschoben werden muss.

Die Gleisfreimeldeanlage in der geraden Gleisverbindung ist nach Pachl (2021: S. 122), wie in Kapitel 4.1.1 erwähnt, 6 Meter nach dem Weichenende eingeplant. Es werden nun die drei Verknüpfungsvarianten für ein- und zweigleisige Strecken verglichen. Die Entfernung vom Hauptsignal bis zur nun untersuchten Gleisfreimeldeanlage bei der niveaufreien Variante 1 ist geringer als die Entfernung vom Hauptsignal bis zur Gleisfreimeldeanlage am Ende des Knotens. Um einen Vergleich zwischen der niveaufreien und den beiden niveaugleichen Verknüpfungsvarianten anstellen zu können, werden für Gleis 1 die Gleisfreimeldeanlagen aller drei Varianten aus den Abbildungen 2.3, 2.5a und 2.6a vergrößert nebeneinander in Abbildung 6.7 dargestellt. Bei der Gegenüberstellung von Variante 1 (Abb. 6.7a) und Variante 2 (Abb. 6.7b) ist kein Unterschied in der Entfernung vom Hauptsignal zur Gleisfreimeldeanlage zu erkennen.

Ohne die rot eingekreiste Gleisfreimeldeanlage war ein Unterschied bei der Fahrzeit zu erkennen, wie in Tabelle 5.3 unter Fahrweg 3 zu sehen ist. Bei Variante 3 (Abb. 6.7c) führt die Beachtung

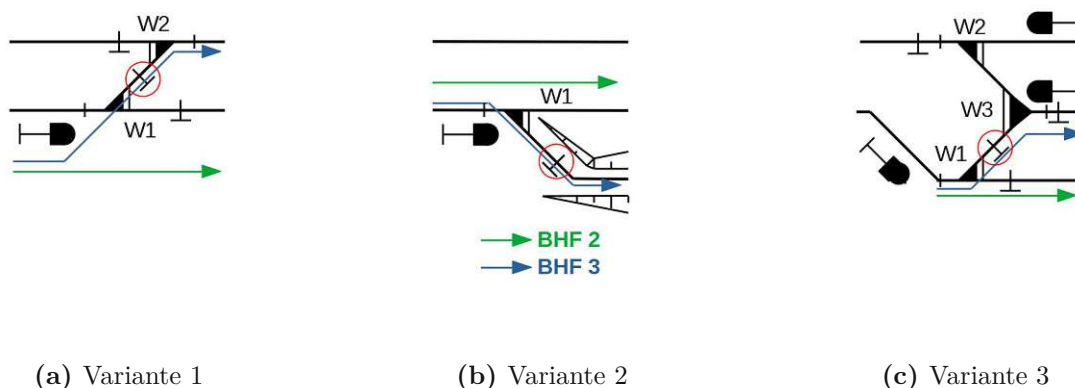


Abb. 6.7: Knotenausschnitte der Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke für den Zugfolgefall

der Gleisfreimeldeanlage in der Zwischengeraden ebenfalls zur selben Entfernung zwischen Hauptsignal und Gleisfreimeldeanlage. Daher ist es für den Zugfolgefall unerheblich, ob es sich um die niveaugleiche Variante 1 oder die niveaufreien Varianten 2 oder 3 handelt.

6.3 Ergebnisdiskussion

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass sich bei Anwendung der Rahmenbedingungen der Fahrzeitberechnung aus Kapitel 5 die Sperrzeitentrepfen in Blockabschnitt 2 berühren. Der untersuchte Knoten befindet sich jedoch in Blockabschnitt 5. Dort überlagern sich die Sperrzeitentrepfen zwar, allerdings erfolgt die Gleisfreimeldung in Blockabschnitt 5 zu einem Zeitpunkt, an dem der nachfolgende Zug vom vorherfahrenden Zug nicht betroffen ist. Deshalb ist Blockabschnitt 2 die maßgebende Stelle für die Anordnung der Sperrzeitentrepfen. Daraus folgt, dass die Verknüpfungsvariante keinen Einfluss auf die Mindestzugfolgezeit hat.

Durch eine Änderung der Weichenform und der darauf folgenden Reduktion der Abzweiggeschwindigkeit, berühren sich die Sperrzeitentrepfen nicht mehr in Blockabschnitt 2, sondern in Blockabschnitt 4. Die Verknüpfungsvariante in Blockabschnitt 5 hat analog zur vorherigen Berechnung keinen Einfluss auf die Mindestzugfolgezeit. Durch die beobachtete Verschiebung auf Blockabschnitt 4 kann davon ausgegangen werden, dass durch eine weitere Veränderung der Weichenform eine Verschiebung auch auf Blockabschnitt 5 möglich ist. Dadurch kann es zu einer Abhängigkeit von der Verknüpfungsvariante durch Änderung der Abzweiggeschwindigkeit kommen.

Das Verhältnis von Abzweiggeschwindigkeit zu Streckengeschwindigkeit kann auch durch die Erhöhung der Streckengeschwindigkeit verändert werden. Eine Erhöhung der Streckengeschwindigkeit ist aber nicht möglich, da sie eine Veränderung in der Signalisierung benötigt. Wie bereits in Kapitel 5.1.1 erwähnt, ist eine Streckengeschwindigkeit von über 160 km/h mit der untersuchten Signalisierung nicht möglich (Vgl. Maschek 2018: S. 210).

Ein Änderung der Zugfolgefälle führt zu einer Veränderung der Mindestzugfolgezeit. Bei Zugfolgefall 2 ergibt sich eine Reduktion der Mindestzugfolgezeit, da der vorherfahrende Zug seine Geschwindigkeit durch das Abzweigen reduzieren muss und der nachfolgende Zug dadurch Aufholen kann. Die Differenz zwischen den Mindestzugfolgezeiten der beiden Zugfolgefälle ver-

größert sich bei Wahl einer Weichenform mit geringerer Abzweiggeschwindigkeit.

Abschließend kann durch Beachtung der Gleisfreimeldeanlage in der geraden Gleisverbindung gezeigt werden, dass die Gleisfreimeldung bei der niveaugleichen Variante zum selben Zeitpunkt wie bei der niveaufreien Variante erfolgen kann.

6.4 Entgegenkommender Zug

Bisher wurde der Zugfolgefall behandelt, bei dem die Mindestzugfolgezeit bestimmt wurde. Die für die Fahrt eines Zuges erforderliche Freigabe eines Blockabschnitts kann jedoch nicht nur durch einen vorherfahrenden Zug verhindert werden, sondern ebenfalls durch einen entgegenkommenden Zug, der den Fahrweg kreuzt.

Nach der Untersuchung des Zugfolgefalls mit Variation sowohl bezüglich der Weichenform als auch der Gleisfreimeldeanlage, soll abschließend ein entgegenkommender Zug analysiert werden. Hierbei kommt erneut kein Betriebsprogramm zur Anwendung.

In der Leistungsuntersuchung gelten die bereits in Kapitel 6.2.1 verwendeten Rahmenbedingungen. Die untersuchten Zugfahrten beschreiben in Abbildung 6.1 eine Fahrt von Bahnhof 1 nach Bahnhof 3 und eine von Bahnhof 2 nach Bahnhof 1. Die bisher zusätzlich untersuchte Fahrt von Bahnhof 1 nach Bahnhof 2 steht in keinem Konflikt zu jener Fahrt in Gegenrichtung.

Bei Betrachtung der Varianten aus den Abbildungen 2.5a und 2.6a zeigt sich, dass aufgrund der niveaufreien Ausführung des Knotens kein Konflikt zwischen den beiden Zugfahrten entsteht. Ziel der Untersuchung ist es, den Unterschied der niveaugleichen Variante zu den niveaufreien Varianten zu berechnen.

Die Analyse wird durch Berechnung der Sperrzeitentreppe durchgeführt. Als Weichenform wird die bereits eingesetzte EW 60-760-1:18,5 gewählt. Die Gleisfreimeldung auf der geraden Gleisverbindung wird nicht beachtet, da sie nur eine Freimeldung auf Gleis 1 bewirken kann, sich die Züge aber auf Gleis 2 kreuzen. Aufgrund identer Streckengeschwindigkeit kann die Sperrzeitentreppe für die Zugfahrt von Bahnhof 1 nach Bahnhof 3 mit den Werten aus Tabelle 6.2 verwendet werden. Da die Zugfahrt von Bahnhof 2 nach Bahnhof 1 nur eine Spiegelung der Fahrt von Bahnhof 1 nach Bahnhof 2 darstellt, kann für diese Fahrt ebenfalls die Sperrzeitentreppe mit den Werten aus Tabelle 6.2 übernommen werden.

Es werden zwei Möglichkeiten untersucht. Bei Möglichkeit 1 fährt der auf die Nebenstrecke abzweigende Zug zuerst (Bahnhof 1 nach Bahnhof 3). Bei Möglichkeit 2 fährt der von Bahnhof 2 nach Bahnhof 1 fahrende Zug zuerst. Es wird der zeitliche Abstand zwischen den Zugfahrten berechnet. Gemessen wird dieser Zeitabstand in der Mitte der Zwischengerade zwischen Weiche 2 und 3, die in Abbildung 2.3 beschriftet ist.

Auf Gleis 1 in Richtung Bahnhof 1 sind die Signale aufgrund der vorgegebenen Trassierungselemente versetzt im Vergleich zu Gleis 2 plaziert. Dadurch ist die Sperrzeitentreppe für die Zugfahrt von Bahnhof 2 nach Bahnhof 1 horizontal verschoben. In Abbildung 6.8 ist Möglichkeit 1 dargestellt, bei der jene Zugfahrt von Bahnhof 2 nach Bahnhof 1 grün und jene von Bahnhof 1 nach Bahnhof 3 blau eingefärbt ist.

Sich überschneidende Sperrzeiten sind dunkler hervorgehoben, da die übrigen Sperrzeiten aufgrund des Befahrens von unterschiedlichen Gleisen irrelevant sind. Bei Möglichkeit 1 ist zu sehen, dass die nach Bahnhof 3 führende Zugfahrt erst nach dem kompletten Verlassen des Blockabschnitts 5 vom vorherigen Zug möglich ist. Dies liegt an der Lage des Knotens am Beginn von Blockabschnitt 5. Bei einer anderen Lage des Knotens innerhalb von Blockabschnitt 5 wäre

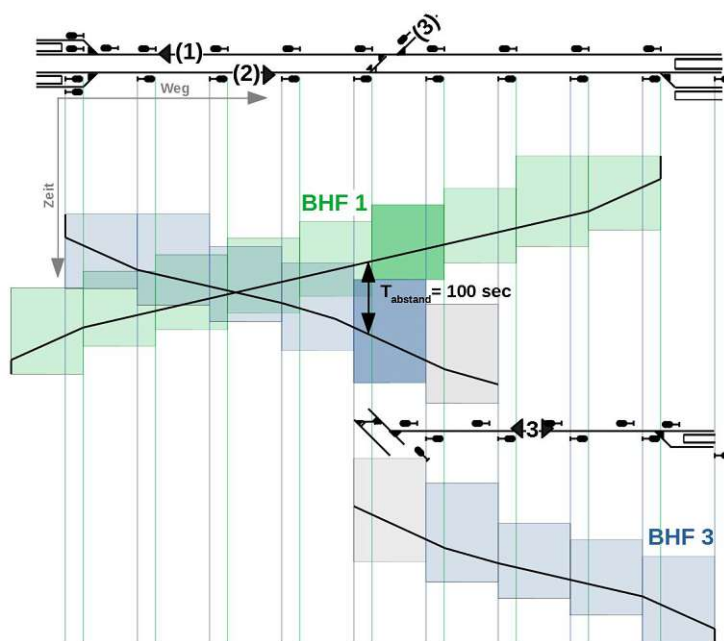


Abb. 6.8: Sperrzeitentreppe bei entgegenkommendem Zug - Möglichkeit 1

die Anordnung einer zusätzlichen Gleisfreimeldeanlage auf Gleis 1 hinter Weiche 2 in Richtung Bahnhof 1 möglich, um die Sperrzeit zu verkürzen.

Abbildung 6.9 zeigt Möglichkeit 2. Analog zu den Sperrzeitentreppen in Kapitel 6.2.1, ist der Zeitpunkt der Gleisfreimeldung nach dem Verlassen des Knotens in Form der schwarzen Linie zu sehen. Im Gegensatz zu Kapitel 6.2.1 ist der Zeitpunkt der Gleisfreimeldung nun für die Position der Sperrzeitentreppe des entgegenkommenden Zuges relevant, da Blockabschnitt 5 der einzige von beiden Zügen auf dem gleichen Gleis befahrene Blockabschnitt ist. Der kleinste zeitliche Abstand zwischen den Zugfahrten wird in der Mitte der Zwischengerade zwischen Weiche 2 und 3 gemessen.

Abschließend wird ein Vergleich zwischen den beiden Möglichkeiten angestellt. Der Zeitabstand zwischen den Zugfahrten ist bei Möglichkeit 1 geringer als bei Möglichkeit 2. Dies liegt daran, dass der Zug, der seine Geschwindigkeit reduzieren muss, nach dem mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Zug fährt. Dadurch kann der zuerst fahrende Zug den gemeinsam genutzten Gleisabschnitt 2 schneller freigeben.

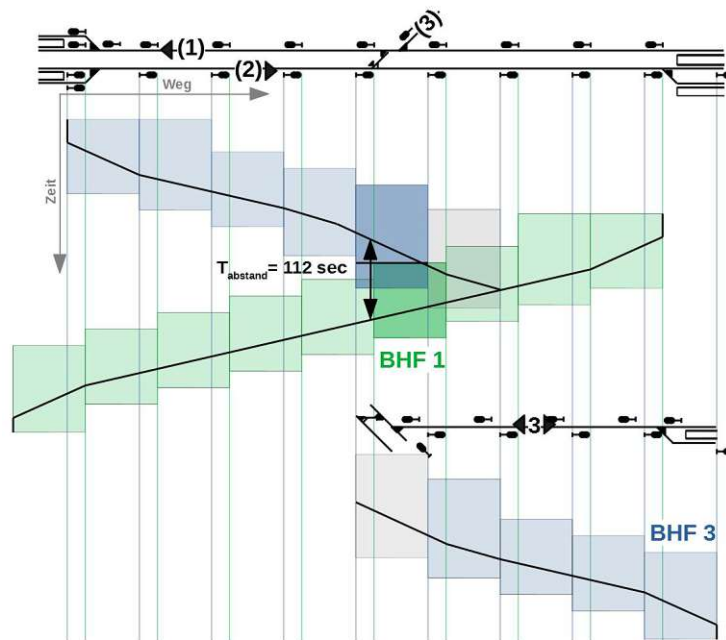


Abb. 6.9: Sperrzeitentreppe bei entgegenkommendem Zug - Möglichkeit 2

Kapitel 7

Resümee

7.1 Schlussfolgerung

Durch die Untersuchung des Leistungsverhaltens und der Einflussfaktoren auf die Mindestzugfolgezeit konnten die zu Beginn aufgestellten Leitfragen beantwortet werden.

Bei der Beantwortung der ersten Leitfrage wurden die vier von Weigand und Heppe (2013) aufgezählten verschiedenen Verfahren, analytisch, statistisch-deterministisch, konstruktiv und die Simulation, vorgestellt. Durch die Auswahl aus den vier zur Verfügung stehenden Verfahren zeigten sich aufgrund der Untersuchung von Fahrstraßenknoten das analytische Verfahren und das Simulationsverfahren als die geeignetsten. Ohne Vorliegen eines konkreten Betriebsprogramms erwies sich in weiterer Folge lediglich das analytische Verfahren als weiter anwendbar.

Bei der Untersuchung von acht unterschiedlichen Verknüpfungsvarianten ein- und zweigleisiger Eisenbahnstrecken konnten die Parameter Streckeneigenschaften (a), Weichenform (b) und Fahrwegsicherung (c) als jene Einflussfaktoren erfasst werden, die durch die Planung der Infrastruktur beeinflusst werden können. Die verschiedenen Verknüpfungsvarianten teilen sich in die Verknüpfung zweier eingleisiger, einer ein- mit einer zweigleisigen und zweier zweigleisiger Strecken auf, die sich wiederum anhand von niveaufrei oder niveaugleich, Gleisführung und Lage der Weichen unterscheiden. Das Aufzeigen von verschiedenen Verknüpfungsvarianten stellte die Basis für die Beantwortung der zweiten Leitfrage dar. Bei den Streckeneigenschaften (a) war ein Unterschied zwischen niveaugleichen und niveaufreien Verknüpfungsvarianten zu erkennen. Die Weichenform (b) zeigte in weiterer Folge durch die Abzweiggeschwindigkeit einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Die Fahrwegsicherung (c), welche die Lage der Signale und die Gleisfreimeldung umfasst, beeinflussten die Leistungsfähigkeit durch die Veränderung der Dauer der Sperrzeit.

Nach Vergleich der verschiedenen Verknüpfungsvarianten wurden Formeln zur Geschwindigkeits- und Fahrzeitberechnung aus der Literatur ausgewählt und anschließend für die Berechnung der Fahrzeit im Knoten adaptiert. Um den Unterschied zwischen den Verknüpfungsvarianten diskutieren zu können, wurden anschließend die Fahrzeiten im Knoten mit angenommenen Werten berechnet. Die Annahme umfasste eine Streckengeschwindigkeit von 160 km/h, eine Zuglänge von 200 Metern und die Weichenform EW 60-760-1:18,5.

Die Ergebnisse zeigten bei der Fahrzeit im Knoten eine Differenz zwischen den niveaufreien und niveaugleichen Verknüpfungsvarianten. Der Unterschied konnte sowohl beim Vergleich der Verknüpfungen von ein- mit zweigleisigen, als auch bei den Verknüpfungen von zwei zweigleisigen Strecken beobachtet werden. Die Fahrzeit im Knoten konnte bei der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke bei den angenommenen Werten durch Wahl eines niveaufreien Knotens um 4,2 Sekunden im Vergleich zu einem niveaugleichen Knoten reduziert werden. Bei der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken betrug die Reduktion 5,7 Sekunden. Diese Werte stellten eine Verringerung um 32 Prozent beziehungsweise 39 Prozent in Bezug auf die gesamte Fahrzeit im Knoten dar.

Die Ergebnisse der Berechnung mit den angenommenen Werten wurden verwendet, um die mittleren Fahrzeiten zu ermitteln. Dadurch konnte die dritte Leitfrage, ob die Leistungsfähigkeit durch die Parameterauswahl erhöht wird, beantwortet werden. Bei einem niveaufreien statt eines niveaugleichen Knotens ist es aufgrund der früheren Gleisfreimeldung durch den kürzeren Fahrweg im Knoten möglich, das Leistungsverhalten im Zugfolgefall zu verbessern. Da die gewählten Eingangswerte nicht variiert wurden, konnte ausschließlich eine Aussage in Hinblick auf die Unterscheidung in niveaugleich und niveaufrei bei den Streckeneigenschaften (a) getroffen werden.

Es zeigte sich ebenfalls, dass die Fahrzeit im Knoten bei einer Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken auch durch Anordnung der geraden Gleisverbindung zwischen die beiden einmündenden Streckengleise reduziert werden kann. Der Grund lag im kürzeren Fahrweg für einen Wechsel von Haupt- auf Nebenstrecke, da die Anzahl der zu überfahrenden Weichen von vier auf drei reduziert wurde.

Zur Bestimmung des Einflusses der Weichenform (b) und der Fahrwegsicherung (c) wurde die Leistungsuntersuchung um einen fiktiven anschließenden Streckenabschnitt erweitert. Bei der Analyse des Knotens zusammen mit der angrenzenden Strecke zeigte sich, dass bei den gewählten Annahmen der Blockabschnitt, in dem der Eisenbahnknoten liegt, die Sperrzeitentreppe nicht beeinflusste. Zusätzlich war zu erkennen, dass eine Änderung der Zugfolge zu einer maximalen Reduktion der Mindestzugfolgezeit von 11 Sekunden führte, wenn der abzweigende Zug zuerst fährt. Im Verhältnis zur Reduktion der Fahrzeit im Knoten von maximal 5,7 Sekunden stellten diese 11 Sekunden einen Unterschied dar. Es zeigte sich somit bei den zuvor getroffenen Annahmen, dass durch die Zugfolge eine größere Reduktion der Mindestzugfolgezeit möglich ist als durch eine Änderung der Verknüpfungsvariante.

Die Auswahl einer Weichenform (b) mit geringerer Abzweiggeschwindigkeit als jene der EW 60-760-1:18,5 führte auf der Strecke zu geringfügigen Veränderungen bei der Mindestzugfolgezeit. Allerdings war dadurch der für die Position der Sperrzeitentreppe relevante Blockabschnitt nicht mehr näher beim Startbahnhof sondern direkt vor dem Blockabschnitt mit dem Eisenbahnknoten. Die Veränderung der Abzweiggeschwindigkeit kann folglich auch dazu führen, dass der Eisenbahnknoten die Position der Sperrzeitentreppe beeinflusst, wenn dies vorher nicht der Fall war.

Die Beachtung der Fahrwegsicherung (c) in Form einer Gleisfreimeldeanlage für Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke führte zu einem identen Zeitpunkt der Gleisfreimeldung bei niveaugleichen und niveaufreien Varianten. Die Gleisfreimeldeanlage war in allen Verknüpfungsvarianten gleich weit von der Weiche entfernt.

Abschließend wurde ein zusätzlicher Aspekt des Einflussfaktors Streckeneigenschaften (a) untersucht. Durch Erweiterung der Analyse um den Fall eines entgegenkommenden Zuges konnte der Unterschied zwischen niveaugleichen und niveaufreien Varianten in diesem Aspekt berechnet werden. Die Sperrzeit bei der niveaugleichen Variante einer Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke betrug 100 bis 112 Sekunden, je nachdem welcher Zug zuerst den Knoten befährt. Bei einer niveaufreien Ausbildung entfiel diese Sperrzeit aufgrund der sich nicht kreuzenden Fahrwege.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine Beeinflussung des Leistungsverhaltens in Hinblick auf die Mindestzugfolgezeit durch Variation der Parameter Streckeneigenschaften (a), Weichenform (b) und Fahrwegsicherung (c) möglich ist.

7.2 Ausblick

Bei der Leistungsuntersuchung wurde in dieser Arbeit die Zugfolge und die sich daraus ergebende Mindestzugfolgezeit analysiert. Die Untersuchung behandelte zu einem großen Teil die theoretischen Grundlagen der Leistungsuntersuchung von Knoten auf der freien Strecke. Die theoretischen Grundlagen bauten auf Annahmen zur Vereinfachung der Analyse auf. So wurden beispielsweise der Streckenverlauf als gerade angenommen und die Gleisanzahl auf maximal zwei begrenzt. Bei der Anwendung der theoretischen Grundlagen wurden zusätzlich Werte für die drei ermittelten Einflussfaktoren festgelegt. Eine hier anschließende Parameterstudie kann untersuchen, wie sehr durch eine Variation der festgelegten Werte die Mindestzugfolgezeit verändert werden kann. So kann beispielsweise untersucht werden, wie sehr sich die Sperrzeitentuppen durch eine Veränderung der Zuglänge verschieben.

Bei der Untersuchung des entgegenkommenden Zuges wurde das Worst-Case-Szenario analysiert, da dabei beide Züge zur selben Zeit in den Knoten einfahren sollten. Um zu analysieren, wie oft ein gleichzeitiges Einfahren in den Knoten im realen Eisenbahnbetrieb auftritt und wie groß hierbei der Nutzen von niveaufreien Varianten ist, könnte die Monte-Carlo-Methode¹ angewendet werden. Hierbei könnte durch Computersimulationen eine große Anzahl an zwei zufällig in den Knoten einfahrenden Zügen analysiert werden. Dadurch könnte die Konfliktwahrscheinlichkeit von sich kreuzenden Fahrwegen untersucht werden.

Zusätzlich kann der Einfluss eines bis jetzt noch nicht betrachteten konkreten Betriebsprogrammes genauer untersucht werden. Variationen bei der Zuganzahl oder die Untersuchung von verschiedenen Fahrplänen könnten hierbei Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben. Des Weiteren würden auch die nicht untersuchten Verfahren der Leistungsuntersuchung, wie zum Beispiel das statistisch-deterministische Verfahren, eingesetzt werden können. Die Annahmen, die zum Ausschluss der Verfahren geführt haben, wären dann nicht mehr tragend.

In Hinblick auf das Thema Umweltschutz, kann eine Untersuchung der Lebenszykluskosten von niveaufreien und niveaugleichen Varianten erfolgen. Durch Analyse der einzelnen Bestandteile von Knotenbauwerken kann eine Verlängerung der Lebensdauer durch Optimierung im Lastabtragungsverhalten erzielt werden. Die Lebenszykluskosten könnten auch den Unterschied bei den Bau- und Planungskosten der verschiedenen Verknüpfungsvarianten zeigen. Hierbei kann analysiert werden, ob ab einer bestimmten Belastung die zusätzlichen Kosten für eine niveaufreie Variante im Verhältnis zur Leistungsfähigkeit wirtschaftlich sind.

¹Vgl. Chu und Martin 2012: S. 40f.

Zeichenerklärung







	Hauptsignal
	Hauptsignal mit Vorsignalfunktion
	Gleisfreimeldeanlage
(1)	Gleisnummer
	Einfache Weiche
	Fahrtrichtungen
	Prellbock

Abb. 7.1: Zeichenerklärung
 Quelle: In Anlehnung an Pachl (2021: S. 286)

Literatur

- Bendfeldt, J.-P. und Warninghoff, C.-R. (2004). „Infrastrukturbezogene Auswertung von Betriebssimulationen in der Eisenbahnbetriebswissenschaft“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* Nr.06, S. 363–370.
- Böttcher, J. und Fengler, W. (2007). „Eisenbahnknoten strukturiert analysieren“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* Nr.09, S. 526–532.
- Chu, Z. und Martin, U. (2012). „Dynamisierung von Zeitscheiben in Betriebsprogrammen bei Leistungsuntersuchungen“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* Nr.05, S. 40–45.
- Eisenbahngesetz 1957 - EisbG (1957). Bundesgesetz über Eisenbahnen, Schienenfahrzeuge auf Eisenbahnen und den Verkehr auf Eisenbahnen (Eisenbahngesetz 1957 - EisbG).*
- Ferchland, C. und Körner, T. (2004). „Analytische Verfahren der Eisenbahnbetriebswissenschaft“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* Nr.07/08, S. 499–505.
- Kuckelberg, A., Janecek, D. und Nießen, N. (2013). „Grundlagen zur Simulation der Fahrplannerstellung und Betriebsabwicklung“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* Nr.07/08, S. 50–55.
- Lay, E. und Rensing, R. (2013). „Weichen“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, S. 239–306. DOI: 10.1007/978-3-642-30021-9.
- Maschek, U. (2013). „Leit- und Sicherungstechnik“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, S. 495–552. DOI: 10.1007/978-3-642-30021-9.
- (2018). *Sicherung des Schienenverkehrs*. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN: 978-3-658-22877-4.
- Menius, R. und Matthews, V. (2020). *Bahnbau und Bahninfrastruktur*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN: 978-3-658-27732-1.
- ÖNORM EN 13803:2017 09 01 (Sep. 2017). *ÖNORM EN 13803:2017 09 01: Bahnanwendungen – Oberbau – Trassierungsparameter – Spurweiten 1425 mm und größer*. Wien: Austrian Standards.
- ÖNORM EN 15273-3:2018 12 15 (Dez. 2018). *ÖNORM EN 15273-3:2018 12 15: Bahnanwendungen – Begrenzungslinien – Teil 3: Infrastrukturbegrenzungslinien*. Wien: Austrian Standards.
- Pachl, J. (2013). „Betriebsführung der Infrastruktur“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, S. 405–440. DOI: 10.1007/978-3-642-30021-9.
- (2021). *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN: 978-3-658-31164-3.

- Schiemann, W. (2002). *Schienenverkehrstechnik*. 1. Auflage. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B.G. Teubner GmbH. ISBN: 978-3-519-00363-2.
- Schmitt, A. und Jänsch, E. (2013). „Querschnittsgestaltung der Bahnanlagen“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, S. 307–336. DOI: 10.1007/978-3-642-30021-9.
- Schüttert, A., Kogel, B., Kurby, S. und Nießen, N. (2018). *Deutschlandweite Kapazitätsermittlung von Strecken und Knoten*. DOI: 10.18154/RWTH-2018-222708. URL: <https://publications.rwth-aachen.de/record/720257/files/720257.pdf> (Zugriff am 29.06.2021).
- Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission* (Nov. 2014). *über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems Infrastruktur des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union*.
- Warninghoff, C.-R. und Ferchland, C. (2004). „Nutzung von Simulationen zur Unterstützung der betrieblichen Infrastrukturplanung“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* Nr.07/08, S. 490–498.
- Weigand, W. und Hepe, A. (2013). „Spurgestaltung und betriebliche Infrastrukturplanung“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, S. 441–494. DOI: 10.1007/978-3-642-30021-9.
- Weigand, M. (2013). „Trassierung und Gleisplanung“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, S. 607–642. DOI: 10.1007/978-3-642-30021-9.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Eisenbahnnetz mit vergrößerter Eisenbahnstrecke	12
1.2	Eisenbahnstrecke mit vergrößertem Eisenbahnknoten	14
2.1	Überleitstelle bei einem Zweirichtungsverkehr	15
2.2	Schrittweiser Aufbau einer Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken	17
	a Streckeneigenschaften	17
	b Weichen	17
	c Fahrwegsicherung	17
2.3	Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke-Variante 1	18
2.4	Gerade Gleisverbindung	19
2.5	Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke-Variante 2	19
	a ohne zusätzlicher Haltemöglichkeit	19
	b mit zusätzlichen Haltemöglichkeiten	19
2.6	Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke-Variante 3	21
	a ohne Schutzweiche	21
	b mit Schutzweiche	21
2.7	Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 1	21
2.8	Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 2	22
2.9	Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 3	23
2.10	Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken-Variante 4	23
4.1	Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken mit bemaßten Sicherheitseinrichtungen	30
4.2	Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken mit nummerierten Fahrwegen	31
4.3	Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken mit Teilfahrstraßenknoten	32
4.4	Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke mit nummerierten Fahrwe- gen	33
4.5	Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke mit Teilfahrstraßenknoten	34
4.6	Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken mit nummerierten Fahrwegen	35
4.7	Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken mit Teilfahrstraßenknoten	36
6.1	Streckenabschnitt mit einmündender Nebenstrecke	47
6.2	Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-760-1:18,5-Zugfolge 1 . . .	51
6.3	Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-760-1:18,5-Zugfolge 2 . . .	52
6.4	Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-500-1:14 - Zugfolge 1 . . .	54
6.5	Sperrzeitentreppe und Mindestzugfolgezeit mit EW 60-500-1:14 - Zugfolge 2 . . .	55

6.6	Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke mit zusätzlicher Gleisfreimeldeanlage	56
6.7	Knotenausschnitte der Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke für den Zugfolgefall	57
a	Variante 1	57
b	Variante 2	57
c	Variante 3	57
6.8	Sperrzeitentreppe bei entgegenkommendem Zug - Möglichkeit 1	59
6.9	Sperrzeitentreppe bei entgegenkommendem Zug - Möglichkeit 2	60
7.1	Zeichenerklärung	64

Tabellenverzeichnis

2.1	Mindestlängen für Zwischengeraden	18
5.1	Zur Auswahl stehende Weichen für die Berechnungen	38
5.2	Fahrzeiten der Fahrwege für die Verknüpfung zweier eingleisiger Strecken	39
5.3	Fahrzeiten der Fahrwege für Verknüpfungen einer ein- und einer zweigleisigen Strecke	41
5.4	Aufteilung der Zugfahrten auf die Fahrtrichtungen	41
5.5	Relative Häufigkeiten der Zugfolgefälle für TFSK 2 bei der Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke	42
5.6	Fahrzeiten der Fahrwege für die Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken	43
5.7	Relative Häufigkeiten der Zugfolgefälle für TFSK 2 bei der Verknüpfung zweier zweigleisiger Strecken	43
5.8	Mittlere Fahrzeiten für die Verknüpfung einer ein- und einer zweigleisigen Strecke	44
5.9	Mittlere Fahrzeiten für Verknüpfungen zweier zweigleisiger Strecken	44
6.1	Länge der Blockabschnitte und Fahrgeschwindigkeiten mit EW 60-760-1:18,5	48
6.2	Sperrzeiten der Blockabschnitte mit EW 60-760-1:18,5	50
6.3	Länge der Blockabschnitte und Fahrgeschwindigkeiten mit EW 60-500-1:14	53
6.4	Sperrzeiten der Blockabschnitte mit EW 60-500-1:14	54
A.1	Zusammenfassung der Verknüpfungsvarianten von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke	71
A.2	Zusammenfassung der Verknüpfungsvarianten von zwei zweigleisigen Strecken	72

Anhang

A.1 Übersicht über die untersuchten Verknüpfungsvarianten

Zusammenfassend werden alle diskutierten Verknüpfungsvarianten aggregiert in Tabellen dargestellt. Tabelle A.1 beinhaltet die Verknüpfung von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke. In Tabelle A.2 sind die Verknüpfungen von zwei zweigleisigen Strecken zu sehen.

Tab. A.1: Zusammenfassung der Verknüpfungsvarianten von einer eingleisigen und einer zweigleisigen Strecke

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Verknüpfungsart	Niveaugleich	Niveaufrei	Niveaufrei
Weichenanzahl	3	3	3
Anzahl gleichzeitig möglicher Fahrtkombinationen	2	3 oder 4*	3
Gleichzeitig möglicher Fahrtkombinationen	Von 1 nach 1 & von 2 nach 2 Von 1 nach 1 & von 3 nach 2	Von 1 nach 1 & von 2 nach 2 Von 1 nach 1 & von 3 nach 2 Von 1 nach 3 & von 2 nach 2 Von 1 nach 3 & von 4 nach 2*	Von 1 nach 1 & von 2 nach 2 Von 1 nach 1 & von 3 nach 2 Von 1 nach 3 & von 2 nach 2

*mit zusätzlicher Haltemöglichkeit nach Abbildung 2.5b

Tab. A.2: Zusammenfassung der Verknüpfungsvarianten von zwei zweigleisigen Strecken

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Verknüpfungsart	Niveaugleich	Niveaugleich	Niveaufrei	Niveaufrei
Weichenanzahl	4	4	2	2
Anzahl gleichzeitig möglicher Fahrtkombinationen	2	3	4	4
Gleichzeitig möglicher Fahrtkombinationen	Von 1 nach 1 & von 2 nach 2 Von 1 nach 1 & von 4 nach 2	Von 1 nach 1 & von 2 nach 2 Von 1 nach 1 & von 4 nach 2 Von 1 nach 3 & von 4 nach 2	Von 1 nach 1 & von 2 nach 2 Von 1 nach 1 & von 4 nach 2 Von 1 nach 3 & von 2 nach 2 Von 1 nach 3 & von 4 nach 2	Von 1 nach 1 & von 2 nach 2 Von 1 nach 1 & von 4 nach 2 Von 1 nach 3 & von 2 nach 2 Von 1 nach 3 & von 4 nach 2

A.2 Python-Code

```
1 #Eingangsparameter
2 v_haupt=160 #km/h
3 v_abzweig=80 #km/h
4 lzug=200 #m
5 lt=20.526 #m
6 lw=52.934 #m
7 b=32.409 #m
8 neigung=18.5 #1:n
9 e=4.5 #m
10 labzweig=lt+b
11 lzwischen=0.15*v_abzweig
12 lverbind=math.sqrt((e*neigung)**2+e**2)-2*lt
13 print(labzweig)
14 print(lverbind)
15 print(lzwischen)
16 #Eingleisige und eingleisige Verbindung
17 s_wee1=56+lw+lzug
18 s_wee2=56+lw+lzug
19 s_wee3=56+labzweig+lzug
20 s_wee4=56+labzweig+lzug
21
22 t_wee1=s_wee1/(v_haupt/3.6)
23 t_wee2=s_wee2/(v_haupt/3.6)
24 t_wee3=s_wee3/(v_abzweig/3.6)
25 t_wee4=s_wee4/(v_abzweig/3.6)
26
27 #Eingleisige und zweigleisige Verbindungen
28 #Variante 1
29 s_wez11=56+lw+lzug
30 s_wez12=56+lw+lzwischen+lw+lzug
31 s_wez13=56+labzweig+lverbind+labzweig+lzwischen+labzweig+lzug
32 s_wez14=56+labzweig+lzwischen+lw+lzug
33
34 t_wez11=s_wez11/(v_haupt/3.6)
35 t_wez12=s_wez12/(v_haupt/3.6)
36 t_wez13=s_wez13/(v_abzweig/3.6)
37 t_wez14=s_wez14/(v_abzweig/3.6)
38
39 #Variante 2
40 s_wez21=56+lw+lzug
41 s_wez22=56+lw+lzug
42 s_wez23=56+labzweig+lzug
43 s_wez24=56+labzweig+lzug
44
45 t_wez21=s_wez21/(v_haupt/3.6)
46 t_wez22=s_wez22/(v_haupt/3.6)
47 t_wez23=s_wez23/(v_abzweig/3.6)
48 t_wez24=s_wez24/(v_abzweig/3.6)
49
50 #Variante 3
51 s_wez31=56+lw+lzug
52 s_wez32=56+lw+lzug
53 s_wez33=56+labzweig+lverbind+labzweig+lzug
54 s_wez34=56+labzweig+lverbind+labzweig+lzug
55
56 t_wez31=s_wez31/(v_haupt/3.6)
57 t_wez32=s_wez32/(v_haupt/3.6)
```

```
58 t_wez33=s_wez33/(v_abzweig/3.6)
59 t_wez34=s_wez34/(v_abzweig/3.6)
60 #Zweigleisige und zweigleisige Verbindungen
61 #Variante 1
62 s_wzz11=56+lw+lzug
63 s_wzz12=56+lw+lzwischen+lw+lzwischen+lw+lzug
64 s_wzz13=56+labzweig+lverbind+labzweig+lzwischen+lw+lzwischen+labzweig+lzug
65 s_wzz14=56+labzweig+lzwischen+lw+lzug
66
67 t_wzz11=s_wzz11/(v_haupt/3.6)
68 t_wzz12=s_wzz12/(v_haupt/3.6)
69 t_wzz13=s_wzz13/(v_abzweig/3.6)
70 t_wzz14=s_wzz14/(v_abzweig/3.6)
71
72 #Variante 2
73 s_wzz21=56+lw+lzug
74 s_wzz22=56+lw+lzwischen+lw+lzwischen+lw+lzug
75 s_wzz23=56+labzweig+lverbind+labzweig+lzwischen+labzweig+lzug
76 s_wzz24=56+labzweig+lzug
77
78 t_wzz21=s_wzz21/(v_haupt/3.6)
79 t_wzz22=s_wzz22/(v_haupt/3.6)
80 t_wzz23=s_wzz23/(v_abzweig/3.6)
81 t_wzz24=s_wzz24/(v_abzweig/3.6)
82
83 #Variante 3
84 s_wzz31=56+lw+lzug
85 s_wzz32=56+lw+lzug
86 s_wzz33=56+labzweig+lzug
87 s_wzz34=56+labzweig+lzug
88
89 t_wzz31=s_wzz31/(v_haupt/3.6)
90 t_wzz32=s_wzz32/(v_haupt/3.6)
91 t_wzz33=s_wzz33/(v_abzweig/3.6)
92 t_wzz34=s_wzz34/(v_abzweig/3.6)
93
94 #Variante 4
95 s_wzz41=56+lw+lzug
96 s_wzz42=56+lw+lzug
97 s_wzz43=56+labzweig+lzug
98 s_wzz44=56+labzweig+lzug
99
100 t_wzz41=s_wzz41/(v_haupt/3.6)
101 t_wzz42=s_wzz42/(v_haupt/3.6)
102 t_wzz43=s_wzz43/(v_abzweig/3.6)
103 t_wzz44=s_wzz44/(v_abzweig/3.6)
104
105 print('Eingleisig')
106 print('Fahrweg 1      Fahrweg 2      Fahrweg 3      Fahrweg 4')
107 print(t_wee1,t_wee2,t_wee3,t_wee4)
108
109
110 print('Eingleisig Zweigleisig')
111 print('Fahrweg 1      Fahrweg 2      Fahrweg 3      Fahrweg 4')
112 print('Variante 1',t_wez11,t_wez12,t_wez13,t_wez14)
113 print('Variante 2',t_wez21,t_wez22,t_wez23,t_wez24)
114 print('Variante 3',t_wez31,t_wez32,t_wez33,t_wez34)
115
116 print('Zweigleisig Zweigleisig')
117 print('Fahrweg 1      Fahrweg 2      Fahrweg 3      Fahrweg 4')
```

```
118 print('Variante 1',t_wzz11,t_wzz12,t_wzz13,t_wzz14)
119 print('Variante 2',t_wzz21,t_wzz22,t_wzz23,t_wzz24)
120 print('Variante 3',t_wzz31,t_wzz32,t_wzz33,t_wzz34)
121 print('Variante 4',t_wzz41,t_wzz42,t_wzz43,t_wzz44)
122
123 print('Fertig')
```
