



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Diplomarbeit

Entwicklung von Simulationsmodellen für Vershubverfahren im Einzelwagengüterverkehr

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften,
von

Brune MAS-MÉZÉLAN

Mat.Nr.: 12019251

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig
(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik)

Wien, 8. November 2022

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während des Erstellens dieser Diplomarbeit motiviert und unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Georg Kartnig, der mich in seiner Funktion als Betreuer und persönlicher Ansprechpartner unterstützt hat. Ihm danke ich auch dafür, es mir ermöglicht zu haben, diese Diplomarbeit am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung verfassen zu dürfen.

Außerdem möchte ich mich beim Unternehmen ÖBB Infrastruktur AG für die Möglichkeit der Verfassung dieser Diplomarbeit danken. Ein besonderer Dank für die fortwährende intensive Zusammenarbeit gilt hierbei Frau Dr. Romane Blanchard.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen, die mich fachlich unterstützt haben, besonders Herrn Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.tech. Michael Eder für die Unterstützung mit dem Simio Programm, und Herrn Christian Peschl für seine spannende Vorstellung des Schienengütertransport und die kenntnisreichen Gespräche bedanken.

Mein Dank gilt auch meiner Familie, allen voran meinen Eltern, die mein Studium ermöglicht haben und mich während meiner Studienzeit stets durch ihre aufmunternden Worte unterstützt haben.

Auch möchte ich der Katholischen Hochschulgemeinde Wien für die Lernräumlichkeiten, die sie den Studenten zur Verfügung stellt, danken. Nicht zuletzt ein ganz herzliches vergelt's Gott an Fr. Elias Krexner und P. Martin Kammerer für das Korrekturlesen dieser Arbeit, ohne sie hätte sie nicht zustande kommen können.

Kurzfassung

Der Schienengütertransport erlebt in den letzten Jahren einen neuen Aufschwung. In den 1970er-Jahren war der Güterverkehr technologisch führend, wurde dann aber weniger erforscht zugunsten des Straßentransports.

Diese Arbeit entspricht der Modernisierung des Schienengüterverkehrs. Neue Technologien in der Kupplung der Wagen lassen eine Automatisierung der Prozesse insbesondere auf Verschiebebahnhöfen für den Einzelwagentransport erwarten. Das Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung eines vereinfachten Verschiebebahnhofs im Hinblick auf seine Automatisierung. Das Modell befasst sich speziell mit Verschiebebahnhöfen ohne Abrollberg, wo der Verschub rein in der Ebene vollzogen wird. Diese Bahnhöfe stellen ein zentrales Element des Einzelwagenverkehrs dar und werden dennoch weniger untersucht als Bahnhöfe mit Abrollberg. Es sollen zwei Modelle entwickelt werden, ein deterministisches und analytisches mit Hilfe von Matlab und ein stochastisches mit Hilfe der Simulationssoftware Simio, um die Verschubprozesse in der Tiefe zu verstehen und die Leistung eines solchen Bahnhofs bestimmen zu können. Schließlich wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um Optimierungen zu identifizieren, die durch die Automatisierung von Sortierprozessen möglich werden.

Die Modelle basieren auf dem Beispiel des Frachtenbahnhofs Bruck an der Mur, dem einzigen Verschubknoten in Österreich, der über keinen Abrollberg verfügt. Die aktuelle Leistung dieses Bahnhofs wurde ebenfalls anhand von realen Daten analysiert.

Abstract

Rail freight transport has experienced a new upswing in recent years. In the 1970s, freight transport was at the forefront of technology, but then became less explored in favour of road transport.

This master thesis takes place in the movement of modernisation of rail freight transport. New technologies, especially in the coupling of wagons, allow an automation of the shunting process in marshalling yards for wagonload freight. The aim of this work is to model a simplified marshalling yard for the purpose of its automation. The designed models specifically reproduce flat marshalling yards, where shunting is carried out without a hump. Such yards represent a key element in wagonload traffic, however they are less studied than hump yards, the latter being more efficient in terms of classification. Two models have been developed, a deterministic and analytical one using Matlab, and a stochastic one using the simulation software Simio, in order to achieve in-depth understanding of shunting processes and to be able to measure the performance of such a yard. Finally, a literature review was conducted to identify future optimisations made possible by automating the sorting process of the wagons.

Both models were based on the example of the marshalling yard in Bruck an der Mur, which is the unique first rank flat marshalling yard in the Austrian rail network . The current performance of this station was also analysed from real data information.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Akronyme	XII
1 Einleitung	2
1.1 Aufgabenstellung	2
1.2 Zielsetzung	3
2 Theoretische Grundlagen	6
2.1 Organisation des Schienengüterverkehrs in Österreich	7
2.1.1 Verkehrsarten	7
2.1.2 Knotenpunktsystem	9
2.2 Vershub	12
2.2.1 Vershubverfahren	14
2.2.2 Gestaltung eines Verschiebebahnhofs	17
2.2.3 Prozessablauf Vershub in der Fläche	19
2.2.4 Sortieralgorithmus	23
3 Erstellung eines ersten analytischen Modells	26
3.1 Aufbau des Modells	26
3.1.1 Ziel des Modells	26
3.1.2 Konzeptioneller Aufbau	27
3.2 Ergebnisanalyse	32
3.2.1 Minimale Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Wag- gons pro ankommendem Zug	32

3.2.2	Minimale Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Wag- gons pro abfahrenden Zug	33
3.2.3	Minimale Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Rich- tungen	34
4	Simulationsmodell	37
4.1	Aufbau des stochastischen Modells	37
4.1.1	Simio Software	38
4.1.2	Variablen und Ausgangsgrößen	40
4.1.3	Implementierter Prozess	43
4.2	Ergebnisse der Simulation	47
4.2.1	Änderung der Größen über der Zeit	47
4.2.2	Leistungsanalyse	50
5	Verifikation und Vergleich der Modelle	60
5.1	Vergleich Simulation und analytisches Modell	61
5.2	Frachtenbahnhof von Bruck an der Mur	62
5.2.1	Geographische Lage	62
5.2.2	Ankünfte und Abfahrten in Bruck an der Mur	65
5.2.3	Verteilung der Ankünfte und Abfahrten	67
5.2.4	Zielverteilung	70
5.2.5	Verteilung der Länge der Züge	70
5.3	Vergleich Simulation und realen Daten	73
5.3.1	Zwischenankunftszeit	73
5.3.2	Verteilung der Länge der Züge	74
6	Optimierungsmöglichkeiten	77
6.1	Automatisierung und Digitalisierung	78
6.2	Kombinierte Optimierung von Netz und Verschiebebahnhöfen	83
6.3	Alternative Prozesse	84
7	Zusammenfassung und Ausblick	89
	Literaturverzeichnis	92
	Anhang	96
A	Prozesse im Bahnhof	96
B	Verschubprozessen mit und ohne Puffer Position	96

Abbildungsverzeichnis

2.1	Anteil von Schienengütertransport im Modal Split der EU-Ländern zwischen 2010 und 2020 Quelle: [Eurostat, 2022]	6
2.2	Bestellplanung von Güterzügen Quelle: https://infrastruktur.oebb.at/de/geschaeftspartner/schienennetz/trassenbestellung-und-fristen/fahrplan-2023/termine-fristen	8
2.3	Kombinierte Verkehrsarten	9
2.4	Struktur des Knotenpunktsystems für den Einzelwagenverkehr in Österreich	10
2.5	Schematische Darstellung der Aufgaben eines Verschiebebahnhofes: Zerlegung von Zügen und Aufbau von neuen Zügen	12
2.6	Unterschiedliche Kupplungstechnologien	13
2.7	Ablaufverfahren mit Abrollberg Quelle: A. Hausmann und D.H. Enders [Hausmann and Enders, 2017]	14
2.8	Unterschiedliche Bremstechnologien in Verschiebebahnhöfen	15
2.9	Beispiel einer Verschubfahrt in der Fläche von Gleis 4a nach Gleis 2 Quelle: A. Hausmann und D.H. Enders [Hausmann and Enders, 2017]	16
2.10	Abstoßverfahren Quelle: A. Hausmann und D.H. Enders [Hausmann and Enders, 2017]	16
2.11	Typische Gestaltung eines Bahnhofes mit Abrollberg Quelle: N. Boysen et al. [Boysen et al., 2012]	18
2.12	Skizze eines Flachverschiebebahnhofes (Quelle: Bhalerao, 2008)	19
2.13	Lokomotiven [Bensch, 2021]	22
3.1	Durchlaufzeit der Wagen bei unterschiedlichen Szenarien mit 5 unterschiedlichen Zielrichtungen der Wagen	32
3.2	Durchlaufzeit der Wagen bei unterschiedliche Szenarien mit 5 unterschiedlichen Zielrichtungen der Wagen	34

3.3	Durchlaufzeit der Wagen bei einer fixen Anzahl von Wagen in abfahrenden Zügen	35
4.1	Simio Benutzeroberfläche	39
4.2	Mit Simio gebautes Modell	40
4.3	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Verteilungen	42
4.4	Abbildung der Wagen in Simio je nach Richtung	44
4.5	Durchlaufzeit der Wagen in Abhängigkeit von der Zeit	48
4.6	Anzahl der Wagen im Bahnhof in Abhängigkeit von der Zeit	50
4.7	Verteilung der Durchlaufzeit für eine typische Situation Zoom auf das Intervall von 0 bis 25 Stunden	51
4.8	Durchlaufzeit der Wagen für unterschiedliche Verteilungen aufgrund der Ziele der Wagen. Statistiken mit 10 Wiederholungen	51
4.9	Sammelzeit der Wagen in den Vershubgleisen. Statistiken mit 10 Wiederholungen	53
4.10	Durchlaufzeit der Wagen. Statistiken mit 20 Wiederholungen	54
4.11	Tatsächlich beobachtete mittlere Zwischenankunftszeit der Züge im Bahnhof. Statistiken mit 20 Wiederholungen	55
4.12	Anzahl der Wagen im Bahnhof. Statistiken mit 20 Wiederholungen	56
4.13	Leerzeit des Vershub-Triebfahrzeugs. Statistiken mit 20 Wiederholungen	56
4.14	Durchlaufzeit der Wagen im Bahnhof bei unterschiedlicher Länge der ankommenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen	57
4.15	Durchlaufzeit der Wagen im Bahnhof bei unterschiedlicher Länge der abfahrenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen	58
4.16	Zeit zwischen zwei Abfahrten bei unterschiedlicher Länge der ankommenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen	58
4.17	Zeit zwischen zwei Abfahrten bei unterschiedlicher Länge der abfahrenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen	59
5.1	Durchlaufzeit der Wagen in Bezug auf die Wagenanzahl pro ankommenden und abfahrenden Zug	61
5.2	Lageskizze Bruck an der Mur (ÖBB Infra, 2021) [1] Übergang zur AB VOEST, [2] Einfahrgleis aus Richtung Wien, [3] Einfahrgleis aus Richtung Villach	63

5.3	Landkarte mit den Frachtenbahnhöfen, die mit Bruck an der Mur verbunden sind	
	Quelle: openstreetmap.org	64
5.4	Anzahl der ankommenden Züge und Wagen pro Tag in Bruck an der Mur .	67
5.5	Anzahl der abfahrenden Züge und Wagen pro Tag in Bruck an der Mur . .	68
5.6	Histogramm Verteilung der Zwischenankunftszeit	69
5.7	Histogramm Verteilung der Zwischenabfahrtszeit	69
5.8	Verteilung der Wagenanzahl pro ankommenden Zug	72
5.9	Verteilung der Wagenanzahl pro abfahrenden Zug	72
5.10	Verteilung der Zwischenankunftszeit für die Daten von Bruck an der Mur und die Simulation, Durchschnitt von 4 Wochen	73
5.11	Verteilung der Wagenanzahl pro ankommenden Zug in Simio und angepasste Kurve der Daten von Bruck an der Mur	75
5.12	Verteilung der Wagenanzahl pro abfahrenden Zug in Simio und angepasste Kurve der Daten von Bruck an der Mur	75
6.1	Prozessdauer für Standardzug mit 30 Wagen nach Umrüstungsstand Quelle: TU Dresden	80
6.2	Definition von Ein-Block-Zug und Zwei-Block-Zug	
	Quelle: [Xiao and Lin, 2016]	86
6.3	Schematischer Aufbau eines modernen Schiene-Schiene-Umschlagterminals	
	Quelle: [Fedtke and Boysen, 2017]	87
7.1	Prozess Abholen von Wagengruppen	97
7.2	Prozess Beistellen von Wagengruppen	98
7.3	Prozess Vershub ohne Puffer Position	99
7.4	Prozess Vershub mit Puffer Position	100

Akronyme

BPMN Business Process Modelling Notation.

DAK Digitale Automatische Kupplung.

DG Direktgüterzug.

GVbh Großverschiebebahnhof.

KPI Key Performance Indicators.

NG Nahgüterzug.

RCA Rail Cargo Austria.

RFID Radio-frequency identification.

RRT Railcar Retrieval Problem.

Simio Simulation Modeling framework based on Intelligent Objects.

SK Schraubenkupplung.

UIC Union Internationale des Chemins de fer.

VG Vershubgüterzug.

ZBA Zugbildungsanlage.

ZVbh Zentral Verschiebebahnhof.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Schienennetz Österreichs ist einzigartig im Hinblick auf seine Bedeutung sowohl für den Personenverkehr als auch für den Gütertransport. Seine Dichte erlaubt eine effiziente Lieferung von Gütern direkt vom Produktionsort zum Kunden. Deswegen ist es für den Staat wichtig, den Einzelwagenverkehr zu fördern.

Der größte Teil des Schienennetzes in Europa ist elektrifiziert, dies gilt zumindest für die Hauptlinien. Der Schienengüterverkehr ist sehr energieeffizient, denn die Güterzüge können sehr lang sein und mehrere hundert Tonnen von Gütern gleichzeitig transportieren. Sowohl große schwere Güter als auch Massengüter sind für den Schienenverkehr geeignet. Aufgrund seines geringen Energieverbrauches hat die Europäische Union entschieden, den Anteil von Schienen im Modalsplit in Europa zu erhöhen. Seit einigen Jahren unterstützt die Europäische Union viele Forschungsprojekte für die Modernisierung und Automatisierung des Schienengütertransports.

Der Schienengütertransport ist im Vormarsch, der Einzelwagenverkehr aber konkurriert mit dem Lkw-Transport. Lkws können nur bis 25 Tonnen in einer Fahrt transportieren, sie sind also für leichte Waren mit hohem Wert geeignet und sind sehr flexibel. In der Ära des Just-in-Time Managements ist diese Flexibilität ein Muss. Der Einzelwagenverkehr soll also effizienter und vorhersehbarer werden und auch flexibler. Um dieses Ziel zu erreichen, soll der Schienenverkehr modernisiert und optimiert werden. Dabei sind die Verschiebebahnhöfe wichtige Elemente im Einzelwagenverkehr. Dort werden Züge mit Wagen unterschiedlicher Kunden, die unterschiedlicher Herkunft sind und unterschiedliche Zielbahnhöfe haben, zusammengestellt und wieder getrennt. Die Standzeit in den

Verschiebebahnhöfen kann zwischen 10 % und 50 % der gesamten Transportzeit ausmachen [Marinov et al., 2014]. Die Ungewissheit über diese Dauer und die Durchlaufzeit im Bahnhof sollen reduziert werden, damit das Dienstleistungsniveau erhöht werden kann.

Die Automatisierung in den Verschiebebahnhöfen wurde sehr spät und nur teilweise durchgeführt. Zudem besteht nur eine geringfügige Digitalisierung der Prozesse im Bahnhof. Die Zusammensetzung der ankommenden und abfahrenden Züge ist bekannt und im System eingetragen, die Bewegungen der Wagen die dazwischen stattfinden werden aber nicht übertragen. Eine Anpassung an die heutigen Erfordernisse erscheint notwendig. Die aktuelle Forschung über die Digitale Automatische Kupplung (DAK) zwischen den Güterwagen erlaubt es, neue Konzepte zu entwickeln und die völlige Automatisierung der Verschiebebahnhöfe zu planen. Momentan werden die Wagons durch standardisierte Schraubenkupplungen (SK) miteinander verbunden. Die Tätigkeit der Verschubmitarbeiter ist sehr anstrengend und trotz aller Sicherheitsmaßnahmen immer noch gefährlich. Die Verschubmitarbeiter müssen zwischen den Wagen stehen, um sie zu kuppeln bzw. zu entkuppeln. Die Europäische Union sollte die DAK-Technologie als Standard fixieren, damit die Wagen innerhalb Europas miteinander kompatibel sind. Die Umsetzung der automatischen Kupplung ist sehr aufwändig. Es gibt dazu eine Vielzahl einschlägiger Literatur. Wenn alle Wagons in Europa mit einer DAK ausgerüstet werden, kann der Arbeitsaufwand dadurch stark reduziert werden.

Der Auslastungsgrad des Schienennetzes ist bereits sehr hoch. Jede Verspätung hat einen starken Einfluss auf den gesamten Verkehr. Da Personenzüge Vorrang vor Güterzügen haben, verkehrt ein Großteil der Güterzüge in der Nacht. Zu diesen Zeiten findet weniger Personenverkehr statt. Es ist sehr wichtig, die Prozesse in Verschiebebahnhöfen gut im Blick zu haben, um Verspätungen zu vermeiden.

1.2 Zielsetzung

Die Fachliteratur beschäftigt sich hauptsächlich mit Verschiebebahnhöfen mit Abrollberg. Seltener sind ebene Verschiebebahnhöfe Gegenstand der einschlägigen Literatur. Dem will diese Arbeit durch die Analyse und Simulation von ebenen Verschiebebahnhöfen abhelfen. Der Frachtenbahnhof Bruck an der Mur dient in dieser Arbeit als Modell. Dieser

1 EINLEITUNG

Bahnhof wurde von den ÖBB Experten als Beispiel gewählt, da es sich um einen wichtigen Verschubstandort in Österreich handelt, der anders als die anderen Güterzentren keinen Abrollberg besitzt.

Mehrere Forschungsprojekte auf der Ebene Österreich und Europa haben sich als Ziel gesetzt, Verschiebebahnhöfe zu simulieren, um sie optimieren zu können. Unter Leitung der ÖBB findet das Forschungsprojekt „TARO – Towards Automated Railway Operation“ statt. Besonderes Augenmerk wird in diesem Projekt auf Prozesse im Schienengüterverkehr gelegt, nämlich die Optimierung der Leerwagendisposition, die Testung der digitalen automatischen Kupplung und die Untersuchung des Verschubs der Zukunft. Im Rahmen dieses Projektes sollten spezifisch auf die österreichischen Verschiebebahnhöfe mit Abrollberg bezogenen Simulationen implementiert werden. Auf europäischer Ebene gibt es das Projekt OptiYard, das ein Entscheidungswerkzeug für den Betrieb von Verschiebebahnhöfen entwickelt. Auch hier liegt der Schwerpunkt auf Verschiebebahnhöfen mit Abrollberg.

Verschiebebahnhöfe in der Ebene mit einem zu Bruck an der Mur vergleichbaren Transportaufkommen wurden bis jetzt in Simulationen noch nicht betrachtet. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit eine Simulation für den Verschub in ebenen Verschiebebahnhöfen mit Simio entwickelt. Sie soll als Grundlage für die Automatisierung des Betriebes von Verschiebebahnhöfen dienen.

Es ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

1. Wie würden die Prozesse in einem automatisierten ebenen Verschiebebahnhof aussehen?
2. Wie sehr könnte dadurch die Leistung des Verschiebebahnhofes, im Sinne einer Reduktion der Verweilzeit der Wagen im Bahnhof, erhöht werden.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, die Prozesse in einem ebenen Verschiebebahnhof zu analysieren und zu simulieren. Dabei werden mögliche Optimierungen vorgeschlagen. Einerseits solche, die mit der Automatisierung im Zusammenhang stehen, und andererseits solche, die davon unabhängig sind.

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wird im Kapitel 2 zunächst die Organisation des Schienengütertransports in Österreich vorgestellt. Einerseits wird das Verkehrsnetz auf österreichischer Ebene erläutert. Andererseits wird für unterschiedliche Typen von Verschiebebahnhöfen die Organisation innerhalb des Bahnhofes beschrieben.

Ein kleines analytisches Modell wurde zuerst konzipiert und im Kapitel 3 präsentiert. Dieses Modell soll als Basis für die Simulation dienen. Es wurde auch danach als Referenz genommen, um die Simulation zu validieren. Dann wird im Kapitel 4 die Simulation erklärt. Sie ist ein stochastisches Modell, das mit der Software Simio aufgebaut wurde. Die Vorgehensweise zur Validierung der Simulation wird im Kapitel 5 wiedergegeben. Beide Modelle wurden zuerst verglichen. Danach wird der Frachtenbahnhof Bruck an der Mur vorgestellt und Daten von diesem Bahnhof wurden analysiert. Schließlich werden die Daten aus des Bahnhofs Bruck an der Mur mit den Ergebnissen der Simulation verglichen und somit die Ergebnisse der Simulation auf ihre Vertrebarkeit hin überprüft.

Abschließend werden die möglichen Optimierungen des Vershubprozesses, die in der Literatur zu finden sind und in der Simulation implementiert werden könnten, skizziert und andere mögliche Organisationsformen von Verschiebebahnhöfen, die bei künftigen Bahnhofserrichtungen berücksichtigt werden könnten zusammengefasst.

2 Theoretische Grundlagen

Der Anteil des Schienenverkehrs im Gütertransport hat in Europa im Laufe der letzten zehn Jahre laut Eurostat leicht abgenommen [Eurostat, 2022]. Die Europäische Union und Österreich planen jedoch, den Schienenanteil im Modal Split des Gütertransports zu erhöhen, um die CO₂ Ausstoß-Abnahmeziele 2030 zu erreichen. Im Jahre 2030 soll der Schienengütertransport 40% des gesamten inländischen Gütertransports ausmachen [für Klimaschutz, 2021]. Laut Statistik Austria ist der Schienentransport in den letzten Jahren relativ konstant geblieben (Abbildung 2.1).

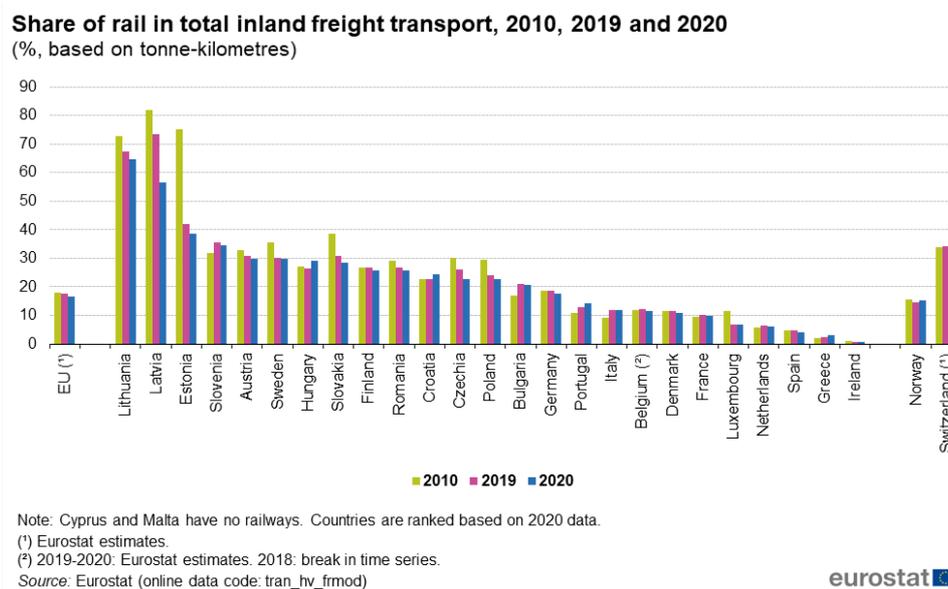


Abbildung 2.1: Anteil von Schienengütertransport im Modal Split der EU-Ländern zwischen 2010 und 2020
Quelle: [Eurostat, 2022]

Mit einem Transportvolumen von ca. 100 Millionen Tonnen im Jahr 2022, macht der Schienengütertransport ungefähr 30% der gesamten inländischen Tonnenkilometer in Österreich aus. Der Schienengütertransport ist besonders geeignet für lange Strecken (wie z.B. der Gütertransport zwischen Asien und Europa), für Massengüter, die regelmäßig verkehren und sehr schwere Güter.

2.1 Organisation des Schienengüterverkehrs in Österreich

Im österreichischen Schienennetz verkehren täglich durchschnittlich 1052 Güterzüge, 870 davon sind ÖBB-Züge [Bensch, 2021]. Die Güterzüge, die auf dem österreichischen Schienennetz verkehren, werden lange im Voraus gebucht. So wie im Personenverkehr üblich fahren die Güterzüge nach einem Fahrplan, nach dem die Schienenbesetzung zwischen den Zügen aufgeteilt werden soll. Die Etappen zur Bestellung eines Zuges sind in der Abbildung 2.2 zu sehen.

2.1.1 Verkehrsarten

Je nach Verkehrsart findet der Gütertransport ganz oder teilweise auf Schienen statt. Die Züge fahren dabei je nach Verkehrsarten unterschiedliche Bahnhöfe an. Die folgenden Verkehrsarten treten in Österreich am häufigsten auf.

- **Kombinierter Verkehr:** Er ist besonders für Container geeignet. Die gesamte Fahrt zwischen Quelle und Senke wird mit mehreren unterschiedlichen Verkehrsmitteln bewältigt, ohne den Transportbehälter zu ändern. Nur ein Teil der Strecke erfolgt auf Schienen. Der Startpunkt davon ist ein Umschlagterminal, der mit Lkws oder mit Schiffen verbunden ist.
- **der Ganzzugverkehr:** Er ist die klassische Punkt-zu-Punkt Verbindung. Der Zug fährt direkt vom Absendergleisanschluss zum Empfänger, ohne sich in Verschiebebahnhöfen aufzuhalten. Er ist besonders geeignet für den schnellen Transport großer Mengen, die immer wieder zwischen denselben Wirtschaftspartnern verkehren sollen. Diese Art von Transport ist der von den meisten Logistikunternehmen einzig vorgeschlagene.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

- **der Einzelwagenverkehr:** In dieser Art von Verkehr ist die kleinste Einheit der Wagen. Die Wagen von unterschiedlichen Absendern werden an verschiedenen Gleisanschlüssen gesammelt, um damit Züge zu bilden. Nur ein Teil der Strecke wird gemeinsam erledigt.

Die letztgenannte Transportart ist die, die uns in dieser Arbeit interessiert, denn sie ist die, die den Verschub in Verschiebebahnhöfen am häufigsten anwendet. Im Einzelwagenverkehr können die Kunden die Fahrt von einigen Wagen bestellen. Das Logistikunternehmen muss diese Bestellung mit anderen Bestellungen verknüpfen, um Teilzüge zu bilden. Die Züge fahren die Wagen verschiedener Absender gleichzeitig zu den jeweiligen Empfängern. Diese Art von Transport ist sehr aufwändig, sie erlaubt aber, alle mögliche Verbindungen zwischen zwei Gleisanschlüssen durchzuführen. Die Wagen werden zuerst regional gesammelt, zum naheliegenden Verschiebebahnhof gebracht und dann zu überregionalen Zügen verbunden. Einige Verschubknoten sind auch Umschlagterminals für den

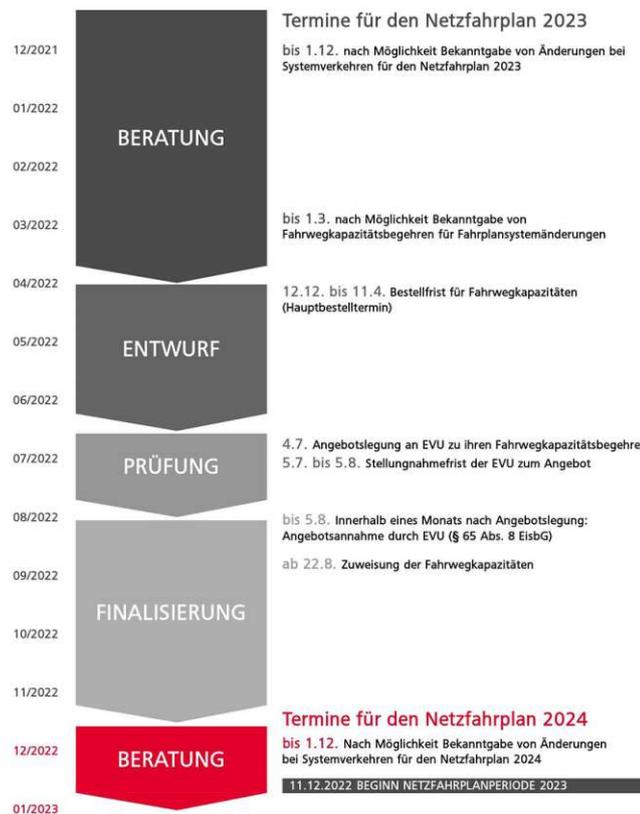


Abbildung 2.2: Bestellplanung von Güterzügen

Quelle: <https://infrastruktur.oebb.at/de/geschaeftspartner/schiennetz/trassenbestellung-und-fristen/fahrplan-2023/termine-fristen>

kombinierten Verkehr in Österreich. In einem Terminal werden Frachten vom Schiffs- oder Straßenverkehr auf Schienen gebracht. Entweder werden die einzelnen Container mit Portalkränen auf spezifische Wagen gelegt oder die Wagen werden direkt mit LKWs beladen (Abbildung 2.3).



a) Containerwaggon



b) Waggon mit Lkw

Abbildung 2.3: Kombinierte Verkehrsarten

Der Einzelwagenverkehr konkurriert direkt mit dem Lkw-Verkehr, weil er eine dichte Flächendeckung erlaubt. Seine Flexibilität ist aber geringer, weil die Wagen mit anderen verbunden werden sollen und nach einem Fahrplan fahren sollen. Daraus folgt eine längere Gesamttransportdauer. Diese kann durch Optimierung von Verschiebebahnhöfen verringert werden, da hauptsächlich die im Verschiebeprozess aufgewandte Zeit in den Verschiebebahnhöfen den Schienentransport verzögert.

2.1.2 Knotenpunktsystem

Um den Transport im Einzelwagenverkehr zu ermöglichen, haben die Länder das Netz in einem Knotenpunktsystem durchgesetzt. Dieses ist auf mehreren Ebenen organisiert, regional und überregional. Die Organisation in Österreich ist in Abbildung 2.4 zu sehen. In Österreich besteht dieses System aus zwei Ebenen, in Deutschland zum Beispiel besitzt das Netz drei Ebenen.

- **Verschubstandort** ist ein Bahnhof oder ein Gleisanschluss. Er ist der Anfang- bzw. der Endpunkt der Transportstrecke. Jeder Verschubstandort ist mit dem nächstliegenden Knotenbahnhof verbunden.

- **Verschubknoten** auch HUB genannt, in Deutschland Rangierbahnhof. Die ÖBB Infrastruktur besitzt sieben Verschubknoten in Österreich (Jahresbericht des ÖBB [Bensch, 2021]). In diesen Bahnhöfen werden Züge gebildet, um Wagen in andere Regionen zu schicken.

Die Züge können die Wagen nicht direkt an einem Verschubstandort abholen und zu einem anderen Verschubstandort fahren. Sie müssen zu einem Verschubknoten fahren.

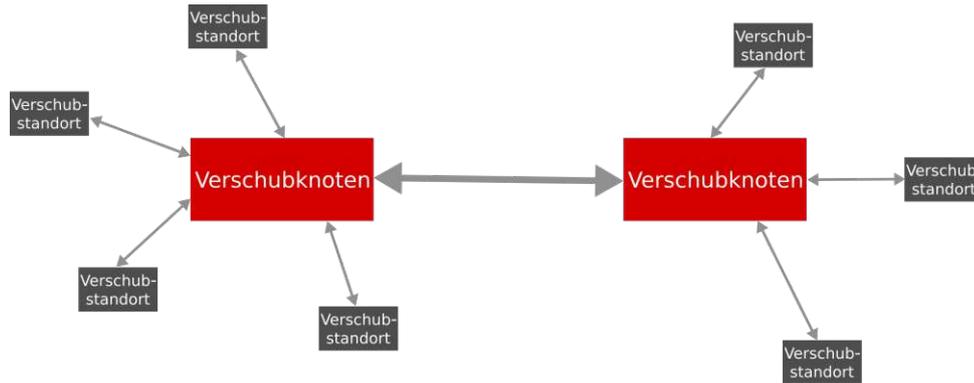


Abbildung 2.4: Struktur des Knotenpunktsystems für den Einzelwagenverkehr in Österreich

Für jede überregionale Fahrt im Einzelwagenverkehr werden die Wagen mindestens in zwei Verschiebebahnhöfen sortiert. Der Preis für den Verschub eines Wagens hängt von der Infrastruktur des Bahnhofes und vom Transportaufkommen im Bahnhof ab. Die Verschiebebahnhöfe sind ein sehr wichtiger Teil des Netzes. Es kann sein, dass die Waggons bis zu 50% der gesamten Transportdauer in Verschiebebahnhöfen stehen [Marinov et al., 2014]. Es gibt also Optimierungsmöglichkeiten, um die Verweilzeit in Verschiebebahnhöfen besser zu beherrschen und eine kürzere und vorhersehbarere Gesamttransportdauer zu erreichen.

Tabelle 2.1: Verschubknoten in Österreich

	Ort	Abkürzung
	Bruck an der Mur Fbf	Bk
	Graz Vbf	Gi
	Hall in Tirol	H
	Linz Vbf	Lzv, Lva, Lv, Lcr, Lm, Lo, Lr
	Salzburg Gnigl	Sr, Sre
	Großverschiebebahnhof (GVbh) Villach Süd	Vsv, Va, Ve
	Wels Vbf	Wev, Wei
	Zentral Verschiebebahnhof (ZVbh) Wien	Zur, Za, Ze

Die österreichischen Vershubknoten sind in der Tabelle 2.1 gelistet. Der österreichische Vershubknoten mit dem größten Durchsatz ist Wien mit einer Leistung von 4760 Wagen/Tag, darauf folgt Villach mit 3150 Wagen/Tag. Im Vergleich: In Bruck werden bis zu 413 Wagen/Tag abgefertigt.

Die Vershubstandorte sind direkt mit einem Vershubknoten verbunden. Die 98 Vershubstandorte sind in einem PDF-Dokument, das auf der Website der ÖBB-Infrastruktur abrufbar ist, zu finden [OEBB-Infrastruktur GB Betrieb, 2022]. Die Bahnhöfe, die mit Bruck verbunden sind, sind in der Tabelle 2.2 eingetragen.

Tabelle 2.2: Vershubstandorte, die zu der Region von Bruck an der Mur Fbh gehören

Ort	Abkürzung
Fehring	Feg
Frohnleiten	Fro
Gleisdorf	Gld
Gratwein-Gratkorn	Gw
Graz Hbf	G
Graz Vbf	Gi
Kalsdorf	Kal
Kapfenberg	Ka
Kindberg	Ki
Knittelfeld	Kd
Leoben Donawitz	Dv
Leoben Göss	Leg
Spielfeld-Straß	Sd
St.Michael	M
Zeltweg	Zg

Es gibt drei Typen von Güterzügen, die zwischen den Bahnhöfen verkehren. Sie wurden im „Zugnummernsystem national Rail Cargo Austria (RCA)“ definiert.

- **Direktgüterzug (DG):** Direktgüterzüge sind die Güterzüge, die Vershubknoten in Österreich miteinander verbinden. Sie verbinden auch die österreichischen Vershubknoten mit den ausländischen HUBs (Verschiebebahnhöfe von erstem Rang). Die Güterzüge, die einen Vershubknoten mit einem Vershubstandort verbinden, werden auch als Direktgüterzüge bezeichnet, wenn die Lokomotive und das Lokpersonal während der ganzen Fahrt nicht gewechselt werden.

- **Nahgüterzug (NG):** Die Nahgüterzüge sind entweder Güterzüge des Einzelwagenverkehrs, die Verschubknoten mit Verschubstandorten verbinden. Oder Güterzüge, die zwischen Verschubstandorten untereinander verkehren. Oder Güterzüge, die Verschubstandorten mit anderen Betriebsstellen des Güterverkehrs (z.B. privaten Gleisanschlüssen) verbinden.
- **Verschubgüterzug (VG):** Ein Verschubgüterzug ist einen Nahgüterzug, in dem sich Verschubpersonal befindet.

In dieser Arbeit werden NG und VG nicht voneinander unterscheidet. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit für Güterzüge beträgt zwischen 100 km/h und 120 km/h für Hauptbahnen und 80 km/h für Nebenbahnen.

2.2 Verschub

Verschub ist der österreichische Begriff für das Rangieren. Er wird als *beabsichtigte Fahrzeugbewegungen, die nicht zu den Zug- oder Nebenfahrten zählen*, definiert. Der Verschub umfasst das Bewegen der Waggons, sowie das Kuppeln und Entkuppeln der Fahrzeuge, das Sichern der abgestellten Wagen und die Weichenstellung.



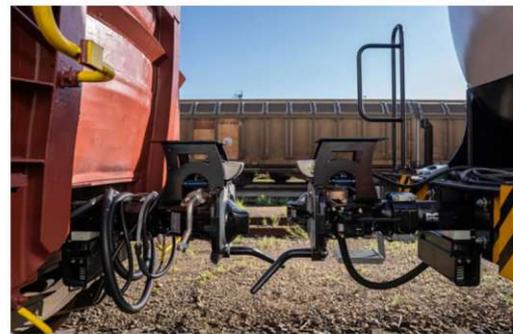
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Aufgaben eines Verschiebebahnhofes: Zerlegung von Zügen und Aufbau von neuen Zügen

Die Verschiebebahnhöfe sind Orte, an denen die Züge ankommen, um zerlegt zu werden. Die Wagen werden auf andere Gleise geschoben, wo Züge gebildet werden und vom Bahnhof abfahren können (Abbildung 2.5). Im Verschubbereich ist die kleinste Einheit weder der Zug noch die Wagengruppe, sondern der Wagen, selbst wenn sie miteinander gekuppelt werden können, um gleichzeitig verschoben zu werden. So kann ein einzelner beschädigter Wagen entfernt werden, obwohl er sich in einer Wagengruppe befindet. Innerhalb des Bahnhofes unterscheiden sich die Verschubfahrten von einer anderen Zugfahrt dadurch, dass sie nicht nach einem Fahrplan fahren und keine Zugnummer bekommen also relativ unabhängig sind.

In einem Zug sind die Waggons miteinander durch ein Kupplungssystem verbunden. Die europäische Standard-Schraubenkupplung (SK), die vom internationaler Eisenbahnverband *Union Internationale des Chemins de fer (UIC)* bevorzugt wird, ist noch immer die am häufigsten verwendete in Güterwagen in Europa [Janicki, 2021]. Mit diesem System werden die Wagen händisch gekuppelt. Der Mitarbeiter hängt den Kupplungsbügel des ersten Wagens in den Zughaken des anderen Fahrzeugs ein. Mit dem Kupplungsschwengel erfolgt die Spannung zwischen den Wagen. Zwei Puffer erlauben die Übertragung von Stoßkräften. Die unterschiedlichen Teile einer Schraubenkupplung sind in der Abbildung 2.6 zu finden. Die neue, in Güterwagen eingefügte Digitale Automatische Kupplung (DAK) erlaubt, die Wagen miteinander nur durch Druck zu kuppeln und mittels Fernsteuerung zu entkuppeln.



Zughaken Lasche Schwengel Spindel Mutter Bügel



a) Bezeichnungen einer Schraubenkupplung b) Digitale automatische Kupplung

Abbildung 2.6: Unterschiedliche Kupplungstechnologien

Die Wagen werden mit Luft versorgt. Die Luftleitung soll auch zwischen den Wagen verbunden werden. Die Hauptluftleitung bindet die Bremsen vom Wagen zum Triebfahrzeug. Dadurch werden die Druckluftbremsen der Wagen mit Luft versorgt und gesteuert. Der Druck in der Hauptluftleitung ist 5 bar ([Janicki, 2021], Seite 83). Einige Systeme von DAK verbinden auch die Luftleitung automatisch, bei anderen Systemen müssen die Verbindungen wie bei klassischen Schraubenkupplungen händisch hergestellt werden.

2.2.1 Verschubverfahren

Mehrere Techniken und Verfahren werden verwendet, um Wagen von Punkt A zu Punkt B zu bringen. Da die Wagen in Europa keinen Motor besitzen, können sie sich nicht von selbst bewegen. Sie können von einer Lokomotive geschoben oder gezogen werden, wie es bei Zügen zu sehen ist. Oder sie bewegen sich durch ihre Trägheit, wenn ihnen ein entsprechender Impuls gegeben wurde. Das sind grundsätzlich die beiden Vorgänge, die in den Verschiebebahnhöfen angewendet werden. Die unterschiedlichen Verfahren werden je nach Gestaltung des Bahnhofes und je nach transportiertem Gut verwendet.

Die Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren stützt sich auf das Buch *Systemtechnik des Schienenverkehrs* von Jörn Pachl [Pachl, 2021]. Er unterscheidet drei Verschubverfahren, die mit der Gestaltung des Bahnhofes verbunden sind:

- Ablaufverfahren
- Umsetzverfahren
- Abstoßverfahren.

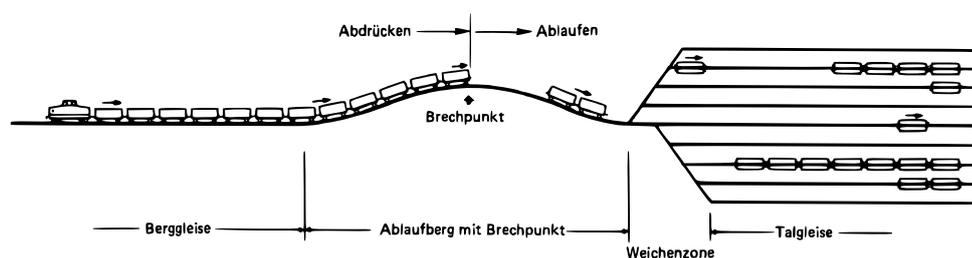


Abbildung 2.7: Ablaufverfahren mit Abrollberg

Quelle: A. Hausmann und D.H. Enders [Hausmann and Enders, 2017]

Das *Ablaufverfahren* kann nur mit einem Abrollberg stattfinden, daher nicht in Bruck an der Mur. Deswegen wird dieses Verfahren in den folgenden Abschnitten nicht eingehender untersucht. Die Wagen laufen durch Schwerkraft in Gruppen gekuppelt die geneigte Ebene bis zum Zielgleis. Die Weichen werden im Voraus vom Verschub-Personal gestellt, damit die Wagen am gewünschten Gleis ankommen.

Eine Besonderheit im Ablauf ist das sogenannte Langmachen, bevor die Wagenkolonne an den Abrollberg gelangt. Es ist die Vorbereitung zur Entkuppelung der Wagengruppen. Im Ankunftsbereich werden die Wagengruppen nicht ganz voneinander getrennt, die Schraubenkupplungen werden aber aufgedreht und die Bügel bleiben an die Haken der

nächsten Wagen gehängt. Erst auf der Höhe des Abrollberges werden die Wagen entkuppelt. Ein Mitarbeiter hebt die Bügel mithilfe einer Stange, um die Wagen voneinander zu trennen, obwohl sie in Bewegung sind.

Die Weichen hinter dem Abrollberg werden ferngesteuert. Manchmal haben die Wagen zu viel kinetische Energie und sollen gebremst werden. Ein Wagen in Europa muss mit einer Lok verbunden sein, damit die Bremsen angetrieben werden können. In einigen Verschiebebahnhöfen sind Bremsen auf den Gleisen befestigt (Abbildung 2.8 a). Wenn das nicht der Fall ist, werden die Wagen durch Bremschuhe gebremst (Abbildung 2.8 b). Die Hemmschuhe werden von Mitarbeitern auf die Gleise gelegt. Am Ziel werden noch Hemmschuhe ausgelegt, um die Wagen zu sichern. Wenn die Bremschuhe durch integrierte Bremsen an den Gleisen ersetzt werden, kann der Bremsvorgang durch Computersteuerung und Automatisierung gesteuert werden.



a) Gleisbremse
Quelle: [Janicki, 2021]



b) Hemmschuh
Quelle: [Hausmann and Enders, 2017]

Abbildung 2.8: Unterschiedliche Bremstechnologien in Verschiebebahnhöfen

Im *Umsetzverfahren* wird ein Wagen mit einer Vershublok gekuppelt und bis zur Zielposition geführt. Die Wagen schließen sich hinter den anderen Wagen an, die schon auf dem Zielgleis stehen. Hemmschuhe werden vor den Wagen gestellt. Falls die Luftleitung gekuppelt war, sollen die Bremsen der Wagen noch gelüftet werden. Schließlich kann das Vershub-Triebfahrzeug entkuppelt werden und zum nächsten Einsatz fahren (Anhang B). Mehrere eine Wagengruppe bildende Wagen können auch gleichzeitig bewegt werden. Eine Lokomotive ist für jede Vershubfahrt erforderlich, die Leistungsfähigkeit des Bahnhofes ist daher niedrig. Dieses Verfahren wird in flachen Verschiebebahnhöfen wie Bruck

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

an der Mur verwendet, aber auch in Verschiebebahnhöfen mit Abrollberg für gefährliche Beladung, die über den Abrollberg nicht fahren darf. Ein Beispiel für eine Verschiebfahrt mit dem Umsetzverfahren ist in der Abbildung 2.9 zu sehen.

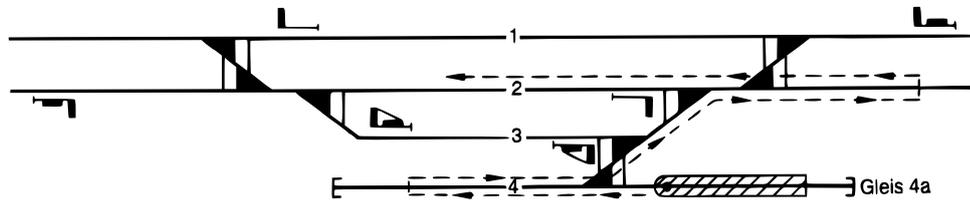


Abbildung 2.9: Beispiel einer Verschiebfahrt in der Fläche von Gleis 4a nach Gleis 2 Quelle: A. Hausmann und D.H. Enders [Hausmann and Enders, 2017]

Das *Abstoßverfahren* ist komplizierter, aber effizienter als das Umsetzverfahren. Dieser Prozess erfordert eine Pufferposition, das heißt eine spezifische Konfiguration der Verschiebgleise. Diese Art von Verschieb ist für gefährliche Waren nicht erlaubt, denn es gibt eine Entgleisungsgefahr. Das Abstoßverfahren ist zudem in einigen Verschiebebahnhöfen wegen der dortigen Topographie nicht erlaubt. Der Fahrer des Verschieb-Triebfahrzeugs fährt mit der Wagengruppe bis an die Pufferposition vor dem Zielgleis und stoppt dort. Ein Verschieb-Mitarbeiter prüft, ob die Wagen, die auf dem Zielgleis liegen, bereit für die Kupplung sind. Ab diesem Ort müssen die Wagen nur mehr geschoben werden, sodass es nicht mehr notwendig ist, dass die Verschieblok mit dem Wagen gekuppelt ist. Die Lok wird entkuppelt. Die Lokomotive fährt los und beschleunigt bis zur „Push-off Geschwindigkeit“. Die maximal erlaubte Geschwindigkeit in den Verschiebebahnhöfen beträgt laut OpenRailrayMap 40 km/h. Diese Geschwindigkeit ist nur erlaubt, wenn der Fahrweg frei ist. Sonst ist 25 km/h die zulässige Höchstgeschwindigkeit und 20 km/h beim Verschieb im Baugleis [Janicki, 2021]. Dann bremst die Lok. Aufgrund ihrer Trägheit fährt die Wagengruppe bis zur Zielstelle weiter.

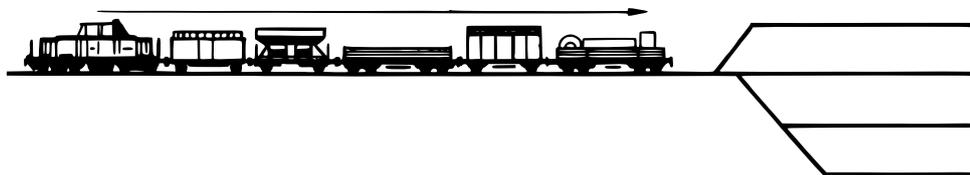


Abbildung 2.10: Abstoßverfahren

Quelle: A. Hausmann und D.H. Enders [Hausmann and Enders, 2017]

Die Push-off Geschwindigkeit muss so berechnet werden, dass die Wagen genug kinetische Energie haben, um den Zielpunkt zu erreichen. Falls die Wagen zu schnell sind, werden wie im Ablaufverfahren Hemmschuhe auf die Schienen gelegt, die Bremschuhe

werden vom Waggon auf der Schiene mitgeschleift. Die dadurch auf der Schienen entstehende Reibung soll eine Bremswirkung erzeugen. Falls die Wagen zu langsam sind und den Zielort nicht erreichen, soll das Verschub-Triebfahrzeug die Wagengruppe bis zur Zielstelle schieben. Danach wird die Wagengruppe gesichert.

2.2.2 Gestaltung eines Verschiebebahnhofs

Es werden drei typischen Arten von Verschiebebahnhöfen unterschieden:

- Verschiebebahnhöfe mit Abrollberg
- flache Verschiebebahnhöfe
- Gefälle-Verschiebebahnhöfe.

In den nächsten Abschnitten werden die unterschiedlichen Verschiebebahnhöfe beschrieben.

Die Verschiebebahnhöfe mit Abrollberg sind am effizientesten. Die Leistung des Zentral Verschiebebahnhofs Wien beträgt 4760 Wagen pro Tag. Ein Bahnhof mit Abrollberg ist typischerweise in vier aufeinanderfolgenden Bereiche geteilt: die Einfahrgruppe, den Abrollberg, die Richtungsgruppe, die Ausfahrgruppe (Abbildung 2.11). Der Abrollberg ist eine kleine steile Anhöhe, ihre Neigung liegt zwischen 4% und 7%. Direkt hinter dem Berg in der Verteilzone, wo alle Weichen sind, herrscht noch eine kleine Neigung, nämlich zwischen 1% und 1.5%. Alle zu sortierenden Wagen fahren hier durch. In der Richtungsgruppe kann noch eine kleine Neigung vorhanden sein, um das Rücklaufen der Waggons zu vermeiden. Die Bahnhöfe verfügen durchschnittlich über 20 bis 40 Sortiergleise in diesem Bereich, die in Europa zwischen 200 m und 700 m lang sind. So entsteht eine Arbeitsrichtung. Damit Züge von beiden Fahrtrichtungen bedient werden können, sind Gleisverbindungen für Gegeneinfahrten und Gegenausfahrten eingerichtet.

Um dem hohen Platzbedarf der Verschiebebahnhöfe mit Abrollberg gerecht zu werden, werden in vielen Bahnhöfen zwei Bereiche zusammengeschlossen. Relativ oft warten die gebildeten Züge auf den Verschubgleisen, weil der Bahnhof keinen Abfahrtbereich besitzt. Die Kapazität des Bahnhofes ist zwar geringer, aber der Flächenbedarf des Bahnhofes wird auch dadurch reduziert. Wien ZVbf ist der einzige österreichische Verschiebebahnhof, der Ausfahrgruppe besitzt. Gelegentlich fungiert die Einfahrgruppe auch als Ausfahrgruppe.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die in einem Gleis gesammelten Wagen werden wieder zur Einfahrgruppe gezogen. In den Vereinigten Staaten sind die Güterzüge länger als in Europa (2 bis 3 km). Trotz der großen Infrastrukturen können nur die Ein- und Ausfahrgleise komplette Züge aufnehmen.

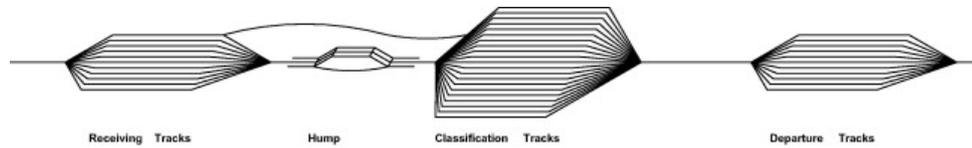


Abbildung 2.11: Typische Gestaltung eines Bahnhofes mit Abrollberg

Quelle: N. Boysen et al. [Boysen et al., 2012]

Der Betrieb in Verschiebebahnhöfen mit Abrollberg läuft folgendermaßen ab. Ein Zug fährt in den Einfahrtbereich ein. Er wird für das Abrollen vorbereitet. Die Lokomotive wird zuerst vom Zug getrennt und fährt zu nächstem Einsatz. Eine kurze Wagenuntersuchung wird durchgeführt. Ziel davon ist, die Schadwagen zu identifizieren, um sie so wie die Wagen, die keinen Abrollberg befahren dürfen, von der Wagenkolonne abzuziehen. Die Wagenreihenfolge wird geprüft, sie entspricht nicht immer der Reihenfolge der Zugpapiere. Die Wagengruppen werden voneinander gemäß der vorgegebenen Zerlegeliste entkuppelt oder lang gemacht. Dann kommt eine Verschieblock und schiebt die Wagenkolonne bis zum Abrollberg dem Ablaufverfahren nach (Abbildung 2.7). Die Wagen werden mit spezifischer Geschwindigkeit bis zum höchsten Punkt des Berges angeschoben. Dann fahren sie dank ihrer Trägheit weiter bis zu ihrer Zielposition. Bevor jede Gruppe zum Abrollberg geschoben werden kann, sollen die Weichen richtig eingestellt werden, damit die Wagengruppe am gewünschten Gleis ankommt. Die Wagen werden in diesem Bereich untersucht und gekuppelt, um neue Züge zu bilden. Die zur Abfahrt bereiten, zusammengeführten Zügen warten dort auf die Abfahrtszeit oder auf eine verfügbare Zuglokomotive. Wenn die Lok gekuppelt ist, sollen noch Bremsproben durchgeführt werden, und die Fahrtpapiere übergeben werden. Wenn der Zug vom Kontrollturm die Erlaubnis bekommt, darf er abfahren.

Die Gefällebahnhöfe funktionieren nach demselben Prinzip. Statt auf einer künstlichen Anhöhe liegen alle Gleise in einem Gefälle, sodass die Wagen allein durch Schwerkraft rollen können. Die Wagen können von einer Verschieblock beschleunigt werden, aber im Allgemeinen rollen die Wagen langsamer als in einem Flachbahnhof mit Abrollberg. Die Leistung dieser Bahnhöfe ist also niedriger als jener mit Abrollberg. Deswegen und wegen ihres höheren Aufwands, um die Wagen festzuhalten, werden keine neuen Gefällebahnhöfe ausgeführt.

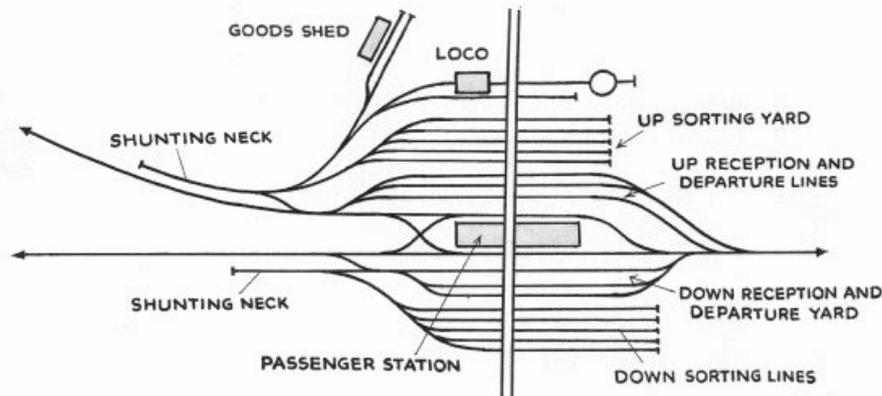


Abbildung 2.12: Skizze eines Flachverschiebebahnhofs (Quelle: Bhalerao, 2008)

Für den Vershub in der Fläche fährt die Vershublok im Sinne des Abstoßverfahrens und des Umsetzverfahrens hin und her (push-pull Prinzip), um die Waggons an ihr Ziel zu bringen. Der Betrieb dieses Bahnhofs benötigt mehr Energie (Brennstoff) als ein Abrollbergbahnhof, wo die potenzielle Schwerkraftenergie genutzt wird. Der Abrollberg ist dennoch ein Engpass und kann die Leistung des Bahnhofs begrenzen, wenn die Ankunftsfrequenz zu hoch ist [Dirnberger and Barkan, 2007]. In flachen Verschiebebahnhöfen können im Vergleich mehrere Vershub-Triebfahrzeuge parallel eingesetzt werden.

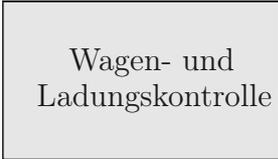
Im Artikel von Boysen et al. [Boysen et al., 2012] erklären die Autoren, warum der Vershub in der Fläche bevorzugt werden sollte. Der Platzbedarf in Flachbahnhöfen ist geringer als in Bahnhöfen mit Abrollberg. Die Investitionskosten sind also geringer.

2.2.3 Prozessablauf Vershub in der Fläche

Alle Prozessdiagramme sind im Anhang A zu finden. Sie wurden an die Business Process Modelling Notation (BPMN) angelehnt.

Wie schon erwähnt ist der Wagen die kleinste Einheit im Verschiebebahnhof. Die Wagen können aber auch in Gruppen betrachtet werden. Die Wagengruppen sind je nach Art der Sortierung im Bahnhof definiert. Gruppen sind entweder Wagen, die nacheinander im ankommenden Zug sind und im selben Zug abfahren werden, oder Wagen, die nacheinander im ankommenden Zug sind und in derselben Reihenfolge im abfahrenden Zug sein sollen. Diese zweite Definition ist restriktiver und gilt lediglich, wenn die Wagen in dem abfahrenden Zug zusätzlich geordnet werden. Es kann interessant sein, die Wagen

Tabelle 2.3: Bedeutung von verwendeten Symbolen im Prozessen

Merkmal	Bedeutung
	Beginn des Prozesses
	Ende des Prozesses
	Ausführende Person
 	Prozess bei Einsatz der Schraubenkupplung (SK) in English <i>screw couplers</i> (SC) oder der digitalen automatischen Kupplung (DAK) in English <i>digital automated coupling</i> (DAC)
	Verzweigung Entweder - Oder
	Prozessetappe

zu ordnen, um Zeit in den Bahnhöfen, wo ein Nahzug sich aufhält oder ein paar Wagen stehen gelassen werden, zu gewinnen. Wenn die Wagen, die in den ersten Bahnhof geliefert werden müssen, die Letzten in der Reihenfolge sind, können sie entkuppelt werden und der Zug kann, ohne zusätzliche Verschubaufträge zu erledigen, weiterfahren. In Bruck an der Mur wird keine Nachsortierung durchgeführt, daher wird hier die erste Definition zugrunde gelegt.

Die unterschiedlichen Rollen der Mitarbeiter im Bahnhof sind folgende:

- S: Verschub-Mitarbeiter
- LD: Lokführer Zugtriebfahrzeug
- WT: Lokführer Verschublok.

Einige Arbeitsschritte können parallel zueinander durchgeführt werden, je nach Verfügbarkeit der Arbeitskräfte, anderen müssen nacheinander durchgeführt werden. Die Prozesse sind Richtlinien für den Verschub, der reale Fall aber weicht oft davon ab, wegen unvorhersehbarer Probleme oder Verspätungen der Züge.

Der Prozess „Beistellen“ ist die Vorbereitung einer Wagengruppe, bevor diese verschoben wird. Der Prozess „Abholen“ beschreibt die Arbeitsschritte, die die Verschiebung folgen soll, um die zu verschiebende Wagengruppe von Gleis A nach Gleis B zu verschieben. Zum besseren Verständnis des Protokolls werden die Arbeitsschritte in den nächsten Abschnitten beschrieben.

Zugankunft

Ein Güterzug kommt im Verschiebebahnhof an. Er soll auf einen Eingangsgleis fahren. Wenn der Bahnhof kein Eingangsgleis hat oder wenn dieses Gleis schon belegt ist, wird dem neu angekommenen Zug ein freies (Sortier-)Gleis zugeordnet. Der Zug wird mit Hemmschuhen gesichert. Wenn nötig werden auch die Bremsen entlüftet. Die Entlüftung der Bremsen verursacht einen Druckabfall, der dazu führt, dass die Bremsen der Wagen automatisch angezogen werden. Die Bremsen sollen bei jedem Wagen entlüftet werden. Erst wenn die Wagen gesichert sind, darf die Zuglokomotive entkuppelt werden. Der Lokführer fährt bis zum Aufnahmegebäude, um die Fahrdokumente zu übergeben. Die Fahrt ist dann offiziell fertig und der Zug-Triebfahrzeug-Führer kann mit seiner Zuglok zum nächsten Auftrag, innerhalb oder außerhalb des Bahnhofes, fahren.

Die Mitarbeiter des Verschiebebahnhofes kümmern sich dann um die neu angekommenen Wagen. Bevor das tatsächliche Verschiebungsverfahren stattfinden kann, soll die Reihenfolge der Wagen geprüft werden. Die Reihenfolge der Wagen des Zuges entspricht unter Umständen nicht, der geplanten Reihenfolge und manchmal fehlen Wagen. Gegebenenfalls müssen die Abweichungen in den Fahrtpapieren vermerkt und die Zerteilung des Zuges adaptiert werden. Dieser Arbeitsschritt wird ausgeführt, indem ein Verschiebe-Mitarbeiter den Wagen entlanggeht und optisch überprüft, ob die Reihenfolge den Papieren entspricht. Diese Etappe kann mit der Entkuppelung der Wagengruppe kombiniert werden: Der Mitarbeiter geht den Wagen entlang, prüft die Folge und entkuppelt zwischen den Wagengruppen. Zum Abschluss wird das Ende des Prozesses „Bereitstellen“ gemeldet.

Verschubbewegungen

Wenn die Gruppen entkuppelt sind, kann der sogenannte Abholprozess beginnen (Anhang A Abholprozess). Zuerst wird ein Verschiebe-Triebfahrzeug angefordert. In großen Verschiebebahnhöfen können mehrere Verschiebe-Triebfahrzeuge, auch Verschiebeploks genannt,



a) Dieselhydraulische Verschublokomotive
ÖBB 2070 ©2014 Tokfo



b) Elektrische Lokomotive
ÖBB 1293 ©Thomas Naas Photography

Abbildung 2.13: Lokomotiven [Bensch, 2021]

gleichzeitig fahren. Die Gestaltung des Bahnhofes muss aber dafür geeignet sein. Damit die Lokomotiven einander nicht stören, benötigen sie zwei unabhängige Bereiche. Es ist eher selten, dass zwei Verschubloks gleichzeitig im Einsatz sind. In der Folge wird also nur der Einsatz einer einzigen Verschublok betrachtet. Das Triebfahrzeug soll mit der Wagen-Gruppe gekuppelt werden. Wenn die Bremsleistung der Verschublok nicht ausreichend ist, sollen die Bremsen von den Wagen wieder gelüftet werden. Das heißt die Luftleitung der mit der Verschublok verbundenen Wagen, wird aktiviert, damit die Bremsen der Wagen bedarfsgerecht auch Bremskraft leisten können. Aus Sicherheitsgründen soll diesem Arbeitsschritt immer eine kurze Bremsprobe folgen. Ein Verschubmitarbeiter prüft visuell, ob die Bremsen bei Betätigung in Kraft treten.

Die Sicherungsmittel können entfernt werden. Der Verschub-Triebfahrzeugführer wartet auf die Vershuberlaubnis. Er bekommt ein Signal vom Weichenwärter, wenn er den Fahrweg eingestellt hat. Die Lokomotive darf nur mit Gehgeschwindigkeit fahren, damit ein Hemmnis auf den Schienen oder eine falsch eingestellte Weiche rechtzeitig bemerkt werden kann. Je nach Situation werden das Umsetzverfahren oder das Abstoßverfahren verwendet.

Zugabfahrt

Wenn sich alle Wagen, die gemeinsam einen Zug bilden sollen, auf demselben Gleis befinden, kann die Zugbildung beginnen. Die Wagen werden direkt am Verschubgleis für den neu abfahrenden Zug vorbereitet. Falls die Wagen nicht direkt hintereinander gestoppt

wurden und näher aneinander gebracht werden sollten, um gekuppelt zu werden, kommt eine Verschiebung, um sie beizudrücken. Sie werden zunächst alle miteinander gekuppelt. Eine Reihungsprüfung der Wagen kann beantragt werden. Die Abweichungen vom Plan werden vermerkt, die Wagen werden aber nicht nachsortiert. Eine Wagenuntersuchung wird durchgeführt. Es soll ungefähr 2 Minuten pro Wagen dauern. Im Falle, dass Schäden gefunden wurden, je nachdem wie schwerwiegend das Problem ist, werden die Schäden vermerkt, direkt an Ort und Stelle oder in der Werkstatt des Bahnhofes behandelt. Dafür muss zuerst der Wagen vom Zug entfernt und dann zur Werkstatt geschoben werden. Der so formierte Zug wird mit einer Zugnummer versehen. Danach wird ein Zugtriebfahrzeug angefordert, und die Fahrtpapiere an den Bediener des Zug-Triebfahrzeugs übergeben. Die Luftleitung jedes Wagens muss angeschlossen werden und ein kurzer Bremsstest durchgeführt werden. Die Hemmschuhe müssen entfernt werden. Wenn alles einwandfrei funktioniert, signalisiert der Zugführer seine Abfahrtsbereitschaft. Sobald das Abfahrtsignal gegeben wurde, darf der neu formierte Zug den Bahnhof verlassen.

2.2.4 Sortieralgorithmus

Es gibt unterschiedliche Sortieralgorithmen und Sortierproblemen, wenn man die Reihenfolge der Wagen in dem abfahrenden Zug spezifisch organisieren möchte.

Abrollberg

Die Züge bilden einen Stapel. Nur das oberste Element kann herausgenommen werden. Mit einem einzigen Durchlauf der Wagenkolonne auf dem Abrollberg kann die gewünschte Reihenfolge nicht erreicht werden. In diesem Fall werden die Wagen, die schon einmal über den Abrollberg gefahren sind und ein Gleis der Richtungsgruppe (Abbildung 2.11) erreicht haben, wieder von einer Verschiebung zur Einfahrgruppe geschoben, damit die Wagen wieder den Abrollberg befahren können. In Österreich darf nur in Abrollrichtung gefahren werden. Der Verschiebbereich und der Ankunftsbereich sind mit einem Umfahrgleis (neben dem Abrollberg) verbunden, um die Wagen für die Sortierung in mehreren Stufen zurück zur Einfahrgruppe bringen zu können.

Unterschiedliche Strategien wurden entwickelt, um die Sortierung durchzuführen. Die Wagen können pro Zug (*sort by train*) oder pro Block (*sort by block*) auf die Verschubgleise aufgeteilt werden. Um einen Zug zu bilden, werden Blöcke aus unterschiedlichen Gleisen zu einem neuen Gleis gebracht. Wenn die Wagen pro Block geordnet sind, ist der Flächenbedarf höher (mehr Gleise werden benötigt), aber die Wagen gehen nur einmal über den Abrollberg. In Verschiebebahnhöfen mit Abrollberg können die Wagen im mehreren Durchläufen auf dem Abrollberg in die gewünschte Reihenfolge gebracht werden.

Die Forschung interessiert sich sehr für die Sortieralgorithmen, durch die eine gewünschte Reihenfolge erlangt wird. Ziel der Untersuchungen ist es, entweder die notwendige Anzahl der Durchläufe des Abrollbergs zu minimieren oder die Anzahl der verwendeten Gleise zu minimieren. In Bruck an der Mur werden die Wagen nicht nachsortiert, um eine spezifische Reihenfolge im abfahrenden Zug zu haben. Deswegen wurde dieser Aspekt auch in der Simulation nicht betrachtet. Es kann sein, dass in Bruck eine Mischung zwischen *sort by train* und *sort by block* stattfindet. Mangels präziser Hinweise wurde hier der *sort by train* betrachtet.

Railcar Retrieval Problem (RRT)

In Bahnhöfen, die über ein Reparaturgleis verfügen, kann die Instandsetzung eines Wagens im Voraus bestellt werden. Die Bahnhofsleitung bekommt den Auftrag, diesen Wagen beiseitezustellen. Anderenfalls können schwere Schäden während der Wagenuntersuchung identifiziert werden. In dem Fall, wo die Schäden zu ernst sind und der Wagen nicht fahren darf, wird der Wagen auf die Seite gestellt.

Der folgende Ablauf findet statt, um die betroffenen Wagen beiseitezustellen: Der Schadwagen wird vom Wagen vorne und hinten entkuppelt. Die Wagen vor dem Schadwagen bilden eine Gruppe und die Wagen danach eine andere. Jede Gruppe soll separat gesichert werden. Dann kommt die Verschublok, sie wird mit der Gruppe vor dem Schadwagen gekuppelt. Die Sicherungsmittel dieser Gruppe werden entfernt und sie wird auf ein leeres Gleis geführt und dort gesichert. Danach holt das Verschub-Triebfahrzeug den Schadwagen ab und schiebt ihn auf ein Sammelgleis. Letztendlich fährt die Lok wieder zu der Wagengruppe, die auf die Seite gebracht wurde und bringt sie zu den verbliebenen Wagen, die hinter dem Schadwagen waren, zurück. Die zwei Gruppen werden miteinander gekuppelt und gesichert.

Der gleiche Prozess wird auch verwendet, um Wagen mit spezifischer Ladung, die nicht über den Abrollberg fahren dürfen, beiseite zu stellen. Dann werden sie von einer Verschublok über ein Umfahrgleis direkt zum Zielgleis verschoben.

In diesem ersten Teil wurde die vorhandene Struktur des Schienengüterverkehrs in Österreich abgebildet. Die Organisation des Einzewagenverkehrs wurde erläutert, spezifisch die Rolle der Verschiebebahnhöfe im Gütertransport. Die Verschubprozesse, die als Basis für die Simulation dienen werden, wurden erklärt. Alle für die Fortsetzung der Diplomarbeit notwendigen Grundlagen wurden somit gesammelt. Die folgenden Kapitel beziehen sich auf die Anwendung dieser theoretischen Kenntnissen in der Simulation, um die Forschungsfragen beantworten zu können.

3 Erstellung eines ersten analytischen Modells

Zwei Arten von Simulationen sind zu unterscheiden, einerseits die analytische, deterministische Simulation und andererseits die stochastische Simulation. Ziel dieser Arbeit ist eine stochastische Simulation zu implementieren, um die Forschungsfragen beantworten zu können. Als Vorarbeit sollte zuerst die derzeitigen Prozesse mithilfe eines analytischen deterministischen Modells analysiert und quantifiziert werden. Dieses Modell soll eine grobe Vereinfachung der Prozesse sein. Ziel davon ist, Ausgangsgrößen zu erlangen, die mit den Ausgangsgrößen der Simulation zur Validierung verglichen werden können.

Die zwei charakteristischen Parameter der Verschiebebahnhöfe sind der Durchsatz, in Wagen pro Zeiteinheit gerechnet, und die mittlere Durchlaufzeit der Wagen durch den Verschiebebahnhof. Das Produkt aus dem Durchsatz und der mittleren Durchlaufzeit ergibt die mittlere Anzahl an Wagen, die sich gleichzeitig am Bahnhof befinden. Die Ausgestaltung des Bahnhofes, die Gleisanzahl und die Länge der Gleise hängen von diesem Produkt ab. Die Leistungsfähigkeit bei der Zugzerlegung wird Bergleistung genannt. Sie hat einen starken Einfluss auf den Durchsatz.

3.1 Aufbau des Modells

3.1.1 Ziel des Modells

Die Durchlaufzeit in Verschiebebahnhöfen mit einem mittleren oder kleinen Transportaufkommen hängt in erster Linie von der Sammelzeit ab. Die Sammelzeit für einen Wagen beginnt, wenn dieser Wagen die Zielposition im Sammelgleis erreicht hat und endet, wenn alle Wagen, die in demselben Zug abfahren werden, in diesem Gleis angekommen sind.

Diese Sammelzeit ist ein Teil der gesamten Wartezeit der Wagen im Bahnhof und hängt vom Fahrplan ab. Da nachts mehr Güterzüge im Bahnhof ankommen, sind die Sammelzeiten kürzer als am Tag.

Um den Einfluss dieser Sammelzeit aufzulösen, hat sich die Fachliteratur für die sogenannte *minimum dwell time* interessiert. Diese Dwell Time kann in einem Gedankenexperiment berechnet werden. Die Sammelzeit wird auf ein Minimum gedrosselt. Die Züge fahren in Bahnhof ein, wenn der Verschub vom vorherigen Zug eben abgeschlossen wurde, damit das verantwortliche Team für die Zerlegung der Züge und den Verschub ohne Unterbrechung arbeiten kann. Die Minimum Dwell Time enthält die Dauer jedes Arbeitsschrittes von der Ankunft eines Wagens im Verschiebebahnhof bis zur Abfahrt und die minimale Sammelzeit. Mit automatisierten Vorgängen sollte sich die Durchlaufzeit dieser Dauer nähern.

The minimum time amount that a railcar consumes between its arrival in an inbound train and its departure in an outbound train is called minimum dwell time.

[Pollehn et al., 2021]

In der Fachliteratur werden die Ergebnisse der Simulationen mit dieser Minimum Dwell Time verglichen. In ähnlicher Weise wurde ein analytisches deterministisches Modell gebaut, um die Minimum Dwell Time für unterschiedliche Konfigurationen zu berechnen. Die sich daraus ergebende Durchlaufzeit wird mit jener der stochastischen Simulation verglichen.

Die Minimum Dwell Time gilt als Referenz für die Bewertung unterschiedlicher Szenarien in der Simulation. Diese Dauer ist die untere Grenze, der sich die tatsächlich im Bahnhof verbrachte Zeit annähern sollte. Durch Automatisierung und Digitalisierung der Arbeit im Verschiebebahnhof sollte sich die Aufenthaltsdauer eines Wagens an dieses Zeitmaß anpassen.

3.1.2 Konzeptioneller Aufbau

Das Modell wurde mit MATLAB aufgebaut. Es ist ein deterministisches analytisches Modell. Die Annahmen und Variablen wurden nach Jaehn et al. definiert [Jaehn et al., 2015].

Für jedes Experiment sind folgende Variablen zu definieren:

3 ERSTELLUNG EINES ERSTEN ANALYTISCHEN MODELLS

- Wagenanzahl in ankommenden Zügen
- Wagenanzahl in abfahrenden Zügen
- Anzahl von Zielen für den Wagen
- Arbeitszeiten für jeden Arbeitsschritt.

Die Merkmale, Länge und Gewicht, der Waggons sind identisch, nur ihre Zielbestimmungen unterscheiden sie voneinander. Deswegen wird die Länge der Züge mit der Anzahl der Wagen berechnet und deswegen wurde keine Beschränkung hinsichtlich der Tonnage eingeführt.

Die ankommenden Züge sind alle gleich ausgestaltet. Sie haben alle dieselbe Länge, und dieselbe Wagenreihenfolge. In jedem Zug befinden sich Wagen für alle geplanten Zielbestimmungen. Es wird davon ausgegangen, dass die Wagen schon sortiert sind. Das heißt die Wagen mit demselben Ziel sind im ankommenden Zug nebeneinander und bilden eine Wagengruppe, die auf einmal verschoben werden kann. Für die unterschiedlichen Wagengruppen wurde jeweils eine identische Länge vorausgesetzt. Dabei handelt sich um eine wesentliche Einschränkung, da die Anzahl der Wagen in den ankommenden Zügen nur ein Vielfaches der Anzahl an Richtungen sein kann. Die Anzahl der Wagen in abfahrenden Zügen ihrerseits ist unabhängig von den anderen Parametern.

Folgende Annahmen wurden getroffen: Ein neuer Zug fährt ein, wenn sich kein Wagen mehr im Einfahrbereich befindet. Das Problem der Ankunfts-Zuweisung wurde nicht berücksichtigt. Keine Einschränkungen wurden für die Ankunft und die Abfahrt der Züge betrachtet. Die Züge stören einander nicht. Alle Züge fahren auf einer Seite des Bahnhofes ein und fahren auf der anderen Seite ab.

Die Wahl des Zielgleises ist unwichtig, außer für die Länge der Verschubfahrt. Das Experiment verfolgt nicht das Ziel, die Anzahl der verwendeten Gleise zu minimieren, sondern nur die Durchlaufzeit der Wagen im Bahnhof auf ein Minimum zu reduzieren bzw. je nach Konfiguration zu berechnen. Die Anzahl an Gleisen wurde als höher als die Anzahl an Zielen der Wagen vorausgesetzt. Jeder abfahrende Zug wird auf einem neuen freien Gleis zusammengefügt. Die Zeit, um alle Wagen von einem ankommenden Zug auf ihre jeweilige Zielgleise mit der Verschublok zu verschieben, wurde mit der Gleichung 3.1.2 berechnet. Es wurde betrachtet, dass die Verschublok durchschnittlich zwischen der Mitte des Ankunftsgleises und der Mitte der Sortiergleise fährt. Die Länge der Gleise sind die des Frachtenbahnhofes Bruck an der Mur. Die maximale Geschwindigkeit v_{max} beträgt 10 km/h, die Beschleunigung $0,1 \text{ m/s}^2$ und die Bremsung $0,4 \text{ m/s}^2$.

$$t_{Verschub} = 2 * n_g * (t_{Beschleunigung} + L_{Fahrt} v_{max} + t_{Bremsung}) \quad (3.1)$$

Die Reihenfolge der Waggons in abfahrenden Zügen ist unwichtig. Die Wagen sind nicht im Voraus einem abfahrenden Zug zugeteilt, sondern werden für die jeweils gewünschte Richtung dem nächsten abfahrenden Zug zugeordnet. Die Wagen sind nach der Reihung in ankommenden Zügen nummeriert, um identifizierbar zu sein, denn die Durchlaufzeit wird für jeden Wagen berechnet. Die Sammelzeit ist für jede Wagengruppe unterschiedlich.

Die einzelnen Arbeitsschritte werden teilweise sequentiell realisiert und teilweise parallel. Für dieses Modell wurden zwei unabhängige Arbeitsteams vorausgesetzt. Das erste kümmert sich um die Vorbereitung für den Verschub und den Verschubvorgang selbst. Die benötigte Zeit um einen Zug zu behandeln ist in der Gleichung 3.1.2 gegeben. Das zweite Team ist für die Vorbereitung von abfahrenden Zügen zuständig. Die Dauer ihrer Arbeit für einen Zug ist in der Gleichung 3.1.2 zu lesen. Das heißt bestehende Züge werden noch zerlegt, während neue Züge gebildet werden.

$$t_{in} = t_{Anfahrt} + t_{EntkupplungZug} + n_g * t_{EntkupplungWagen} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} t_{out} = & t_{KupplungZug} + n_{out} * t_{KupplungWagen} \\ & + t_{WagenuntersuchungZug} + n_{out} * t_{WagenuntersuchungWagen} \\ & + t_{BremsstestZug} + n_{out} * t_{BremsstestWagen} \\ & + t_{Abfahrt} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Die Dauer jedes Arbeitsschrittes im Verschubprozess ist fix vorgegeben. Einige Schritte müssen pro Zug nur einmal erledigt werden andere sind für jeden Wagen zu wiederholen. Die dafür notwendige Arbeitsdauer kann unterschiedlich sein, je nach Länge der ankommenden und abfahrenden Züge.

3 ERSTELLUNG EINES ERSTEN ANALYTISCHEN MODELLS

Die einzelnen Arbeitsschritte des ganzen Prozesses und deren jeweilige Dauer sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Zeiten wurden von einer Einschätzung der Autoren, TU Dresden, im Fachbericht [Hecht et al., 2020] übernommen. Ein Projekt wurde gestartet, um diese Zeiten genauer zu messen und zu schätzen. Diese Messung ist notwendig als Vorbedingung für die Schätzung der Zeiteinsparung durch die Einführung der automatischen Kupplung und der automatischen Sortiervorgänge.

Tabelle 3.1: Dauer für die Durchführung jeder Etappe im Vershubprozess

Etappe	Dauer pro Zug (min)	Dauer pro Wagen (min)
Anfahrt	8	-
Enkupplung	9.05	0.55
Kupplung	11.52	0.4
Wagenuntersuchung	16.52	1.86
Bremstest	15.35	0.24
Abfahrt	5	-

Das Experiment endet, wenn alle angekommenen Wagen auf neue Züge verteilt wurden und diese Züge vom Bahnhof abgefahren sind. Dafür werden so viele Züge wie notwendig für jede Fahrtrichtung gebildet, also eine unterschiedliche Anzahl von Zügen pro Experiment. Zum Beispiel für ankommenden Züge, die 20 Wagen lang sind, abfahrenden Züge, die 5 Wagen lang sind und 5 unterschiedliche Ziele der Züge werden 300 Wagen für die Berechnung der mittlere Durchlaufzeit betrachtet. Sie sind in 15 ankommende Züge, 20 abfahrende Züge, sprich 4 abfahrende Züge pro Richtung geteilt.

$$n_{in} = 20, \quad n_{out} = 15, \quad n_g = 5$$

Die Anzahl von betrachteten Wagen für dieses Experiment ist das kleinste gemeinsame Vielfache (KGV) zwischen 20 und $5 * 15$.

$$n_w = KGV(20, 5 * 15) = 300 \text{ Wagen}$$

Die technischen Voraussetzungen werden in den folgenden Punkten zusammengefasst.

1. Die Zuweisung von Vershubgleisen kann willkürlich gewählt werden.
2. Es gibt keine Ungewissheit über die Ankunftszeit der Züge. Die Wagen, die verschoben werden sollen, stehen schon im Bahnhofbereich.

3. Es gibt genügend Gleise im Bahnhof, nämlich mehr als die Anzahl der Ziele der Wagen. Es gibt keine Beschränkung für die Länge der Gleise, sie sind lang genug, um einen ganzen Zug aufnehmen zu können.
4. Die Wagen sind nach ihrer ankommenden Reihe nummeriert.
5. Alle Wagen eines Zuges werden verschoben, bevor der nächste Zug für den Verschub vorbereitet wird.
6. Die Züge kommen von einer Seite des Bahnhofes an und fahren von den anderen Seite ab.
7. Die Wagen werden je nach Ziel sortiert, sie werden nicht zu einem abfahrenden Zug verbunden.
8. Die gesamte Kapazität aller abfahrenden Züge pro Ziel entspricht der Anzahl der ankommenden Wagen für diese Richtung.
9. Die Zeit für jeden Arbeitsschritt wurde klar definiert. Die Arbeitszeit ist entweder pro Zug oder pro Wagen definiert.
10. Die Wagen mit demselben Ziel sind im ankommenden Zug nebeneinander, sie bilden eine Wagengruppe und werden gemeinsam geschoben.

Die letzte Einschränkung wurde zu denen von Jaehn et al. hinzugefügt [Jaehn et al., 2015].

Die aus dem Experiment hervorgehenden Größen sind die Durchlaufzeit jedes Wagens und der Mittelwert dieser Durchlaufzeiten.

Grundsätzlich besteht die Durchlaufzeit der Wagen im Verschiebebahnhof aus drei Teilen: die Arbeitszeit, um einen Zug zu zerlegen, die Wagen zu schieben und einen neuen Zug zu bilden, die Sammelzeit und die Wartezeit.

3.2 Ergebnisanalyse

3.2.1 Minimale Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Waggons pro ankommendem Zug

Eine erste Analyse untersucht den Einfluss der Länge ankommender Züge auf die Verweilzeit der Wagen im Bahnhof. Die Anzahl von Zielen für die abfahrenden Züge ist die gleiche für alle Kurven. Jede Kurve bezieht sich auf eine unterschiedliche Anzahl der Wagen in abfahrenden Zügen. In Abbildung 3.1 kann man beobachten, dass die Durchlaufzeit im Bahnhof bei jeweils hoher Anzahl der Wagen in ankommenden Zügen sehr rasch sinkt.

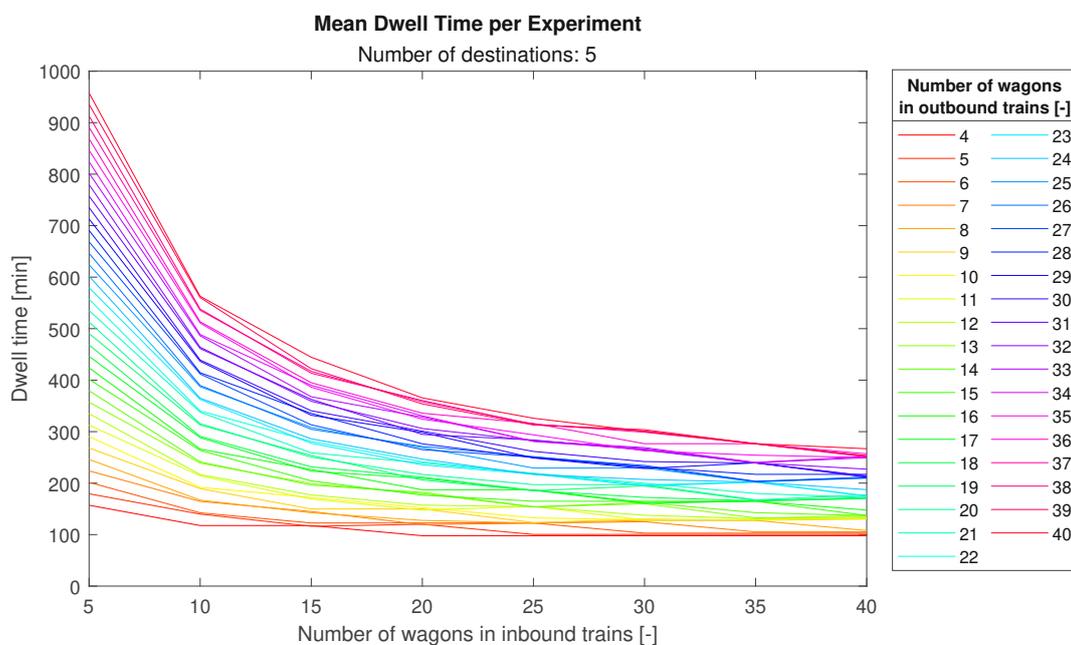


Abbildung 3.1: Durchlaufzeit der Wagen bei unterschiedlichen Szenarien mit 5 unterschiedlichen Zielrichtungen der Wagen

Im Fall von 40 Wagen in abfahrenden Zügen und 5 Wagen in ankommenden Zügen beträgt die maximale Durchlaufzeit in allen Experimenten 15 h 58 min.

Die minimale Durchlaufzeit von allen Kurven ist 1 h 38 min. Diese ergibt sich im Fall von 4 Wagen in abfahrenden Zügen, 5 Richtungen und ab 20 Wagen in ankommenden Zügen. Für diese Experimente ist die untere Grenze der Durchlaufzeit erreicht. Wenn die

Wagenanzahl pro abfahrendem Zug niedriger als die Anzahl von Wagen für eine Richtung im ankommenden Zug ist, wird die Sammelzeit auf Null reduziert und dadurch die minimale Verweilzeit der Wagen erreicht.

Für 40 Wagen in den ankommenden Zügen beträgt die durchschnittliche Durchlaufzeit 3 h 2 min. Die durchschnittliche minimale Durchlaufzeit für ankommende Züge mit 25 Wagen beträgt 3 h 34 min. Dieses Ergebnis kann durch die überwiegend gleichbleibende Arbeitszeit für die Vorbereitung des Verschubs pro Zug im Vergleich zur Arbeitszeit pro Wagen erklärt werden.

Die Erhöhung der Anzahl der Wagen in den ankommenden Zügen könnte die Durchlaufzeit reduzieren. Man muss im Hinterkopf behalten, dass dieses Experiment ausschließlich die Abhängigkeit von den unterschiedlichen Parametern zeigt. In Österreich haben die meisten Direktzüge zwischen 15 und 35 Wagen. Eine Erhöhung der Wagenanzahl pro Zug ist für Direktzüge denkbar, hätte aber eine längere Sammelzeit zur Folge. Gegenwärtig ist die Varianz der Länge der Züge sehr hoch. Dieses Experiment spiegelt somit nicht die tatsächliche Situation wieder.

3.2.2 Minimale Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Waggons pro abfahrenden Zug

In Abbildung 3.2 ist die Durchlaufzeit der Wagen abhängig von der Länge der abfahrenden Züge dargestellt. Je länger der abfahrende Zug ist, desto länger die Sammelzeit und desto länger die Zeit für die Zugbildung.

Der Idealfall ist also ein Bahnhof, an dem die ankommenden Züge sehr lang sind und die abfahrenden Züge sehr kurz. Wenn man aber auf der Netzebene denkt, sind die kürzeren Züge nur für die Lieferung der Wagen zu den Endkunden interessant, aber nicht für die Züge, die zwischen den Verschiebebahnhöfen verkehren. Je kürzer die Züge, desto regelmäßiger müssen sie fahren, um dieselbe Menge wie die längeren liefern zu können. Die Netzkapazität ist begrenzt, die Kosten so wie der Energieverbrauch pro Zugfahrt hängen nur im geringen Maß von der Anzahl der transportierten Wagen ab.

3 ERSTELLUNG EINES ERSTEN ANALYTISCHEN MODELLS

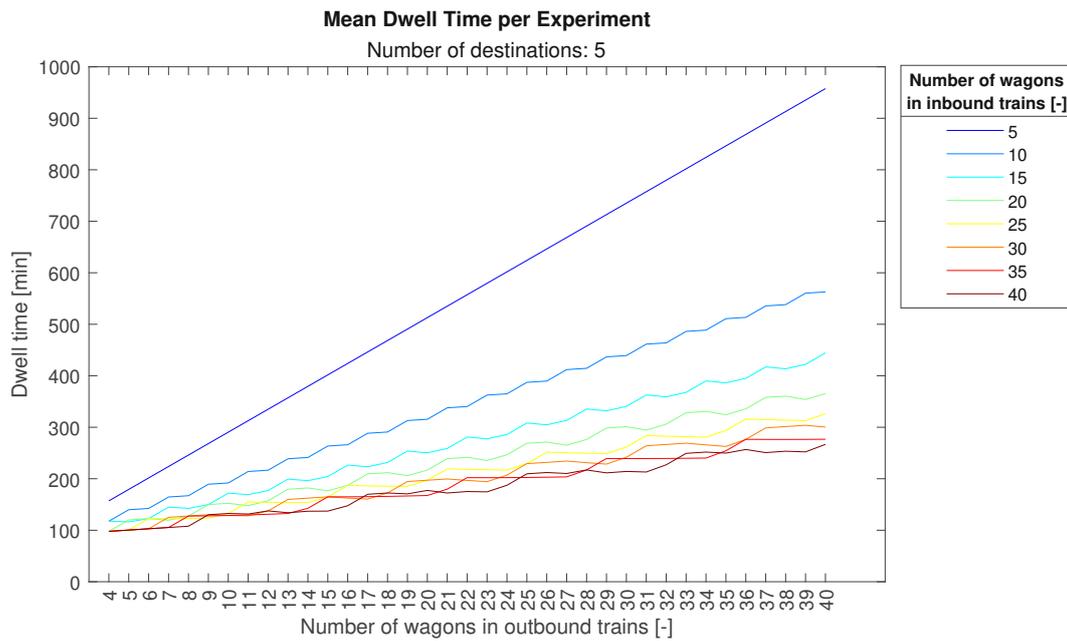


Abbildung 3.2: Durchlaufzeit der Wagen bei unterschiedliche Szenarien mit 5 unterschiedlichen Zielrichtungen der Wagen

3.2.3 Minimale Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Richtungen

In dieser Untersuchung variiert die Anzahl von Richtungen für die abfahrenden Züge zwischen 2 und 5. Denn in Bruck an der Mur sind die Bahnhöfe, von Nahzügen Wagen liefern, auf fünf unterschiedlichen Strecken verteilt. Wenn das Verfahren *sort by train* verwendet wird, dann bestehen die ankommenden Züge tatsächlich aus maximal fünf Wagengruppen. Es ist aber anzunehmen, dass in Vershubknoten wie Bruck an der Mur eine Mischung zwischen *sort by train* und *sort by block* stattfindet. Tatsächlich gibt es in Bruck an der Mur mehr als fünfzehn Ziele (Tabelle 2.2), aber die Wahrscheinlichkeit, dass sich Wagen für alle diesen Ziele in einem einzigen ankommenden Zug befinden, ist gering.

Es ist bemerkenswert, dass die Anzahl der Wagen in ankommenden Zügen ab einer bestimmten Zahl keinen Einfluss mehr auf die Durchlaufzeit hat. Die Durchlaufzeit konvergiert nach 180 min, wenn die Länge der ankommenden Züge nach Unendlich strebt. Je höher die Anzahl der Zielrichtungen, desto langsamer konvergiert die Durchlaufzeit der Wagen. Zur Unterstützung von Abbildung 3.3 kann behauptet werden, dass wenn die

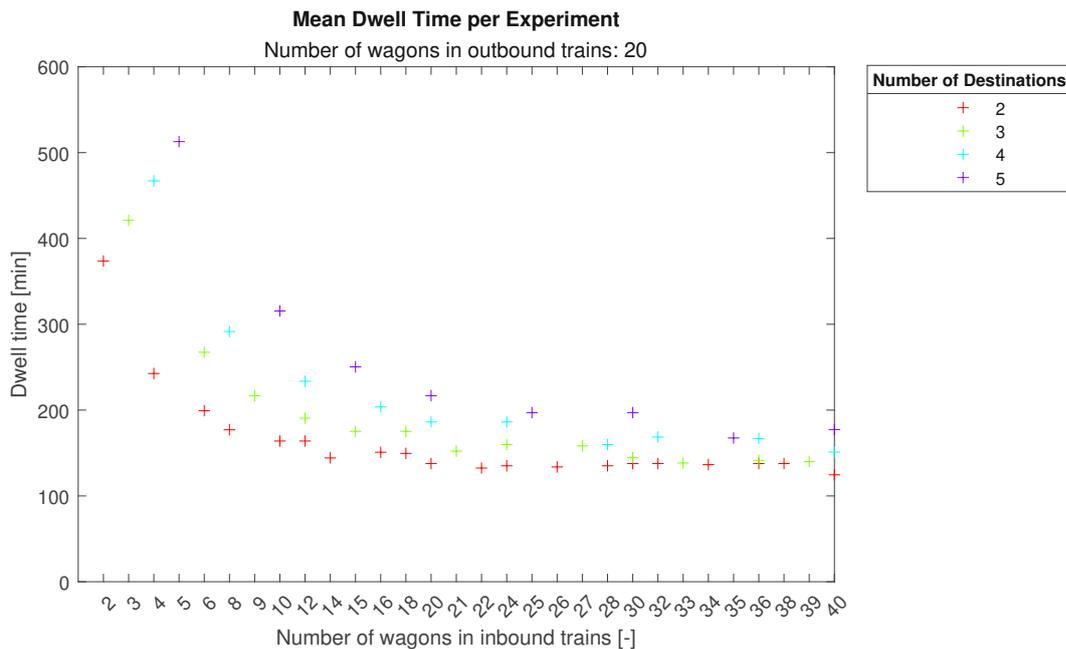


Abbildung 3.3: Durchlaufzeit der Wagen bei einer fixen Anzahl von Wagen in abfahrenden Zügen

Anzahl der Wagen in ankommenden Zügen fünf Mal größer als die Anzahl der Ziele ist, hängt die Durchlaufzeit nicht mehr von der Anzahl von Wagen in ankommenden Zügen ab.

Ein anderes interessantes Phänomen ist, dass je höher die Anzahl der Wagen in ankommenden Zügen ist, desto niedriger ist der Unterschied in der Durchlaufzeit mit unterschiedlicher Anzahl von Zielen. Der Grenzwert der Durchlaufzeit scheint, unabhängig von der Anzahl von Zielen zu sein. Das spricht für die Erhöhung der Länge der ankommenden Züge.

Die Länge der Züge ist vor allem von den Infrastrukturen abhängig. Die Direktzüge, die zwischen den großen Verschiebebahnhöfen verkehren, können lang sein, wenn die Gleise in den Bahnhöfen, an denen sie sich aufhalten, lang genug sind. Die Anschlussgleise der Kunden sind meistens viel kürzer, sie können oft nur weniger als zehn Wagen aufnehmen. Diese Einschränkung soll in den Verschiebebahnhöfen berücksichtigt werden.

Typischerweise bestehen ankommende Züge in einem Verschiebebahnhof aus 24 Wagen und abfahrende Züge aus 20 Wagen. Diese typische Situation wurde der Berechnung der minimum dwell time zugrundegelegt. Drei unterschiedliche Ziele wurden betrachtet. Die

3 ERSTELLUNG EINES ERSTEN ANALYTISCHEN MODELLS

durchschnittliche Durchlaufzeit, die mit diesem Modell berechnet wurde beträgt 160 min. Der Unterschied zwischen den Durchlaufzeiten ist gering, der schnellstbehandelte Wagen hat eine Verweilzeit von 129 min und der langsamste Wagen 190 min.

Diese Analyse dient als Grundlage, um eine Simulation zu erstellen, die im nächsten Kapitel präsentiert wird.

4 Simulationsmodell

Der Schwerpunkt des praktischen Teils der Diplomarbeit ist der Aufbau einer Simulation eines vereinfachten Verschiebebahnhofs, wo der Vershub nur in der Fläche stattfindet, in Anlehnung an den Frachtenbahnhof Bruck an der Mur. Wir müssen ein umfassendes Verständnis für den Betrieb des gesamten Verschiebebahnhofs entwickeln, um den Einfluss von neuen Prozessen, Optimierungen und Echtzeit-Netzkommunikation bewerten zu können.

Das Simulationsmodell erlaubt es, Experimente durchzuführen, die in einem Bahnhof schwierig umsetzbar wären. Die Inputdaten sind mit einem Computermodell erzeugt, sie sollen die realen Daten abbilden. Sie sind für die Simulation angepasst, je nachdem, welcher Aspekt des Vershubprozesses untersucht wird. Diese Datenmodelle wurden mithilfe realer Daten erstellt. Die Simulation wurde mit Simio, einer Logistiksimulation-Software, erstellt.

Der erste Teil bezieht sich auf die erste Forschungsfrage, bzw. das Umsetzen der vorhandenen Prozessen in computergesteuerte Verfahren. Der Aufbau der Simulation und die Parameter und Inputsdaten, die eingestellt werden müssen, um den Bahnhof gut abbilden zu können, werden erklärt. Im zweiten Teil, der sich vor allem auf die zweite Forschungsfrage bezüglich die Erhöhung der Leistung bezieht, wird die Analyse der Simulationsergebnisse vorgestellt.

4.1 Aufbau des stochastischen Modells

Die Güterzüge verkehren nach einem Fahrplan. Das heißt ihre Ankunft im Verschiebebahnhof sowie ihre Abfahrt wurden vorher festgelegt. Viele Bestellungen von regelmäßigen Zügen sind pro Woche gebucht. Es gibt wenige Unterschiede zwischen den Ankünften und

den Abfahrten von einer Woche zur nächsten. Die Fachliteratur wendet für diese Fragestellung nur stochastische Modelle an. Stochastische Modelle erlauben Abweichungen vom Fahrplan. Die Arbeitszeit für die Prozesse am Bahnhof sind sehr variabel. Die Störungen in den alten Infrastrukturen werden dadurch modelliert, auch Unfälle können so erfasst werden. Marinov et al. haben sich mit der Simulation von einem flachen Verschiebebahnhof ohne Abrollberg befasst [Marinov and Viegas, 2009]. Die Struktur der hier dargestellten Simulation orientiert sich an diesem Artikel.

4.1.1 Simio Software

Simio ist eine vollständige objektorientierte Simulations- und Planungssoftware. Simio ist das Akronym von SIMulation Modeling framework based on Intelligent Objects. Simio ist besonders für das Erstellen von Materialflusssystemen geeignet. Sie wird besonders in der Industrie verwendet, findet aber auch für Bildungszwecke Anwendung und bietet eine University Edition, die hier verwendet wurde. Simio zielt unter anderem darauf ab, die optimale Lösung für komplexe Probleme zu finden.

Die Einsatzbereiche von Simio Software sind:

- Gesundheitswesen
- Fertigung
- Bergbau
- Häfen und Schifffahrt
- Supply Chain
- Transportwesen.

Ein Vorteil dieser Simulationssoftware ist, dass Prozesse sehr einfach implementiert werden können. Die Benutzeroberfläche ist wie die von Microsoft Office organisiert, um intuitiv bedienbar zu sein (Abbildung 4.1). Die Prozesse werden mit Blockdiagrammen dargestellt, sodass Simio ohne Programmieren verwendet werden kann.

Ereignisdiskrete sowie kontinuierliche Simulationen können mit Simio implementiert werden. Die Bewegungen der Einheiten sind in einem visuellen Animationsmodell zu beobachten. Simio bietet eine 3D-Ansicht, was ein realitätsnahes Eintauchen ins System

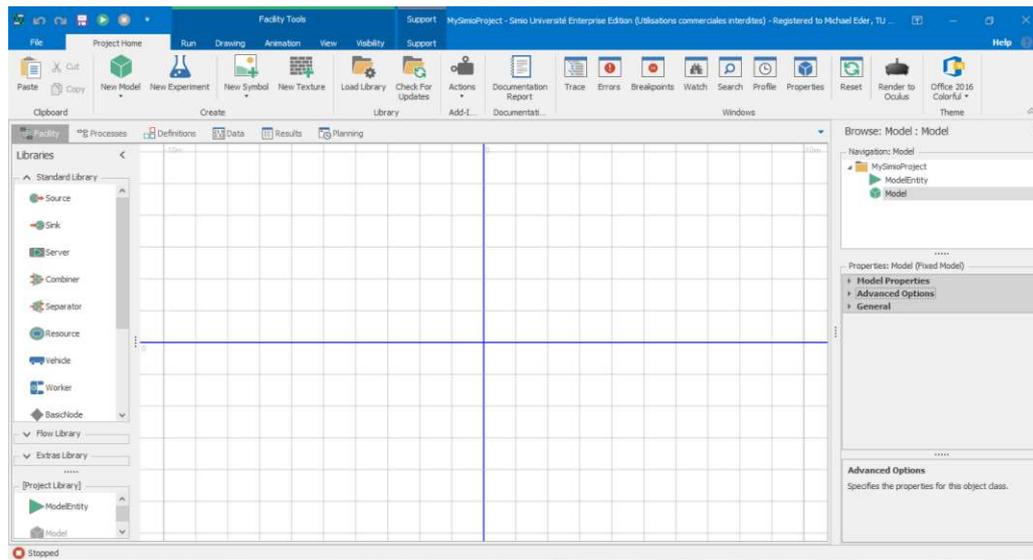


Abbildung 4.1: Simio Benutzeroberfläche

ermöglicht. Die Software umfasst alle notwendigen Aspekte, die betrachtet werden sollten, um eine vollständige Analyse des Prozesses durchführen zu können. Der Lagerbestand und die Kostenrechnungen können integriert werden.

Simio verfügt weiters über zwei Möglichkeiten Simulationen durchzuführen. Die erste Möglichkeit ist eine Simulation zu starten. Die zweite Möglichkeit ist, Experimente zu starten. Im Experiment können mehrere Simulationen gleichzeitig ohne Animation und mit unterschiedlichen Inputs laufen. Die gewählten Ausgangsgrößen werden berechnet und der Mittelwert davon angezeigt. Ein Set von Inputs bildet ein Szenario. Jedes Szenario kann mehrmals wiederholt werden, um Statistiken zu erstellen.

Eine Simulation besteht aus drei Basisblöcken: die Quelle (*Source*), die Senke (*Sink*) und die Vorgänge (*Server*). In den Blöcken können Prozesse bei jedem Schritt implementiert werden, z.B. vor dem Einstieg der Entitäten im Puffer, oder nach dem Verfahrensschritt. Simio ist gut modulierbar. Die Entitäten sind die kleinsten Einheiten, die sich zwischen den Stationen bewegen, sie werden *Model Entity* genannt. Sie haben *States*, die jederzeit geändert werden können und *Properties* (Eigenschaften), die in der Initialisierungsphase zugewiesen werden.

In der Simulation werden zu den Arbeitsstationen (Quelle, Senke, Vorgänge...) auch Ressourcen für die Prozesse in den Blöcken oder für die Wege (Mitarbeiter, Fahrzeuge...) und Verbindungen zwischen den Blöcken (Pfad, Fließband...) bereitgestellt. Die Entitäten

bewegen sich zwischen diesen Elementen. Die Entitäten sind vorprogrammiert, immer zum nächstliegenden Block zu gehen. Die Pfade drosseln die Bewegungen der Entitäten im Raum, um eine spezifische Auftragsfolge einzurichten.

Jede Arbeitsstation verfügt über einen Eingangspuffer, wo die Entitäten gegebenenfalls warten, bevor sie behandelt werden können und über einen Ausgangspuffer, wo die fertigen Entitäten warten, wenn sie nicht direkt zum nächsten Auftrag gehen können. Wenn diese Puffer voll sind, können die Entitäten zerstört werden, oder zu einer anderen Arbeitsstation umgeleitet werden.

4.1.2 Variablen und Ausgangsgrößen

Der Verschiebebahnhof wurde folgendermaßen in der Simulation implementiert: Der Plan der Schienen ist fix eingestellt und ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Der Bahnhof ist in eine Einfahrgruppe und eine Richtungsgruppe geteilt. Da es keine Ausfahrgruppe gibt, werden die Züge direkt auf den Verschiebgleisen vorbereitet. Jedes Gleis wird durch eine Arbeitsstation veranschaulicht.

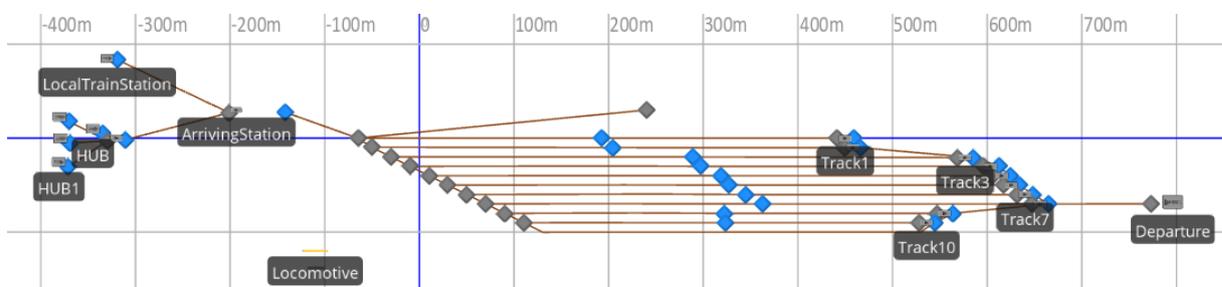


Abbildung 4.2: Mit Simio gebautes Modell

Die Länge der ankommenden Züge ist nicht fix eingestellt, sondern mit einer Normalverteilung geregelt. In Verschiebebahnhof München, großer HUB mit Abrollberg, sind die Züge länger als in Bruck an der Mur. Eine Normalverteilung mit einem Erwartungswert von 30 und einer Standardabweichung von 5 wurde von Jaehn et al. für diesen Bahnhof implementiert [Jaehn et al., 2015]. Der simulierte Bahnhof ist ein vereinfachter Bahnhof, mit weniger Gleisen als in der Realität. Die Anzahl der Wagen in den Zügen ist darauf angepasst.

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung mit der Erwartungswert μ und der Varianz σ^2 ist mit der folgenden Gleichung definiert:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Die Wagen haben alle die gleichen Eigenschaften, so wie im deterministischen Modell, das gilt auch für ihre Länge. Die durchschnittliche Länge der Wagen in der Simulationssoftware Villon wurde als Standardwert genommen. Diese Software wurde im Rahmen des europäischen Projektes OptiYard entwickelt. Ziel davon war ein Entscheidungshilfesystem für das Management von Verschiebebahnhöfen zu entwickeln. Die Längen der betrachteten Waggon messen zwischen 12.6 m und 34 m. Für die Simulation wurde eine durchschnittliche Länge von 20 m gewählt. Das Gewicht der Wagen sollte für eine Automatisierung des Vorganges betrachtet werden, wurde aber in dieser Simulation nicht betrachtet. Tatsächlich müssen die Züge eine maximale Tonnage berücksichtigen. Diese Vereinfachung wurde gewählt, damit die Züge lediglich die Anzahl an Wagen als Parameter haben.

Wie im Artikel [Marinov and Viegas, 2009] wurde eine Dreieck-Verteilung für die benötigte Zeit für jeden der Arbeitsschritte implementiert. Der Wert mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ist der in der Tabelle 3.1 eingetragene, sprich die Dauer, die im deterministischen Modell implementiert wurde. Der kleinste und der maximale mögliche Wert für die Verteilung sind

$$0.5 * \text{Mittelwert} \text{ und } 2 * \text{Mittelwert}.$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Dreiecksverteilung ist so definiert:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x < c \\ \frac{2}{b-a} & x = c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & c < x \leq b \end{cases}$$

Die Erwartungswert und die Varianz davon sind mit folgenden Gleichungen definiert:

$$E = \frac{a + b + c}{3}$$

$$V = \frac{(a - b)^2 + (b - c)^2 + (a - c)^2}{36}$$

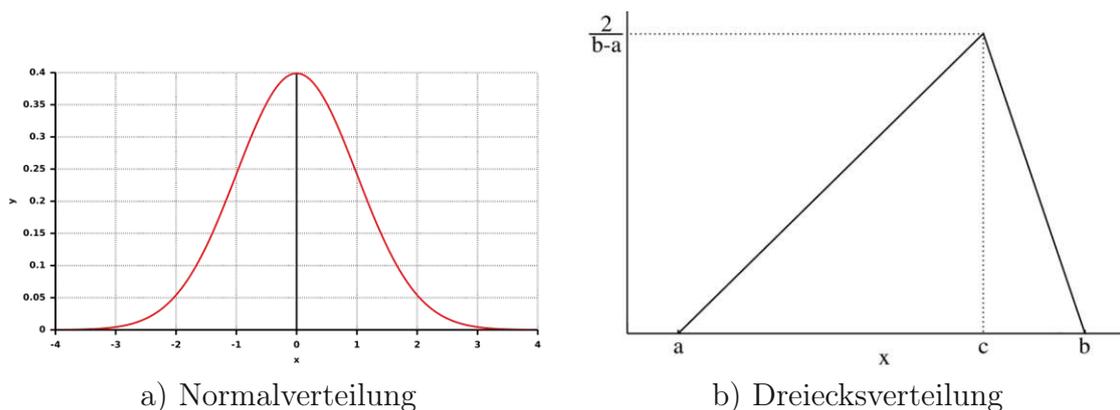


Abbildung 4.3: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Verteilungen

Um einen Bahnhof möglichst wirklichkeitsnahe zu simulieren und unterschiedliche Szenarien auszuprobieren, wurden die folgenden Variablen implementiert:

- mittlere Zwischenankunftszeit der Züge;
- Verteilung der Wagen pro Richtung, in Prozentsätzen angegeben. Es gibt zwischen ein und vier unterschiedliche Wagenziele.
- Anzahl von Gleisen, die verwendet werden dürfen;
- die mittlere Länge und Standardabweichung von ankommenden Direktzügen
- die mittlere Länge und Standardabweichung von ankommenden Nahtzügen
- die mittlere Länge und Standardabweichung von abfahrenden Direktzügen
- die mittlere Länge und Standardabweichung von abfahrenden Nahzügen.

Die Ausgangsgrößen können in drei Kategorien unterschieden werden: Die Erste bezieht sich auf die Leistung des Bahnhofs: den Durchsatz, die durchschnittliche Durchlaufzeit und den Füllungsgrad. Die Analyse dieser Größen erlaubt es die Engpässe und die Optimierungsmöglichkeiten zu erkennen und hervorzuheben. Die zweite Kategorie umfasst die Variablen zur Prüfung der Eingangsparameter. Die dritte Kategorie betrifft die Analyse der simulierten ankommenden und abfahrenden Züge.

4.1.3 Implementierter Prozess

Der simulierte Ablauf bildet die bei ÖBB Infrastruktur gegebenen Prozesse nach, die im Anhang A gesammelt sind.

Die Waggons bewegen sich zwischen Stationen, wo sie bearbeitet werden. Je nach Arbeitsschritt rollen die Wagen alleine, innerhalb einer Gruppe oder werden von einer Verschublok geschoben. Die Mitarbeiter wurden nicht berücksichtigt. Die einzige implementierte Ressource in der Simulation ist das Verschub-Triebfahrzeug.

Alle Puffer in der Simulation haben eine Kapazität von null Einheiten, denn die Wagen warten in den Gleisen und werden auch dort behandelt. Es gibt also keinen Pufferbereich im Bahnhof. Das Gleis wird zuerst als Puffer und dann als Arbeitsstation verwendet. Jeder Block in der Simulation, wo die Wagen bearbeitet werden, hat eine beschränkte Kapazität (Anzahl von Wagen die gleichzeitig behandelt werden können). Wenn die Wagen vor einem Block ankommen dürfen sie ohne Wartezeit im Block „eintreten“, also direkt behandelt werden, solange der Block noch freie Kapazität hat. Wenn der Block voll ist, werden die Wagen zu einem anderen Block umgeleitet. Dies entspricht den Fahrt von einem Gleis zu anderem im Sammelbereich. Wenn kein Platz mehr im ganzen Sammelbereich vorhanden ist, warten die Wagen in der Ankunftsstation. Die Zugankunftsrate ist limitiert, damit der Bahnhof nie überlastet wird.

Die kleinste Einheit in der Simulation ist der Wagen. Die Wagen fahren in Zügen in den Bahnhof ein. Ein Zug ist durch ein Los abgebildet. Die ankommenden Züge bestehen aus Wagen, die unterschiedliche Zielen haben. Im Ankunftsbereich werden also die Loszüge zerlegt, um die Wagengruppen zu bilden. Alle Wagen von einem Zug mit demselben Ziel bilden eine Wagengruppe, die auch als Los in Simio abgebildet wurde. Innerhalb des Bahnhofes bewegen sich die Wagen mit ihrer Wagengruppe. Am Ende des Prozesses werden die Wagen von ihrer Wagengruppen befreit, um die abfahrenden Züge zu bilden. Der abfahrende Zug ist mit einem anderen Los abgebildet.

Zugankunft

Die Quellen erzeugen Waggons. Es gibt nur einen Typ von Waggons, sie haben also alle dieselben Eigenschaften. Bei den jeweiligen Wagen ist nur die Zielrichtung unterschiedlich, die in den Parametern der Entitäten eingegeben wird. Dieses Ziel wird dem Wagen

4 SIMULATIONSMODELL

nach dem Zufallsprinzip gegeben. Die Verteilung aber erfolgt gemäß der vorgegebenen Prozentsätze. Die Wagen haben unterschiedliche Farben je nach Richtung, damit das Animationsmodell deutlicher ist (Abbildung 4.4).

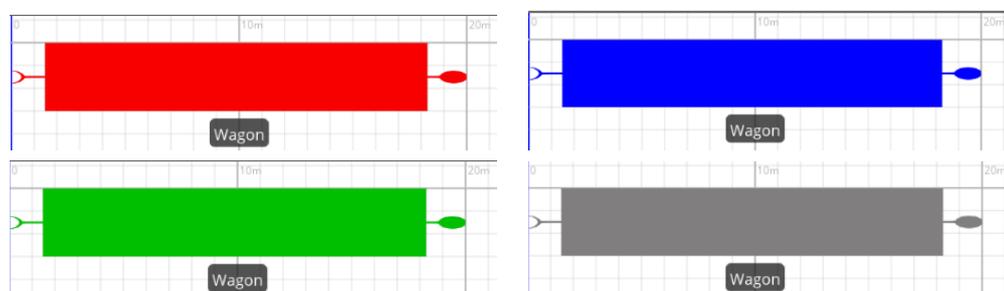


Abbildung 4.4: Abbildung der Wagen in Simio je nach Richtung

Die Direktzüge und die Nahzüge werden bei der Zugankunft unterschieden. Die Nahzüge, die im Verschiebebahnhof ankommen, werden aus Wagen, die in einem Direktzug zu einem Verschiebebahnhof geschickt werden sollen, gebildet. Die Wagen, die im Bahnhof in Direktzügen ankommen, sollen zu einem Vershubstandort oder in einem Nahzug direkt zu Kunden in der Nähe geschickt werden. Anders gesagt wurden die folgende Annahmen getroffen:

- Die in Nahzügen angekommenen Wagen fahren vom Bahnhof in Direktzügen ab.
- Die Wagen, die innerhalb eines Direktzuges angekommen sind, sollen in einem Nahzug vom Bahnhof abfahren.

Das Modell hat also zwei Quellen: eine für die Wagen von Nahzügen (*Local Train Station* in Abbildung 4.2) und eine für die Wagen von Direktzügen (HUB genannt in Abbildung 4.2).

Die Anzahl von Wagen pro Zug ist durch die Normalverteilung geregelt. Die Parameter dieser Verteilung sind in den Variablen eingegeben. Nachdem der ankommende Zug gebildet wurde, werden die Wagen innerhalb des Zuges in Wagengruppen organisiert, das heißt, die Wagen mit demselben Ziel stehen nebeneinander.

Die Zeitspanne zwischen zwei Zugankünften ist durch eine Exponentialverteilung bestimmt, deren Erwartungswert in den Parametern eingetragen wurde. Um eine Überlastung des Bahnhofes zu vermeiden, dürfen sich nur zwei Züge gleichzeitig in der Einfahrgruppe befinden. Sobald dieser Grenzwert erreicht ist, stoppen die Quellen die Erzeugung

von Wagen. Diese Einschränkung von Zugankünften kann zu einer Abweichung zwischen der gewünschten Zwischenankunftszeit der Züge und der tatsächlichen, beobachteten Zwischenankunftszeit führen.

In der *Arriving Station* werden die Güterzüge für den Verschub vorbereitet. Da die Verschubmitarbeiter nicht betrachtet wurden, werden die Züge direkt nach ihrer Ankunft behandelt bzw. zerlegt. Die gesamte Dauer aller Vorbereitungsprozesse wurde summiert und als Parameter in einer Dreieck-Verteilung angegeben. Wenn die Vorbereitungsarbeit fertig ist, wird ein Signal zur Verschublok gesendet. Die Wagengruppen warten im Ausgangspuffer der Ankunftsstation darauf, dass sie von einer Verschublok abgeholt werden.

Verschub

Alle Wagen einer Wagengruppe werden auf einmal verschoben. Sie werden in der Reihenfolge abgeholt, in der sie im angekommenen Zug waren. Eine Mischung von Abstoßverfahren und Umsetzverfahren wurde implementiert, damit die sich ergebenden Verschubzeiten möglichst realistisch ausfallen. Die Lok fährt mit der Wagengruppe bis zur ersten Weiche, wie es im Abstoßverfahren geschieht. Die eingestellte Geschwindigkeit der Lok beträgt 10 km/h. Erst nachdem die Wagen am Ziel angekommen sind, fährt die Lok zum nächsten Auftrag. Die maximale Geschwindigkeit auf den Verschubgleisen beträgt 3 km/h.

Ein Gleis der Richtungsgruppe wird einer Wagengruppe nach den folgenden Regeln zugeteilt:

- *Erster Fall:* Die betrachtete Wagengruppe ist die erste für dieses Ziel. Eine Gleisliste mit den leeren Gleisen wird abgerufen. Von allen möglichen Gleisen wird das Allernächste gewählt. In einem Gleis sind Wagen für eine Richtung. In dieser Simulation wurden Mixgleise nicht betrachtet.
- *Zweiter Fall:* Im Bahnhof stehen schon Wagen für dasselbe Ziel. Der Algorithmus sucht das Gleis oder die Gleise, wo sich Wagen für dieselbe Richtung befinden. Die Gleise, die keinen verfügbaren Platz mehr haben, werden aus der Liste der verfügbaren Gleise genommen. Eines der möglichen Gleise wird gewählt und die Wagengruppe rollt bis zu diesem Gleis. Falls dieses Gleis nicht genug Platz für die ganze Wagengruppe hat, werden die überzähligen Wagen zu einem anderen Gleis gefahren. Dieses Gleis wird gemäß den Regeln von Fall 1 bestimmt.

Die Wagen rollen immer bis zum Mittelpunkt des Vershubgleises. Es ist davon auszugehen, dass die Vershubwege durchschnittlich so lang wie die halben Vershubgleise sind.

Wenn die Vershublok keinen Auftrag hat, fährt sie zu einer Warteposition. Jedes Mal, wenn sie zu dieser Position kommt, wird die Zeit verzeichnet, damit die echte Nutzungsdauer der Lok berechnet werden kann.

Zugbildung

Die neuen Züge werden direkt in der Richtungsgruppe bzw. in den Bedienstationen, gebildet. In dieser Station sollen die Wagengruppen auseinandergenommen und die Wagen zu Zügen zusammengefasst werden. Die Länge der abfahrenden Züge wird durch eine Normalverteilung ermittelt. Der Mittelwert und die Standardabweichung sind als Simulationsparameter einzugeben.

Wenn alle Wagen, die zum nächsten abfahrenden Zug gehören, im Vershubgleis gesammelt wurden, beginnt die Arbeit, um den neuen Zug zu bilden. Der für die Zugbildung notwendige Zeitaufwand wird auch durch eine Dreieck-Verteilung bestimmt. Er hängt von der Länge des Zuges ab, wird also für jeden Zug berechnet.

In den Verschiebebahnhöfen sind einige Züge vor ihrer Abfahrtszeit schon bereit. Je nach Situation können sie vorzeitig abfahren oder müssen bis zur geplanten Uhrzeit warten. Andererseits fahren einige Güterzüge mit Verspätung ab. Diese Ungewissheit, die von externen Parametern wie der Verfügbarkeit einer Zuglokomotive oder der Besetzung der Schienen usw. abhängt, wurde durch eine Variable für die notwendige Zeit abgebildet. Sie folgt einer Exponentialverteilung mit einem Erwartungswert von 20 Minuten.

Alle Züge fahren zu derselben Senke, *Departure* in Abbildung 4.2. Es wird davon ausgegangen, dass die Wagen ab diesem Moment den Bahnhof verlassen haben.

4.2 Ergebnisse der Simulation

Der modellierte Bahnhof erlaubt es, die Kapazität eines Verschiebebahnhofs zu prüfen. Die Key Performance Indicators (KPI) wurden nach einem Bericht über ein Projekt der Europäischen Union namens Intermodel gewählt [Martín et al., 2017]. Diese wurden in die Simulation implementiert und ihre Abhängigkeit von den Inputparametern wurde untersucht. Die folgenden KPIs wurden angewandt:

1. **Der Terminalumschlag:** Der Terminalumschlag misst die Aktivität des Bahnhofes an den Zahlen der ankommenden Wagen, der abgefertigten Wagen und der abfahrenden Wagen.
2. **Verwendung der Verschublok:** Die Nutzung der Lok ist als der Anteil der Zeit, in der sie effektiv Wagen schiebt, definiert, bzw. als Zeit, während der sie nicht in ihrer Warteposition steht, im Verhältnis zur gesamten Dauer der Simulation. Besonders interessant ist dieser KPI, wenn eine Ausfallquote für die Geräte eingefügt wird.
3. **Die Lagerplatzauslastung** ist der Anteil von verwendeten Lagerplätzen im Vergleich zur Gesamtzahl der verfügbaren Stellplätze im Bahnhof.
4. **Die Gleisauslastung:** Dieses Maß bezieht sich auf die Zeit, während derer das Gleis belegt ist, im Verhältnis zur Gesamtdauer der Simulation.
5. **Die Wartezeit der Wagen:** Sie ist unproduktive Zeit, die in den Puffern verbracht wurde. Sie spiegelt den Grad der Überlastung des Bahnhofes wider. Das Ziel aller Terminals ist, die Wartezeiten zu reduzieren.
6. **Die Verschubzeit** ist die notwendige Zeit, um alle Wagen von einem Zug zu den Gleisen der Richtungsgruppe zu bringen.
7. **Die Leerlaufzeit** ist die unproduktive Zeit, in der die Lok einsatzbereit am Standort verbleibt, aber nicht verwendet wird.
8. **Die Durchlaufzeit** ist die gesamte Dauer zwischen der Ankunft der Waggons am Bahnhof und ihrer Abfahrt.

4.2.1 Änderung der Größen über der Zeit

Der Startpunkt der Simulation ist ein leerer Verschiebebahnhof. Diese Situation kommt nur ein einziges Mal in der Laufzeit des Bahnhofes vor, nämlich nachdem der Bahnhof eröffnet wurde. Diese Situation interessiert uns nicht, sondern vielmehr der stationäre Zustand des Bahnhofes. Es empfiehlt sich also die Zeit zu berechnen, die benötigt wird um

den stationären Zustand zu erreichen. Diese Periode wird Aufwärmzeit genannt. In Simio kann diese Zeit (*warm-up period*) eingestellt werden. Die Ausgangsgrößen, die während dieses Zeitraumes berechnet werden, werden in den Statistiken nicht berücksichtigt, damit die Ergebnisse der Simulation dem gewünschten Experiment entsprechen.

Durchlaufzeit

Die erste untersuchte Variable ist die Durchlaufzeit. Die Lieferzeiten im Einzelwagenverkehr sind relativ lang und die Ungewissheit über die Ankunftszeit der Wagen im Endziel ist hoch, was an einer Reihe von Unbekannten bei den Arbeitsschritten in Verschiebebahnhöfen liegt. Die Untersuchung dieser Zeit ist also von höchster Wichtigkeit.

In Abbildung 4.5 ist die Durchlaufzeit der Wagen ab dem Moment, in dem sie den Bahnhof verlassen, dargestellt. Da die Durchlaufzeit sehr variabel ist, wurde das gleitende Mittel über 50 Werte berechnet. Die Ergebnisse von zehn Wiederholungen werden angezeigt. Ein leichter Anstieg der mittleren Durchlaufzeit am Anfang der Simulation ist feststellbar. Anhand dieser Grafik kann man davon ausgehen, dass der stationäre Zustand ab dem zweiten Tag der Simulation erreicht ist.

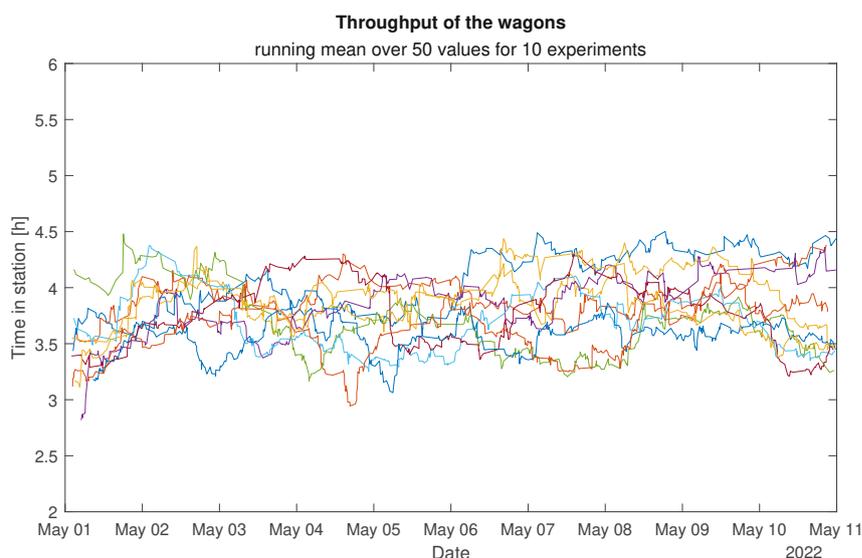


Abbildung 4.5: Durchlaufzeit der Wagen in Abhängigkeit von der Zeit

Füllungsgrad

Der Füllungsgrad ist direkt mit der Stellfläche verbunden. Die Anzahl von Lagerplätzen ergibt sich aus der Länge der Verschiebgleise. Sie sind in der Tabelle 4.1 zu finden. Die Verschiebgleise werden sowohl als Lagerplatz als auch als Arbeitsplatz für die Vorbereitung der neuen Züge verwendet. Die Kapazität des Bahnhofes umfasst 271 Wagen. Dazu kommen die Gleise von der Einfahrgruppe. Es wurde die Annahme getroffen, dass zwei Züge gleichzeitig dort sein können, das entspricht 60 zusätzlichen Stellplätzen.

Tabelle 4.1: Ausrichtung der Richtungsgruppe in Simio

Gleis Nummer	Länge in Anzahl von Wagen
Gleis 1	25
Gleis 2	25
Gleis 3	30
Gleis 4	30
Gleis 5	30
Gleis 6	29
Gleis 7	29
Gleis 8	29
Gleis 9	23
Gleis 10	21
Total	271

Die Aufwärmzeit für den Füllungsgrad ist länger als die der Durchlaufzeit (Abbildung 4.6). Da die Wagen in Zügen im Bahnhof einfahren und aus dem Bahnhof abfahren, ist die Veränderlichkeit des Füllungsgrades bzw. der Anzahl von Wagen im Bahnhof sehr hoch. Deswegen wurde das gleitende Mittel über 500 Wagen berechnet und in Rot in die Grafik eingetragen. In den ersten Tagen sind durchschnittlich weniger als 80 Wagen im Bahnhof. Dann wird die durchschnittliche Belegung höher. Die Aufwärmzeit dauert fünf Tage. Deswegen wurde für alle Experimente eine Aufwärmzeit von 5 Tagen angewandt.

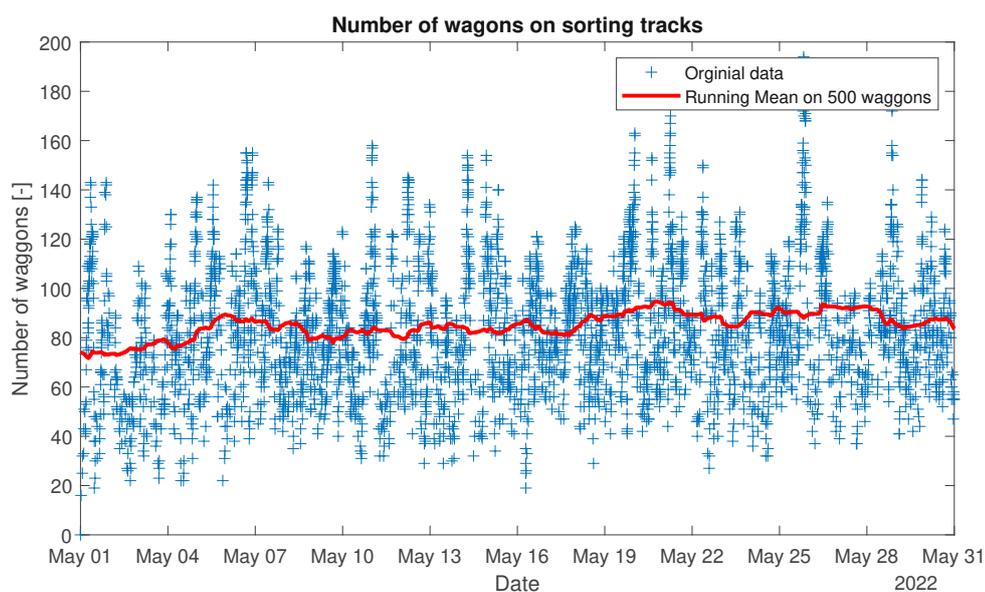


Abbildung 4.6: Anzahl der Wagen im Bahnhof in Abhängigkeit von der Zeit

4.2.2 Leistungsanalyse

Nachdem die Aufwärmperiode identifiziert wurde, wurden die KPIs für unterschiedliche Inputs berechnet. In diesem Teil wurde die Leistung des Bahnhofs untersucht. Das Ziel ist die Kapazität des Bahnhofs für einen voll automatisierten Vorgang zu berechnen. Die Engpässe, die daraus entstehen können, sollen identifiziert werden, um Alternativen dafür zu finden.

Zuerst wurde die Durchlaufzeit der Wagen berechnet, wobei dieselbe typische Situation, wie bei der Berechnung der minimum dwell time zugrundegelegt wurde. Die Wagenanzahl der ankommenden Züge folgt einer Normalverteilung mit dem Erwartungswert 24 und der Varianz 5. Die Länge der abfahrenden Züge wird ebenfalls durch eine Normalverteilung ermittelt mit einem Erwartungswert von 20 Wagen und einer Varianz von 10 Wagen. Als Zwischenankunftszeit wurden 90 min gewählt und die Verteilung der Ziele erfolgte folgenderweise: 10% der ankommenden Wagen fahren in Richtung 1, 30% in Richtung 2 und 60% in Richtung 3. Die Simulation wurde für einen Zeitraum von einem Monat erstellt. Die sich daraus ergebende durchschnittliche Durchlaufzeit beträgt 317 min. Diese Durchlaufzeit ist doppelt so hoch wie die minimum dwell time für eine vergleichbare Situation. Die Durchlaufzeiten der Wagen sind auch breiter verteilt als die minimum dwell time (Abbildung reffig:chap3typicalSituation). Die minimale simulierte Durchlaufzeit beträgt 81 min und die längste 122 h, sprich 5 Tage.

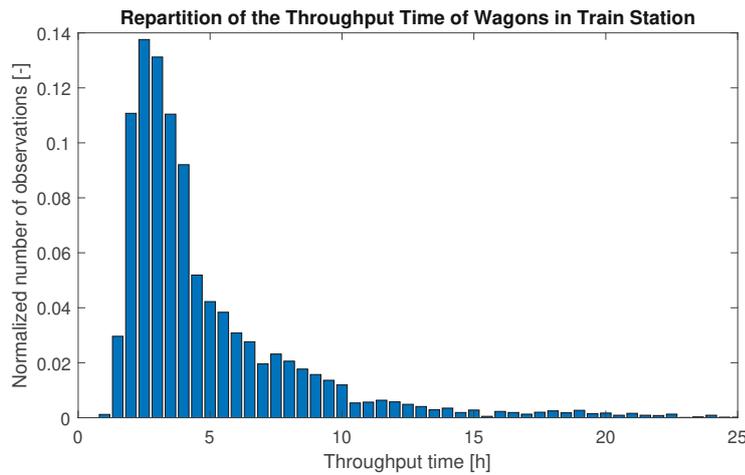


Abbildung 4.7: Verteilung der Durchlaufzeit für eine typische Situation Zoom auf das Intervall von 0 bis 25 Stunden

Einfluss der Verteilung der Ziele

Die folgenden Experimente wurden an 31 Tagen durchgeführt, die Aufwärmperiode wurde mitberechnet. Die Statistiken wurden also nur für 26 Tage gemacht. Der Erwartungswert der Zwischenankunftszeit wurde auf 2 Stunden angesetzt. Die Verteilungen der Längen der Züge sind folgende:

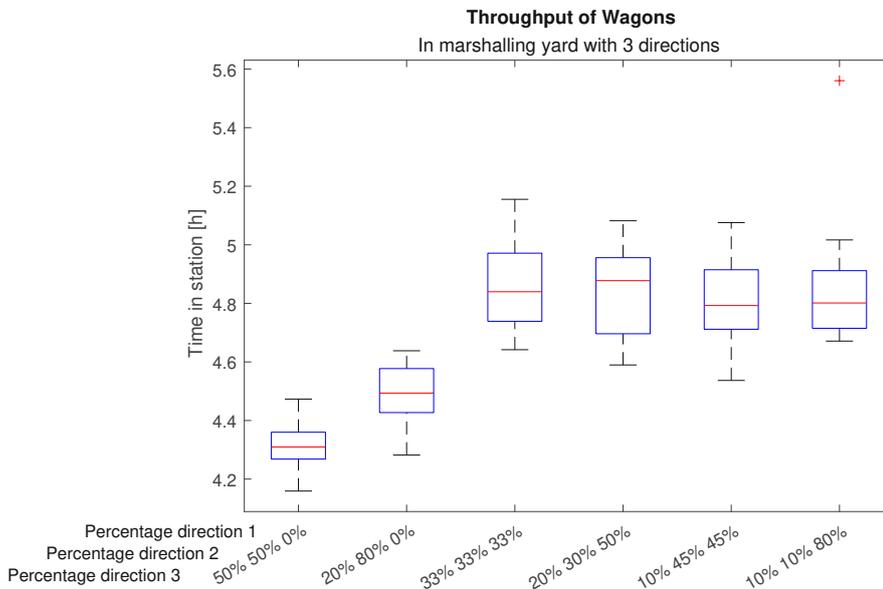


Abbildung 4.8: Durchlaufzeit der Wagen für unterschiedliche Verteilungen aufgrund der Ziele der Wagen. Statistiken mit 10 Wiederholungen

4 SIMULATIONSMODELL

ankommende Direktzüge: Normal(20,5)

ankommende Nahzüge: Normal(15,10)

abfahrende Direktzüge: Normal(20,5)

abfahrende Nahzüge: Normal(10,5).

Normal steht für die Normalverteilung und die Parameter in den Klammern sind der Erwartungswert und die Standardabweichung davon.

Mehrere Szenarien wurden mit unterschiedlichen Verteilungen für die Richtungen implementiert. Insgesamt können Prozentsätze für drei Richtungen eingegeben werden. Man kann auch weniger Richtungen wählen, indem deren Prozentzahl auf Null gesetzt wird. In der Grafik 4.8 wurden die beiden ersten Experimente nur mit zwei unterschiedlichen Richtungen für die Nahzüge, die Folgenden wurden mit drei umgesetzt. Dieses Experiment soll den Einfluss einer ungleichen Verteilung der Richtungen beurteilen.

In erster Linie beobachtet man, dass die durchschnittliche Durchlaufzeit deutlich höher ist, wenn drei Richtungen bedient werden sollen im Vergleich zu zwei. Das kann leicht durch den Aufbau der Simulation erklärt werden. Die Verteilung der Länge der Züge ist gleich für jedes Szenario. Je mehr Ziele ein Bahnhof bedient, desto mehr Wagen müssen ankommen, um in ausreichender Zahl die neuen Züge bilden zu können. Sprich die Sammelzeit erhöht sich.

Wenn man die zwei ersten Experimente betrachtet, lässt sich beobachten, dass die Durchlaufzeit für ein ungleiches Szenario (Verteilung der Ziele 20%, 80%) höher ist als für ein Szenario, wo die Wagen gleichmäßig auf die Ziele verteilt werden. Die Sammelzeit für die Wagen, die dasselbe Ziel wie die große Mehrheit der Wagen haben (80%), ist niedriger als die des Szenarios mit gleichmäßiger Verteilung der Ziele. Die Sammelzeit der Wagen, die zu Zielen mit sehr kleinen Prozentsätze fahren sollen (20%), ist sehr hoch, siehe Abbildung 4.9. Der Durchschnitt beider Werte ist höher als im gleichmäßigen Fall. Für drei Richtungen ist der Zusammenhang zwischen der Durchlaufzeit und der Verteilung weniger deutlich. Die Sammelzeit aber ist am geringsten bei einer gleichmäßigen Verteilung der Ziele. Je geringer das Transportaufkommen für eine Richtung, desto höher die Sammelzeit.

Für die Richtungen mit geringem Transportaufkommen könnte die Sammelzeit der Wagen durch eine Kürzung der abfahrenden Züge reduziert werden. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Länge der abfahrenden Züge und der Verteilung der Ziele, der zu optimalen Situationen führt. Das Transportaufkommen für eine Richtung sollte also in Betracht gezogen werden, um die Wahl der Länge der Züge für diese Richtung zu treffen.

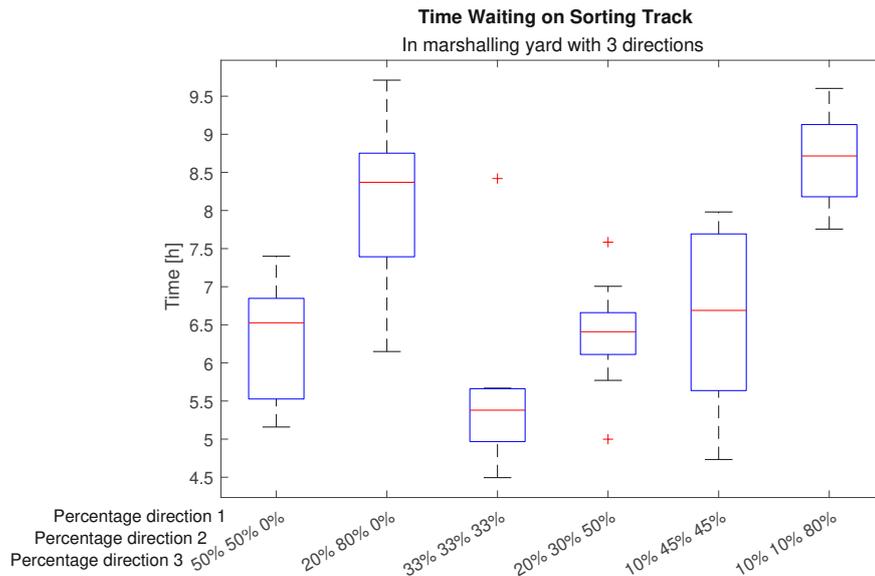


Abbildung 4.9: Sammelzeit der Wagen in den Verschubgleisen. Statistiken mit 10 Wiederholungen

In der implementierten Simulation kann die Länge der Züge je nach Ziel nicht unterschieden werden. Diese Unterscheidung wäre in einer zukünftigen Arbeit zu untersuchen. Eine andere Lösung, um die Durchlaufzeit der Wagen mit ungewöhnlichen Zielen zu reduzieren, wäre Zügen mit mehreren Blöcke, die unterschiedliche Ziele haben, zu bilden. Diese Lösung wird in Teil 6 eingehender behandelt.

Der Füllungsgrad ist auch direkt von der Verteilung der Ziele betroffen. Je länger die Sammelzeit, desto länger bleiben die Wagen im Bahnhof und besetzen Platz. Der Füllungsgrad ist also auch bei ungleicher Verteilung höher.

Einfluss der Zwischenankunftszeit

Im folgenden Experiment wurde für jedes Szenario eine unterschiedliche Zwischenankunftszeit der Züge eingesetzt. Die Zwischenankunftszeit ist durch eine Exponentialverteilung definiert, deren Erwartungswert als Parameter eingetragen wurde. Die Verteilung zwischen den Zielen ist zu 20%, 30% und 50% fixiert. Wie im vorherigen Experiment wurden folgende Verteilungen für die Längen von den Zügen gewählt (Normalverteilung (Erwartungswert, Standardabweichung)):

ankommende Direktzüge: Normal(20,5)

ankommende Nahzüge: Normal(15,10)

abfahrende Direktzüge: Normal(20,5)

abfahrende Nahzüge: Normal(10,5).

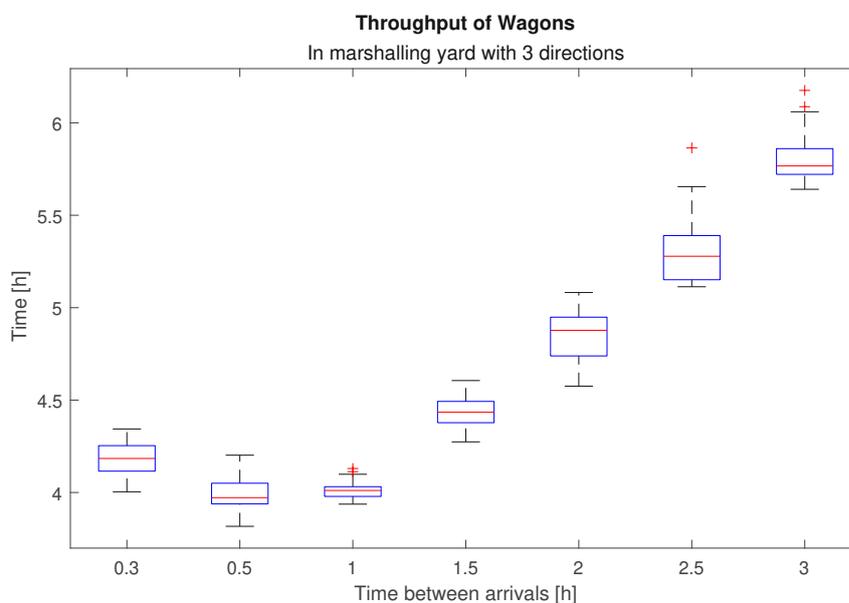


Abbildung 4.10: Durchlaufzeit der Wagen. Statistiken mit 20 Wiederholungen

Auf der Grafik 4.10 ist zu sehen, dass die Durchlaufzeit der Wagen mit der Zwischenankunftszeit ab einem bestimmten Wert steigt. Ein Optimum scheint erreicht zu sein bei einer Zwischenankunftszeit von 0.5 h.

Die Bedienzeit in der Ankunftsstation ist ein wenig kürzer als 30 min. In diesem Fall bildet die Vorbereitung für den Verschub einen Engpass. Es kann durch die Messung der tatsächliche beobachtete Zwischenankunftszeit bestimmt werden, dass diese Arbeitsschritt einen Engpass bildet. In der Simulation wurde implementiert, dass die Züge nicht ankommen können, wenn der Bahnhof überlastet ist. Dies hat zur Folge, dass die tatsächliche Zwischenankunftszeit größer als der Parameter sein kann. Folgende Werten wurden erlangt (Abbildung 4.11). Für jedes Szenario ist die mittlere beobachtete Zwischenankunftszeit der Züge im Bahnhof kleiner als der Parameter der x-Achse, außer für das erste Szenario (Erwartungswert der Zwischenankunftszeit: 18 min, beobachtete Zwischenankunftszeit: 25 min). Man kann daraus schließen, dass der Bahnhof lediglich in diesem Szenario überlastet ist.

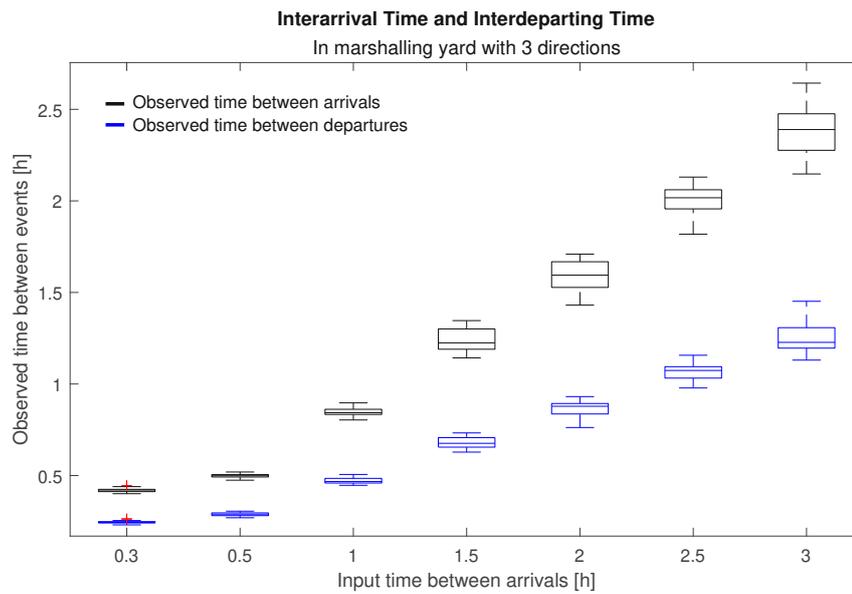


Abbildung 4.11: Tatsächlich beobachtete mittlere Zwischenankunftszeit der Züge im Bahnhof. Statistiken mit 20 Wiederholungen

Je kleiner die Zwischenankunftszeit der Züge im Bahnhof, desto höher die Bedienrate. Eine hohe Bedienrate kann zu Engpässen führen und die Wartezeiten können dadurch erhöht werden. Dies geschieht im letzten Szenario.

Die Verringerung der Zwischenankunftszeit kann auch zu einem erhöhten Füllungsgrad des Bahnhofes führen. Genau das kann anhand der Abbildung 4.12 festgestellt werden. Je öfter Züge ankommen, desto höher die durchschnittliche Anzahl der Waggons im Bahnhof. Diese Grafik bestätigt die Behauptung, dass der Bahnhof für eine Zwischenankunftszeit von 0.3 h überlastet ist. Tatsächlich ist die durchschnittliche Anzahl der Wagen im Bahnhof höher als die Anzahl der Stellplätze in der Richtungsgruppe. Das heißt, die Wagen müssen im Einfahrbereich darauf warten, verschoben zu werden.

Die Zeit zwischen zwei Abfahrten nimmt mit der Zwischenankunftszeit zu (Abbildung 4.11). Die Steigung aber ist niedriger als die der Zwischenankunftszeit.

Die Leerlaufzeit der Lok ihrerseits ist auch direkt mit der Zwischenankunftszeit der Züge verbunden. Die Wartezeit der Lok wurde als die Zeit zwischen dem Ende eines Verschubauftrags und dem Beginn des nächsten Auftrags definiert. Wenn der Bahnhof überlastet ist, wird davon ausgegangen, dass die Verschublok immer einen Auftrag hat. In diesem Fall ist die Wartezeit der Lok sehr niedrig. In der Simulation sind die Fahrzeiten relativ kurz im Vergleich zur Dauer der Arbeitsschritte.

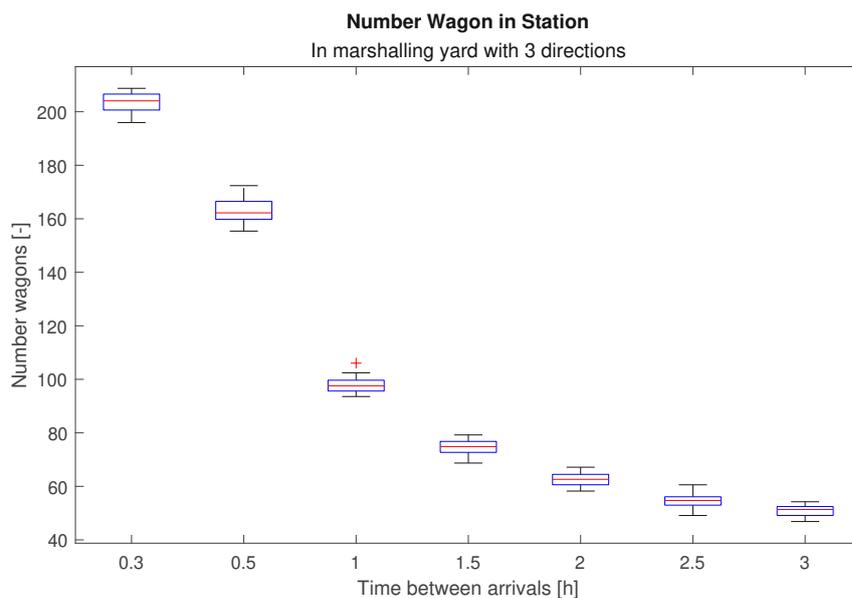


Abbildung 4.12: Anzahl der Wagen im Bahnhof. Statistiken mit 20 Wiederholungen

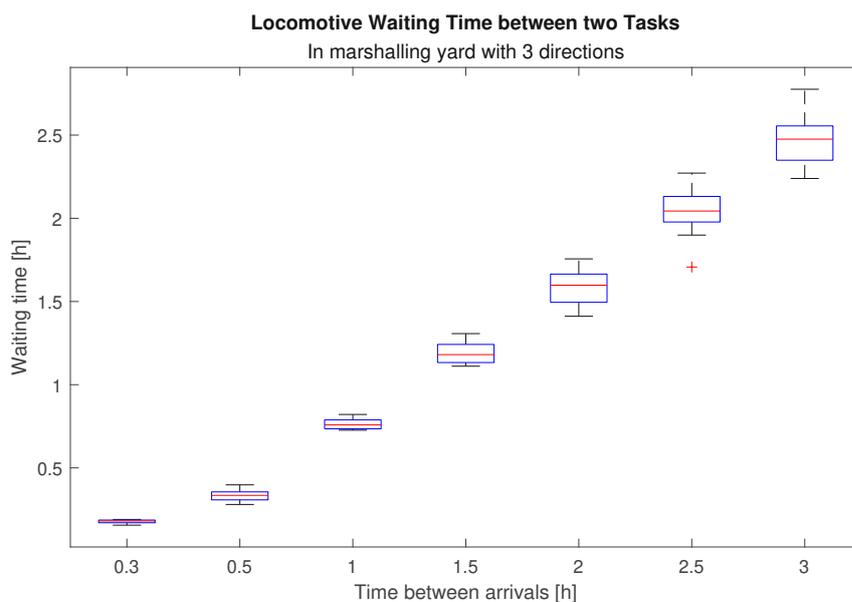


Abbildung 4.13: Leerzeit des Verschub-Triebfahrzeugs. Statistiken mit 20 Wiederholungen

In Abbildung 4.13 wurde die durchschnittliche Wartezeit der Verschublok im Verhältnis zu der Zeit zwischen zwei Zugankünften abgebildet. Diese beiden Werte sind fast linear miteinander verbunden. Dieses Verhältnis ist zu erwarten, solange die Verschublok keinen Engpass verursacht. Der Verschub mit Umsetzverfahren hat zwar eine geringere Leistung als das Abrollverfahren, jedoch scheint diese Leistung selbst bei einem hohen Transportaufkommen ausreichend zu sein.

Einfluss der Länge der Züge

In diesem dritten Experiment wurde die Länge der Züge als Variable genommen. Die anderen Parameter haben die folgenden Werte: Der Erwartungswert der Zwischenankunftszeit beträgt 1.3 h. Die Verteilung der Ziele beträgt 20%, 30% und 50% sowie im vorherigen Experiment.

Je länger die ankommenden Züge desto kürzer die Durchlaufzeit. Andererseits gilt: Je länger die abfahrenden Züge desto kürzer die Durchlaufzeit. Es gibt ein optimales Verhältnis zwischen den Längen der ankommenden und der abfahrenden Züge.

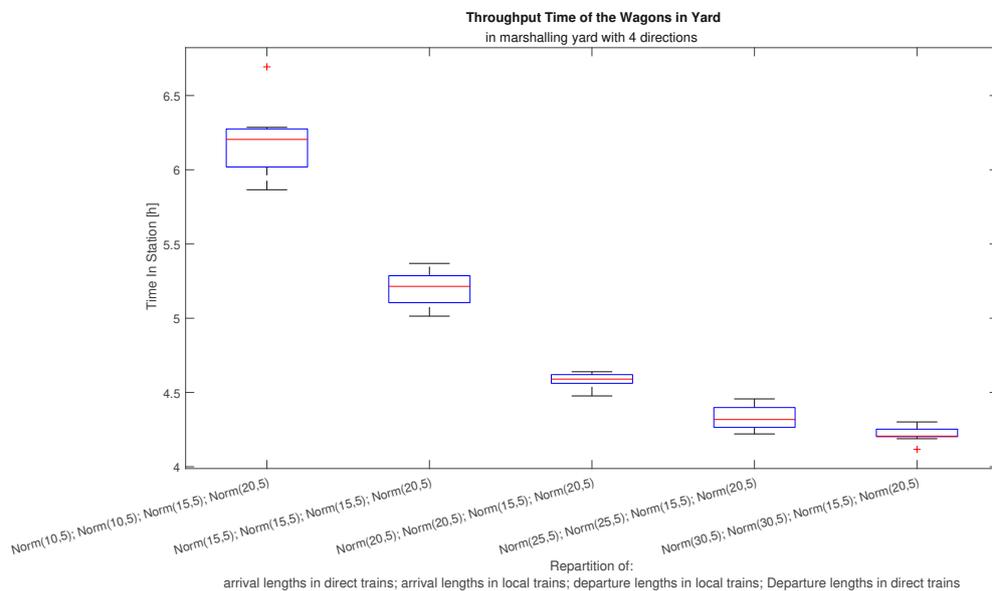


Abbildung 4.14: Durchlaufzeit der Wagen im Bahnhof bei unterschiedlicher Länge der ankommenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen

Die Zeit zwischen zwei Abfahrten wird höher mit der Länge der abfahrenden Züge und niedriger mit der Anzahl der Wagen in ankommenden Zügen.

In diesem Kapitel wurden die Parameter der Simulation untersucht, um die minimale Durchlaufzeit der Wagen im Bahnhof zu erlangen. Die Abhängigkeit der Größen untereinander wurde festgestellt, um die richtigen Parameter für eine bestimmte Experiment einzustellen. Die Vorgehensweise zur Validierung der Simulation wird im nächsten Kapitel erklärt. Der Vergleich zwischen der im Kapitel 3 berechneten *minimum dwell time* und der Durchlaufzeit der Simulation wird ebenfalls im nächsten Kapitel behandelt.

4 SIMULATIONSMODELL

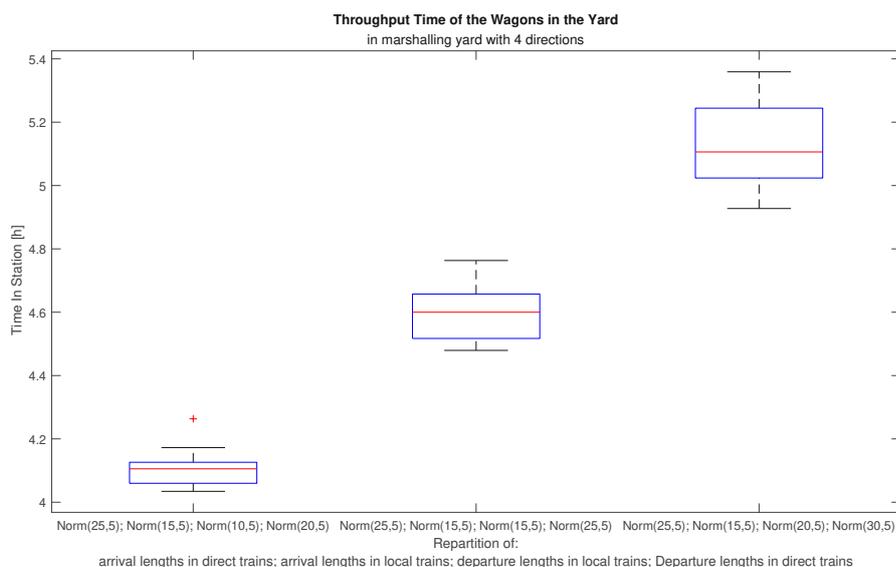


Abbildung 4.15: Durchlaufzeit der Wagen im Bahnhof bei unterschiedlicher Länge der abfahrenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen

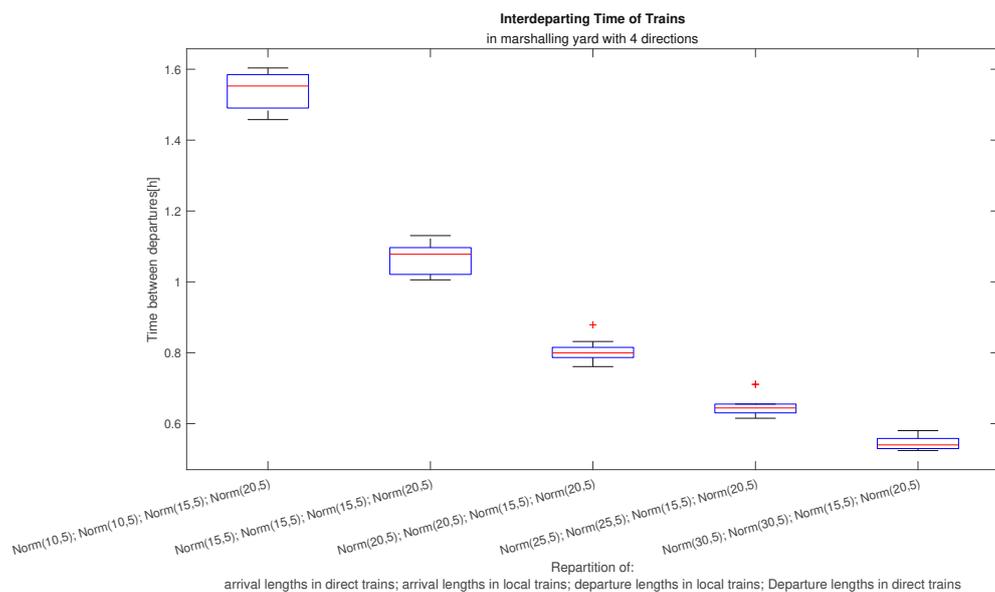


Abbildung 4.16: Zeit zwischen zwei Abfahrten bei unterschiedlicher Länge der ankommenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen

Wegen des Zeitdrucks konnte keiner der Optimierungsvorschläge, die im Kapitel 6 zu finden sind, implementiert werden. Die Simulation des Bahnhofs, erlaubt es, neue Prozesse zu testen. Um die tatsächlichen Wirkungen von Änderungen im Prozess vorherzusehen,

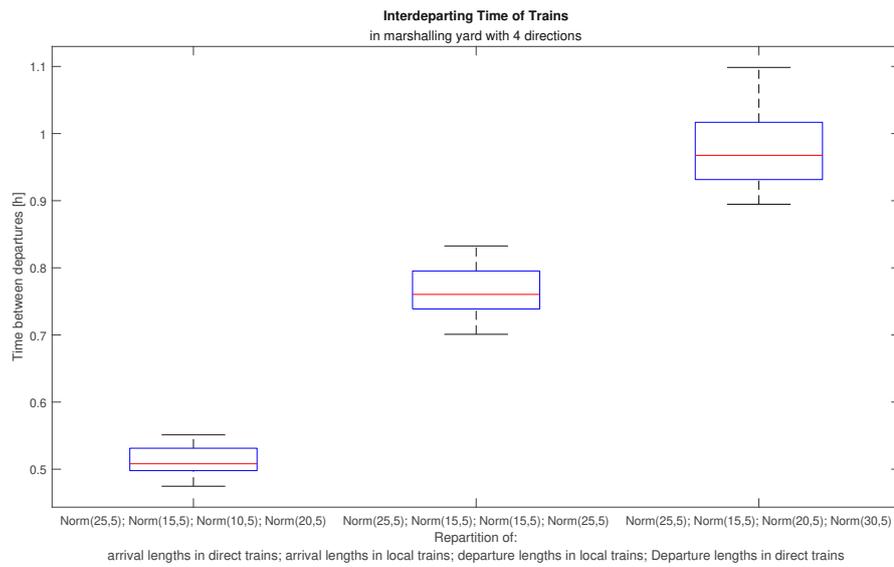


Abbildung 4.17: Zeit zwischen zwei Abfahrten bei unterschiedlicher Länge der abfahrenden Züge. Statistiken mit 10 Wiederholungen

müssen die Daten möglichst realitätsnah sein. Den Prozess betreffen nämlich sehr viele Einschränkungen, die sehr wichtig sind, z.B. für Sicherheit, die aber in dieser Simulation nicht berücksichtigt werden konnten.

5 Verifikation und Vergleich der Modelle

Damit die Simulation validiert werden kann, soll sie mit anderen Daten verglichen werden. Dies erfolgt in diesem Kapitel. Das analytische Modell, das in Kapitel 3 präsentiert wurde, und die Simulation sind nicht für dieselben Zwecke aufgebaut. Das analytische Modell berechnet die *minimum dwell time*. Die Simulation sollte die Realität genauer abbilden, indem sie stochastisch die Zeit zwischen den Ankünften der Züge im Bahnhof betrachtet. Deswegen sollte die Simulation an das analytische Modell angepasst werden, damit die berechnete Durchlaufzeit der Wagen verglichen werden kann. Das wird im ersten Teil erklärt.

Eine andere Weise eine Simulation zu validieren ist sie mit realen Daten zu vergleichen. Dafür haben die Experten der ÖBB den Frachtenbahnhof Bruck an der Mur gewählt. Eine Primärerhebung der zeitlichen Informationen im Verschiebebahnhof konnte im Rahmen der Diplomarbeit nicht durchgeführt werden. Die Ist-Aufnahme dieses Bahnhofs wurde daher durch eine Sekundärerhebung durchgeführt, indem bestehende Daten, die für den normalen Betrieb des Bahnhofes erhoben wurden, ausgewertet wurden. Die in dieser Arbeit verwendeten betrieblichen Daten dieses Bahnhof wurden von der ÖBB ermittelt.

Nachfolgend wird der Frachtenbahnhof Bruck an der Mur beschrieben, um diesen Bahnhof in seinen Kontext einzuordnen. Dann werden die vorhandenen Daten verarbeitet und analysiert, um den Vergleich mit der Simulation vorzubereiten. Anschließend werden die Ergebnisse der Simulation mit den Daten von Bruck an der Mur verglichen.

5.1 Vergleich Simulation und analytisches Modell

Ein Vergleich zwischen dem analytischen Modell und der Simulation wurde durchgeführt, um das Simulationsmodell zu validieren. Dafür wurde die stochastische Simulation an das deterministische Modell angepasst. Jeder Zug ist gleich. Die Wagen für die unterschiedlichen Ziele werden in Simio mit unterschiedlichen Quellen erzeugt und danach zu einem Zug verbunden, damit die Wagengruppen dieselbe Länge haben, nämlich $\frac{n_{IN}}{n_G}$, mit der Beschränkung, dass n_{IN} ein Vielfaches von n_G sein soll. Die Wagenanzahl pro ankommendem Zug sowie die Wagenanzahl pro abfahrenden Zug sind fix eingestellt.

Im analytischen Modell werden die Züge nacheinander ohne Pause behandelt. Die Arbeitsschritte in der Behandlung eines Zuges sind die Ankunft, die Wagenreiheprüfung, die Entkopplung der Wagengruppen und die Verschubfahrten. Die benötigte Zeit dafür wurde in Simio als Zwischenankunftszeit eingestellt, dies entspricht insgesamt 31 Minuten.

Die Durchlaufzeit der Wagen wurde dann im analytischen Modell und in der Simulation mit den gleichen Parametern berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.1 veranschaulicht.

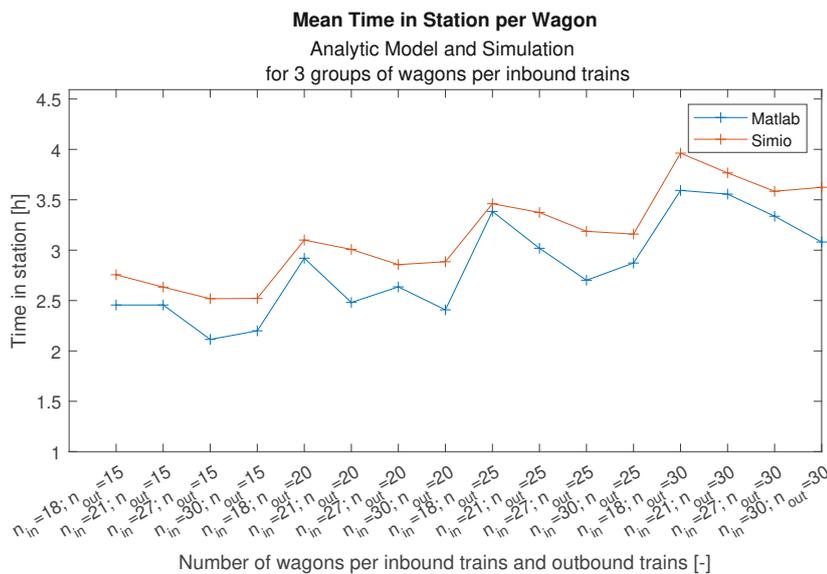


Abbildung 5.1: Durchlaufzeit der Wagen in Bezug auf die Wagenanzahl pro ankommenden und abfahrenden Zug

Die Durchlaufzeit ist in der stochastischen Berechnung der Simulation systematisch höher als im analytischen Modell. Ähnliche Muster sind mit Matlab und Simio zu erkennen. Je höher die Wagenanzahl pro ankommenden Zug, desto kürzer die Durchlaufzeit. Je höher die Wagenanzahl pro abfahrenden Zug, desto länger die Durchlaufzeit.

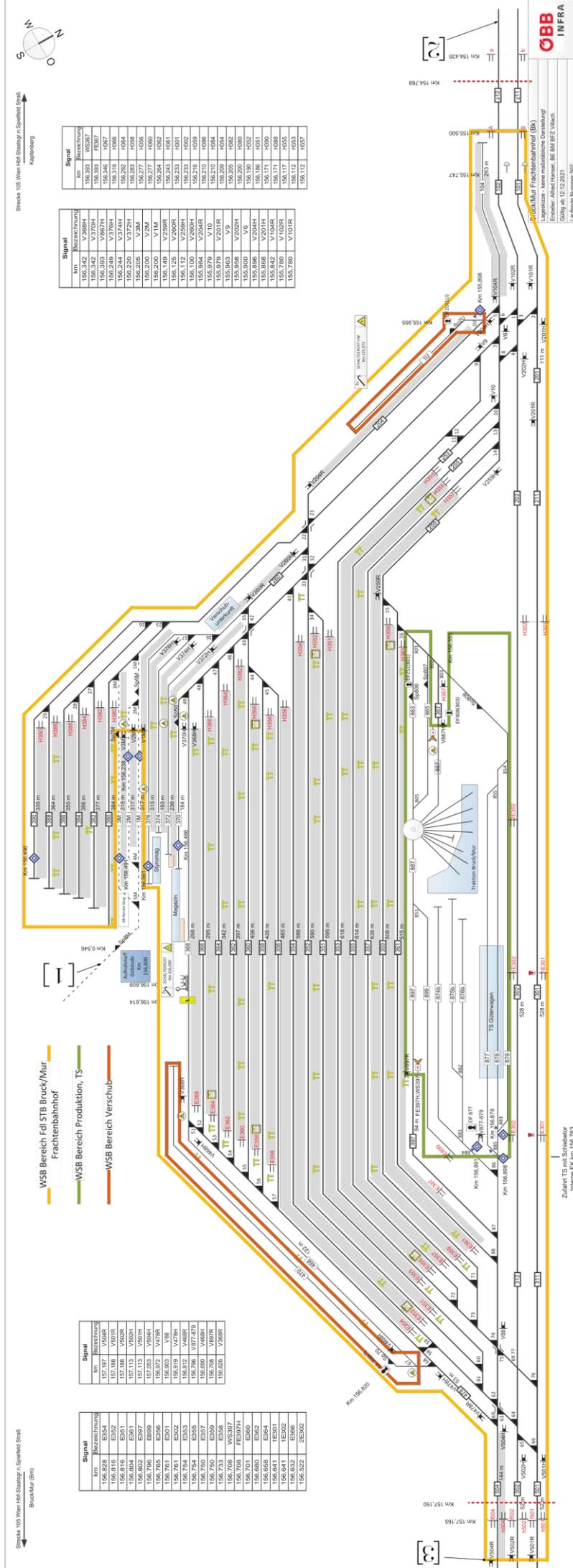
Die Simulation und das analytische Modell haben inhärente Unterschiede, die die Abweichung zwischen den berechneten Durchlaufzeiten erklären könnten. Obwohl in den beiden Modellen dieselben Gleislängen angenommen wurden, damit die Fahrtzeiten gleich sind, ist die Verteilung der Wagen auf den Gleisen unterschiedlich. Bei Matlab wurde die volle Auslastung des Bahnhofes nicht als Beschränkung eingestellt. Es gibt ein Zielgleis pro Gruppe und es wird immer mit derselben Länge der Strecke für die Vershubfahrt gerechnet. Jedoch wird bei Simio die Gleislänge als Beschränkung der Anzahl der Wagen eingestellt. Das heißt, wenn nicht genug Plätze für die ganze Wagengruppe im Zielgleis vorhanden sind, wird die Gruppe geteilt, die ersten Wagen werden auf das ursprüngliche Zielgleis verschoben und die folgenden auf ein leeres Gleis. Die Fahrt ist also länger.

Der sich daraus ergebende Unterschied liegt zwischen 2 % und 18 %. Die Größenordnung bleibt also gleich. Die mit der Simulation berechneten Größen haben realistische Werten. Das bestätigt, dass sich im Simio Code kein Fehler eingeschlichen hat.

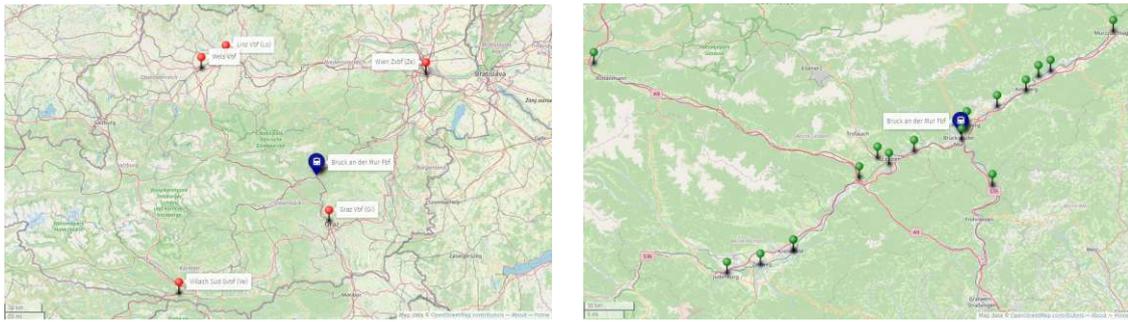
5.2 Frachtenbahnhof von Bruck an der Mur

5.2.1 Geographische Lage

Der Frachtenbahnhof Bruck an der Mur wurde für die Simulation als Vorlage verwendet. Der Frachtenbahnhof von Bruck an der Mur ist ein Vershubknoten nach der Aufteilung von ÖBB Infra. Dieser Bahnhof befindet sich auf der Kreuzung der Strecke zwischen den Vershubknoten Wien und Villach und der Strecke, die Linz mit Graz verbindet, wie auf der Landkarte in der Abbildung 5.3 zu sehen ist. Die Vershubstandorte, die an Bruck angebunden sind, sind auf fünf unterschiedlichen Strecken aufgeteilt.



5 VERIFIKATION UND VERGLEICH DER MODELLE



a) An Bruck angebundener
Verschubknoten

b) An Bruck angebundene
Verschubstandorte

Abbildung 5.3: Landkarte mit den Frachtenbahnhöfen, die mit Bruck an der Mur verbunden sind

Quelle: openstreetmap.org

Der Grundriss des Bahnhofs wurde für die Simulation übernommen. Das Layout befindet sich in Abbildung 5.2.

Tabelle 5.1: Gleisnutzlängen der Hauptgleise in Bruck an der Mur

Gleis Nummer	Nutzlänge	Gleis Nummer	Nutzlänge
351	595 m	359	508 m
352	590 m	360	406 m
353	618 m	361	515 m
354	586 m	362	397 m
355	614 m	364	342 m
356	465 m	366	295 m
357	638 m	368	268 m
358	426 m		

Der Bahnhof Bruck an der Mur verfügt über fünfzehn Hauptgleise, deren Länge in Tabelle 5.1 eingetragen wurde. Diese sind die Gleise, von denen die Wagen verschoben werden und wo die neuen Züge gebildet werden. Züge, die vor Kurzem eingefahren sind, können dort warten, bevor sie sortiert werden, wenn das Ankunftsgleis schon besetzt ist. Die anderen sogenannten Nebengleise werden als Abstellgleise benutzt. Dort werden leere Wagen und Wagen, die kleine Instandsetzungsarbeiten benötigen, abgestellt. Im Gegensatz zu den Hauptgleisen sind sie Stumpfgleise. Drei Gleise haben einen direkten Anschluss zum Gelände der VOEST. Die Wagen für die VOEST werden dorthin verschoben. Der Unterschied zu den anderen Verschubgleisen ist, dass dort keine Zug gebildet wird. Die VOEST holt die Wagen mit einer privaten Verschublok direkt im Bahnhof ab und bringt

die Wagen, die zu anderen Bahnhöfe geschickt werden sollen, zu diesen Gleisen. Es wurde von der ÖBB Infra entschieden, dass dieser Aspekt des Bahnhofs erst einmal nicht simuliert werden soll.

5.2.2 Ankünfte und Abfahrten in Bruck an der Mur

Der Zugverkehr findet nach einem Fahrplan statt. Der größte Anteil an Bestellungen machen regelmäßige Züge aus. Wiederkehrende Muster pro Tag oder pro Woche sind in den Ankünften und Abfahrten in Bruck an der Mur zu beobachten.

Wenn sich ein Zug verspätet, warten die abfahrenden Züge nicht auf die verspäteten Wagen. Die Verweilzeit dieser Wagen ist länger als geplant, sie müssen auf den nächsten geplanten Zug für diese Richtung warten. Die Auswirkung der Verspätung auf den Fahrplan wird dadurch minimiert. So kann ein Zug kürzer als geplant sein oder mit leeren Wagen gefüllt werden. Das Management der leeren Wagen erfolgt teilweise nach Schätzung der Verschiebmitarbeiter. Die vollen Wagen haben gegenüber den leeren Wagen Vorrang. Dadurch kann die Reihenfolge in den Zügen an die Verfrühungen und Verspätungen angepasst werden. Eine interessante Untersuchung über das Management von leeren Wagen ist in der Referenz [Bektaş et al., 2009] zu finden.

Wegen dieser Abweichungen zwischen der Soll- und der Ist-Situation, müssen die Beobachtungsdaten und nicht nur die geplanten Ankünfte und Abfahrten analysiert werden. Deswegen wurden sowohl die Bestellungen für das Jahr 2022 als auch die Güterzüge, die tatsächlich im Mai in Bruck an der Mur angekommen und abgefahren sind, analysiert. Erstere Daten kommen aus dem Bestellsystem der ÖBB Infra und letztere aus den Daten des Bahnhofs Bruck an der Mur.

Die verfügbaren Informationen aus den Daten über die Ankünfte und Abfahrten der Züge in Bruck an der Mur im Mai 2022 sind folgende:

- Richtung des Zuges (Eingang oder Ausgang)
- Zugnummer
- Abfahrtsdatum oder Ankunftsdatum mit Uhrzeit
- Wagenanzahl im Zug.

5 VERIFIKATION UND VERGLEICH DER MODELLE

Die vorhandene Daten beziehen sich nicht auf einzelne Wagen sondern auf Züge. Das heißt, sie enthalten Informationen über die Ankünfte im Bahnhof und die Abfahrten vom Bahnhof, aber keine Information darüber, was im Bahnhof stattfindet, z.B. über die einzelnen Vershubfahrten. Die Informationen über Ankünfte und Abfahrten können auch nicht miteinander verbunden werden. Deswegen kann die Durchlaufzeit der Wagen nur mit diesen Daten leider nicht berechnet werden. Diese Daten werden also verwendet, um die Verteilung der Ankünfte, die als Parameter in der Simulation eingetragen ist, zu prüfen. Mit der Simulation wurden auch Informationen über die Zugabfahrten berechnet, die können auch mit den Daten von Bruck an der Mur verglichen werden.

Jeder Zug, der im Schienennetz fährt, bekommt eine Zugnummer. Diese Kennzeichnung erlaubt es, die Zugfahrt zu identifizieren. Die Richtlinien für die Nummerierung wurden von der ÖBB AG definiert. Die Zugnummer besteht aus fünf Ziffern und kann nur ein Mal pro Tag vergeben werden. Bei der Zugnummernvergabe muss darauf geachtet werden, dass die Zugnummer frei ist, das heißt, noch nicht vergeben wurde. Die Nummer kennzeichnet die Zuggattung, den Abfahrts- und Zielbahnhof für Direktzüge oder den nächstliegenden Vershubknoten für Nahzüge und Vershubzüge und den verwendeten Laufweg für die Fahrt.

Als Beispiel betrachten wir die Zugnummer 54060.

Die erste Zahl gibt die Zuggattung an: 5 für Direktgüterzug, 6 für Nahgüterzug und 7 für Vershubgüterzug. Es handelt sich also um einen Direktzug, der zwischen zwei Vershubknoten fährt.

Die zweite Stelle steht für Primärnetze und Qualitätsstufe.

Für die Direktgüterzüge folgt dann an dritter Stelle die Codenummer des Zielvershubknotens.

Die vierte Stelle kennzeichnet den Startbahnhof. Im Beispiel fährt der Zug von Bruck an der Mur nach Wien.

Die fünfte Ziffer wird in der Reihenfolge der Abfahrtszeiten für diese Richtung vergeben. Denn die Zugnummer soll pro Tag eindeutig bleiben. 0 ist der erste Zug des Tages in diese Richtung.

Für Nahgüterzüge (NG) und Vershubgüterzüge (VG) kennzeichnet die dritte Stelle den Knotenbahnhof, in dessen Bereich die NG bzw. VG überwiegend verkehren.

Die vierten und fünften Stellen werden richtungsbezogen in zeitlicher Reihenfolge je Kalendertag vergeben.

5.2.3 Verteilung der Ankünfte und Abfahrten

Im Untersuchungszeitraum vom 1. bis 31. Mai 2022 sind 8540 Wagen in 499 Zügen in Bruck an der Mur angekommen und 8425 Wagen in 552 Zügen von Bruck an der Mur abgefahren. Im Mai 2022 sind mehr Wagen im Bruck an der Mur angekommen als abgefahren. Durchschnittlich werden 250 Wagen pro Tag in Bruck an der Mur behandelt. Bis zu 400 Wagen kommen in Bruck an der Mur pro Tag an (Abbildung 5.4). Diese Wagen werden auf bis zu 26 Züge verteilt. Die Verteilung der Zugbahfarten ist sehr ähnlich. Pro Tag fahren bis zu 413 Wagen und bis zu 28 Zügen von Bruck an der Mur ab (Abbildung 5.5). In dieser Analyse wurden nur die Züge, deren Zugnummer mit 5, 6 oder 7 beginnt, betrachtet.

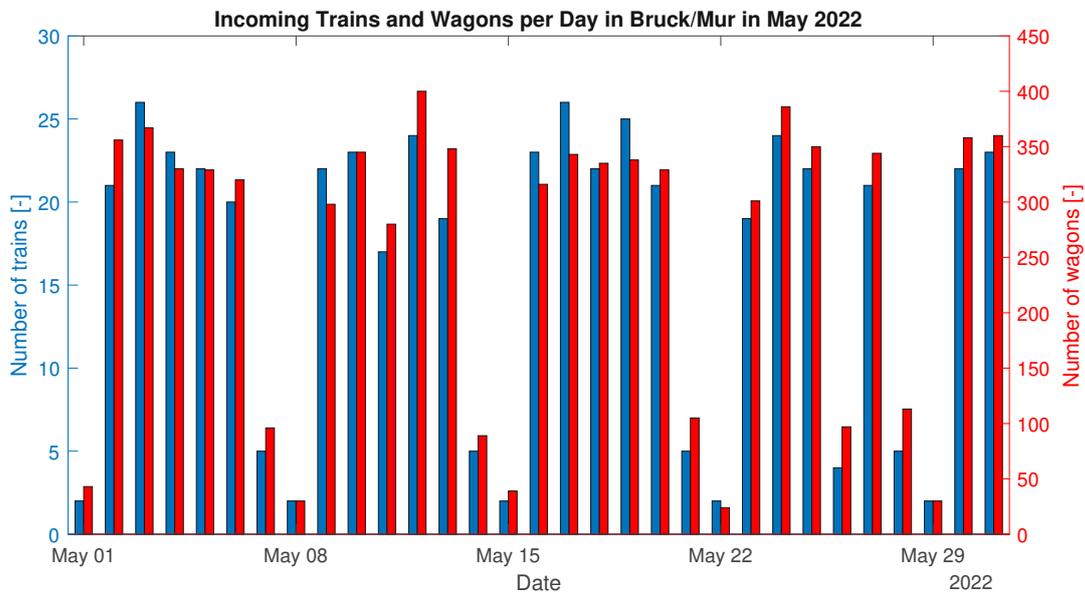


Abbildung 5.4: Anzahl der ankommenden Züge und Wagen pro Tag in Bruck an der Mur

In der Anzahl der ankommenden Züge pro Tag (Abbildung 5.4) und in der Anzahl der abfahrenden Züge (Abbildung 5.5) sind Muster zu erkennen. Von Montag bis Freitag verkehren mehr Züge als an Samstagen und Sonntagen. Die Sonntage von Mai 2022 sind der 1., 8., 15., 22. und 29. Der Zugverkehr sonntags beginnt erst am Abend. Der erste Zug kommt um 22 Uhr an und die erste Zugabfahrt findet um 22:30 Uhr statt. Die Samstage sind auch verkehrsarme Tagen. Die geringe Anzahl der ankommenden und abfahrenden Züge am 26. Mai lässt sich durch den Feiertag Christi Himmelfahrt erklären.

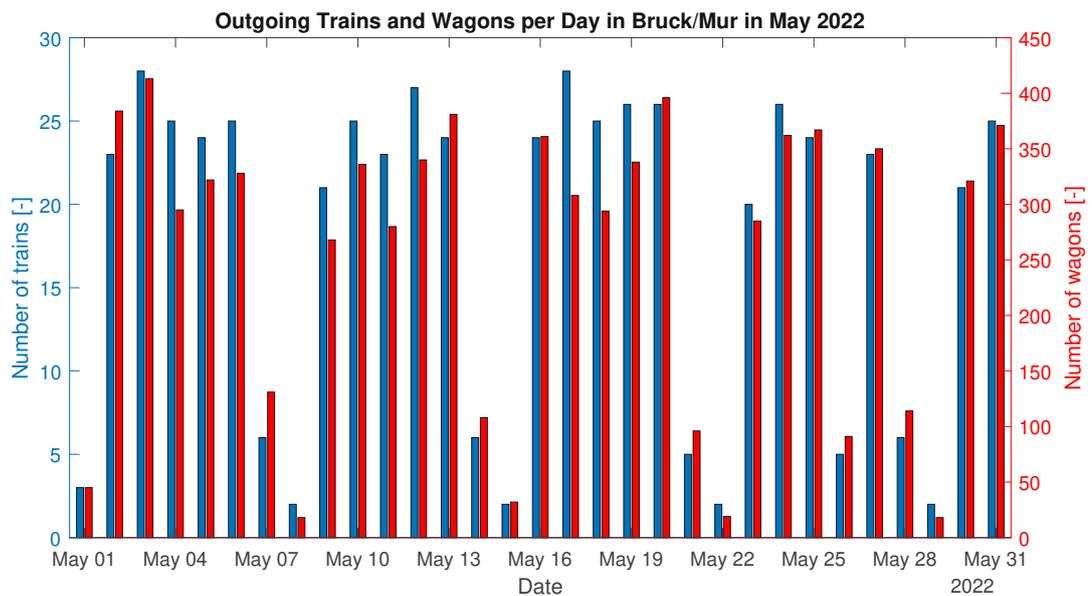


Abbildung 5.5: Anzahl der abfahrenden Züge und Wagen pro Tag in Bruck an der Mur

Dieses Wechselspiel zwischen verkehrarmen und verkehrreichen Tagen lässt sich auch in der Analyse der Zwischenankunftszeiten und der Zwischenabfahrtszeiten erkennen. Die Verteilung der Zeit zwischen zwei Ankünften ist im Diagramm 5.6 zu sehen. Jeder Balken ist 30 Minuten breit. Die Zwischenankunftszeiten sind exponentialverteilt. Die Ereignisse „Zugankunft“ folgen einer Poisson-Verteilung. Das begründet, dass in der Simulation die Zwischenankunftszeit von einer Exponentialverteilung bestimmt wird.

Die durchschnittliche Zwischenankunftszeit der Züge im Mai 2022 ist 86 min. Mit einer Standardabweichung von 163 min.

Der letzte Zug am Samstag fährt um 19:51 Uhr ein. Am Sonntag kommt der erste Zug um 22 Uhr an. Daraus ergibt sich ein Höchstwert für die Zwischenankunftszeit von 26 Stunden. Eine Arbeitswoche wurde mit der Zeit von Sonntagabend bis Freitagabend definiert. Die durchschnittliche Zwischenankunftszeit in dieser Woche beträgt 73 min, die dazu gehörige wöchentliche Standardabweichung 107 min.

Die Zeit zwischen zwei Abfahrten in Bruck an der Mur kann auch durch eine Exponentialverteilung angenähert werden. Durchschnittlich alle 80 Minuten fährt einen Zug von Bruck ab. Hinsichtlich der Abfahrten von Bruck gibt es im Mai fünf Leerstellen, die den

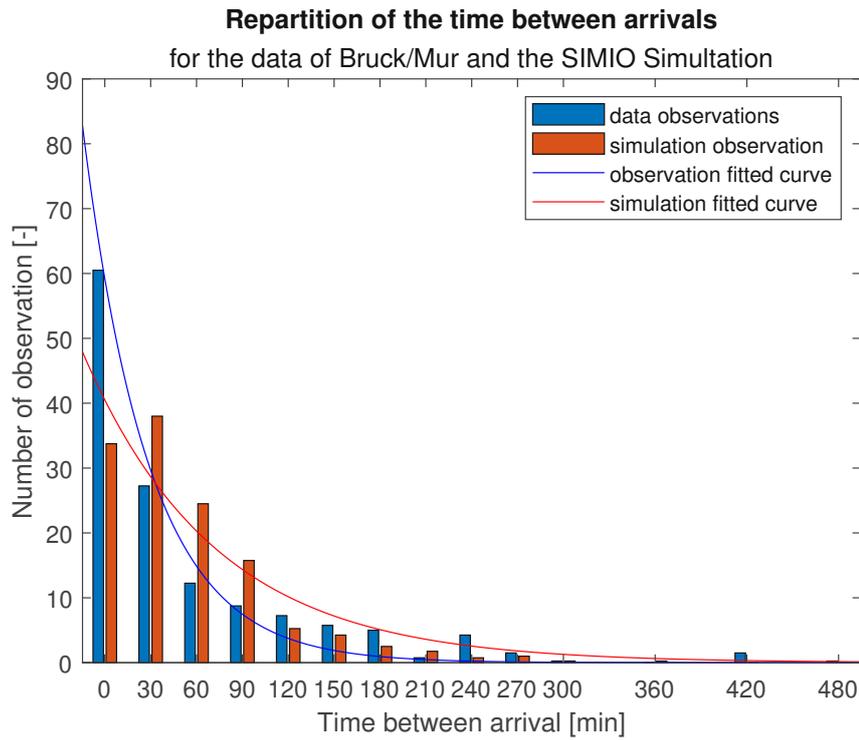


Abbildung 5.6: Histogramm Verteilung der Zwischenankunftszeit

vier Maisonntagen und dem 26. Mai (Christi Himmelfahrt) entsprechen. Die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Abfahrten beträgt in einer wie oben definierten Arbeitswoche: 64 min und die dazu passende Standardabweichung 66 min.

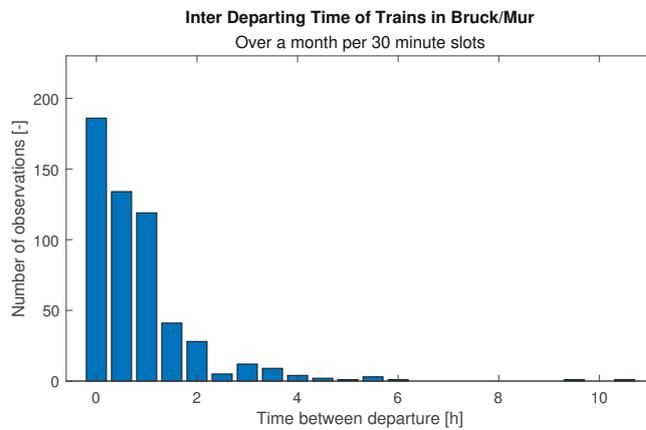


Abbildung 5.7: Histogramm Verteilung der Zwischenabfahrtszeit

Die Analyse dieser Daten ist für die Simulation relevant. Um eine reale Situation abbilden zu können, soll die Simulation die Alternation zwischen Werktagen und Wochenenden berücksichtigen. Das geringere Transportaufkommen am Wochenende verringert insgesamt die Stauungsgefahr während der gesamten Woche. In Simio können Werktage definiert werden, um die Simulation realitätsnaher zu machen.

5.2.4 Zielverteilung

Der Frachtenbahnhof Bruck an der Mur ist ein Vershubknoten, auch HUB genannt. Die Wagen kommen an und fahren in Direktgüterzügen DG, Nahgüterzügen NG und Vershubgüterzügen VG ab. Die Bahnhöfe, die mit Bruck an der Mur verbunden sind, sind auf den Landkarten 5.3 gekennzeichnet.

Bruck ist nicht direkt an alle österreichischen Vershubknoten angebunden. Die Direktzüge von Bruck an der Mur fahren lediglich bis zu folgenden HUBs:

- Graz
- Linz
- Villach
- Wien.

Die Züge von Bruck an der Mur fahren mehr als achtzehn Bahnhöfe an. Die Bahnhöfe, die durch Nahzüge an Bruck an der Mur angebunden sind, sind auf fünf verschiedene Strecken aufgeteilt. In der Tabelle 5.2 sind alle Ziele der Züge, die von Bruck abfahren, in absteigender Reihenfolge der Anzahl der Züge pro Monat geordnet.

5.2.5 Verteilung der Länge der Züge

Die Verteilung der Wagenanzahl pro ankommenden Zug entspricht einer Gauß-Verteilung, siehe Abbildung 5.8.

Tabelle 5.2: Verteilung des Transportaufkommens pro Ziel

Ziel	Anzahl der Züge	Anzahl der Wagen
Wien	67	1203
Villach	61	938
Graz	47	717
Leoben Donawitz	42	711
Bruck	41	290
St.Marein-St.Lorenzen	41	255
Linz	40	834
Knittelfeld	25	516
Selzthal	24	491
St.Michael	21	360
Mitterdorf-Veitsch	21	314
Wartberg im Mürztal	21	246
Leoben Göss	21	223
Zeltweg	21	192
Mürzzuschlag Süd	21	104
Niklasdorf	20	159
Mixnitz-Bärenschützklamm	5	15
Koper Tovorna	1	21
Andere	12	183

Ein Gaußsches Regressionsmodell wurde verwendet. Die unbekannt Parameter davon wurden folgendermaßen definiert:

$$f(x) = \frac{a}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5.1)$$

Die Parameter und deren Vertrauensintervalle für ein 95% Konfidenzniveau sind:

$$\begin{aligned} a &= 576.4 \quad (502.5, 650.3) \\ \mu &= 15.12 \quad (13.74, 16.51) \\ \sigma &= 10.54 \quad (8.803, 12.28) \end{aligned}$$

Einem Gaußsches Regressionsmodell entspricht auch die Verteilung der Länge von abfahrenden Güterzügen. Dieselbe Gleichung wie für ankommende Züge (Gleichung 5.1) wird mit den folgenden Parametern verwendet.

5 VERIFIKATION UND VERGLEICH DER MODELLE

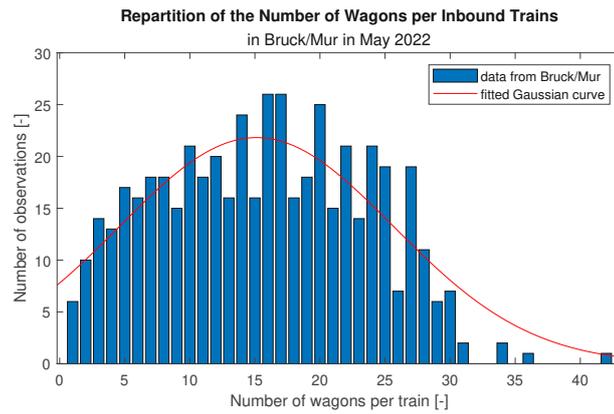


Abbildung 5.8: Verteilung der Wagenanzahl pro ankommenden Zug

$$a = 23.35 \quad (20.9, 25.8)$$

$$\mu = 10.13 \quad (7.551, 12.72)$$

$$\sigma = 17.65 \quad (13.73, 21.58)$$

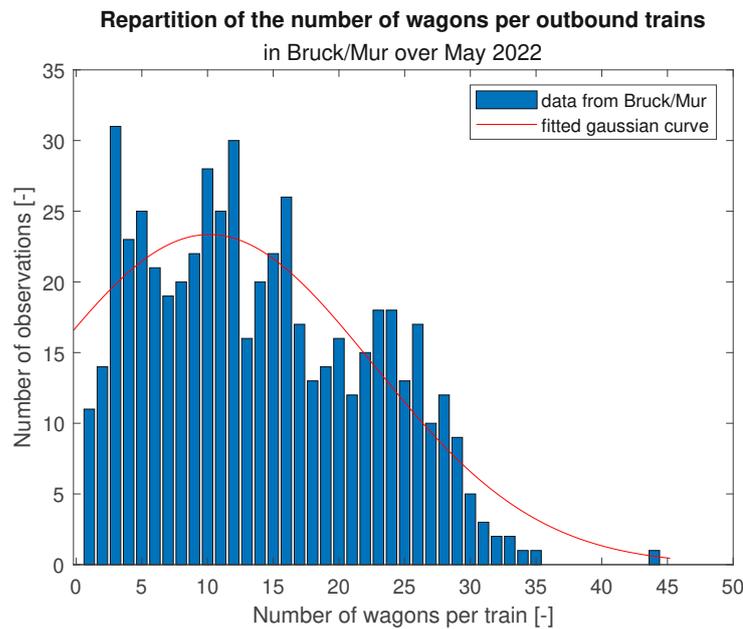


Abbildung 5.9: Verteilung der Wagenanzahl pro abfahrenden Zug

Die Direktzüge sind in der Regel länger als die Nahzüge. Sie führen durchschnittlich 17 Wagen pro Zug, während die regionalen Nahzüge und Vershubzüge durchschnittlich aus 13 Wagen pro Zug bestehen. Die Parameter des Regressionsmodells können in der Simulation eingetragen werden, um eine reale Situation abzubilden.

5.3 Vergleich Simulation und realen Daten

Zunächst wurde eine Analyse durchgeführt, um zu prüfen, ob die Inputparameter der Simulation mit den Daten von Bruck an der Mur übereinstimmen. Als Inputparameter sind die Zwischenankunftszeit und die Verteilung der Wagenanzahl pro Zug zu verstehen.

5.3.1 Zwischenankunftszeit

Der Fahrplan kann durch unabhängige, zufällige Ereignisse ersetzt werden. Die Ankunftsrate wird als konstant angenommen. Die Ankünfte der Züge folgen einer Poisson-Verteilung. Ein Hinweis zur Poisson-Verteilung der Ankünfte wurde in der Analyse der Zwischenankunftszeit der Züge in Bruck an der Mur gegeben. Denn die Zwischenankunftszeit entsprach einem exponentielle Regressionsmodell. Im Falle einer Poisson-Verteilung ist die Wartezeit zwischen zwei Ereignissen exponentialverteilt. Die Zwischenankunftszeit der Züge in Simio wurde also mithilfe einer Exponentialverteilung eingestellt. Der Erwartungswert der Verteilung wurde als Parameter in Simio eingegeben.

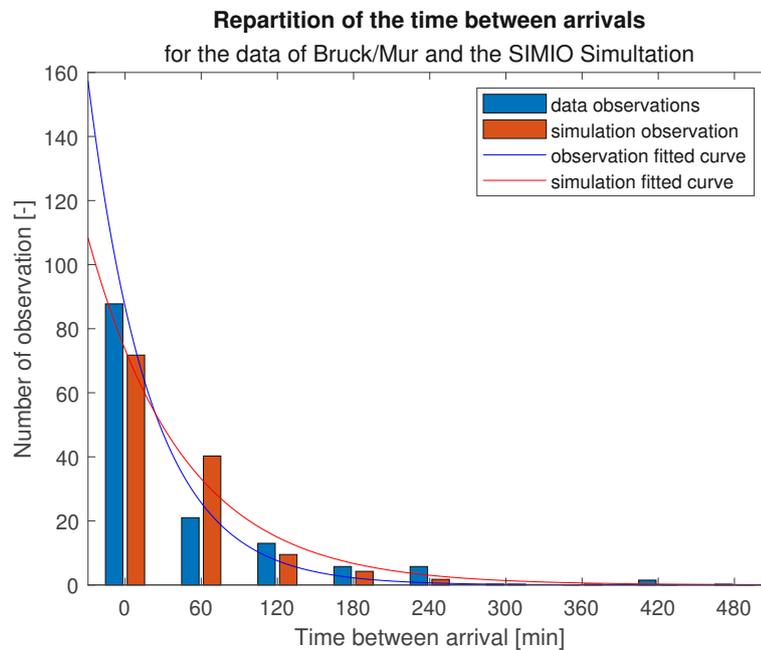


Abbildung 5.10: Verteilung der Zwischenankunftszeit für die Daten von Bruck an der Mur und die Simulation, Durchschnitt von 4 Wochen

Die Abbildung 5.10 zeigt die Daten von Bruck an der Mur und der Simulation für eine Arbeitswoche. Die Woche wurde von Sonntagabend bis Samstagvormittag definiert, um den Einfluss der Betriebspausen am Wochenende auszuschließen. Die Gleichung des Regressionsmodells hat folgenden Ausdruck:

$$y = a * e^{-b*x} \quad (5.2)$$

Die Vertrauensintervalle der Koeffizienten des Regressionsmodells, das den Daten der Simulation entspricht, sind für ein Konfidenzniveau von 95%:

$$a = 73.56 \quad (62.73, 84.38)$$

$$b = 0.01329(0.009332, 0.01726)$$

Die Parameter für die Daten von Bruck an der Mur sind:

$$a = 74.18 \quad (67.92, 80.43)$$

$$b = 0.01442 \quad (0.01189, 0.01696)$$

Die Simulation ist also fähig eine ähnliche Situation, wie die im Bruck an der Mur abzubilden.

5.3.2 Verteilung der Länge der Züge

Wie im Abschnitt 5.2 erläutert, folgt die Länge der Züge (nach der Anzahl der Wagen berechnet) einer Normalverteilung. Eine ähnliche Verteilung wurde daher als Parameter für die Länge der Züge in Simio eingestellt. Als Erwartungswert und Varianz dieser Verteilung wurden die Werte des Regressionsmodells gewählt nämlich $\mu = 15$ und $\sigma = 10$.

Der Vergleich wurde für 499 Zügen gemacht. In Abbildung 5.11 ist das Histogramm der zufallsgenerierten Wagenanzahl pro ankommenden Zug in der Simulation dargestellt. Als Vergleich wurde auch die angepasste Kurve zu den Daten von Bruck an der Mur erstellt.

Die Verteilung der Länge der ankommenden Zügen in der Simulation entspricht eher den Daten als die Verteilung der Länge der abfahrenden Zügen. In der Simulation ist eine Normalverteilung für die Länge der abfahrenden Nahzüge und der abfahrenden Direktzüge eingestellt worden, obwohl nur die Verteilung der Länge aller abfahrenden Züge in

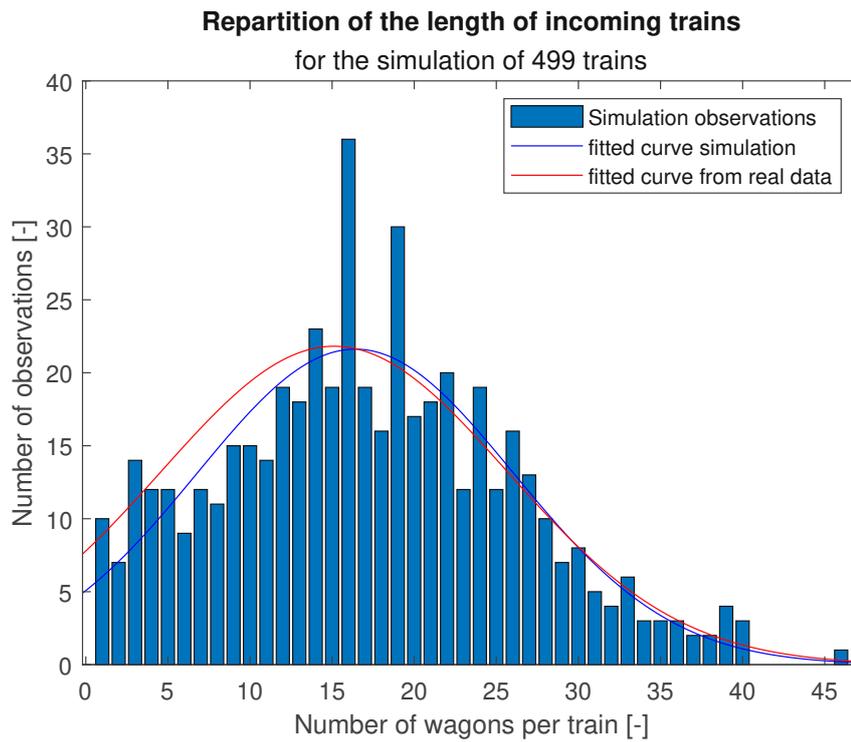


Abbildung 5.11: Verteilung der Wagenanzahl pro ankommenden Zug in Simio und angepasste Kurve der Daten von Bruck an der Mur

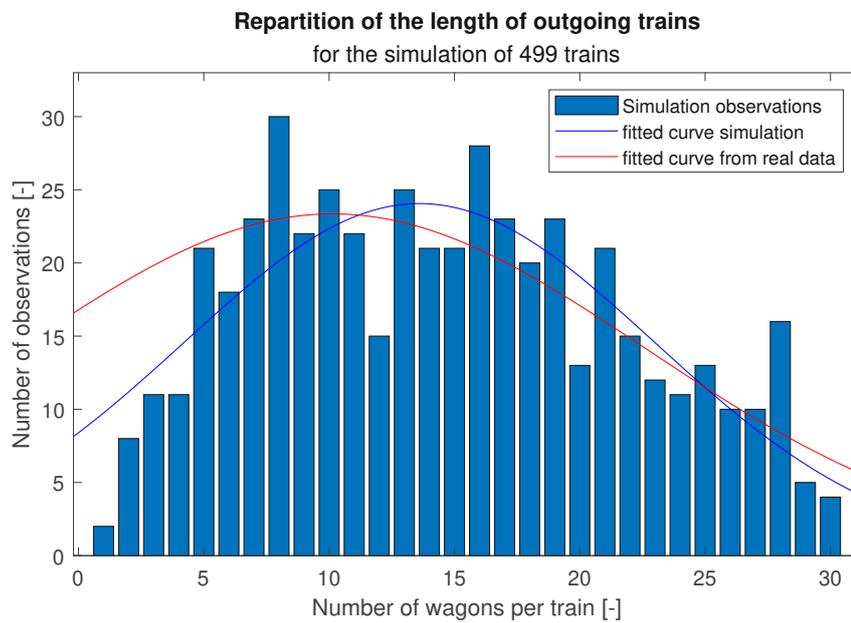


Abbildung 5.12: Verteilung der Wagenanzahl pro abfahrenden Zug in Simio und angepasste Kurve der Daten von Bruck an der Mur

5 VERIFIKATION UND VERGLEICH DER MODELLE

den Daten von Bruck an der Mur einer Normalverteilung entspricht. Die Verteilung der Länge der abfahrende Nahgüterzüge kann nicht durch eine Normalverteilung angenähert werden, weil viele Züge mit weniger als fünf Wagen vom Bahnhof abfahren.

Durch diese Analyse wurde bestätigt, dass die Wahl der Verteilung der Zwischenankunftszeiten und der Länge der Zügen sinnvoll ist. Die Simulation ist fähig reale Situation abzubilden.

Die Simulation kann also für die Untersuchung von Optimierungsmaßnahmen verwendet werden. Die Optimierungen, die in einer zukünftigen Arbeit in der Simulation implementiert werden könnten, werden im nächsten Kapitel beschrieben.

6 Optimierungsmöglichkeiten

Die Herausforderungen für den Schienengütertransport sind zahlreich. Im Artikel [Licciardello and Ricci, 2022] versuchen die Autoren, den *State of the Art* des gegenwärtigen Schienengüterverkehrs zu erheben und die aussichtsreichsten zukünftigen Technologien und Organisationen des Schienengütertransports zu sammeln. Sie listen Verbesserungsziele und Hindernisse auf, die der Schienentransport überwinden soll, um seinen Marktanteil zu erhöhen. Es handelt sich um mannigfaltige Themen, wie die Akzeptanz des Lärms, der durch die Vorbeifahrt des Zuges entsteht oder die notwendige Kooperation zwischen den Stakeholdern und zwischen den Staaten, damit Hindernisse für den internationalen Transport vermindert werden.

Ziel dieses Kapitels ist es, in der Fachliteratur zu recherchieren, welche optimierten Prozesse existieren, die zuerst in einer Simulation und dann in Österreich eingesetzt werden könnten, um das Dienstleistungsniveau zu erhöhen. Der Einzelwagenverkehr müsste attraktiver sein, damit die Verschiebebahnhöfe in ihrer vollen Kapazität genutzt werden können.

Dieser Verkehr steht in direkter Konkurrenz zum Lkw-Transport, der sehr flexibel und zuverlässig ist. Die Forschung bemüht sich darum, Lösungen zu finden, um diese beiden Punkte – eben die Flexibilität und die Zuverlässigkeit – im Gütertransport auf der Schiene zu verbessern. Eine bessere Beherrschung der Prozesse dank Automatisierung kann die Pünktlichkeit der Züge erhöhen. Dadurch können die Lieferzeiten reduziert und die Zuverlässigkeit des Lieferdatums erhöht werden. Eine Optimierung der Prozesse soll auch die Ressourcen besser verteilen und die Betriebskosten senken.

Die Forschung wurde dreifach unterteilt. In einem ersten Teil wurde die gesamte Literatur über die Optimierungen, die mit der Automatisierung des Betriebs der Bahnhöfe verbunden sind, gesammelt. In einem zweiten Teil wurde der Schwerpunkt auf die Optimierungen, die das Netz betreffen, gelegt. Schließlich wurden alternative Prozesse für den Vershub erforscht.

6.1 Automatisierung und Digitalisierung

Einführung der digitalen automatischen Kupplung (DAK)

Die Europäische Union hat sich bereits für die digitale automatische Kupplungen entschieden. Sie hat mehrere Forschungsprojekte im Rahmen des Programms Shift2Rail gefördert, die die Gestaltung zukünftiger Güterzüge vorbereiten. Die DAK wird die Prozesse im Bahnhof vereinfachen. Die Automatisierung sollte es erlauben, diese Prozesse zu beschleunigen. Die notwendige Arbeitszeit an den Wagen wird dadurch für die Arbeitsschritte Kuppeln und Entkuppeln reduziert. Diese Optimierung führt aber nicht direkt zu einer kürzeren Durchlaufzeit, weil letztere auch von der Infrastruktur abhängig ist. Ein Zeitgewinn stellt sich ein, solange der Bahnhof nicht überlastet ist. Eine Simulation ist ein angemessenes Werkzeug, um den tatsächlichen Einfluss der Reduktion der Arbeitszeiten auf die Durchlaufzeit der Wagen unter Berücksichtigung der Bahnhofskapazität und der stochastischen Ankunft zu berechnen.

Die Tabelle 6.1 fasst die geschätzten notwendigen Arbeitszeiten für den Vershub mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden zusammen. Diese Schätzung weicht von jenen der TU Dresden [Hecht et al., 2020] ab, die als Basis für die Simulation betrachtet wurde.

Die für die Bildung der neuen Züge aufgewendete Zeit ist sehr lange, insbesondere wegen der Inspektion. Diese Etappe wird in der Literatur als Engpass identifiziert [Marinov et al., 2014]. Die minimale Verweilzeit sollte durch die Einführung eines voll automatisierten Prozesses drastisch reduziert werden, und zwar um 60%. Diese Berechnungen gelten für den Fall, dass alle Wagen mit DAK ausgestattet sind. Der Übergang von der Ist-Situation zu dieser Situation wird lang dauern und ist selbst ein Untersuchungsgegenstand.

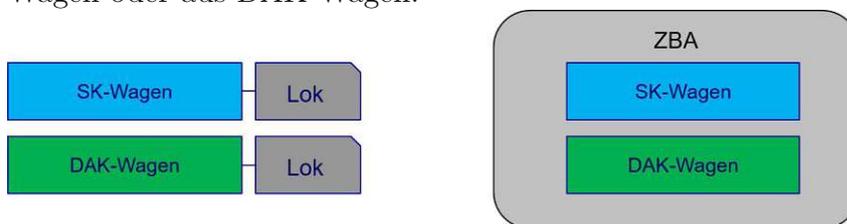
Tabelle 6.1: Considered process times [min] depending on automation scenario.

Quelle: [Pollehn et al., 2021]

Code	Process	Duration [min] per scenario		
		Conventional	Partial automation	Full automation
ARR	Arrival	5	5	5
UNC	Uncouple	25	20	5
HUM	Humping	15	15	15
COU	Couple	30	0	0
PUL	Pull	30	25	25
INS	Inspection	45	45	0
BRC	Brake check	15	10	10
DEP	Departure	5	5	5
Minimum dwell time		170	125	65

Der Übergang zu DAK kann in unterschiedlichen Szenarien stattfinden [König et al., 2020]. Diese Szenarien sind wichtig, da sie die Organisation des Verschubs völlig verändern.

- *Getrennte Verkehre*: In diesem Szenario werden die SK- und die DAK-Wagen unabhängig voneinander betrieben. Die Züge bestehen entweder ausschließlich aus SK-Wagen oder aus DAK-Wagen.



Quelle: TU Dresden

- *Gemischte Verkehre*: Züge verkehren als reine SK-Züge, gemischte Züge (SK- und DAK-Wagen) oder reine DAK-Züge. Zwischen den Wagengruppen in gemischten Zügen sollen Kupplungswagen eingesetzt werden, die beidseitig mit Hybridkupplungen ausgestattet sein müssen. Es gibt keine Mischzüge. In diesem Szenario kann der aktuelle Fortschritt der Umstellung anhand der Aufteilung zwischen SK-Zügen, gemischten Zügen und DAK-Zügen ermittelt werden.



Quelle: TU Dresden

6 OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Die berechneten Arbeitszeiten für diese zwei Szenarien sind in der Abbildung 6.1 zu sehen.

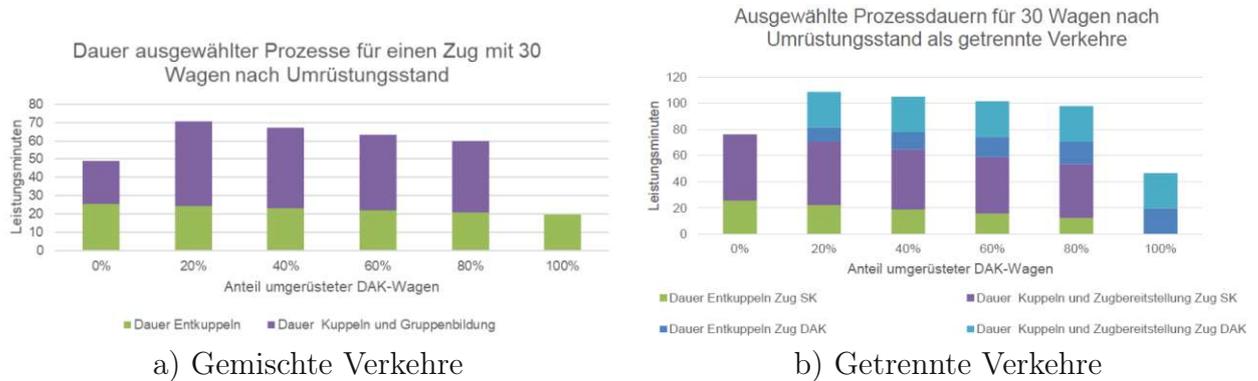


Abbildung 6.1: Prozessdauer für Standardzug mit 30 Wagen nach Umrüstungsstand Quelle: TU Dresden

Die Betriebsstrategie „gemischter Verkehr“ führt zu einem höheren zusätzlichen Verschubaufwand während der gesamten Migrationsphase. Die Arbeitszeit der Verschublok für den Verschub eines ganzen Zugs wird im Vergleich zum Status Quo um 20 % bis zu 75 % erhöht. Eine unkoordinierte Umrüstung über einen mehrjährigen Migrationszeitraum führt zu einer schnellen Überlastung der Zugbildungsanlage (ZBA). Der starke Anstieg der Zugzahlen bei der Betriebsstrategie „Getrennte Verkehre“ lässt im Migrationszeitraum eine bedeutende zusätzliche Belastung der ZBA erwarten. Erst bei vollständiger Umrüstung lassen sich dieselben Effekte wie bei der Betriebsstrategie „Gemischte Verkehre“ in Form einer deutlichen Zeitreduktion feststellen.

Diese Szenarien können in der Simulation durch die Einführung eines zusätzlichen Parameters (DAK, SK oder gemischt) implementiert werden. Die Beschränkungen für die Kupplung muss im Prozess eingestellt werden. Nicht alle Wagen für einen Ziel können gleichzeitig geschoben werden, wenn diese nicht dieselbe Kupplungsart haben. Der zusätzliche Platzbedarf, wenn zwei Gleise pro Zielrichtung zugewiesen werden sollen (ein Gleis für die SK-Wagen und ein Gleis für die DAK-Wagen) lässt sich einfach berechnet.

Sortieralgorithmen

Die Hauptprobleme der Optimierung in Verschiebebahnhöfen, die in der Literatur behandelt werden, sind in folgenden vier Punkten in [Deleplanque et al., 2022] zusammengefasst:

1. Das Problem der Zuteilung des Gleises für ankommende Züge:
In Bahnhöfen mit hoher Ankunftsrate warten mehrere Züge in der Einfahrgruppe, bevor sie zum Abrollberg verschoben werden. Im Ankunftsbereich müssen sie einem Gleis zugewiesen werden. Dieses Problem stellt sich besonders, wenn die Gleise im Ankunftsbereich lang genug sind, um zwei Züge aufnehmen zu können.
2. Das Problem der Zuteilung des Gleises für abfahrende Züge:
Grundsätzlich handelt es sich um dasselbe Problem wie bei der Zuteilung des Ankunftsgleises. Es bezieht sich auf große Verschiebebahnhöfe mit Abrollberg, die eine Ausfahrgruppe besitzen, wo die gebildeten Züge auf die Abfahrt warten.
3. Das Problem der Abrollfolge:
Wenn sich mehrere Züge gleichzeitig im Ankunftsbereich befinden, kann es effizienter sein, eine spezifische Reihenfolge für die Verschubfahrten zu wählen, statt die Wagenkolonnen nach dem Prinzip *first come first serve* zu behandeln.
4. Das Klassifizierungsproblem:
Dieses Problem bezieht sich auf die Reihenfolge der Wagen in den abfahrenden Zügen. In einigen Bahnhöfen werden die Wagen nachsortiert. Das heißt, dass die sich schon in den Verschubgleisen befindenden Wagen, zurück zum Abrollberg gebracht werden, um wieder über den Abrollberg zu fahren.

Die Fachliteratur konzentriert sich dabei fast ausschließlich auf das Sortierproblem (auch *train marshalling problem* genannt). In den meisten Fällen ist das Ziel der Optimierung die Minimierung der verwendeten Verschubgleise. Bei mehrstufigen Sortierprozessen besteht die Zielsetzung darin, die minimale Sortierstufenanzahl zu erlangen. Für diese Probleme werden zahlreiche Algorithmen entwickelt.

Hingegen wird selten erforscht, wie die defekten Wagen entfernt werden sollen. Der größte Teil der Forschung betrachtet den Verschub mit Abrollberg, der der effizienteste sei. Die Forschung findet allerdings auch mehr Anwendungsmöglichkeiten in diesem Bereich, da die große Mehrheit der Verschiebebahnhöfe mit hohem Transportaufkommen, jene mit Abrollberg sind.

Andere Technologien

Die Einführung von neuen Technologien in den Verschiebebahnhöfen kann zur Beschleunigung des ganzen Verschiebeprozesses beitragen. Die folgenden Abschnitten stellen die neuen Technologien vor, die in der Literatur behandelt werden. Der spezifische Einfluss von jeder Technologie auf die Durchlaufzeit der Wagen soll in einer Simulation untersucht werden.

Im Artikel [Aronian et al., 2012] wurde vorgeschlagen, die Bremstests zu automatisieren. Dafür sollen Geräte an den Bremsen befestigt werden, die den Leistungsgrad der Bremsen messen. Die Ergebnisse der Messung werden dem Lokführer geschickt. Die Sicherheit des Zuges wird dadurch erhöht, da so kleine Defekte früher aufgedeckt werden können. Nur noch ein Mitarbeiter ist für diesen Arbeitsschritt notwendig, statt zwei wie bei einer visuellen Kontrolle.

Im Artikel [Marinov et al., 2014] werden mehrere Optimierungsmöglichkeiten erwähnt wie:

- der Einbau von automatischen Scannern, die die Waggons automatisch erkennen, womit der Personalbedarf geringer wird.
- die Qualität des Sortierprozesses zu erhöhen (wichtiger als die Quantität zu erhöhen) (Dirnberger and Barkan, 2007).

Mit der Digitalisierung verbunden ist die Frage des Datenmanagements der Wagen. Die Verschiebefahrten sind nicht im Voraus geplant, das heißt, es sind kaum Informationen über den Verschiebeprozess vorhanden. Grundsätzlich gibt es einen geringen Informationsaustausch zwischen den Stakeholdern. Die Eigentümer der Wagen haben diese mit GPS ausgestattet, um in Echtzeit zu wissen, wo sich ihre Wagen befinden und vielleicht auch eine mögliche Verspätung vorherzusehen. Diese Daten werden mit der Leitung der Verschiebebahnhöfe aber nicht geteilt. Durch RFID oder ähnliche Technologien könnten die Wagen direkt identifiziert werden. Durch die DAK könnte jede Wagenbewegung registriert werden, solange ein Wagen mit einer Lok gekuppelt ist. In dieser Weise ist der Ort, an dem sich die Wagen befinden, immer am Computer abrufbar. Durch ein kluges Datenmanagement, das von der Supply Chain inspiriert ist, könnten diese Informationen zu den Kunden geschickt werden. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten.

Die Automatisierung des Managements in Güterbahnhöfen soll dazu beitragen, mehr Daten zu sammeln, um KPIs erzeugen zu können und letztendlich Zusammenhänge zwischen den messbaren Größen durch Machine Learning festzustellen [Adlbrecht et al., 2015].

6.2 Kombinierte Optimierung von Netz und Verschiebebahnhöfen

Der Schienentransport ist besonders für lange Strecken adaptiert [Islam et al., 2016]. Der Anteil des Schienengütertransports auf Strecken, länger als 300 km, beträgt 25% des gesamten Tonnenkilometeraufkommens im Schienen- und Straßtransport, während der Anteil auf Strecken, kürzer als 300 km nur 10% beträgt. Auf längeren Strecken erweist sich der Schienengüterverkehr als flexibel und schnell. Zum Beispiel erreichen Container auf dem Weg China-Europa mit Zügen schneller ihr Ziel als mit Schiffen. Deswegen blüht die Erforschung des Schienengütertransports gerade in China [Xiao and Lin, 2016].

Die Forschung zur Optimierung des Schienengütertransports interessiert sich in größerem Umfang für das Schienennetz [Boysen et al., 2012]. Bahnhöfe sind die Knoten des Netzes. Wo sollen Verschiebebahnhöfe gebaut werden, um die Leistung des Netzes zu erhöhen? Sollen Verschiebebahnhöfe abgebaut werden? Auf der Planungsebene für die Fahrplanerstellung ist die Literatur ebenfalls umfangreich. Die Güterzüge können sich aber verfrühen oder verspäten, was zu Änderungen im Fahrplan führen kann. An der Anpassung des Fahrplans wird auch geforscht [Spanninger et al., 2022].

Die Qualität des Schienengütertransports soll durch die Einführung von Elementen des Supply Chain Managements verbessert werden. KPIs und entsprechende digitale Geräte im Bahnhof sollen dabei helfen, Informationen über die Wagen und die Auslastung der Verschiebebahnhöfe in Echtzeit zu erhalten und sie mit den anderen Kettengliedern zu teilen. Dadurch soll der gesamte Prozess beschleunigt werden [Licciardello and Ricci, 2022].

Die Europäische Union ist am Schienengütertransport interessiert, weil diese Art von Transport weniger CO₂ Ausstoß pro Tonne als Straßenverkehr verursacht. Den Schienenanteil im Güterverkehr zu erhöhen, ist eine ihrer Vorgaben, damit die Zielsetzung für die Reduzierung des CO₂ Ausstoßes bis 2030 erreicht werden kann. Deswegen unterstützt die EU große Forschungsprojekte im Bereich Schienenverkehr.

OptiYard bietet ein Entscheidungswerkzeug, welches das umgebende Netzwerk berücksichtigt, um einen reibungslosen Verschub zu gewährleisten, der für die globale Effizienz der Transportkette unerlässlich ist. Dieses Projekt hat es sich zum Ziel gesetzt, den Status des Netzes in Echtzeit zu ermitteln und diesen als Input für das Management des Verschiebebahnhofes zu implementieren. Die Informationen über den Bahnhof sollen auch vom Netz übernommen werden, damit sich das Netz in Rückkoppelung je nach Zustand im Bahnhof adaptieren kann. OptiYard ist Teil des Shift2Rail Konsortiums.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Simulation namens Villon entwickelt. In dieser Simulation werden alle vier im Abschnitt 6.1 Sortieralgorithmen gelisteten Optimierungsprobleme gelöst.

Mit der Digitalisierung des Betriebs des Bahnhofes können Daten, wie der Grad der Auslastung des Bahnhofes mit der Durchlaufzeit der Wagen verknüpft werden. So könnte den Zugführern kurzfristig Bescheid gegeben werden, wenn die Wartezeiten im Bahnhof hoch sind. So können die Züge zu einem anderen Bahnhof umgeleitet werden, damit die Wagen schneller an ihr Ziel kommen. Diese Maßnahme fällt unter das Ziel Entlastung von „Engpassabschnitten durch Umleiten von Zügen über andere Strecken“ [Pachl, 2021].

Ziel einer Simulation für den Automatischen Betrieb eines Bahnhofes ist auch die Daten, die bewertet sein können, zu identifizieren. In der Simulation wurden viele KPIs implementiert, um ein umfassendes Verständnis der Prozesse und Engpässe zu erlangen.

6.3 Alternative Prozesse

Einführung von Prioritäten zwischen den Wagen

In der Simulation wurde die Reihenfolge der Waggonen in abfahrenden Zügen nicht berücksichtigt. Die Wagen wurden nicht im Voraus einem spezifischen abfahrenden Zug zugeteilt. Es wäre interessant zu analysieren, welchen Einfluss die unterschiedlichen Organisationsformen im Bahnhof auf die Gesamttransferdauer für jeden Wagen und je nach Priorität haben. Mit dieser Unterscheidung zwischen den Wagen kann leeren Wagen die geringste Priorität gegeben werden [Jaehn et al., 2015].

Einschlägige Artikel schlagen vor, den verschiedenen Wagen unterschiedliche Prioritäten zu geben. In der einfachsten Form haben volle Wagen Vorrang gegenüber leeren Wagen. Bektaş et al. schlagen vor, die Leistung eines Verschiebebahnhofes durch ein spezifisches Management der leeren Wagen zu erhöhen [Bektaş et al., 2009].

Wenn ein leerer Wagen seinen Anschluss verpasst hat, wird er in der Regel der nächsten Abfahrt desselben Zuges zugewiesen, der in ein paar Stunden oder in ein paar Tagen abfahren kann. Es ist jedoch möglich, solche Wagen zu einem anderen Zug umzuleiten. Dieser Artikel behandelt das Problem der dynamischen Neuordnung leerer Wagen zu abgehenden Zügen, so dass die Durchlaufzeit der leeren Wagen im Verschiebebahnhof so weit wie möglich reduziert wird, wobei die folgenden Bedingungen erfüllt werden müssen:

- Die Blockzusammenstellung in Bezug auf die Anzahl und die Art der leeren Wagen sollte die gleiche bleiben wie ursprünglich geplant.
- Die Kapazität und Zusammensetzung der abfahrenden Züge müssen beibehalten werden.
- Jeder Wagen sollte genau einem ausgehenden Zug zugewiesen werden.

In der Fallstudie von Bektaş et al. wurden Daten von CN über den Verschiebebahnhof MacMillan übernommen. Die Daten erstrecken sich über eine Woche. 21 % aller Wagen sind für Neuordnungen geeignet. Durchschnittlich könnte bis 4.98 % der gesamten Durchlaufzeit aller Wagen eingespart werden.

Die Prioritätstufe der Wagen könnte in den Eigenschaften der Entitäten in der Simulation implementiert werden. So könnte die tatsächliche mögliche Verkürzung der Durchlaufzeit der Wagen mit hoher Priorität im Verschiebebahnhof berechnet werden. Einige Wagen zu bevorzugen könnte auch die Gesamtleistung des Bahnhofes verringern, weil die Komplexität der Prozesse dadurch erhöht wird.

Zwei-Block Züge

Eine Mischung zwischen den Ganzzügen und dem Einzelwagenverkehr ist der Blockzug. Ein Zug besteht dabei aus mindestens zwei Blöcken. Der Zug fährt vom Bahnhof A durch Bahnhof B zum Bahnhof C. Der erste Block bleibt während der ganzen Fahrt im Zug. Der zweite Block hingegen fährt nur einen Teil der Strecke mit und wird im Laufe der Strecke gewechselt. Die Abbildung 6.2 erklärt das Prinzip von Blockzügen.

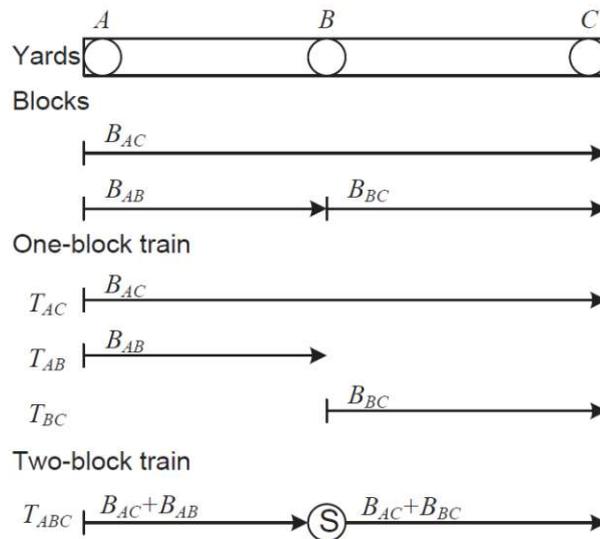


Abbildung 6.2: Definition von Ein-Block-Zug und Zwei-Block-Zug
Quelle: [Xiao and Lin, 2016]

Zwischen den Bahnhöfen A und C wird der Zug nicht sortiert. Er hält sich aber im Bahnhof B auf, lässt einen Block dort und holt einen anderen. Der neue Block wurde im Bahnhof B im Voraus gesammelt und für die Abfahrt vorbereitet, aber es wurde kein Zug gebildet. Dieses System erfordert eine genaue Koordinierung. Die Sammelzeit für einen Block ist kürzer als die für einen ganzen Zug. Die Züge fahren also regelmäßiger zu Bahnhöfen mit mittlerem Transportaufkommen.

In den Verschiebebahnhöfen dürfen keine Züge verkehren. Der erste Arbeitsschritt im Vershubprozess ist die Entkupplung der Zuglokomotive. Die zweiblöckigen Züge können also nicht mit den bestehenden Prozessen behandelt werden, neue Prozesse müssen spezifisch für dieser Art des Verkehrs entwickelt werden.

Die Schlussfolgerung des Artikels [Xiao and Lin, 2016] ist, dass sich durchschnittlich im Vergleich zu einblöckigen Zügen durch eine Optimierung mit zweiblöckigen Zügen bis zu 15.9% des gesamten Zeitaufwands für jeden Wagen reduzieren lässt. Diese Schlussfolgerung könnte auch durch die Simulation geprüft werden.

Neue Infrastruktur

In diesem letzten Abschnitt wird von anderen Organisation von Bahnhöfen, die eine neue Infrastruktur benötigen, berichtet, die also in der gebildeten Simulation nicht abgebildet werden könnten. Die Infrastruktur für den Schienentransport ist kostenintensiv. Der Preis des Verschiebs der Wagen entsteht größtenteils aus den Kosten für die Instandhaltung der Infrastruktur. Die einsetzbaren Optimierungen hängen von der vorhandenen Infrastruktur ab. Eine komplett neue Organisation mit einer neuen Infrastruktur kann für zukünftige Bahnhöfe geplant werden, aber ist wegen der hohen Investitionskosten in existierenden Bahnhöfen nicht umsetzbar. Es ist aber interessant zu merken, dass neue Verschiebebahnhöfen auf ein völlig unterschiedliches Muster aufgebaut werden.

Das verbreitetste Design eines Güterbahnhofs ist das Muster eines Verschiebebahnhofes mit Abrollberg. Allerdings tauchen andere sogenannte moderne Designs auf. Die Umschlagplätze für Container zwischen Wasser und Erde können in der Forschung ein Modell für Schiene-Schiene Umschlagplätze mit Kränen sein [Deleplanque et al., 2022], [Fedtke and Boysen, 2017]. Die Container werden von einem Zug zu einem anderen mithilfe eines Portalkranes bewegt. Die Container können auch mittels Stetigförderer (*Conveyors*) befördert werden.

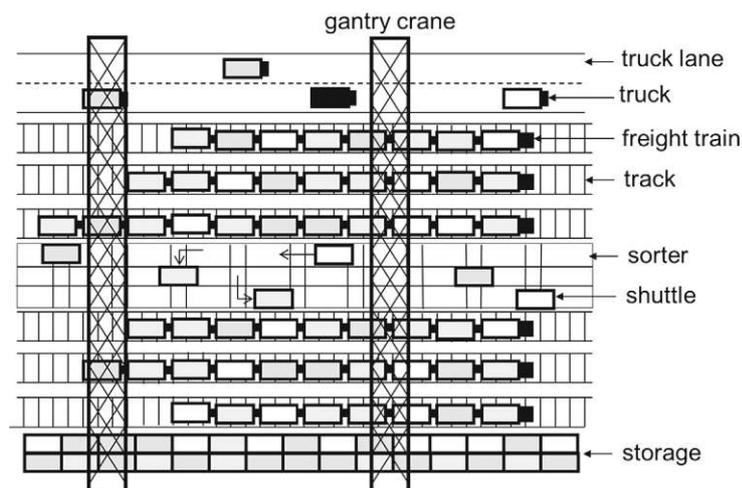


Abbildung 6.3: Schematischer Aufbau eines modernen Schiene-Schiene-Umschlagterminals

Quelle: [Fedtke and Boysen, 2017]

6 OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Ein Vorteil von Verschiebebahnhöfen besteht darin, jede Art von Waggons sortieren zu können. Laut Statistik Austria spielt der Container-Verkehr keine überwiegende Rolle [Austria, 2022]. 20 % der Wagen, deren Fahrt in Österreich beginnt oder beendet, sind Container. Je nach Region und den Betrieben, die in der Nähe liegen, kann man ein höheres oder niedriges Containeraufkommen beobachten. Die Schienen-Schienen Umschlagplätzen mit Portalkran sind nicht die geeignetsten, um die klassische Verschiebebahnhöfe in Österreich zu ersetzen, da Containers nur einen geringen Teil der transportierten Güter ausmachen.

Die einschlägige Fachliteratur interessiert sich auch für die Einführung selbstfahrender Wagen. Der Gewinn für die Durchlaufzeit könnte 30 % erreichen [Licciardello and Ricci, 2022]. Die Investitionskosten sind sehr hoch, deswegen ist Europa abgeneigt, diese Lösung in Erwägung zu ziehen.

Die Zukünftigen Verschubprozesse wurden in diesem Kapitel zusammengefasst. Diese Optimierungen sollten in der Simulation implementiert werden, um ihren Beitrag zur Reduktion der Durchlaufzeit der Wagen in ebenen Verschiebebahnhöfen bewerten zu können. Die Zukunft des Verschubs auf lange Frist ist vielleicht nicht in der Optimierung der vorhandenen Prozesse zu finden, sondern in neuen flexibleren Bahnhofsmustern.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit lag darin herauszufinden, wie sich die Prozesse in flachen Verschiebebahnhöfen ohne Abrollberg simulieren lassen, um so mögliche Optimierungen, die die Durchlaufzeit der Wagen im Bahnhof reduzieren können, zu finden.

Zu diesem Zwecke war es zunächst notwendig, die theoretischen Grundlagen der Organisation des Schienengüterverkehrs zu ermitteln. Insbesondere das Knotenpunktsystem und die unterschiedlichen Arten von Güterzügen waren dabei relevant. Auch der Vershub in den unterschiedlichen Verschiebebahnhöfen musste erläutert werden, wobei zwischen Bahnhöfen mit Gefälle, flachen Bahnhöfen mit Abrollberg und flachen Bahnhöfen ohne Abrollberg unterschieden werden muss. Gemäß der zugrundeliegenden Fragestellung lag der Schwerpunkt des Interesses dabei auf den Abläufen in flachen Bahnhöfen ohne Abrollberg. Diese Art von Bahnhöfen war von der Forschung bislang vernachlässigt worden, weshalb hier seitens der ÖBB Infra ein besonderer Bedarf nach einer Simulation bestand. Als einen exemplarischen flachen Bahnhof ohne Abrollberg wählten die Experten der ÖBB den Frachtenbahnhof Bruck an der Mur, weil dieser der einzige Vershubknoten ohne Abrollberg ist.

Erst auf Grundlage dieser präzisen Erfassung des ganzen Vershubprozesses war es möglich, zwei Simulationen zu erstellen. Die erste Simulation ist ein analytisches Modell, das mit Matlab codiert wurde, die zweite ein stochastisches Modell, welches mit Simio implementiert wurde. Die Struktur eines jeden Modells wurde klar und deutlich dargestellt und die Ergebnisse wurden wiedergegeben. Danach wurden die zwei Simulationen miteinander verglichen, um sie zu validieren. Das Praxisbeispiel wurde analysiert und seinerseits mit der stochastischen Simulation verglichen.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zuletzt wurde eine Literatuarbeit durchgeführt, um die möglichen Optimierungen, mithilfe derer die Durchlaufzeiten der Wagen im Verschiebebahnhöfen reduziert und der Schienentransport allgemein attraktiviert werden könnte und die in der Simulation implementiert könnten, aufzuzeigen. Die folgenden Aspekte wurden berücksichtigt:

1. die Einführung von neuen Technologien in Verschiebebahnhöfen;
2. das Datenmanagement und die Nutzung dieser Daten, um mögliche Optimierungen dank des Austausches nach dem Supply Chain Management Prinzip zu entwickeln;
3. die alternativen Prozesse, die mit der derzeitigen Infrastruktur nicht einsetzbar sind.

Die Simulation wurde in Simio modular aufgebaut, damit Aspekte, die zunächst vernachlässigt wurden, später implementiert werden können. Das Ziel ist auch, in die Simulation neue Prozesse einzubauen und ihre Auswirkungen auf die Leistung und die Kosten zu messen. Innerhalb der vorgegebenen Zeit für die Diplomarbeit konnte mit der Simulation leider kein Optimierungsvorschlag untersucht werden.

Die Forschung im Bereich der Simulation wird sich auf absehbare Zeit auf die Sortieralgorithmen konzentrieren. Für die Automatisierung des Betriebes eines Verschiebebahnhöfes müssen die Sortieralgorithmen klar gesetzt werden. Die Wagen können nicht mehr nach Schätzung verschoben werden.

Die Optimierungen in den einzelnen Bahnhöfen können nicht unabhängig vom Netz betrachtet werden. Österreich befindet sich wortwörtlich inmitten des Europäischen Schienennetzes. Die Forschung muss die Lage auf europäische Ebene analysieren. Deswegen stellt das Konsortium Shift2Rail die Zukunft für den europäischen Schienengütertransport dar.

Die ganze Neuorganisation des Schienengüterverkehrs kann nicht auf einmal umgesetzt werden. Es wäre aber interessant, die Vorteile in der Ausrichtung des Schienentransports auf anderen Kontinenten zu beobachten, um möglicherweise einige Elemente davon im Europäischen Netz nachzuahmen.

Als Fortsetzung dieser Arbeit könnten einige Optimierungen, die im letzten Kapitel zusammengefasst sind, untersucht werden. In diesem Sinn scheint die Einführung von Mischgleisen und von Prioritäten zwischen den Wagen besonders relevant. In der Simulation wurde die Annahmen getroffen, dass der Bahnhof mehr Gleise als notwendig mit der derzeitigen Ankunftsrate hat. Den Einfluss von Mischgleisen für die Ziele mit wenig

Aufkommen auf der Durchlaufzeit sollte berücksichtigt werden. Diese Optimierung könnte wieder das Hauptproblem von Verschiebebahnhöfen werden, wenn der Einzelwagengüterverkehr gegenüber Lkws an Boden gewinnt [Bohlin et al., 2011].

Literaturverzeichnis

- [Adlbrecht et al., 2015] Adlbrecht, J.-A., Hüttler, B., Ilo, N., and Gronalt, M. (2015). Train routing in shunting yards using answer set programming. *Expert Systems with Applications*, 42(21):7292–7302.
- [Aronian et al., 2012] Aronian, A., Jamieson, M., and Wachs, K. (2012). Automated train brake effectiveness (atbe) test process at canadian pacific. In *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, volume 44656, pages 173–181. American Society of Mechanical Engineers.
- [Austria, 2022] Austria, S. (2022). Güterverkehr schiene. [Online; accessed 16-August-2022].
- [Bektaş et al., 2009] Bektaş, T., Crainic, T. G., and Morency, V. (2009). Improving the performance of rail yards through dynamic reassignments of empty cars. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(3):259–273.
- [Bensch, 2021] Bensch, S. (2021). Zahlen daten fakten. *ÖBB-Holding AG*.
- [Bohlin et al., 2011] Bohlin, M., Flier, H., Maue, J., and Mihalák, M. (2011). Track Allocation in Freight-Train Classification with Mixed Tracks. In Caprara, A. and Kontogiannis, S., editors, *11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, volume 20 of *OpenAccess Series in Informatics (OASISs)*, pages 38–51, Dagstuhl, Germany. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- [Boysen et al., 2012] Boysen, N., Fliedner, M., Jaehn, F., and Pesch, E. (2012). Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications. *European Journal of Operational Research*, 220(1):1–14.

- [Deleplanque et al., 2022] Deleplanque, S., Hosteins, P., Pellegrini, P., and Rodriguez, J. (2022). Train management in freight shunting yards: Formalisation and literature review. *IET Intelligent Transport Systems*.
- [Dirnberger and Barkan, 2007] Dirnberger, J. R. and Barkan, C. P. (2007). Lean railroading for improving railroad classification terminal performance: bottleneck management methods. *Transportation Research Record*, 1995(1):52–61.
- [Eurostat, 2022] Eurostat (March 2022). Freight transport statistics - modal split. [Online; accessed 16-August-2022].
- [Fedtke and Boysen, 2017] Fedtke, S. and Boysen, N. (2017). A comparison of different container sorting systems in modern rail-rail transshipment yards. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 82:63–87.
- [für Klimaschutz, 2021] für Klimaschutz, B. (2021). Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich.
- [Hausmann and Enders, 2017] Hausmann, A. and Enders, D. H. (2017). *Grundlagen des Bahnbetriebs*. DB-Fachbuch. Bahn Fachverlag, Berlin, 3. überarbeitete und erweiterte auflage. edition.
- [Hecht et al., 2020] Hecht, M., Leiste, M., and Discher, S. (2020). Erstellung eines konzeptes für die eu-weite migration eines digitalen automatischen kupplungssystems (dak) für den schienengüterverkehr.
- [Islam et al., 2016] Islam, D. M. Z., Ricci, S., and Nelldal, B.-L. (2016). How to make modal shift from road to rail possible in the european transport market, as aspired to in the eu transport white paper 2011. *European transport research review*, 8(3):1–14.
- [Jaehn et al., 2015] Jaehn, F., Rieder, J., and Wiehl, A. (2015). Minimizing delays in a shunting yard. *OR Spectrum*, 37(2):407–429.
- [Janicki, 2021] Janicki, J. (2021). *Systemwissen Eisenbahn*. DB-Fachbuch. Bahn Fachverlag, Berlin, 3. überarbeitete auflage. edition.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

- [König et al., 2020] König, R., Pollehn, T., and Ruf, M. (2020). Simulation parallelbetrieb von schraubenkupplung und digitaler automatischer kupplung (dak) in zugbildungsanlagen - erstellung eines konzeptes für die eu-weite migration eines digitalen automatischen kupplungssystems (dak) für den schienengüterverkehr. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI*.
- [Licciardello and Ricci, 2022] Licciardello, R. and Ricci, S. (2022). Present and future of rail freight: Problems and challenges. In *Modern Trends and Research in Intermodal Transportation*, pages 405–449. Springer.
- [Marinov et al., 2014] Marinov, M., Giovanni, L., Bellisai, G., Clevermann, J., Mastellou, A., Victória, D., and Deleva, L. (2014). Analysis of rail yard and terminal performances. *Journal of Transport Literature*, 8:178–200.
- [Marinov and Viegas, 2009] Marinov, M. and Viegas, J. (2009). A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(6):1106–1129.
- [Martín et al., 2017] Martín, E., Dombriz, M., and Soley, G. (2017). Study of the state of the art and description of kpi and kri of terminals, hinterland mobility and rail network. *Intermodel EU Project*.
- [OEBB-Infrastruktur GB Betrieb, 2022] OEBB-Infrastruktur GB Betrieb (2022). Standorte 2023.
- [Pachl, 2021] Pachl, J. (2021). *Systemtechnik des Schienenverkehrs : Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. Lehrbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 10., überarbeitete und erweiterte auflage. edition.
- [Pollehn et al., 2021] Pollehn, T., Ruf, M., and König, R. (2021). Evaluating the effects of automation components in service networks of rail freight. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 20:100267.
- [Spanninger et al., 2022] Spanninger, T., Trivella, A., Büchel, B., and Corman, F. (2022). A review of train delay prediction approaches. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 22:100312.

- [Xiao and Lin, 2016] Xiao, J. and Lin, B. (2016). Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3):218–236.

Anhang

A Prozesse im Bahnhof

B Vershubprozessen mit und ohne Puffer Position

Prozess: Abholung auf Strecke

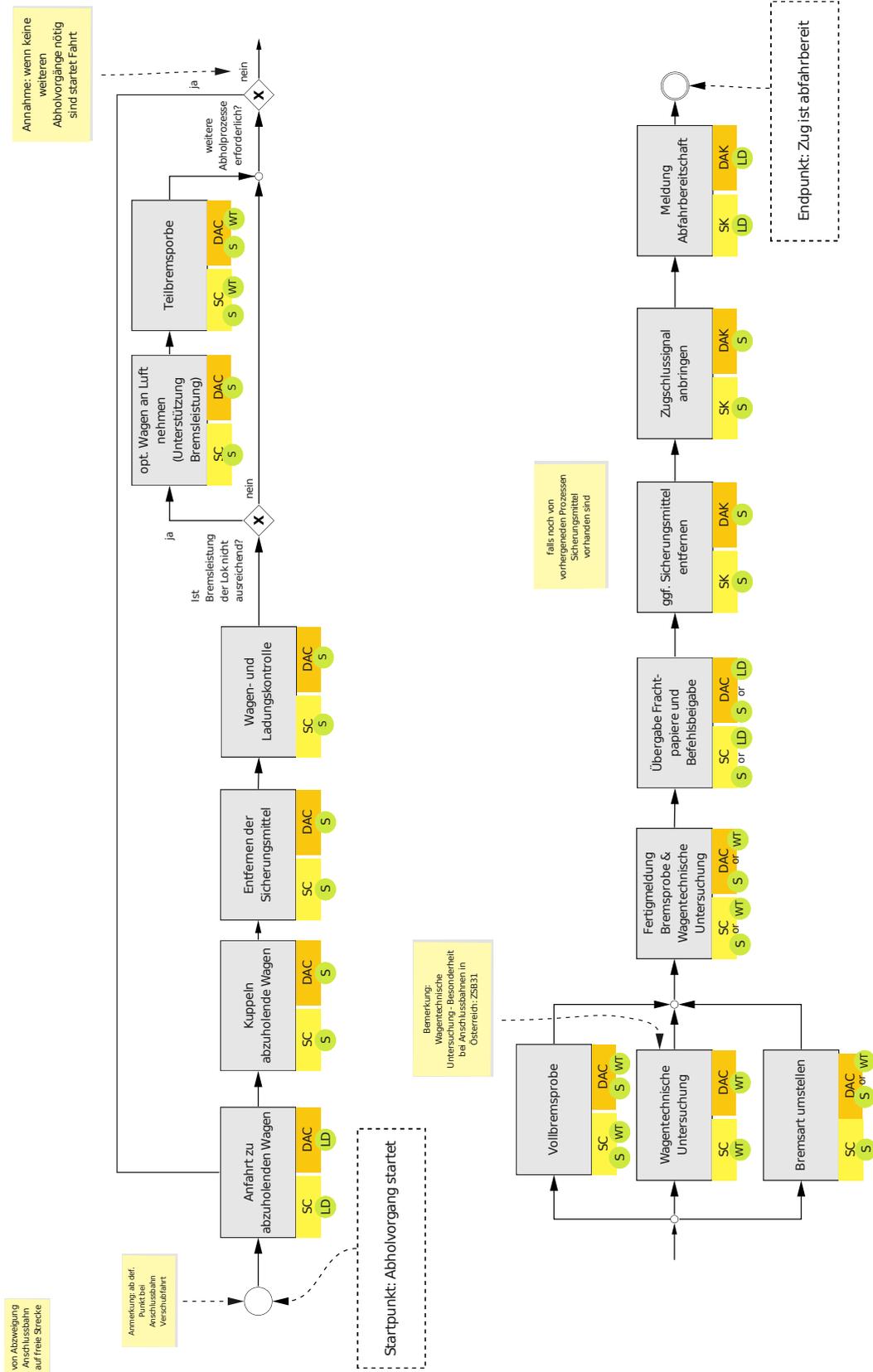


Abbildung 7.1: Prozess Abholen von Wagengruppen

Prozess: Beistellen auf Strecke und Bahnhof

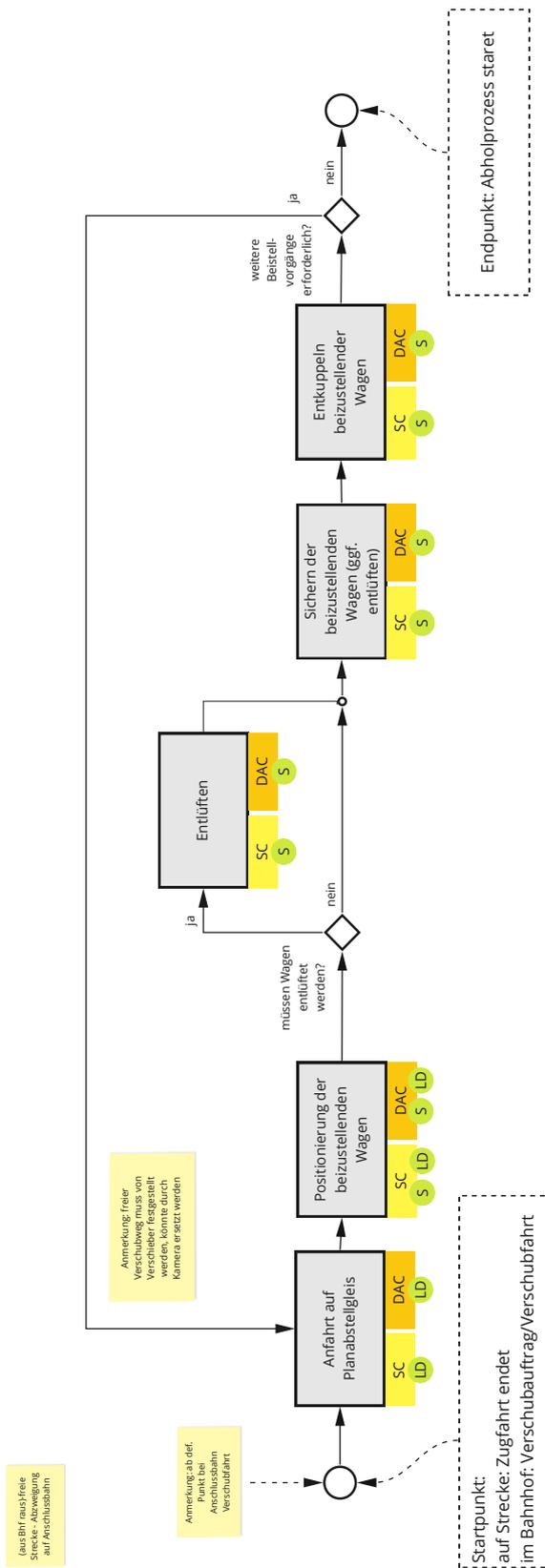


Abbildung 7.2: Prozess Beistellen von Wagengruppen

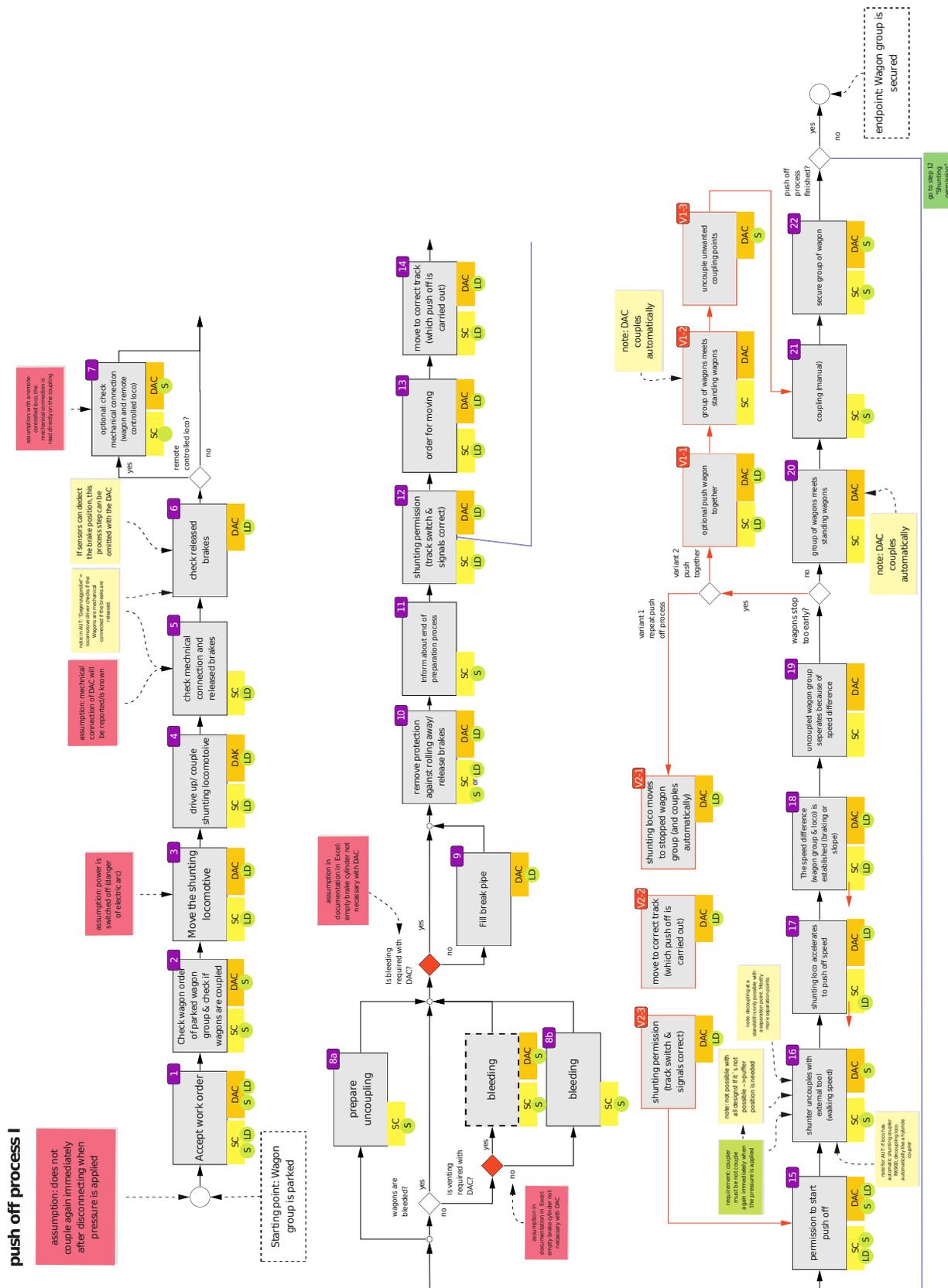


Abbildung 7.3: Prozess Verschub ohne Puffer Position

