



**School of
Engineering**

IDP Institut für Datenanalyse
und Prozessdesign

Bachelorarbeit (Verkehrssysteme)

Entwicklung einer Methode und Kalkulationstabelle zur Anschlussoptimierung des ÖSPV an Schweizer Bahnknoten

Autoren

Christof Kraft
Dominic Thalmann

Hauptbetreuung

Dr. Stephan Bütikofer

Nebenbetreuung

Prof. Dr. Raimond Wüst

Industriepartner

Stadtbus Winterthur

Externe Betreuung

Stefan Gerber
Tobias Keller

Datum

10.06.2022

Selbstständigkeitserklärung

Erklärung betreffend das selbstständige Verfassen einer Bachelorarbeit an der School of Engineering

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat. (Bei Gruppenarbeiten gelten die Leistungen der übrigen Gruppenmitglieder nicht als fremde Hilfe.)

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle zitierten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt nachgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten die Paragraphen 39 und 40 (Unredlichkeit und Verfahren bei Unredlichkeit) der ZHAW Prüfungsordnung sowie die Bestimmungen der Disziplinarmaßnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Uzwil, 10.06.2022

Winterthur, 10.06.2022

Name Studierende:

Christof Kraft_____

Dominic Thalman_____

Zusammenfassung

Für den öffentlichen Verkehr sind funktionierende Anschlüsse zentral. Die Planung von Anschlüssen des ÖSPV (Öffentlicher Strassenpersonennahverkehr) an Bahnknoten ist sehr arbeits- und zeitintensiv. Diese Planung soll vereinfacht werden.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer auf die Schweizer Gegebenheiten zugeschnittenen Optimierungsmethode und einer userfreundlichen Anwendung mit einer Kalkulationstabelle. Diese Arbeit wurde als Einzelfallstudie in enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Stadtbus Winterthur erarbeitet.

Der Arbeitsaufwand für das bei Stadtbus Winterthur bisher verwendete Vorgehen zur Bestimmung der optimalen Ankunfts- und Abfahrtszeiten an einem Umsteigeknoten ist sehr gross. Zudem kann lediglich ein Knoten berücksichtigt werden.

Es gibt viele Studien, die ähnliche Probleme eines TCDP (transfer coordination design problem) behandeln. Diese lassen sich aber nicht auf das Schweizer System mit einem Integralen Taktfahrplan und weiteren Besonderheiten übertragen. So wurden keine Studien zu Anpassungen in ausgewählten Knoten an ein übergeordnetes System mit fixem Fahrplan (in der Schweiz ist dies die Bahn) gefunden. Oft sind die Lösungen in der Literatur nicht primär userorientiert.

Aus der Arbeit resultiert ein Tool, mit dem für die Periodenzeit von einer Stunde für 30 ÖSPV-Linien eine Optimierung der Anschlüsse durchgeführt werden kann. Am Hauptknoten können 50 ankommende und 50 abfahrende Züge mit individueller Gewichtung berücksichtigt werden. Je ÖSPV-Linie können die Anschlüsse an einem zusätzlichen, frei wählbaren Sekundärknoten optimiert werden. An jedem Sekundärknoten können jeweils 30 ankommende und 30 abfahrende Züge mit einer individuellen Gewichtung berücksichtigt werden.

Als Methode wurde ein mathematisches Modell und für die Anwendung eine Kalkulationstabelle entwickelt. Das mathematische Modell beschreibt den Prozess der Anschlussoptimierung als Minimierungsproblem. In der Kalkulationstabelle ist eine vollständige Enumeration des Minimierungsproblems mithilfe von VBA-Code integriert. Zudem sind zur Analyse mehrere Blätter mit Diagrammen enthalten.

Die entwickelte Methode und das dazugehörige Tool bieten eine gute Möglichkeit, um Fahrplanoptimierungen im Arbeitsalltag der Angebotsplanung zu ermöglichen. Dies war bisher nicht möglich. Der Prozess der Angebotsplanung wird dabei unterstützt, jedoch keinesfalls ersetzt.

Zur Weiterentwicklung des Tools bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, beispielsweise die Implementierung von weiteren Funktionen oder Verbesserungen des Codes.

Abstract

Functioning connections are essential for public transport. The planning of connections for public road transport at railway nodes is very time-consuming. This planning needs to be simplified.

The goal of this thesis is the development of an optimisation method tailored to Swiss requirements and a user-friendly application with a spreadsheet. This work was developed as a single case study in close cooperation with the industrial partner Stadtbus Winterthur.

The workload for the procedure used so far by Stadtbus Winterthur to determine the optimal arrival and departure times at a transfer node is very high. In addition, only one node can be included.

There are many studies that address similar problems of a TCDP (transfer coordination design problem). However, these cannot be transferred to the Swiss system with an integral interval timetable and other unique features. So, no studies were found on adaptations in selected nodes to a higher-level system with a fixed timetable (in Switzerland this is the railway). Often the solutions in the literature are not primarily user-oriented.

The result of the work is a tool that can be used to optimise connections of 30 public transport lines based on a one-hour period. At the main node, 50 arriving and 50 departing trains can be taken into account with individual weighting. For each public transport line, the connections can be optimised at an additional, freely selectable secondary node. At each secondary node, 30 arriving and 30 departing trains can be taken into account with an individual weighting. A mathematical model was developed as a method and a spreadsheet for the application. The mathematical model describes the process of optimising connections as a minimisation problem. Integrated in the spreadsheet is a complete enumeration of the minimisation problem using VBA-code. Furthermore, there are several sheets included with diagrams for analysis.

The developed method and the associated tool offer a good possibility to optimise timetables in everyday work of timetable planning. This was not possible until now. The process of timetable planning is supported, but in no way replaced.

There are various possibilities for the further development of the tool, for example by implementing additional functionalities or improvements to the code.

Vorwort

Wir sind überzeugt, dass der öffentliche Verkehr für die Mobilität der Zukunft eine grosse Rolle spielt. Als Verkehrssystem-Studenten und rege ÖV-Nutzer wissen wir, welche Wichtigkeit dabei gute Anschlüsse haben. Nicht nur an den Bahnhöfen von Zug zu Zug, sondern auch die Anschlüsse zwischen Bussen, Trams und der Bahn. Bei der Themenwahl der Bachelorarbeit stand für uns beide im Vordergrund, dass die Arbeit nicht in der Schublade verschwindet. So war die Aufgabenstellung von Stadtbus Winterthur, ein Tool zur Optimierung der Anschlüsse zu entwickeln, eine ideal geeignete Arbeit.

Die Zusammenarbeit zwischen uns Autoren funktionierte hervorragend. Ebenfalls hervorragend war die Zusammenarbeit mit dem Industriepartner und Auftraggeber Stadtbus Winterthur sowie mit unserer Betreuung seitens zhaw. Wir möchten uns an dieser Stelle bei Tobias Keller und Stefan Gerber von Stadtbus Winterthur bedanken, für die gute Zusammenarbeit, die hilfreichen Inputs und die ehrlichen Feedbacks. Ein weiterer Dank geht an die Betreuung dieser Arbeit, Dr. Stephan Bütikofer und Prof. Dr. Raimond Wüst der zhaw School of Engineering.

Uzwil / Winterthur, 10.06.2022

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	8
1.1.	Problemstellung und Auftrag	8
1.2.	Forschungslücke	9
1.3.	Zielsetzung	9
2.	Theoretische Grundlagen	10
2.1.	Integraler Taktfahrplan	10
2.2.	Kurse und Versatzzeiten	10
2.3.	Optimaler Anschluss.....	10
2.4.	Transfer coordination design problem (TCDP).....	11
3.	Ausgangslage	12
3.1.	Analyse des bisherigen Vorgehens von Stadtbus Winterthur.....	12
3.2.	Stand der Forschung	13
4.	Methode und Vorgehen	15
4.1.	Methode	15
4.2.	Vorgehen.....	15
5.	Resultate	17
5.1.	Grundlagen der Methode.....	17
5.1.1.	Definition Haupt- und Sekundärknoten.....	17
5.1.2.	Mögliche ÖSPV-Linientypen	18
5.1.3.	Gewichtete Wartezeiten und deren Festlegung.....	23
5.1.4.	Wegzeit.....	25
5.1.5.	Minimale und maximale Haltezeiten	25
5.2.	Mathematisches Modell	26
5.2.1.	Aufteilung des Modells in Haupt- und Sekundärknoten	26
5.2.2.	Herleitung für den Hauptknoten	27
5.2.3.	Herleitung für die Sekundärknoten	32
5.2.4.	Zusammenfassung und Minimierung totale gewichtete Wartezeit	38
5.3.	Anwendung der Methode mit einer Kalkulationstabelle.....	39
5.3.1.	Aufbau des Tools, User Interface und Vorgehen Optimierung.....	39
5.3.2.	Eingabedaten.....	41
5.3.3.	Berechnungen der gewichteten Wartezeiten	46
5.3.4.	Optimierung	49
5.3.5.	Ergebnisse, Analyse und Visualisierungsmöglichkeiten	55
5.4.	Prüfung der Anwendbarkeit und Validierung.....	59
5.4.1.	Winterthur in der Morgenspitzenstunde.....	59
5.4.2.	Winterthur in der Nebenverkehrszeit.....	64

5.4.3. Wil in der Morgenspitzenstunde	68
5.4.4. Allgemeine Anwendbarkeit.....	72
5.5. Usability und Handbuch.....	73
6. Diskussion	74
6.1. Anwendungsgrenzen in der Angebotsplanung.....	74
6.2. Anwendung ausserhalb des Schweizer Systems.....	74
6.3. Möglichkeiten zur Weiterentwicklung	75
6.4. Schlussfolgerung.....	76
I. Verzeichnisse.....	i
I.I. Literaturverzeichnis	i
I.II. Glossar.....	ii
I.III. Abbildungsverzeichnis.....	ii
II. Anhang.....	v
II.I. Aufgabenstellung.....	v
II.II. Code des Makros «Werte nach unten kopieren»	v
II.III. Code des UserForm (Fortschrittsanzeige)	vi
II.IV. Mathematisches Gesamtmodell.....	vii

1. Einleitung

Ein wichtiger Bestandteil eines funktionierenden öffentlichen Verkehrs (ÖV) sind Anschlüsse an Knotenpunkten. Diese Bachelorarbeit behandelt das Thema der Optimierung von Anschlüssen des öffentlichen Strassenpersonennahverkehrs (ÖSPV) an Bahnknoten, also der Synchronisation des Strassenbahn- und Busfahrplans mit dem des Bahnnetzes. Der Auftrag für diese Arbeit ist von Stadtbus Winterthur. Ziel ist es, eine Methode und ein passendes Tool zur Anwendung dieser zu entwickeln, mit dem in der Angebotsplanung von Stadtbus Winterthur die optimalen Anschlüsse an den Bahnknoten eruiert werden können.

1.1. Problemstellung und Auftrag

Der nationale Bahnverkehr in der Schweiz wird zentral geplant, sodass die nationalen Bahnreiseketten optimiert sind. Für Betreiber eines regionalen ÖSPV-Angebots bedeutet dies, dass sie an den Bahnknoten in ihrer Region ihr Angebot auf den Bahnfahrplan abstimmen müssen. Dabei müssen Faktoren wie die Wegzeit zwischen den Fahrzeugen des ÖSPV und den Zügen, die Haltezeit und der Takt, der in einem Integralen Taktfahrplan verkehrenden Linien, berücksichtigt werden.

Stadtbus Winterthur ist ein lokales Busunternehmen der Stadt Winterthur. Das Liniennetz umfasst dreizehn Linien, hauptsächlich im innerstädtischen Verkehr. [1]

Der wichtigste Knoten im Busnetz von Winterthur ist der Hauptbahnhof Winterthur. Fast alle Linien im radial aufgebauten Liniennetz haben dort wichtige Verknüpfungspunkte zur Bahn und zu anderen Buslinien. Die Umstiege von beziehungsweise zur Bahn sind dabei relevanter als die Umstiege zwischen den Buslinien. [2]

Der Auftrag von Stadtbus Winterthur umfasst ein Tool, welches die von vielen Faktoren abhängigen, optimalen Fahrplanzeiten einer Buslinie am Hauptbahnhof Winterthur berechnen und optimieren kann. Im Verlaufe der Arbeit wurde der Auftrag erweitert. Die Optimierung der Anschlüsse des ÖSPV an und von der Bahn soll nicht nur an einem Hauptknoten, sondern auch an mehreren Sekundärknoten im gleichen Netz geschehen.

Umlaufpläne, Haltekantenbelegungen und andere betriebliche Aspekte sollen nicht betrachtet werden. Wirtschaftliche Aspekte sollen auch nicht untersucht werden.

Gegeben sind der Bahnfahrplan und der Fahrplan des ÖSPV. Variable Grössen sind die Ankunfts- sowie die Haltezeit des ÖSPV an den Knoten. Werden bei einer Linie des ÖSPV die Anschlüsse an zwei Knoten betrachtet, muss die Fahrzeit zwischen diesen berücksichtigt werden.

Das Tool soll langfristig bei Fahrplanveränderungen genutzt werden können und dementsprechend verständlich und einfach in der Bedienung sein.

1.2. Forschungslücke

In der Literaturrecherche (siehe Kapitel 3.2 «Stand der Forschung») konnte keine direkt passende Methode zur Optimierung gefunden werden. Deshalb muss eine Methode entwickelt werden, die auf die spezifische Problemstellung zugeschnitten ist. Gründe dafür sind die speziellen Anforderungen des in der Schweiz verwendeten Integralen Taktfahrplanes und die an ein übergeordnetes System (in diesem Fall die Bahn) angepasste Planung der Anschlüsse des ÖSPV.

1.3. Zielsetzung

Das Ziel ist es, die Forschungslücke gemäss dem Auftrag von Stadtbus Winterthur zu schliessen. Es soll eine Verbesserung im Prozess zur Planung der Anschlüsse des ÖSPV an Bahnknoten erreicht werden.

Diese Zielsetzung umfasst als Ergebnis eine Methode, die in einem dazugehörigen Tool umgesetzt wird. Damit können die Anschlüsse des ÖSPV an den Bahnfahrplan an einem Hauptknoten und mehreren Sekundärknoten optimiert werden. Die Bedienung des Tools wird ausführlich in einem Handbuch beschrieben.

Die Forschungsfragen dieser Arbeit sind:

- Wie sollen Verkehrsunternehmen vorgehen, um an Bahnknoten ideale Anschlüsse von und zum ÖSPV anbieten zu können?
- Wie können die benötigten Anschlüsse priorisiert und ausgewählt werden?
- Wie können die idealen Ankunfts- und Abfahrtszeiten bestimmt werden?

Für die Aufgabenstellung siehe Anhang II.I.

In der Arbeit wird zuerst auf die nötigen theoretischen Grundlagen eingegangen.

Im Kapitel «Ausgangslage» wird das bisherige Vorgehen von Stadtbus Winterthur erläutert und analysiert. Danach wird der aktuelle Stand der Forschung anhand einer Literaturanalyse aufgezeigt.

Das nächste Kapitel befasst sich mit der Methodik und dem Vorgehen.

Die Resultate der Arbeit sind in fünf Teile gegliedert. Zuerst werden die Grundlagen der entwickelten Methodik aufgezeigt. Anschliessend wird das mathematische Modell erklärt und im darauffolgenden Unterkapitel in einer Kalkulationstabelle implementiert. Danach wird die durchgeführte Validierung thematisiert. Als Abschluss des Kapitels «Resultate» wird auf die Usability des entwickelten Tools eingegangen.

Im letzten Teil der Arbeit werden die Anwendungsgrenzen des Tools, eine Anwendung ausserhalb der Schweiz sowie die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung diskutiert.

2. Theoretische Grundlagen

Für das Verständnis dieser Arbeit ist eine Definition der Begriffe «Integraler Taktfahrplan», «Kurse», «Versatzzeiten», «optimaler Anschluss» und «TCDP» nötig.

In den folgenden Unterkapiteln werden diese Begriffe definiert.

2.1. Integraler Taktfahrplan

Ein Taktfahrplan bedeutet, dass die Kurse einer Linie in einem fixen Taktabstand fahren. Ein Integraler Taktfahrplan (ITF) unterscheidet sich von einem normalen Taktfahrplan insofern, dass der ITF nicht für jede Linie einzeln geplant wird. Die einzelnen Taktfahrpläne der Bahn- und ÖSPV-Linien werden in den Knoten aufeinander abgestimmt [3]. Der Vorteil eines ITF ist die Bildung eines flächendeckenden Verkehrsnetzes, in dem die Anschlüsse möglichst gut aufeinander abgestimmt sind [3].

Für städtische ÖSPV-Netze wie in Winterthur wird der Bahnfahrplan zuerst erstellt und danach die ÖSPV-Anschlüsse möglichst optimal an die Bahnabfahrten und -ankünfte angepasst [2].

2.2. Kurse und Versatzzeiten

Eine ÖSPV-Linie besteht aus verschiedenen Kursen. Ein Kurs ist ein Fahrzeug, das die Linie vom Anfang bis zum Ende fährt. Wenn dasselbe Fahrzeug die Linie nochmals bedient, ist diese Fahrt ein neuer Kurs. Typischerweise verkehren mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf einer Linie, jedes Fahrzeug ist dabei ein Kurs. Wenn der zeitliche Abstand zwischen den Kursen regelmässig ist, wird dieser als Taktzeit bezeichnet. In einem Taktfahrplan ist die Taktzeit ein Teiler der Periodenzeit. Der Versatz der Taktzeit zur Periodenzeit wird in dieser Arbeit als Versatzzeit bezeichnet.

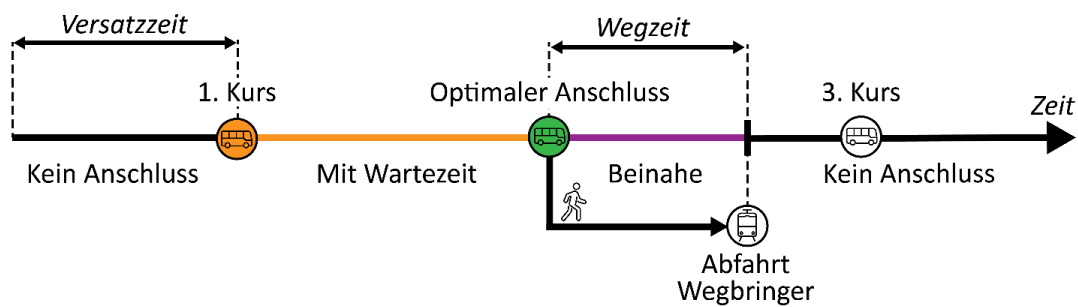
2.3. Optimaler Anschluss

Im «Glossar öffentlicher Verkehr» des Instituts für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich wird ein Anschluss als «zeitlich günstige Möglichkeit zum Umsteigen durch optimale Festlegung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten von öffentlichen Verkehrsmitteln in Fahrplänen» [4] definiert.

Die gesamte Zeit zwischen der Ankunftszeit des einen Transportmittels und der Abfahrt des anderen Transportmittels ist die Kombination der Wegzeit mit einer möglichen Wartezeit [5]. Ein Anschluss, bei dem die Zeit zwischen der Ankunft und der Abfahrt kleiner ist als die Wegzeit, kann dementsprechend nicht als Anschluss gewertet werden. Zur Kategorisierung der Güte eines Anschlusses kann zwischen Beinahe-Anschlüssen [6], optimalen Anschlüssen und Anschlüssen mit Wartezeit [6] unterschieden werden.

Wie in Abbildung 1 zu sehen, ist ein Beinahe-Anschluss ein Anschluss, der knapp nicht erreicht wird. Ein Anschluss mit Wartezeit ist ein Anschluss, bei dem bis zur Abfahrt des nächsten Verkehrsmittels gewartet werden muss. Der optimale Anschluss liegt genau dazwischen. Nach dem Zurücklegen des Weges vom Zubringer- zum Wegbringerverkehrsmittel fährt dieses so gleich ab.

Optimaler Anschluss ÖSPV zu Bahn



Optimaler Anschluss Bahn zu ÖSPV

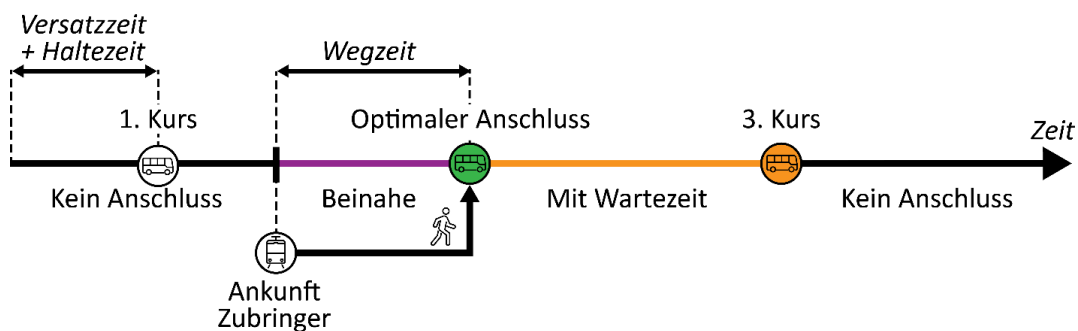


Abbildung 1: Visualisierung des optimalen Anschlusses ÖSPV zu Bahn (oben) und Bahn zu ÖSPV (unten). Der grün markierte Kurs ist der Optimale, da so keine Wartezeit entsteht. Eigene Darstellung in Anlehnung an [6].

Eine mögliche weitere Art der Differenzierung wären sogenannte Risikoanschlüsse [6]. Unter Risikoanschluss wird ein Anschluss verstanden, der lediglich knapp und nur wenn keine Verzögerungen auftreten, erreicht werden kann. Für diese Arbeit wird davon ausgegangen, dass die nötige Zeitreserve, um Risikoanschlüsse zu vermeiden, bereits in der Wegzeit zwischen Bahnperon und ÖSPV-Kante berücksichtigt ist.

Durch die Optimierung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten des ÖSPV soll erreicht werden, dass die Wartezeiten möglichst kurz sind. Das bedeutet, dass der Umstieg für so viele Personen wie möglich, so nahe wie möglich an einem optimalen Anschluss ist. Konkret sollen die aufsummierten Wartezeiten der Umsteigenden möglichst klein sein.

2.4. Transfer coordination design problem (TCDP)

Als transfer coordination design problem (TCDP) wird die Problemstellung der Bildung von optimalen Anschlüssen im öffentlichen Verkehr bezeichnet. Es ist in der Regel ein komplexes, multidimensionales Optimierungsproblem. Ziel bei der Lösung dieses Problems ist, die Umsteigevorgänge für die Kundschaft möglichst zu optimieren oder eine Kostenoptimierung vorzunehmen. Das Problem kann für ein gesamtes Netz, einen Knoten oder mehrere Knoten gebildet werden. [7]

3. Ausgangslage

Als Grundlagen für diese Arbeit dienen eine Analyse des bisherigen Vorgehens von Stadtbus Winterthur und Erkenntnisse aus der aktuellen Forschung.

3.1. Analyse des bisherigen Vorgehens von Stadtbus Winterthur

Im bisherigen Prozess der Anschlussplanung am Hauptbahnhof Winterthur hat Stadtbus Winterthur eine intern erstellte Kalkulationstabelle in Microsoft «Excel» verwendet. Mit dieser können, anhand des Taktes und der Haltezeit am Hauptbahnhof Winterthur, die optimalen Versatzeiten für eine Buslinie bestimmt werden.

Inputparameter sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten des Bahnfahrplans. Jede Bahnlinie erhält eine ganzzahlige Zahl im Intervall von 0 bis 10 als Gewichtung der Relevanz für Anschlüsse. Ein weiterer Inputparameter ist eine Buslinie, gegeben durch den Takt und die Haltezeit am Hauptbahnhof Winterthur. Die Wegzeit zwischen den Bahnperrens und den Buskannten ist als letzter Inputparameter fix gegeben.

Anhand der Differenz der Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Busse und der Züge werden unter Berücksichtigung der Wegzeit die Wartezeiten für alle Kurse der Buslinie berechnet. Die gewichteten Wartezeiten werden durch Multiplizieren der Wartezeit mit der Gewichtung berechnet.

Die Kurse mit der tiefsten Summe der gewichteten Wartezeit für beide Umsteigebeziehungen sind die Kurse mit den optimalen Anschlüssen.

Dieses Vorgehen hat folgende Schwächen: Die Linien müssen jeweils einzeln in einem Blatt der Kalkulationstabelle optimiert werden, wodurch ein grosser Arbeitsaufwand entsteht. Weiter können Halte an zusätzlichen Bahnknoten nicht berücksichtigt werden und die Haltezeit der Busse an den Knoten kann nicht optimiert werden.

3.2. Stand der Forschung

Es gibt zahlreiche Studien zum Thema TCDP. Als erste Studie wurde die Sammelstudie «A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase» [7] analysiert, welche die bestehenden Arbeiten zu diesem Thema sammelt und einordnet.

In der Studie wird zwischen vier verschiedenen Lösungsansätzen für ein TCDP unterschieden:

- Heuristischer regelbasierter Ansatz
- Analytischer Modellierungsansatz
- Mathematischer Programmierungsansatz (MP)
- Simulationsbasierter Ansatz

Der heuristische regelbasierte Ansatz löst das Problem basierend auf Heuristiken. Meist ist ein Zusammenspiel von Mensch und Computer notwendig.

Beim analytischen Modellierungsansatz wird eine Kostenfunktion berücksichtigt. Alle Parameter (zum Beispiel Nachfrage, Haltestellenabstände, Linien etc.) sind als Funktionen gegeben.

Der mathematische Programmierungsansatz (MP) versucht das TCDP mithilfe eines mathematischen Modells zu lösen. Die Parameter sind Variablen mit diskreten Werten. Somit hat ein MP realistischere Ergebnisse als ein Modell des analytischen Lösungsansatzes, jedoch auch höhere Rechenanforderungen. Das Modell kann entweder deterministisch oder stochastisch sein. Bei deterministischen MP sind alle Parameter der Zielfunktion und der Nebenbedingung mit Sicherheit bekannt, beim stochastischen MP werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet, um Schwankungen der nicht vollständig bekannten Parameter zu berücksichtigen.

Simulationsbasierte Ansätze berechnen eine Lösung mit einer Simulation, die meist agentenbasiert ist.

Für diese Arbeit wurde der MP gewählt, da dieser auf die Arbeit anwendbar war und die grössten Erfolgchancen versprach.

Die Lösungsmethoden für den MP lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- Exakte Lösungsmethoden
- Heuristische bzw. meta-heuristische Lösungsmethoden für deterministische Modelle
- Heuristische bzw. meta-heuristische Lösungsmethoden für stochastische und unsichere Modelle

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um ein deterministisches Modell, da eine Bearbeitung mit einem stochastischen Modell vom Auftraggeber nicht gewünscht wurde und ein stochastischer Ansatz die Verständlichkeit der Methode und des Tools erschweren würde.

Zur exakten Lösungsmethode und zur heuristischen beziehungsweise meta-heuristischen Lösungsmethode für deterministische Modelle wurde je eine weitere Studie vertieft analysiert. Das Ziel war es herauszufinden, ob aus den beiden zu der Problemstellung am besten passenden Studien Wissen oder Methoden für den Anwendungsfall dieser Arbeit übertragen werden können.

Exakte Lösungsmethode: «A dynamic programming approach to synchronize train timetables» von Tian und Niu (2017) [8]

Ziel dieser Studie war eine Optimierung eines reinen Bahnknotens. Dabei wurden Standardzüge an den Fahrplan von Hochgeschwindigkeitszügen angeglichen, mit dem Ziel, nahtlose Verbindungen zu maximieren und die Wartezeiten zu minimieren. Als Zielfunktion wurde eine exponentielle Nutzenfunktion verwendet.

Der Lösungsansatz von Tian und Niu ist zu komplex und kann nicht auf diese Arbeit übertragen werden. In der Studie wird beispielsweise die Mindestzugfolgezeit für die Berechnung des neuen Fahrplans berücksichtigt und es wird lediglich ein fixer Parameter für die Wegzeit verwendet.

Heuristische Lösungsmethode für deterministische Modelle: «A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions» von Shafahi und Khani (2010) [9]

In dieser Studie wurde untersucht, wie die Wartezeit an Umsteigeknoten minimiert werden kann. Dazu wurde ein Modell formuliert, welches die Abfahrtszeit der Linien in den Knoten so berechnete, dass die Wartezeit für die Passagiere minimiert wurde. In einem zweiten Schritt wurde das Modell erweitert, um die Wartezeit der Fahrzeuge am Knoten als zusätzliche Variable zu berücksichtigen. Zur Lösung des Problems in kleinen und mittleren Netzen sollen Solver für gemischt-ganzzahlige Probleme verwendet werden können. Für grössere Netze wurde als Lösungsmethode ein genetischer Algorithmus vorgeschlagen. Abschliessend wurde eine Fallstudie an einem realen Netz durchgeführt, um die Modelle und den vorgeschlagenen genetischen Algorithmus zu bewerten.

Für die vorliegende Arbeit ist das vorgeschlagene Modell nicht geeignet, da es auf die Optimierung des gesamten Netzes und nicht auf die Optimierung einzelner Knoten ausgelegt ist. Dabei sollen die Umsteigebeziehungen zwischen den Linien des betrachteten Netzes optimiert werden, nicht aber diejenigen zu einem übergeordneten Netz mit fix definierten Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Dementsprechend wäre die Eingabe der Bahnankunfts- und Abfahrtszeiten nicht möglich. Da vom Auftraggeber die Optimierung ebendieser Anschlüsse gewünscht ist und nicht die der weniger frequentierten Anschlüsse zwischen zwei ÖSPV-Linien, kann der Lösungsansatz nicht übernommen werden.

Fazit der gesamten Literaturrecherche

In der Forschung gab es bereits viele Studien, die ähnliche Probleme behandelten. Die meisten Studien verwenden zur Lösung Optimierungsalgorithmen. Oft sind die gewählten Problemstellungen und erforschten Lösungen jedoch sehr komplex und schwer verständlich. Häufig sind zu viele Parameter vorhanden, oder die Optimierung bezieht sich auf die finanziellen Kosten im Gesamtnetz.

Für diese Arbeit werden Ansätze benötigt, die auf das Schweizer System des Integralen Taktfahrplanes anwendbar sind. Explizit wird gewünscht, Anschlüsse an ein übergeordnetes System mit einem fixen Fahrplan anpassen zu können. Dies nicht im gesamten Netz, sondern nur an ausgewählten Knoten. Die erarbeitete Lösung soll zudem leicht verständlich und primär userorientiert sein, was die bestehenden Lösungen nicht sind.

4. Methode und Vorgehen

Im Folgenden wird die gewählte Methodik für die Entwicklung der Berechnungs- und Optimierungsmethode erläutert. Zudem wird das konkrete Vorgehen während der Arbeit aufgezeigt.

4.1. Methode

Die Entwicklung der Methode zur Optimierung der ÖSPV-Anschlüsse wurde in einer Einzelstudie erarbeitet. Als Datengrundlage dienten neben einer Literaturrecherche die Erkenntnisse aus regelmässigen Meetings mit dem Industriepartner Stadtbus Winterthur. Diese waren insbesondere wichtig, um die Anwendbarkeit des Tools im Arbeitsalltag der Angebotsplanenden sicherzustellen. In diesen Meetings wurden die Anforderungen an das zu entwickelnde Tool nach dem Ansatz des Living Labs festgelegt und jeweils der aktuelle Stand aufgezeigt. So konnte das Tool regelmässig getestet und neue Ideen laufend integriert und evaluiert werden.

Die Methode zur Berechnung der idealen Ankunfts- und Abfahrtszeiten wurde mit einem mathematischen Programmieransatz entwickelt und anschliessend implementiert.

4.2. Vorgehen

Zur Einschränkung der Problemstellung wurden in einem ersten Schritt grundlegende Begriffe und Ziele genau definiert. Daraus wurde ein Forschungsziel erarbeitet und eine entsprechende Literaturanalyse durchgeführt, woraus wiederum die genauen Forschungsfragen abgeleitet werden konnten.

In einem nächsten Schritt wurde das derzeitige Vorgehen zur Anschlussoptimierung bei Stadtbus Winterthur analysiert und mit der Literatur verglichen.

Als grösster Arbeitsschritt wurde dann das mathematische Modell und das dazugehörige Tool zur Anwendung dessen entwickelt. Dazu wurden in fünf Meetings mit Stadtbus Winterthur jeweils der aktuelle Stand, zusätzliche Funktionsmöglichkeiten und das weitere Vorgehen besprochen. Die Meetings fanden jeweils in einem Abstand von 2-3 Wochen statt. Die Entwicklung der Methode erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurde eine Grundmethode entwickelt, die alle Anschlüsse an nur einem Knoten berücksichtigt. Als Nächstes wurde die Methode einerseits so erweitert, dass einzelne Anschlüsse bewusst ausgeschaltet werden können. Andererseits wurde die Berücksichtigung von Anschlüssen der ÖSPV-Linien an weiteren Bahnknoten ermöglicht. Die Methode wurde laufend in einer Kalkulationstabelle implementiert. Dazu wurde das

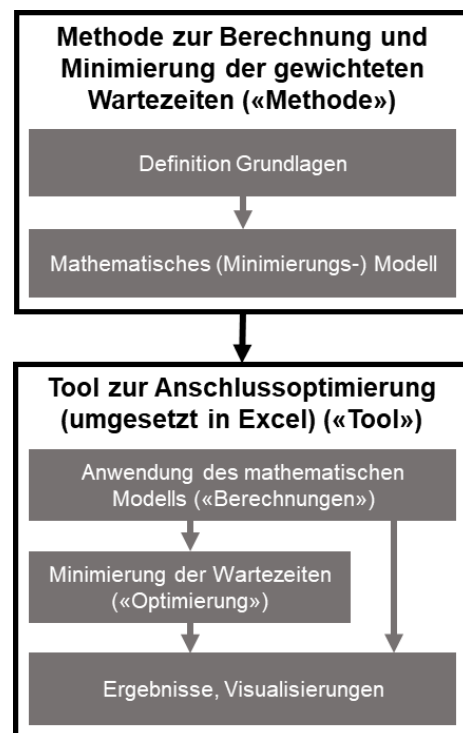


Abbildung 2: Schematisches Vorgehen, das für die Integration jeder zusätzlichen Funktion erneut durchgeführt wurde. (Eigene Darstellung)

grundlegende Vorgehen für jede Erweiterung wiederholt (vgl. Abbildung 2). Das bedeutet, dass bei einer angedachten Erweiterung zuerst genau definiert wurde, was gemacht werden soll. Anschliessend wurde die Erweiterung im mathematischen Modell integriert. Sobald klar war, dass die Erweiterung mathematisch möglich ist, wurde die Umsetzung im Tool gemacht. Dazu wurde die Berechnung der Wartezeiten angepasst und wenn nötig der Optimierungsalgorithmus ergänzt. Als Abschluss einer Erweiterung wurden die Ergebnisbereiche und Visualisierungen ergänzt.

Während der Entwicklung der Grundmethode sowie der erweiterten Methode wurden verschiedene Lösungsmöglichkeiten für das mathematische Problem in Microsoft «Excel» geprüft.

Nach der Fertigstellung wurde das Tool auf den Knoten Winterthur in der Haupt- und Nebenverkehrszeit sowie den Knoten Wil in der Hauptverkehrszeit getestet. Damit wurde die universelle Anwendbarkeit für mittelgrosse Bahn-ÖSPV-Knoten in der Schweiz geprüft.

Abschliessend wurde ein Handbuch als Anleitung zum Tool erstellt.

5. Resultate

Das Hauptresultat dieser Arbeit ist eine Kalkulationstabelle zur Anschlussoptimierung von ÖSPV-Anschlüssen an Bahnknoten. Zu dessen Erstellung war die Entwicklung einer Methode für die Optimierung nötig. Diese Methode beinhaltet zum einen die Definition der Grundlagen und zum anderen ein mathematisches Modell.

Im Folgenden wird in einem ersten Teil auf die Grundlagen der entwickelten Methode und die dafür nötigen Parameter und Variablen eingegangen.

Im zweiten Teil wird das entwickelte mathematische Modell dokumentiert und erklärt.

Als Drittes wird die Umsetzung des mathematischen Modells in einer Kalkulationstabelle erläutert. Ein Teil davon ist die Lösung des Optimierungsproblems zur Eruerung der idealen Ankunfts- und Haltezeiten.

Im vierten Teil wird dargelegt, wie die entwickelte Kalkulationstabelle validiert wurde.

Als abschliessender Teil der Resultate wird die Usability des entwickelten Tools geprüft.

5.1. Grundlagen der Methode

Aufgrund der Problemstellung wurde beschlossen, eine Methode zu entwickeln, die in einem Integralen Taktfahrplan mit einer Periodenzeit von einer Stunde, wie dies im Schweizer System der Fall ist, angewendet werden kann. Die einzelnen Kurse einer Linie verkehren jeweils mit einem zeitlichen Abstand von einer Taktzeit.

Die ÖSPV-Linientypen werden anhand der bedienten Haltestellen, an denen Anschlüsse angeboten werden, und ihren Wendepunkten charakterisiert. Im Folgenden werden die Begriffe Haupt- und Sekundärknoten definiert und anschliessend die betrachteten Linientypen erläutert. Weiter wird die gewählte Definition der gewichteten Wartezeit erklärt sowie eine Empfehlung zur Festlegung der Gewichtung gemacht. Zudem werden sowohl die Wegzeit als auch die minimalen und maximalen Haltezeiten definiert.

5.1.1. Definition Haupt- und Sekundärknoten

Mit der Methode sollen primär die Anschlüsse an einem Knoten optimiert werden. Dieser Knoten wird Hauptknoten genannt. Bei Linien, die nebst dem Hauptknoten auch an einem weiteren Knoten Anschlüsse an die Bahn anbieten, sollen diese Anschlüsse ebenfalls berücksichtigt werden. Dieser zweite Knoten wird Sekundärknoten genannt. Um die Komplexität und die Menge an Möglichkeiten gering zu halten, kann je Linie nur ein Sekundärknoten berücksichtigt werden.

Somit gibt es Linien, die nur am Hauptknoten verkehren und solche, die am Haupt- und an einem Sekundärknoten verkehren. Die Linien, die nur am Hauptknoten verkehren, können in zwei Typen eingeteilt werden:

- Linien, die den Hauptknoten als Durchmesserlinie bedienen (Normalfall)
- Linien, die am Hauptknoten wenden

Bei Linien mit Sekundärknoten kann zwischen vier Typen unterschieden werden:

- Linien, die an beiden Knoten durchgehend verkehren
- Linien, die am Sekundärknoten wenden
- Linien, die am Haupt- und am Sekundärknoten wenden und somit nur zwischen diesen beiden Knoten verkehren
- Linien, die am Hauptknoten wenden und dabei auf der Hin- und der Rückfahrt am Sekundärknoten vorbeikommen

Alle sechs Linientypen werden im folgenden Kapitel 5.1.2 «Mögliche ÖSPV-Linientypen» genauer erläutert.

An einem Haupt- oder Sekundärknoten kann von der Bahn auf den ÖSPV oder vom ÖSPV auf die Bahn umgestiegen werden. Diese beiden Möglichkeiten werden folgend als Anschlussbeziehung bezeichnet. Eine Anschlussbeziehung umfasst alle Anschlüsse an einem Knoten von der Bahn auf den ÖSPV oder umgekehrt.

5.1.2. Mögliche ÖSPV-Linientypen

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, müssen verschiedene Linientypen in der Methode berücksichtigt werden. Je nach Methode sind einzelne Anschlussbeziehungen nicht zulässig und die Art, wie Halte- und Wegzeiten berücksichtigt werden müssen, ändert sich. Folgend wird zuerst auf die beiden Linientypen eingegangen, die nur den Hauptknoten bedienen. Anschliessend werden die vier Linientypen erläutert, die einen Sekundärknoten bedienen.

5.1.2.1. Normalfall (ohne Sekundärknoten)

Eine ÖSPV-Linie, die einen Hauptknoten bedient, ist in der Regel Zu- und Wegbringer gleichzeitig. Das bedeutet, sie ist eine Durchmesserlinie, die also nicht am Hauptknoten wendet. Dieser «Normalfall» ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Bei der Ankunft bedient die Linie Anschlüsse an die Bahnabfahrten. Nach dem Abwarten der Haltezeit dient die Abfahrt als Anschluss von den Bahnankünften.

Die Rückrichtung kann als separate Linie betrachtet werden, die durch die Fahrtzeit zu den beiden Linienenden und den Wendezeiten mit der ersten Richtung verknüpft ist. Diese Verknüpfung wird in der entwickelten Methode jedoch nicht betrachtet, da dies ausserhalb des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit liegt. Zudem würde diese Verknüpfung die Eingabe und Optimierung übermässig komplex machen.

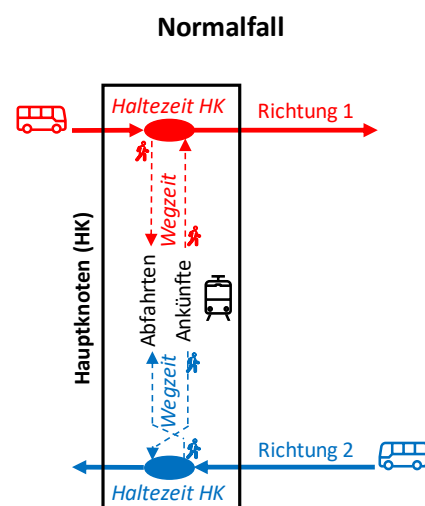


Abbildung 3: Schematische Darstellung von Durchmesserlinien am Hauptknoten. (Eigene Darstellung)

5.1.2.2. Hauptknoten als Wendehaltestelle (ohne Sekundärknoten)

Eine weitere Art von Linien sind solche, wie in Abbildung 4 schematisch dargestellt, die am Hauptknoten wenden und danach in die Rückrichtung verkehren. Diese Linien können als eine Linie in die Methode integriert werden. Die Haltezeit am Hauptknoten entspricht dabei der Wendezeit.

Hauptknoten als Wendehaltestelle

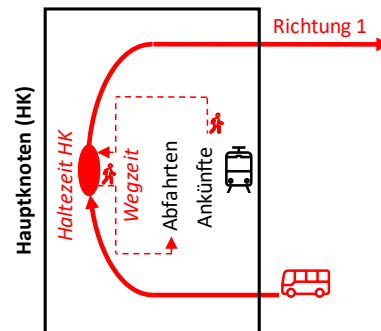


Abbildung 4: Schematische Darstellung von Linien, die am Hauptknoten wenden. (Eigene Darstellung)

5.1.2.3. Normalfall mit Sekundärknoten (keine Linie wendet an einem der Knoten)

Als Normalfall mit Sekundärknoten wird die einfachste Variante zur Einbindung des Sekundärknotens bezeichnet. Diese ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. In dieser Variante kommt die ÖSPV-Linie von ausserhalb des betrachteten Systems und fährt den Hauptknoten als Haltestelle an. Nach der Haltezeit am Hauptknoten verkehrt sie weiter und benötigt eine bekannte Fahrzeit bis zum Sekundärknoten. Nach dem Abwarten der Haltezeit am Sekundärknoten verlässt die Linie das System wieder.

Der Vorlauf bis zur Ankunft am Hauptknoten und der Nachlauf nach dem Verlassen des Sekundärknotens werden nicht betrachtet. Dies bedeutet, dass in diesem Fall keine Rücksicht auf allfällige Wendezeiten an den Endpunkten der Linie genommen wird.

Die Rückrichtung der Linie wird als separate ÖSPV-Linie eingegeben. Durch die Begrenzung des Systems auf die beiden Knoten ist eine zeitliche Verknüpfung dieser beiden Linien nicht möglich. Wenn jedoch die Fahrzeit bis zur Wendehaltestelle respektive von der Wendehaltestelle bis zum ersten Knoten bekannt ist, können die Wendezeiten anhand dieser und der bekannten idealen Ankunftszeiten einfach berechnet werden.

Normalfall mit Sekundärknoten

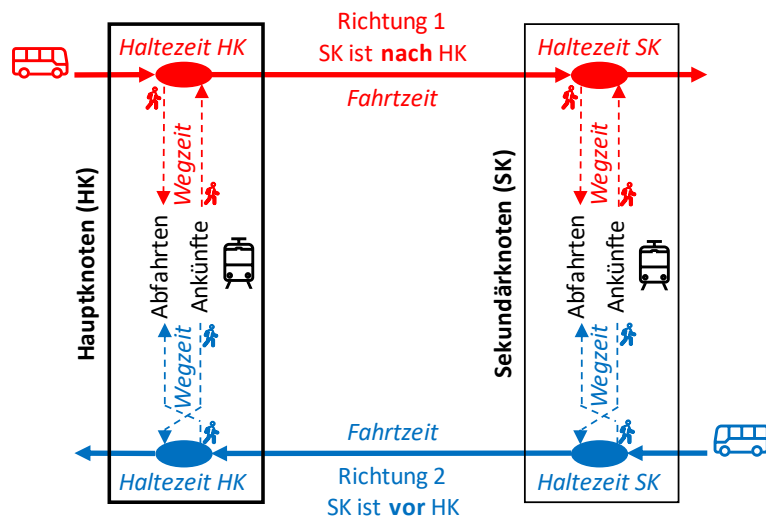


Abbildung 5: Schematische Darstellung zur normalen Einbindung eines Sekundärknotens. (Eigene Darstellung)

5.1.2.4. Einbindung des Sekundärknotens als Wendehaltestelle

Wenn eine ÖSPV-Linie einen Sekundärknoten bedient, der gleichzeitig als Wendehaltestelle dieser Linie dient, müssen die Wartezeiten speziell berechnet werden. Dieser Fall ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt wird analog zum Normalfall die Linie in zwei separate Linien aufgeteilt. Eine dieser beiden Linien kommt von ausserhalb des Systems, fährt den Hauptknoten an und wartet dort die Haltezeit ab. Anschliessend verkehrt sie mit einer bekannten Fahrtzeit weiter zum Sekundärknoten. Hier ist ein Umstieg von der ÖSPV-Linie auf die Bahn möglich, jedoch nicht von der Bahn auf diese Linie.

Die zweite Linie beginnt am Sekundärknoten. Bei dieser Linie ist der Umstieg von der Bahn auf den ÖSPV möglich, umgekehrt aber nicht. Anschliessend verkehrt die Linie mit einer bekannten Fahrtzeit weiter zum Hauptknoten, wartet die Haltezeit ab und verlässt das betrachtete System wieder.

Die Haltezeit der beiden separaten Linien am Sekundärknoten ist dabei irrelevant und wird nicht berücksichtigt. Die Wendezeit kann anhand der Differenz zwischen der Ankunftszeit der ersten Linie am Sekundärknoten und der Abfahrtszeit der zweiten Linie berechnet werden.

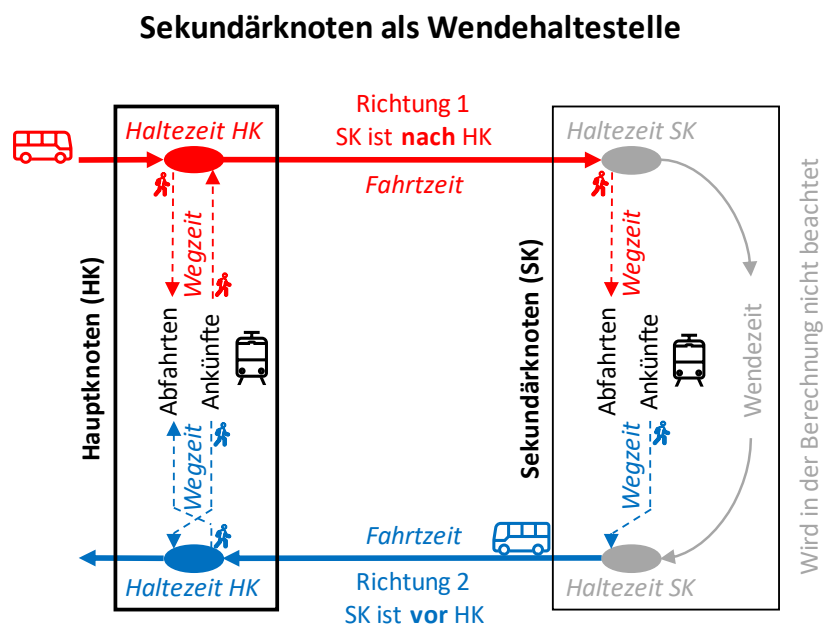


Abbildung 6: Schematische Darstellung zur Einbindung eines Sekundärknotens, wenn dieser gleichzeitig die Wendehaltestelle der Linie ist. (Eigene Darstellung)

5.1.2.5. Einbindung des Sekundärknotens, wenn beide Knoten Wendehaltstellen sind

Wenn eine ÖSPV-Linie am Hauptknoten und an einem Sekundärknoten wendet, kann die Linie im Tool als eine Linie eingegeben werden. Dieser Fall ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Somit können mit der vorgeschlagenen Methode die gesamten Umläufe berechnet werden. Die Linie verkehrt dabei vom Hauptknoten zum Sekundärknoten und wartet die Haltezeit am Sekundärknoten ab. Anschliessend verkehrt sie zurück zum Hauptknoten, an dem die Haltezeit am Hauptknoten abgewartet wird, bevor mit der nächsten Abfahrt der nächste Umlauf beginnt. Die Fahrtzeit vom Haupt- zum Sekundärknoten und umgekehrt muss dabei gleich sein.

Die Berechnung der Haltezeit am Sekundärknoten ergibt sich aus der gewählten Haltezeit am Hauptknoten und den Fahrtzeiten sowie der Taktzeit (vgl. Kapitel 5.3.2.4 «Eingabedaten auf dem Hauptblatt» und zur Berechnungsformel Kapitel 5.2.3.3 «Spezialfälle» des mathematischen Modells).

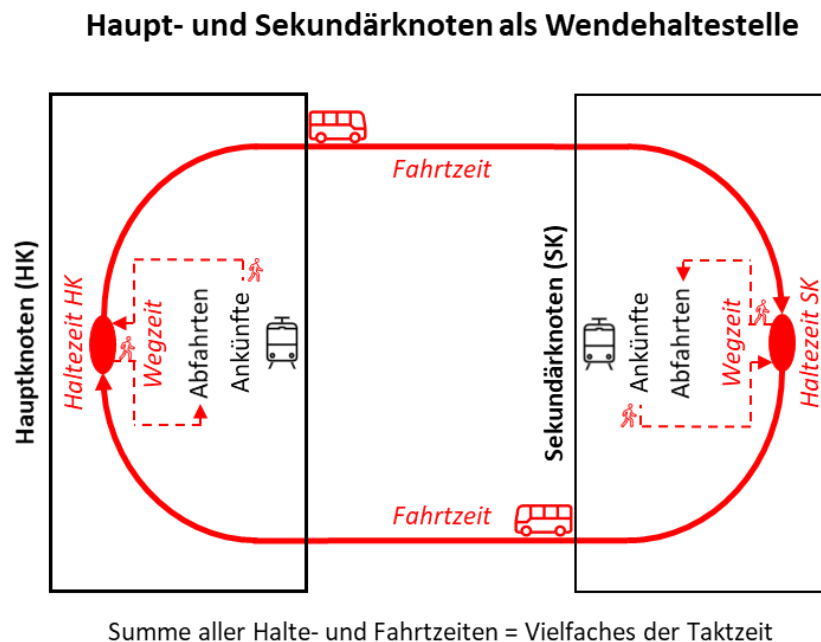


Abbildung 7: Schematische Darstellung zur Einbindung eines Sekundärknotens, wenn am Sekundär- und am Hauptknoten gewendet wird. (Eigene Darstellung)

5.1.2.6. Einbindung des Sekundärknotens, wenn nur der Hauptknoten eine Wendehaltestelle ist

Umgekehrt zum in Kapitel 5.1.2.4 «Einbindung des Sekundärknotens als Wendehaltestelle» beschriebenen Fall kann der Hauptknoten als Wendehaltestelle dienen und gleichzeitig ein Sekundärknoten eingebunden werden. Dieser Fall ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Dazu muss die Linie als zwei Linien eingegeben werden. Dies, weil doppelt so viele Anschlüsse am Sekundärknoten berechnet werden wie am Hauptknoten, was in der Methode mit nur einer Linie nicht möglich ist. Dieser Fall ist damit analog zum Fall «Einbindung als Wendehaltestelle», nur dass hier der Haupt- und nicht der Sekundärknoten die Wendehaltestelle ist. Die Haltezeit der ankommenden Linie am Hauptknoten spielt zur Berechnung der Wartezeiten keine Rolle.

Als Nebeneffekt können mit der für diesen Fall entwickelten Berechnungsmethode auch Linien beachtet werden, die am Hauptknoten weder wenden noch weiter verkehren, sondern enden. Da dieser Fall sehr selten ist, wurde er in der Festlegung der Anforderungen an die Methodik nicht explizit berücksichtigt. Mit dem Fall «Hauptknoten als Wendehaltestelle» können die Wartezeiten von solchen Linien trotzdem berechnet werden, indem die Haltezeiten am Sekundärknoten auf null gesetzt werden. Wie dazu im Tool vorgegangen werden muss, wird in Kapitel 5.3.2.2 «ÖSPV-Linien» erklärt.

Hauptknoten als Wendehaltestelle

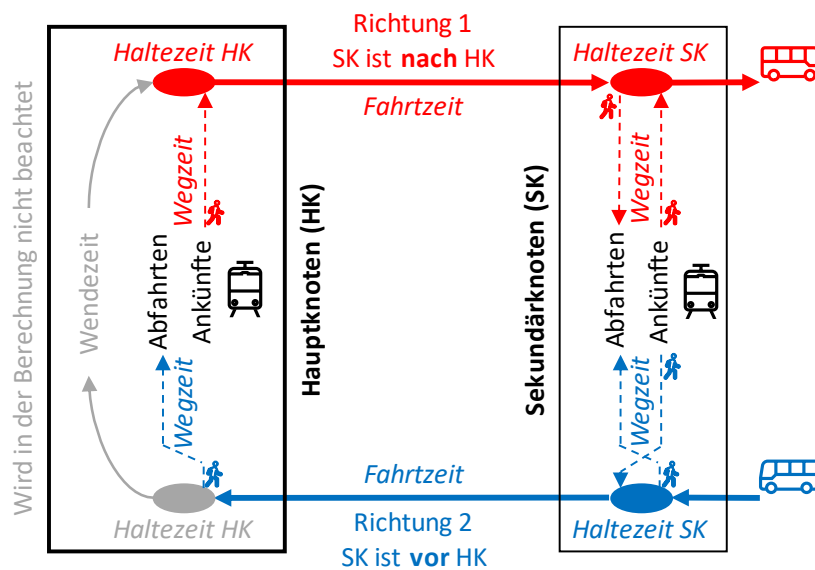


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Integration des Sekundärknotens, wenn der Hauptknoten als Wendehaltestelle dient. (Eigene Darstellung)

5.1.3. Gewichtete Wartezeiten und deren Festlegung

Ein optimaler Anschluss charakterisiert sich durch möglichst keine Wartezeit (siehe Kapitel 2.3 «Optimaler Anschluss»). Nicht jeder Anschluss hat aber die gleiche Wichtigkeit. Mithilfe von gewichteten Wartezeiten kann dies bei der Berechnung berücksichtigt werden. Die gewichteten Wartezeiten sind das Produkt der Multiplikation der Wartezeit mit einer Gewichtung.

Gewichtet werden dabei die Bahnabfahrten und -ankünfte. Weil die ÖSPV-Linien einzeln optimiert werden und in der entwickelten Methode nicht miteinander verknüpft sind, hätte die Gewichtung der ÖSPV-Linien keinen Nutzen.

Die Gewichtung legt fest, wie stark die Anschlüsse aller ÖSPV-Linien auf eine Bahnlinie gewichtet werden sollen. Wird beispielsweise eine Bahnabfahrt lediglich zu 50 % gewichtet, so wird die Wartezeit auf diese nur zur Hälfte in die Gesamtsumme der Wartezeiten einfließen. Zur Festlegung der Gewichtung empfehlen wir das in Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 als Prozessdiagramm dargestellte Vorgehen.

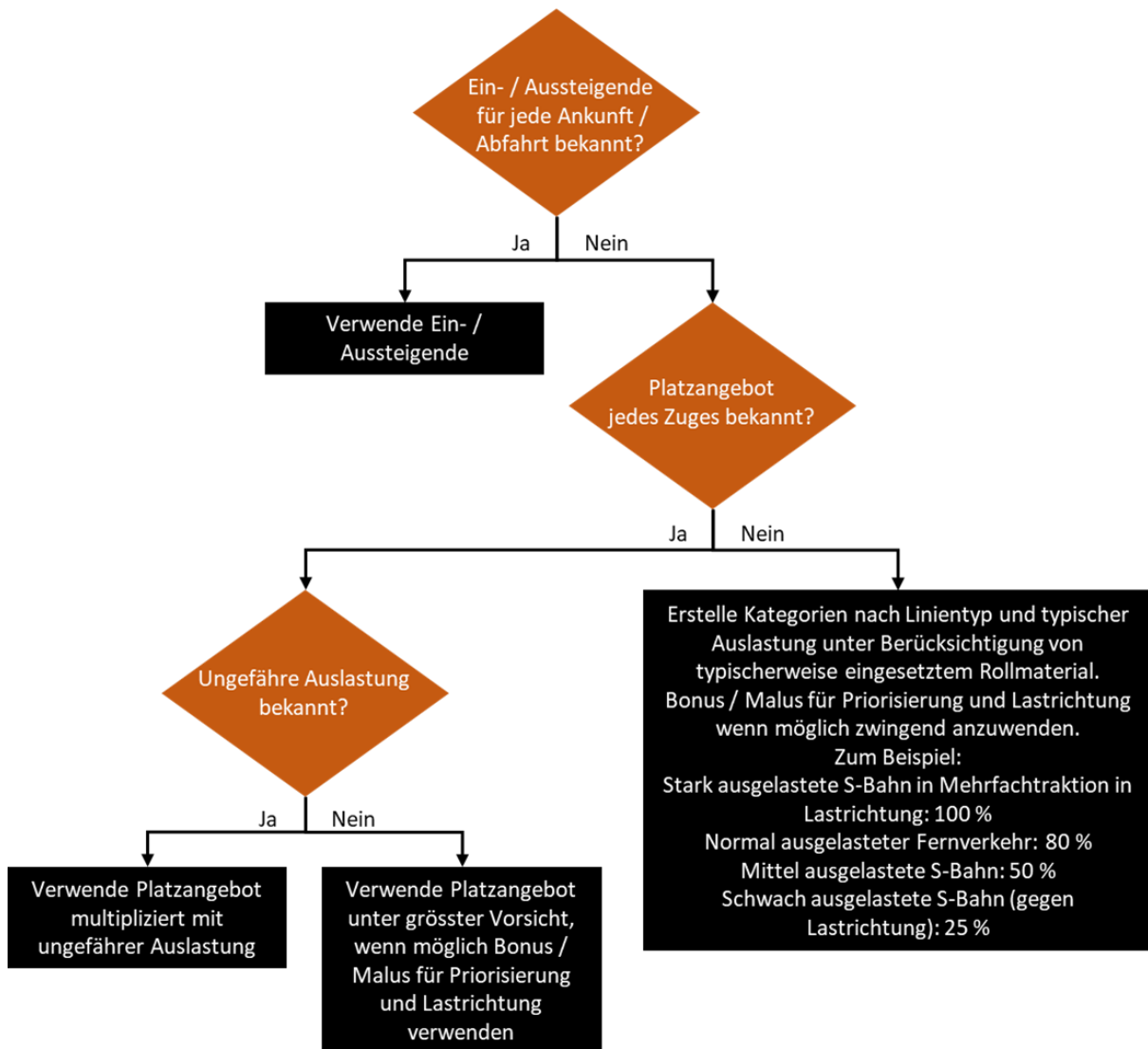


Abbildung 9: Prozessdiagramm zur Festlegung der Daten, die für die Gewichtung der Bahnankünfte und -abfahrten verwendet werden. (Eigene Darstellung)

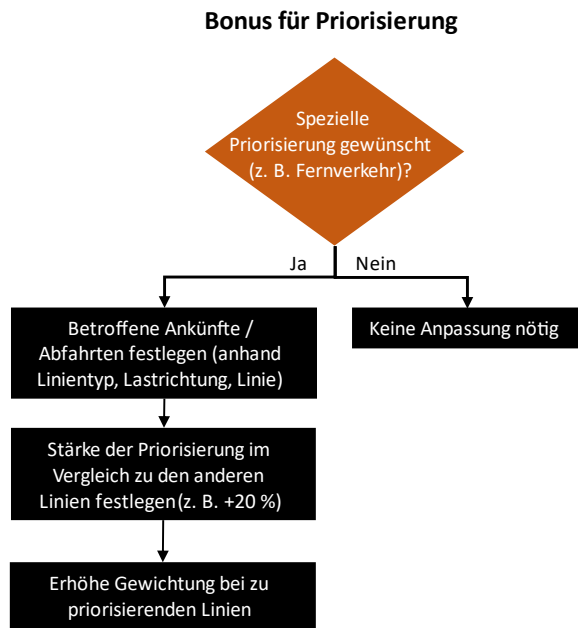


Abbildung 10: Prozessdiagramm für die Festlegung von Priorisierungen. (Eigene Darstellung)

In Fällen, in denen das Platzangebot ebenfalls nicht bekannt ist oder die Auslastung nur ungenügend abgeschätzt werden kann, ist es sinnvoll, die Bahnlinien in Kategorien nach Verkehrsart (Fernverkehr, Nahverkehr), typischer Auslastung und dem verwendeten Rollmaterial einzuteilen. Anhand dieser Kategorien kann dann eine Gewichtung vorgenommen werden (vgl. Abbildung 9).

Falls es durch den Besteller der ÖV-Leistung oder das ausführende Verkehrsunternehmen gewünscht ist, können die Anschlüsse auf einzelne Bahnlinien (beispielsweise Fernverkehrslinien) priorisiert werden. Dies, in dem die Gewichtung bei diesen entsprechend erhöht wird (vgl. Abbildung 10).

Wenn die Lastrichtung durch die verwendeten Daten nicht repräsentiert wird, aber in einem relevanten Ausmass einseitig ist, sollte dies ebenfalls in der Gewichtung berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 11).

Wenn Daten zur Anzahl aussteigender Passagiere für ankommende Züge respektive einsteigender Passagiere für abfahrende Züge vorhanden sind, sollten diese Werte verwendet werden. Die Verwendung dieser Daten ist immer dann sinnvoll, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Verteilung der Passagiere auf die ÖSPV-Linien unabhängig von der ankommenden oder abfahrenden Bahnlinie ist. Sollte ein entsprechender Zusammenhang bestehen, müsste dieser berücksichtigt werden. In der vorliegenden Methode ist dies mit Ausschliessen von einzelnen Anschlüssen möglich (vgl. Kapitel 5.3.2.3 «Anschlusswahl»). Falls solche Daten nicht bekannt sind, kann auf das Platzangebot in den Zügen zurückgegriffen werden. Falls möglich, sollte dieses jedoch mit einer ungefähren Auslastung multipliziert werden.

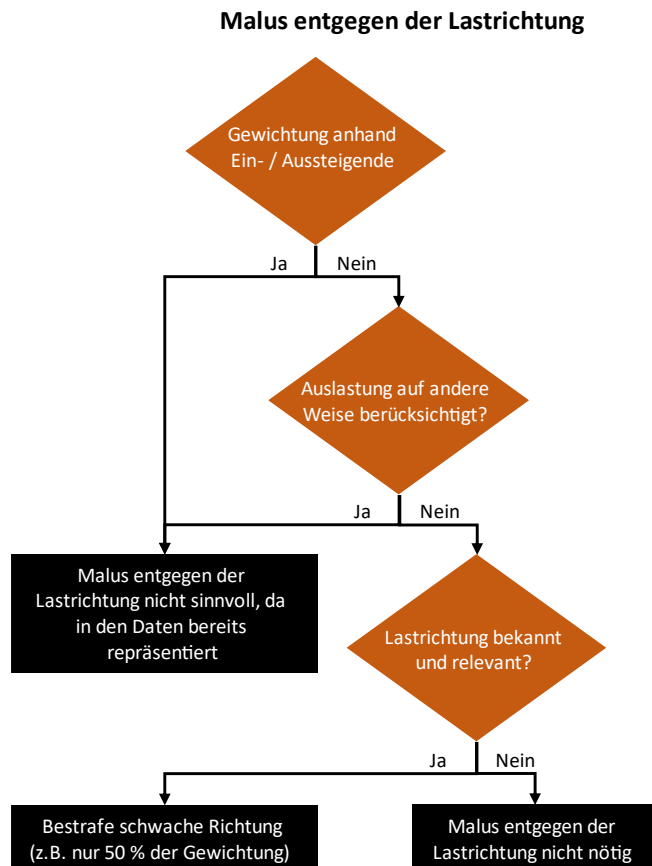


Abbildung 11: Prozessdiagramm zur Festlegung eines Malus aufgrund der Lastrichtung. (Eigene Darstellung)

Wenn Wartezeiten, die an einem oder mehreren Sekundärknoten entstehen, mehr gewichtet werden sollen als diejenigen am Hauptknoten, kann die Gewichtung aller Bahnankünfte und Bahnabfahrten an diesen Sekundärknoten erhöht werden. Damit kann verhindert werden, dass die Anschlüsse an den Sekundärknoten zu wenig beachtet werden.

5.1.4. Wegzeit

Die Wegzeit wird zur Berechnung der effektiven Wartezeit benötigt. Als Wegzeit wird die Zeit bezeichnet, die benötigt wird, um von der ÖSPV-Haltekante zum weitest entfernten Perron oder umgekehrt zu gelangen. In der Regel ist diese Zeit für alle Perrons an einem Bahnhof fixiert. Bei Bahnhöfen, deren ÖSPV-Haltekanten an verschiedenen Orten liegen (zum Beispiel auf beiden Seiten der Gleise oder einzelne Kanten aus Platzgründen etwas abseits), können jedoch unterschiedliche Wegzeiten auftreten.

Die Wegzeit wird von der gesamten Differenz zwischen Ankunfts- und Abfahrtszeit der entsprechenden Umsteigebeziehung abgezogen.

5.1.5. Minimale und maximale Haltezeiten

Die minimalen und maximalen Haltezeiten grenzen den Bereich ein, in dem die Haltezeit im Optimierungsprozess geändert werden kann. Die maximale Haltezeit sollte mindestens so gross wie die minimale Haltezeit sein.

5.2. Mathematisches Modell

Das nachfolgend erklärte Modell wurde für diese Arbeit entwickelt, da für das spezifische Problem in der Forschung kein passendes mathematisches Modell gefunden wurde.

Ein optimaler Anschluss ist gemäss der Definition in Kapitel 2.3 «Optimaler Anschluss» ein Anschluss ohne Wartezeit.

Das Ziel ist ein Modell für die Optimierung der gewichteten Wartezeit an allen Knoten. Dafür wird ein Minimierungsproblem definiert, dieses wird als «mathematisches Modell» bezeichnet. Die Zielfunktion des Minimierungsproblems ist die Summe der gewichteten Wartezeiten (vgl. Kapitel 5.1.2 «Mögliche ÖSPV-Linientypen») an allen Knoten.

Als Variablen werden die Versatzzeiten der ersten Kurse der ÖSPV-Linien am Hauptknoten sowie die Haltezeiten am Haupt- und an den möglichen Sekundärknoten je Linie verwendet. Der Betrachtungszeitraum der Methode beschränkt sich auf eine Stunde.

In diesem Kapitel wird das mathematische Modell Schritt für Schritt hergeleitet und erklärt. Als Erstes folgt die Aufteilung in Haupt- und Sekundärknoten. Für die Definition eines Haupt- und eines Sekundärknotens siehe Kapitel 5.1.1 «Definition Haupt- und Sekundärknoten». Für das Gesamtmodell siehe den Anhang II.IV.

5.2.1. Aufteilung des Modells in Haupt- und Sekundärknoten

Ziel ist es, die totale gewichtete Wartezeit λ_{total} zu minimieren.

$$\text{minimiere } \lambda_{total} \quad (1)$$

Die totale gewichtete Wartezeit λ_{total} lässt sich aufteilen in die gewichtete Wartezeit aller Anschlüsse am Hauptknoten λ_H und derjenigen am Sekundärknoten λ_S .

$$\lambda_{total} = \lambda_H + \lambda_S \quad (2)$$

In den folgenden Kapiteln werden λ_H und λ_S separat hergeleitet. Wenn eine ÖSPV-Linie über einen Sekundärknoten verfügt, sind λ_H und λ_S jedoch abhängig voneinander. So müssen λ_H und λ_S gemeinsam minimiert werden.

Siehe dazu Kapitel 5.2.4 «Zusammenfassung und Minimierung totale gewichtete Wartezeit».

5.2.2. Herleitung für den Hauptknoten

Die gewichtete Wartezeit des Hauptknotens λ_H berechnet sich aus der Summe der beiden gewichteten Wartezeiten der Anschlussbeziehung vom ÖSPV (im Modell b für busses) zu den Zügen (t für trains) $\lambda_{H_{b \rightarrow t}}$ und umgekehrt $\lambda_{H_{t \rightarrow b}}$.

$$\lambda_H = \lambda_{H_{b \rightarrow t}} + \lambda_{H_{t \rightarrow b}} \tag{3}$$

In den folgenden zwei Kapiteln werden die gewichteten Wartezeiten $\lambda_{H_{b \rightarrow t}}$ und $\lambda_{H_{t \rightarrow b}}$ hergeleitet.

5.2.2.1. Herleitung der gewichteten Wartezeit ÖSPV zu Bahn $\lambda_{H_{b \rightarrow t}}$

Die gewichtete Wartezeit wird aus der ungewichteten Wartezeit berechnet, die nun zuerst betrachtet wird.

Wenn ein spezifischer Umstieg von einem Kurs j der ÖSPV-Linie α zu einem Zug β berechnet wird, ist die Wartezeit $wtb_{t_{\alpha\beta}}$ wie folgt definiert:

$$wtb_{t_{\alpha\beta}} = Dt_{\beta} + 60 - (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + s_{\alpha}), \quad wtb_{t_{\alpha\beta}} \geq 0 \tag{4}$$

Wobei:

α	ÖSPV-Linie am Hauptknoten	β	Zug am Hauptknoten
j	Gewählter Kurs der ÖSPV-Linie α	Dt_{β}	Abfahrtsminute des Zuges β
Ab_{α}	Versatzzeit der ÖSPV-Linie α	$wtb_{t_{\alpha\beta}}$	Wartezeit bei Umstieg von Kurs j der ÖSPV-Linie α zu Zug β
T_{α}	Taktzeit der ÖSPV-Linie α		
s_{α}	Wegzeit von/zur ÖSPV-Linie α		

Die Parameter sind in Abbildung 12 in einem Zeitstrahl dargestellt.

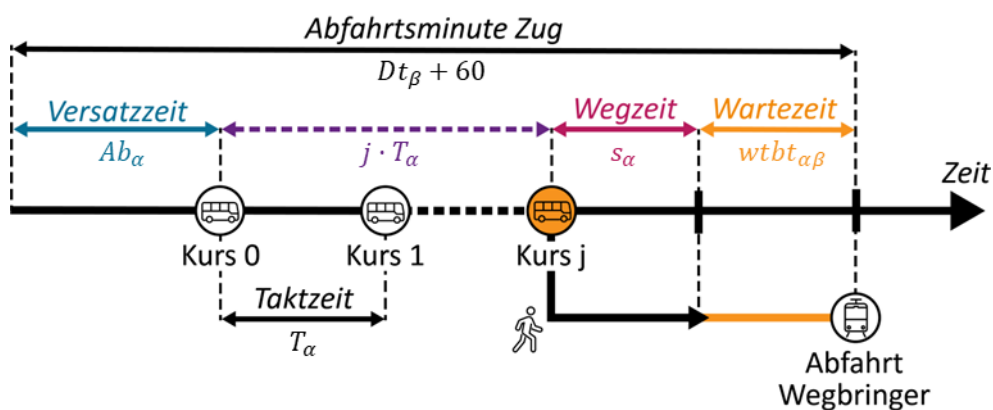


Abbildung 12: Die Parameter der Formel für $wtb_{t_{\alpha\beta}}$, dargestellt in einem Zeitstrahl. (Eigene Darstellung)

Die Variable $wtb_{t_{\alpha\beta}}$ bezeichnet die Wartezeit des Anschlusses von Kurs j der ÖSPV-Linie α zu Zug β . Wie in Formel (4) aufgezeigt, berechnet sich $wtb_{t_{\alpha\beta}}$ aus der Abfahrtszeit des Zuges Dt_{β} abzüglich der Ankunftszeit der Umsteigenden beim Zug. Diese Zeit ist gegeben durch die Versatzzeit der ÖSPV-Linie Ab_{α} , dem Versatz des Kurses $j \cdot T_{\alpha}$ und der Wegzeit s_{α} . Der

Versatz des Kurses ist nötig, um den richtigen Kurs zu berücksichtigen. Es wird zu Ab_α entsprechend dem gewählten Kurs j -mal die Taktzeit T_α dazugezählt. Die Wegzeit ist die Zeit, die für die Strecke von der Haltekante des ÖSPV zum Bahnperon benötigt wird.

Es kann sein, dass ein Zug vor der ersten Ankunft eines Kurses einer ÖSPV-Linie abfährt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Versatzzeit bei der ÖSPV-Linie 7 Minuten beträgt, der Zug aber zur Minute 2 abfährt. Würde die nachfolgende Korrektur nicht vorgenommen werden, würden die Umsteigenden vom ÖSPV den Zug nie erreichen. So ist eine Addition von 60 Minuten zur Abfahrtsminute des Zuges notwendig, um diese Fälle abzudecken. Die Auswirkungen auf die Wahl des Kurses j sind vernachlässigbar. Die j werden aufgrund der Periodizität des Fahrplans einige Kurse höher, was jedoch keinen Einfluss auf die Optimierung hat. Bei der Berechnung von $wbt_{\alpha\beta}$ können für die Wartezeit negative Werte entstehen, wenn ein Anschluss verpasst wird. Deshalb wird $wbt_{\alpha\beta}$ auf Werte grösser gleich null begrenzt.

Da nicht per se klar ist, bei welchem Kurs der ÖSPV-Linie α der Anschluss an den Zug β gegeben ist, ist der am besten passende Kurs schwierig zu definieren. Um den besten Kurs j automatisch zu wählen, wird das Minimum der Wartezeit $wbt_{\alpha\beta}$ gesucht. Dabei werden alle j im Intervall $\left[0, \frac{120}{T_\alpha}\right]$ berücksichtigt. Die Obergrenze des Intervalls $\frac{120}{T_\alpha}$ ist so gewählt, dass für zwei Stunden nach dem ersten Kurs ($j = 0$) Kurse der ÖSPV-Linie berechnet werden. So wird erreicht, dass genügend Kurse berechnet werden, um Abfahrten der Züge zur Minute 59 zu berücksichtigen, die aufgrund der Addition von 60 Minuten zur Minute 119 abfahren.

Da die Formel, für welche die Formel (5) gebraucht wird, für eine Minimierung verwendet wird, wird die folgende Formel (5) im weiteren Verlauf als «inneren Minimierung» bezeichnet.

$$\min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_\alpha}} \{wbt_{\alpha\beta} = Dt_\beta + 60 - (Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha + s_\alpha) \mid wbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \quad (5)$$

Ist das j gewählt und somit das Minimum von $wbt_{\alpha\beta}$ eindeutig definiert, wird die Wartezeit mit zwei weiteren Parametern multipliziert, um die gewichtete Wartezeit zu erhalten. Dies ist einerseits der binäre Indikator $CD_{\alpha\beta} \in \{0, 1\}$, mit dem die gewichtete Wartezeit auf null gesetzt werden kann, falls der Anschluss von der ÖSPV-Linie α zum Zug β nicht berücksichtigt werden soll. Andererseits ist dies die Gewichtung WD_β des Zugs β als Zahlenwert.

$$\lambda_{H_{\alpha \rightarrow \beta}} = CD_{\alpha\beta} \cdot WD_\beta \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_\alpha}} \{wbt_{\alpha\beta} = Dt_\beta + 60 - (Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha + s_\alpha) \mid wbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \quad (6)$$

Die Formel für $\lambda_{H_{\alpha \rightarrow \beta}}$ lässt sich nun einfach auf mehrere Züge übertragen. Für jeden vorhandenen abfahrenden Zug wird die Formel (6) berechnet und zur Gesamtsumme dazugezählt. Die Gesamtmenge der abfahrenden Züge am Hauptknoten ist n_H .

Dies wird nun für jede ÖSPV-Linie α der Gesamtmenge aller ÖSPV-Linien am Hauptknoten i_H wiederholt. Ergebnis ist folgende Formel für die gewichtete Wartezeit ÖSPV zu Bahn $\lambda_{Hb \rightarrow t}$:

$$\lambda_{Hb \rightarrow t} = \sum_{\alpha \in i_H} \sum_{\beta \in n_H} CD_{\alpha\beta} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_{\alpha}}} \{wtbt_{\alpha\beta} = Dt_{\beta} + 60 - (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + s_{\alpha}) \mid wtbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \quad (7)$$

Wobei:

Parameter:

i_H	Menge aller ÖSPV-Linien am Hauptknoten
α	ÖSPV-Linie der Menge i_H
T_{α}	Taktzeit der ÖSPV-Linie α
s_{α}	Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α
n_H	Menge aller abfahrenden Züge am Hauptknoten
β	Zug der Menge n_H
Dt_{β}	Abfahrtsminute des Zugs β
$CD_{\alpha\beta}$	Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen an Zug β
WD_{β}	Gewichtung des Anschlusses an abfahrenden Zug β

Variable der inneren Minimierung:

j	Wievielter Kurs der ÖSPV-Linie α
-----	---

Sonstige Variablen:

$wtbt_{\alpha\beta}$	Wartezeit bei Umstieg von Kurs j der ÖSPV-Linie α zu Zug β
Ab_{α}	Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
$\lambda_{Hb \rightarrow t}$	Gewichtete Wartezeit ÖSPV zu Bahn

5.2.2.2. Herleitung der gewichteten Wartezeit Bahn zu ÖSPV $\lambda_{Ht \rightarrow b}$

Die gewichtete Wartezeit $\lambda_{Ht \rightarrow b}$ wird analog zur gewichteten Wartezeit der Anschlussbeziehung ÖSPV zu Bahn berechnet.

Unterschiede gibt es in der Berechnung der Wartezeit. Hier wird die Ankunftsminute der Züge At_{β} und die Abfahrtsminute des ÖSPV $Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + st_{\alpha}$ benötigt.

Die Wartezeit $wttb_{\beta\alpha}$ ist wie folgt definiert:

$$wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + st_{\alpha}) - (At_{\beta} + 60 + s_{\alpha}), \quad wttb_{\beta\alpha} \geq 0 \quad (8)$$

Wobei:

α	ÖSPV-Linie am Hauptknoten	β	Zug am Hauptknoten
j	Gewählter Kurs der ÖSPV-Linie α	At_{β}	Ankunftsminute des Zugs β
Ab_{α}	Versatzzeit der ÖSPV-Linie α	$wttb_{\beta\alpha}$	Wartezeit bei Umstieg von Zug β zu Kurs j der ÖSPV-Linie α
T_{α}	Taktzeit der ÖSPV-Linie α	st_{α}	Haltezeit von ÖSPV-Linie α
s_{α}	Wegzeit von/zur ÖSPV-Linie α		

Die Parameter sind in Abbildung 13 in einem Zeitstrahl dargestellt.

Bei der Wahl des optimalen j , beziehungsweise der inneren Minimierung gibt es eine Änderung des gegebenen Intervalls für j . Neu ist das Intervall definiert als $\left[0, \frac{120+T_{\alpha}}{T_{\alpha}}\right]$. Grund für die geänderte Obergrenze ist, dass aufgrund der geänderten Anschlussbeziehung beim ÖSPV ein Kurs mehr infrage kommt.

Für die Berechnung der gewichteten Wartezeit wird der binäre Indikator $CA_{\beta\alpha}$ und die Gewichtung WD_{β} der geänderten Anschlussbeziehung angepasst.

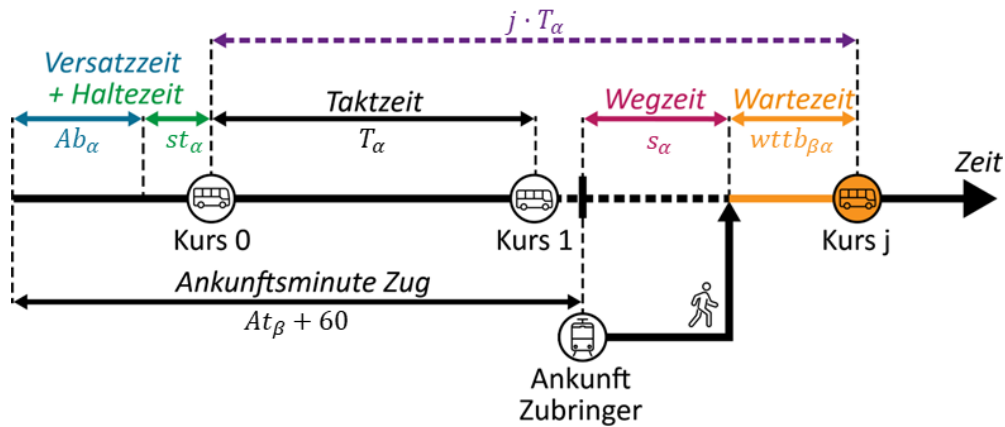


Abbildung 13: Die Parameter für die Formel $wttb_{\beta\alpha}$, dargestellt in einem Zeitstrahl. (Eigene Darstellung)

Somit lässt sich die gewichtete Wartezeit $\lambda_{H_{t \rightarrow b}}$ wie folgt definieren:

$$\lambda_{H_{t \rightarrow b}} = \sum_{\alpha \in i_H} \sum_{\beta \in m_H} CA_{\beta\alpha} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120+T_{\alpha}}{T_{\alpha}}} \{wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + st_{\alpha}) - (At_{\beta} + 60 + s_{\alpha}) \mid wttb_{\beta\alpha} \geq 0\} \quad (9)$$

Wobei:

Parameter:

- i_H Menge aller ÖSPV-Linien am Hauptknoten
- α ÖSPV-Linie der Menge i_H
- T_{α} Taktzeit der ÖSPV-Linie α
- s_{α} Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α
- m_H Menge aller ankommenden Züge am Hauptknoten
- β Zug der Menge m_H
- At_{β} Ankunftsminute des Zugs β
- $CA_{\beta\alpha}$ Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen von Zug β zu ÖSPV-Linie α
- WD_{β} Gewichtung des Anschlusses an abfahrenden Zug β

Variable der inneren Minimierung:

- j Wievielter Kurs der ÖSPV-Linie α

Sonstige Variablen:

- $wttb_{\beta\alpha}$ Wartezeit bei Umstieg von Zug β zu Kurs j der ÖSPV-Linie α
- Ab_{α} Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
- st_{α} Haltezeit von ÖSPV-Linie α
- $\lambda_{H_{t \rightarrow b}}$ Gewichtete Wartezeit Bahn zu ÖSPV

5.2.2.3. Zusammenfassung und Definition: Minimierungsproblem Hauptknoten

Gemäss Formel (3) ist die gesamte gewichtete Wartezeit für den Hauptknoten die Summe der gewichteten Wartezeit der beiden Anschlussbeziehungen: $\lambda_H = \lambda_{H_{b \rightarrow t}} + \lambda_{H_{t \rightarrow b}}$. Mit der hergeleiteten Formel (7) für $\lambda_{H_{b \rightarrow t}}$ und Formel (9) für $\lambda_{H_{t \rightarrow b}}$ aus den vorherigen Kapiteln kann nun die Summe gebildet werden.

$$\begin{aligned} \lambda_H &= \lambda_{H_{b \rightarrow t}} + \lambda_{H_{t \rightarrow b}} \\ &= \sum_{\alpha \in i_H} \sum_{\beta \in n_H} CD_{\alpha\beta} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_{\alpha}}} \{wttb_{\alpha\beta} = Dr_{\beta} + 60 - (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + s_{\alpha}) \mid wttb_{\alpha\beta} \geq 0\} \\ &+ \sum_{\alpha \in i_H} \sum_{\beta \in m_H} CA_{\beta\alpha} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120+T_{\alpha}}{T_{\alpha}}} \{wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + st_{\alpha}) - (At_{\beta} + 60 + s_{\alpha}) \mid wttb_{\beta\alpha} \geq 0\} \end{aligned} \quad (10)$$

Für die Minimierung der gewichteten Wartezeit des Hauptknotens λ_H werden die Variablen Kurs j , die Versatzzeit des ÖSPV Ab_α und die Haltezeit st_α verwendet. Dabei wird die Variable j zweimal unabhängig voneinander für die inneren Minimierungen zur eindeutigen Bestimmung des Minimums von $wbtb_{\alpha\beta}$ und $wttb_{\beta\alpha}$, verwendet.

Parameter:

i_H	Menge aller ÖSPV-Linien am Hauptknoten
α	ÖSPV-Linie der Menge i_H
T_α	Taktzeit der ÖSPV-Linie α
s_α	Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α
m_H	Menge aller ankommenden Züge am Hauptknoten
n_H	Menge aller abfahrenden Züge am Hauptknoten
β	Zug der Menge m_H oder n_H
At_β	Ankunftsminute des Zugs β
Dt_β	Abfahrtsminute des Zugs β
$CD_{\alpha\beta}$	Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen ÖSPV-Linie α zu Zug β
$CA_{\beta\alpha}$	Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen von Zug β zu ÖSPV-Linie α
WD_β	Gewichtung des Anschlusses an/von Zug β

Variable der inneren Minimierung:

j	Wievielter Kurs der ÖSPV-Linie α
-----	---

Variablen für Minimierung:

Ab_α	Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
st_α	Haltezeit von ÖSPV-Linie α

Sonstige Variablen:

$\lambda_{Hb \rightarrow t}$	Gewichtete Wartezeit ÖSPV zu Bahn
$\lambda_{Ht \rightarrow b}$	Gewichtete Wartezeit Bahn zu ÖSPV
$wbtb_{\alpha\beta}$	Wartezeit bei Umstieg von Kurs j der ÖSPV-Linie α zu Zug β
$wttb_{\beta\alpha}$	Wartezeit bei Umstieg von Zug β zu Kurs j der ÖSPV-Linie α

Für die vollständige Definition des Minimierungsproblems müssen Nebenbedingungen aufgestellt werden, welche die Variablen einschränken. Dafür braucht es zusätzlich zwei Konstanten: Die minimale Haltezeit $st_{\min\alpha}$ und die maximale Haltezeit $st_{\max\alpha}$.

Die Nebenbedingungen lauten:

$$Ab_\alpha \leq T_\alpha \tag{11}$$

Die Versatzzeit Ab_α der ÖSPV-Linie α soll kleiner sein als die Taktzeit.

$$Ab_\alpha = int \tag{12}$$

Die Versatzzeit Ab_α der ÖSPV-Linie α soll ganzzahlig sein.

$$st_{\min\alpha} \leq st_\alpha \leq st_{\max\alpha} \tag{13}$$

Die Haltezeit st_α der ÖSPV-Linie α wird begrenzt durch die minimale Haltezeit $st_{\min\alpha}$ und die maximale Haltezeit $st_{\max\alpha}$, welche beide zu Beginn der Optimierung definiert werden.

$$st_\alpha = int \tag{14}$$

Die Haltezeit st_α der ÖSPV-Linie α soll ganzzahlig sein.

$$Ab_\alpha, st_\alpha \geq 0 \tag{15}$$

Die Variablen Versatzzeit Ab_α und Haltezeit st_α der ÖSPV-Linie α sollen grösser gleich null sein.

Wichtig:

Ist bei der ÖSPV-Linie α ein Sekundärknoten vorhanden und es liegt der Spezialfall vor, dass der Hauptknoten eine Wendehaltestelle ist (vgl. Kapitel 5.1.2.6 «Einbindung des Sekundärknotens, wenn nur der Hauptknoten eine Wendehaltestelle ist»), dann wird für λ_H je eine Anschlussbeziehung bei jeder der beiden Linien nicht berücksichtigt. Ist bei der Linie der Sekundärknoten «vor» dem Hauptknoten, so werden die Wartezeiten der Anschlüsse Bahn zu ÖSPV $\lambda_{H \rightarrow b}$ am Hauptknoten gleich null gesetzt, also nicht betrachtet. Ist der Sekundärknoten bei der Linie jedoch «nach» dem Hauptknoten, so werden die Wartezeiten der Anschlüsse ÖSPV zu Bahn $\lambda_{H \rightarrow t}$ am Hauptknoten gleich null gesetzt.

5.2.3. Herleitung für die Sekundärknoten

Die Inputparameter für die Sekundärknoten unterscheiden sich nur geringfügig von denjenigen des Hauptknotens. Wie beim Hauptknoten werden für jeden Sekundärknoten die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Züge angegeben. Anders als beim Hauptknoten wird die Ankunftszeit der ÖSPV-Linie nicht direkt angegeben, sondern aus der Versatzzeit der ÖSPV-Linie am Hauptknoten und der Fahrzeit zwischen Hauptknoten und Sekundärknoten berechnet. Somit ist die gewichtete Wartezeit am Sekundärknoten λ_S verknüpft mit der Versatzzeit der ÖSPV-Linie am Hauptknoten Ab_α .

Aus diesem Grund spielt es eine Rolle, ob der Sekundärknoten bei einer ÖSPV-Linie vor oder nach dem Hauptknoten bedient wird, da sich so die Berechnungsmethode verändert (vgl. Kapitel 5.1.2 «Mögliche ÖSPV-Linientypen»). Wenn die Linie am Sekundär- endet, muss dies genauer betrachtet werden, da die Einflüsse auf das Modell sehr gross sind. Siehe dazu Kapitel 5.2.3.3 «Spezialfälle».

Ebenso muss aufgrund dieser Verknüpfung für die Optimierung von λ_{total} die Optimierung von λ_H und λ_S am Haupt- und Sekundärknoten gleichzeitig durchgeführt werden.

Wie beim Hauptknoten lässt sich bei den Sekundärknoten die gewichtete Wartezeit λ_S als Summe der gewichteten Wartezeiten der beiden Anschlussbeziehungen darstellen.

$$\lambda_S = \lambda_{S_{b \rightarrow t}} + \lambda_{S_{t \rightarrow b}} \quad (16)$$

5.2.3.1. Herleitung der gewichteten Wartezeit ÖSPV zu Bahn $\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$

Die Information, welcher Sekundärknoten x bei der jeweiligen ÖSPV-Linie α berücksichtigt wird, ist gegeben. Die Parameter der ÖSPV-Linien sind bezüglich des Sekundärknotens eindeutig gegeben und nicht abhängig von x , da der für die jeweilige Linie gewählte Sekundärknoten bei der Eingabe bereits berücksichtigt wird. Bei den Bahnfahrplänen ist jedoch für jeden Sekundärknoten ein eigener Fahrplan vorhanden. Um in den folgenden Formeln die Wahl des richtigen Bahnfahrplanes für die jeweilige ÖSPV-Linie zu ermöglichen, wird bei diesen Parametern x als Index verwendet.

Der Unterschied zur Berechnung beim Hauptknoten liegt darin, dass die Versatzzeit der ÖSPV-Linie hier nicht direkt bekannt ist, sondern von der Abfahrtszeit am Hauptknoten abhängt. Damit die Logik der Berechnung der Wartezeit vom Hauptknoten übernommen werden kann, wird die Versatzzeit mithilfe einer relativen Versatzzeit $A_{rel\alpha}$ separat berechnet.

Die Summe der relativen Versatzzeit $A_{rel\alpha}$ mit der Ankunftszeit des Kurses j am Hauptknoten $Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha$ ergibt die Versatzzeit am Sekundärknoten.

Dabei spielt es eine Rolle, ob der Sekundärknoten der ÖSPV-Linie vor oder nach dem Hauptknoten angefahren wird. Diese Information ist als Input verfügbar.

Die relative Versatzzeit $A_{rel\alpha}$ ergibt sich aus dem Input «vor» oder «nach»:

$$\begin{aligned} \text{Wenn "vor": } A_{rel\alpha} &= -t_\alpha - st_{S\alpha} \\ \text{Wenn "nach": } A_{rel\alpha} &= st_\alpha + t_\alpha \end{aligned} \quad (17)$$

Wobei:

- α ÖSPV-Linie mit Sekundärknoten
- $A_{rel\alpha}$ Relative Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
- t_α Fahrtzeit Haupt- zu Sekundärknoten und umgekehrt der ÖSPV-Linie α
- $st_{S\alpha}$ Haltezeit der ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
- st_α Haltezeit der ÖSPV-Linie α am Hauptknoten

Die Formel der Wartezeit $wbt_{\alpha\beta}$ für den Umstieg von einer ÖSPV-Linie α zu Zug β am Sekundärknoten wird entsprechend angepasst:

$$wbt_{\alpha\beta} = Dt_\beta + 60 - (Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha + A_{rel\alpha} + s_{S\alpha}), \quad wbt_{\alpha\beta} \geq 0 \quad (18)$$

Wobei:

- α ÖSPV-Linie mit Sekundärknoten
- β Zug, hier am Sekundärknoten x
- x Wahl des Sekundärknotens (gegeben durch ÖSPV-Linie α)
- $wbt_{\alpha\beta}$ Wartezeit von ÖSPV-Linie α zu Zug β
- Dt_β Abfahrtsminute des Zugs β
- $Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha$ Ankunftsminute ÖSPV-Linie α am Hauptknoten
- $A_{rel\alpha}$ Relative Versatzzeit (vgl. Formel (17))
- $s_{S\alpha}$ Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten

Der Ansatz für die Transformation zur gewichteten Wartezeit $\lambda_{S\alpha \rightarrow \beta}$ ist derselbe wie beim Hauptknoten. Es wird für alle j im Intervall $\left[0, \frac{120}{T_\alpha}\right]$ die minimale Wartezeit gesucht und danach mit einem binären Indikator $CD_{\alpha\beta} \in \{0, 1\}$ und der Gewichtung WD_β multipliziert. Dies ergibt die folgende Formel:

$$\lambda_{S\alpha \rightarrow \beta} = CD_{\alpha\beta} \cdot WD_\beta \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_\alpha}} \{wbt_{\alpha\beta} = Dt_\beta + 60 - (Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha + A_{rel\alpha} + s_{S\alpha}) \mid wbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \quad (19)$$

Wobei $wbt_{\alpha\beta}$ die Wartezeit von ÖSPV-Linie α zu Zug β ist (vgl. Formel (18)).

Um von einer Verbindung α zu β auf alle zu schliessen, können analog zum Hauptknoten über die Menge aller ÖSPV-Linien mit Sekundärknoten i_S und der Menge aller abfahrenden Züge am Sekundärknoten n_{S_x} zwei Summen gebildet werden.

$$\lambda_{S_{b \rightarrow t}} = \sum_{\alpha \in i_S} \sum_{\beta \in n_{S_x}} CD_{\alpha\beta} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_{\alpha}}} \{wtbt_{\alpha\beta} = Dt_{\beta} + 60 - (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + A_{rel_{\alpha}} + s_{S_{\alpha}}) \mid wtbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \quad (20)$$

Parameter:

- i_S Menge aller ÖSPV-Linien mit Sekundärknoten
- α ÖSPV-Linie der Menge i_S
- x Wahl des Sekundärknotens (gegeben durch ÖSPV-Linie α)
- T_{α} Taktzeit der ÖSPV-Linie α
- $s_{S_{\alpha}}$ Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
- n_{S_x} Menge aller abfahrenden Züge am Sekundärknoten x
- β Zug der Menge n_{S_x}
- Dt_{β} Abfahrtsminute des Zugs β
- $CD_{\alpha\beta}$ Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen ÖSPV-Linie α zu Zug β
- WD_{β} Gewichtung des Anschlusses an abfahrenden Zug β

Variable der inneren Minimierung:

- j Wievielter Kurs der ÖSPV-Linie α

Sonstige Variablen:

- $wtbt_{\alpha\beta}$ Wartezeit bei Umstieg von Kurs j der ÖSPV-Linie α zu Zug β
- Ab_{α} Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
- $\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$ Gewichtete Wartezeit ÖSPV zu Bahn

5.2.3.2. Herleitung der gewichteten Wartezeit Bahn zu ÖSPV $\lambda_{S_{t \rightarrow b}}$

Die Herleitung der gewichteten Wartezeit Bahn zu ÖSPV $\lambda_{S_{t \rightarrow b}}$ funktioniert analog zur Herleitung der gewichteten Wartezeit ÖSPV zu Bahn $\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$ des vorherigen Kapitels und der Herleitung der gewichteten Wartezeit $\lambda_{t \rightarrow b}$ am Hauptknoten.

Die Formel der Wartezeit $wttb_{\beta\alpha}$ wird an den Sekundärknoten angepasst. Dafür wird die relative Versatzzeit $A_{rel_{\alpha}}$ aus Formel (18) verwendet.

$$wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + A_{rel_{\alpha}} + st_{S_{\alpha}}) - (At_{\beta} + 60 + s_{S_{\alpha}}), \quad wttb_{\beta\alpha} \geq 0 \quad (21)$$

Wobei:

- α ÖSPV-Linie mit Sekundärknoten
- x Wahl des Sekundärknotens (gegeben durch ÖSPV-Linie α)
- β Zug, hier am Sekundärknoten x
- $wttb_{\beta\alpha}$ Wartezeit von Zug β zu ÖSPV-Linie α , hier jetzt am Sekundärknoten
- $Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha}$ Ankunftsminute ÖSPV-Linie α am Hauptknoten
- $A_{rel_{\alpha}}$ Relative Versatzzeit (vgl. Formel (17))
- $st_{S_{\alpha}}$ Haltezeit am Sekundärknoten
- At_{β} Ankunftsminute Zug β
- $s_{S_{\alpha}}$ Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten

Aus der Wartezeit wird, analog zum Hauptknoten die gewichtete Wartezeit aller Linien hergeleitet, indem die Wartezeit minimiert, gewichtet und über alle Linien aufsummiert wird:

$$\lambda_{S_t \rightarrow b} = \sum_{\alpha \in I_S} \sum_{\beta \in m_{S_x}} CA_{\beta\alpha} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120+T_{\alpha}}{T_{\alpha}}} \{wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + A_{rel_{\alpha}} + st_{S_{\alpha}}) - (At_{\beta} + 60 + s_{S_{\alpha}}) \mid wttb_{\beta\alpha} \geq 0\} \quad (22)$$

Parameter:

- i_S Menge aller ÖSPV-Linien mit Sekundärknoten
- α ÖSPV-Linie der Menge i_S
- x Wahl des Sekundärknotens (gegeben durch ÖSPV-Linie α)
- T_{α} Taktzeit der ÖSPV-Linie α
- $s_{S_{\alpha}}$ Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
- m_{S_x} Menge aller ankommenden Züge am Sekundärknoten x
- β Zug der Menge m_{S_x}
- At_{β} Ankunftsminute des Zugs β
- $CA_{\beta\alpha}$ Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen von Zug β zu ÖSPV-Linie α
- WD_{β} Gewichtung des Anschlusses an abfahrenden Zug β

Variable der inneren Minimierung:

- j Wievielter Kurs der ÖSPV-Linie α

Sonstige Variablen:

- $wttb_{\beta\alpha}$ Wartezeit bei Umstieg von Zug β zu Kurs j der ÖSPV-Linie α
- Ab_{α} Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
- $st_{S_{\alpha}}$ Haltezeit von ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
- $\lambda_{S_t \rightarrow b}$ Gewichtete Wartezeit Bahn zu ÖSPV

5.2.3.3. Spezialfälle

Wie in Kapitel 5.1.2 «Mögliche ÖSPV-Linientypen» beschrieben, gibt es verschiedene Spezialfälle, die im Modell berücksichtigt werden müssen:

Einerseits ist dies der Spezialfall, dass die ÖSPV-Linie einen Sekundärknoten als Wendehaltestelle bedient und andererseits der Spezialfall, dass die ÖSPV-Linie den Haupt- und den Sekundärknoten als Wendehaltstellen nutzt.

Spezialfall: Der Sekundärknoten ist Wendehaltestelle

In diesem Fall sind zwei verschiedene Szenarien möglich. Aufgrund der in Kapitel 5.1.2.4 «Einbindung des Sekundärknotens als Wendehaltestelle» beschriebenen wegfallenden Anschlussbeziehungen muss die Berechnung der (gewichteten) Wartezeit entsprechend angepasst werden. Ist bei der Linie der Sekundärknoten «nach» dem Hauptknoten, so werden die Wartezeiten der Anschlüsse Bahn zu ÖSPV $\lambda_{S_t \rightarrow b}$ gleich null gesetzt, also nicht betrachtet.

Ist der Sekundärknoten bei der Linie «vor» dem Hauptknoten, so werden die Wartezeiten der Anschlüsse ÖSPV zu Bahn $\lambda_{S_b \rightarrow t}$ gleich null gesetzt.

Spezialfall: Hauptknoten und Sekundärknoten sind beides Wendehaltstellen

In diesem Fall ist nur noch eine Linie vorhanden (vgl. Kapitel 5.1.2.5 «Einbindung des Sekundärknotens, wenn beide Knoten Wendehaltstellen sind»). Es muss die berechnete Wendezeit am Sekundärknoten verwendet werden, da dieser Wert sich aus den anderen berechnen lässt und somit fixiert ist. Die Berechnung dieser Halte- beziehungsweise Wendezeit am Sekundärknoten ist in Formel (23) zu finden.

Der Hauptteil der Formel ist die Berechnung des Rests der Division aller bekannten Fahrt- und Haltezeiten mit der Taktzeit. Die Summe der bekannten Fahrt- und Wartezeiten bildet sich aus der doppelten Fahrtzeit (Hin- und Rückrichtung) und der gewählten Haltezeit am Hauptknoten. Wenn die Differenz der Taktzeit und des Rests mindestens so gross ist wie die gegebene minimale Haltezeit am Sekundärknoten, so ist die Haltezeit am Sekundärknoten gleich dieser Differenz. Wenn diese Differenz kleiner als die minimale Haltezeit ist, wird eine ganze Taktzeit zur Haltezeit am Sekundärknoten addiert. So wird sichergestellt, dass die ÖSPV-Linien immer im gewählten Takt verkehren und die Mindesthaltezeit eingehalten wird.

$$\begin{aligned}
 st_{S_{\alpha prov}} &= T_{\alpha} - Rest\left(\frac{2 \cdot t_{\alpha} + st_{\alpha}}{T_{\alpha}}\right) \\
 st_{S_{\alpha prov}} \geq st_{S_{min\alpha}} &: st_{S_{\alpha}} = st_{S_{\alpha prov}} \\
 st_{S_{\alpha prov}} < st_{S_{min\alpha}} &: st_{S_{\alpha}} = st_{S_{\alpha prov}} + T_{\alpha}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Wobei:

$st_{S_{\alpha prov}}$	Provisorische Haltezeit der ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
$st_{S_{\alpha}}$	Haltezeit der ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
$st_{S_{min\alpha}}$	Minimale Haltezeit der ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
st_{α}	Haltezeit der ÖSPV-Linie α am Hauptknoten
T_{α}	Taktzeit der ÖSPV-Linie α
t_{α}	Fahrtzeit Haupt- zu Sekundärknoten und umgekehrt der ÖSPV-Linie α

5.2.3.4. Zusammenfassung und Definition: Minimierungsproblem Sekundärknoten

Analog zum Hauptknoten ist beim Sekundärknoten gemäss Formel (16) die gesamte gewichtete Wartezeit am Sekundärknoten die Summe der gewichteten Wartezeiten der beiden Anschlussbeziehungen: $\lambda_S = \lambda_{S_{b \rightarrow t}} + \lambda_{S_{t \rightarrow b}}$. Somit ergibt sich aus der Kombination der Formeln (20) für $\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$ und (22) für $\lambda_{S_{t \rightarrow b}}$:

$$\begin{aligned} & \lambda_S = \lambda_{S_{b \rightarrow t}} + \lambda_{S_{t \rightarrow b}} \\ = & \sum_{\alpha \in i_S} \sum_{\beta \in n_{S_x}} CD_{\alpha\beta} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_{\alpha}}} \{wtbt_{\alpha\beta} = Dt_{\beta} + 60 - (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + A_{rel_{\alpha}} + s_{S_{\alpha}}) \mid wtbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \\ + & \sum_{\alpha \in i_S} \sum_{\beta \in m_{S_x}} CA_{\beta\alpha} \cdot WD_{\beta} \\ & \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120+T_{\alpha}}{T_{\alpha}}} \{wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + A_{rel_{\alpha}} + s_{S_{\alpha}}) - (At_{\beta} + 60 + s_{S_{\alpha}}) \mid wttb_{\beta\alpha} \geq 0\} \end{aligned} \quad (24)$$

Für die Minimierung der gewichteten Wartezeit des Sekundärknotens λ_S werden die Variablen Kurs j , die Versatzzeit der ÖSPV-Linie Ab_{α} und die Haltezeit am Sekundärknoten $st_{S_{\alpha}}$ verwendet, wobei die Variable j für die beiden inneren Minimierungen zur eindeutigen Bestimmung des Minimums von $wtbt_{\alpha\beta}$ und $wttb_{\beta\alpha}$ verwendet wird.

Parameter:

- i_S Menge aller ÖSPV-Linien mit Sekundärknoten
- α ÖSPV-Linie der Menge i_S
- x Wahl des Sekundärknotens (gegeben durch ÖSPV-Linie α)
- T_{α} Taktzeit der ÖSPV-Linie α
- $s_{S_{\alpha}}$ Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
- m_{S_x} Menge aller ankommenden Züge am Sekundärknoten x
- n_{S_x} Menge aller abfahrenden Züge am Sekundärknoten x
- β Zug der Menge m_{S_x} oder n_{S_x}
- At_{β} Ankunftsminute des Zugs β
- Dt_{β} Abfahrtsminute des Zugs β
- $CA_{\beta\alpha}$ Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen von Zug β zu ÖSPV-Linie α
- $CD_{\alpha\beta}$ Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen an Zug β
- WD_{β} Gewichtung des Anschlusses an abfahrenden Zug β

Variable der inneren Minimierung:

- j Wievielter Kurs der ÖSPV-Linie α

Variablen für Minimierung:

- Ab_{α} Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
- $st_{S_{\alpha}}$ Haltezeit von ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten

Sonstige Variablen:

- $wtbt_{\alpha\beta}$ Wartezeit bei Umstieg von Kurs j der ÖSPV-Linie α zu Zug β
- $wttb_{\beta\alpha}$ Wartezeit bei Umstieg von Zug β zu Kurs j der ÖSPV-Linie α
- $\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$ Gewichtete Wartezeit ÖSPV zu Bahn
- $\lambda_{S_{t \rightarrow b}}$ Gewichtete Wartezeit Bahn zu ÖSPV

Für die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems des Sekundärknotens sind zusätzliche Konstanten nötig: Die minimale Haltezeit $st_{S_{\min\alpha}}$ und die maximale Haltezeit $st_{S_{\max\alpha}}$ am Sekundärknoten.

Die Nebenbedingungen lauten:

$$Ab_{\alpha} \leq T_{\alpha} \quad (25)$$

Die Versatzzeit Ab_{α} der ÖSPV-Linie α soll kleiner sein als die Taktzeit.

$$Ab_{\alpha} = int \quad (26)$$

Die Versatzzeit Ab_{α} der ÖSPV-Linie α soll eine ganzzahlige Zahl sein.

$$st_{S_{\min\alpha}} \leq st_{S_{\alpha}} \leq st_{S_{\max\alpha}} \quad (27)$$

Die Haltezeit $st_{S_{\alpha}}$ der ÖSPV-Linie α pro Linie wird begrenzt durch die minimale Haltezeit $st_{S_{\min\alpha}}$ und die maximale Haltezeit $st_{S_{\max\alpha}}$, welche beide zu Beginn der Optimierung definiert werden.

$$st_{S_{\alpha}} = int \quad (28)$$

Die Haltezeit $st_{S_{\alpha}}$ der ÖSPV-Linie α soll ganzzahlig sein.

$$Ab_{\alpha}, st_{S_{\alpha}} \geq 0 \quad (29)$$

Die Variablen Versatzzeit Ab_{α} und Haltezeit $st_{S_{\alpha}}$ der ÖSPV-Linie α sollen grösser gleich null sein.

Wichtig:

Liegt beim Sekundärknoten der ÖSPV-Linie α ein Spezialfall vor (vgl. Kapitel 5.2.3.3 «Spezialfälle») muss ...

..., wenn der Sekundärknoten eine Wendehaltestelle ist, entweder nur $\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$ oder $\lambda_{S_{t \rightarrow b}}$ für λ_S berücksichtigt werden.

..., wenn der Hauptknoten und der Sekundärknoten beides Wendehaltestellen sind anstelle von st_S die fix berechnete Wartezeit verwendet werden.

..., wenn der Hauptknoten eine Wendehaltestelle ist, die Berechnung der gewichteten Wartezeit am Hauptknoten angepasst werden.

5.2.4. Zusammenfassung und Minimierung totale gewichtete Wartezeit

Mit den hergeleiteten Formeln für die gewichtete Wartezeit λ_H und λ_S kann gemäss Formel (2) die totale gewichtete Wartezeit $\lambda_{total} = \lambda_H + \lambda_S$ berechnet werden. Die komplette Formel für λ_{total} sowie die Formulierung des Minimierungsproblems für λ_{total} befindet sich im Anhang II.IV «Mathematisches Gesamtmodell». Dieses ist eine Kombination der in den Kapiteln 5.2.2.3 «Zusammenfassung und Definition: Minimierungsproblem Hauptknoten» und 5.2.3.4 «Zusammenfassung und Definition: Minimierungsproblem Sekundärknoten» hergeleiteten Minimierungsprobleme für λ_H und λ_S .

Um die Wechselwirkungen zwischen Haupt- und Sekundärknoten bei der Minimierung zu berücksichtigen, müssen die beiden Minimierungsprobleme für λ_H und λ_S gemeinsam minimiert werden. Dabei kann ÖSPV-linienweise vorgegangen werden, da es keine Wechselwirkungen zwischen den Linien gibt.

5.3. Anwendung der Methode mit einer Kalkulationstabelle

Das im vorherigen Kapitel beschriebene mathematische Modell ist die theoretische Grundlage für die Umsetzung in einem Berechnungstool. Für dieses Tool wurde die Kalkulationstabellen-Software «Excel» von Microsoft gewählt. Dies, weil Excel sehr weit verbreitet und auf den Computern des Industriepartners bereits installiert ist. Die weite Verbreitung trägt dazu bei, dass die erwarteten Nutzenden in der Anwendung von Excel bereits geschult und erfahren sind. Dies wirkt sich sehr positiv auf die Usability des Tools aus, da keine Schulungen in einem neuen Programm nötig sind. Aufgrund der verwendeten Formeln funktioniert das entwickelte Tool nur in Versionen ab Excel 2013.

In diesem Kapitel wird zunächst auf den Aufbau des Tools eingegangen und anschliessend werden die verschiedenen Teile detailliert erklärt.

5.3.1. Aufbau des Tools, User Interface und Vorgehen Optimierung

Die Excel-Kalkulationstabelle ist in mehrere Tabellenblätter gegliedert:

Eingabedatenblätter:

- Bahnfahrplan Hauptknoten
- Bahnfahrplan Sekundärknoten
- ÖSPV-Linien
- Anschlusswahl

Zentrales Steuerungsblatt:

- Hauptblatt


Berechnungsblatt:

- Berechnungen

Blätter für den grafischen Output:

- Wartezeiten Hauptknoten
- Wartezeiten Sekundärknoten
- Standzeiten
- Histogramme Hauptknoten
- Histogramme Sekundärknoten

Bei den Eingabedatenblättern gibt es ein Blatt für den Bahnfahrplan des Hauptknotens und je ein Blatt für den Bahnfahrplan jedes Sekundärknotens. Die Blätter sind nach der Abkürzung des Bahnknotens benannt. Zusätzlich ist ein leeres Sekundärknotenblatt vorhanden, das für eine mögliche Erweiterung der Sekundärknoten kopiert und ausgefüllt werden kann. Die Dateneingabe ist in Kapitel 5.3.2 «Eingabedaten» detailliert beschrieben.

Die Felder in der Kalkulationstabelle, die für Usereingaben vorgesehen sind, sind jeweils orange  markiert.

Das zentrale Steuerungsblatt «Hauptblatt» umfasst die Zusammenfassung der Resultate und Steuerungsmöglichkeiten für die Berechnung und Optimierung. Die Variablen der Minimierung können manuell oder mit dem Optimierungsvorgang, der auf diesem Blatt gestartet werden kann, angepasst werden.

Im Berechnungsblatt werden die Werte für die Zusammenfassung auf dem zentralen Steuerungsblatt berechnet. Diese Berechnungen sind sehr umfangreich. Für die alltägliche Nutzung müssen im Berechnungsblatt keine Änderungen vorgenommen werden.

In den Blättern für den grafischen Output werden die in der Kalkulationstabelle berechneten Ergebnisse in verschiedenen Diagrammen dargestellt. Diese werden im Kapitel 5.3.5 «Ergebnisse, Analyse und Visualisierungsmöglichkeiten» ausführlich beschrieben.

Vorgehen bei einer Optimierung

Wenn eine Optimierung durchgeführt werden soll, müssen als Erstes die Eingabedaten (vgl. Kapitel 5.3.2 «Eingabedaten») angepasst werden.

In einem zweiten Schritt müssen im «Hauptblatt» die Linien definiert werden, die ausgewertet werden sollen. Dazu muss im entsprechenden Feld «Von Linie #» und «Bis Linie #» jeweils der entsprechende Wert der ÖSPV-Linie aus der #-Spalte eingegeben werden (vgl. Abbildung 14).

Mit einem Klick auf «Werte nach unten kopieren» können die bestehenden Werte in einen separaten Bereich unterhalb der Haupttabelle kopiert werden. Dies wird automatisch bei jedem Start der Optimierung ausgeführt.

Ein Klick auf «Gewählte Linien optimieren» startet die gewünschte Optimierung. Für eine detaillierte Beschreibung des Vorganges siehe Kapitel 5.3.4 «Optimierung».

Sobald der Prozess abgeschlossen ist, erscheint eine Bestätigungsmeldung und die optimalen Werte werden in die Tabelle eingetragen.

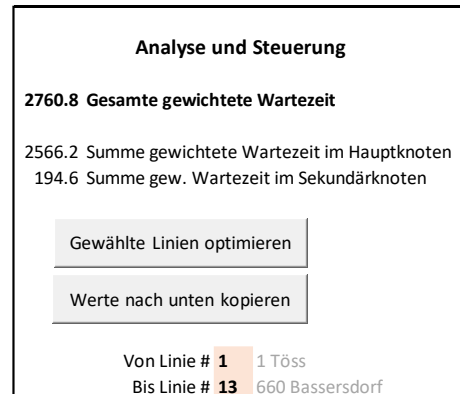


Abbildung 14: Die Summen der gewichteten Wartezeit und Steuerungselemente auf dem Blatt "Hauptblatt". (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Infos zu ÖSPV-Linien			Variablen				Hauptknoten (HK) Resultate (gewichtete Wartezeit)		Sekundärknoten (SK) Resultate (gewichtete Wartezeit)		Resultate (gewichtete Wartezeit)
#	Linie	Richtung	Hauptknoten		Sekundärknoten		ÖSPV zu Bahn	Bahn zu ÖSPV	ÖSPV zu Bahn	Bahn zu ÖSPV	Summe pro Linie
			Versatzzeit (Ankunft) [Minuten]	Haltezeit [Minuten]	Haltezeit [Minuten]	Haltezeit wenn Wendelinie					
1	1	Töss	3	2	0		68.3	65.9	16.1	12.8	163.1
2	1	Oberwinterthur	6	2	0		54.2	58.1	13.9	19.2	145.4
3	2	Seen	0	2	7		54.2	58.1	6.9	Irrelevant	119.2
4	2	Wülflingen	3	2	7		68.3	65.9	Irrelevant	11.5	145.7
5	3	Oberseen	0	2			84.35	80.15	Keiner	Keiner	164.5
6	3	Rosenberg	0	2			84.35	80.15	Keiner	Keiner	164.5
7	4	Breite	2	6			87.4	84.1	Keiner	Keiner	171.5
8	5	Dätttau	13	2	0		154.2	149.3	48.8	44.5	396.8
9	5	Technorama	1	2	0		153.3	178.7	33.9	39.8	405.7
10	7	Wülflingen	4	2	0		87.4	84.1	11.1	8.8	191.4
11	7	Melcher	4	2	0		87.4	84.1	14.2	15.7	201.4
12	10	Oberwinterthur	2	4	±	10	105	84.1	24.9	24	238
13	660	Bassersdorf	23	9	±±	1	299.1	314.3	83.2	64	760.6
14	660	Winterthur	14				322.8	Irrelevant	Keiner	Keiner	322.8
15	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
16	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
17	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
18	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
19	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
20	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
21	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
22	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
23	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
24	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
25	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
26	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
27	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
28	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
29	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
30	0	0	0	0	0		0	0	Keiner	Keiner	0
			Hier die Werte anpassen				Total 1710.3 1387		Total 253 240.3		

Abbildung 15: Auszug aus der Haupttabelle auf dem Blatt "Hauptblatt". Links befinden sich Infos zu den eingegebenen ÖSPV-Linien. In der Mitte ist der Eingabebereich für die Variablen der Optimierung (orange markiert). Rechts sind die Resultate der gewichteten Wartezeit des Hauptknotens, des Sekundärknotens und die jeweiligen Summen zu finden. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)


Zur Analyse werden die Summen der gewichteten Wartezeiten im Kasten berechnet (vgl. Abbildung 14) und alle Grafiken in den Blättern für den grafischen Output werden automatisch angepasst. Für eine detaillierte Beschreibung dieser beiden Aspekte siehe Kapitel 5.3.5 «Ergebnisse, Analyse und Visualisierungsmöglichkeiten».

VBA-Code

Die Optimierung wird mit einem VBA-Code ausgeführt. Für eine detaillierte Beschreibung der Funktionen und des Aufbaus des Codes siehe Kapitel 5.3.4.2 «Vollständige Enumeration mit VBA-Code».

Das Makro zur Kopie der aktuell eingestellten Variablen auf dem Hauptblatt hebt, wenn nötig, den Blattschutz auf, kopiert die Werte in die untere Tabelle und schützt das Blatt gegebenenfalls wieder. Einerseits lässt sich das Makro per Knopfdruck auf «Werte nach unten kopieren» starten, andererseits wird es beim Starten der Optimierung automatisch ausgeführt. Der gesamte Code für dieses Makro ist im Anhang II.II zu finden.

5.3.2. Eingabedaten

Für die Berechnung der Wartezeiten werden Eingabedaten benötigt. Das sind einerseits die Daten zu den Ankünften und Abfahrten der Bahnlinien, die für den Haupt- sowie die zu betrachtenden Sekundärknoten benötigt werden. Andererseits werden Daten zu den zu betrachtenden ÖSPV-Linien benötigt. Zur Übersichtlichkeit und Verständlichkeit wurden Bereiche, in denen Daten vom Nutzenden eingegeben werden müssen, orange  markiert (vgl. Abbildung 15).

Im Folgenden werden diese benötigten Daten genauer beschrieben.

5.3.2.1. Bahnfahrplan an Haupt- und Sekundärknoten

Die Bahnlinien werden, wie in Kapitel 5.3.1 «Aufbau des Tools, User Interface und Vorgehen Optimierung» erläutert, auf separaten Tabellenblättern eingegeben. Einerseits gibt es ein Tabellenblatt für den Hauptknoten, andererseits eines für jeden gewünschten Sekundärknoten.

Eingabedaten am Hauptknoten

Für den Hauptknoten müssen nebst dem Namen des Knotens sämtliche Bahnankünfte und Abfahrten eingetragen werden (vgl. Abbildung 16). Für die weitere Berechnung wird die Gewichtung der spezifischen Ankunft oder Abfahrt benötigt, mit welcher die Wartezeit von oder zu dieser berücksichtigt werden soll. Die Ankunfts- respektive Abfahrtszeit wird für die weitere Berechnung ebenfalls benötigt. Der Name der Linie sowie die Richtung, in welche der Zug weiterfährt, dienen lediglich der Information und haben keinen Einfluss auf die Berechnung.

Hauptknoten

Winterthur			Bahn Ankünfte		Winterthur			Bahn Abfahrten	
#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Ankunftsminute	#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Abfahrtsminute
§1§	IC1	St. Gallen	80%	6	§1§	IC1	St. Gallen	80%	8
§2§	IC1	Genève-Aéroport	80%	52	§2§	IC1	Genève-Aéroport	80%	54
§3§	IC5	Lausanne	80%	1	§3§	IC5	Lausanne	80%	3
§4§	IC5	Rorschach	80%	27	§4§	IC5	Rorschach	80%	29
§5§	IC5	Genève-Aéroport	80%	31	§5§	IC5	Genève-Aéroport	80%	33
§6§	IC8	Romanshorn	80%	29	§6§	IC8	Romanshorn	80%	31
§7§	IC8	Brig	80%	29	§7§	IC8	Brig	80%	31
§8§	IR13	Zürich HB	80%	22	§8§	IR13	Zürich HB	80%	24
§9§	IR13	St. Margrethen SG	80%	36	§9§	IR13	St. Margrethen SG	80%	38
§10§	IR75	Konstanz	80%	59	§10§	IR75	Konstanz	80%	1
§11§	IR75	Luzern	80%	59	§11§	IR75	Luzern	80%	1
§12§	EC	München Hbf	80%	57	§12§	EC	München Hbf	80%	58

Abbildung 16: Ausschnitt aus den Eingabedaten für den Hauptknoten. Ausgefüllt sind Daten des Knotens Winterthur in der Morgenspitzenstunde. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Der **Name des Knotens** und der des Tabellenblattes können frei gewählt werden. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass bei der Definition der ÖSPV-Linien auf den Namen des Tabellenblattes eines Sekundärknotens verwiesen werden muss (vgl. Kapitel 5.3.2.2 «ÖSPV-Linien»).

Die **Gewichtung** muss ein numerischer Wert sein. Als Standard wurde ein prozentualer Wert gewählt, alternativ könnten auch andere Werte verwendet werden.

Für die **Ankunfts- respektive Abfahrtsminute** werden die Fahrplanzeiten angenommen. Da die Berechnung in einem deterministischen Modell erfolgt, macht die Berücksichtigung von Verspätungen grundsätzlich keinen Sinn.

Es können bis zu 50 ankommende und 50 abfahrende Bahnlinsen eingegeben werden.

Eingabedaten an den Sekundärknoten

Die Eingabedaten von Bahnlinsen am Sekundärknoten sind grundsätzlich gleich wie am Hauptknoten. Bei der Gewichtung sollte darauf geachtet werden, dass sie mit den Gewichtungen am Hauptknoten vergleichbar ist.

Es können bis zu 30 ankommende und 30 abfahrende Züge eingegeben werden.

Sekundärknoten können beliebig viele erstellt werden.

Sekundärknoten 3

Oberwinterthur			Bahn Ankünfte		Oberwinterthur			Bahn Abfahrten	
#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Ankunftsminute	#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Abfahrtsminute
§1§	S24	Zug	50%	8	§1§	S24	Zug	80%	8
§2§	S29	Winterthur	50%	14	§2§	S29	Winterthur	50%	14
§3§	S29	Stein am Rhein	50%	15	§3§	S29	Stein am Rhein	50%	15
§4§	S30	Winterthur	50%	20	§4§	S30	Weinfeldern	50%	20
§5§	S11	Aarau	50%	29	§5§	S11	Aarau	80%	29

Abbildung 17: Ausschnitt aus den Eingabedaten der Bahnlinsen am Sekundärknoten. Dargestellt sind Daten des Knotens Oberwinterthur in der Morgenspitzenstunde. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

5.3.2.2. ÖSPV-Linien

Zu den ÖSPV-Linien, deren Ankunfts- und Standzeiten optimiert werden sollen, müssen ebenfalls einige Daten hinterlegt werden. Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, sind dies für den Hauptknoten Informationen zur Linie, zur Taktzeit, zur Wegzeit von den Bahnperrens zur entsprechenden ÖSPV-Halteplatte, die minimale Haltezeit, die gewartet werden soll und die maximale Haltezeit, die eingehalten werden muss. In der Tabelle des Sekundärknotens werden die Daten der entsprechenden ÖSPV-Linien zu allfälligen Halten an Sekundärknoten eingegeben. Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, gibt es nebst der Eingabe, ob die Linie an einem Sekundärknoten anhält, noch sieben weitere Datenfelder. Der Knoten, an dem angehalten werden muss, wird eingegeben sowie eine Angabe, ob dieser vor oder nach dem Hauptknoten angefahren wird. Weiter können Spezialfälle eingegeben werden (vgl. Kapitel 5.1.2 «Mögliche ÖSPV-Linientypen»). Für die Berechnung wird ebenfalls die Fahrzeit zwischen Haupt- und Sekundärknoten sowie die Wegzeit zwischen Perron und Halteplatte der ÖSPV-Linie benötigt. Für die Optimierung werden analog zum Hauptknoten die minimalen und maximalen Haltezeiten benötigt. Es können bis zu 30 ÖSPV-Linien eingegeben werden.

#	Linie	Richtung	Taktzeit	Wegzeit	min. Haltezeit	max. Haltezeit
1	1	Töss	6	5	1	3
2	1	Oberwinterthur	6	5	1	3
3	2	Seen	6	5	1	3
4	2	Wülflingen	6	5	1	3
5	3	Oberseen	7.5	5	1	3
6	3	Rosenberg	7.5	5	1	3
7	4	Breite	10	7	2	10
8	5	Dätttau	15	5	1	3
9	5	Technorama	15	5	1	3
10	7	Wülflingen	10	5	1	3
11	7	Melcher	10	5	1	3
12	10	Oberwinterthur	10	5	2	10
13	660	Bassersdorf	30	7	2	10
14	660	Winterthur	30	7	0	0

Abbildung 18: Eingabedaten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Winterthur. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Die Angabe der **Linie und Richtung** der ÖSPV-Linie dient lediglich zur Information der Nutzenden. Der Zugriff auf die für die Berechnung relevanten Daten geschieht über die Zeilennummer oder den Wert in der #-Spalte.

Die **Taktzeit** kann als Dezimalzahl angegeben werden. So können beispielsweise auch 7.5 Minuten-Takte berücksichtigt werden. Die Taktzeit wird benötigt, um anhand der Versatzzeit die Ankunftszeit aller Kurse an den Knoten zu berechnen.

Verknüpfung	Knoten	Vor / Nach	Spezialfall	Fahrzeit	Wegzeit	min. Haltezeit	max. Haltezeit
Ja	OWT	Vor	Nein	11	5	0	1
Ja	OWT	Nach	Nein	10	5	0	1
Ja	WSEE	Nach	Endet oder beginnt am Sekundärknoten	14	3	3	7
Ja	WSEE	Vor	Endet oder beginnt am Sekundärknoten	16	3	3	7
Nein							
Nein							
Nein							
Ja	OWT	Vor	Nein	16	6	0	1
Ja	OWT	Nach	Nein	15	4	0	1
Ja	WHE	Vor	Nein	16	6	0	1
Ja	WHE	Nach	Nein	15	6	0	1
Ja	OWT	Vor	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten	18	3	1	7
Ja	BSD	Vor	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten	40	4	1	5

Abbildung 19: Eingabedaten der ÖSPV-Linien in Winterthur für die Definition der Sekundärknoten. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Die **Wegzeit** wird zur Berechnung der Wartezeit benötigt. Bei eher instabilen Systemen, in denen häufig Verspätungen im Minutenbereich auftreten, kann es sinnvoll sein, zur Wegzeit eine kleine Reserve zu addieren. So kann die Zuverlässigkeit der optimierten Umsteige Verbindung erhöht werden. Bei pünktlichen Ankünften wird jedoch die Wartezeit erhöht. Deshalb sollte dieses Mittel nur sehr vorsichtig eingesetzt werden.

Die **minimalen und maximalen Haltezeiten** werden in Minuten angegeben. Es müssen ganzzahlige Werte eingegeben werden.

Die **Verknüpfung** legt fest, ob die ÖSPV-Linie einen Sekundärknoten bedient, der berücksichtigt werden soll.

Falls die ÖSPV-Linie an mindestens einem der betrachteten Knoten wendet, kann in der Spalte **«Spezialfall»** der entsprechende Fall eingegeben werden (vgl. Kapitel 5.1.2 «Mögliche ÖSPV-Linientypen»).

In der Spalte **«Knoten»** wird angegeben, welcher Sekundärknoten angebunden werden soll. Der Wert muss mit dem Namen des jeweiligen Bahnfahrplanblattes übereinstimmen.

In der Spalte **«Vor / Nach»** wird definiert, ob der Sekundärknoten vor oder nach dem Hauptknoten bedient wird.

Wie im Kapitel 5.1.2.6 «Einbindung des Sekundärknotens, wenn nur der Hauptknoten eine Wendehaltestelle ist» beschrieben, kann mit den Funktionen «Verknüpfung», «Spezialfall» und «Vor / Nach» auch der Spezialfall einer am Hauptknoten endenden Linie, die keinen Sekundärknoten bedient, berechnet werden. Dieser Fall wird eingegeben, in dem der Spezialfall «Endet am Hauptknoten» eingestellt wird, die «Verknüpfung» auf «Nein» und «Vor / Nach» auf «Vor» gesetzt wird. So werden lediglich die Wartezeiten am Hauptknoten in der Umsteigerichtung ÖSPV auf Bahn berechnet.

5.3.2.3. Anschlusswahl

Im Blatt «Anschlusswahl» können einzelne Anschlüsse, die explizit nicht berücksichtigt werden sollen, ausgeschlossen werden. Dies kann beispielsweise sinnvoll sein, wenn eine Bahnlinie dorthin zurückfährt, wo die ÖSPV-Linie herkommt. Anders als wenn die Gewichtung auf null gestellt wird, werden so nur die Anschlüsse zwischen einer ÖSPV- und einer Bahnlinie nicht berücksichtigt und nicht die von allen ÖSPV-Linien zu einer Bahnlinie.

Der Eingabebereich des Blattes ist in vier Teile gegliedert. Wie in Abbildung 20 dargestellt, werden in der oberen Hälfte die Anschlüsse des Hauptknotens aufgelistet und in der unteren Hälfte diejenigen eines Sekundärknotens. Jeweils links sind die Anschlüsse vom ÖSPV auf die Bahn und rechts diejenigen von der Bahn auf die ÖSPV-Linien in Matrixform aufgelistet. Die einzelnen Felder sind immer gleich aufgebaut. Als Spaltennamen dienen die ankommenden respektive abfahrenden Bahnlinien. Als Zeilenname dienen die erstellten ÖSPV-Linien. Ein Anschluss kann ausgeschlossen werden, indem in das entsprechende Feld ein «x» gesetzt wird. Für den Sekundärknoten kann zusätzlich angegeben werden, welcher Knoten gerade erfasst werden soll. Die Spaltennamen werden dann entsprechend angepasst und die ÖSPV-Linien, welche diesen Sekundärknoten nicht bedienen, ausgegraut. Die gesetzten «x»

bleiben beim Wechsel des Sekundärknotens bestehen. Dies, da alle Anschlüsse an Sekundärknoten auf einem Blatt in einer Tabelle dargestellt werden. So müssen Nutzende nicht mehrere Blätter oder Tabellenbereiche bearbeiten, um einen Sekundärknoten zu erstellen.

Für jede ÖSPV-Linie wird anhand der Eingaben für den Haupt- und den Sekundärknoten ein Code erstellt. Anhand dieses Codes kann in der Berechnung ausgelesen werden, welche Anschlüsse nicht berücksichtigt werden.

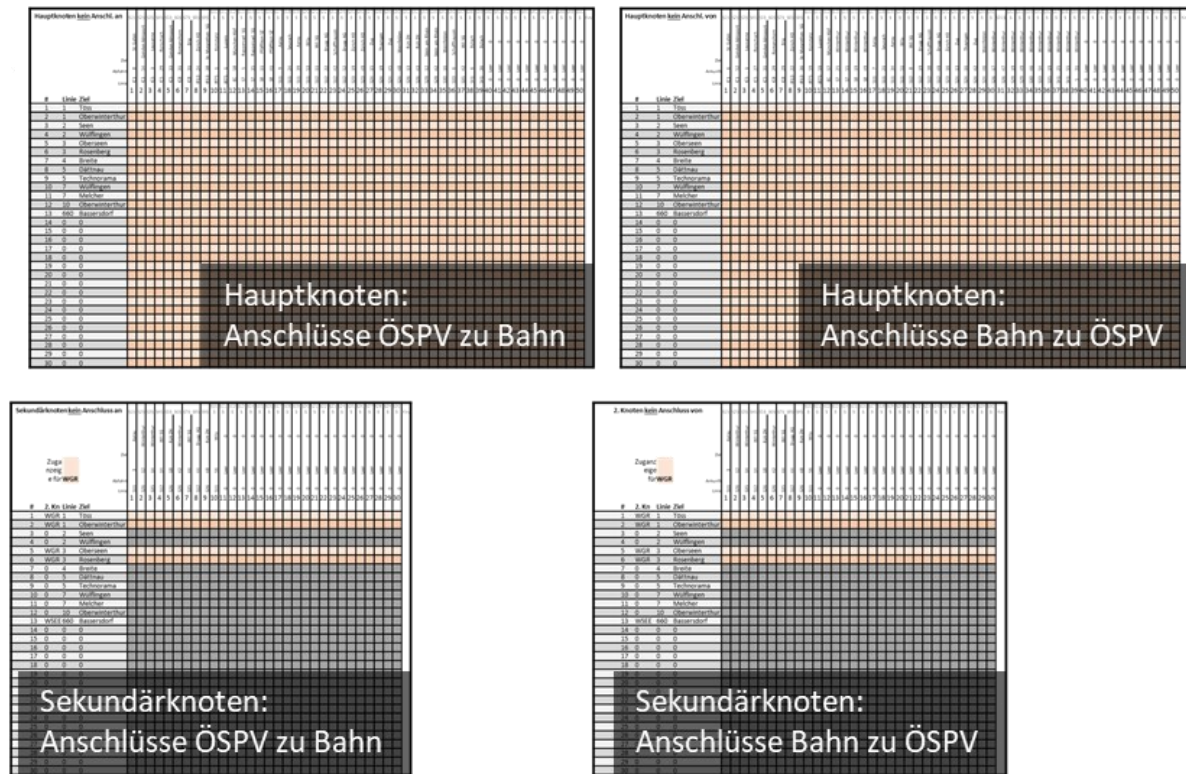


Abbildung 20: Gliederung des Eingabebereichs des Blatts "Anschlusswahl". (Eigene Darstellung)

5.3.2.4. Eingabedaten auf dem Hauptblatt

Auf dem Hauptblatt können je ÖSPV-Linie Werte in den Spalten der Versatzzeit und der Haltezeiten eingegeben werden (vgl. Abbildung 15 auf Seite 40). Anhand der eingegebenen Werte werden die jeweiligen Wartezeiten berechnet. Mit dieser manuellen Eingabe können die Wartezeiten in einem bestehenden Fahrplan berechnet oder auch die Auswirkung von Anpassungen geprüft werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die Haltezeit am Sekundärknoten ignoriert wird, wenn durch die Spalte «Haltezeit wenn Wendelinie» ein Wert vorgegeben wird (vgl. Kapitel 5.1.2.5 «Einbindung des Sekundärknotens, wenn beide Knoten Wendehaltstellen sind» und 5.2.3.3 «Spezialfälle»).

Um einen Vergleich zu ermöglichen, können die Werte mit der Schaltfläche «Werte nach unten kopieren» in die zweite Tabelle unterhalb der Haupttabelle kopiert werden. Falls eine Optimierung durchgeführt wird, werden die Werte automatisch nach unten kopiert und die Werte in der oberen Tabelle überschrieben.

5.3.3. Berechnungen der gewichteten Wartezeiten

Die Berechnungen der gewichteten Wartezeiten in der Kalkulationstabelle basieren auf dem mathematischen Modell (vgl. Kapitel 5.2 «Mathematisches Modell»).

Das Ziel ist die Berechnung der gewichteten Wartezeiten, welche auf den Eingabedaten (vgl. Kapitel 5.3.1 «Aufbau des Tools, User Interface und Vorgehen Optimierung») basieren. Diese Berechnungen sind analog zum mathematischen Modell in die gewichtete Wartezeit des Hauptknotens und diejenige des Sekundärknotens aufgeteilt.

Der Hauptknoten und der Sekundärknoten sind wiederum zeilenweise in die einzelnen ÖSPV-Linien aufgeteilt. Die gewichteten Wartezeiten werden zeilenweise beziehungsweise je ÖSPV-Linie berechnet.

In den folgenden Kapiteln wird die Berechnung für die gewichtete Wartezeit in der Kalkulationstabelle beschrieben.

5.3.3.1. Hauptknoten (HK)

Die Berechnung beginnt im Blatt «Berechnungen». In diesem Blatt wird noch nicht alles berechnet, das Ergebnis sind zwei Spaltenvektoren. Die Komponenten der Vektoren beinhalten die Wartezeiten aller berechneten möglichen Anschlüsse von beziehungsweise zu jedem Zug.

Berechnungen im Blatt «Berechnungen»

Als Grundlage für die Berechnung der Wartezeit werden als Erstes für alle ÖSPV-Linien die Ankunftszeiten für je 26 Kurse berechnet (vgl. Abbildung 21). Dies ist anhand von der Versatz- und der Taktzeit möglich. 26 Kurse sind ausreichend, um ÖSPV-Linien bis und mit einer minimalen Taktzeit von fünf Minuten optimieren zu können.

Berechnung der Kurse im Hauptknoten	
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26
ÖSPV 1	4 10 16 22 28 34 40 46 52 58 64 70 76 82 88 94 100 106 112 118 124 130 136 142 148 154 160
ÖSPV 2	4 10 16 22 28 34 40 46 52 58 64 70 76 82 88 94 100 106 112 118 124 130 136 142 148 154 160
ÖSPV 3	1 7 13 19 25 31 37 43 49 55 61 67 73 79 85 91 97 103 109 115 121 127 133 139 145 151 157
ÖSPV 4	4 10 16 22 28 34 40 46 52 58 64 70 76 82 88 94 100 106 112 118 124 130 136 142 148 154 160
ÖSPV 5	3 11 18 26 33 41 48 56 63 71 78 86 93 101 108 116 123 131 138 146 153 161 168 176 183 191 198
ÖSPV 6	3 11 18 26 33 41 48 56 63 71 78 86 93 101 108 116 123 131 138 146 153 161 168 176 183 191 198

Abbildung 21: Screenshot aus der Tabelle zur Berechnung der Ankunftszeit von 26 Kursen für den Hauptknoten im Blatt «Berechnungen». (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Die Wartezeit berechnet sich gemäss Formel (5) des mathematischen Modells (vgl. Kapitel 5.2.2.1 «Herleitung der gewichteten Wartezeit ÖSPV zu Bahn $\lambda_{Hb \rightarrow t}$ ») als:

$$\min_{j = 0,1,\dots,\frac{120}{T_\alpha}} \{wtbt_{\alpha\beta} = Dt_\beta + 60 - (Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha + s_\alpha) \mid wtbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \tag{5}$$

Umgesetzt ist dies in der Kalkulationstabelle mit einer Kombination der Minimumfunktion mit dem S-Verweis und Wenn-Bedingungen. Der S-Verweis ermöglicht es, Daten von anderen Tabellenblättern für das Blatt «Berechnungen» auszulesen. Zur Abfahrtsminute der Bahn werden 60 Minuten addiert. Davon wird der Vektor aller 26 Kurse und die Wegzeit subtrahiert ("Abfahrtsminute Bahn HK" + 60 - (Kurse + "Wegzeit")).

Von diesem Resultat wird das Minimum grösser gleich null gesucht. Dieser Zahlenwert wird in eine Tabelle geschrieben, je Zug eine neue Spalte (vgl. Abbildung 22). Diese Tabelle entspricht einer Matrix mit den minimalen ungewichteten Wartezeiten aller Anschlüsse.

Für das bessere Verständnis der einzelnen Wartezeiten werden die Liniennamen der Züge als Spaltenbezeichnungen angezeigt. Diese werden mithilfe des Keys (z. B. §2§) und einem S-Verweis vom Bahnfahrplanblatt des Hauptknotens übernommen.

Wartezeit ÖSPV zu Bahn

§1§	§2§	§3§	§4§	§5§	§6§	§7§	§8§	§9§	§10§	§11§	§12§	§13§	§14§	§15§	§16§	§17§	§18§	§19§	§20§	§21§	§22§	§23§	§24§	§25§	§26§	§27§	§28§
IC1	IC1	IC5	IC5	IC5	IC8	IC8	IR13	IR13	IR75	IR75	EC	S7	S7	S8	S8	S11	S11	S11	S11	S12	S12	S12	S12	S23	S23	S24	S24
3	1	4	0	4	2	2	1	3	2	2	5	0	0	0	0	4	1	4	0	0	5	1	5	2	2	4	2
3	1	4	0	4	2	2	1	3	2	2	5	0	0	0	0	4	1	4	0	0	5	1	5	2	2	4	2
3	1	4	0	4	2	2	1	3	2	2	5	0	0	0	0	4	1	4	0	0	5	1	5	2	2	4	2
3	1	4	0	4	2	2	1	3	2	2	5	0	0	0	0	4	1	4	0	0	5	1	5	2	2	4	2
3	4	5.5	1.5	5.5	3.5	3.5	4	3	3.5	3.5	0.5	0	0	6	6	4	4	4	3	6	2	7	2	6.5	6.5	2.5	6.5

Abbildung 22: Screenshot aus der Tabelle zur Berechnung der Wartezeiten ÖSPV zu Bahn im Blatt «Berechnungen». Die ersten zwei Zeilen beinhalten die Spaltenbezeichnungen für die Züge. Die restlichen Zeilen sind ÖSPV-Linien. Der Zahlenwert ist die Wartezeit in Minuten von der entsprechenden ÖSPV-Linie zum entsprechenden Zug. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Bei der Wartezeit Bahn zu ÖSPV bezieht sich die Berechnung auf Formel (9) in Kapitel 5.2.2.2 «Herleitung der gewichteten Wartezeit Bahn zu ÖSPV $\lambda_{H \rightarrow b}$ »:

$$\min_{j = 0,1,\dots,\frac{120+T_\alpha}{T_\alpha}} \{wttb_{\beta\alpha} = (Ab_\alpha + j \cdot T_\alpha + st_\alpha) - (At_\beta + 60 + s_\alpha) \mid wttb_{\beta\alpha} \geq 0\} \quad \text{Ausschnitt aus Formel (9)}$$

Für die Umsetzung in der Kalkulationstabelle wird der Vektor aller 26 Kurse mit der Haltezeit addiert und die Abfahrtsminute der Bahn, addiert mit 60 und der Wegzeit, subtrahiert ((Kurse + "Haltezeit") – ("Abfahrtsminute Bahn HK" + 60 + "Wegzeit")).

Von diesem Resultat wird das Minimum grösser gleich null gesucht. Das Ergebnis wird als Zahlenwert in einer Tabelle analog zu derjenigen in Abbildung 22 zwischengespeichert.

Berechnungen im Blatt «Hauptblatt»

Für die Berechnung der gewichteten Wartezeiten der beiden Anschlussbeziehungen im «Hauptblatt» wird je Anschlussbeziehung der Vektor der Wartezeit mit dem Vektor der binären Indikatoren der Anschlusswahl und dem Vektor mit den Gewichtungen der Züge multipliziert. Dazu wird in der Kalkulationstabelle die Funktion des Summenproduktes verwendet.

Für den Vektor der Wartezeiten werden die im Blatt «Berechnungen» berechneten Wartezeiten als Spaltenvektoren ausgelesen. Die Komponenten des Vektors sind die Wartezeiten der einzelnen Züge der Anschlussbeziehung am Knoten. Da die Werte als Zeilenvektor in der Tabelle gespeichert sind (vgl. Abbildung 22), wird der Vektor dafür transponiert.

Der Vektor der binären Indikatoren (Anschlusswahl) ergibt sich aus dem Blatt «Anschlusswahl». Wird der Anschluss nicht benötigt, ist die entsprechende Komponente 0, ansonsten 1. Dies wird mit einer Kombination aus einer Wenn-Bedingungen und den Funktionen Ist-Zahl und Suchen erreicht.

Der Vektor der Gewichtung ist die gesamte Spalte «Gewichtung» des Bahnfahrplanblattes entsprechend der zu berechnenden Anschlussbeziehung.

Die Summe der gewichteten Wartezeiten beider Anschlussbeziehungen aller ÖSPV-Linien ergibt die gewichtete Wartezeit für den Hauptknoten.

Spezialfall: Linie endet/beginnt am Hauptknoten (mit Sekundärknoten)

Wenn die Linie am Hauptknoten endet und/oder beginnt und einen Sekundärknoten bedient, hat dies Änderungen bei der Berechnung zu Folge. Wie in Kapitel 5.1.2.6 «Einbindung des Sekundärknotens, wenn nur der Hauptknoten eine Wendehaltestelle ist» beschrieben, muss die Linie in zwei richtungsgetreunte Linien aufgeteilt werden. Die Anschlussbeziehungen ÖSPV zu Bahn bei der Linie, die den Sekundärknoten «nach» dem Hauptknoten bedient und die Anschlussbeziehung Bahn zu ÖSPV bei der Linie, die den Sekundärknoten «vor» dem Hauptknoten hat, dürfen nicht berücksichtigt werden. In der Kalkulationstabelle wird dies mithilfe einer Wenn-Bedingung abgefangen und die entsprechende Summe der gewichteten Wartezeit wird durch den Text «irrelevant» ersetzt, der den Wert null repräsentiert.

Dies kann auch auf einzelne Kurse einer Linie ohne Sekundärknoten, die am Hauptknoten beginnen oder enden, angewendet werden. Diese müssen aber als separate Linien eingegeben werden.

5.3.3.2. Sekundärknoten (SK)

Die Berechnung für den Sekundärknoten funktioniert sehr ähnlich wie diejenige des Hauptknotens im vorherigen Kapitel. Hier werden die Unterschiede beschrieben.

Berechnungen im Blatt «Berechnungen»

Die Berechnung der Kurse ist grundsätzlich gleich wie beim Hauptknoten. Beim Sekundärknoten wird jedoch zusätzlich die relative Ankunftszeit (vgl. Formel (17) aus Kapitel 5.2.3.1 «Herleitung der gewichteten Wartezeit ÖSPV zu Bahn $\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$ ») benötigt.

Die Umsetzung dessen erfolgt in der Kalkulationstabelle mit einer Wenn-Bedingung, welche die Fallunterscheidung von Formel (17) ermöglicht. Die Kurse werden in einer Tabelle gespeichert (vgl. Abbildung 23).

Berechnung der Kurse im Sekundärknoten				Kurse																										
	Knoten	Haltezeit	rel. Anknft	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
ÖSPV 1	OWT	1	-12	-8	-2	4	10	16	22	28	34	40	46	52	58	64	70	76	82	88	94	100	106	112	118	124	130	136	142	148
ÖSPV 2	OWT	0	12	16	22	28	34	40	46	52	58	64	70	76	82	88	94	100	106	112	118	124	130	136	142	148	154	160	166	172
ÖSPV 3	WSEE	3	17	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174
ÖSPV 4	WSEE	3	-19	-15	-9	-3	3	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69	75	81	87	93	99	105	111	117	123	129	135	141

Abbildung 23: Screenshot aus der Tabelle zur Berechnung der Ankunftszeit von 26 Kursen für den Sekundärknoten im Blatt «Berechnungen». Grösster Unterschied zum Hauptknoten ist die benötigte Berechnung der relativen Ankunftszeit. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Die Berechnung der Wartezeiten für den Sekundärknoten ist, unter Berücksichtigung der Änderungen im mathematischen Modell, analog zum Hauptknoten.

Für die Anschlussbeziehung ÖSPV zu Bahn wird das Minimum von "Abfahrt Bahn am Sekundärknoten" + 60 - (Kurse + "Wegzeit Sekundärknoten"), wenn ≥ 0 berechnet.

Für die Anschlussbeziehung Bahn zu ÖSPV wird das Minimum der Kurse + "Haltezeit Sekundärknoten" - ("Ankunft Bahn Sekundärknoten " + 60 + "Wegzeit Sekundärknoten "), wenn ≥ 0 berechnet.

Berechnungen im Blatt «Hauptblatt»

Ist kein Sekundärknoten vorhanden, erscheint aufgrund einer Wenn-Bedingung der Text «Keiner». Dieser repräsentiert den Wert null.

Ansonsten funktioniert die Berechnung analog zum Hauptknoten.

Spezialfall: Sekundärknoten ist Wendehaltestelle

Wenn der Sekundärknoten eine Wendehaltestelle ist, werden wie in Kapitel 5.1.2.4 «Einbindung des Sekundärknotens als Wendehaltestelle» beschrieben, einzelne Anschlussbeziehungen nicht berücksichtigt. Diese werden im «Hauptblatt» mit einer Wenn-Bedingung abgefangen und durch den Text «Irrelevant» ersetzt. Dieser repräsentiert den Wert null.

Spezialfall: Beide Knoten sind Wendehaltstellen

Wenn beide Knoten Wendehaltstellen sind, muss wie in Kapitel 5.1.2.5 «Einbindung des Sekundärknotens, wenn beide Knoten Wendehaltstellen sind» beschrieben, die berechnete Haltezeit für die Berechnungen verwendet werden. Wenn der entsprechende Spezialfall eingestellt wurde, wird in der Kalkulationstabelle im Hauptblatt diese Haltezeit gemäss Formel (23) in Kapitel 5.2.3.3 «Spezialfälle» berechnet. Im Blatt «Berechnungen» wird dann aufgrund einer Wenn-Bedingung diese speziell berechnete Haltezeit verwendet und die eingegebene Haltezeit überschrieben.

5.3.4. Optimierung

Um das Minimierungsproblem zu lösen, wurden effiziente Lösungsmethoden für die Optimierung gesucht. Als Erstes wurden Solver und Optimierungsalgorithmen getestet. Diese genügten aber den Anforderungen nicht. Als Zweites wurde als Lösungsmethode eine vollständige Enumeration des Minimierungsproblems entwickelt. Beide Ansätze werden im Folgenden genauer beschrieben.

5.3.4.1. Lösungsansätze mit Solvern / Optimierungsalgorithmen

Die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und das Ziel eines möglichst einfach anwendbaren Tools legen nahe, die Lösung des Optimierungsproblems mit einem Optimierungsalgorithmus zu suchen. Solche Optimierungsalgorithmen können mit verschiedenen Add-Ins in Excel eingebunden werden. Für das Tool wurde die Anwendung von drei verschiedenen Add-Ins untersucht.

Excel Solver

Das Solver Add-In ist in aktuellen Excel-Versionen standardmässig integriert und kann einfach aktiviert werden. In einem Dialogfeld können die Eingaben für die Optimierung eingegeben werden [10]. Dies sind die Zielzelle, die Art der durchzuführenden Optimierung (Minimierung, Maximierung, genauer Zielwert), die Variablenzellen und die Nebenbedingungen [10]. Zur Ausführung stehen drei Lösungsmethoden zur Verfügung: GRG-Nichtlinear (geeignet für kontinuierliche nicht lineare Probleme), Simplex LP (geeignet für lineare Probleme) und ein Evolutionärer Algorithmus (geeignet für nicht kontinuierliche Probleme) [10]. Aufgrund der Problemstellung eignet sich dementsprechend der Evolutionäre Algorithmus am besten. Jedoch konnte mit diesem die optimale Lösung nicht gefunden werden.

In einem weiteren Schritt wurde, anstelle der Optimierung über alle Linien gleichzeitig, eine linienweise Optimierung mithilfe einer VBA-Ansteuerung durchgeführt. Auch in diesem Fall konnte die optimale Lösung nicht gefunden werden. Die Rechenzeit war ebenfalls nicht zufriedenstellend.

OpenSolver mit Coin-OR-optimization Engine

OpenSolver ist ein kostenloses Open-Source Add-In für Excel. Die Probleme werden ähnlich wie beim Excel-Solver mittels Ziel- und Variablenzellen sowie Nebenbedingungen erfasst [11]. Es können diverse Lösungsmethoden implementiert werden, die aber separat heruntergeladen werden müssen [12]. Für nicht lineare Probleme kommen drei Lösungsmethoden infrage: NOMAD, Bonmin und Couenne [12]. Bonmin und Couenne könnten mit dem NEOS Optimization Server online gelöst werden. Aufgrund der komplexen Excel-Formeln, die für die Berechnung nötig sind, war dies jedoch nicht möglich [12]. Die Implementierung von OpenSolver und den Lösungsmethoden ist sehr komplex, wodurch die Usability unzureichend ist. Zudem konnte die optimale Lösung mit keiner Lösungsmethode zuverlässig gefunden werden und die Rechenzeit war ebenfalls nicht zufriedenstellend.

FrontlineSolvers Analytic Solver

Vom Analytic Solver von FrontlineSolvers wurde eine Testversion verwendet. Die Kosten für das Produkt sind zu hoch für eine Anwendung im benötigten Rahmen [2], [13]. Deshalb dient dieses Add-In ausschliesslich als Referenz. Es wird ebenfalls ein evolutionärer Algorithmus verwendet. Auch dieser Solver konnte die optimale Lösung nicht finden und die Berechnung dauerte zu lange.

Fazit

Die Add-Ins konnten die optimale Lösung nicht zuverlässig finden. Die Lösungsmethoden beendeten die Suche oft in lokalen Minima. Die Berechnungsdauer war nicht zufriedenstellend. Weiter ist die Usability lediglich beim Excel-Solver mit VBA-Code zufriedenstellend. Aufgrund dieser Probleme wurde entschieden, das Minimum des Problems anhand einer vollständigen Berechnung aller Möglichkeiten zu finden.

5.3.4.2. Vollständige Enumeration mit VBA-Code

Da die Performance der Solver für die Ansprüche dieser Arbeit nicht ausreichen (vgl. vorheriges Kapitel) wird die vollständige Enumeration mithilfe von VBA-Code durchgeführt. Das bedeutet, es wird jede mögliche Kombination berechnet und dann diejenige mit dem minimalen Zielfunktionswert gewählt.

VBA steht als Abkürzung für «Visual Basic for Applications». Das ist die in Microsoft Office verwendete Skriptsprache. Mit dieser kann beispielsweise Excel durch selbstprogrammierten Code gesteuert werden.

In diesem Kapitel wird sowohl ein Überblick über die Idee des entwickelten Codes gegeben als auch die Funktionsweise beschrieben und die Integration in der Kalkulationstabelle erklärt. Der vollständige Code befindet sich beigelegt zu dieser Arbeit in der Datei «AutomaticSolveModul.bas».

Idee

Die Enumeration wird ÖSPV-linienweise durchgeführt. Als Variablen für das Minimierungsproblem werden die Versatzzeit der Linie und die Haltezeiten am Haupt- und (wenn vorhanden) am Sekundärknoten verwendet. Die Idee des Codes ist es, jede mögliche Kombination dieser drei Variablen zu erzeugen und den dazugehörigen Zielfunktionswert zu berechnen. Die Zielfunktion ist die Summe der gewichteten Wartezeit des Haupt- und Sekundärknotens. Um den Rechen- und damit den Zeitaufwand gering zu halten, soll die Neuberechnung der Kalkulationstabelle so wenig wie möglich ausgelöst werden.

Für die zulässigen Kombinationen der Variablen für jede Linie wird diejenige Kombination bestimmt, die den minimalen Zielfunktionswert hat.

Der Code ist in folgende vier Hauptteile gegliedert:

1. Bestimmung des Optimierungsintervalls für jede Variable jeder Linie und Generierung einer passenden Matrix.
2. Berechnen der Zielfunktionswerte für jede Kombination jeder Linie und Füllen der Matrix mit den Ergebnissen.
3. Bestimmung der minimalen Kombination für jede Linie.
4. Output der Ergebnisse in die Kalkulationstabelle.

Für die Usability wurde eine Fortschrittsanzeige implementiert, welche den Nutzenden den Fortschritt anzeigt (vgl. Abbildung 24). Mit einem «Abbrechen»-Button kann die Berechnung abgebrochen werden.

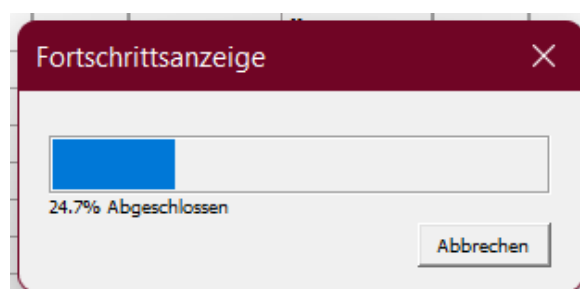


Abbildung 24: Screenshot der Fortschrittsanzeige. Diese zeigt den Nutzenden den aktuellen Stand der Berechnung an. Es steht ein Button für den Abbruch des Vorganges zur Verfügung. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Funktionsweise der einzelnen Teile

Für die Ausführung des Codes ist die Definition von Variablen notwendig, die auf die entsprechenden Zellen in der Kalkulationstabelle verweisen. Dies wird vor Teil 1 im Code gemacht.

In jedem Teil gibt es bei jeder längeren Berechnungsschleife eine Abfrage der Variable für die Abbruchbedingung. Hat diese den Wert «True», wird der Code bei der entsprechend markierten Stelle «Abbruch» weitergeführt (siehe Teil 4). Die Abbruchbedingung ist dann «True», wenn der in der Fortschrittsanzeige integrierte Knopf «Abbrechen» gedrückt wird (siehe den Code des «UserForm» im Anhang II.III). Die Variable der Abbruchbedingung wird zu Beginn auf «False» gesetzt.

Teil 1: Bestimmung des Optimierungsintervalls für jede Variable jeder Linie und Generierung der passenden Matrix.

In einem ersten Schritt wird die Anzahl Linien gemäss den Inputs auf dem Hauptblatt berechnet. Für eine bessere Performance und damit die Ausführung des Codes nicht von der automatischen Neuberechnung der Kalkulationstabelle unterbrochen wird, wird die Berechnung der Zellen auf manuell umgestellt und die Aktualisierung der Anzeige ausgeschaltet.

Danach wird das Modul «CopyOldData» ausgeführt, welches die aktuellen Werte im Hauptblatt für eine Überprüfung der Optimierungsergebnisse nach unten kopiert (vgl. Kapitel 5.3.1 «Aufbau des Tools, User Interface und Vorgehen Optimierung»).

Als Nächstes wird die Anzahl der möglichen Werte für die Variablen je Linie bestimmt.

Bei der Versatzzeit wird die aufgerundete Taktzeit verwendet. Dies, da beispielsweise bei einem 7.5-Minuten-Takt acht Möglichkeiten bestehen (0, 1, ..., 6, 7). Die Aufrundung hat keinen Einfluss auf ganzzahlige Taktzeiten.

Bei der Haltezeit am Hauptknoten wird die Anzahl Möglichkeiten bestimmt, indem die minimale von der maximalen Haltezeit abgezogen wird.

Die Haltezeit am Sekundärknoten wird gleichermassen mit einer Subtraktion der maximalen mit der minimalen Haltezeit bestimmt. Wenn die Linie keine Werte für einen Sekundärknoten aufweist, wird die Variable auf null gesetzt.

Linie 1					Linie 2					usw.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Linien #	Ver-satz	Halte-zeit HK	Halte-zeit SK	Zielfunk-tionswert	Linien #	Ver-satz	Halte-zeit HK	Halte-zeit SK	Zielfunk-tionswert	
1	1	Alle möglichen Variablenkombinationen der Linie 1		?	2	Alle möglichen Variablenkombinationen der Linie 2		?		
2	1			?	2			?		
3	1			?	2			?		
usw.										

Abbildung 25: Schematische Darstellung der Matrix, die während des Algorithmus gefüllt wird. HK steht für Hauptknoten und SK für Sekundärknoten. (Eigene Darstellung)

Als zentraler Speicherort für alle wichtigen erzeugten Daten im Code wird eine Matrix erstellt (vgl. Abbildung 25). Für die Anzahl der Zeilen wird die Anzahl der möglichen Variablenwerte je Linie miteinander multipliziert und das grösste Produkt eruiert. Die Matrix benötigt genauso viele Zeilen wie die maximal mögliche Variablenkombination. Da für jede Linie fünf Spalten benötigt werden, ist die Anzahl der Spalten fünf Mal die Anzahl der Linien.

Die erstellte Matrix wird als Nächstes mit den Variablenkombinationen je Linie gefüllt. Dafür werden drei Listen gefüllt mit allen möglichen Werten der Variablen erzeugt:

- Liste aller Versatzzeiten: Liste mit allen ganzen Zahlen von null bis zur Taktzeit abzüglich 0.5, da bei einem 7.5-Minuten-Takt nur bis 7 Minuten Versatz möglich sein soll. Bei den ganzzahligen Taktzeiten ist die Liste bis zur vorherigen ganzen Zahl.
- Liste aller Haltezeiten am Hauptknoten: Die ganzen Zahlen im geschlossenen Intervall zwischen der minimalen und maximalen Haltezeit.
- Liste aller Haltezeiten am Sekundärknoten: Hier ist eine Unterscheidung nötig, ob die Linien einen Sekundärknoten aufweisen oder nicht. Falls ja, ist es die Liste der Zahlen im geschlossenen Intervall zwischen der minimalen und maximalen Haltezeit am Sekundärknoten. Falls nein, wird die Liste für diese Linie nicht neu geschrieben, da sie nicht benötigt wird.

Pro Linie gibt es drei Schleifen, die durchlaufen werden. Die äusserste iteriert über alle Versatzzeiten und die mittlere über alle Haltezeiten am Hauptknoten. Die innerste Schleife iteriert über alle Haltezeiten am Sekundärknoten. Wenn die Linie keine minimale und maximale Haltezeit am Sekundärknoten aufweist, wird diese Schleife einmal ausgeführt.

Je Iteration der inneren Schleife wird die Variablenkombination in die Matrix geschrieben.

Wenn eine Linie abgeschlossen ist, startet die Erzeugung der Listen erneut und die neuen Variablenkombinationen werden um fünf Spalten versetzt bei der nächsten Linie in die Matrix geschrieben.

Teil 2: Berechnung der Zielfunktionswerte für jede Zeile in der Matrix

Für jede Zeile der Matrix werden die Werte der drei Variablen in das Hauptblatt geschrieben. Danach wird die Berechnung der Kalkulationstabellen der Blätter «Hauptblatt» und «Berechnungen» ausgeführt, um den Zielfunktionswert berechnen zu können.

Ist die Berechnung abgeschlossen, wird für jede Linie als Zielfunktionswert die totale gewichtete Wartezeit aus dem Hauptblatt ausgelesen und in die noch leere dafür vorgesehene Spalte der Matrix geschrieben. Sind alle möglichen Variablenkombinationen für die Linie berechnet, wird in allfälligen weiteren Zeilen der Matrix 999'999 als Zielfunktionswert hineingeschrieben. Da alle Linien gleichzeitig ausgewertet werden und nur so viele Iterationen nötig sind, wie Variablenkombinationen vorhanden sind, ist dieser Vorgang effizient gestaltet.

Teil 3: Minimumfindung und Schreiben der Resultate-Matrix

Damit das finale Ergebnis gespeichert werden kann, wird eine neue Matrix für die Resultate erzeugt. Die Anzahl der Zeilen ist gegeben durch die Anzahl der Linien, die optimiert werden. Die Spaltenanzahl ist drei, je Variable eine Spalte. Der Zielfunktionswert wird in der Kalkulationstabelle neu berechnet.

Für jede Linie gibt es in der Hauptmatrix eine Spalte, die alle möglichen Zielfunktionswerte enthält. Diese Spalte wird nun für jede Linie ausgelesen, der minimale Wert identifiziert und die dazugehörigen Variablen in die Resultate-Matrix geschrieben.

Für die Identifizierung des Indexes eines minimalen Wertes in einem Vektor wurde Code von Ryan Wells implementiert [14].

Teil 4: Schreiben in Kalkulationstabelle

Zum Schluss werden das Update der Anzeige und die automatische Berechnung wieder eingeschaltet. Die Werte der Resultate-Matrix werden in das Hauptblatt geschrieben.

Damit im Fall eines kontrollierten Abbruchs des Codes das Update der Anzeige und die automatische Berechnung auch wieder eingeschaltet werden, sind diese Befehle auch im entsprechend markierten Code für den «Abbruch» enthalten. Dieser Code wird ausschliesslich dann ausgeführt, wenn die Variable für die Abbruchbedingung den Wert «True» hat, also der Knopf zum Abbrechen betätigt wurde. Den Nutzenden wird eine Meldung angezeigt, dass der Berechnungsvorgang abgebrochen wurde.

Damit ist die Optimierung mit der vollständigen Enumeration abgeschlossen.

Integration in der Kalkulationstabelle

Die Integration in die Kalkulationstabelle wurde mithilfe der in Excel eingebauten VBA Integration gelöst. Der gesamte Code kann als Makro ausgeführt werden. Dazu wurde im Hauptblatt ein Knopf platziert, dessen Betätigung das Makro startet.

Während der Ausführung des Makros ist die Kalkulationstabelle passiv und kann nicht verwendet werden. Die Fortschrittsanzeige (vgl. Abbildung 24) informiert Nutzende über den aktuellen Stand der Berechnung und bietet eine Möglichkeit zum Abbruch des Berechnungsvorganges.

Die Ausführung des Codes funktioniert ab zwei Linien, eine Linie kann nicht einzeln optimiert werden.

5.3.5.2. Wartezeiten

Auf den Blättern Wartezeiten HK und Wartezeiten SK werden die Wartezeiten für die einzelnen Umsteigebeziehungen an den jeweiligen Knoten dargestellt. Ein entsprechender Ausschnitt ist in Abbildung 27 zu sehen. Es können die ungewichteten Wartezeiten sowie die gewichteten Wartezeiten für die beiden Umsteigerichtungen (von der Bahn auf den ÖSPV und umgekehrt) für jede mögliche Umsteigebeziehung dargestellt werden. Im Blatt Wartezeiten Sekundärknoten können zwei verschiedene Knoten gewählt werden. Diese werden gleichzeitig in unterschiedlichen Tabellen dargestellt, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

Sekundärknoten: **OWT**

		\$1\$	\$2\$	\$3\$	\$4\$	\$5\$	\$6\$	\$7\$	\$8\$	\$9\$	\$10\$	
Ziel		Zug	Winterth	Stein am	Weinfeld	Aarau	Seuzach	Winterth	Winterth	Stein am	Weinfeld	
Abfahrt		8	14	15	20	29	30	41	44	45	52	
Linie		S24	S29	S29	S30	S11	S11	S30	S29	S29	S24	
Gewichtung		80%	50%	50%	50%	80%	50%	50%	50%	50%	50%	
Total: 210.0												
#	Linie	Richtung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	Töss	5.0	5.0	0.0	5.0	2.0	3.0	2.0	5.0	0.0	1.0
2	1	Oberwinterthur	5.0	5.0	0.0	5.0	2.0	3.0	2.0	5.0	0.0	1.0
3												
4												
5												
6												
7												
8	5	Dätttau	9.0	0.0	1.0	6.0	0.0	1.0	12.0	0.0	1.0	8.0
9	5	Technorama	0.0	6.0	7.0	12.0	6.0	7.0	3.0	6.0	7.0	14.0
10												
11												
12	10	Oberwinterthur	3.0	9.0	0.0	5.0	4.0	5.0	6.0	9.0	0.0	7.0

Abbildung 27: Screenshot eines Ausschnitts aus dem Blatt "Wartezeiten SK". (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Um einen schnellen Überblick zu erhalten, werden die Wartezeiten je nach Wert von Rot bis Blau eingefärbt. Dunkelblaue Werte indizieren tiefe Wartezeiten und rote hohe Wartezeiten.

5.3.5.3. Standzeiten

Auf dem Blatt «Standzeiten» werden die Standzeiten der ÖSPV-Linien an den Knoten grafisch dargestellt. Die Grafik ist einmal für den Haupt- und zweimal für einen Sekundärknoten vorhanden, sodass zwei Sekundärknoten direkt miteinander verglichen werden können.

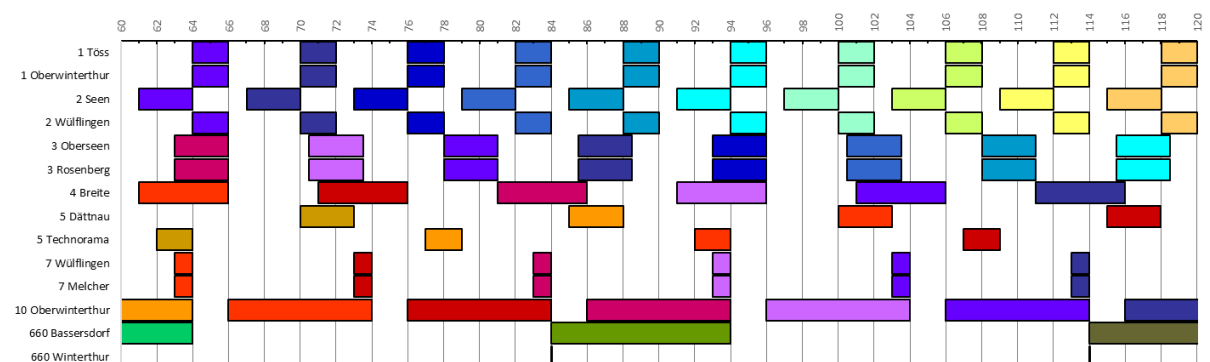


Abbildung 28: Beispiel der Grafik für die Standzeiten am Hauptknoten. Die Standzeiten sind dargestellt im Intervall zwischen 60 und 120 Minuten. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Ein Beispiel für diese Grafik am Hauptknoten ist in Abbildung 28 dargestellt. Die unterschiedlichen Farben stellen die Kursnummer dar. Es repräsentieren beispielsweise alle dunkelblauen Balken den dritten Kurs der jeweiligen Linie. Die Grafik kann verwendet werden, um Anschlüsse zwischen ÖSPV-Linien zu prüfen. Weiter kann die Haltekantenbelegung der Linien dargestellt und somit sehr einfach die Anzahl benötigter Kanten an einem Knoten abgelesen

werden. Das Intervall von 60 bis 120 Minuten entspricht der Periode, in der die Optimierung durchgeführt wird, da eine Stunde berechnet wird (vgl. Kapitel 5.1 «Grundlagen»). Die Verschiebung um 60 Minuten entsteht durch die Addition von 60 Minuten im mathematischen Modell für die korrekte Berechnung aller Anschlüsse.

5.3.5.4. Histogramme

In den Blättern «Histogramme HK» und «Histogramme SK» werden jeweils verschiedene Histogramme mit Verteilungen der Wartezeiten dargestellt. Für jeden Knoten werden die folgenden Histogramme für die Umsteigerichtungen ÖSPV auf Bahn und Bahn auf ÖSPV sowie beide Richtungen konsolidiert dargestellt.

- Verteilung der **ungewichteten** Wartezeiten, alle Gewichte
- Verteilung der **gewichteten** Wartezeiten, alle Gewichte
- Verteilung der ungewichteten Wartezeiten, **hohe Gewichte**
- Verteilung der ungewichteten Wartezeiten, **mittlere Gewichte**
- Verteilung der ungewichteten Wartezeiten, **niedrige Gewichte**

Die Intervalle in Minuten können von den Nutzenden selbst gewählt werden. Auf dem Blatt «Histogramme SK» kann ein Sekundärknoten für die Betrachtung ausgewählt werden.

Die Verteilung der ungewichteten Wartezeiten ist je nach Gewichtungen nicht unbedingt aussagekräftig. Sie sollte aber nach der Optimierung einen Unterschied zu vor der Optimierung oder Zufallswerten aufweisen.

Die gewichteten Wartezeiten sollten im optimierten Zustand eine rechtsschiefe Verteilung aufweisen. Ein entsprechendes Beispiel ist in Abbildung 29 dargestellt.

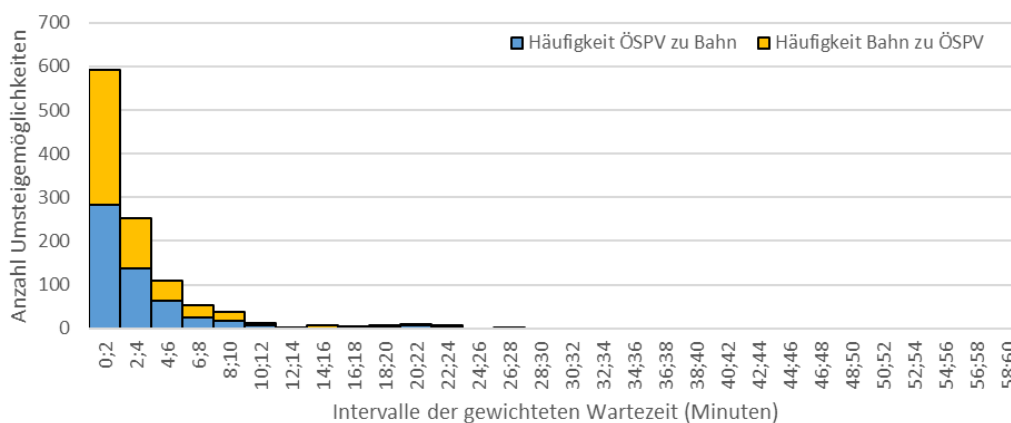


Abbildung 29: Beispiel eines Histogramms zur Verteilung der gewichteten Wartezeiten im optimierten Zustand. Auffällig ist die typisch rechtsschiefe Verteilung. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Falls die Verteilungen der gewichteten Wartezeiten am Haupt- und am Sekundärknoten stark unterschiedliche Formen aufweisen, sollte die Vergleichbarkeit der Gewichtungen am Haupt- und an den Sekundärknoten überprüft werden (z. B. ob prozentuale Werte und ganzzahlige Werte verwendet wurden).

Auch die Histogramme mit den Verteilungen der ungewichteten Wartezeit für hohe, mittlere und niedrige Gewichte können von den Nutzenden angepasst werden. Es kann nebst den Klassen auch eingestellt werden, in welchem Intervall die Gewichtungen für das jeweilige Histogramm liegen sollen.

Die Histogramme mit den Verteilungen der Wartezeit für Anschlüsse auf Bahnabfahrten und Bahnankünfte mit hohen Gewichtungen sollten nach der Optimierung eindeutig rechtsschief sein.

Diejenigen der mittleren Gewichte sind idealerweise eher rechtsschief.

Bei den Histogrammen zu den niedrig gewichteten Anschlüssen tritt meist eine eher zufällige Verteilung auf. Dies liegt daran, dass diese nur einen geringen Einfluss auf die Optimierung der Ankunfts- und Haltezeiten des ÖSPV haben.

5.4. Prüfung der Anwendbarkeit und Validierung

Um die Anwendbarkeit der entwickelten Kalkulationstabelle zu prüfen, wurden Validierungen anhand von praktischen Beispielen durchgeführt. Das primäre Ziel ist nicht, einen neuen Fahrplan vorzuschlagen, sondern die Methode und die erreichten Resultate auf Ihre Nutzbarkeit zu prüfen. Deshalb wurde beispielsweise die Gewichtung nur sehr rudimentär eingestellt. Es wurden drei verschiedene Szenarien getestet:

- Winterthur in der Hauptverkehrszeit (HVZ)
- Winterthur in der Nebenverkehrszeit (NVZ)
- Wil SG als Knoten mit weniger Bahnverbindungen, aber mehr ÖSPV-Linien als Winterthur.

Die Eingabe der Daten und die erreichten Resultate der jeweiligen Szenarien werden im Folgenden dargelegt. Aus diesen Szenarien konnten Erkenntnisse zur allgemeinen Anwendbarkeit in der Praxis gezogen werden. Diese werden im letzten Teil des Kapitels erläutert.

Die Angaben zu den Fahrplänen und den Linien des ÖSPV stammen für Winterthur von Stadtbus Winterthur [2] und für Wil aus dem Kursbuch auf der Webseite fahrplanfelder.ch [15]. Die Angaben zu den Abfahrten der Bahn stammen von der Webseite der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) [16] und die Ankünfte wurden der Webseite search.ch [17] entnommen.

5.4.1. Winterthur in der Morgenspitzenstunde

Die erste Validierung wurde für Winterthur in der Morgenspitzenstunde (07:00 – 08:00 Uhr) durchgeführt. Als Ausgangslage dient der Fahrplan 2022. Berücksichtigt wurden ÖSPV-Linien von Stadtbus Winterthur, die am Hauptbahnhof Winterthur verkehren.

Eingabe der Daten

Der Knoten Winterthur Hauptbahnhof umfasst 39 Bahnlinien je Richtung (vgl. Abbildung 30) und insgesamt 8 Buslinien, die im Tool als 14 Buslinien (vgl. Abbildung 31) eingegeben werden. Die Gewichtung der Bahnlinien ist so aufgebaut, dass sehr wichtige Verbindungen (Fernverkehr) eine Gewichtung von 80 % erhalten und andere Verbindungen (S-Bahnen) mit 50 % gewichtet werden. Die S11/S12 Verbindungen von und nach Zürich erhalten eine Gewichtung von 100 %.

Winterthur			Bahn Ankünfte		Winterthur			Bahn Abfahrten	
#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Ankunftsminute	#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Abfahrtsminute
§1§	IC1	St. Gallen	80%	6	§1§	IC1	St. Gallen	80%	8
§2§	IC1	Genève-Aéroport	80%	52	§2§	IC1	Genève-Aéroport	80%	54
§3§	IC5	Lausanne	80%	1	§3§	IC5	Lausanne	80%	3
§4§	IC5	Rorschach	80%	27	§4§	IC5	Rorschach	80%	29
§5§	IC5	Genève-Aéroport	80%	31	§5§	IC5	Genève-Aéroport	80%	33
§6§	IC8	Romanshorn	80%	29	§6§	IC8	Romanshorn	80%	31
§7§	IC8	Brig	80%	29	§7§	IC8	Brig	80%	31
§8§	IR13	Zürich HB	80%	22	§8§	IR13	Zürich HB	80%	24
§9§	IR13	St. Margrethen SG	80%	36	§9§	IR13	St. Margrethen SG	80%	38
§10§	IR75	Konstanz	80%	59	§10§	IR75	Konstanz	80%	1
§11§	IR75	Luzern	80%	59	§11§	IR75	Luzern	80%	1
§12§	EC	München Hbf	80%	57	§12§	EC	München Hbf	80%	58
§13§	S7	Winterthur	50%	25	§13§	S7	Rapperswil SG	50%	5
§14§	S7	Winterthur	50%	55	§14§	S7	Rapperswil SG	50%	35
§15§	S8	Winterthur	50%	19	§15§	S8	Pfäffikon SZ	50%	11
§16§	S8	Winterthur	50%	49	§16§	S8	Pfäffikon SZ	50%	41
§17§	S11	Aarau	50%	7	§17§	S11	Aarau	100%	9
§18§	S11	Seuzach	100%	21	§18§	S11	Seuzach	50%	24

Abbildung 30: Screenshot von 18 von 39 Zeilen der Eingabedaten des Bahnfahrplanes in Winterthur. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Die Wegzeit zwischen Bahn und Bus am Bahnhof Winterthur beträgt für fast alle Linien 5 Minuten (vgl. Abbildung 31). Bei den Linien 4 und 660, die an der etwas weiter entfernten Haltestelle Archstrasse halten, beträgt die Wegzeit 7 Minuten. Die Haltezeiten bei den Durchmesserlinien sollen zwischen 1 und 3 Minuten liegen. Bei den am Bahnhof wendenden Linien 4, 10 und 660 sollen die Haltezeiten zwischen 2 und 10 Minuten liegen. Bei der Linie 660 werden zusätzliche Kurse von Nürensdorf nach Winterthur eingesetzt, die lediglich in eine Richtung verkehren. Diese werden als separate Linie eingegeben.

ÖSPV-Linien Hauptknoten (Winterthur)						
#	Linie	Richtung	Taktzeit	Wegzeit	min. Haltezeit	max. Haltezeit
1	1	Töss	6	5	1	3
2	1	Oberwinterthur	6	5	1	3
3	2	Seen	6	5	1	3
4	2	Wülflingen	6	5	1	3
5	3	Oberseen	7.5	5	1	3
6	3	Rosenberg	7.5	5	1	3
7	4	Breite	10	7	2	10
8	5	Dätttau	15	5	1	3
9	5	Technorama	15	5	1	3
10	7	Wülflingen	10	5	1	3
11	7	Melcher	10	5	1	3
12	10	Oberwinterthur	10	5	2	10
13	660	Bassersdorf	30	7	2	10
14	660	Winterthur	30	7	0	0

Abbildung 31: Screenshot der Eingabedaten im Blatt "ÖSPV" für Winterthur. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Im Anwendungsfall Winterthur gibt es vier Sekundärknoten (vgl. Abbildung 32). Die Linien 1, 5 und 10 haben Oberwinterthur als Sekundärknoten, die Linie 2 Seen, die Linie 7 Hegi und die Linie 660 Bassersdorf.

Die Fahrzeiten zwischen Haupt- und Sekundärknoten sind nicht bei allen Linien für beide Richtungen gleich. Bei den Linien, die am Haupt- und am Sekundärknoten wenden und somit nur eine Fahrzeit eingegeben werden kann, wurde die grössere der beiden Fahrzeiten eingegeben. Dies wurde bei der minimalen Haltezeit berücksichtigt, indem diese entsprechend verkürzt wurde. Bei den zusätzlichen Kursen der Linie 660, die als separate Linie eingegeben werden (unterste Zeile in Abbildung 32), ist die Verknüpfung mit einem Sekundärknoten auf «Nein» gestellt. Als Spezialfall wird jedoch «Endet oder beginnt am Hauptknoten» angegeben, damit die Beziehung Bahn zu ÖSPV am Hauptknoten in der Berechnung der Wartezeiten nicht berücksichtigt wird.

Verknüpfung	Knoten	Vor / Nach	Spezialfall	Fahrtzeit	Wegzeit	min. Haltezeit	max. Haltezeit
Ja	OWT	Vor	Nein	11	5	0	1
Ja	OWT	Nach	Nein	10	5	0	1
Ja	WSEE	Nach	Endet oder beginnt am Sekundärknoten	14	3	3	7
Ja	WSEE	Vor	Endet oder beginnt am Sekundärknoten	16	3	3	7
Nein							
Nein							
Nein							
Ja	OWT	Vor	Nein	16	6	0	1
Ja	OWT	Nach	Nein	15	4	0	1
Ja	WHE	Vor	Nein	16	6	0	1
Ja	WHE	Nach	Nein	15	6	0	1
Ja	OWT	Vor	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten	18	3	1	7
Ja	BSD	Vor	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten	40	4	1	5
Nein		Vor	Endet oder beginnt am Hauptknoten				

Abbildung 32: Screenshot der Eingabedaten für die Sekundärknoten der ÖSPV-Linien in Winterthur. Es gibt vier Sekundärknoten: Oberwinterthur (OWT), Winterthur Seen (WSEE), Winterthur Hegi (WHE) und Bassersdorf (BSD). Das «Nein» auf der letzten Zeile ist farblich markiert, da hier der Spezialfall genutzt wurde, um eine Linie ohne Sekundärknoten anzupassen und so der Sekundärknoten nicht vollständig definiert ist. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Werte vor der Optimierung

Vor der Optimierung erreicht das Angebot gemäss dem Fahrplan 2022 eine totale gewichtete Wartezeit von 3'294 Minuten. Davon fallen 2'988 Minuten beim Haupt- und 307 Minuten beim Sekundärknoten an.

Optimierung

Der Optimierungsvorgang hat 10 Minuten gedauert. Es konnte keine erhöhte Belegung des Arbeitsspeichers festgestellt werden.

Ergebnisse

Nach der Optimierung hat sich die gesamte gewichtete Wartezeit wie folgt verändert:

- Hauptknoten: Verbesserung von 2'988 auf 2'618 Minuten (-12 %)
- Sekundärknoten: Verbesserung von 307 auf 240 Minuten (-22 %)
- Total: Verbesserung von 3'294 auf 2'858 Minuten (-13 %)

Analyse

Um die Ergebnisse zu analysieren, werden die Diagramme der Standzeiten und Histogramme der gewichteten Wartezeit vor und nach der Optimierung miteinander verglichen.

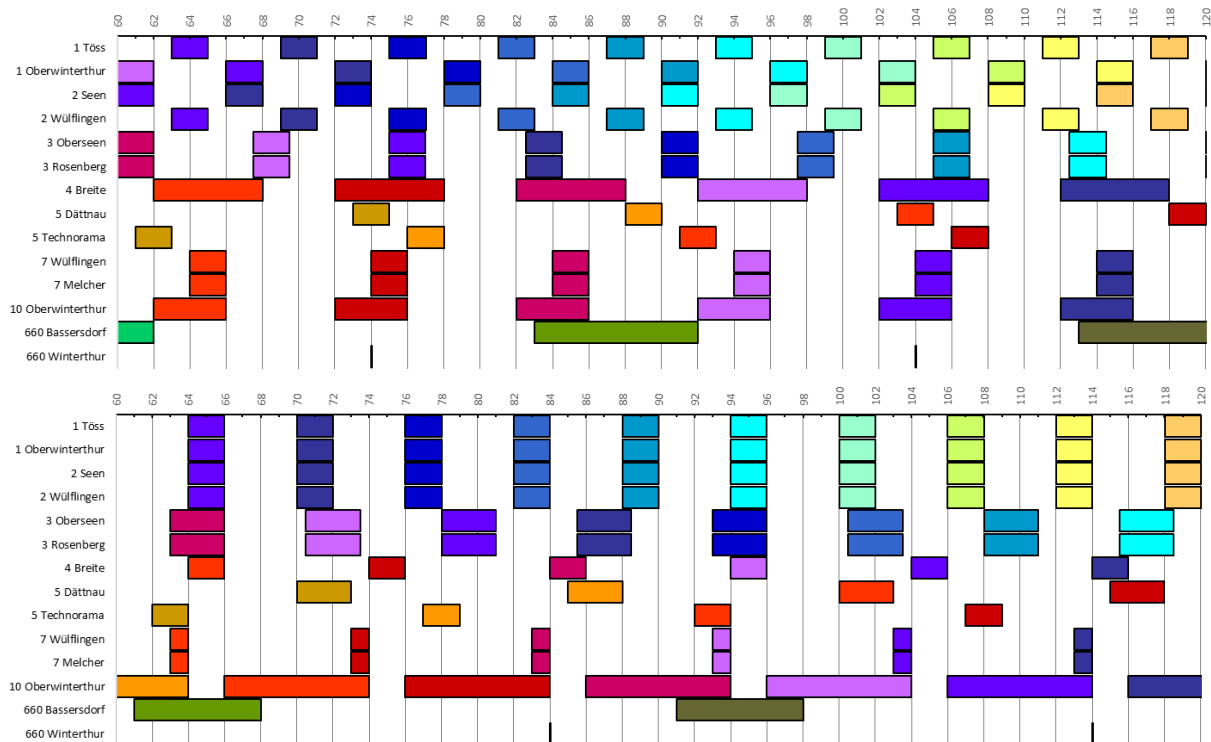


Abbildung 33: Standzeiten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Winterthur in der HVZ vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. Darstellung im Intervall von 60 bis 120 Minuten. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

In Abbildung 33 sind die Standzeiten der ÖSPV-Linien vor und nach der Optimierung dargestellt. Die Unterschiede sind gut sichtbar. So wurden alle Linien, die im selben Takt verkehren gleich geplant. Dies zeigt, dass die teilweise vorhandenen Sekundärknoten einen geringen Einfluss haben.

Die als separate Linie eingegebenen Verstärkerkurse der Linie 660 kommen nun zur Versatzminute 24 an. Die normalen Kurse kommen zur Versatzminute 01 an. Diese Aufteilung ist eher suboptimal, da sie stark versetzt zum eigentlichen Viertelstundentakt verkehren. Die Versatzzeit müsste in der Angebotsplanung manuell angepasst werden.

In Abbildung 34 ist ein Vergleich zwischen den Histogrammen der gewichteten Wartezeiten vor und nach der Optimierung abgebildet. Die Menge der gewichteten Wartezeiten zwischen 0 und 2 Minuten hat zugenommen, die Menge der gewichteten Wartezeiten zwischen 2 und 6 Minuten ab.

Bereits im jetzigen Fahrplan ist die Verteilung sehr rechtsschief.

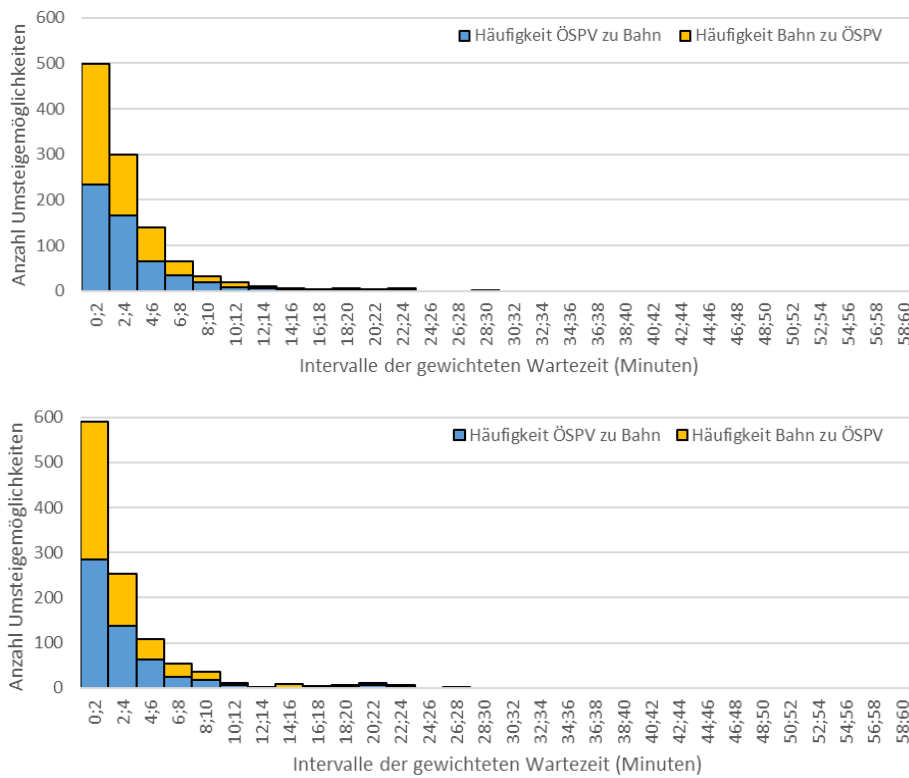


Abbildung 34: Histogramme der gewichteten Wartezeiten vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. (Eigene Darstellung)

Weitere Zahlen, Diagramme und alle konkreten Eingabedaten für den optimierten Zustand können in der Kalkulationstabelle «Tool Optimale Anschlüsse Winterthur HVZ.xlsm» als Beilage zu dieser Arbeit eingesehen werden. Der Stand vor der Optimierung kann in der Kalkulationstabelle «Tool Optimale Anschlüsse Winterthur HVZ (vor Optimierung).xlsm» als Beilage zu dieser Arbeit eingesehen werden.

5.4.2. Winterthur in der Nebenverkehrszeit

Der zweite Test wurde für Winterthur in einer Randstunde (23:00 – 24:00 Uhr) durchgeführt. Als Ausgangslage dient der Fahrplan 2022. Berücksichtigt wurden ÖSPV-Linien von Stadtbus Winterthur.

Eingabe der Daten

Der Bahnfahrplan ist zwischen 23:00 und 24:00 Uhr im Vergleich zur HVZ ausgedünnt (vgl. Abbildung 35).

Winterthur			Bahn Ankünfte		Winterthur			Bahn Abfahrten	
#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Ankunftsminute	#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Abfahrtsminute
§1§	IC1	St. Gallen	100%	6	§1§	RE	Konstanz	80%	1
§2§	S12	Winterthur	100%	8	§2§	RE	Zürich HB	100%	1
§3§	S30	Winterthur	50%	12	§3§	S7	Rapperswil SG	50%	5
§4§	S26	Winterthur	50%	17	§4§	S33	Schaffhausen	50%	6
§5§	S29	Winterthur	50%	19	§5§	S41	Bülach	50%	6
§6§	S12	Brugg AG	50%	19	§6§	IC1	St. Gallen	80%	8
§7§	S35	Winterthur	50%	19	§7§	S35	Wil SG	50%	11
§8§	IR13	Zürich HB	80%	22	§8§	S29	Stein am Rhein	50%	12
§9§	S41	Winterthur	50%	25	§9§	S26	Bauma	50%	13
§10§	S7	Winterthur	50%	25	§10§	S30	Weinfelden	50%	16
§11§	IC8	Romanshorn	100%	29	§11§	S12	Brugg AG	100%	22
§12§	IC8	Zürich HB	80%	29	§12§	IR13	Zürich HB	100%	24
§13§	IR13	St. Gallen	100%	36	§13§	IC8	Romanshorn	80%	31
§14§	S12	Schaffhausen	100%	38	§14§	IC8	Zürich HB	100%	31
§15§	S30	Winterthur	50%	45	§15§	S7	Rapperswil SG	50%	35
§16§	S26	Winterthur	50%	47	§16§	S41	Bülach	50%	36
§17§	S35	Winterthur	50%	49	§17§	IR13	St. Gallen	80%	38
§18§	S29	Winterthur	50%	49	§18§	S12	Schaffhausen	50%	42
§19§	S33	Winterthur	50%	54	§19§	S29	Seuzach	50%	42
§20§	S41	Winterthur	50%	55	§20§	S35	Wil SG	50%	42
§21§	S7	Winterthur	50%	55	§21§	S26	Bauma	50%	43
§22§	RE	Zürich HB	80%	59	§22§	S30	Weinfelden	50%	49
§23§	RE	Konstanz	100%	59	§23§	S12	Brugg AG	100%	52

Abbildung 35: Screenshot der Eingabedaten des Bahnfahrplanes in Winterthur zwischen 23 und 24 Uhr. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Die ÖSPV-Linien sind die Gleichen wie die während der HVZ (siehe vorheriges Kapitel) mit der Ausnahme, dass die Verstärkerkurse der Linie 660 nicht vorkommen und alle Linien (ausser 660) lediglich in einem 15-Minuten-Takt verkehren (vgl. Abbildung 36). Zusätzlich haben sich die Versatz-, Halte- und Fahrzeiten geändert (vgl. Abbildung 37).

ÖSPV-Linien Hauptknoten (W)						
#	Linie	Richtung	Taktzeit	Wegzeit	min. Haltezeit	max. Haltezeit
1	1	Töss	15	5	3	5
2	1	Oberwinterthur	15	5	3	5
3	2	Seen	15	5	3	5
4	2	Wülflingen	15	5	3	5
5	3	Oberseen	15	5	3	5
6	3	Rosenberg	15	5	3	5
7	4	Breite	15	7	3	10
8	5	Dätttau	15	5	3	10
9	7	Wülflingen	15	5	3	5
10	7	Melcher	15	5	3	5
11	10	Oberwinterthur	15	5	3	10
12	660	Bassersdorf	30	7	3	29

Abbildung 36: Screenshot der Eingabedaten im Blatt "ÖSPV" für Winterthur in der NVZ. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Verknüpfung	Knoten	Vor / Nach	Spezialfall	Fahrtzeit	Wegzeit	min. Haltezeit	max. Haltezeit
Ja	OWT	Vor	Nein	8	5	0	1
Ja	OWT	Nach	Nein	8	5	0	1
Ja	WSEE	Nach	Endet oder beginnt am Sekundärknoten	12	3	3	5
Ja	WSEE	Vor	Endet oder beginnt am Sekundärknoten	12	3	3	5
Nein							
Nein							
Nein							
Nein							
Ja	WHE	Vor	Nein	12	6	0	1
Ja	WHE	Nach	Nein	11	6	0	1
Ja	OWT	Vor	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten	13	3	1	5
Ja	BSD	Vor	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten	31	4	1	5

Abbildung 37: Screenshot der Eingabedaten für die Sekundärknoten der ÖSPV-Linien im Blatt "ÖSPV" für Winterthur in der NVZ. Wie in der HVZ gibt es vier Sekundärknoten: Oberwinterthur (OWT), Winterthur Seen (WSEE), Winterthur Hegi (WHE) und Bassersdorf (BSD). (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Werte vor der Optimierung

Vor der Optimierung erreicht das Angebot gemäss Fahrplan 2022 eine totale gewichtete Wartezeit von 3'277 Minuten. Davon fallen 2'779 Minuten beim Haupt- und 499 Minuten beim Sekundärknoten an.

Optimierung

Der Optimierungsvorgang hat 30 Minuten gedauert. Es konnte keine erhöhte Belegung des Arbeitsspeichers festgestellt werden.

Ergebnisse

Nach der Optimierung hat sich die gesamte gewichtete Wartezeit wie folgt verändert:

- Hauptknoten: Verbesserung von 2'779 auf 2'260 Minuten (-19 %)
- Sekundärknoten: Verbesserung von 499 auf 388 Minuten (-22 %)
- Total: Verbesserung von 3'277 auf 2'648 Minuten (-19 %)

Analyse

Als Analyse dient ein Vergleich der Diagramme der Standzeiten und Histogramme der gewichteten Wartezeiten vor und nach der Optimierung.

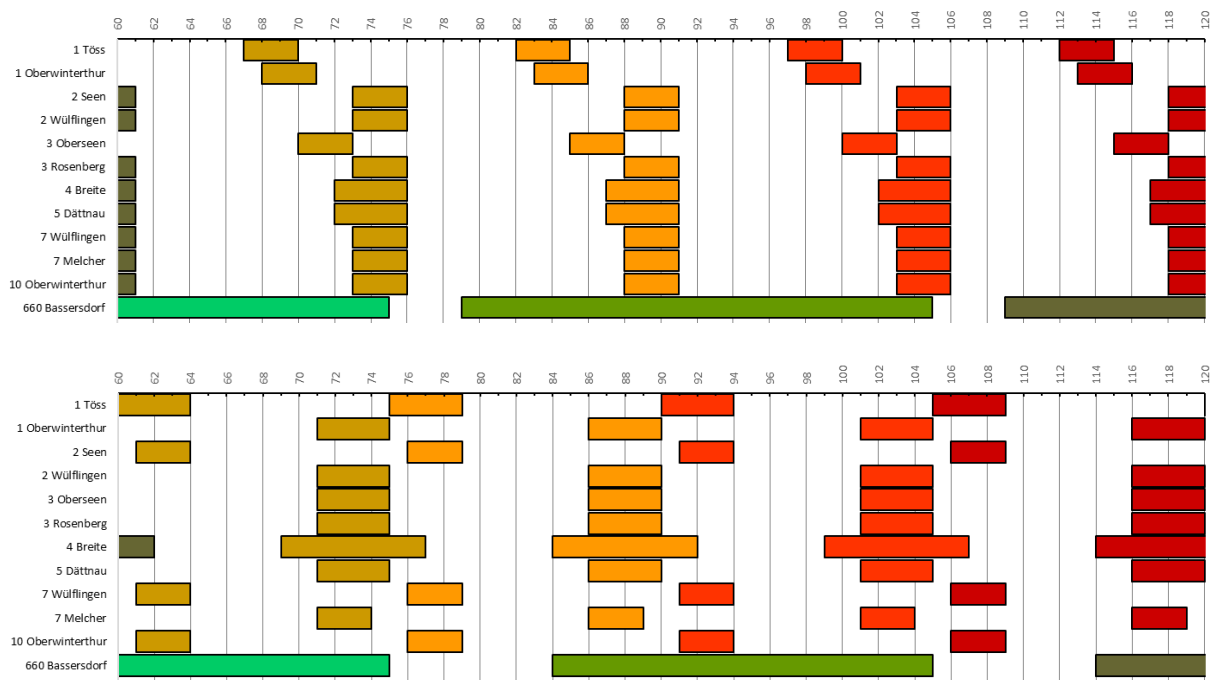


Abbildung 38: Standzeiten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Winterthur zur NVZ vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. Darstellung im Intervall von 60 bis 120 Minuten. (Eigene Darstellung)

In Abbildung 38 ist sichtbar, dass die Haltezeiten vor und nach der Optimierung sehr ähnlich sind, es aber auch deutliche Unterschiede gibt. So halten beispielsweise je eine Richtung der Linien 1, 2, 7 und die Linie 10, die alle einen Sekundärknoten aufweisen, nicht gleichzeitig mit den anderen Linien am Hauptknoten.

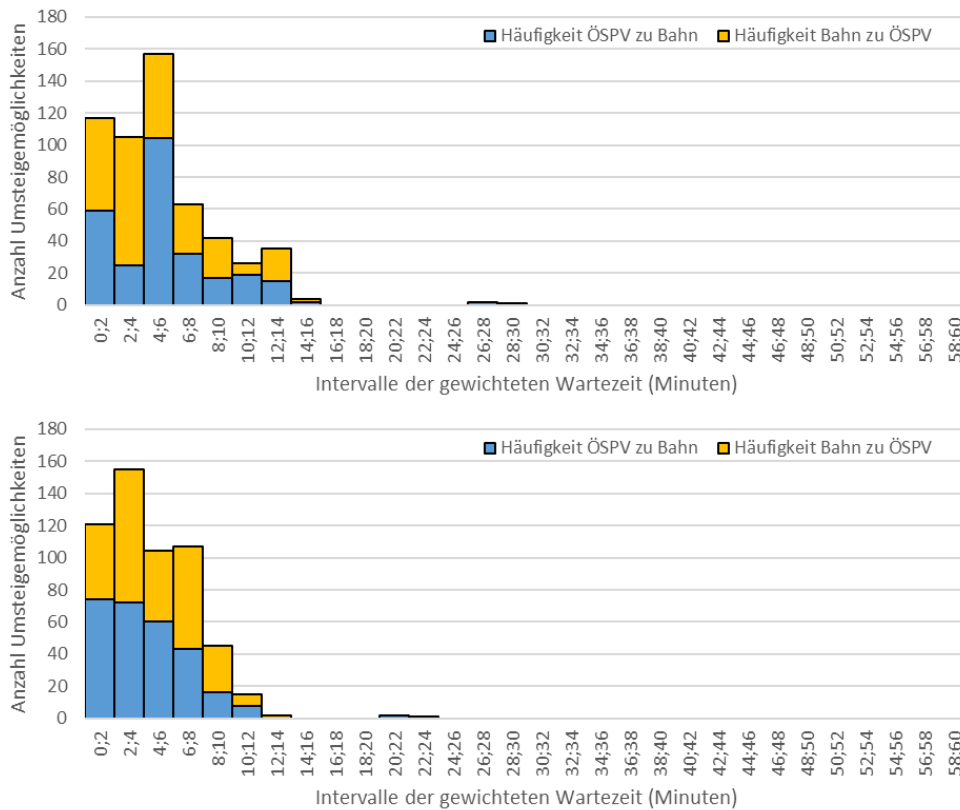


Abbildung 39: Histogramme der gewichteten Wartezeiten vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. (Eigene Darstellung)

Beim Vergleich der Histogramme der gewichteten Wartezeiten (vgl. Abbildung 39) fällt auf, dass sich der Peak um zwei Minuten nach links verschoben hat. Die Streuung der Anzahl der Werte ist kleiner nach der Optimierung und es gibt kaum mehr gewichtete Wartezeiten länger als 10 Minuten. Die sehr langen gewichteten Wartezeiten im Bereich von 20 bis 30 Minuten wurden um 4 Minuten reduziert.

Weitere Zahlen, Diagramme und alle konkreten Eingabedaten für den optimierten Zustand können in der Kalkulationstabelle «Tool Optimale Anschlüsse Winterthur NVZ.xlsm» als Beilage zu dieser Arbeit eingesehen werden. Der Stand vor der Optimierung kann in der Kalkulationstabelle «Tool Optimale Anschlüsse Winterthur NVZ (vor Optimierung).xlsm» als Beilage zu dieser Arbeit eingesehen werden.

5.4.3. Wil in der Morgenspitzenstunde

Um die universelle Anwendbarkeit für andere Knoten zu prüfen, wurde die Kalkulationstabelle am Knoten Wil zur Morgenspitzenstunde (07:00 – 08:00 Uhr) angewendet. Dafür wurde der Fahrplan 2022 verwendet.

Eingabe der Daten

Der Knoten Wil umfasst 16 Bahnlinien je Richtung (vgl. Abbildung 40) und insgesamt 17 Buslinien, die im Tool als 23 Linien (vgl. Abbildung 41) eingegeben werden. Sehr wichtige Bahnlinien (Fernverkehr) werden mit 80 % gewichtet, andere Verbindungen (S-Bahnen) mit 50 %.

Wil					Wil				
			Bahn Ankünfte					Bahn Abfahrten	
#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Ankunftsminute	#	Linie	Richtung	Gewichtung (%)	Abfahrtsminute
§1§	IR13	Zürich HB	80%	3	§1§	S9	Wattwil	50%	2
§2§	S35	Wil SG	50%	12	§2§	S10	Romanshorn	50%	2
§3§	S1	Wil SG	50%	13	§3§	S15	Wängi	50%	3
§4§	S15	Wil SG	50%	18	§4§	IR13	Zürich HB	80%	4
§5§	IC1	St. Gallen	80%	25	§5§	S15	Frauenfeld	50%	11
§6§	S10	Wil SG	50%	27	§6§	S1	Schaffhausen	50%	17
§7§	S9	Wil SG	50%	28	§7§	S12	Brugg AG	50%	18
§8§	S15	Wil SG	50%	29	§8§	IC1	St. Gallen	80%	26
§9§	IC1	Genève-Aéroport	80%	33	§9§	S9	Wattwil	50%	32
§10§	S12	Wil SG	50%	42	§10§	S10	Romanshorn	50%	32
§11§	S1	Wil SG	50%	43	§11§	S15	Wängi	50%	33
§12§	S15	Wil SG	50%	48	§12§	IC1	Genève-Aéroport	80%	34
§13§	IR13	Chur	80%	55	§13§	S15	Frauenfeld	50%	41
§14§	S10	Wil SG	50%	57	§14§	S1	Schaffhausen	50%	47
§15§	S9	Wil SG	50%	58	§15§	S35	Winterthur	50%	48
§16§	S15	Wil SG	50%	59	§16§	IR13	Chur	80%	56

Abbildung 40: Screenshot der Eingabedaten des Bahnfahrplanes in Wil. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

In Wil wird eine Wegzeit von 5 Minuten angenommen. Als minimale beziehungsweise maximale Haltezeit wird je nach Takt 0 bis 5 Minuten, 2 bis 10 Minuten oder 2 bis 15 Minuten angenommen.

Die Linie 732 verfügt über Verstärkerkurse, welche die in einem Halbstundentakt bediente Strecke zwischen dem Bahnhof Wil und Kirchberg Post zu einem angenäherten Viertelstundentakt verdichtet.

ÖSPV-Linien Hauptknoten (Wil)						
#	Linie	Richtung	Taktzeit	Wegzeit	min. Haltezeit	max. Haltezeit
1	701	Neulanden	15	5	0	5
2	702	Rossrüti, Altersheim	15	5	0	5
3	702	Wil en bei Wil, Gemeindez.	15	5	0	5
4	703	Neugruben	15	5	0	5
5	703	Reuttistrasse	15	5	0	5
6	704	Wilerwald	15	5	0	5
7	705	Bronschhofen Himmelrich	30	5	2	10
8	706	Braunau, Dorf	30	5	2	10
9	722	Weinfeld en, Bahnhof	60	5	2	15
10	724	Niedbüren, Dorf	60	5	2	15
11	725	Niederhelfenschwil, Neudorf	60	5	2	15
12	726	Uzwil, Waldhof	30	5	2	10
13	726	Wil SG, Bahnhof	30	5	2	10
14	729	Uzwil, Bahnhof	60	5	2	15
15	730	Uzwil, Bahnhof	30	5	2	10
16	731	Kirchberg SG, Fetzhof	30	5	2	10
17	732	Kirchberg SG, Post	30	5	2	30
18	732	Gähwil, Sportstrasse	30	5	2	30
19	733	Littenheid, Klinik	30	5	2	10
20	734	Fischingen, Kloster	30	5	2	10
21	734	Fischingen, Kloster	30	5	2	10
22	735	Bichelsee, Dorf	30	5	2	10
23	735	Bichelsee, Dorf	30	5	2	10

Abbildung 41: Screenshot der Eingabedaten im Blatt "ÖSPV" für Wil. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Da der reine Viertelstundentakt aber nicht erreicht wird, sondern es einen «Hinketakt» (also nicht immer gleiche Wartezeiten) gibt, wurden diese Kurse als eine separate Linie nach Kirchberg Post erfasst. Das Intervall der Haltezeit wurde bei diesen Linien auf 2 bis 30 Minuten erweitert.

Die Linien 722, 726, 729, 730, 734 und 735 haben jeweils einen Sekundärknoten (vgl. Abbildung 42). Die Linie 722 führt vom Bahnhof Wil an den Bahnhof Weinfeld, beginnt und endet demnach am Haupt- und Sekundärknoten.

Die Linien 726, 729 und 730 haben als Sekundärknoten Uzwil, wobei die Linie 726 weiterführt und die Linien 729 und 730 am Bahnhof Uzwil enden.

Bei den Linien 734 und 735 ist Sirmach der Sekundärknoten. Da beide Linien weiterführen, enden beziehungsweise beginnen die Linien nur am Hauptknoten.

Verknüpfung	Knoten	Vor / Nach	Spezialfall
Nein			
Nein			
Nein			
Nein			
Nein			
Nein			
Nein			
Ja	WF	Nach	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten
Nein			
Nein			
Ja	UZW	Nach	Endet oder beginnt am Hauptknoten
Ja	UZW	Vor	Endet oder beginnt am Hauptknoten
Ja	UZW	Nach	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten
Ja	UZW	Nach	Endet / beginnt am Haupt- und am Sekundärknoten
Nein			
Nein			
Nein			
Nein			
Ja	SIR	Nach	Endet oder beginnt am Hauptknoten
Ja	SIR	Vor	Endet oder beginnt am Hauptknoten
Ja	SIR	Nach	Endet oder beginnt am Hauptknoten
Ja	SIR	Vor	Endet oder beginnt am Hauptknoten

Abbildung 42: Screenshot eines Teils der Eingabedaten für die Sekundärknoten der ÖSPV-Linien im Blatt "ÖSPV" für Wil. Es gibt drei verschiedene Sekundärknoten: Weinfeld (WF), Uzwil (UZW) und Sirmach (SIR). (Screenshot aus dem entwickelten Tool)

Wenn eine Linie am Haupt- und am Sekundärknoten endet, kann im Tool lediglich eine Fahrzeit für beide Richtungen eingegeben werden. Da die Linien 722, 729 und 730 über unsymmetrische Fahrzeiten je Richtung verfügen, wurden die Fahrzeiten dieser Richtungen angepasst, sodass die Gesamtsymmetrie des Fahrplans stimmt. Sollte dies in der Praxis nicht funktionieren, müssen die einzelnen Fahrtrichtungen als separate Linien eingegeben werden.

Bei der Anschlusswahl wurden am Hauptknoten Wil bei den Buslinien 734 und 735 via Sirmach Bahnhof die Anschlüsse von/nach Sirmach (S12 und S35) deaktiviert. In Weinfeld wurden beide Anschlussbeziehungen zwischen der Buslinie 722 (von/nach Wil) und der S10 (von/nach Wil) deaktiviert.

Ausgangslage

Vor der Optimierung erreicht das Angebot gemäss Fahrplan 2022 eine totale gewichtete Wartezeit von 6'308 Minuten. Davon fallen 5'351 Minuten beim Haupt- und 957 Minuten beim Sekundärknoten an.

Optimierung

Der Optimierungsvorgang hat 2:02 h gedauert. Grund für diese lange Laufzeit ist, dass Wil über viele Buslinien im Stundentakt verfügt, wovon mehrere einen Sekundärknoten aufweisen. Somit gibt es eine grosse Anzahl möglicher Kombinationen der Variablen. Während der Berechnung wurden ca. 1.3 GB Arbeitsspeicher benötigt.

Ergebnisse

Nach der Optimierung hat sich die gesamte gewichtete Wartezeit wie folgt verändert:

- Hauptknoten: Verbesserung von 5'351 auf 3'918 Minuten (-26.8 %)
- Sekundärknoten: Verschlechterung von 957 auf 1'025 Minuten (+7.1 %)
- Total: Verbesserung von 6'308 auf 4'942 Minuten (-21.6 %)

Analyse

Anders als bei den Anwendungsfällen in Winterthur ist in Wil eine Verschlechterung beim Sekundärknoten festzustellen. Diese ist auf die wenigen Züge in Sirnach und Uzwil sowie den Halbstundentakt bei den meisten ÖSPV-Linien zurückzuführen. So sind die Anschlüsse in Wil in Summe wichtiger als diejenigen am Sekundärknoten. Um dies zu verhindern, müssten die Sekundärknoten stärker gewichtet werden.

Um die Ergebnisse zu analysieren, werden folgend die Diagramme der Standzeiten und Histogramme der gewichteten Wartezeit miteinander verglichen.

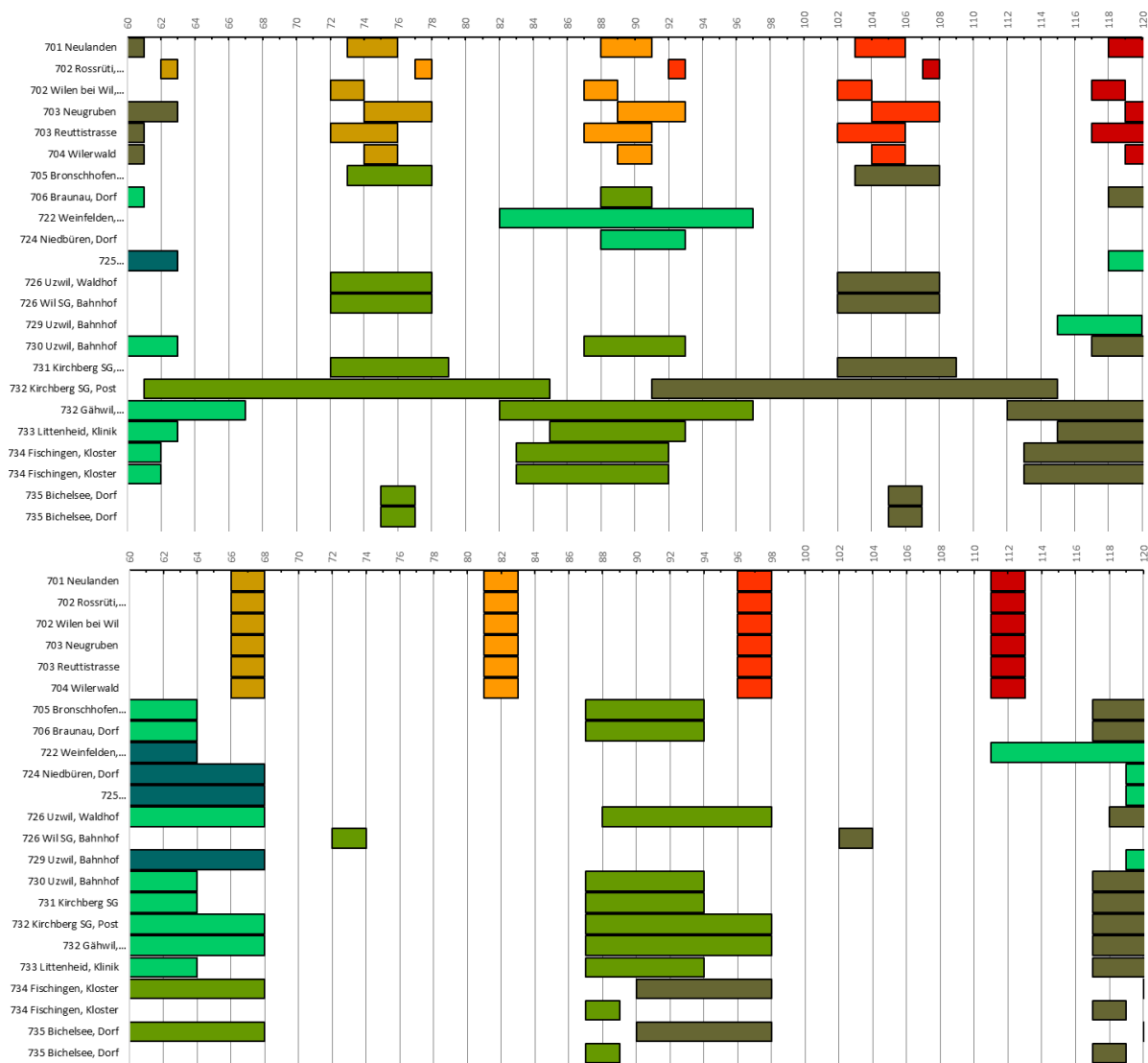


Abbildung 43: Standzeiten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Wil vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. Darstellung im Intervall von 60 bis 120 Minuten. (Eigene Darstellung)

Wie in Abbildung 43 dargestellt, haben sich die Standzeiten verändert. Die Linien 701 bis 704 halten nun alle zur selben Zeit am Bahnhof Wil. Bei den Linien mit Sekundärknoten ist die Streuung etwas grösser, aber wesentlich kleiner als im heutigen nicht optimierten Zustand. Die in eine eigene Linie eingeteilten Verstärkerkurse der Linie 732 nach Kirchberg/Gähwil haben nun die gleichen Abfahrtszeiten wie die Hauptkurse. Dies müsste von der Angebotsplanung des ÖSPV-Unternehmens manuell angepasst werden.

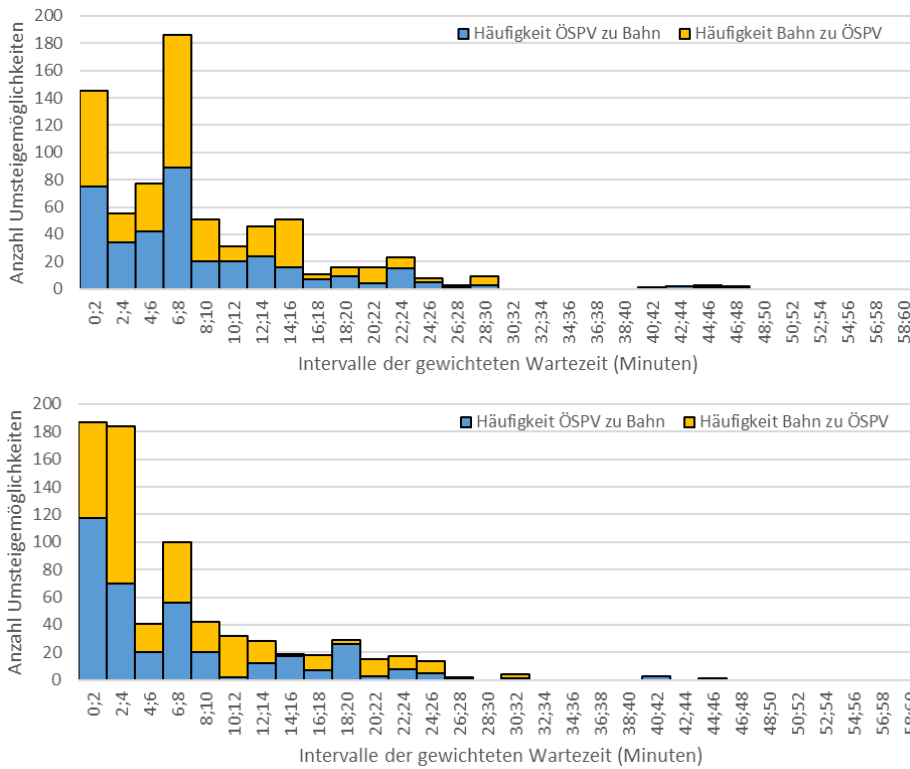


Abbildung 44: Histogramme der gewichteten Wartezeiten vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. (Eigene Darstellung)

Wenn die Histogramme der gewichteten Wartezeiten miteinander verglichen werden (vgl. Abbildung 39) fällt auf, dass das Histogramm nach der Optimierung deutlich rechtsschiefer ist als jenes vor der Optimierung. Die Anzahl der kurzen gewichteten Wartezeiten ist deutlich grösser nach der Optimierung als vor der Optimierung. Zudem wurden die sehr grossen Wartezeiten reduziert.

Weitere Zahlen, Diagramme und alle konkreten Eingabedaten für den optimierten Zustand können in der Kalkulationstabelle «Tool Optimale Anschluesse Wil.xlsm» als Beilage zu dieser Arbeit eingesehen werden. Der Stand vor der Optimierung kann in der Kalkulationstabelle «Tool Optimale Anschluesse Wil (vor Optimierung).xlsm» als Beilage zu dieser Arbeit eingesehen werden.

5.4.4. Allgemeine Anwendbarkeit

Aufgrund der Validierung kann gefolgert werden, dass die entwickelte Methode und das dazugehörige Tool für kleine und mittlere Schweizer ÖSPV-Knoten gut geeignet sind. Einige Schwächen bei speziellen Linien wurden jedoch erkannt. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

Je Linie kann nur ein Sekundärknoten im Modell betrachtet und optimiert werden. In der Praxis kann es durchaus vorkommen, dass eine Linie am Haupt- und an mehreren Sekundärknoten anhält. Da es sehr anspruchsvoll ist, die grosse Anzahl an Varianten, die dadurch möglich wird, in ein Modell zu integrieren, wurde darauf verzichtet. Für die Anwendung hat dies zur Folge, dass diese Linien nicht anhand von allen Knoten optimiert werden können oder mit einer anderen Methode einzeln optimiert werden müssen.

Weiter müssen bei Linien, bei denen der Haupt- und der Sekundärknoten Wendehaltstellen sind, die Fahrzeiten in beiden Richtungen gleich sein. Unterschiedliche Fahrzeiten können nicht berücksichtigt werden. Bei der Anwendung muss in einem solchen Fall die kürzere Fahrzeit erhöht werden, damit sicher alle Anschlüsse in der Praxis möglich sind. Um weiterhin korrekte Umläufe zu berechnen, muss zusätzlich die minimale Haltezeit um denselben Wert reduziert werden.


Bei Linien, die am Sekundär- und am Hauptknoten enden, muss eine Angabe gemacht werden, ob der Sekundärknoten vor oder nach dem Hauptknoten bedient wird. Diese Angabe ist zwingend nötig, um die Berechnung der relativen Versatzzeit korrekt auszuführen. Es spielt keine Rolle, was eingegeben wird, sofern ein Wert vorhanden ist.

Für Linien, bei denen nicht alle Kurse zum angegebenen Sekundärknoten verkehren, können die Wartezeiten nicht richtig berechnet werden. Ein Beispiel für eine solche Linie ist, wenn die Hälfte der Kurse die Gesamtstrecke fährt, die andere Hälfte aber nur vom Hauptknoten bis zu einer Haltestelle zwischen Haupt- und Sekundärknoten. Typischerweise sind dies sogenannte Verstärkerkurse. In diesem Fall muss die Linie auf zwei separate Linien aufgeteilt werden. Die Optimierung mit dem Tool wird dadurch aber verunmöglicht, weil die Taktzeit nicht mehr korrekt berücksichtigt werden kann. In der Praxis muss in diesem Fall für die Optimierung eine andere Methode verwendet werden. Die Wartezeiten werden mit dem Tool aber richtig berechnet.

Die Optimierung dauert sehr lange, wenn es Linien mit grossen Taktzeiten und grossen Haltezeitintervallen gibt. Dies liegt daran, dass in diesem Fall sehr viele verschiedene Möglichkeiten berechnet werden müssen (vgl. Kapitel 5.3.4.2 «Vollständige Enumeration mit VBA-Code»).

5.5. Usability und Handbuch

Während der Entwicklung des Tools stand die Usability, also die gute Anwendbarkeit für Nutzende, im Fokus. Die Usability ist sehr subjektiv und darum schwierig zu beurteilen. Im Entwicklungsprozess wurde die gute Usability durch die enge Zusammenarbeit mit dem Praxispartner Stadtbus Winterthur sichergestellt. Im Folgenden wird auf einige Funktionalitäten eingegangen, die integriert wurden, um eine möglichst gute Usability zu erreichen.

Sämtliche Zellen in der Kalkulationstabelle, die keine Eingabe erfordern, wurden gesperrt und diejenigen Zellen, die eine Eingabe erfordern, wurden orange  markiert. Damit kann verhindert werden, dass Zellen mit Formeln oder konstanten Werten versehentlich überschrieben werden.

Weiter werden bei unlogischen Eingaben (zum Beispiel: minimale Haltezeit grösser als maximale Haltezeit) die entsprechenden Zellen farblich hervorgehoben. Werden im Hauptblatt Werte eingegeben, die ausserhalb der definierten Grenzen liegen (zum Beispiel: eingegebene Wartezeit grösser als maximale Wartezeit) erscheint eine Warnung, die von den Nutzenden aktiv quittiert werden muss.

In einem vordefinierten Bereich auf dem Blatt «ÖSPV» können sämtliche Sekundärknoten aufgelistet werden. Diese Liste wird bei allen Zellen, in denen die Eingabe eines Sekundärknotens gefordert ist, als Dropdown-Liste angezeigt und es sind keine anderen Eingaben möglich. Die Eingaben für die Spalten «Verknüpfung», «Vor/Nach» und «Spezialfall» sowie die Auswahl des «x» im Blatt «Anschlusswahl» sind ebenfalls als Dropdown-Liste verfügbar.

Im Blatt «Anschlusswahl» werden im Bereich des Sekundärknotens die Bahnverbindungen dynamisch an den gewählten Sekundärknoten angepasst. Weiter werden die relevanten Zeilen jeweils farblich hervorgehoben (vgl. Kapitel 5.3.2.3 «Anschlusswahl»).

Die visuellen Ausgaben (Wartezeiten, Standzeiten, Histogramme) helfen dabei, schnell und einfach einen guten Überblick zu erhalten.

Wird eine Optimierung gestartet, werden die aktuellen Werte in einen separaten Bereich kopiert, um nach der Optimierung die beiden Varianten miteinander vergleichen zu können. Um einen ausführlichen Vergleich zu machen, empfehlen wir aber, die Datei vor dem Optimieren separat zu speichern.

Wird die Optimierung versehentlich gestartet, gibt es einen Abbruch-Knopf, mit dem die (unter Umständen sehr zeitaufwändige) Optimierung abgebrochen werden kann.

Zusätzlich zum Tool wird ein Handbuch geschrieben, indem die Bedienung des Tools beschrieben wird.

6. Diskussion

Die Diskussion ist aufgeteilt in vier Teile. Zunächst werden die Anwendungsgrenzen in der Angebotsplanung eines ÖSPV-Fahrplanes beschrieben. Im zweiten Teil wird die Anwendung der Methode und des Tools ausserhalb des Schweizer Systems diskutiert und im dritten Teil werden die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung aufgezeigt. Als Abschluss werden die erlangten Erkenntnisse für die Wissenschaft und die Praxis in der Schlussfolgerung zusammengefasst.

6.1. Anwendungsgrenzen in der Angebotsplanung

Die entwickelte Kalkulationstabelle eignet sich gut, um die optimale Versatzzeit und innerhalb von vorgegebenen Intervallen am Haupt- und Sekundärknoten die optimale Haltezeit zu wählen. Die Qualität der Resultate ist stark abhängig von gut gewählten Gewichtungen.

Die Betrachtungsgrenzen der Arbeit sind so gewählt, dass betriebliche Aspekte nicht beachtet werden. Dies betrifft beispielsweise Umlaufpläne und Haltekantenbelegungen. Die Idee des Tools ist es, kleine Anpassungen am Fahrplan vorzunehmen und nicht den Fahrplan komplett neu zu planen.

Das Tool soll den Vorgang der Anschlussplanung nicht ersetzen, sondern die Angebotsplanung unterstützen. Es können optimale Anschlüsse berechnet werden, nicht aber der optimale Fahrplan.

In der Angebotsplanung muss geprüft werden, ob die Ergebnisse des Tools für die entsprechenden ÖSPV-Linien Sinn machen und ob es aus betrieblicher Sicht sinnvollere Varianten gäbe. Schlussendlich gibt das Tool eine Möglichkeit, schnell manuell einen anderen gewünschten Wert einzugeben und die Folgen davon zu analysieren. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Variablenkombination des Optimums nicht umsetzbar ist, für eine Sensitivitätsanalyse oder einfach zum Ausprobieren. Es muss keineswegs immer für alles eine Optimierung ausgeführt werden.

6.2. Anwendung ausserhalb des Schweizer Systems

Grundsätzlich ist die entwickelte Methode und das Tool auch für die Planung von Anschlüssen des ÖSPV an Bahnknoten im Ausland anwendbar. Dafür müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Einerseits muss der Bahnfahrplan an allen gewünschten Knoten innerhalb einer Stunde fix gegeben sein (die Züge müssen aber nicht im Takt verkehren). Andererseits müssen die ÖSPV-Linien über Kurse verfügen, die innerhalb der einen betrachteten Stunde im Takt verkehren.

6.3. Möglichkeiten zur Weiterentwicklung

Die entwickelte Methode und damit auch das erstellte Tool können noch weiter ausgebaut werden. Auf die verschiedenen von uns erkannten Möglichkeiten zur Verbesserung wird in diesem Teil eingegangen.

Zusätzliche Funktionen

Es könnten einige zusätzliche Funktionen ermöglicht werden, in dem die Dateneingabe und die Berechnung erweitert werden.

Im Falle von Linien, die am Haupt- und am Sekundärknoten wenden (vgl. Kapitel 5.1.2.5 «Einbindung des Sekundärknotens, wenn beide Knoten Wendehaltstellen sind»), sollte eine Eingabe von verschiedenen Fahrzeiten für die jeweiligen Fahrrichtungen ermöglicht werden.

Nicht nur die Haltezeiten in einem Intervall sollten eingeschränkt werden können, sondern auch die möglichen Versatzzeiten. Derzeit sind alle Versatzzeiten im Intervall von null bis zur Taktzeit zulässig. Gerade bei grossen Taktzeiten kann es aber durchaus vorkommen, dass gar nicht alle Versatzzeiten infrage kommen. Eine Einschränkung der Versatzzeiten würde nicht nur den Einsatz des Tools in der Praxis verbessern, sondern könnte auch die Berechnungszeit für die Optimierung deutlich verkleinern. Dies gilt insbesondere für Knoten mit grossen Taktzeiten, da an diesen die Anzahl der zu berechnenden Möglichkeiten verkleinert werden könnte.

Eine Möglichkeit für eine bessere Integration von Verstärkerkursen wäre, die Versatzzeit dieser Linien relativ zu derjenigen der Hauptlinie zu fixieren. So würden die Verstärkerkurse in einem fixen Abstand zur Hauptlinie verkehren. In einem weiteren Schritt könnte diese Fixierung in einem Intervall angegeben werden. Dies würde die Optimierung eines «Hinketaks» ermöglichen.

Eine grosse Erweiterung des Tools wäre die Möglichkeit, für jede ÖSPV-Linie mehr als einen Sekundärknoten zu definieren. Für diese Erweiterung müssten aber viele zusätzlich möglichen Eingabedaten und Konfigurationen zur Definition einer Linie beachtet werden (beispielsweise die Reihenfolge der Knoten, Fahrzeiten und die Definition der Wendehaltstellen). Darum ist es mit der derzeitigen Struktur der Methode und des Tools fraglich, ob diese Erweiterung sinnvoll umsetzbar ist.

Sensitivitätsanalyse

Als zusätzliche Analysemöglichkeit wäre eine Sensitivitätsanalyse sinnvoll, mit der aufgezeigt werden kann, wie stark sich die Änderungen einzelner Variablen auf das Gesamtergebn auswirken. Damit könnte aufgezeigt werden, bei welchen Linien es sich lohnt, das berechnete Optimum umzusetzen. So kann gewählt werden, ob die weiteren betrieblichen Aspekte mit viel Aufwand optimiert werden, um das berechnete Optimum zu erreichen oder ob es reicht, in einem gewissen Bereich zu bleiben, in dem betrieblich weniger angepasst werden muss.

Optimierungen des Algorithmus

Die Laufzeit des Codes der vollständigen Enumeration kann verkleinert werden. Dazu könnte der Code so optimiert werden, dass bei Linien, bei denen die Berechnung der Haltezeit im Sekundärknoten keinen Mehrwert bietet, nicht über die Haltezeiten am Sekundärknoten iteriert wird. Dies ist der Fall, wenn der Haupt- und der Sekundärknoten Wendehaltstellen sind.

Aktuell wird im Algorithmus bei der Wahl der Variablenkombination für die minimale Wartezeit die erste Kombination gewählt, wenn mehrere Minima auftreten. Weitere mögliche Minima werden nicht beachtet. Eine Möglichkeit zur Verbesserung des Algorithmus wäre es, diese ebenfalls zu berücksichtigen, da so weitere optimale Werte der Variablen möglich sind.

6.4. Schlussfolgerung

Mit der entwickelten Methode können die Anschlüsse von ÖSPV-Linien an Bahnknoten optimiert werden. Dabei werden die Besonderheiten des Schweizer Systems wie der Integrale Taktfahrplan und der fixe Bahnfahrplan berücksichtigt. Die entwickelte Methode berücksichtigt im Vergleich zu anderen Methoden nur wenige Faktoren bezüglich der betrieblichen Umsetzung. Aufgrund der Einfachheit lohnt sich die Anwendung auch bei kleinen Problemstellungen im Arbeitsalltag und nicht nur bei grossen Veränderungen oder Neuplanungen von ÖSPV-Netzen.

In der Praxis kann die Kalkulationstabelle für die Anschlussoptimierung von ÖSPV verwendet werden. Dabei kann jeweils je ÖSPV-Linie ein Sekundärknoten berücksichtigt werden, der frei gewählt werden kann. Das Tool ist userfreundlich und dient als Unterstützung zur Angebotsplanung, nicht als dessen Ersatz. Die Methode lässt sich noch erweitern, wodurch der Nutzen vergrössert werden könnte.

I. Verzeichnisse

I.I. Literaturverzeichnis

- [1] „Angebotsstrategie Stadtbus Winterthur.pdf“. [Online]. Verfügbar unter: <https://stadt.winterthur.ch/stadtbus/ueberuns/angebotsstrategie/angebotsstrategiebroschuere-2030/angebotsstrategie-stadtbus-winterthur.pdf/@@download/file/Angebotsstrategie%20Stadtbus%20Winterthur.pdf>. [Zugegriffen: 23. April 2022]
- [2] S. Gerber und T. Keller, „Persönliche Kommunikation“, April 2022.
- [3] F. Thoma, „Integraler Taktfahrplan (ITF) – von der Schweiz auf Deutschland übertragbar? » Zukunft Mobilität“, *Zukunft Mobilität*, 8. Januar 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/42868/analyse/integraler-taktfahrplan-itf-schweiz-deutschland-deutschlandtakt-umsetzbarkeit-konzept/>. [Zugegriffen: 26. April 2022]
- [4] „ETH - IVT - VS - Glossar“. [Online]. Verfügbar unter: <http://archiv.ivt.ethz.ch/oev/glossar/#top>. [Zugegriffen: 22. Februar 2022]
- [5] E. Hassane und E. A. Ahmed, „Optimization of Correspondence Times in Bus Network Zones, Modeling and Resolution by the Multi-agent Approach“, *J. Oper. Res. Soc. China*, Bd. 8, Nr. 3, S. 415–436, Sep. 2020, doi: 10.1007/s40305-020-00307-8.
- [6] I. Schüle, M. Schröder, und K.-H. Küfer, „Synchronization of regional public transport systems“, gehalten auf der WIT Transactions on the Built Environment, Juni 2009, Bd. 107, S. 301–311, doi: 10.2495/UT090271.
- [7] T. Liu, O. Cats, und K. Gkiotsalitis, „A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase“, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Bd. 133, S. 103450, Dez. 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103450.
- [8] X. Tian und H. Niu, „A dynamic programming approach to synchronize train timetables“, *Adv. Mech. Eng.*, Bd. 9, Nr. 6, S. 1687814017712364, Juni 2017, doi: 10.1177/1687814017712364.
- [9] Y. Shafahi und A. Khani, „A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions“, *Transp. Res. Part Policy Pract.*, Bd. 44, Nr. 6, S. 377–389, Juli 2010, doi: 10.1016/j.tra.2010.03.007.
- [10] „Erkennen und Lösen eines Problems mithilfe von Solver“. [Online]. Verfügbar unter: <https://support.microsoft.com/de-de/office/erkennen-und-l%C3%B6sen-eines-problems-mithilfe-von-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. [Zugegriffen: 14. Mai 2022]
- [11] „Using OpenSolver“, *OpenSolver for Excel*, 17. Mai 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://opensolver.org/using-opensolver/>. [Zugegriffen: 14. Mai 2022]
- [12] „Guide to Solvers“, *OpenSolver for Excel*, 15. Juni 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://opensolver.org/guide-to-solvers/>. [Zugegriffen: 14. Mai 2022]
- [13] „Excel Products“, *solver*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.solver.com/catalog/excel-products>. [Zugegriffen: 14. Mai 2022]
- [14] R. Wells, „Return Position of Element in VBA Array“, *wellsr.com*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wellsr.com/vba/2017/excel/return-position-of-element-in-vba-array/>. [Zugegriffen: 19. Mai 2022]
- [15] „Offizielles Kursbuch: Willkommen!“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fahrplanfelder.ch/de/willkommen.html>. [Zugegriffen: 4. Juni 2022]
- [16] „Abfahrtstabellen als PDF & Liniennetzpläne | SBB“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sbb.ch/de/fahrplan/online-fahrplan/pdf-fahrplaene/abfahrtsplakate.html>. [Zugegriffen: 4. Juni 2022]
- [17] „Fahrplan Schweiz - search.ch“. [Online]. Verfügbar unter: https://fahrplan.search.ch/?time=07%3A00&date=Mo+23.05.2022&time_type=arrival. [Zugegriffen: 4. Juni 2022]

I.II. Glossar

ÖV	Öffentlicher (Massentransport-)Verkehr (Bahn, Bus, Strassenbahn etc.)
ÖSPV	Öffentlicher Strassenpersonennahverkehr (Busse und Strassenbahnen)
TCDP	Transfer coordination design problem
MP	Mathematischer Programmierungsansatz (zur Lösung eines TCDP)
HK	Hauptknoten
SK	Sekundärknoten
VBA	Visual Basic for Applications (Skriptsprache in Microsoft Excel)
HVZ	Hauptverkehrszeit
NVZ	Nebenverkehrszeit

I.III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visualisierung des optimalen Anschlusses ÖSPV zu Bahn (oben) und Bahn zu ÖSPV (unten). Der grün markierte Kurs ist der Optimale, da so keine Wartezeit entsteht. Eigene Darstellung in Anlehnung an [6].....	11
Abbildung 2: Schematisches Vorgehen, das für die Integration jeder zusätzlichen Funktion erneut durchgeführt wurde. (Eigene Darstellung)	15
Abbildung 3: Schematische Darstellung von Durchmesserlinien am Hauptknoten. (Eigene Darstellung).....	18
Abbildung 4: Schematische Darstellung von Linien, die am Hauptknoten wenden. (Eigene Darstellung).....	19
Abbildung 5: Schematische Darstellung zur normalen Einbindung eines Sekundärknotens. (Eigene Darstellung).....	19
Abbildung 6: Schematische Darstellung zur Einbindung eines Sekundärknotens, wenn dieser gleichzeitig die Wendehaltestelle der Linie ist. (Eigene Darstellung).....	20
Abbildung 7: Schematische Darstellung zur Einbindung eines Sekundärknotens, wenn am Sekundär- und am Hauptknoten gewendet wird. (Eigene Darstellung)	21
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Integration des Sekundärknotens, wenn der Hauptknoten als Wendehaltestelle dient. (Eigene Darstellung).....	22
Abbildung 9: Prozessdiagramm zur Festlegung der Daten, die für die Gewichtung der Bahnankünfte und -abfahrten verwendet werden. (Eigene Darstellung)	23
Abbildung 10: Prozessdiagramm für die Festlegung von Priorisierungen. (Eigene Darstellung)	24
Abbildung 11: Prozessdiagramm zur Festlegung eines Malus aufgrund der Lastrichtung. (Eigene Darstellung).....	24
Abbildung 12: Die Parameter der Formel für $wbt\alpha\beta$, dargestellt in einem Zeitstrahl. (Eigene Darstellung).....	27
Abbildung 13: Die Parameter für die Formel $wttb\beta\alpha$, dargestellt in einem Zeitstrahl. (Eigene Darstellung).....	30
Abbildung 14: Die Summen der gewichteten Wartezeit und Steuerungselemente auf dem Blatt "Hauptblatt". (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	40
Abbildung 15: Auszug aus der Haupttabelle auf dem Blatt "Hauptblatt". Links befinden sich Infos zu den eingegebenen ÖSPV-Linien. In der Mitte ist der Eingabebereich für die Variablen der Optimierung (orange markiert). Rechts sind die Resultate der gewichteten Wartezeit des	

Hauptknotens, des Sekundärknotens und die jeweiligen Summen zu finden. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	40
Abbildung 16: Ausschnitt aus den Eingabedaten für den Hauptknoten. Ausgefüllt sind Daten des Knotens Winterthur in der Morgenspitzenstunde. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	42
Abbildung 17: Ausschnitt aus den Eingabedaten der Bahnlinien am Sekundärknoten. Dargestellt sind Daten des Knotens Oberwinterthur in der Morgenspitzenstunde. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	42
Abbildung 18: Eingabedaten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Winterthur. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	43
Abbildung 19: Eingabedaten der ÖSPV-Linien in Winterthur für die Definition der Sekundärknoten. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	43
Abbildung 20: Gliederung des Eingabebereichs des Blatts "Anschlusswahl". (Eigene Darstellung).....	45
Abbildung 21: Screenshot aus der Tabelle zur Berechnung der Ankunftszeit von 26 Kursen für den Hauptknoten im Blatt «Berechnungen». (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	46
Abbildung 22: Screenshot aus der Tabelle zur Berechnung der Wartezeiten ÖSPV zu Bahn im Blatt «Berechnungen». Die ersten zwei Zeilen beinhalten die Spaltenbezeichnungen für die Züge. Die restlichen Zeilen sind ÖSPV-Linien. Der Zahlenwert ist die Wartezeit in Minuten von der entsprechenden ÖSPV-Linie zum entsprechenden Zug. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	47
Abbildung 23: Screenshot aus der Tabelle zur Berechnung der Ankunftszeit von 26 Kursen für den Sekundärknoten im Blatt «Berechnungen». Grösster Unterschied zum Hauptknoten ist die benötigte Berechnung der relativen Ankunftszeit. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	48
Abbildung 24: Screenshot der Fortschrittsanzeige. Diese zeigt den Nutzenden den aktuellen Stand der Berechnung an. Es steht ein Button für den Abbruch des Vorganges zur Verfügung. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	51
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Matrix, die während des Algorithmus gefüllt wird. HK steht für Hauptknoten und SK für Sekundärknoten. (Eigene Darstellung).....	52
Abbildung 26: Screenshot der Bereiche Resultate sowie Analyse und Steuerung des Hauptblatts. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	55
Abbildung 27: Screenshot eines Ausschnitts aus dem Blatt "Wartezeiten SK". (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	56
Abbildung 28: Beispiel der Grafik für die Standzeiten am Hauptknoten. Die Standzeiten sind dargestellt im Intervall zwischen 60 und 120 Minuten. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	56
Abbildung 29: Beispiel eines Histogramms zur Verteilung der gewichteten Wartezeiten im optimierten Zustand. Auffällig ist die typisch rechtsschiefe Verteilung. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	57
Abbildung 30: Screenshot von 18 von 39 Zeilen der Eingabedaten des Bahnfahrplanes in Winterthur. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	60
Abbildung 31: Screenshot der Eingabedaten im Blatt "ÖSPV" für Winterthur. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	60
Abbildung 32: Screenshot der Eingabedaten für die Sekundärknoten der ÖSPV-Linien in Winterthur. Es gibt vier Sekundärknoten: Oberwinterthur (OWT), Winterthur Seen (WSEE), Winterthur Hegi (WHE) und Bassersdorf (BSD). Das «Nein» auf der letzten Zeile ist farblich markiert, da hier der Spezialfall genutzt wurde, um eine Linie ohne Sekundärknoten	

anzupassen und so der Sekundärknoten nicht vollständig definiert ist. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	61
Abbildung 33: Standzeiten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Winterthur in der HVZ vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. Darstellung im Intervall von 60 bis 120 Minuten. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	62
Abbildung 34: Histogramme der gewichteten Wartezeiten vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. (Eigene Darstellung).....	63
Abbildung 35: Screenshot der Eingabedaten des Bahnfahrplanes in Winterthur zwischen 23 und 24 Uhr. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	64
Abbildung 36: Screenshot der Eingabedaten im Blatt "ÖSPV" für Winterthur in der NVZ. (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	64
Abbildung 37: Screenshot der Eingabedaten für die Sekundärknoten der ÖSPV-Linien im Blatt "ÖSPV" für Winterthur in der NVZ. Wie in der HVZ gibt es vier Sekundärknoten: Oberwinterthur (OWT), Winterthur Seen (WSEE), Winterthur Hegi (WHE) und Bassersdorf (BSD). (Screenshot aus dem entwickelten Tool).....	65
Abbildung 38: Standzeiten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Winterthur zur NVZ vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. Darstellung im Intervall von 60 bis 120 Minuten. (Eigene Darstellung).....	66
Abbildung 39: Histogramme der gewichteten Wartezeiten vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. (Eigene Darstellung).....	67
Abbildung 40: Screenshot der Eingabedaten des Bahnfahrplanes in Wil. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	68
Abbildung 41: Screenshot der Eingabedaten im Blatt "ÖSPV" für Wil. (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	68
Abbildung 42: Screenshot eines Teils der Eingabedaten für die Sekundärknoten der ÖSPV-Linien im Blatt "ÖSPV" für Wil. Es gibt drei verschiedene Sekundärknoten: Weinfelden (WF), Uzwil (UZW) und Sirnach (SIR). (Screenshot aus dem entwickelten Tool)	69
Abbildung 43: Standzeiten der ÖSPV-Linien am Hauptknoten Wil vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. Darstellung im Intervall von 60 bis 120 Minuten. (Eigene Darstellung)	70
Abbildung 44: Histogramme der gewichteten Wartezeiten vor (oben) und nach (unten) der Optimierung. (Eigene Darstellung).....	71

II. Anhang

II.I. Aufgabenstellung

Das Ziel der Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, um die Anschlüsse des ÖSPV an beziehungsweise von der Bahn zu optimieren. Die Methode soll ermöglichen, die optimalen Ankunfts- und Abfahrtszeiten der ÖSPV-Linien zu definieren.

Bestandteile der Arbeit sind:

- Analyse des aktuellen Vorgehens und der Literatur
- Definition eines "optimalen Anschlusses"
- Definition für welche Kurse Anschlüsse angeboten werden sollen (abhängig von Takt, Fahrzeit, Zielort)
- Entwicklung einer Methode zur Optimierung der ÖSPV Anschlüsse
- Anwendung auf Bahnhof Winterthur
- Universelle Anwendbarkeit auf andere Bahnhöfe
- Entwicklung des Tools zur userfreundlichen Anwendung der Methode

II.II. Code des Makros «Werte nach unten kopieren»

```
Sub CopyOldData()
```

```
    Dim schutz As Integer 'Variable Schutz als Integer definieren
```

```
    schutz = 0 'Schutz = 0 setzen
```

```
    If ActiveSheet.ProtectContents = True Then 'Wenn Blatt geschützte Elemente enthält
```

```
        schutz = 1 'Schutz = 1 setzen
```

```
        ActiveSheet.Unprotect 'Blattschutz aufheben
```

```
    End If
```

```
    'Zellen der verschiedenen Bereiche kopieren und wieder einfügen (nur als Werte)
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("F6:H35").Copy
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("F46:H75").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("K6:L35").Copy
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("K46:L75").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("N6:O35").Copy
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("N46:O75").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("Q6:Q35").Copy
```

```
    Sheets("Hauptblatt").Range("Q46:Q75").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues
```

```
    If schutz = 1 Then
```

```
        ActiveSheet.Protect DrawingObjects:=True, Contents:=True, Scenarios:=True 'Blatt wieder schützen
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

II.III. Code des UserForm (Fortschrittsanzeige)

```
VERSION 5.00
Begin {C62A69F0-16DC-11CE-9E98-00AA00574A4F} UserForm1
  Caption      = "Fortschrittsanzeige"
  ClientHeight = 1296
  ClientLeft   = -336
  ClientTop    = -1284
  ClientWidth  = 3648
  OleObjectBlob = "UserForm1.frx":0000
  ShowModal    = 0 'False
  StartupPosition = 1 'Fenstermitte
End
Attribute VB_Name = "UserForm1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Private Sub CommandButton1_Click()
  StopVar = True 'Setze Abbruchbedingung auf True
  CommandButton1.Caption = "Abgebrochen"
End Sub
```

II.IV. Mathematisches Gesamtmodell

Das mathematische Gesamtmodell für die Berechnung der totalen gewichteten Wartezeit λ_{total} . Ohne Spezialfälle beim Haupt- und Sekundärknoten. Für diese siehe die detaillierte Beschreibung des mathematischen Modells in Kapitel 5.2. «Mathematisches Modell».

minimiere λ_{total}

$$\lambda_{total} = \lambda_H + \lambda_S$$

$$\begin{aligned} \lambda_H &= \lambda_{H_{b \rightarrow t}} + \lambda_{H_{t \rightarrow b}} \\ &= \sum_{\alpha \in i_H} \sum_{\beta \in n_H} CD_{\alpha\beta} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_{\alpha}}} \{wtbt_{\alpha\beta} = Dr_{\beta} + 60 - (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + s_{\alpha}) \mid wtbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \\ &\quad + \sum_{\alpha \in i_H} \sum_{\beta \in m_H} CA_{\beta\alpha} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120+T_{\alpha}}{T_{\alpha}}} \{wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + st_{\alpha}) - (At_{\beta} + 60 + s_{\alpha}) \mid wttb_{\beta\alpha} \geq 0\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_S &= \lambda_{S_{b \rightarrow t}} + \lambda_{S_{t \rightarrow b}} \\ &= \sum_{\alpha \in i_S} \sum_{\beta \in n_{S_x}} CD_{\alpha\beta} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120}{T_{\alpha}}} \{wtbt_{\alpha\beta} = Dt_{\beta} + 60 - (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + A_{rel_{\alpha}} + s_{S_{\alpha}}) \mid wtbt_{\alpha\beta} \geq 0\} \\ &\quad + \sum_{\alpha \in i_S} \sum_{\beta \in m_{S_x}} CA_{\beta\alpha} \cdot WD_{\beta} \cdot \min_{j=0,1,\dots,\frac{120+T_{\alpha}}{T_{\alpha}}} \{wttb_{\beta\alpha} = (Ab_{\alpha} + j \cdot T_{\alpha} + A_{rel_{\alpha}} + st_{S_{\alpha}}) - (At_{\beta} + 60 + s_{S_{\alpha}}) \mid wttb_{\beta\alpha} \geq 0\} \end{aligned}$$

Die relative Versatzzeit $A_{rel_{\alpha}}$ ergibt sich aus dem Input «vor» oder «nach» der ÖSPV-Linie α :

$$\text{Wenn "vor": } A_{rel_{\alpha}} = -t_{\alpha} - st_{S_{\alpha}}$$

$$\text{Wenn "nach": } A_{rel_{\alpha}} = st_{\alpha} + t_{\alpha}$$

Parameter:

i_H	Menge aller ÖSPV-Linien am Hauptknoten
i_S	Menge aller ÖSPV-Linien mit Sekundärknoten
x	Wahl des Sekundärknotens (gegeben durch ÖSPV-Linie α)
α	ÖSPV-Linie der Menge i_H oder i_S
T_α	Taktzeit der ÖSPV-Linie α
s_α	Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α
s_{S_α}	Wegzeit von/zu ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten
m_H	Menge aller ankommenden Züge am Hauptknoten
n_H	Menge aller abfahrenden Züge am Hauptknoten
m_{S_x}	Menge aller ankommenden Züge am Sekundärknoten x
n_{S_x}	Menge aller abfahrenden Züge am Sekundärknoten x
β	Zug der Menge m oder n bzw. m_{S_x} oder n_{S_x}
At_β	Ankunftsminute des Zugs β
Dt_β	Abfahrtsminute des Zugs β
$CD_{\alpha\beta}$	Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen von ÖSPV-Linie α zu Zug β
$CA_{\beta\alpha}$	Binärindikator zum Ausschluss einzelner Umsteigeverbindungen von Zug β zu ÖSPV-Linie α
WD_β	Gewichtung des Anschlusses an/von Zug β

Variable der inneren Minimierung:

j	Wievielter Kurs der ÖSPV-Linie α
-----	---

Variablen für Minimierung:

Ab_α	Versatzzeit der ÖSPV-Linie α
st_α	Haltezeit von ÖSPV-Linie α
st_{S_α}	Haltezeit von ÖSPV-Linie α am Sekundärknoten

Sonstige Variablen:

$\lambda_{H_{b \rightarrow t}}$	Gewichtete Wartezeit ÖSPV zu Zug
$\lambda_{H_{t \rightarrow b}}$	Gewichtete Wartezeit Zug zu ÖSPV
$\lambda_{S_{b \rightarrow t}}$	Gewichtete Wartezeit ÖSPV zu Zug am Sekundärknoten
$\lambda_{S_{t \rightarrow b}}$	Gewichtete Wartezeit Zug zu ÖSPV am Sekundärknoten
$wtb_{t_{\alpha\beta}}$	Wartezeit bei Umstieg von Kurs j der ÖSPV-Linie α zu Zug β
$wtt_{b_{\beta\alpha}}$	Wartezeit bei Umstieg von Zug β zu Kurs j der ÖSPV-Linie α

Die Nebenbedingungen lauten:

$$Ab_\alpha \leq T_\alpha$$

Die Versatzzeit Ab_α der ÖSPV-Linie α soll kleiner sein als die Taktzeit.

$$Ab_\alpha = int$$

Die Versatzzeit Ab_α der ÖSPV-Linie α soll eine ganzzahlige Zahl sein.

$$st_{\min\alpha} \leq st_\alpha \leq st_{\max\alpha}$$

Die Haltezeit st_α der ÖSPV-Linie α wird begrenzt durch die minimale Haltezeit $st_{\min\alpha}$ und die maximale Haltezeit $st_{\max\alpha}$.

$$st_{S\min\alpha} \leq st_{S\alpha} \leq st_{S\max\alpha}$$

Die Haltezeit $st_{S\alpha}$ der ÖSPV-Linie α pro Linie wird begrenzt durch die minimale Haltezeit $st_{S\min\alpha}$ und die maximale Haltezeit $st_{S\max\alpha}$.

$$st_\alpha = int$$

Die Haltezeit soll ganzzahlig sein

$$Ab_\alpha, st_\alpha, st_{S\alpha} \geq 0$$

Die Variablen Versatzzeit Ab_α und die Haltezeiten st_α und $st_{S\alpha}$ der ÖSPV-Linie α sollen grösser gleich null sein.